



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

DANIEL GURGEL PINHEIRO

**TRANSPORTE DE FRANGOS: MODIFICAÇÕES DO *LAYOUT* DA CARGA COMO
MÉTODO DE ATENUAÇÃO DO ESTRESSE TÉRMICO**

FORTALEZA

2019

DANIEL GURGEL PINHEIRO

TRANSPORTE DE FRANGOS: MODIFICAÇÕES DO *LAYOUT* DA CARGA COMO
MÉTODO DE ATENUAÇÃO DO ESTRESSE TÉRMICO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

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

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P718t Pinheiro, Daniel Gurgel.
Transporte de frangos: modificações do layout da carga como método de atenuação do estresse térmico /
Daniel Gurgel Pinheiro. – 2019.
88 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. José Antonio Delfino Barbosa Filho.

1. Estresse térmico. 2. Transporte de aves. 3. Frango de corte. 4. Layout da carga. I. Título.

CDD 630

DANIEL GURGEL PINHEIRO

TRANSPORTE DE FRANGOS: MODIFICAÇÕES DO *LAYOUT* DA CARGA COMO
MÉTODO DE ATENUAÇÃO DO ESTRESSE TÉRMICO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Aprovada em: 29/11/2019.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Iran José Oliveira da Silva
Universidade de São Paulo (USP)

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

Prof. Dr. Geraldo Luís Bezerra Ramalho
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Claus Franz Wehmann
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Maria Pinheiro Gurgel (*In memoriam*).

À Maria José Pinheiro (*In memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela proteção durante minha jornada nesta vida.

Aos meus maiores tesouros, Doris e João Pedro, minhas maiores fontes de inspiração; tudo que faço é por vocês.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará pela confiança e incentivo na realização desta pesquisa.

A Tijuca alimentos pela visão empreendedora de seus gestores por abrirem suas portas e contribuírem com o desenvolvimento do setor.

Ao Prof. Dr. José Antonio Delfino Barbosa Filho, pela orientação, amizade e conhecimentos transmitidos durante esta jornada.

Ao amigo Prof. Marcos Lemos (IFCE Campus Fortaleza), pela grande ajuda durante todo o doutorado.

Ao Prof. João Medeiros Tavares (IFCE Campus Fortaleza), pelo apoio incondicional durante a parte experimental desta pesquisa.

Ao Professor Dr. Claus Franz Wehmann (UFC – Departamento de Engenharia Mecânica) por acreditar na importância deste trabalho e ajuda nos ensaios em túnel de vento.

Ao Professor e amigo Dr. Geraldo Ramalho (IFCE Campus Fortaleza) pelas contribuições ao longo desta jornada.

Em especial, ao amigo Nítalo Machado (UFC – Departamento de Engenharia Agrícola) pela ajuda incondicional para enriquecer este trabalho.

RESUMO

O transporte de animais é um dos temas mais desafiadores na área de ambiência e bem-estar animal, tendo como problemática fundamental controlar os agentes estressores, a fim de propiciar um ambiente confortável para os animais. O estresse térmico causado pela ação conjunta da temperatura e da umidade relativa é o principal responsável pelas perdas durante o transporte de aves, ocasionando prejuízos aos produtores. Isso se dá em virtude do transporte, caracterizar-se pelo confinamento das aves em caixas, que são arrumadas na forma de uma carga prismática compacta, ao longo da carroceria de um caminhão, dificultando a circulação do vento em seu interior e como consequência surgem regiões de concentração de calor. Neste sentido, o propósito deste trabalho foi analisar como as mudanças no *layout* da carga, com a utilização de dispositivos para controlar o vento e dispositivos para descompactar a carga (espaçadores) podem contribuir em minimizar os efeitos do estresse térmico. Para isso foram utilizadas ferramentas de desenho e engenharia assistidos por computador; ferramentas de simulação fluidodinâmica; ensaios qualitativos e quantitativos em túnel de vento com modelos em escala reduzida e métodos de análise estatística. As informações obtidas foram intrigantes por mostrarem a complexidade e a interação das variáveis envolvidas na operação de transporte com a descompactação e a nova disposição das caixas ao longo da carga. De forma geral, a descompactação da carga contribuiu com o aumento da circulação de vento ao longo da carga. A disposição das caixas na posição longitudinal, o uso dos espaçadores e o maior distanciamento entre as fileiras das caixas mostrou as melhores condições de circulação do vento ao longo da carga. No entanto, percebe-se que modificar o *layout* não garante que o vento chegue até as aves, isto é, não garante que o vento circule no interior das caixas para que os mecanismos de troca térmicas funcionem de forma eficiente. Este resultado revela que o *design* da caixa de transporte deve ser modificado.

Palavras-chave: Estresse térmico. Transporte de aves. Frango de corte. *Layout* da carga.

ABSTRACT

Animal transportation is one of the most challenging topics in the area of animal ambience and well-being, which has, as the fundamental problem, the control of stressors in order to provide a comfortable environment for animals. The thermal stress caused by the combined action of temperature and relative humidity is the main responsible for losses during the transport of birds, causing losses to producers, as well. This is due to transportation issues, in its turn characterized by the confinement of birds in transport containers, which are arranged in the form of a compact prismatic load, along the body of a truck, making it difficult for wind to circulate inside. Therefore, regions of heat concentration usually take place. Thus, the purpose of this work was to analyse how changes in the load layout, with the use of devices to control the wind and devices to decompress the load (spacers) can contribute to minimize the effects of thermal stress. Computer-aided design and engineering tools were used, as well as fluid dynamics simulation tools; also, qualitative and quantitative tests in a wind tunnel with small scale models and statistically analysed methods. The information obtained was intriguing because it shows the complexity and the interaction of the variables involved in the transport operation, the unpacking and the new arrangement of the transport containers along the load. In general, the decompression of the load contributed to the increase of wind circulation throughout the load. The arrangement of the transport containers in the longitudinal position, the use of spacers and the greater distance between the rows of transport containers showed the best conditions for wind circulation throughout the load. However, it is clear that changing the layout does not guarantee that the wind will reach the birds, that is, it does not guarantee that the wind will circulate inside the transport containers so that the thermal exchange mechanisms can work efficiently. This result leads to the assumption that the design of the transport containers must be modified.

Keywords: Heat stress. Poultry transport. Broiler chicken. Load layout.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– As linhas de corrente (A) e escoamento permanente (B).....	20
Figura 2	– Coeficientes de arrastos para objetos bidimensionais (A) e tridimensionais (B).....	23
Figura 3	– Caixa de transporte das aves (A) e layout convencional (B).....	38
Figura 4	– Modelo virtual da caixa de transporte.....	39
Figura 5	– Projeções ortográficas da caixa de transporte.....	39
Figura 6	– Modelo virtual em perspectiva do espaçador.....	40
Figura 7	– Montagem dos espaçadores nas caixas de transporte.....	41
Figura 8	– Vistas ortográficas do captador de vento.....	41
Figura 9	– Vistas ortográficas do aerofólio.....	42
Figura 10	– Modelos virtuais das modificações de layouts avaliados.....	43
Figura 11	– Simplificações do modelo virtual feitas com o uso do software Solidworks	46
Figura 12	– Protótipo do veículo de transporte e carga para ensaio em túnel de vento....	47
Figura 13	– Ensaio quantitativo em túnel de vento da velocidade interna das caixas...	48
Figura 14	– Localização dos sensores na carga.....	49
Figura 15	– Simulações fluidodinâmicas com espaçadores de 50 mm, 100 mm e 150 mm.....	50
Figura 16	– Análise de tensão do espaçador.....	51
Figura 17	– Análise de deformação do espaçador.....	52
Figura 18	– Análise de tensão do coletor tipo coifa.....	53
Figura 19	– Simulação fluidodinâmica dos coletores tipo coifa e aerofólio.....	54
Figura 20	– Simulação fluidodinâmica do layout convencional (LA).....	55
Figura 21	– Simulação fluidodinâmica do layout alternativo (LB1).....	56
Figura 22	– Simulação fluidodinâmica do layout alternativo (LB2)	56

Figura 23 – Simulação fluidodinâmica do layout com espaçadores (LC1).....	57
Figura 24 – Simulação fluidodinâmica do layout com espaçadores (LC2).....	58
Figura 25 – Simulação fluidodinâmica do layout com espaçadores (LD1).....	59
Figura 26 – Simulação fluidodinâmica do layout com espaçadores (LD2).....	60
Figura 27 – Simulação fluidodinâmica do layout com espaçadores (LE).....	61
Figura 28 – Simulação fluidodinâmica do layout convencional sem fileira central (LF1)	61
Figura 29 – Simulação fluidodinâmica do layout convencional sem fileira central com espaçadores (LF2).....	62
Figura 30 – Simulação fluidodinâmica do layout convencional sem fileira central com aerofólio instalado (LG1).....	63
Figura 31 – Simulação fluidodinâmica do layout convencional sem fileira central com aerofólio instalado e espaçadores (LG2).....	64
Figura 32 – Ensaio em túnel de vento com marcação de linha de trajetória - layout LA..	65
Figura 33 – Ensaio em túnel de vento com marcação de linha de trajetória - layout LD2	65
Figura 34 – Ensaio em túnel de vento com marcação de linha de trajetória - layout LE.	66
Figura 35 – Ensaio em túnel de vento com marcação de linha de trajetória - layout LE com aerofólio.....	67
Figura 36 – Boxplot VIC em função do tipo de layout para o ensaio com velocidade de 10 m s^{-1}	69
Figura 37 – Boxplot VIC em função do tipo de layout para o ensaio com velocidade de 15 m s^{-1}	69
Figura 38 – Boxplot VIC em função do tipo de layout para o ensaio com velocidade de 20 m s^{-1}	70
Figura 39 – Boxplot VIC em função do tipo de layout para o ensaio com velocidade de 30 m s^{-1}	71
Figura 40 – Comparação das médias da velocidade interna das caixas em função do <i>layout</i>	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Classificação dos intervalos de IEC para frangos de corte na sexta semana...	15
Tabela 2	– Valores experimentais do coeficiente de calor por convecção.....	25
Tabela 3	– Classificação dos processos de prototipagem rápida.....	31
Tabela 4	– Classificação dos túneis de vento.....	36
Tabela 5	– Resumo dos modelos virtuais a serem analisados pela simulação fluidodinâmica.....	45
Tabela 6	– Resultados da força de arrasto e sustentação dos dispositivos de captação de vento.....	53
Tabela 7	– Estatística descritiva da velocidade interna das caixas de transporte nos ensaios em túnel de vento.....	68
Tabela 8	– Teste de normalidade dos valores de velocidade interna das caixas.....	71
Tabela 9	– Análise de variância das médias da velocidade interna do interior das caixas em função do <i>layout</i>	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Avicultura e bem-estar animal	13
2.2	Transporte de frangos vivos	16
2.3	Escoamento de ar sobre corpos imersos	19
2.3.1	<i>Fundamentos de mecânica dos fluidos</i>	19
2.4	Transferência de calor por convecção	24
2.5	Transferência de massa por convecção	27
2.6	Dinâmica de fluidos computacional	28
2.7	Prototipagem rápida	30
2.7.1	<i>Desenho e engenharia assistido por computador (CAD/CAE)</i>	33
2.8	Ensaio em túnel de vento	34
3	MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1	Estudo da logística de transporte	37
3.2	Modelamento com o uso de ferramentas CAD	38
3.3	Simulação computacional	45
3.4	Ensaio em túnel de vento	46
3.5	Análise estatística	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Projeto dos espaçadores, coletor e aerofólio	50
4.2	Dispositivos de captação de vento	52
4.3	Simulação computacional	54
4.4	Ensaio em túnel de vento	64
4.4.1	<i>Ensaio de marcação de linha de trajetória</i>	64
4.4.2	<i>Ensaio da ventilação interna nas caixas</i>	67
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
6	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa uma posição de destaque na produção de carne de frango, o sucesso do setor avícola brasileiro pode ser explicado pela excelência tecnológica em genética, manejo e ambientes que garantam elevados saltos produtivos. Além de atender a grande demanda por proteína animal, os produtores devem estar sempre atentos também às mudanças e exigências dos consumidores.

O consumidor sabe que o animal criado em um ambiente confortável resultará em um produto de melhor qualidade. Os consumidores atuais exigem que os animais sejam tratados com respeito e não como um produto de prateleira. O bem-estar animal já vem sendo discutido e exigido mundialmente, os produtores devem abraçar esta oportunidade para otimizar a produção, minimizar perdas e aumentar seus lucros.

Dentre as operações do ciclo de produção de frango de corte, o transporte das aves até o abatedouro tem sido identificado como um dos pontos críticos. As perdas contabilizadas decorrentes das operações pré-abate são chamadas de mortes na chegada ou *Dead on Arrivals* (DOA's) e representam um grande desafio para os produtores devido as dificuldades de se descobrir sua origem para controlar e minimizar os prejuízos. Durante o transporte o microclima da carga poderá se tornar extremamente desconfortável para as aves, além de ser um desafio para os pesquisadores da área de ambiência animal devido a complexidade de se controlar a temperatura e a umidade relativa ao longo da carga.

A interação de múltiplas variáveis durante o transporte das aves poderá resultar em um ambiente desconfortável e letal. Além da temperatura e da umidade relativa, pressupõe-se que a caixa de transporte e o *layout* da carga influenciam diretamente no microclima durante o trajeto da viagem. As aves são transportadas em caixas existentes no mercado que atendem, basicamente, a um padrão geométrico e dimensional. O *design* da caixa e a alta densidade de aves transportada impede as aves de expressarem movimentos naturais para minimizar os efeitos do estresse térmico.

O formato retangular das caixas convencionais de transporte de aves existentes no mercado facilita o empilhamento das mesmas. As caixas são arranjadas em colunas distribuídas em fileiras ao longo da carroceria do caminhão, assumindo o formato de um prisma quadrangular, caracterizando o *layout* mais utilizado (convencional), que dificulta a circulação do ar (vento) ao longo da carga criando regiões de concentração de calor e umidade relativa (bolsões de calor), que agravam os efeitos do estresse térmico durante o trajeto da viagem.

Descompactar a carga pode ser uma solução viável para minimizar as perdas

durante o transporte, pois o aumento do fluxo de ar entre as caixas e ao longo da carga, além de favorecer os processos de troca térmica das aves, poderá contribuir com a redução da umidade relativa na carga.

Partindo da premissa que a avicultura de corte brasileira necessita inovação em seus processos de manejo, principalmente durante a operação de transporte, devido a elevada quantidade de perdas, este trabalho tem como principal objetivo avaliar se modificar o *layout* da carga contribui para atenuar o estresse térmico, bem como:

- Projetar dispositivos para descompactar e direcionar o vento para o interior da carga;
- Analisar o perfil de ventilação dos *layouts* propostos através da simulação computacional de fluidos (CFD);
- Analisar o comportamento do vento com o uso de protótipos em túnel de vento;
- Medir a velocidade do vento no interior das caixas (protótipos) em túnel de vento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Avicultura e bem-estar animal

A avicultura é um dos principais segmentos do setor agropecuário em todo mundo, contribuindo significativamente para segurança e soberania alimentar da humanidade e para a geração de emprego e renda. Dados da *Foreign Agricultural Service* (USDA) estimam que a produção mundial de frangos de corte chegou a 44.649.716 toneladas de carne em 2018, sendo o Brasil o principal exportador e o terceiro produtor mundial (APBA, 2014).

Estima-se que a avicultura representa cerca de 1,5% do PIB brasileiro, gerando 3,5 milhões de empregos diretos e indiretos (APBA, 2014). Nesse contexto, um dos pontos mais complexos envolvidos no processo de produção de frangos relaciona-se as práticas de manejo que garantam o bem-estar dos animais. Tal concepção pode ser definida como um estado de completa saúde física e mental, em que o animal está em harmonia com o ambiente (TANNENBAUM, 1991), e pela capacidade de se adaptar ao meio ambiente (BROOM, 1986).

A visão do Código Sanitário dos Animais Terrestres da *World Organisation for Animal Health* - OIE (2016), sobre o significado do bem-estar animal, aborda como o animal lida com as condições do ambiente onde ele habita. Um bom estado de bem-estar, indicado por evidências científicas, ocorre quando o animal está saudável, confortável, bem nutrido, seguro, capaz de expressar seu comportamento natural e não está sofrendo de sensações desagradáveis de dor, medo e angústia. (WORLD ORGANIZATION FOR ANIMAL HEALTH, 2017).

Do ponto de vista prático, a elucidação do respeito ao bem-estar animal, pelas práticas de manejo e instalações e equipamentos utilizados durante todo o ciclo produtivo, pode ser obtida por meio dos princípios das liberdades apresentadas pelos teóricos do bem-estar animal (WEBSTER *et al.*, 1993), que residem no conceito das Cinco Liberdades, apresentado pela primeira vez no Relatório de Brambell, na Grã-Bretanha. Estas "liberdades" foram depois adaptadas pelo *Farm Animal Welfare Council* (FAWC, 2009), a saber:

1. Livres de fome e sede: aspecto relacionado à liberdade nutricional, que diz respeito ao fornecimento de uma dieta satisfatória, apropriada e segura.
2. Livres de dor, sofrimento e doenças: concepção que envolve a liberdade sanitária, a ausência de problemas de saúde, tais como doença, e ferimentos.
3. Livres de desconforto: aspecto relacionado à liberdade ambiental, que inclui, entre outras coisas, instalações adequadas onde os animais são mantidos.

4. Livres para expressar seu próprio comportamento natural: refere-se à possibilidade de expressar seu comportamento natural, quando o animal se desenvolve sem prejuízo psicológico ou físico.

5. Livres de medo e angústia: diz respeito à liberdade psicológica em todo ciclo produtivo, especialmente quanto ao manejo da fazenda, no processo de pré-abate ou antes da eutanásia.

Leis que regulamentem condições mínimas de bem-estar na criação de aves são importantes para uma produção sustentável. Porém, apesar da importância da avicultura para a economia do Brasil, a regulamentação de leis que garantam o bem-estar das aves é escassa e atende apenas a uma imposição de compradores internacionais (VAN HORNE; BONDT, 2013). No cenário de exportação, devido a uma pressão do mercado consumidor internacional, uma série de normas devem ser atendidas para que os produtores brasileiros possam comercializar seus produtos (SILVA *et al.*, 2011; SANTOS *et al.*, 2015).

Nesse contexto, um dos pontos mais complexos envolvidos no bem-estar animal das aves é o conforto térmico desses animais, pois as aves são animais homeotérmicos, ou seja, sua temperatura interna permanece constante por um sistema termorregulador, que controla a redução ou o aumento das perdas de calor por meio de mecanismos fisiológicos e comportamentais (MACARI; FURLAN; GONZALES, 2002).

Os principais mecanismos de transferência de calor das aves são a radiação, a convecção e a evaporação, este último exclusivo no processo de ofegação (respiração), uma vez que as aves não possuem glândulas sudoríparas, além de serem altamente sensíveis à elevada saturação do ambiente (HILLMAN; SCOTT; VAN TIENHOVEN, 1985). Portanto, condições de elevada umidade relativa do ambiente podem tornar a via evaporativa praticamente ineficiente, cortando a principal via de trocas térmicas das aves (RUI; SOUZA; SILVA, 2011).

As aves devem estar em um ambiente de conforto térmico, compreendido como zona de termo neutralidade ou zona termo neutra, que varia conforme a idade do animal (BARBOSA-FILHO, 2008; HILLMAN, SCOTT; VAN TIENHOVEN, 1985; MACARI; FURLAN; GONZALES, 2002). Alguns autores, como Macari e Furlan (2001) estipulam valores ou faixas de temperatura (21 – 24 °C) e umidade relativa (55 – 65%) para definir a zona de conforto térmico. Contudo, normalmente a zona ou intervalo de conforto é classificada por índices de conforto térmico.

Na literatura encontra-se vários índices de conforto térmico, como o índice de temperatura e umidade (ITU), proposto por Thom (1958), o índice de temperatura e umidade

de globo negro (ITGU), proposto por Buffington *et al.* (1981), e o Índice Entalpia de Conforto (IEC), proposto por Rodrigues *et al.* (2011).

Nos experimentos com frangos de corte o IEC tem sido proposto como o mais adequado por quantificar a energia no ambiente (energia do ar seco), equação 1 e, especialmente, por possuir intervalos específicos propostos por Barbosa-Filho, (2008), apresentados na Tabela 1.

$$IEC = 1.006.tbs + \frac{UR}{P_b} \cdot 10^{7.5tbs(237.3 + tbs)^{-1}} \cdot (71.28 + 0.052 tbs) \quad (1)$$

Onde:

IEC é a entalpia (kJ/kg ar seco);

t é a temperatura de bulbo seco do ar (°C);

UR é a umidade relativa (%);

P_b é a pressão barométrica local (mmHg).

Tabela 1 - Classificação dos intervalos de IEC para frangos de corte na sexta semana

Varição de Entalpia (Kj kg de ar seco ⁻¹)	Classificação	Tabela de Entalpia
37,4 – 52,1	Conforto	Verde
52,2 – 63,0	Alerta	Amarelo
63,1 – 72,6	Crítico	Laranja
72,7 – 106,0	Letal	Vermelho

Fonte: Queiroz, Barbosa Filho e Vieira (2012).

A Tabela 1 apresenta os limites de IEC que representam uma situação de conforto, alerta, crítica e letal para frangos de corte na sexta semana. A classificação ainda propõe uma abordagem didática pela sinonímia dos critérios de classificação por cores, tornando a interpretação do IEC mais clara. Pesquisas utilizaram o IEC para caracterizar a condição ambiental em experimentos com frangos de corte (BARBOSA-FILHO *et al.*, 2009; QUERIOZ *et al.*, 2017) e codornas (LIMA *et al.*, 2019).

Nos últimos anos, percebe-se grandes avanços no emprego de tecnologias no sistema de produção de frangos de corte no Brasil (RODRIGUES *et al.*, 2014). O sistema intensivo de criação vem sendo adotado pela maioria dos produtores, com tecnologias de controle ambiental, visando fornecer condições ideais para as aves expressarem o máximo do seu potencial genético e obterem o máximo de peso até o abate. Porém, existem algumas lacunas negligenciadas, as quais estão relacionadas ao manejo do preparo dos animais na granja

até momentos antes do abate, denominadas operações de pré-abate (RUI; SOUZA; SILVA, 2011; SANTOS *et al.*, 2015).

Estudos e ações que forneçam informações para o manejo adequado no pré-abate, a fim de garantir o bem-estar das aves, são importantes por aumentar a qualidade do produto final (carne e ovos) (RUI; SOUZA; SILVA, 2011; SPURIO *et al.*, 2015) e reduzir as perdas econômicas ocorridas por lesões e mortalidade (BARBOSA FILHO *et al.*, 2009; TREVINO; RYAN, 1993; WEBSTER; KETTLEWELL *et al.*, 2001) e características indesejáveis da carne (MULLER; PASCHOAL; SANTOS, 2012). Portanto, inovações tecnológicas são necessárias, especialmente quanto à operação de transporte (WEEKS, 2014).

2.2 Transporte de frangos vivos

A operação de transporte de frangos vivos tem sido um dos grandes entraves da avicultura. Segundo a *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2008), estima-se que há, em média uma perda de 0,2% por operação de transporte. Embora pareça pouco, ao realizar um exercício mental e imaginar a quantidade de transportes realizados anualmente, pode-se compreender a real situação de danos econômicos ao setor, ocorridos principalmente pelas DOA's.

Existem vários fatores potencialmente estressantes envolvidos na operação de transporte, como distância, alterações abruptas de velocidade, vibração, impactos, tempo de jejum, mistura social, ruídos, microambiente térmico, turno de transporte entre outros (BARBOSA FILHO *et al.*, 2009; FAUCITANO; GOUMON, 2014; KETTLEWELL *et al.*, 2001; SILVA *et al.*, 2011; SCHWARTZKOPF-GENSWEIN *et al.*, 2012; SOMMAVILLA *et al.*, 2017; WARRIS *et al.*, 1990). Normalmente, as perdas por mortalidade podem ultrapassar 1%, sendo que 40% das perdas são em função do estresse térmico durante o transporte (RITZ, 2003).

Os primeiros questionamentos sobre as condições da operação de transporte de aves datam do final da década de 80 (CASHMAN; NICOL; JONES, 1989; KETTLEWELL; TURNER, 1985). As primeiras pesquisas foram realizadas na década de 90, concentração na caracterização ambiental durante o transporte (KETTLEWELL; MORAN, 1990; MITCHELL *et al.*, 1990), no manuseio e captura das aves (NICOL; SCOTT, 1990) e indicadores de estresse fisiológico das aves (MITCHELL, KETTLEWELL; MAXWELL, 1992).

Os principais relatos associando pontos de maior desconforto, elevados valores de temperatura e umidade relativa do ar com as DOAS's datam do final da década de 90

(HUNTER; MITCHELL; MATHEU, 1997; HUNTER; MITCHELL; CARLISLE, 1999; MITCHELL; KETTLEWELL, 1998), o que foi possível pela caracterização tridimensional da carga de caminhões comerciais de transporte de frangos (KETTLEWELL; MITCHELL, 1993), que revelou uma grande heterogeneidade de distribuição de calor na carga, que foi pouco tempo depois relacionada à produção de calor metabólico pelas aves durante o transporte, criando gradientes térmicos entre as caixas de transporte e o meio externo (MITCHELL; KETTLEWELL, 1994).

Os pontos de maior concentração de carga térmica da carga do caminhão coincidem exatamente com os pontos de maior DOA's (HUNTER; MITCHELL; MATHEU, 1997; MITCHELL; KETTLEWELL, 1998), sugerindo que a distribuição da mortalidade não é aleatória e corresponde exatamente aos pontos com a presença de “núcleos térmicos” (KETTLEWELL; MITCHELL, 1993; KETTLEWELL; MITCHELL; MEEHAN, 1993; MITCHELL *et al.*, 1992) ou “bolsões de calor” (BARBOSA FILHO *et al.*, 2009), formados pela baixa ventilação, resultando em locais de alta carga térmica e umidade relativa.

A busca por melhores condições de bem-estar animal e redução das perdas produtivas durante a operação de transporte fazem com que produtores e transportadoras busquem alternativas para atenuação do estresse térmico, como o transporte em períodos mais amenos do dia (BARBOSA FILHO *et al.*, 2009), o molhamento da carga (RUI; SOUZA; SILVA, 2011), técnicas de nebulização (PEREIRA *et al.*, 2018) e a alteração no arranjo das caixas (*layout*) de transporte da carga (SPURIO *et al.*, 2015).

Uma outra estratégia é utilizar uma baixa densidade de animais na caixa de transporte, porém corresponde a uma redução significativa na eficiência da logística da granja, aumentando os custos pelo maior número de viagens até o abatedouro. Alguns autores recomendam que a caixa possua até 22 kg (NÄÄS, 2008), outros entre 21 a 23 kg/caixa (ROSA *et al.*, 2012), o que normalmente corresponde a 8 aves por caixa de transporte (PINHEIRO, 2015).

Considerando o elevado fluxo de transporte, dificilmente a demanda é alcançada somente no intervalo de períodos mais amenos do dia, sendo comum observar operações de transporte efetuadas no período de maior incidência térmica ($\pm 14h00$). O molhamento da carga e o uso da nebulização podem saturar o ambiente, afetando o sistema de trocas térmicas das aves e, conseqüentemente, comprometendo as condições de conforto térmico e bem-estar, podendo resultar no estresse por frio (hipotermia), quando realizado sem critérios (BARBOSA FILHO, *et al.*, 2009; RUI; SOUZA; SILVA, 2011), ou mesmo ser ineficiente no controle do estresse térmico por ter um efeito temporário (PINHEIRO, 2015).

No entanto, modificar o *layout* pode ser uma alternativa promissora. Normalmente, o transporte de frangos é realizado em caixas com um padrão geométrico retangular, utilizado como padrão convencional de *layout*, em que as caixas são empilhadas na carroceria do caminhão em colunas e fileiras, que assumem o formato de um prisma retangular. Porém, alguns produtores seccionam a carga em duas partes, a partir da retirada de algumas colunas, para criar um espaço central vazio (Nordeste), ou aumentam os espaços entre as fileiras da carga (Sul/Sudeste), na tentativa de melhorar o microambiente da carga

Spurio *et al.*, (2015) avaliaram o transporte de frangos vivos em quatro condições: *layout* convencional e um *layout* protótipo - um canal de 10 cm entre as fileiras da caixa dotado de estruturas em pontos específicos para canalizar o ar a pontos mais críticos de ventilação, com e sem o molhamento da carga. Os autores constataram uma redução ($P < 0.05$) da ocorrência de carne PSE em 66,3% e 49,6% com e sem o molhamento da carga, respectivamente, no *layout* protótipo.

Durante o transporte de frango, o principal mecanismo de troca térmica é a convecção, um mecanismo que ocorre devido ao contato de um fluido em movimento e uma superfície (BERGMAN *et al.*, 2014). Portanto, a caracterização da ventilação da carga apresenta-se como um importante parâmetro para identificar problemas no bem-estar animal, por promover a renovação de ar, removendo a umidade relativa (BROWN *et al.*, 2011).

A maioria dos estudos anteriores concentrou-se no transporte em escala real com o objetivo de medir as distribuições de pressão de superfície durante o trânsito, realizada pelo *Silsoe Research Institute*, em 1996 (BAKER *et al.*, 1996; DALLEY *et al.*, 1996; HOXEY *et al.*, 1996). Na tentativa de quantificar diretamente a ventilação, Purswell *et al.*, (2006) investigaram as taxas de troca de ar durante o transporte de cavalos. O reboque tinha 9,1 m de comprimento e um volume vazio de 41,5 m. A ventilação foi limitada na frente do trailer, que é protegida da corrente livre pela cabine do caminhão.

Recentemente, a simulação computacional baseada na dinâmica de fluídos computacional (CFD), tem sido considerada uma ferramenta poderosa nas investigações relacionadas às trocas térmicas por convecção dos animais (GILKESON *et al.*, 2016; NORTON; KETTLEWELL; MITCHELL, 2013; SEEDORF; SCHMIDT, 2017). A utilização de CFD e o uso de modelos em escala reduzida, em ensaios em túnel de vento em projetos ou para análise de problemas, tem aumentado cada vez mais em virtude da redução de custos, do aumento na performance dos processadores e dos avanços dos *softwares* de simulação computacional (WEHMANN *et al.*, 2018).

A elucidação da dinâmica e padrões de ventilação na carga forneceria informações

pontuais sobre a formação dos “bolsões de calor” e, conseqüentemente, sobre as DOA’s. A utilização de CFD e modelos em escala reduzida constituem em um arranjo experimental oportuno na avaliação de diferentes arranjos de *layouts*, podendo fornecer informações detalhadas sobre os padrões de ventilação da carga e auxiliar no desenvolvimento de tecnologias aplicáveis (GILKESON *et al.*, 2009; 2016).

2.3 Escoamento de ar sobre corpos imersos

2.3.1 Fundamentos de mecânica dos fluidos

A mecânica dos fluidos é a parte da mecânica que estuda o comportamento dos líquidos e gases, tanto em repouso, quanto em movimento. Fluido, pela definição clássica, é uma substância que se deforma de forma contínua quando submetida a uma força tangencial (tensão de cisalhamento). Outra característica dos fluidos é que não podem sustentar a tensão de cisalhamento quando em repouso (MUNSON; YONG; OKIISHI, 1990).

Os autores ainda ressaltam a contribuição do estudo da mecânica dos fluidos para o desenvolvimento de máquinas hidráulicas mais eficientes, o desenvolvimento de veículos terrestres mais econômicos, aeronaves mais rápidas e a geração de energia.

Diante da definição, pode-se diferenciar uma substância sólida de um fluido pela facilidade de deformação. Geralmente, os sólidos não se deformam com facilidade, enquanto um fluido é facilmente deformável. A deformação de um sólido depende do seu módulo de rigidez, enquanto a de um fluido depende da sua viscosidade. Assim, conceitualmente, os sólidos possuem elasticidade e os fluidos possuem viscosidade.

A viscosidade é uma propriedade importante na dinâmica dos fluidos e pode ser definida como o atrito interno resultante do movimento de uma camada de fluido em relação a outra. Os fluidos que apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e sua deformidade são chamados de fluidos newtonianos; os fluidos em que a tensão de cisalhamento não for diretamente proporcional à taxa de deformação são classificados como não newtonianos (FOX, PRITCHARD; MCDONALD, 2014; MUNSON; YONG; OKIISHI, 1990).

A análise quantitativa do comportamento dinâmico dos fluidos envolve as leis fundamentais da mecânica e da física: leis do movimento de Newton, a primeira e a segunda leis da termodinâmica, e o princípio da quantidade do movimento angular (FOX, PRITCHARD; MCDONALD, 2014; MUNSON; YONG; OKIISHI, 1990).

O escoamento dos fluidos é bastante complexo e para a visualização do campo de escoamento são utilizados os métodos das linhas de corrente, linhas de emissão e trajetória

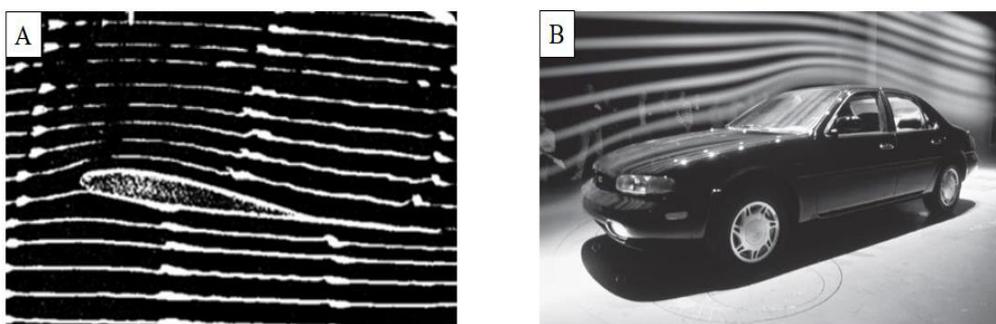
(FOX, PRITCHARD; MCDONALD, 2014; MUNSON; YONG; OKIISHI, 1990). O interesse na visualização dos perfis de velocidade durante o escoamento dos fluidos levou ao desenvolvimento de várias técnicas para a solução de problemas relacionados com a movimentação de fluido (MERZKIRCH, 2012).

As linhas de corrente são utilizadas no estudo analítico do escoamento. O fluxo se torna visível devido à introdução de fumaça, geralmente de gelo seco (Figura 1 A). Ressalta-se que, durante o regime de escoamento permanente as linhas de corrente são fixas no espaço, o que não se observa no regime transitório. As linhas de emissão são utilizadas experimentalmente e consistem de todas as partículas do fluido que durante o escoamento passam por um determinado ponto.

A trajetória também é um método experimental e consiste em uma linha traçada por uma determinada partícula do fluido, que escoar de um ponto para o outro, isto é, é o caminho real percorrido por uma determinada partícula de fluido (MARTINEZ; ZUFFO, 1995; WHITE, 2018). No escoamento em regime permanente, as linhas de corrente, emissão e a trajetória são idênticas.

A Figura 1B mostra um exemplo de escoamento permanente, em que as linhas de corrente, emissão e trajetória são coincidentes. As cinco linhas iniciais, a contar a partir da superfície do carro, representam as linhas de emissão; a visualização do campo de escoamento do ar sobre a estrutura do carro é de fundamental importância para o desenvolvimento de *designs* para aerodinâmicos.

Figura 1 - As linhas de corrente (A) e escoamento permanente (B)



Fonte: (A) Studart e Dahmen (2006) e (B) Fox, Pritchard e McDonald (2014).

A variação da massa específica é outra característica que deve ser observada no escoamento de fluido, pois fluidos em que a variação da massa específica é desprezível e são denominados de incompressíveis (comuns no escoamento de líquidos); em se tratando do escoamento de gases, as variações da massa específica são significativas e os fluidos são

denominados compressíveis.

Para o escoamento de fluidos em dutos ou em corpos imersos, a razão entre as forças de inércia e viscosas são de extrema importância. O número adimensional de Reynolds (Equação 2) é utilizado para classificar o escoamento em laminar e turbulento (ASHARAE, 2009).

$$\text{Re} = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2)$$

Onde:

ρ é a massa específica do fluido e μ é a viscosidade do fluido;

V é a velocidade do escoamento,

L é o comprimento característico do escoamento.

Analisando a Equação 2, se o valor do número de Reynolds for grande, os efeitos viscosos são desprezíveis, e se o valor do número de Reynolds for pequeno, os efeitos da viscosidade serão dominantes.

Para Fox, Pritchard e McDonald (2014), o escoamento em que as partículas fluidas se movimentam em camadas lisas ou lâminas são classificados como laminar, diferentemente do escoamento turbulento, em que as partículas rapidamente se misturam devido a perturbações em seu campo de velocidade.

No escoamento laminar, as partículas do fluido se movem ao longo de trajetórias bem definidas, preservando suas características. O escoamento laminar ocorre, geralmente, em baixas velocidades e em fluidos que apresentam alta viscosidade. No escoamento turbulento, as partículas do fluido descrevem trajetórias irregulares, com movimentos aleatórios, ocorrendo, geralmente, em fluidos de baixa viscosidade.

A definição das faixas do número de Reynolds que indicam se o escoamento será laminar ou turbulento não é um consenso entre os pesquisadores, pois a transição entre laminar e turbulento dependerá das perturbações do campo de velocidade durante o escoamento (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2014; MUNSON; YONG; WHITE, 2018; OKIISHI, 1990). Munson *et al.* (2009), utilizam os seguintes valores de Reynolds para classificar os escoamentos em condutos (tubos): $\text{Re} < 2100$ (laminar); $\text{Re} > 4000$ (turbulento) e $2100 < \text{Re} < 4000$ (transição).

É necessário o conhecimento das influências mecânicas do ar durante seu escoamento ao redor dos dispositivos (escoamento de corpos imersos) para o desenvolvimento dos dispositivos de atenuação de estresse térmico durante o transporte de frango. Munson *et al.* (2009) definem a análise dos escoamentos externos de fluidos (ar) como aerodinâmicos, e

ressaltam sua importância para a construção de aeronaves, veículos terrestres e edifícios.

Dessa forma, torna-se importante conhecer as forças que atuam nos corpos imersos em um fluido. No caso do transporte de frangos, o fluido está estacionário enquanto o veículo se movimenta. Segundo Munson *et al.* (2009), quando um corpo se move através de um fluido, ocorrem interações entre o fluido e a superfície do corpo.

As interações são provenientes das forças de cisalhamento, oriundo dos efeitos viscosos, e da tensão normal, devido ao gradiente de pressão. A componente da força resultante que atua na direção do escoamento é denominada de arrasto, *drag* (D), e a que atua na direção normal ao escoamento é denominada de sustentação, *lift* (L) (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2014; OKIISHI, 1990; MUNSON; YONG; WHITE, 2009).

As Equações 3 e 4 mostram o cálculo do arrasto e da sustentação.

$$D = \int p \cos \theta \, dA + \int \tau \sin \theta \, dA \quad (3)$$

$$L = - \int p \sin \theta \, dA + \int \tau \cos \theta \, dA \quad (4)$$

Onde p e τ são a força de pressão e de cisalhamento, respectivamente. O ângulo θ depende da geometria do corpo.

Fox e colaboradores concordam que o conhecimento dos perfis da distribuição do gradiente de pressão e da tensão de cisalhamento é bastante complexo e, como alternativa para o cálculo da influência das forças viscosas e de pressão, faz-se o uso de números adimensionais, coeficiente de arrasto, C_D , e o coeficiente de sustentação, C_L (equações 5 e 6).

$$C_D = \frac{D}{0,5 \rho U^2 A} \quad (5)$$

$$C_L = \frac{L}{0,5 \rho U^2 A} \quad (6)$$

Onde:

D é o arrasto;

L é a sustentação;

ρ é a massa do fluido;

A é a área total da superfície em contato com o fluido (característica do objeto);

U é a velocidade do escoamento.

Muitas informações sobre o coeficiente de arrasto podem ser encontradas na literatura sobre escoamentos viscosos e incompressíveis em corpos imersos. O coeficiente de arrasto é calculado experimentalmente, no entanto, há ábacos e tabelas com os valores dos coeficientes de arrasto típicos de objetos bidimensionais e tridimensionais em função do número de Reynolds.

A Figura 2 mostram os valores do coeficiente de arrasto típico para objetos

bidimensionais e tridimensionais, respectivamente, em função da área de contato do comportamento do escoamento (número de Reynolds). As setas indicam o sentido do fluxo sobre o objeto.

Figura 2 - Coeficientes de arrastos para objetos bidimensionais (A) e tridimensionais (B)

A	Forma	Área de Referência A (b = comprimento)	Coefficiente de arrasto $C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A}$	Número de Reynolds $Re = UD\rho/\mu$
	Barra quadrada com cantos arredondados	$A = bD$	R/D C_D 0 2,2 0,02 2,0 0,17 1,2 0,33 1,0	$Re = 10^3$
	Triângulo equilátero com cantos arredondados	$A = bD$	R/D C_D 0 1,4 2,1 0,02 1,2 2,0 0,08 1,3 1,9 0,25 1,1 1,3	$Re = 10^3$
	Chapa semicircular	$A = bD$	C_D → 2,3 ← 1,1	$Re = 2 \times 10^4$
	Cilindro semicircular	$A = bD$	C_D → 2,15 ← 1,15	$Re > 10^4$
	Barra T	$A = bD$	C_D → 1,80 ← 1,65	$Re > 10^4$
	Barra I	$A = bD$	C_D 2,05	$Re > 10^4$
	Barra L	$A = bD$	C_D → 1,98 ← 1,82	$Re > 10^4$
	Hexágono	$A = bD$	C_D 1,0	$Re > 10^4$
	Retângulo	$A = bD$	b/D C_D $\leq 0,1$ 1,9 0,5 2,5 0,65 2,9 1,0 2,2 2,0 1,6 3,0 1,3	$Re = 2 \times 10^3$

B	Forma	Área de Referência A	Coefficiente de arrasto C_D	Número de Reynolds Re
	Hemisfério sólido	$A = \pi D^2/4$	C_D → 1,17 ← 0,42	$Re > 10^4$
	Hemisfério oco	$A = \pi D^2/4$	C_D → 1,42 ← 0,38	$Re > 10^4$
	Disco fino	$A = \pi D^2/4$	C_D 1,1	$Re > 10^3$
	Eixo paralelo ao escoamento	$A = \pi D^2/4$	l/D C_D 0,5 1,10 1,0 0,93 2,0 0,83 4,0 0,85	$Re > 10^3$
	Cone	$A = \pi D^2/4$	θ , graus C_D 10 0,30 30 0,55 60 0,80 90 1,15	$Re > 10^4$
	Cubo	$A = D^2$	C_D 1,05	$Re > 10^4$
	Cubo	$A = D^2$	C_D 0,80	$Re > 10^4$
	Corpo aerodinâmico	$A = \pi D^2/4$	C_D 0,04	$Re > 10^3$

Fonte: Munson, Yong e Okiishi (1990).

O coeficiente de sustentação é uma informação importante quando se trata do projeto de perfis de aerofólios, pois o aerofólio é, basicamente uma asa que usa diferentes ângulos de ataque para variar a intensidade dos módulos de ataque e sustentação. Para a definição do *design* de aerofólios, são utilizadas as séries de quatro e cinco dígitos da *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) (JANE; JACKSON, 2007; STIVERS; ABBOT; VON DOENHOFF, 1945).

Para os perfis de asa padronizados pela NACA, há tabelas experimentais que mostram a variação do coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque, além de ferramentas CFD como o *xflow – Dassault Systèmes®*.

Diante do exposto, as características do escoamento em corpos imersos são influenciadas por vários fatores como forma e geometria do corpo, velocidade e propriedades do fluido. Destacam-se o número de Reynolds e o número de Mach (Ma) que representa a razão entre as forças de inércia e de compressibilidade (Equação 7), respectivamente, como parâmetros adimensionais importantes (MUNSON; YONG; OKIISHI, 1990).

$$\text{Ma} = \frac{U}{c} \quad (7)$$

Onde:

U é a velocidade do corpo;

C é a velocidade do som no meio.

Como pode ser observado, o número de Reynolds influencia tanto o arrasto quanto a sustentação no escoamento externo de fluidos. Segundo Munson, Yong e Okiishi (2009), na maioria dos escoamentos externos, objetos com comprimentos que variam de 0,01 m a 10 m, e velocidade de escoamento na ordem de grandeza de 0,01 a 100 m/s, os valores do número de Reynolds estão situados entre os seguintes valores, $10 < \text{Re} < 10^9$.

O escoamento viscoso pode ser dividido em duas regiões, uma próxima da superfície do objeto e outra cobrindo o resto do escoamento. Apenas na região adjacente à fronteira sólida o efeito da viscosidade é importante; esta região é chamada de camada-limite (ANDERSON; JACKSON, 1967; PRANDTL, 1904; SCHLICHTING; GERSTEN, 2000).

O conceito de camada-limite é importante, pois mesmo para números de Reynolds elevados, em que, de forma geral, o atrito seja desprezível, existirá sempre uma camada-limite delgada, em que o atrito é significativo; então, teremos arrasto. Fox, Pritchard e McDonald (2014) definem de forma simples a camada-limite como uma região adjacente à superfície de um sólido, em que as tensões viscosas são significativas.

2.4 Transferência de calor por convecção

Bergman *et al.* (2014), a convecção é o mecanismo de troca térmica que ocorre devido ao contato de um fluido em movimento e uma superfície. Ainda segundo os autores, como consequência da interação entre o fluido e a superfície há o desenvolvimento de uma região no fluido, em que o módulo da velocidade varia entre zero, no contato com a superfície, e um valor de módulo finito, associado ao desenvolvimento do escoamento; esta região do fluido é conhecida como camada limite hidrodinâmica ou de velocidade.

Segundo Braga Filho (2004), a movimentação de um fluido pode ser ocasionada por diferença de massa específica (empuxo) ou por diferença de pressão. As velocidades devido ao empuxo são menores que as velocidades desenvolvidas pela diferença de pressão; como consequência, o fluxo de energia será maior na movimentação ocasionada pela diferença de pressão. A convecção pode ser classificada em natural ou livre (forças de empuxo) e forçada (diferença de pressão).

Segundo Çengel e Ghajar (2009), a convecção é complexa por envolver movimento do fluido e condução de calor. Porém, a taxa de transferência de energia está bem expressa pela lei do resfriamento de Newton (Equação 8).

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (w) \quad (8)$$

Onde:

Q_{conv} é a quantidade de calor transferida (Watt = W);

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, W/m^2K ;

A_s é a área de transferência de calor, m^2 ;

T_s é a temperatura da superfície, $^\circ C$;

T_∞ é a temperatura do fluido suficientemente longe da superfície, $^\circ C$.

Os autores ressaltam a dependência da convecção para com as propriedades do fluido, como viscosidade dinâmica, condutividade térmica, densidade, calor específico e velocidade. A convecção também depende da geometria e da rugosidade da superfície e do tipo de escoamento (laminar ou turbulento).

O coeficiente de transferência de calor por convecção (h) é uma variável importante e não deve ser associada como uma propriedade do fluido, e sim como um parâmetro experimental, cujo valor depende de todas as variáveis que influenciam a convecção (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

A Tabela 2 mostra os valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção (h), calculados experimentalmente.

Tabela 2 – Valores experimentais do coeficiente de calor por convecção

Tipo de convecção	h, W/m^2K
Convecção livre de gases	2 – 25
Convecção livre de líquidos	10 – 1.000
Convecção forçada de gases	25 – 250
Convecção forçada de líquidos	50 – 20.000
Ebulição e condensação	2500 – 100.000

Fonte: Çenge e Ghajar (2009).

Devido à quantidade de variáveis envolvidas no mecanismo de troca térmica por convecção, é comum o uso de números adimensionais (ÇENGEL; GHAJAR, 2009). Assim como o número de Reynolds para a classificação do escoamento, o número de Nusselt (Equação 9) é de suma importância para a convecção, pois representa a razão entre a transferência de calor por convecção e a transferência de calor por condução (somente).

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (9)$$

Onde:

Nu é o número adimensional de Nusselt;

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção;

L é o comprimento característico da superfície, m;

k é a condutividade térmica do fluido, W/m K.

Pela análise do número de Nusselt, confirma-se a eficiência da convecção forçada sobre a convecção natural. Outro número adimensional utilizado nos processos convectivos de troca térmica é o número de Prandtl (Equação 10). O número de Prandtl fornece o valor da efetividade relativa dos transportes por difusão, de momento e de energia no interior das camadas-limite de velocidade e térmica, respectivamente (BERGMAN *et al.*, 2014; ÇENGEL; GHAJAR, 2009). O número de Prandtl é um parâmetro que relaciona as espessuras das camadas-limite térmica e de velocidade.

$$Pr = \frac{\delta}{\alpha} \quad (10)$$

Onde:

Pr é o número adimensional de Prandtl;

δ é a viscosidade cinemática do fluido, $m^2 s^{-1}$;

α é a difusividade térmica do fluido, $m^2 s^{-1}$.

A viscosidade cinemática de um fluido revela informações sobre a taxa com a qual o momento pode ser difundido pelo fluido, devido à movimentação molecular. A difusividade térmica revela informações sobre a difusão de calor no fluido. Portanto, a relação entre essas duas quantidades expressa as magnitudes relativas das difusões de momento e calor no fluido. Para gases $Pr \approx 1$, para metais líquidos $Pr \gg 1$ e para óleos $Pr \ll 1$.

Diante do exposto, as forças que afetam a força de arrasto durante a movimentação do fluido também afetam os fenômenos de transferência de calor por convecção, e esses efeitos são mostrados pelo número de Nusselt, como mostra a Equação 11 que representa os dados experimentais de transferência de calor por meio de relação de potência.

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (11)$$

Onde:

m e n são expoentes constantes e o valor de C depende fortemente da geometria da superfície e do escoamento do fluido. Assim, para cada caso de escoamento externo serão obtidos valores

específicos de C, m e n.

2.5 Transferência de massa por convecção

Durante a passagem de um fluido em movimento (ar) sobre uma superfície líquida (água), observa-se que parte do líquido irá evaporar e ser transferido para o fluido. Isto é um exemplo de transferência de massa por convecção (ÇENGEL; GHAJAR, 2009; BERGMAN *et al.*, 2014).

A transferência de massa poderá ser entendida como o movimento espacial da matéria. Essa movimentação pode ocorrer pelo mecanismo da difusão molecular ou da convecção. A transferência de massa por difusão molecular, em consequência de uma diferença de concentrações, é análoga à transferência de calor por condução, embora seja um fenômeno mais complexo, pois ocorre numa mistura com pelo menos duas espécies químicas. No mecanismo de transferência de massa por convecção, a transferência de massa se dá através de um fluido em movimento de forma natural ou forçada.

Segundo Welty *et al.* (2009), a força motriz responsável pela transferência de massa é o gradiente de concentração, isto é, deve haver diferença de concentração entre as espécies para que ocorra transferência de massa. Os autores ainda ressaltam a importância dos mecanismos de transferência de massa nos processos bioquímicos e industriais.

Assim como nos processos de escoamento de fluidos e de transferência de calor, há o surgimento de uma camada-limite de concentração em que a transferência das espécies por convecção entre a superfície líquida e a corrente de fluido é determinada por suas condições (BERGMAN *et al.*, 2014; ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

O desenvolvimento da camada-limite de concentração, em que considera uma mistura binária de espécies químicas diferentes (mistura A + B) sobre uma superfície perfeitamente plana (superfície líquida), a concentração molar da espécie A na superfície é $C_{A,S}$ e na corrente livre do fluido é $C_{A,\infty}$. Caso a concentração de $C_{A,S}$ for diferente de $C_{A,\infty}$, ocorrerá a transferência da espécie A por convecção. O cálculo da espessura da camada-limite (δ_c), em que os efeitos dos gradientes de concentração são importantes, a espessura da camada-limite é definida como $[(C_{A,S} - C_A)/(C_{A,S} - C_{A,\infty})] = 0,99$.

A taxa de transferência molar pode ser calculada a partir da Equação 12, muito semelhante a equação de resfriamento de Newton (Equação 8).

$$N_A = h_m A_s (C_{A,S} - C_{A,\infty}) \quad (12)$$

Onde:

N_A é a taxa de transferência molar, $\text{kmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$;

h_m é o coeficiente de massa convectivo, m s^{-1} ;

A_s é a área da superfície, m^2 ;

$C_{A,S}$ é a concentração da espécie A na superfície, kmol m^{-3} ;

$C_{A,\infty}$ é a concentração da espécie A na corrente livre do fluido, kmol m^{-3} .

No estudo das camadas-limite de velocidade, térmica e de concentração é importante considerar: as forças de atrito superficial, traduzidas pelo coeficiente de atrito (camada-limite de velocidade); o coeficiente de transferência de calor por convecção (camada-limite térmica); e o coeficiente de transferência de massa por convecção (camada-limite de concentração).

Uma aplicação relevante dos fenômenos de transferência de calor e massa é o processo de resfriamento adiabático evaporativo, que ocorre quando um gás escoia sobre um líquido (BERGMAN *et al.*, 2014). O processo de resfriamento evaporativo vem sendo utilizado como alternativa para amenizar o estresse térmico em instalações avícolas (ALJMAL, 1994, ALI *et al.*, 1999; ARBEL; YEKUTIELI; BARAK, 1999; BOTTCHEER; BAUGHMAN; GATES, 1991; GATES; USRY; NIENABER, 1991; RYAN; BOLAND; KOPEL, 1992; TINOCO, 1996).

Nas instalações avícolas, a climatização do ambiente pelo resfriamento adiabático evaporativo pode ser obtida por meio de sistemas de nebulização associados à circulação forçada de ar (ventiladores) ou forçando a passagem do ar através de um material poroso úmido (BOTTCHEER; BAUGHMAN; GATES, 1991).

Durante o transporte das aves, o microclima da carga apresenta uma atmosfera supersaturada por vapor d'água, em decorrência da respiração das aves e devido à falta de circulação de ar, ocasionada pelo *leiaute* compacto da carga. Não há como diminuir a umidade relativa do ambiente através dos mecanismos de transferência de massa e nem como transferir parte da energia na forma de calor para o ambiente externo à carga (PINHEIRO, 2015).

2.6 Dinâmica de fluidos computacional

A fluidodinâmica computacional ou dinâmica dos fluidos computacional, *Computational Fluid Dynamics* (CFD), desenvolveu-se até um estágio em que fornece uma visão substancial dos fenômenos que ocorrem em um sistema ventilado, em consonância com o rápido desenvolvimento de tecnologias de computadores (NORTON *et al.*, 2010). Segundo Chen (2004), a CFD pode desenvolver com eficiência soluções de campo temporal de pressão,

temperatura e velocidade do fluido.

A CFD vem sendo utilizada amplamente no estudo do ambiente térmico, emissões acústicas, melhorias estruturais e outros aspectos relacionados às instalações animais, em especial, a ventilação (BJERG *et al.*, 2013; BUSTAMANTE *et al.*, 2013; KWON *et al.*, 2015; NORTON; KETTLEWELL; MITCHELL, 2013).

De fato, nos últimos anos, a modelagem de CFD permitiu identificar com clareza os sistemas de ventilação natural e artificiais (GILKESON *et al.*, 2009; 2016; NORTON *et al.*, 2010; NORTON; KETTLEWELL; MITCHELL, 2013; SEEDORF; SCHMIDT, 2017). Além disso, a CFD permite avaliar o desempenho de sistemas de ventilação e pode ser usada para manipular fenômeno a fim de otimizar resultados (NORTON *et al.*, 2009), como parâmetros de *design* e aerodinâmica (GILKESON *et al.*, 2009; 2016).

Na avicultura de corte a CFD foi utilizada por Bustamante *et al.* (2015), que avaliaram um sistema de ventilação mecânica cruzada em galpões, avaliando problema de baixo fluxo de vento durante a época mais quente do ano.

Rahman, Chu e Kumaresen (2014), estudaram modificações de galpões para a criação de frangos ventiladas por chaminés com a utilização de simulações computacionais e obtiveram um aumento da taxa de ventilação variando de 60 a 90% comparado ao design convencional do galpão convencionais.

Estudos prévios de CFD foram realizados em veículos pesados de mercadorias (POINTER *et al.*, 2005) em regime de turbulência, para prever a aerodinâmica dos vagões de contêineres de trens de carga (MALEKI; BURTON; THOMPSON, 2017), veículos espaciais (KASHKOVSKY; VASHCHENKOV; BANYAI, 2014) e em caminhões (XIAO-NI, 2011), validando a eficiência e acurácia dos resultados obtidos em simulação.

A CFD é cada vez mais usada para estudar o fluxo de ar ao redor de edifícios e de animais, desenvolver tecnologias para mitigar as emissões e prever a dispersão de contaminantes do gado em confinamento (RONG *et al.*, 2016; SEEDORF; SCHMIDT, 2017). No transporte rodoviário de animais, as pesquisas foram iniciadas com o transporte de cavalos, buscando compreender a ventilação passiva na carga (PURSEWELL *et al.*, 2005) e, posteriormente, o efeito da aerodinâmica no transporte de suínos e ovelhas (GILKESON *et al.*, 2009; 2016), assim como no transporte marítimo de animais (NORTON; KETTLEWELL; MITCHELL, 2013).

Gilkeson *et al.* (2009) avaliaram o efeito da aerodinâmica nos padrões de ventilação, utilizando CFD em escala real de um reboque utilizado para transporte de suínos, ovelhas e cavalos no Reino Unido. O reboque apresentava dois andares e possuía 3,66 m x 1,82

m x 1,81 m de comprimento, largura e altura, respectivamente. Os autores verificaram alterações no fluxo de ar pela influência da aerodinâmica do veículo, sendo a ventilação concentrada na região traseira do reboque.

Em seguida Gilkeson *et al.* (2016) quantificaram a ventilação passiva do mesmo reboque de Gilkeson *et al.* (2009), utilizando CFD. Os autores verificaram um regime turbulento, que pelo *design* do reboque e caminhão, permanecia maior no andar superior do reboque que, diferentemente do andar inferior, atendeu aos padrões de ventilação recomendados pela legislação da união europeia (UE, 2005).

Para Vinco *et al.* (2016), os sistemas de transporte de aves estão sob investigação, com um foco particular no *design* e nas dimensões de caixas de transporte comercialmente disponíveis. Entretanto, são escassos os trabalhos que utilizam a CFD no transporte de frangos vivos, mesmo ainda sendo considerado que alguns fatores, como a caixa de transporte, sejam insuficientes para atender às necessidades de bem-estar animal.

2.7 Prototipagem rápida

Segundo Gorni (2001), o método da prototipagem rápida define um conjunto de tecnologias usadas para fabricar objetos físicos diretamente de dados gerados de modelos tridimensionais, a partir de ferramentas de CAD. O processo de fabricação se baseia na manufatura por camadas, que o diferencia dos métodos de manufatura convencional que retiram material, como na usinagem convencional com o uso de torno e fresadora.

Segundo Jacobs (1995), a prototipagem rápida possibilita a verificação da funcionalidade dos componentes durante a montagem, avaliação da geometria, função, avaliação da manufaturabilidade e redução do tempo de projeto. Devido ao desenvolvimento de tecnologias de modelagem tridimensional e de novos métodos de produção baseados em modelos digitais, como a manufatura auxiliada por computador, a prototipagem rápida vem se destacando em diversas áreas (LINO, 2006).

Uma das aplicações da prototipagem rápida no setor industrial é a criação de modelos de avaliação que permitem testes prévios como, por exemplo, ensaios em túnel de vento para componentes aeronáuticos ou análise fotoelástica para verificar pontos de concentração de tensões na peça (GORNI, 2001).

O protótipo é construído através do sistema aditivo, que consiste em sobrepor camadas de material sucessivamente, até que o objeto seja formado (VOLPATO, 2007). Os protótipos físicos podem ser construídos pela adição de finas camadas de materiais como

polímeros, cerâmicas, metais, etc. (FERREIRA; LAFRATTA, 1998; LINO *et al.*, 2006). No processo de fabricação aditiva, a máquina lê os dados de um desenho digital coloca camadas sucessivas de líquido ou material pulverizado e, deste, modo constrói o modelo com uma série longa de seções transversais (SALMORIA *et al.*, 2007).

A Tabela 3 mostra os principais processos de prototipagem rápida utilizados. A técnica de modelagem por deposição de material fundido foi utilizada para a construção dos protótipos nesta pesquisa.

Tabela 3 – Classificação dos processos de prototipagem rápida

Tipo de material	Processo
Líquido	Estereolitografia
Líquido	Cura sólida na base
Líquido	Impressão a laser ultravioleta de objetos sólidos
Líquido	Sistema de fotopolímero
Pó	Sinterização seletiva a laser
Pó	Sinterização a laser metálica direta
Sólido	Manufatura de objetos em lâmina
Sólido	Modelagem por deposição de material fundido
Sólido	Impressão com jato de tinta com mudança térmica de fase

Fonte: Booker e Swift (2014).

A Estereolitografia (*Stereolithography*) consiste na construção do protótipo a partir da foto polimerização de uma resina epóxi líquida, usando um feixe de luz ultravioleta. É um método para produzir objetos sólidos, imprimindo sucessivas camadas finas de um material curável por radiação ultravioleta (HULL, 1990; LINO; METO, 2000).

O processo de construção do protótipo ocorre em um tanque e começa quando uma camada de polímero líquido é espalhada sobre uma plataforma. A máquina usa, então, um laser para desenhar a primeira camada sobre a superfície de um polímero líquido, que endurece quando atingido pela luz ultravioleta. O modelo é abaixado e a próxima camada é desenhada diretamente sobre a anterior. Isso é repetido até que o modelo seja concluído (BOOKER; SWIFT, 2014).

A Manufatura de Objeto por Lâmina (*Laminated Object Manufacturing*) é uma técnica que consiste em formar o protótipo com a adição de camadas de tiras de papel laminado revestido de adesivo ativado pelo calor. O processo também permite o uso de materiais como polímeros, papel hidrófobo, pós-cerâmicos e metálicos (GORNİ, 2001; VOLPATO, 2007). O funcionamento de uma máquina de manufatura de objetos por lâminas baseia-se no corte a *laser* do papel, em que as tiras são aplainadas por um rolo aquecido para ativar a cola e pressionar as

camadas para formar o protótipo.

A Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering*) trata-se de uma técnica que utiliza uma luz de alta frequência (*laser*) para fundir seletivamente materiais em pó, como náïlons, elastômeros e metais em um objeto sólido (GORNI, 2001; VOLPATO, 2007). Uma camada fina de material em pó é colocada e o *laser* “desenha” na camada, sintetizando as partículas. A camada é, então, rebaixada e uma nova camada de pó é colocada em cima. Este processo é repetido camada por camada até que a peça esteja completa.

A Cura Sólida na Base (*Solid Ground Curing*), assim como, na estereolitografia utiliza a radiação ultravioleta para endurecer seletivamente polímeros. Neste processo, camadas inteiras de polímeros são curadas (VOLPATO, 2007). Para o endurecimento de uma camada inteira de polímero, é gerada uma máscara similar a um estêncil, com a forma da camada a ser endurecida. A máscara é exposta à radiação ultravioleta, a qual passa pelas partes transparentes da máscara e atinge a película de polímero fotossensível. Após o endurecimento, a máquina retira o excesso de resina e aplica uma camada de cera. Então, a superfície é aplainada e o processo se repete até finalizar o objeto. Ao final, o objeto recebe um banho de solvente para retirar a cera (HAUGUE; REEVES, 2000).

O método de Impressão por Jato de Tinta (*Multi Jet Modeling e Ballistic Particle Manufacturing*) usa a tecnologia de jato de tinta, em que o protótipo é construído sobre uma plataforma imersa em um material na forma de pó (polímero, cerâmica ou metais). Um cabeçote de impressão aplica um agente aglutinante que aglomera o pó. Na plataforma baixa, mais pó é adicionado e o processo é repetido até a finalização do protótipo, que será sintetizado e o excesso de pó removido (BOBOULOS, 2010).

A conformação próxima ao Formato Final Via *Laser* (*Laser Engineered Net Shaping*) é um método em que um *laser* de alta potência é usado para fundir pó metálico, fornecido coaxialmente ao foco do raio *laser*, através de um cabeçote de deposição. O laser passa através do centro do cabeçote e é focado em um pequeno ponto através de uma lente ou conjunto de lentes. Uma mesa X-Y é movida por varredura, de forma a gerar cada camada do objeto. O cabeçote é movido para cima à medida que cada camada é completada (GORNI, 2001).

Este é o processo mais avançado em termos de propriedades mecânicas alcançadas de partes metálicas geradas entre todos os processos comercializados com base no princípio de construção em camadas (BOBOULOS, 2010). Este método pode utilizar ampla gama de metais e ligas como material de construção. Devido à complexidade do sistema de impressão, o processo apresenta a desvantagem do alto custo de fabricação dos protótipos.

A Modelagem por Deposição de Material Fundido (*Fused Deposition Modeling*) é essencialmente um processo de deposição de material em camadas, em que são utilizados filamentos de resina termoplástica, extrudados por um bico extrusor que se move num plano X-Y. O cabeçote de extrusão controla a deposição de filetes da resina aquecida sobre uma plataforma de construção.

A plataforma é mantida sob uma temperatura inferior à do material, de forma que a resina termoplástica endurece rapidamente. Após esse endurecimento, a plataforma se abaixa ligeiramente e a matriz de extrusão deposita uma segunda camada sobre a primeira. O processo é repetido até a construção total do protótipo e nele são utilizadas as seguintes resinas: poliéster, polipropileno, ABS, PLA, Nylon, elastômeros e cera usada no processo de fundição por cera perdida (GORNI, 2001; JIN *et al.*, 2015; VOLPATO, 2007).

Este método apresenta como vantagem o baixo custo do sistema de impressão, devido à simplicidade construtiva dos dispositivos. Entretanto, problemas podem surgir como o entupimento do cabeçote extrusor devido à solidificação da resina. O tamanho do protótipo está limitado à mesa de impressão, e a principal desvantagem está no tempo de impressão do protótipo.

2.7.1 Desenho e engenharia assistido por computador (CAD/CAE)

Para o desenvolvimento e fabricação de produtos mais eficientes e competitivos, a utilização de ferramentas computacionais é essencial pois, através de métodos de simulação, os engenheiros podem projetar produtos com dimensões lineares e geométricas que atendam às especificações, evitando com isso, erros de dimensionamento e “gargalos” na fabricação.

O avanço da tecnologia computacional, em especial na área gráfica e digital, vem auxiliando os engenheiros a resolverem problemas complexos. O desenvolvimento de um produto envolve um conjunto interativo de processos que vai da pesquisa, análise, conceituação, visualização, modelagem, construção de protótipos, testes e refinamento (BRYDEN, 2014). Ainda segundo Bryden (2014), o CAD refere-se ao processo de utilização de *softwares* especializados para criar modelos tridimensionais virtuais e desenhos de produtos.

A modelagem CAD pode ser dividida em duas técnicas fundamentais: modelagem de superfície e modelagem de sólidos. Os modelos de superfície podem ser considerados “casca” de espessura zero, enquanto modelos sólidos possuem espessura.

Figueira (2003) define engenharia auxiliada por computador como um conjunto de técnicas para avaliar os aspectos de engenharia de projetos concebidos pelo CAD. Segundo

Souza e Ulbrich (2009), os sistemas CAD podem ser definidos em *Low-end*, *Meddle-end* e *High-end*. O primeiro é de pequeno porte, utilizado para representar objetos e formas geométricas em duas dimensões; o segundo, de médio porte capaz de representação geométrica em três dimensões, podendo o usuário fazer análise de interferência em montagens ou verificação de linha de fechamento.

Já o *High end*, além do CAD, contempla em um único sistema módulos de análises CAE, CAM (manufatura auxiliada por computador). Mais especificamente o CAD utiliza *software* para a criação, desenvolvimento, análise e otimização de projetos ou produtos. Como ferramentas CAD, pode-se citar os seguintes *softwares*: AutoCAD desenvolvido e comercializado pela AUTODESK®, *software* utilizado no desenvolvimento de projeto 2D e 3D; *Solidworks* e *Catia*, desenvolvidos pela *Dassault Systemes*; *Solid edge* e o *NX* desenvolvidos e comercializado pela Siemens.

O *software* CAD/CAE faz uso do processo de simulação computacional, em que avalia o comportamento do produto virtualmente, isto é, põe o produto em funcionamento no ambiente virtual, imitando seu funcionamento real, fazendo uso de métodos matemáticos como o método dos elementos finitos (MEF).

O MEF começa com a criação de um modelo geométrico. Em seguida, o algoritmo do programa subdivide o modelo em partes pequenas que são conectadas em pontos comuns (nós). Os programas de análise de elementos finitos consideram o modelo como uma rede de elementos discretos interconectados, e preveem o comportamento do modelo combinando as informações obtidas de todos os elementos que formam o modelo.

Segundo Lotti *et al.* (2006), o MEF é um método matemático no qual um meio contínuo é discretizado (subdividido) em elementos que mantêm as propriedades de quem o originou. Pode ser utilizado em diversas áreas das ciências exatas e biológicas devido à sua grande aplicabilidade e eficiência.

Vieira (2006) define simulação como uma tentativa de imitar o comportamento real através da construção de modelo matemático em um computador. Segundo Figueira (2003), são utilizados modelos digitais para simular os fenômenos naturais a que estão expostos os produtos para analisar seu comportamento.

2.8 Ensaios em túnel de vento

O uso de túneis de vento para a análise aerodinâmica tem sido útil para obter informações sobre a segurança, confiabilidade, eficiência e a redução de custos de projetos

(COSTA; SILVA; ASSAYAG, 2013).

Os ensaios em túnel de vento vêm sendo utilizados para validar os resultados obtidos nas CFD. Segundo Moreira Júnior (2009), o túnel de vento é uma instalação destinada a produzir, de forma regular e controlada, uma corrente de ar com o objetivo de estudar as condições de escoamento do fluido, analisar os perfis de esforço e temperatura.

O estudo do fluxo de ar sob condições controladas em túnel de vento é utilizado para simular o desempenho de veículos em movimento sob fortes ventos. Nestes ensaios são calculadas as forças que agem sobre o veículo (BOCCIOLONE *et al.*, 2008; HE; YE; WANG, 2006; XIANG *et al.*, 2017). Muitos trabalhos são desenvolvidos usando a simulação em túnel de vento para a determinação de parâmetros aerodinâmicos importantes em veículos rodoviários (COLEMAN; BAKER, 1994; CARREGARI, 2006; XU; GUO, 2003; ZHU *et al.*, 2012).

O estudo de como o ar interage com os corpos em movimento é importante para o desenvolvimento de veículos mais eficientes, e contribuindo com a redução das emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera (LEUSCHEN; COOPER, 2006).

Para garantir a qualidade do escoamento, o túnel de vento deve obedecer a algumas características construtivas, como uniformidade geométrica da seção de teste, controle da pressão e temperatura, ausência de vórtices de rotação e de velocidades transversais e ausência de pulsações e de flutuações da velocidade de escoamento (FINNIS, 1999; RAE; POPE, 1984; WESTPHAL, 1997).

O principal fluido utilizado nos ensaios aerodinâmicos é o ar, embora seja compressível e sua massa específica varia com a pressão e temperatura; em muitos experimentos, pode-se considerar sua massa específica constante (BARLOW; ERA; POPE, 1984; FINNIS, 1999; WESTPHAL, 1997).

Os túneis de vento podem ser classificados com base na velocidade do fluxo de ar na seção de teste e com base na forma. Para a classificação com base na velocidade do fluxo utiliza-se, geralmente, o número de Mach, que é uma medida adimensional definida como a razão entre a velocidade do objeto e a velocidade do som, e são subdivididos em túneis subsônicos, transônicos, supersônicos e hipersônicos. A Tabela 4 mostra um resumo da classificação dos túneis de vento em função da velocidade de fluxo.

Tabela 4 – Classificação dos túneis de vento

Tipo	Valor número Mach
Subsônico – baixa velocidade	0,4 (137 m s ⁻¹)
Transônico	1 (343 m s ⁻¹)
Supersônico	5 (1715 m s ⁻¹)
Hipersônico	5-15 (1715–5145 m s ⁻¹)

Fonte: elaborado pelo autor.

Existe também a classificação quanto à forma, sendo separados em circuito aberto ou fechado. Nesse último, o ar circula ao longo do túnel de forma mais estável e contínua, pois utiliza um conjunto de estruturas e controle para a estabilização do fluxo de ar; este tipo de túnel é utilizado pela indústria aerodinâmica e automobilística. Devido à simplicidade de construção, neste tipo de túnel, a probabilidade de entrada de particulados é alta.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Estudo da logística de transporte

De forma preliminar, informações foram obtidas por meio do monitoramento de 35 carregamentos de uma granja situada em Beberibe - Ceará, Brasil ($04^{\circ} 10' 47''$ S, $38^{\circ} 07' 50''$ W e altitude de 12 m) até seu abatedouro com capacidade de abater 10 mil aves por dia, localizado a 25 km da granja.

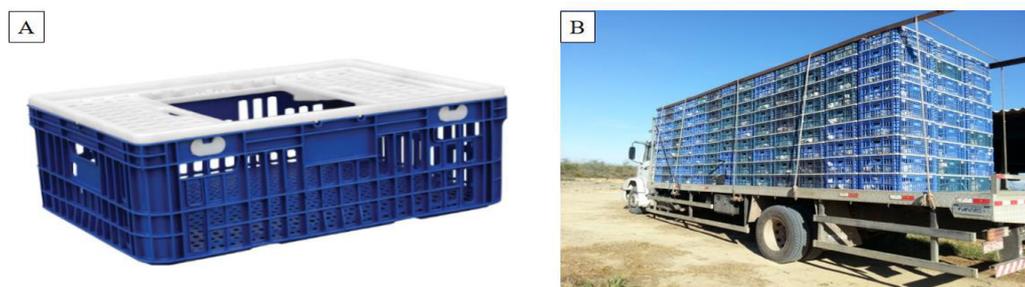
O transporte era realizado no início da manhã por volta das 03h30 e finalizado as 08h30. A pega das aves era feita por dez trabalhadores, três responsáveis por fazer a pega das aves e sete para recolher as aves em sacolas, pesá-las e em seguida, colocá-las nas caixas de transporte, em cada caixa eram colocadas 8 aves.

A granja possuía caminhões com: motor de 150 CV de potência, distância entre eixos de 3.600 mm, altura de 2.338 mm, ângulo de entrada de 21° , ângulo de saída de 25° , bitola dianteira de 1.760 mm e capacidade de carga de 10.000 kg. A carroceria utilizada era aberta de grade baixa com estrutura em aço e piso de madeira, com comprimento de 7,20 m e largura de 2,60m.

A caixa utilizada para o transporte das aves era fabricada em polietileno de alta densidade (PEAD), possuía capacidade 100 l, peso médio de 6,4 kg, dimensões externas de 770 mm de comprimento, 570 mm de largura e 290 mm de altura, 3 mm de espessura; tampa com 4 mm de espessura, trava de segurança e portinhola bipartida com abertura deslizante (Figura 3A).

A caixa possuía ressaltos, rebaixos e ranhuras que facilitam o encaixe da parte inferior com a tampa. Normalmente eram empilhadas formando colunas de nove caixas arrumadas transversalmente ao longo da carroceria do caminhão formando três fileiras, cada uma composta por treze colunas para formar bloco prismático retangular, caracterizando o *layout* convencional (Figura 3B).

Figura 3 - Caixa de transporte das aves (A) e *layout* convencional (B)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os trabalhadores iniciavam a prática do molhamento da carga com metade da carroceria ocupada. O molhamento era realizado com o uso de mangueiras, que eram colocadas em caixas localizadas no topo da carga de forma aleatória, por um período de tempo de aproximadamente três minutos. Em média, eram consumidos 2.200 l de água por carregamento.

Após o molhamento da carga e com todas as caixas distribuídas ao longo da carroceria, iniciava-se a amarração da carga com o uso de cantoneiras de aço e cordas de *nylon*, para garantir a estabilidade durante o transporte. Toda a etapa de carregamento durava aproximadamente 35 minutos.

O transporte se iniciava ao final da amarração da carga. A velocidade média durante o transporte era de aproximadamente 72 km/h.

3.2 Modelamento com o uso de ferramentas CAD

A granja forneceu uma caixa de transporte, com o intuito de se obter as informações dimensionais e estruturais para a concepção do modelo virtual e desenvolvimento do *design* dos dispositivos (espaçadores), para criar os corredores de circulação de vento, e dispositivos (coletores e aerofólio) para captar e direcionar o vento durante o trajeto até o abatedouro. O modelamento da caixa foi realizado com o *software Solid Edge ST10* no laboratório de prototipagem rápida (LABPRO) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE) do Campus Fortaleza.

Estruturalmente, a caixa possuía nervuras, o que contribuía para a redução de material e aumento de sua resistência mecânica. A caixa possuía 70% de sua área composta por rasgos e furos cujo principal objetivo seria facilitar a limpeza e contribuir com a circulação de ar em seu interior.

A Figura 4 mostra o modelo virtual em perspectiva da caixa de transporte em escala natural, em que foi dada toda atenção aos detalhes das nervuras e aberturas.

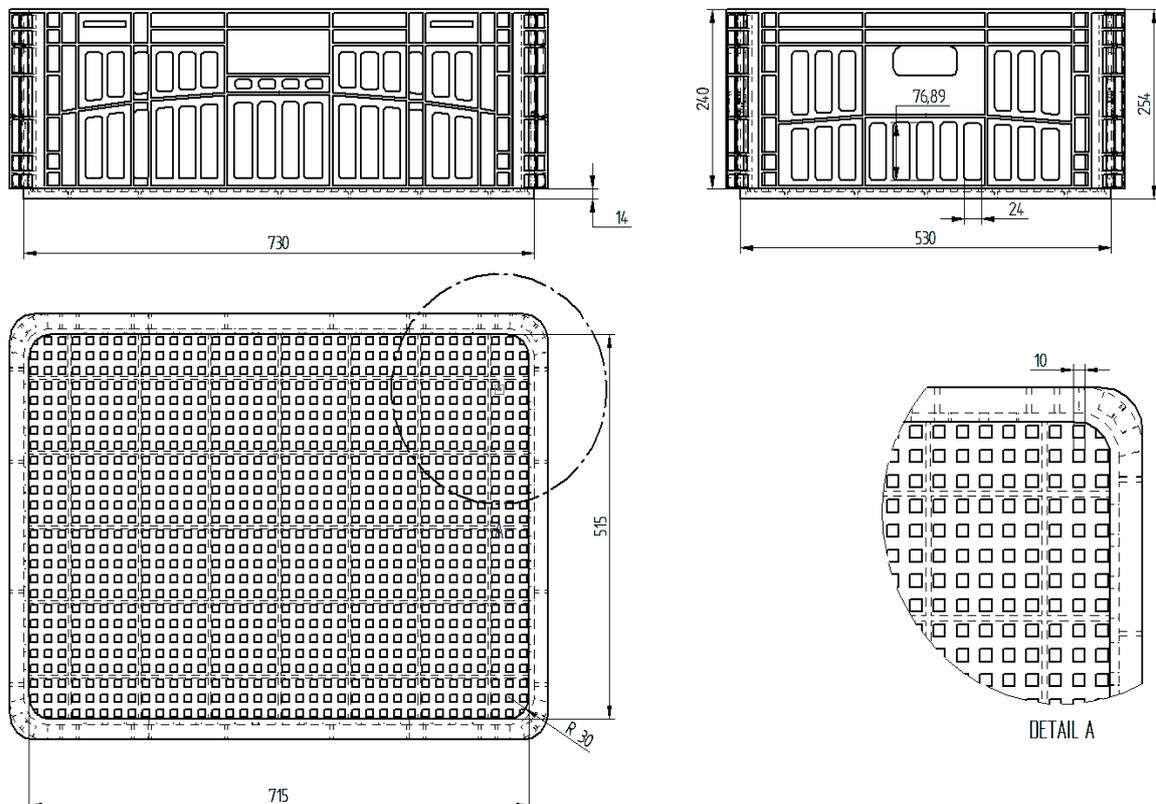
Figura 4 - Modelo virtual da caixa de transporte



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5, mostra a caixa de transporte com o uso de projeções ortográficas, uma forma de representar graficamente objetos tridimensionais em superfícies planas, de modo a transmitir suas características com precisão e demonstrar sua verdadeira grandeza.

Figura 5 - Projeções ortográficas da caixa de transporte

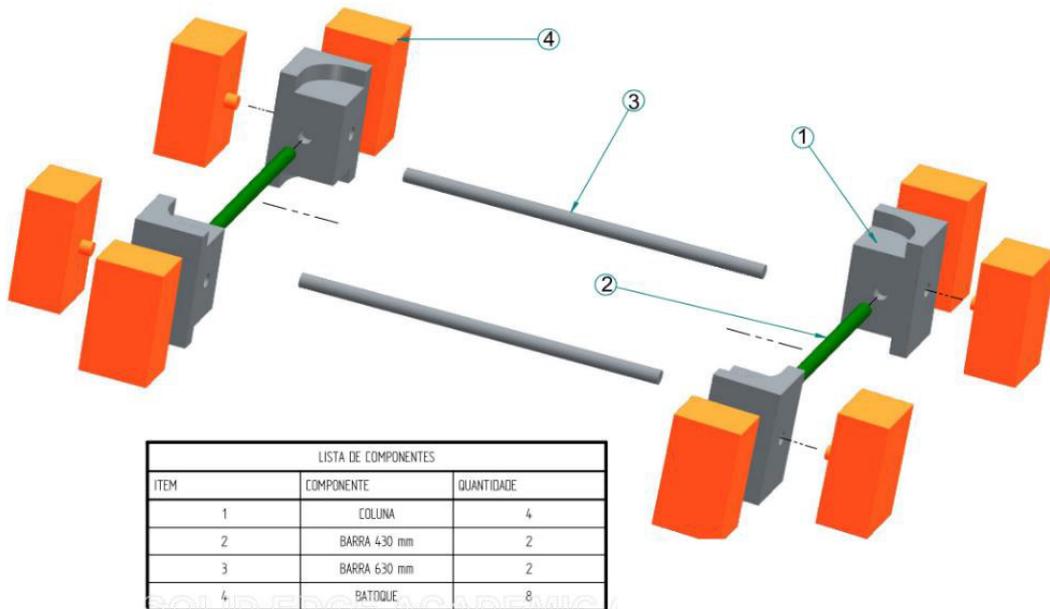


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na concepção do espaçador também foi utilizado o software *Solid Edge ST10*,

optou-se por um espaçador com *design* no formato de bandeja, pois facilitaria a montagem e contribuiria com a estabilidade da carga. Os dispositivos propostos visam modificar o *layout* com corredores de circulação de vento. A Figura 6 mostra o modelo virtual em perspectiva do espaçador.

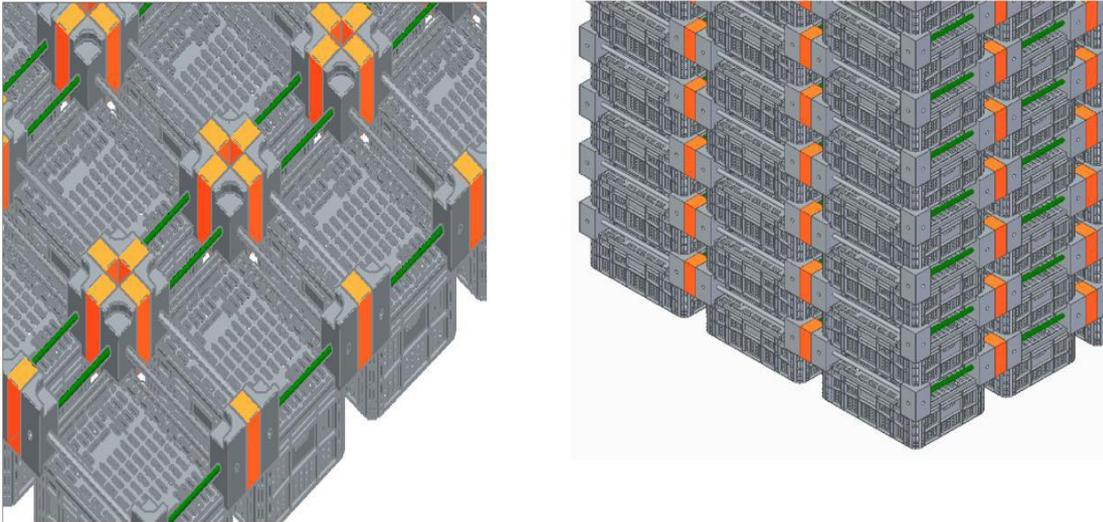
Figura 6 - Modelo virtual em perspectiva do espaçador



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os espaçadores seriam encaixados na parte superior e inferior da caixa de transporte. Dessa forma, os corredores horizontais seriam criados pelas colunas de sustentação e os corredores verticais pelos batoques a serem encaixados nas colunas do espaçador, conforme mostra a Figura 7.

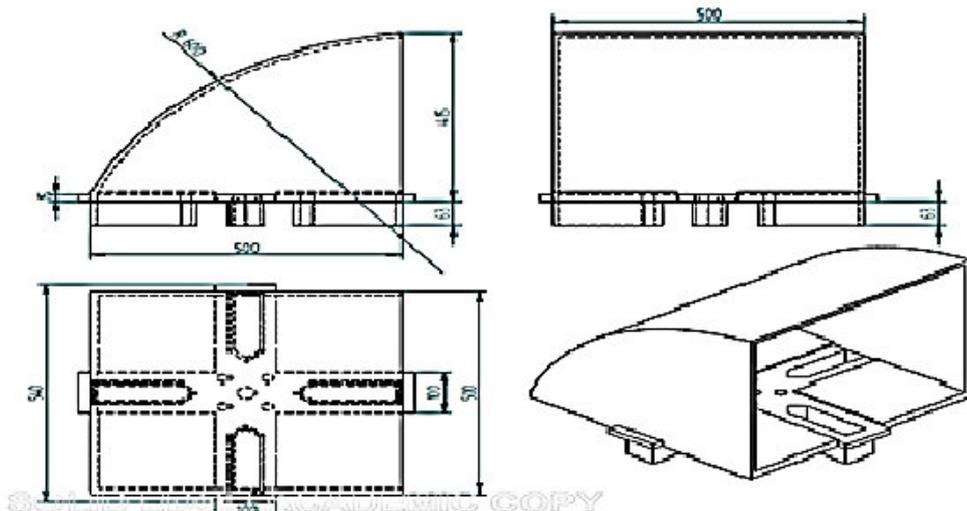
Figura 7 - Montagem dos espaçadores nas caixas de transporte



Fonte: Elaborado pelo autor

Além dos espaçadores, foram projetados captadores de vento para serem instalados no topo da carga, afim de forçar a circulação de vento e um aerofólio para direcionar o vento para o interior da carga descompactada pelos espaçadores. A Figura 8 mostra o projeto dos captadores de vento, em que se optou pelo *design* com geometria de coifa, pois esta geometria é a mais utilizadas quando se necessita captar vento e forçar a sua circulação. Os coletores serão fixados na estrutura das caixas.

Figura 8 - Vistas ortográficas do captador de vento



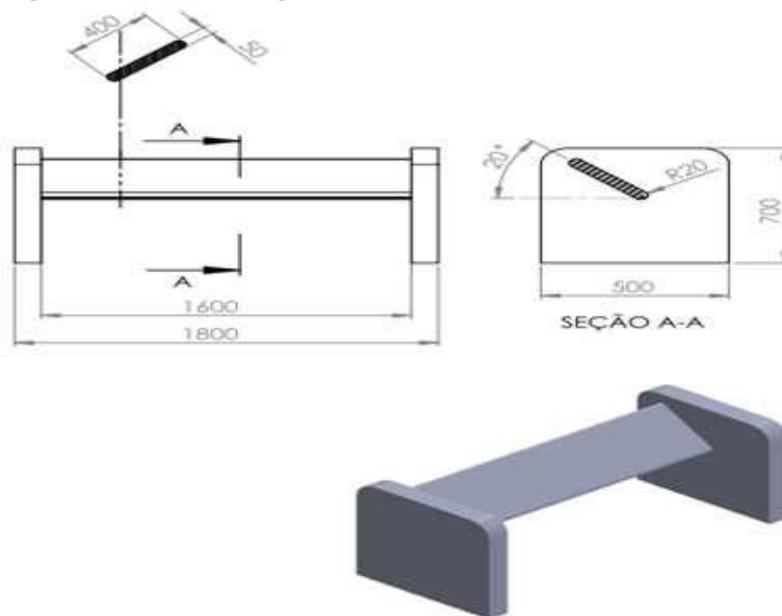
Fonte: Elaborado pelo autor

Estimou-se o módulo do coeficiente de arrasto com a ferramenta computacional *xflow*. Foram utilizados os parâmetros do transporte de frangos obtidos por Pinheiro (2015):

velocidade do vento de 22 m s^{-1} (72 km h^{-1}), massa específica do ar de $1,2754 \text{ kg m}^{-3}$.

A Figura 9 mostra o projeto do aerofólio, que foi elaborado com base na família de quatro dígitos do *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA). O aerofólio, basicamente, é uma “asa” cuja principal função seria modificar o perfil de escoamento do vento que se choca com a parte frontal da carga, para garantir uma melhor distribuição da ventilação no seu topo e direcionar o vento para os corredores de ventilação.

Figura 9 - Vistas ortográficas do aerofólio



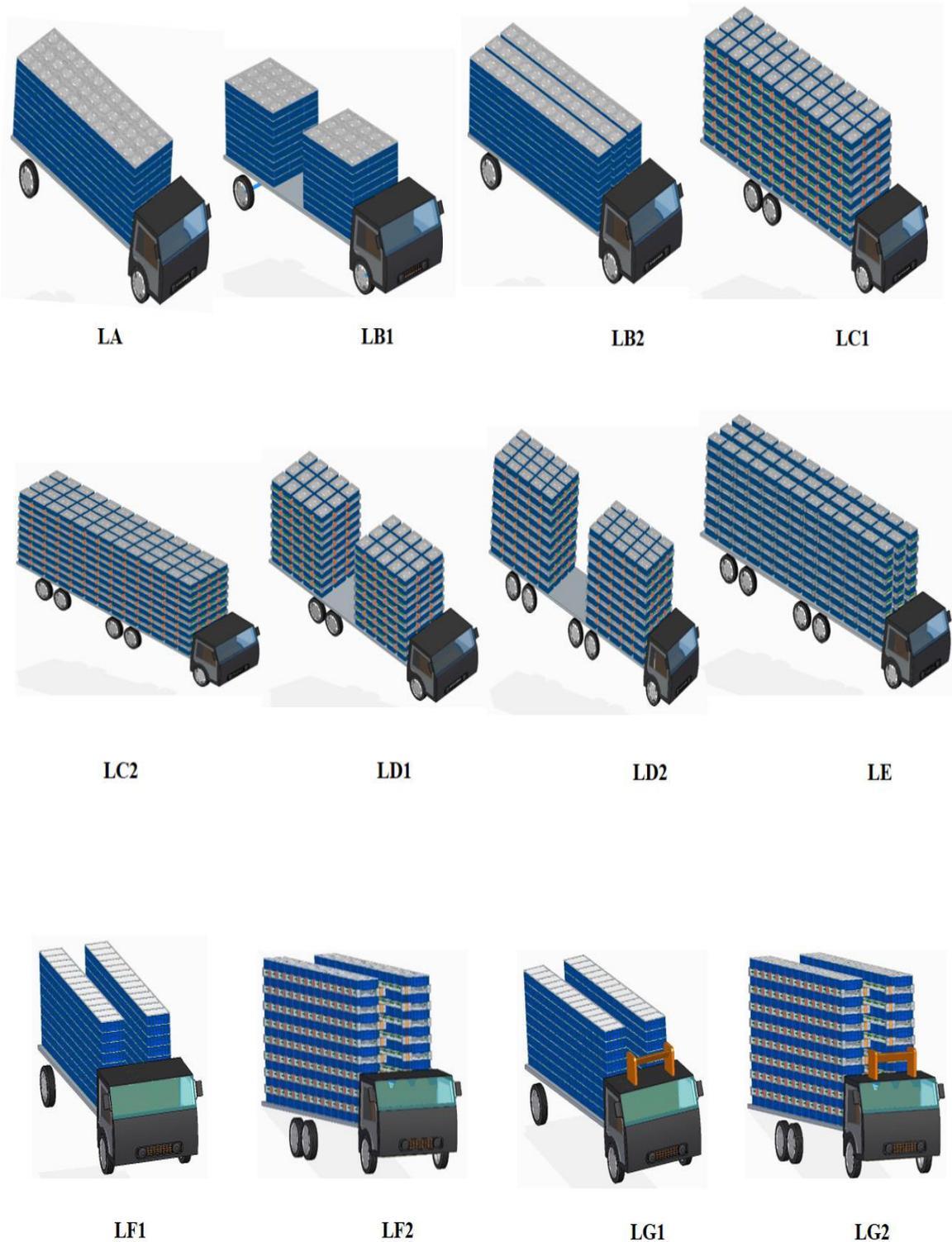
Fonte: Elaborado pelo autor

Para os cálculos das forças de arrasto e sustentação foi utilizado o *software xflow* para a seção convencional NACA 4415 com ângulo de ataque de 20° . O escoamento foi parametrizado como turbulento, de acordo com as simulações fluidodinâmica.

Na concepção dos modelos virtuais de *layout* de carga foi utilizado o *software Solid Edge ST10*. Os modelos virtuais foram feitos em escala natural e foi mantido os detalhes das caixas de transporte e espaçadores para o estudo do comportamento do vento ao longo da carga através da simulação fluidodinâmica.

A Figura 10 mostra os tipos de *layouts* que foram avaliados (modelos virtuais): convencional (LA), alternativos (LB1 e LB2), com espaçadores (LC1, LC2, LD1, LD2, LE), sem a fileira central (LF1), sem a fileira central e espaçadores instalados (LF2), sem a fileira central e aerofólio instalado no caminhão (LG1) e sem a fileira central, espaçadores e aerofólio instalados (LG2).

Figura 10 - Modelos virtuais das modificações de *layouts* avaliados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação aos *layouts* alternativos, as granjas da região Nordeste utilizam o seccionamento da carga para criar um espaço central entre a carga (*layout* LB1). As granjas das regiões Sul e Sudeste do país fazem uso de outro tipo de *layout* alternativo (*layout* LB2),

utilizando a mesma disposição das caixas do *layout* convencional, porém com um espaço entre as fileiras para servir como corredor de circulação de vento. Em ambos os *layouts* as caixas são dispostas transversalmente ao longo da carroceria do caminhão.

Os espaçadores foram utilizados para modificar o *layout* convencional criando o *layout* LC1 e foi proposto o *layout* LC2, em que as caixas são distribuídas longitudinalmente, em vez da distribuição transversal. Com esta nova distribuição das caixas ao longo da carroceria do caminhão, o produtor conseguiria acrescentar mais uma fileira de caixas, porém teria que fazer uso de uma carroceria maior.

Foram propostos o *layout* LD1, que corresponde ao *layout* LB1 com espaçadores; o *layout* D2 corresponde ao *layout* LC2 com seccionamento da carga para criar um espaço central e o *layout* LE corresponde ao *layout* LC2 com três fileiras e um maior espaçamento entre os corredores verticais de circulação de vento (300 mm).

A fileira central se apresenta como uma região de elevada probabilidade de ocorrer estresse térmico, devido à falta de ventilação. Assim, foi usada uma nova disposição das caixas para criar uma configuração de carga sem a fileira central. O *layout* LF1 corresponde ao *layout* LA sem a fileira central e o *layout* LF2 corresponde ao *layout* LF1 com espaçadores. Para analisar as mudanças dos perfis da trajetória do vento com a instalação do aerofólio, foram propostos os *layouts* LG1, que corresponde ao *layout* LF1 com o aerofólio instalado na cabine do caminhão e o *layout* LG2 que corresponde ao *layout* LF2 com aerofólio.

Um resumo sobre o arranjo e modificações no perfil das caixas de transporte configurando o tipo de *layout* na carga estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo dos modelos virtuais a serem analisados pela simulação fluidodinâmica

<i>Layout</i>	Descrição
LA	Caixas arranjadas em formato de um prisma retangular compacto.
LB1	Seccionamento da carga no arranjo LA, para criar um espaço central
LB2	Arranjo LA com formação de corredor de ar entre as fileiras da carga
LC1	LA com a inclusão de espaçadores.
LC2	LA com as caixas dispostas longitudinalmente utilizando espaçadores.
LD1	LB1 com uso de espaçadores.
LD2	LB1 com as caixas dispostas longitudinalmente utilizando espaçadores.
LE	LC2 com três fileiras, espaçadores e corredores verticais com 300 mm.
LF1	LA sem a fileira central.
LF2	LF1 com espaçadores.
LG1	LF1 com aerofólio instalado na cabine do caminhão.
LG2	LF2 com aerofólio instalado na cabine do caminhão.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Simulação computacional

Foram realizados ensaios iniciais para o projeto dos espaçadores, utilizando a simulação CFD com os espaçadores nas dimensões de 50 mm, 100 mm e 150 mm com *software Solidworks*, utilizando uma velocidade de ensaio de 20 m s⁻¹, umidade relativa do ar de 75% e temperatura de 25 °C, com o objetivo de determinar a dimensão a ser utilizada nos corredores de circulação de vento. Também foi analisada a legislação do conselho nacional de trânsito (CONTRAN) sobre as dimensões para veículos de carga, pois os espaçadores modificariam a largura e altura da carga.

Foram realizadas simulações para determinar a tensão e deformação máxima dos espaçadores, coletores e aerofólio com o *software Solid Edge ST10*, através do método de elementos finitos

As simulações CFD dos *layouts* propostos exigiriam simplificações dos modelos virtuais (Figura 11), em razão das limitações de processamento (*hardware*). A carga teve que sofrer uma redução no número de caixas, passaram de trezentos e cinquenta para duzentas e oitenta caixas, foram suprimidos todos os detalhes das caixas, que passaram a ser representadas virtualmente por um prisma retangular com permeabilidade de 60% para representar suas aberturas e para representar os espaçadores, a carga foi “explodida”.

Figura 11 - Simplificações do modelo virtual feitas com o uso do *software Solidworks*



Fonte: elaborado pelo autor.

Definidos o plano geométrico e os modelos virtuais simplificados, realizou-se os ensaios de simulação dos tratamentos, utilizando o *software Solidworks* com pacote CFD para avaliar os padrões de circulação de vento, utilizando velocidade de ensaio de 20 m s^{-1} (72 km h^{-1}), umidade relativa do ar de 75%, temperatura de 25°C e considerando a circulação do fluido entre os espaços vazios (corredores de circulação de ar).

3.4 Ensaios em túnel de vento

Foi construído um modelo em madeira do caminhão de transporte em escala de 1:10. As caixas de transporte foram fabricadas em escala de 1:10 pelo método de modelagem por Deposição de Material Fundido (*Fused Deposition Modeling - FDM*) com o uso de impressora 3D, da marca XYZ DAVINCI PRO. Os protótipos foram impressos em PLA (poliácido láctico).

A Figura 12 mostra o modelo em escala reduzida para ensaio em túnel de vento. As caixas foram impressas mantendo os detalhes da caixa de transporte.

Figura 12 - Protótipo do veículo de transporte e carga para ensaio em túnel de vento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram realizados ensaios qualitativos e quantitativos em túnel de vento. Os ensaios de marcação de linhas de trajetória (ensaio qualitativo) foram realizados no Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica de Fluídos (LAERO) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará (UFC), para avaliar a trajetória do vento ao longo da carga. O principal objetivo foi verificar a acurácia das simulações.

O túnel de vento do LAERO apresentava área de teste de 500 x 500 mm, em virtude das características do túnel, a quantidade de caixas da carga do modelo teve que sofrer redução. O *layout* LA foi ensaiado com uma carga de vinte e uma colunas de nove caixas dispostas em três fileiras; o *layout* LE foi ensaiado com uma carga de dezoito colunas de sete caixas dispostas em três fileiras e para verificar a funcionalidade do aerofólio, foi realizado um ensaio para avaliar o comportamento do vento no *layout* LE.

Devido as características do túnel, a montagem da carga foi realizada no interior da área de teste, que inviabilizou a montagem dos demais *layouts* simulados e devido a problemas de instabilidade da carga, os ensaios foram realizados com velocidade de 8 m s^{-1} ($Re = 266.395,34$), Temperatura de 25°C e umidade relativa de 65%.

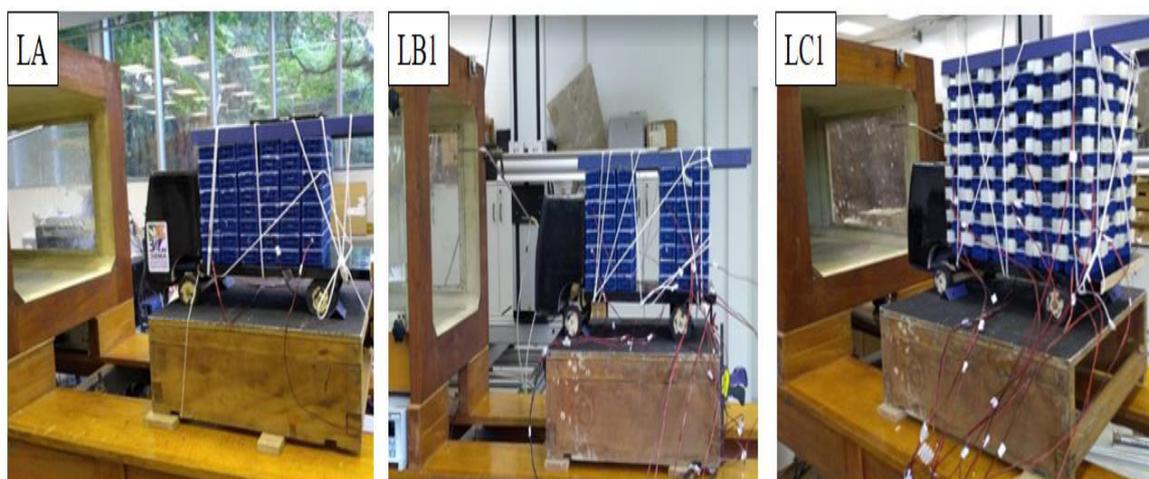
No Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) foram realizados os ensaios quantitativos em túnel de vento para medir a velocidade do vento no interior das caixas (VIC), nos *layouts* LA, LB1 e LC1, foram realizados ensaios com as caixas vazias e cheias.

Nos ensaios com as caixas cheias, elas foram preenchidas com isopor para simular uma densidade de 8 frangos por caixas. O túnel de vento utilizado era aberto com área de teste

de 500 mm x 500 mm e capacidade de gerar ventos de até 42 m s^{-1} .

Os ensaios foram realizados com velocidades de 10 m s^{-1} ($\text{Re} = 332.994,60$), 15 m s^{-1} ($\text{Re} = 499.491,90$), 20 m s^{-1} ($\text{Re} = 665.989,10$) e 30 m s^{-1} ($\text{Re} = 998.983,70$), com duração média de 40 minutos para cada *layout* avaliado e a cada 30s era realizado o registro da VIC pelo sistema de aquisição de dados do túnel (Figura 13).

Figura 13 - Ensaios quantitativos em túnel de vento da velocidade interna das caixas



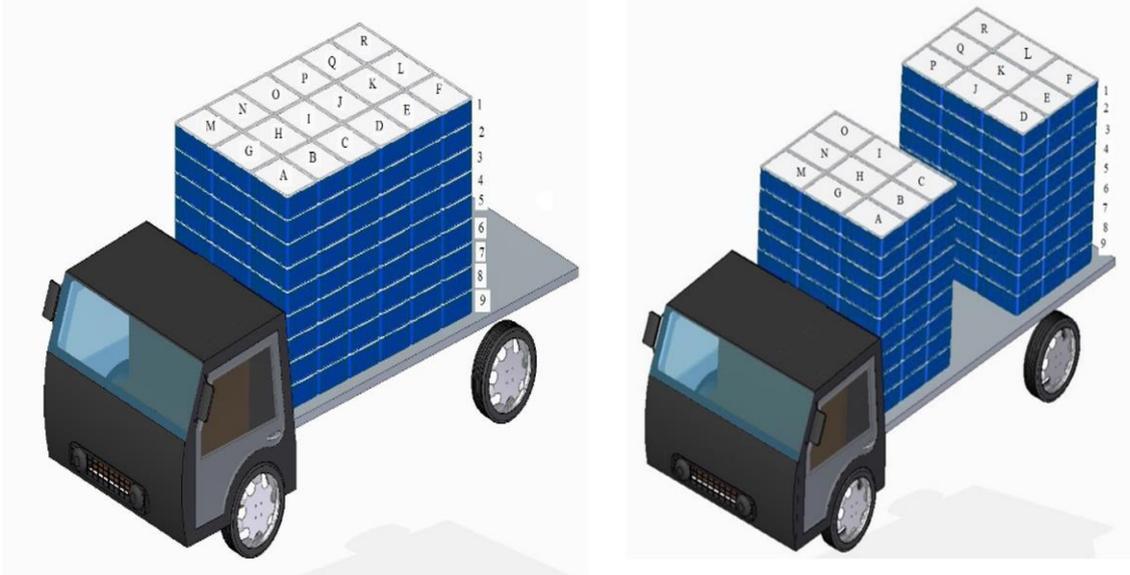
Fonte: Elaborado pelo autor.

A velocidade do vento no interior das caixas foi mensurada de forma indireta, utilizando catorze termistores, sensor de temperatura composto por material semicondutor sinterizado, capaz de exibir uma grande alteração de resistência proporcional a pequenas alterações de temperatura. Assim, a velocidade foi calculada em função da variação de temperatura do termistor no interior das caixas.

Os catorze sensores foram instalados nas regiões mais crítica para as aves, onde se localizavam os “bolsões de calor” ou “núcleos térmicos”, região de elevada carga térmica e umidade, desfavorável às trocas térmicas por convecção (BARBOSA FILHO *et al.*, 2009).

A Figura 14 mostra a localização dos sensores na carga. Considerando a carga como um *array* de dimensão $9 \times 6 \times 3$, isto é, um conjunto de três matrizes contendo nove linhas e seis colunas, cada coluna da carga foi nomeada com uma letra e as linhas foram nomeadas numericamente de forma decrescente. Os sensores foram instalados nas seguintes caixas: H9, H7, H6, H4, I8, I5, I4, J9, J7, J6, J4, K8, H5, K4.

Figura 14 - Localização dos sensores na carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 Análise estatística

Para verificar a hipótese deste trabalho, a análise estatística necessitava comprovar se há dependência entre o arranjo das caixas (*layout* da carga) e o fluxo de vento no interior das caixas (VIC). A análise estatística seguiu o modelo estatístico de delineamento inteiramente casualizado.

$$Y_{ij} = \mu + t_i + e_{ij}$$

Y_{ij} = valor observado na unidade experimental, velocidade do vento no interior das caixas;

μ = efeito geral da média da velocidade do vento no interior da caixa em função do *layout* da carga;

t_i = efeito do tratamento (efeito do *layout*)

e_{ij} = erro aleatório (resíduo).

Para verificar se houve diferença significativa entre os *layouts* ensaiados, foi realizado a análise de variância das médias das VICs considerando um nível de significância de 0,05 e a validação de seus pressupostos com o uso do *software R Core Team* (2018).

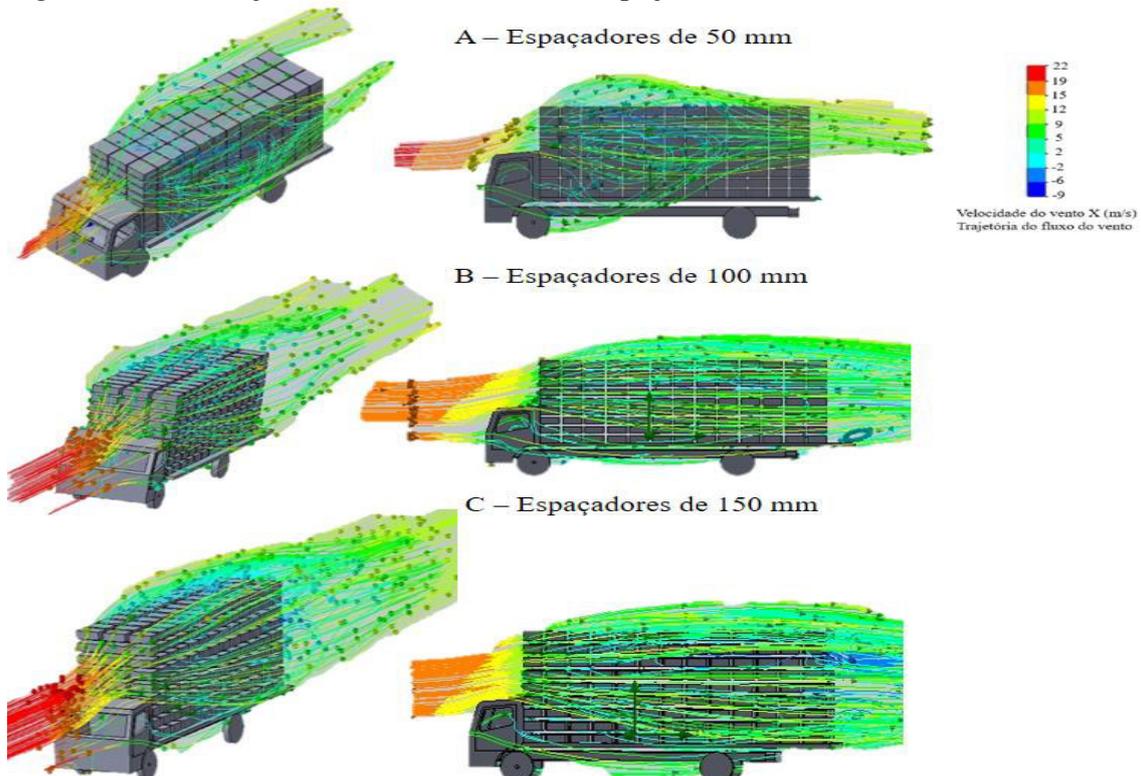
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente são apresentados os resultados do projeto dos espaçadores, coletores e aerofólio para definir as dimensões dos corredores de circulação de ar, a análise de tensão-deformação e o cálculo das forças aerodinâmicas dos dispositivos. Definido o *design* dos dispositivos, foram realizadas as simulações CFD dos *layouts* propostos (Figura 10) para analisar o comportamento do vento ao longo da carga. Para validar as simulações foram realizados ensaios em escala reduzida em túnel de vento com marcação de trajetória e análise quantitativa da ventilação interna no interior das caixas para confirmar ou não a hipótese deste trabalho.

4.1 Projeto dos espaçadores, coletor e aerofólio

Para a escolha das dimensões dos corredores de circulação de ar, percebeu-se que os espaçadores de 150 mm apresentaram o maior fluxo de vento no interior da carga (Figura 15), sugerindo uma relação diretamente proporcional entre o aumento da dimensão dos corredores entre as caixas e a circulação de vento na carga, que poderia ser atribuído pela maior descompactação da carga.

Figura 15 - Simulações fluidodinâmicas com espaçadores de 50 mm, 100 mm e 150 mm

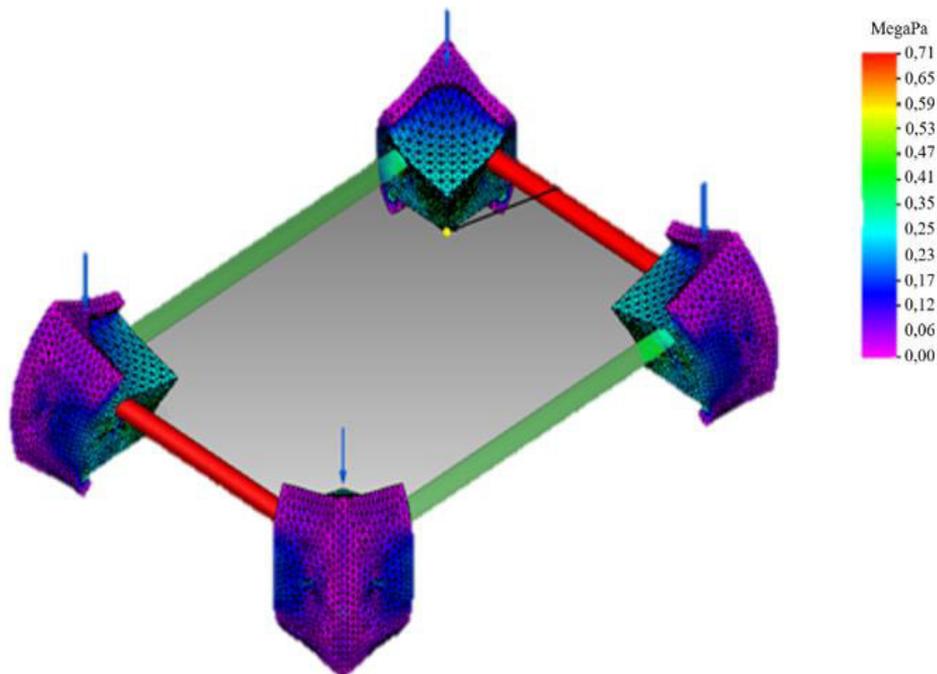


Fonte: Elaborado pelo autor.

Entretanto, o CONTRAN estabeleceu como limite legal as dimensões para veículos simples (caminhão da granja) de 2,60 m largura e 4,40 m de altura e 14 m de comprimento. Portanto, optou-se pela dimensão de espaçadores de 150 mm que resultou em uma carga com as seguintes dimensões: 2,00 m de largura, 4,30 m de altura e 11,50 m de comprimento. Assim, o espaçador de 150 mm, além de aumentar a circulação do vento no interior da caixa, atendeu a legislação vigente.

A Figura 16 mostra que a coluna do espaçador suportaria uma tensão de deformação plástica máxima de aproximadamente 0,3 MPa, como consequência suporta uma pressão vertical de aproximadamente 750 kg. Considerando que o peso médio de cada caixa cheia (8 aves) é de 22 kg, assim o empilhamento máximo suportado seria de 34 caixas. Normalmente, a carga de transporte não ultrapassaria 13 caixas empilhadas (286 kg). Portanto, o espaçador possuía uma resistência mecânica que atenderia às exigências do transporte.

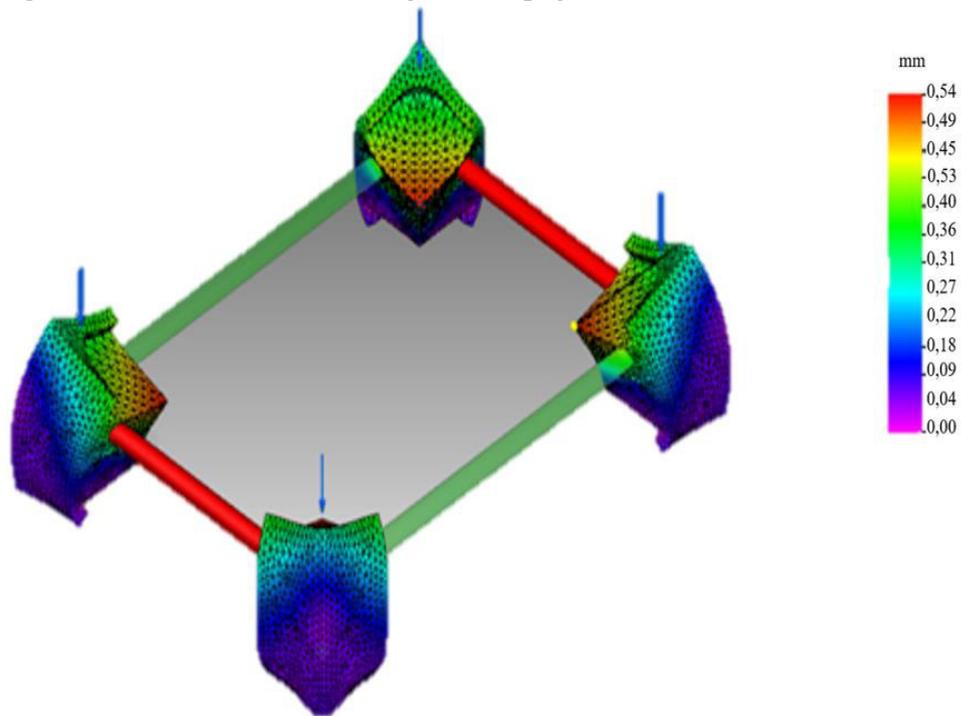
Figura 16 - Análise de tensão do espaçador



Fonte: Elaborado pelo autor.

Prosseguindo com a análise estrutural do espaçador, realizou-se a simulação de deformação (Figura 17). Percebeu-se que a deformação máxima foi de aproximadamente 0,53 mm antes da ruptura. Este baixo valor poderia ser explicado pelo caráter maciço das colunas, que contribuiria para a rigidez e estabilidade durante o empilhamento da carga.

Figura 17 – Análise de deformação do espaçador



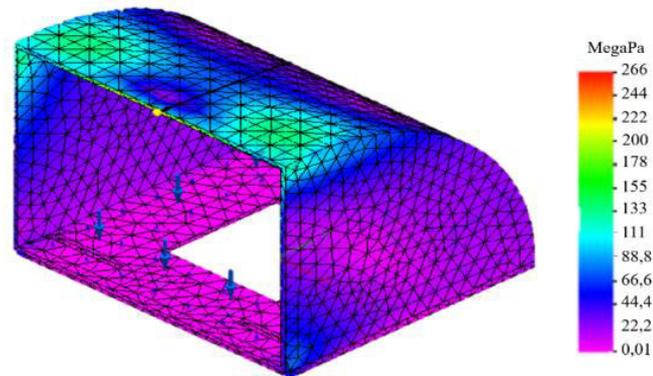
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Dispositivos de captação de vento

Durante a concepção do projeto, optou-se em construir o coletor com o mesmo tipo de material das caixas de transporte, logo a análise dos esforços sofridos pelo coletor durante o transporte foi essencial para avaliar sua durabilidade

A Figura 18 mostra os resultados do ensaio de tensão do coletor tipo coifa. A tensão máxima obtida na estrutura foi de 266 MPa na parte frontal, sugerindo que estruturalmente o coletor conseguiria suportar ventos de até 150 km h^{-1} . Devido ao elevado valor de resistência estrutural do coletor, não foi realizado o ensaio de deformação.

Figura 18 – Análise de tensão do coletor tipo coifa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram realizadas simulações aerodinâmicas para o coletor e o aerofólio. O coletor tipo coifa apresentou elevado módulo de força de arrasto, o que poderia causar danos estruturais às caixas, uma vez que sua instalação seria no topo da carga, nas ranhuras das caixas de transporte. Por outro lado, o aerofólio cuja principal função é direcionar o vento para o interior da carga, possuía módulos da força de arrasto e sustentação que favoreceriam sua utilização, pois seria instalado no topo da cabine do caminhão, sem causar danos estruturais (Tabela 6).

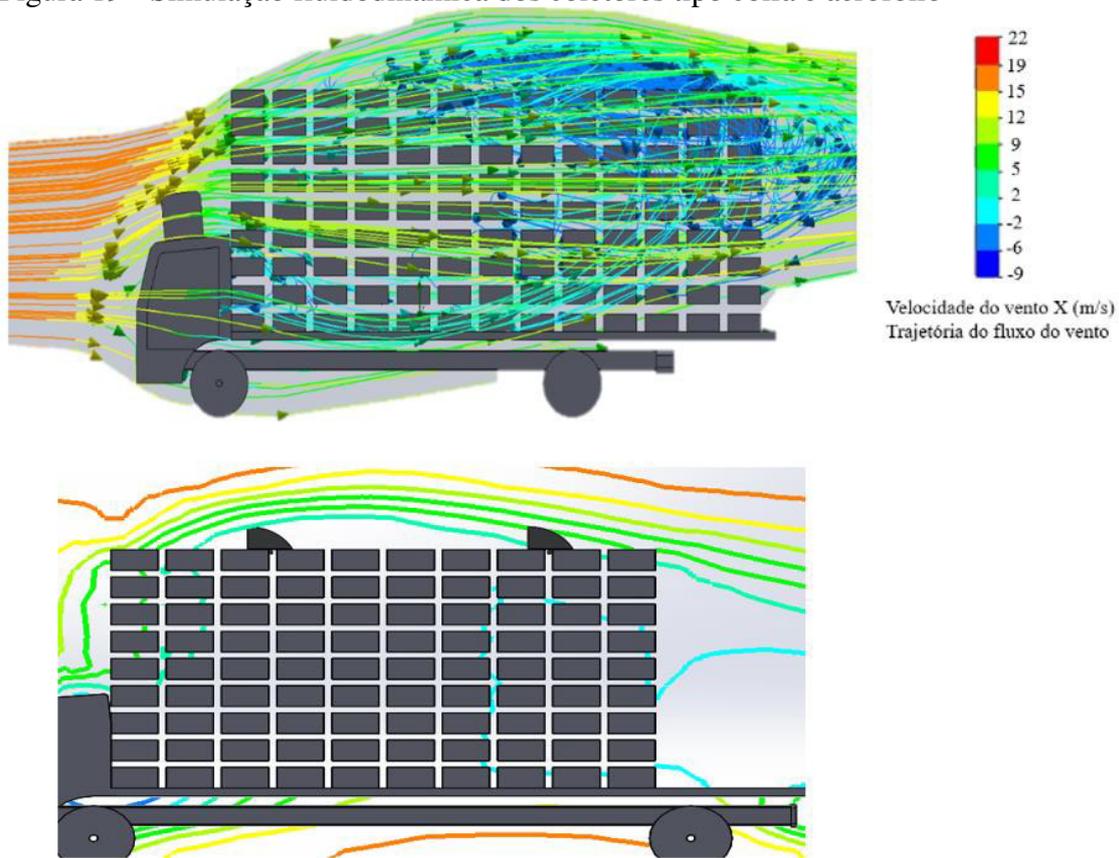
Tabela 6 - Resultados da força de arrasto e sustentação dos dispositivos de captação de vento

Dispositivo	Coefficiente de arrasto	Coefficiente de sustentação
Coletor (coifa)	1,42	-
Aerofólio	0,87	1,23

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, os resultados da simulação fluidodinâmica com o coletor tipo coifa mostrou que o perfil da trajetória do vento não favoreceria sua utilização, uma vez que não promoveria a captação do vento, como pode ser observado pelo mapa de isolinhas da trajetória do vento (Figura 19). Este resultado poderia ser atribuído aos aspectos relacionados à aerodinâmica da cabine e da região frontal da carga, pois promovem uma forte perda de energia cinética, criando um vórtex que direciona o vento para cima dos coletores (GILKESON *et al.*, 2009; 2016).

Figura 19 - Simulação fluidodinâmica dos coletores tipo coifa e aerofólio



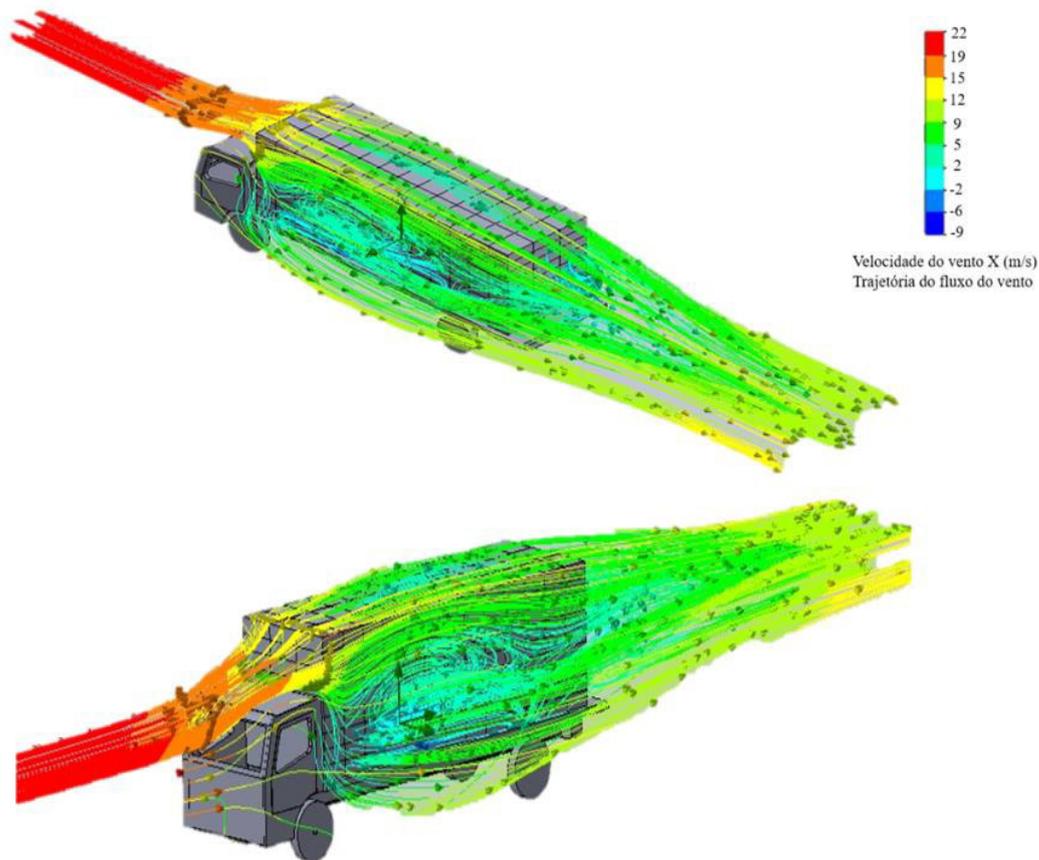
Fonte: Elaborado pelo autor.

O *design* do aerofólio resultou no maior fluxo de vento no interior da carga, pois conseguiu direcionar o vento para a parte frontal da carga, minimizando o deslocamento para o topo. Observou-se um aumento da turbulência na traseira do caminhão, criando uma diferença de pressão que favoreceria a circulação do vento ao longo da carga, o que poderia proporcionar redução do estresse térmico e minimizar as perdas na qualidade da carne das aves (SPURIO *et al.*, 2015). Os resultados CFD com o uso conjunto do aerofólio e dos espaçadores apontaram para um melhor aproveitamento do vento por direcioná-lo para os corredores de circulação.

4.3 Simulação computacional

Como mostra a Figura 20 a simulação CFD do *layout* LA, o vento perdeu energia ao se chocar com a estrutura frontal do veículo (cabine e carga), reduzindo sua velocidade de 22 m s^{-1} para 12 m s^{-1} e direcionando a maior parte do vento para as laterais do veículo, com variação de velocidade entre 2 m s^{-1} a 9 m s^{-1} , corroborando com os resultados apresentados por Barbosa Filho *et al.* (2009), em que as caixas localizadas nas laterais da carga possuíam temperatura mais amenas.

Figura 20 - Simulação fluidodinâmica do *layout* convencional (LA)

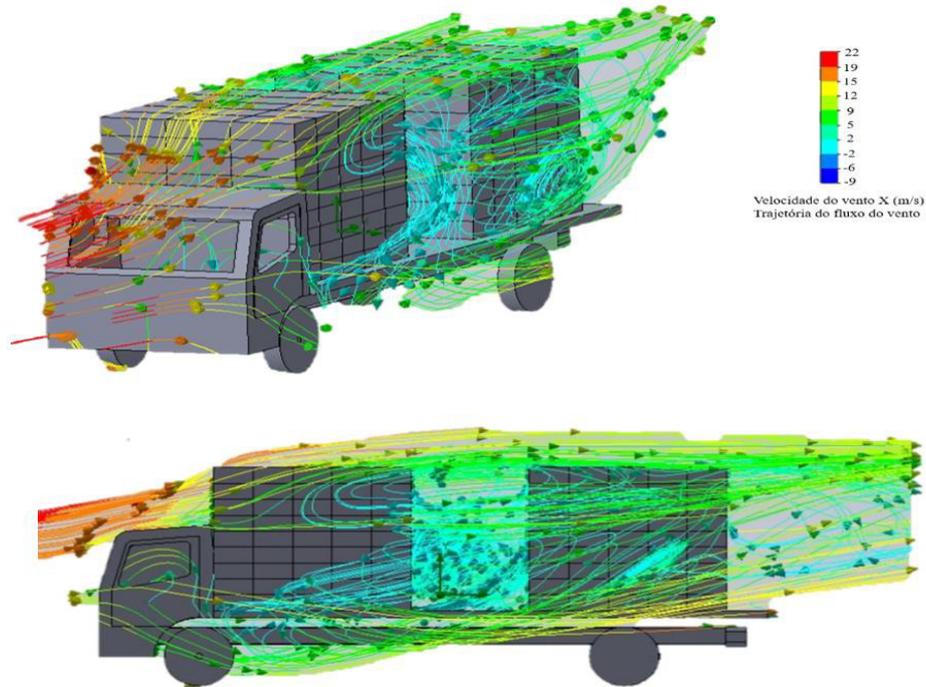


Fonte: Elaborado pelo autor.

Também foi observado que o regime de deslocamento do vento foi caracterizado pelo arrasto para a parte traseira da carga, que além da turbulência, originou uma região de baixa pressão favorecendo a sucção do vento para o interior da carga. Como relatado anteriormente em simulação computacional de fluidos no transporte rodoviário de ovelhas (GILKESON *et al.*, 2016), suínos (PEREIRA *et al.*, 2018) e aves (SEDOORF; SCHMIDT, 2017).

O seccionamento da carga (*layout* LB1) gerou uma região de turbulência no vão central, devido ao *layout* LB1 canalizar o vento das laterais para o interior do vão central (Figura 21), criando uma segunda região de sucção, além da região de baixa pressão situada na traseira da carga, claramente visualizada no *layout* LA (Figura 20). Entretanto, embora ocorra uma zona de elevada turbulência no vão central no *layout* LB1, o vento não conseguiu circular entre as caixas, em virtude de seu arranjo compacto. Observou-se que o vento ficou retido no vão central em virtude da alta turbulência.

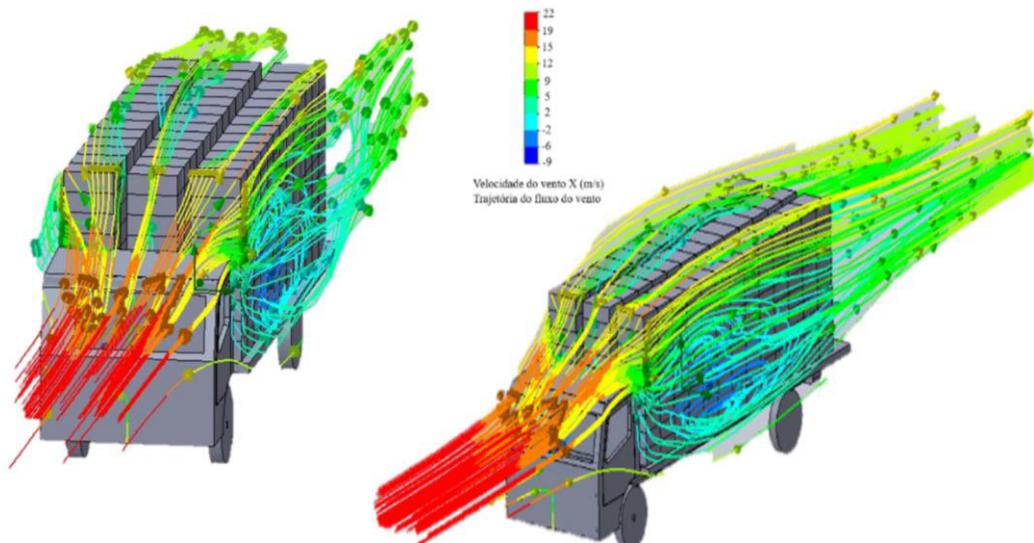
Figura 21 - Simulação fluidodinâmica do *layout* alternativo (LB1)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, a criação de corredores verticais entre as fileiras da carga (*layout* LB2) resultou na circulação de vento com velocidades variando de 2 m s^{-1} a 5 m s^{-1} entre as fileiras da carga (Figura 22). Os baixos valores de velocidades poderiam ser explicados pela perda de energia com a parte frontal do veículo e pelo atrito (perda de carga) do vento com as caixas à medida que percorria o interior da carga.

Figura 22 - Simulação fluidodinâmica do *layout* alternativo (LB2)



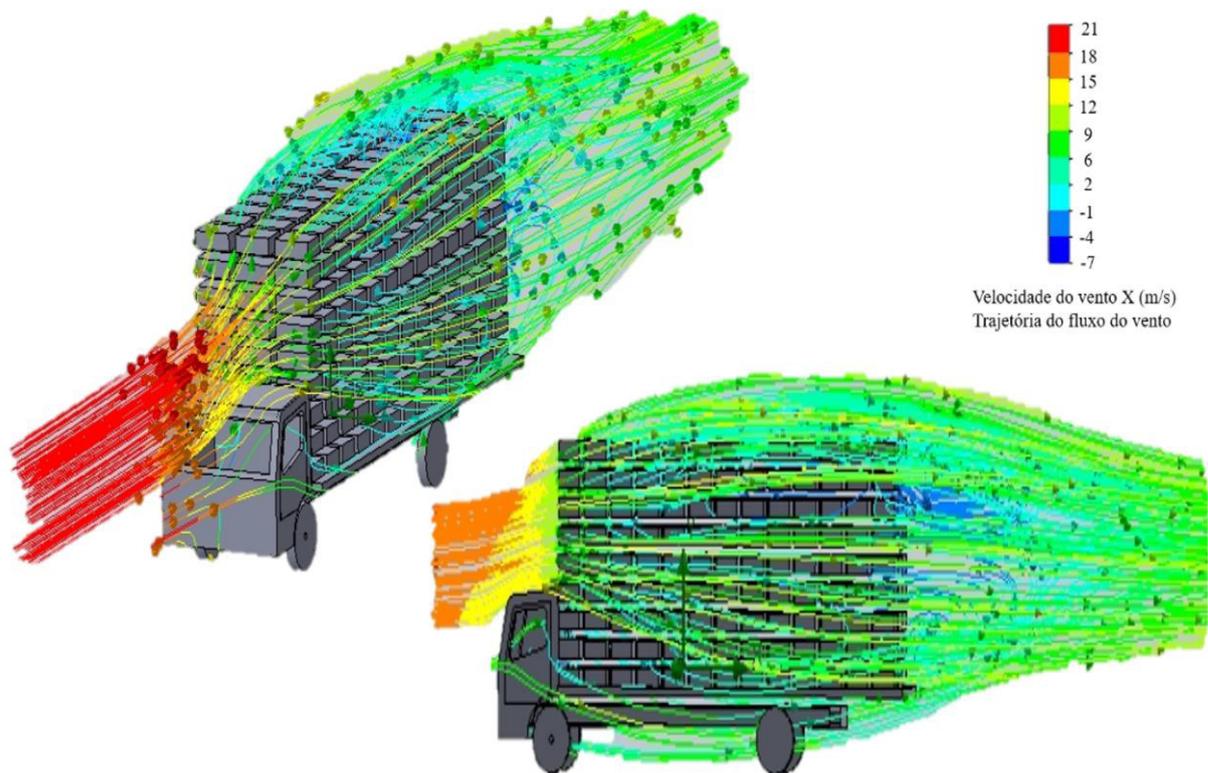
Fonte: Elaborado pelo autor.

A renovação do ar no interior da carga pode ser considerada uma solução viável para reduzir a energia térmica durante o transporte de animais (KETTLEWEL *et al.*, 2001; NORTON; KETTLEWELL; MITCHELL, 2013; GILKESON *et al.*, 2016). Enquanto o caminhão se movimentar, a circulação do vento existirá e poderá ser utilizada de forma contínua para reduzir os impactos do estresse térmico durante o transporte, favorecendo o bem-estar das aves e reduzindo a mortalidade e o desenvolvimento de características indesejáveis na carne (SPURIO *et al.*, 2015).

De um modo geral, observou-se a formação de regiões de baixa pressão nas laterais da carga, caracterizadas pela formação de vórtices. O que rege o regime de escoamento turbulento, nos *layouts* LA, LB1 e LB2. Entretanto, estas regiões de baixa pressão não são aproveitadas para aumentar o fluxo de vento no interior da carga em razão do arranjo compactado das caixas.

O uso dos espaçadores no *layout* LC1 possibilitou o melhor aproveitamento do vento das laterais da carga, pois favoreceu sua canalização para o interior da carga, com velocidade variando entre 9 m s^{-1} a 12 m s^{-1} (Figura 23).

Figura 23 – Simulação fluidodinâmica do *layout* com espaçadores (LC1)

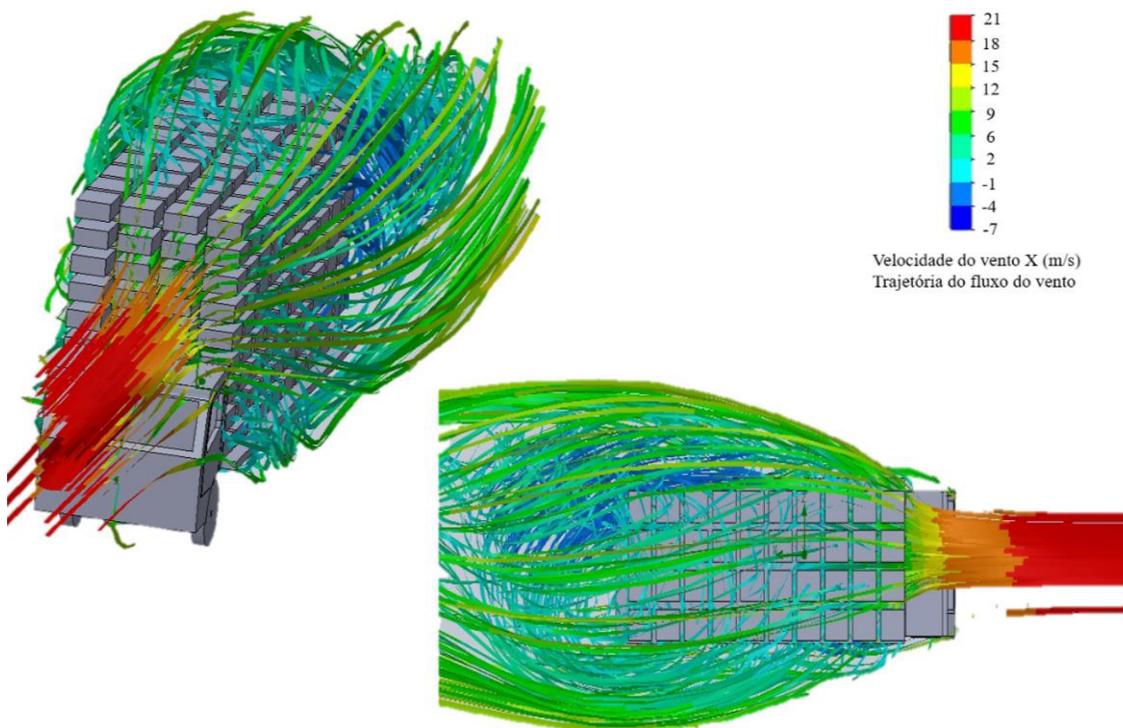


Fonte: Elaborado pelo autor.

Constatou-se que o *layout* LC1 possuía uma distribuição mais uniforme do vento no topo da carga, em virtude da maior captação de vento da parte frontal da carga proporcionada pelo aumento da sua altura com uso dos espaçadores. Além do aumento do fluxo de vento no interior da carga, observou-se a predominância do regime de escoamento turbulento, comprovado pelos valores negativos da velocidade, o que poderia favorecer os processos de troca térmica por convecção e a renovação da atmosfera supersaturada por vapor d'água, oriunda da respiração das aves e da prática do molhamento (BARBOSA FILHO *et al.*, 2009; RUI; SOUZA; SILVA, 2011; PINHEIRO, 2015).

A Figura 24 mostra uma nova proposta de arranjo com a utilização dos espaçadores, em que as caixas foram dispostas longitudinalmente ao longo da carroceria do caminhão (*layout* LC2).

Figura 24 - Simulação fluidodinâmica do *layout* com espaçadores (LC2)



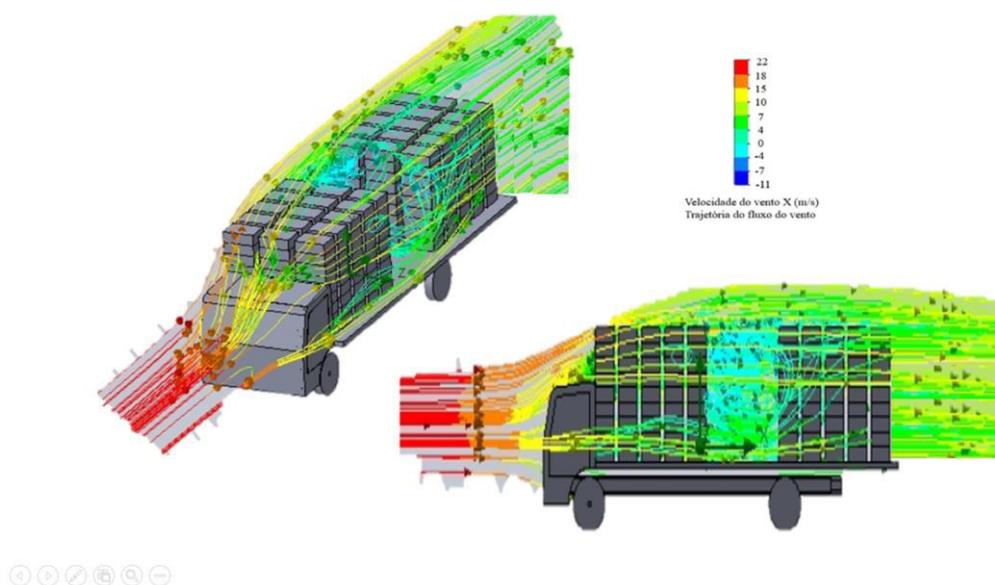
Fonte: Elaborado pelo autor.

O aumento de corredores de circulação entre as caixas favoreceu o fluxo de vento no *layout* LC2, observou-se que o vento conseguiu fluir com maior facilidade em virtude da turbulência do escoamento, principalmente na traseira da carga. Como as caixas foram dispostas longitudinalmente, o vento teria uma maior área de contato, que poderia favorecer os mecanismos convectivos de troca térmica e de massa (retirada da umidade). Foi observado que

o aumento de um corredor vertical no *layout* LC2 aumentou a turbulência do vento no interior da carga quando comparado com o *layout* LC1 (Figura 23).

A Figura 25 mostra que o uso dos espaçadores e do seccionamento da carga (*layout* LD1) propiciou a canalização do vento das laterais da carga para o vão central, ocasionando uma maior turbulência, quando comparado ao *layout* LB1 (Figura 21). Observou-se nitidamente que o vento circula com maior facilidade entre as caixas.

Figura 25 - Simulação fluidodinâmica do *layout* com espaçadores (LD1)

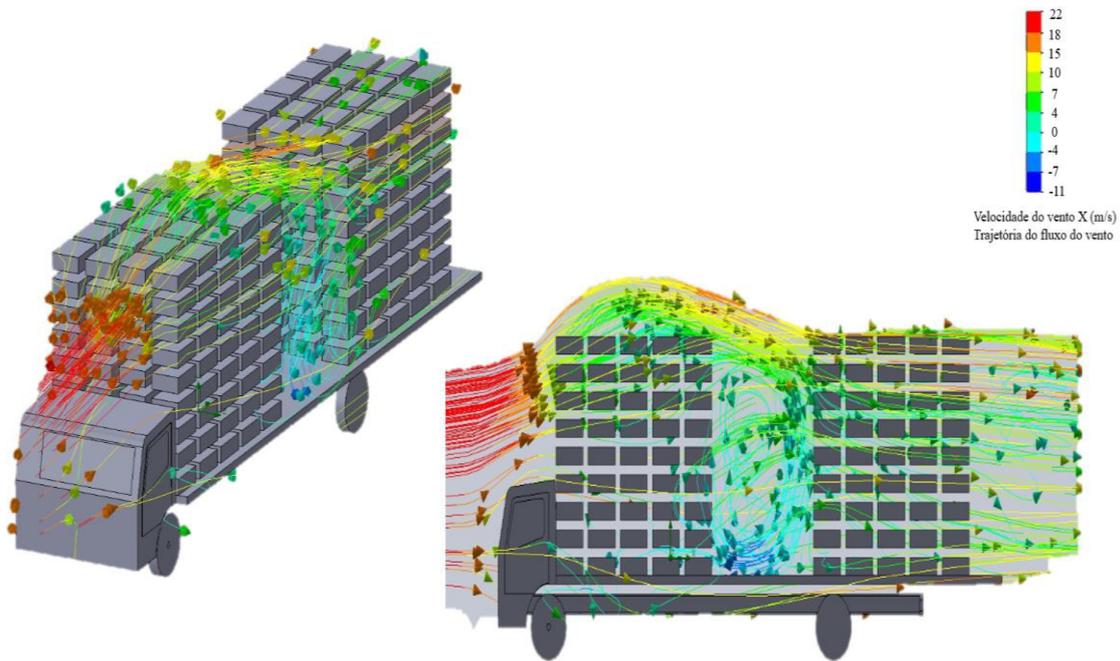


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os *layouts* LB1 e LD1 proporcionaram a retirada das caixas das regiões situadas nos “bolsões de calor”. Contudo, mesmo com o aumento do fluxo de vento, a simulação sugeriu que as caixas localizadas próximas à cabine apresentariam uma elevada probabilidade de acúmulo de calor, fato que necessitaria de investigações para verificar se houve o deslocamento dos “bolsões de calor”.

A Figura 26 mostra o *layout* LD2, em que a carga foi seccionada com as caixas arranjadas na posição longitudinal. A simulação mostrou que, assim como no *layout* LC2, o aumento de mais um corredor vertical entre as fileiras das caixas no *layout* LD2 favoreceu a canalização do vento que se choca com a parte frontal da carga, o que ocasionou o aumento da turbulência na região central.

Figura 26 - Simulação fluidodinâmica do *layout* com espaçadores (LD2)

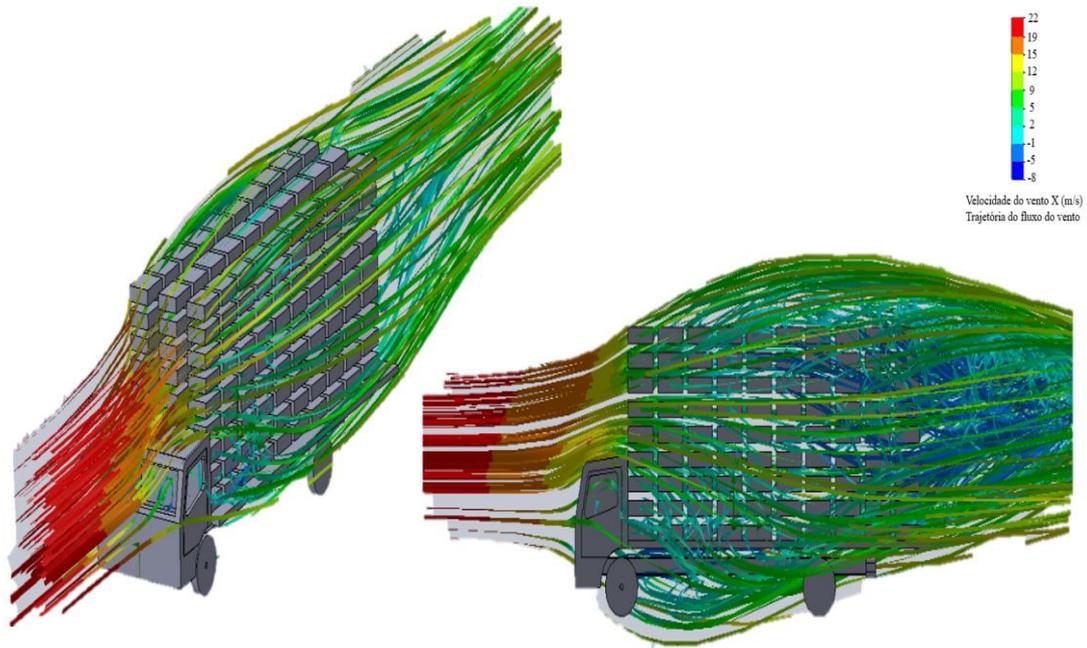


Fonte: Elaborado pelo autor.

Também foram observadas mudanças expressivas nos perfis de velocidade e trajetória do vento no topo da carga. O vento ao se chocar com a parte frontal foi direcionado para o topo, canalizado para o centro e arrastado para a parte final da carga com velocidade elevada, variando entre 10 m s^{-1} a 15 m s^{-1} . Portanto, a simulação fluidodinâmica sugeriu que o *layout* LD2 possuiria um melhor aproveitamento das regiões de baixa pressão.

No *layout* LE (Figura 27), as caixas foram dispostas longitudinalmente ao longo da carroceria, mantendo constante a medida dos corredores horizontais e aumentando a distância entre as fileiras (corredores verticais). Observou-se um maior fluxo de vento no interior da carga, devido ao aumento da velocidade (9 m s^{-1} a 12 m s^{-1}), em comparação com o *layout* LC2 (Figura 24). Além disso, vale destacar que o aumento da distância dos corredores verticais entre as fileiras das caixas ocasionou o aumento da turbulência na região traseira no *layout* LE (Figura 27), que favoreceu o arrasto (sucção) do vento entre as caixas.

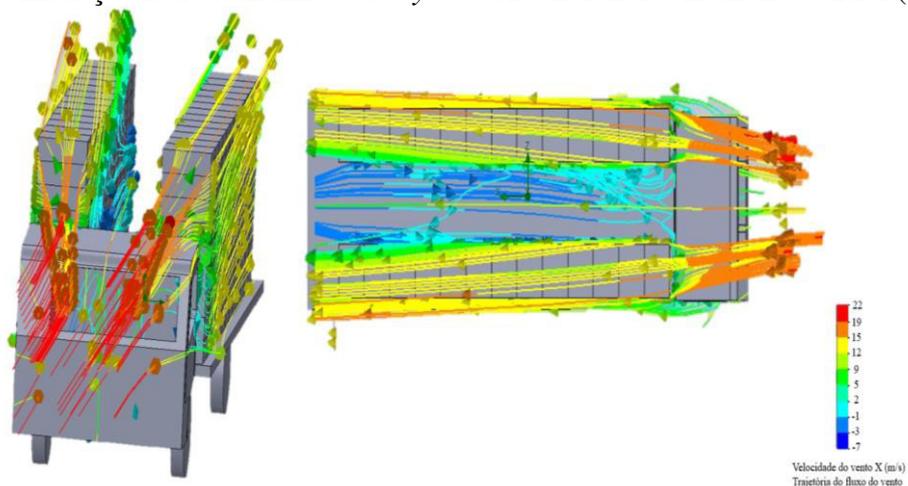
Figura 27 - Simulação fluidodinâmica do *layout* com espaçadores (LE)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 28 mostra uma nova proposta de *layout*, onde a fileira central seria eliminada. No *layout* convencional, a fileira central, onde se concentram os “bolsões de calor”, é o local de maior probabilidade de ocorrência de mortes por estresse térmico (HUNTER; MITCHELL; MATHEU, 1997; KETTLEWELL *et al.*, 2001; BARBOSA FILHO *et al.*, 2009). Sem a fileira central da carga (*layout* LF1), o vento seguiu o mesmo padrão do *layout* LA, concentrando-se nas laterais da carga, porém com velocidades maiores, variando de 12 m s^{-1} a 15 m s^{-1} .

Figura 28 - Simulação fluidodinâmica do *layout* convencional sem fileira central (LF1)

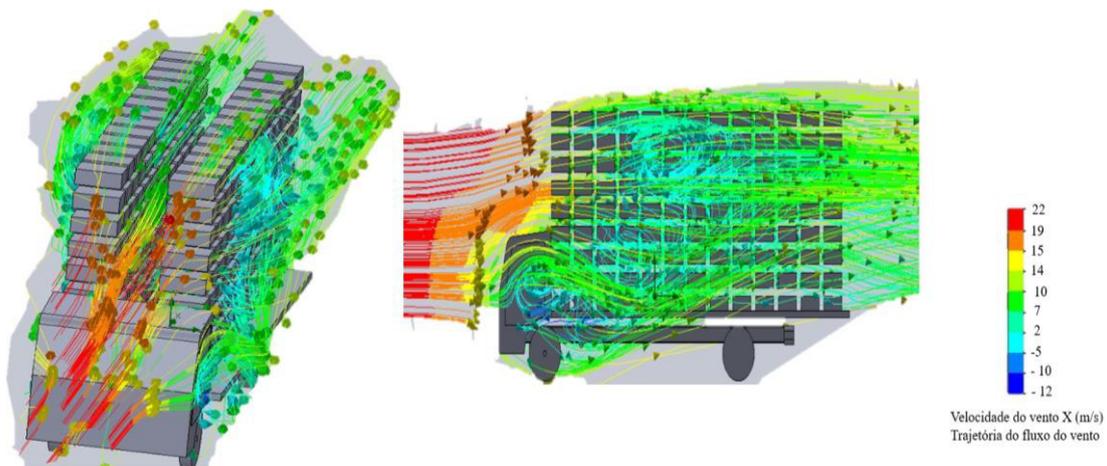


Fonte: Elaborado pelo autor.

No *layout* LF1 foi observada a ausência da região de elevada turbulência na traseira da carga, talvez em virtude da geometria da carga que favoreceria a turbulência no corredor longitudinal central e nas laterais das duas fileiras de caixas.

A modificação do *layout* LF1 com os espaçadores, *layout* LF2, criou uma geometria que favoreceu a criação de vórtices pelo fato de serem geradas três regiões de alta turbulência (corredor central, lateral direita e esquerda da carga), o vento que se concentrou nas laterais foi canalizado e arrastado para o centro da carga e retornou para as laterais, numa espécie de movimento cíclico (Figura 30).

Figura 29 - Simulação fluidodinâmica do *layout* convencional sem fileira central com espaçadores (LF2)



Fonte: Elaborado pelo autor.

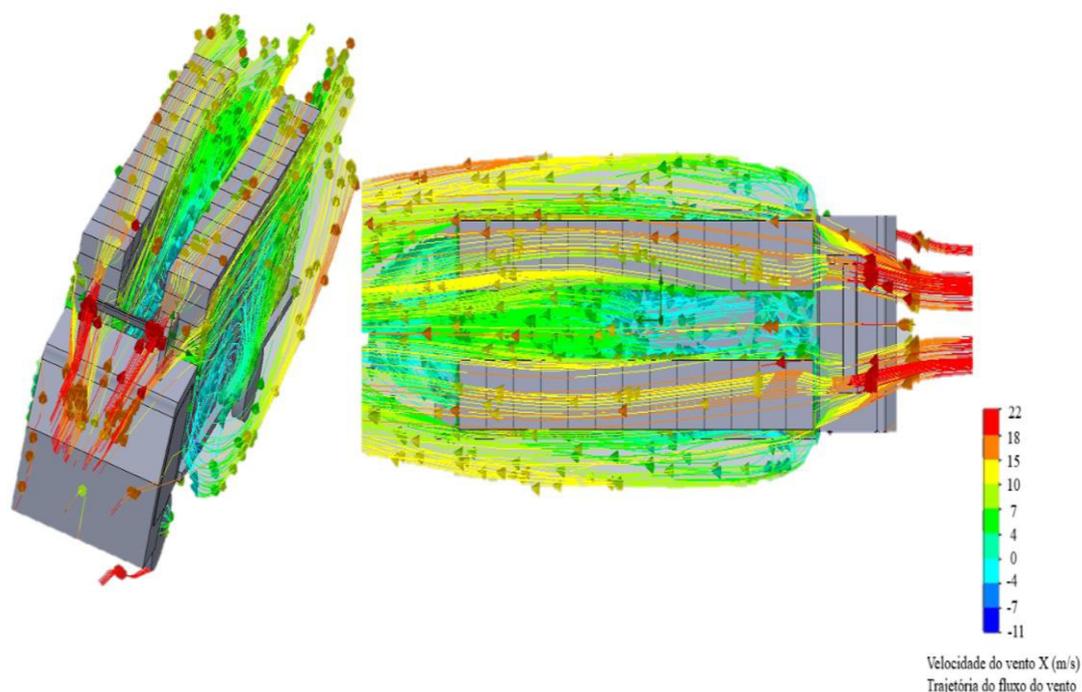
Além do movimento turbulento cíclico, observou-se uma drástica mudança na trajetória do vento no topo da carga, embora sua altura tenha sido modificada (aumentada). A simulação sugere que o *layout* LF2 conseguiu minimizar as perdas de energia do vento ao se chocar com o veículo. O aumento da turbulência direcionou o vento para o topo da carga e a maior parcela do vento foi oriunda dos corredores de circulação, como observado pelo movimento de ascendência e descendência do vento no topo da carga (Figura 30), além dos valores de velocidades elevados se comparados com os *layouts* LA, LB1 e LB2.

Analisando o *layout* LF2 com o *layout* LF1, observou-se que os espaçadores contribuíram com o aumento da circulação de vento entre as caixas e com uma melhor distribuição do vento no topo da carga. Entretanto, a estabilidade da carga continuaria sendo um problema, que só poderia ser resolvido com o projeto e pesquisa de veículos apropriados

para o transporte de carga viva.

A instalação do aerofólio (*layout* LG1) proporcionou o aumento da ventilação e melhorou a distribuição do vento ao longo do corredor central, pois direcionou a massa de ar que atinge a parte frontal do veículo para o interior da carga (Figura 30). O aumento do fluxo de vento no corredor central, além de aumentar a turbulência da região, favoreceu a criação da região de baixa pressão. Este *layout* sugere uma maior ventilação da carga se comprado com LF1.

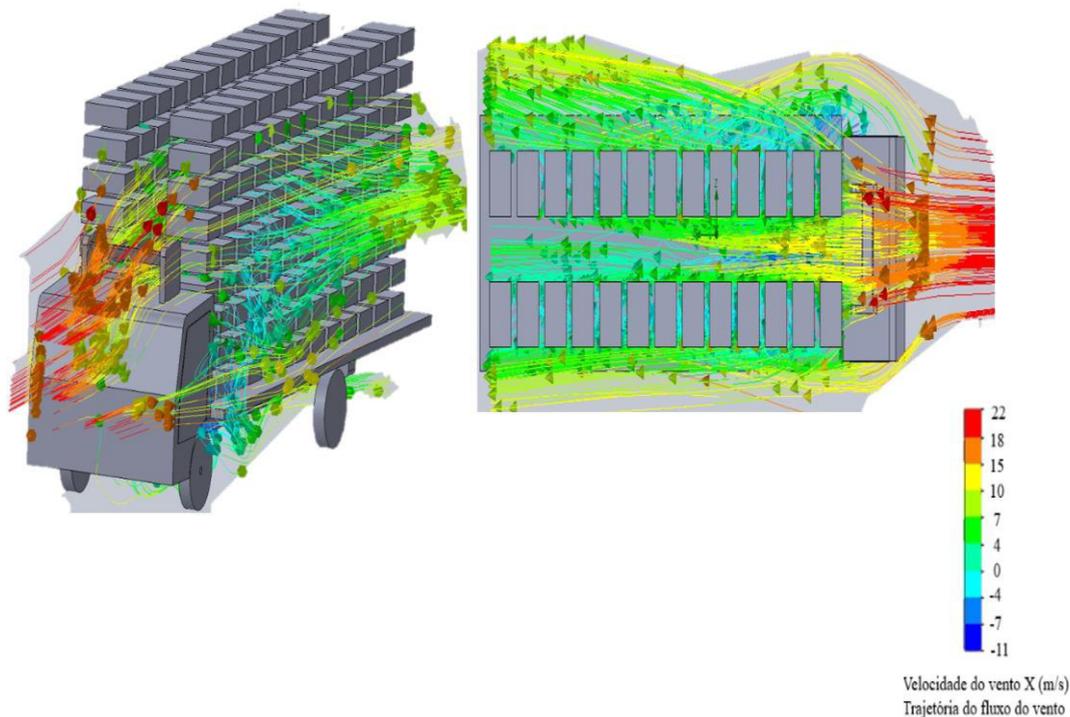
Figura 30 - Simulação fluidodinâmica do *layout* convencional sem fileira central com aerofólio instalado (LG1)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como mostra a Figura 31, observou-se que ao modificar o *layout* LF2 com os espaçadores, *layout* LG2, além a aumentar a altura da carga, obteve-se mais uma vez a ação positiva dos corredores na circulação de ar entre as caixas. O aerofólio direcionou uma grande massa de ar para o centro da carga e, devido os corredores criados pelos espaçadores, uma parte do vento do centro da carga retornou para as suas laterais, garantindo o aumento da circulação de vento entre as caixas. Praticamente o topo da carga não apresentou ventilação, tendo como causa mais provável a presença do aerofólio, que força a ventilação para o centro da carga.

Figura 31 - Simulação fluidodinâmica do *layout* convencional sem fileira central com aerofólio instalado e espaçadores (LG2)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos dos processos de simulação fluidodinâmica sugerem que modificar a arrumação das caixas pode ser uma forma de garantir um microambiente que favoreça os mecanismos de troca térmica das aves, para minimizar os efeitos dos agentes estressores. Porém, para minimizar o estresse térmico, deve-se garantir que o vento também circule no interior das caixas de transporte para que a fluidodinâmica e a termodinâmica possam interagir para garantir o bem-estar das aves.

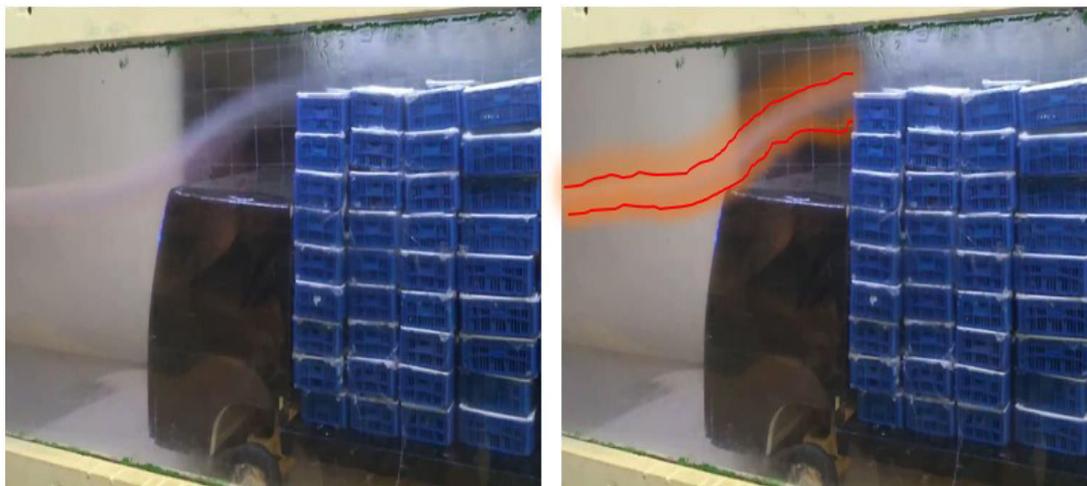
4.4 Ensaio em túnel de vento

4.4.1 Ensaio de marcação de linha de trajetória

A Figura 32 mostra como a geometria do veículo influencia na trajetória e consequentemente nos perfis de velocidades do vento. No ensaio não foi possível verificar as zonas de baixa pressão que se concentrariam na lateral e na parte traseira da carga em virtude do fator de escala 1:10 do modelo que ocupou praticamente toda a área de teste do túnel.

Os resultados da marcação de linha de trajetória foram semelhantes aos obtidos na simulação CFD para o *layout* LA (Figura 20).

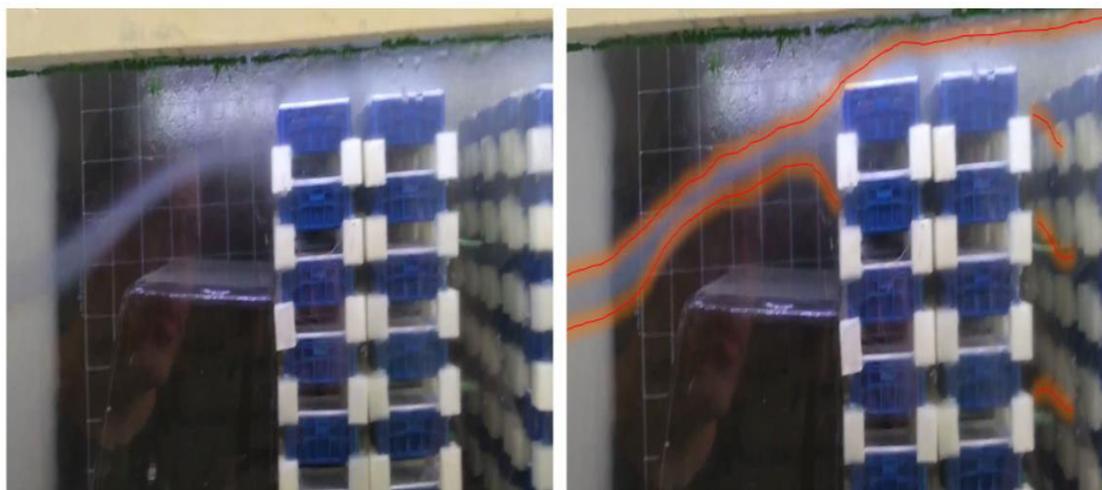
Figura 32 - Ensaio em túnel de vento com marcação de linha de trajetória - *layout LA*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na marcação de linha de trajetória para o *layout LD2* (Figura 33), foi observado o aumento da circulação de vento em comparação com o *layout LA* (Figura 32), pois assim como na simulação CFD, os corredores de ar canalizariam a massa do vento que se chocou com a parte frontal da carga. O vão central gerado pelo seccionamento da carga apresentou circulação de vento em toda sua extensão. Os registros de velocidade do vento do vão central foram de 6 m s^{-1} , que correspondeu a uma perda de 25% de sua energia inicial.

Figura 33 - Ensaio em túnel de vento com marcação de linha de trajetória - *layout LD2*

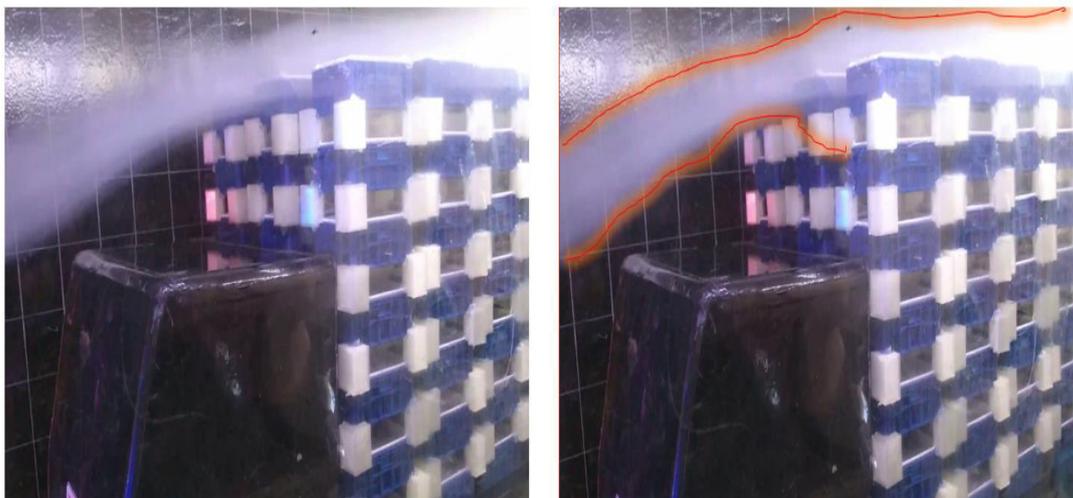


Fonte: Elaborado pelo autor.

A simulação CFD mostrou que o uso dos espaçadores, com a distribuição longitudinal das caixas e o aumento dos corredores verticais da carga (*layout LE*) foi o arranjo que mais favoreceu a circulação de ar no interior da carga (Figura 27). O ensaio em túnel de

vento demonstrou que o vento circulou em toda extensão da carga, embora o ensaio tenha sido realizado com um menor número de caixas (Figura 34).

Figura 34 - Ensaio em túnel de vento com marcação de linha de trajetória - *layout* LE

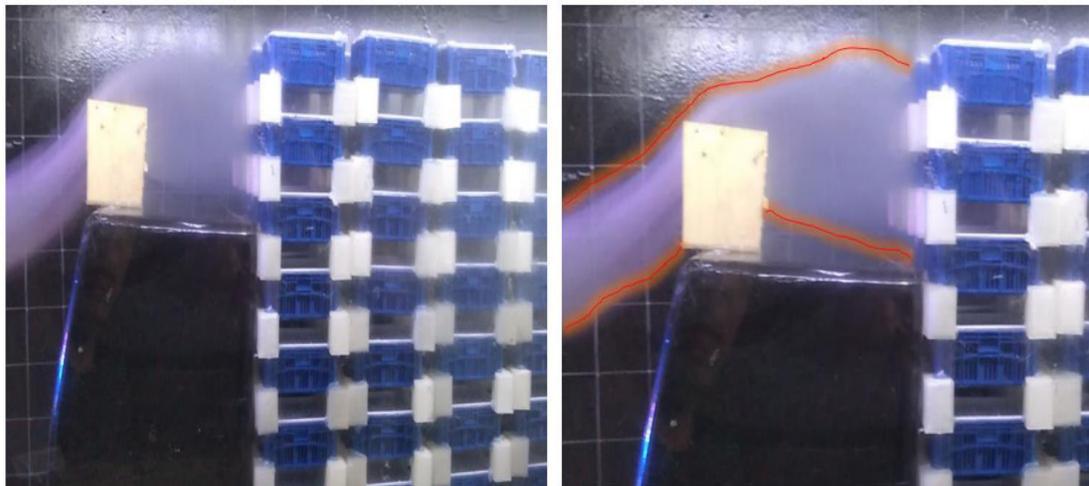


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ensaios de marcação de linha de trajetória validaram os resultados das simulações CFD, em que a geometria do caminhão possuía forte influência na trajetória do vento, o que já era esperado, direcionando-o para as laterais e topo da carga. Resultados semelhantes foram apresentados em modelos de reboque para o transporte de equinos (PURSEWELL *et al.*, 2005), suínos e ovinos (GILKESON *et al.*, 2009;2016).

O ensaio de marcação de linha de trajetória comprovou que o aerofólio conseguiu modificar a trajetória do vento, que se concentrava no topo para toda a parte frontal da carga. O ensaio ainda sugeriu que o aerofólio em conjunto com os espaçadores poderiam ser uma solução eficiente para minimizar o estresse térmico (Figura 35). Vale destacar que o aerofólio utilizado no ensaio era estático, com ângulo de ataque fixo. Possivelmente, um aerofólio de ângulo de ataque variável maximizaria o aproveitamento do vento, que poderia otimizar o fluxo de ar no interior da carga em todas as configurações de *layouts*.

Figura 35 - Ensaio em túnel de vento com marcação de linha de trajetória - layout LE com aerofólio



Fonte: Elaborado pelo autor.

Spurio *et al.* (2015) avaliaram o transporte de frango em quatro condições: *layout* convencional e um modelo alternativo com e sem molhamento da carga. O *layout* alternativo possuía estruturas instaladas na carroceria, as estruturas eram similar a um aerofólio, para direcionar o vento para os “bolsões de calor”. Os autores constataram uma redução significativa da ocorrência da carne PSE em 66,3% e 49,6% com e sem molhamento da carga respectivamente, no *layout* alternativo.

O uso do aerofólio poderia, possivelmente, corroborar com os benefícios proporcionados do modelo alternativo de *layout* proposto por Spurio *et al.* (2015), por maximizar a circulação de vento no interior da carga.

Os resultados dos ensaios de marcação de linha de trajetória, foram muito semelhantes aos resultados da simulação CFD. Entretanto os resultados apresentados até o momento atestaram a qualidade da ventilação externa em função da modificação do *layout*, isto é, o *layout* interfere no fluxo de vento do interior da carga. Porém, faz-se necessário mensurar a ventilação no interior das caixas.

4.4.2 Ensaios da ventilação interna nas caixas

A Tabela 7 mostra a estatística descritiva dos ensaios em túnel de vento para os *layouts* LA, LB1 e LC1 com as caixas de transporte vazias. Os valores médios das velocidades do vento no interior das caixas de transporte (VIC) aumentaram nos *layouts* avaliados em função da velocidade de teste, o que já era esperado, pois o aumento da velocidade de teste

ocasionou o maior deslocamento de massa de ar sob o veículo e como as caixas de transporte possuíam aberturas, o vento fluiu com maior facilidade (GILKESON *et al.*, 2009; 2016).

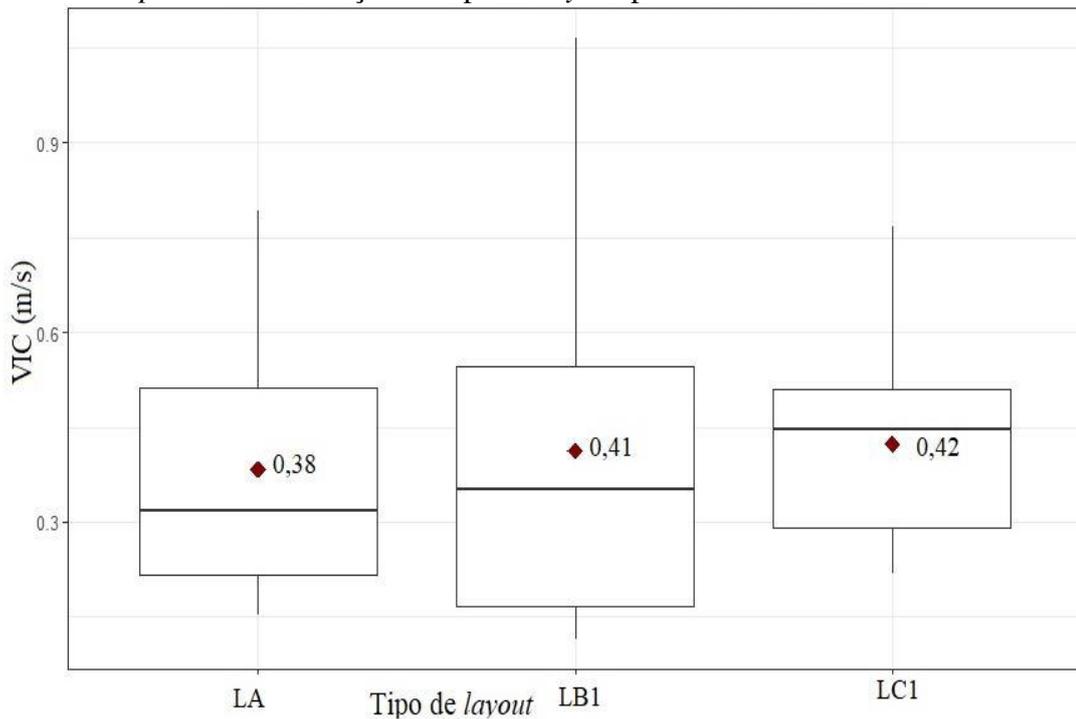
Tabela 7 - Estatística descritiva da velocidade interna das caixas de transporte nos ensaios em túnel de vento

Estatística	V1 (10 m s⁻¹)	V2 (15 m s⁻¹)	V3 (20 m s⁻¹)	V4 (30 m s⁻¹)
<i>Layout LA</i>				
Mínima	0,15	0,34	0,45	0,60
Mediana	0,32	0,44	0,68	1,18
Média	0,38	0,49	0,83	1,28
Desvio Padrão	0,21	0,16	0,39	0,60
Máxima	0,79	0,82	1,56	2,70
<i>Layout LB1</i>				
Mínima	0,11	0,16	0,25	0,54
Mediana	0,35	0,58	0,62	0,94
Média	0,41	0,64	0,76	1,02
Desvio Padrão	0,29	0,47	0,53	0,42
Máxima	1,06	1,67	1,82	1,70
<i>Layout LC1</i>				
Mínima	0,22	0,35	0,44	0,76
Mediana	0,44	0,70	0,96	1,39
Média	0,42	0,64	1,02	1,36
Desvio Padrão	0,15	0,19	0,52	0,38
Máxima	0,77	0,90	2,44	2,13

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 36 mostra o *boxplot* da distribuição das VIC para os três *layouts* analisados com a velocidade de teste de 10 m s⁻¹. Constatou-se que os *layouts* LB1 e LC1 obtiveram as melhores médias (losango vermelho) comparado com o *layout* LA, e que praticamente o valor das médias foram os mesmos: 0,41 m s⁻¹ e 0,42 m s⁻¹, respectivamente, não foram observados *outliers*.

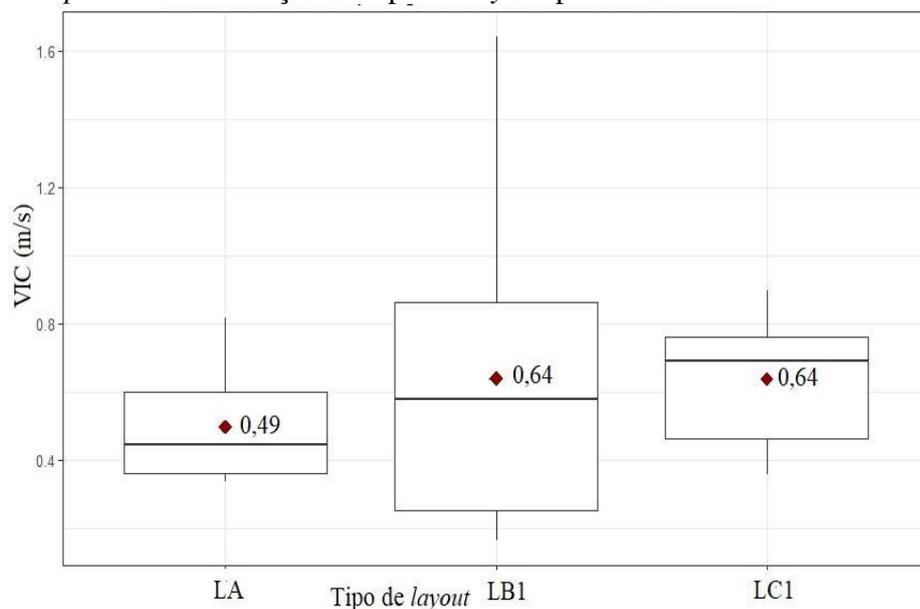
Figura 36 - *Boxplot* VIC em função do tipo de *layout* para o ensaio com velocidade de 10 ms^{-1}



Fonte: Elaborado pelo autor.

No ensaio com velocidade de teste de 15 m s^{-1} , o *layout* LA apresentou o pior resultado, os *layouts* LB1 e LC1 continuaram a apresentar as mesmas médias ($0,64 \text{ m s}^{-1}$). Assim como no ensaio com velocidades de 10 m s^{-1} , não foram registrados valores extremos (Figura 37).

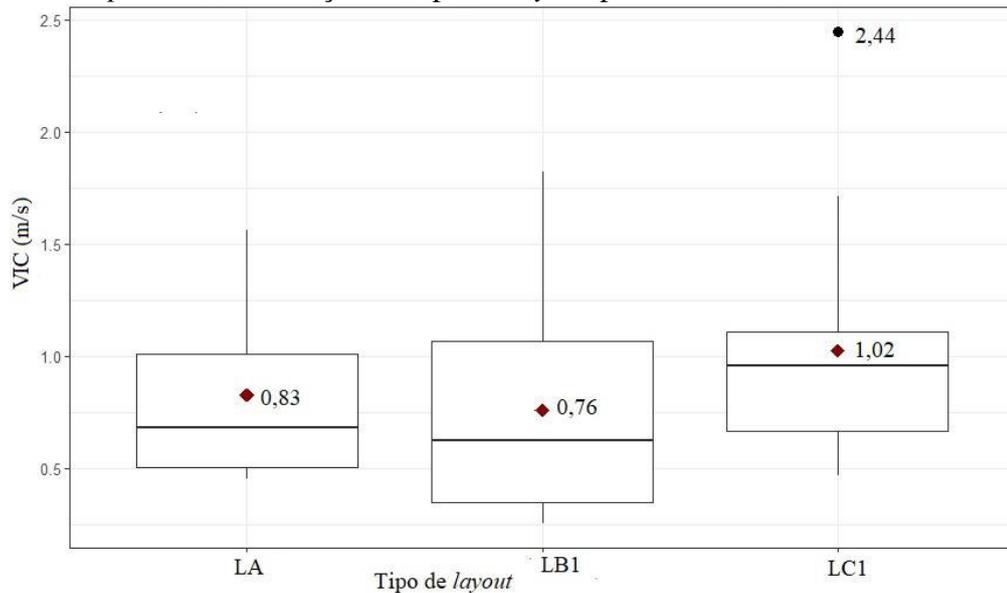
Figura 37 - *Boxplot* VIC em função do tipo de *layout* para o ensaio com velocidade de 15 ms^{-1}



Fonte: Elaborado pelo autor.

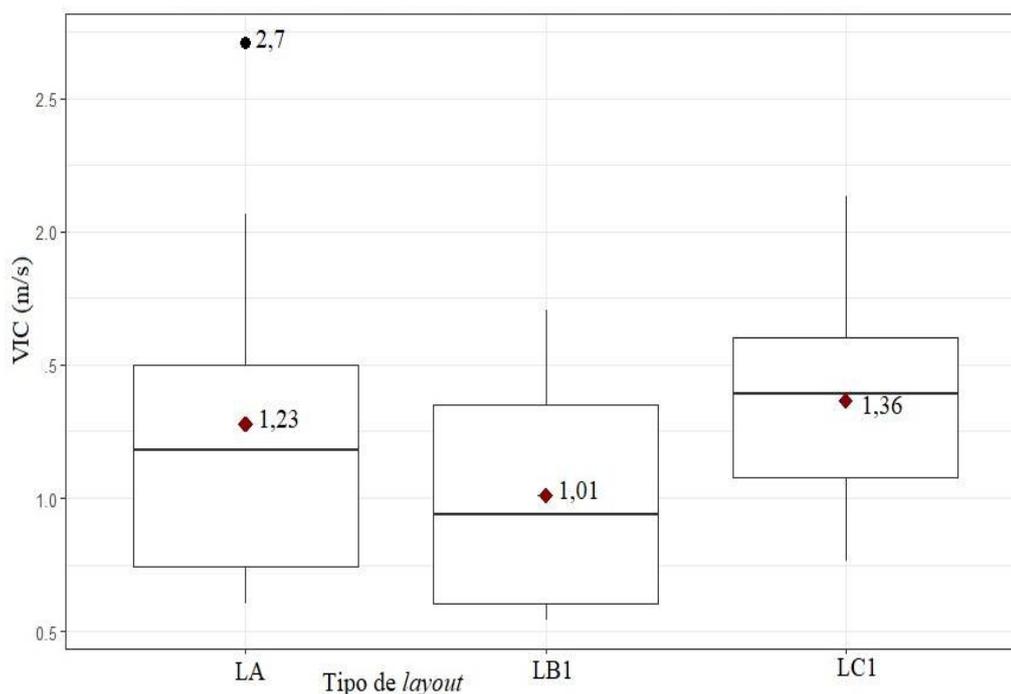
Com o aumento da velocidade de teste para 20 m s^{-1} , foi registrado uma melhora da média VIC para o *layout* LA ($0,83 \text{ m s}^{-1}$). O *layout* LB1 apresentou o pior resultado ($0,76 \text{ m s}^{-1}$) e mais uma vez a descompactação da carga (LC1), propiciou o aumento da VIC. Foi registrado um *outlier* para o *layout* LC1, podendo ter ocorrido devido ao deslocamento de alguns sensores no interior do protótipo em virtude do aumento da velocidade de teste (Figura 38).

Figura 38 - *Boxplot* VIC em função do tipo de *layout* para o ensaio com velocidade de 20 ms^{-1}



Fonte: Elaborado pelo autor.

A maior velocidade de teste (30 m s^{-1}) propiciou o aumento da VIC no *layout* LA ($1,23 \text{ m s}^{-1}$), Figura 39. Uma explicação plausível para os resultados negativos obtidos com o *layout* LB1 seria o aumento da turbulência no vão central que favoreceu a concentração do ar no centro da carga em decorrência dos vórtices gerados, como observado nas simulações CFD (Figura 21). O *layout* LC1 continuou registrando os melhores resultados de VIC. Foi registrado um valor *outlier* para o *layout* LA.

Figura 39 - *Boxplot* VIC em função do tipo de *layout* para o ensaio com velocidade de 30 ms^{-1} 

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 mostra o resultado do teste de normalidade dos dados VIC para cada *layout* em função da velocidade de teste. O resultado mostra que todos os dados seguiram a distribuição normal, pois todos os p-valor foram maiores que 0,05, aceitando a hipótese nula de que os dados seguiram a distribuição Gaussiana.

Tabela 8 – Teste de normalidade dos valores de velocidade interna das caixas

Velocidade	<i>p</i> - valor		
	Layout LA	Layout LB1	Layout LC1
V1 (10 m s^{-1})	0,168	0,110	0,44
V2 (15 m s^{-1})	0,343	0,315	0,06
V3 (20 m s^{-1})	0,175	0,09	0,07
V4 (30 m s^{-1})	0,720	0,209	0,84

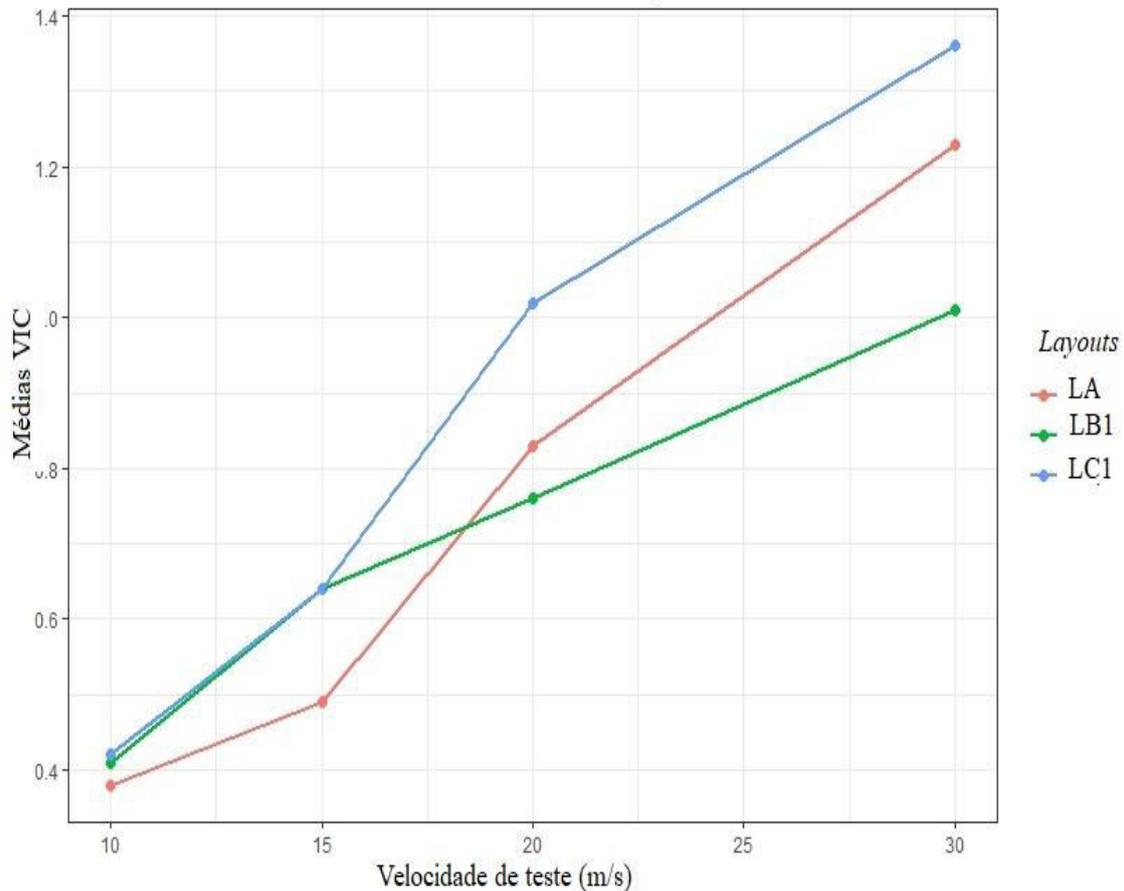
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 40 mostra o resumo da análise das médias do ensaio com as caixas vazias, percebeu-se que o uso de espaçadores (*layout* LC1) resultou em maiores valores absolutos de VIC independente da velocidade de teste, como já era esperado, consequência da descompactação da carga. Entretanto, velocidades de teste acima de 20 m s^{-1} o seccionamento da carga (*layout* LB1) apresentou os piores resultados absolutos de VIC, possivelmente pelo fato da turbulência ser maior na região central da carga em virtude da compactação da carga,

como foi observado na simulação CFD (Figura 21).

No layout LA o aumento da velocidade do teste, valores acima de 20 m s^{-1} , gerou maiores valores absolutos de VIC em relação ao LB1, possivelmente pela maior turbulência na região traseira da carga. Para velocidade de teste inferiores a 15 m s^{-1} os layouts LC1 e LB1 obtiveram resultados semelhantes, possivelmente pelo fato da velocidade baixa não gerar altas turbulências no vão central (layout LB1), evitando o “aprisionamento” do vento.

Figura 40 - Comparação das médias da velocidade interna das caixas em função do *layout*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora as médias VIC tenham apresentado valores diferentes, foi necessário realizar a análise de variância para inferir se modificar somente o *layout* da carga contribuiria na eliminação das perdas durante o transporte.

A Tabela 9 mostra os resultados da análise das médias VIC em função do *layout*. Todos os resultados da estatística F foram acima do nível de significância adotado (0,05). Portanto a hipótese de igualdade das médias entre os tratamentos não poderia ser negada, logo a análise mostrou que não há diferença significativa na VIC nos *layouts* avaliados.

Tabela 9 - análise de variância das médias da velocidade interna do interior das caixas em função do *layout*

Valor estatística F – Análise de variância				
	V1 (10 m s ⁻¹)	V2 (15 m s ⁻¹)	V3 (20 m s ⁻¹)	V4 (30 m s ⁻¹)
F-Valor	0,112	1,012	1,149	2,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, torna-se oportuno destacar que nos ensaios em túnel de vento com as caixas de transporte “cheias” (simulando uma densidade de 8 aves por caixa), os resultados de VIC proporcionaram valores tão baixos, que foram insuficientes para a sensibilidade de mensuração dos dispositivos (0,001 m s⁻¹), sugerindo valores extremamente baixos de velocidade de vento dentro das caixas de transporte nos *layouts* avaliados. Portanto, ambos os resultados apresentados sugerem um novo parâmetro importante na busca por melhores condições de conforto térmico durante o transporte de frangos, a aerodinâmica da caixa de transporte.

Nessa perspectiva, a modificação do *layout* da carga pode ser considerada uma estratégia salutar para o bem-estar das aves durante a operação de transporte, pois a promoção de corredores de ventilação na carga favorece a remoção de gases poluentes e partículas em suspensão (SEEDORF; SCHMIDT, 2017). Entretanto, ressalta-se que não se configura como estratégia que garanta, invariavelmente, a solução para atenuação do estresse térmico das aves, pois os resultados obtidos sugerem que a ventilação no interior das caixas é praticamente inalterada com os *layouts*, possivelmente insuficiente para minimizar os “bolsos de calor” na carga.

Na prática, a utilização de uma baixa densidade nas caixas de transporte pode ser apontada como o método mais eficiente para atenuação do estresse térmico (NÄÄS, 2008; ROSA *et al.*, 2012). Como demonstrado neste trabalho, a VIC e a densidade de aves por caixa podem ser consideradas grandezas inversamente proporcionais. O transporte de frangos vivos se trata de uma abordagem multifatorial que deve englobar o emprego de tecnologias, manejo e gestão eficientes nas etapas envolvidas.

O *design* e as dimensões das caixas de transporte disponíveis comercialmente já estão sob investigação na perspectiva dos impactos gerados ao bem-estar animal pela restrição de movimento (VINCO *et al.*, 2016). Os resultados obtidos nesta pesquisa permitem constatar que a caixa de transporte é um elemento chave para garantir o bem-estar das aves.

Portanto, investigações que aumentem a eficiência aerodinâmica e térmica das

caixas de transporte podem ser importantes para corroborar de forma significativa para o bem-estar das aves e redução das DOA's e, conseqüentemente das perdas econômicas geradas durante o transporte de frangos vivos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que se refere ao uso dos dispositivos de captação de vento, o uso dos coletores tipo “coifa” não se mostrou como uma alternativa eficiente, pois além captar pouco vento para o interior da carga, em virtude da geometria do veículo, poderia danificar as caixas de transporte em virtude do seu elevado coeficiente de arrasto. Por outro lado, o uso de aerofólio no topo da cabine do caminhão se mostrou um mecanismo promissor para controlar a trajetória do vento para o interior da carga.

A simulação CFD mostrou que novas formas de arranjo das caixas na carroceria do caminhão e o emprego dos espaçadores contribuíram positivamente para o aumento do fluxo de vento entre as caixas de transporte, isto é, houve uma melhora significativa na qualidade da renovação do ar no exterior das caixas em virtude da descompactação da carga.

A disposição das caixas na posição longitudinal, o uso dos espaçadores e o aumento dos corredores de circulação verticais (*layout* LE), apresentou as melhores condições de circulação de vento ao longo da carga. Os *layouts* LD2 e LG2 também se mostraram promissores. Entretanto, alguns fatores operacionais poderiam ser prejudicados pelo aumento do comprimento e altura da carga, como a estabilizar a carga.

No entanto, além de garantir a ventilação no interior da carga, também se deve garantir que o vento chegue até as aves, isto é, o vento deve circular no interior das caixas de transporte para aumentar a eficiência dos mecanismos de troca térmica das aves. Nesse sentido, a modificação do *layout* da carga se mostrou ineficiente. Este resultado revela que a caixa de transporte deve ser repensada.

Do ponto de vista de manejo, a baixa densidade de aves por caixa pode aumentar a circulação de vento no interior da caixa, favorecendo as trocas térmicas das aves. Barbosa Filho (2008) recomenda sete aves por caixa. Entretanto, esta recomendação pouco fará efeito com o *design* atual das caixas, pois praticamente os frangos não conseguem realizar movimentos para ajudar na dissipação térmica (VINCO *et al.*, 2016).

A simulação fluidodinâmica também possibilitou o estudo da circulação do vento em função do *layout* da carga, fornecendo informações detalhadas sobre os perfis de velocidades ao longo da carga. Esses resultados são de interesse potencial para os fabricantes de veículos, pois podem auxiliar na concepção de veículos especializados e ajudar na elaboração de leis específicas para o transporte de aves.

Este trabalho mostrou que descompactar a carga pode contribuir em atenuar os efeitos do estresse térmico durante o transporte, pois o aumento da circulação de vento no

interior da carga contribui com a redução da umidade relativa. Porém, no tocante aos processos convectivos de calor, o *design* da caixa em conjunto com a elevada densidade de aves por caixa não permite que a propagação dos benefícios da descompactação da carga.

O transporte de frangos continua sendo um desafio para a ambiência animal e várias reflexões podem ser feitas e vários temas para trabalhos futuros podem ser sugeridos para minimizar os efeitos do estresse térmico, entre eles:

1. Desenvolvimento de caixas de transporte que favoreçam a captação de vento para o seu interior;
2. Desenvolvimento de veículos para o transporte de frangos;
3. Análise multivariada do transporte de frangos vivos;
4. Sistema de resfriamento adiabático evaporativo para o transporte de frangos vivos;
5. Desenvolvimento de sistema de monitoramento e controle das condições bioclimáticas durante o transporte de animais.

6 CONCLUSÕES

A descompactação da carga se apresenta como uma solução para aumentar a circulação de ar (vento) entre as caixas de transporte e assim reduzir a umidade relativa e temperatura ao longo da carga;

Os espaçadores e o aerofólio atenderam de forma satisfatória suas funções de modificar o layout da carga para aumentar o fluxo de vento ao longo da carga, respectivamente;

A simulação computacional de fluidos (CFD) foi essencial para o estudo do comportamento do vento nos layouts propostos nesta pesquisa;

O uso de protótipos em túnel de vento foi essencial para validar os modelos da simulação CFD;

A análise quantitativa da velocidade do vento no interior das caixas (protótipos) em túnel de vento mostrou que a descompactação da carga favorece o fluxo de ar no interior das caixas, entretanto não houve diferença significativa da velocidade no interior dos protótipos nos layouts ensaiados.

REFERÊNCIAS

- ALI, A. K.A.; AL-HAIDARY, A. A.; ALSHAIKH, M. A.; HAYERS, E. The effect of evaporative cooling in alleviating seasonal differences in milk production of Almarai dairy farms in the Kingdom of Saudi Arabia. **Journal of Animal Science**, Oxford, v.12, n.4, p.590-596, 1999.
- ALJMAL, K. Greenhouse cooling in hot countries. **Energy**, [s.l.], v.19, n.11, p.1187- 1192, 1994.
- ANDERSON, T. B.; JACKSON, R. Fluid mechanical description of fluidized beds. Equations of motion. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, [s.l.], v. 6, n. 4, p. 527-539, 1967.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL. **Relatório anual**. Brasília: ABPA, 2014. Disponível em:
<http://www.ubabef.com.br/files/publicacoes/8ca705e70f0cb110ae3aed67d29c8842.pdf>.
 Acesso em: 29 out. 2017.
- ARBEL, A.; YEKUTIELI, O.; BARAK, M. Performance of a fog system for cooling greenhouses. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Pavia, v.72, n.2, p.129- 136, 1999.
- ASHRAE HANDBOOK COMMITTEE. **Handbook of Fundamentals (SI)**. Atlanta: Ashrae, 2009.
- BAKER, C. J.; DALLEY, X.; YANG, X.; KETTLEWELL, P.; HOXEY, R. An investigation of the aerodynamic and ventilation characteristics of poultry transport vehicles: Part 2, Wind Tunnel Experiments. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Pavia, v. 65, n. 2, p. 97-113, 1996.
- BARBOSA FILHO, J. A. D. **Caracterização quantitativa das condições bioclimáticas e produtivas nas operações pré-abate de frangos de corte**. 2008. 174 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- BARBOSA FILHO, J. A. D.; VIERA, F. M. C.; SILVA, I. J. O.; GARCIA, D. B.; SILVA, M. A. N.; FONSECA, B. H. F. Poultry transport microclimate characterization of the truck during the winter. **Brazilian Journal of Animal Science**, São Paulo, v.38, n.12, p.2442-2446, 2009.
- BARLOW, B. J.; ERA, W. H. J.; POPE, A. **Low-speed wind tunnel testing**. 3rd edition, John Wiley, 1984.
- BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2014.
- BJERG, B.; CASCONE, G.; LEE, I-B.; BARTZANAS, T.; NORTON, T.; HONG, S-W.;

SEO, I-H.; BANHAZI, T.; LIBERATI, P.; MARUCCI, A.; ZHANG, G. Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings. Part 3: CFD modelling. **Biosystems Engineering**, [s.l.], v.116, n.3, p.259-275, 2013.

BOBOULOS, M. A. **CAD-CAM & rapid prototyping application evaluation**. Copenhagen: Bookboon, 2010.

BOCCIOLONE, M.; CHELI, F.; CORRADI, R.; MUGGIASCA, S.; TOMASINI, G. Crosswind action on rail vehicles: wind tunnel experimental analyses. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s.l.], v.96, n.5, p.584-610, 2008.

BOOKER, J. D.; SWIFT, K. G. **Seleção de processos de manufatura**. Brasil: Elsevier, 2014.

BOTTCHER, R. W.; BAUGHMAN, G. R.; GATES, R. S. Characterizing efficiency of misting systems for poultry. **Transactions of ASAE**, [s.l.], v.34, n.2, p.586-590, 1991.

BRAGA FILHO, W. **Transmissão de calor**. São Paulo: Thomson, 2004.

BROOM, D. M. Indicators of poor welfare. **British Veterinary Journal**, [s.l.], v.142, n.1, p.524-526, 1986.

BROWN, J. A.; SAMARAKONE, T. S.; CROWE, T.; BERGERON, R.; WIDOWSKI, T.; CORREA, J. A.; FAUCITANO, L.; TORREY, S.; GONYOU, H. W. Temperature and humidity conditions in trucks transporting pigs in two seasons in eastern and western Canada. **Transactions of the ASABE**, North Carolina, v. 54, n. 6, p. 2311-2318, 2011.

BUFFINGTON, D. E.; COLLAZO-AROCHO, A.; CANTON, G. H.; PITT, D.; THATCHER, W.W.; COLLIER, R. J. Black-Globe-Humidity Index (BGHI) as confort equations for dairy cows. **Transactions of the ASAE**, [s.l.], v.24, n.3, p.711-14, 1981.

BUSTAMANTE, E.; GARCÍA-DIEGO, F.-J.; CALVET, S.; ESTELLÉS, F.; BELTRÁN, P.; HOSPITALER, A.; TORRES, A. G. Exploring Ventilation Efficiency in Poultry Buildings: The Validation of Computational Fluid Dynamics (CFD) in a Cross-Mechanically Ventilated Broiler Farm. **Energies**, [Roma], v.6, n.5, p.2605-2623, 2013.

BUSTAMANTE, E.; GARCÍA-DIEGO, F.-J.; CALVET, S.; TORRES, A. G.; HOSPITALER, A. Measurement and numerical simulation of Air velocity in a tunnel-ventilated broiler house. **Sustainability**, [s.l.], v.7, n.2, p.2066-2085, 2015.

BRYDEN, D. **CAD and Rapid prototyping for product design**. Londres: Laurence King Publish, 2014.

CARREGARI, A. L. **Estudo do escoamento de ar sobre a carroceria de um ônibus usando um programa de CFD e comparação com dados experimentais**. 2006. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2006.

CASHMAN, P. J.; NICOL, C. J.; JONES, R. B. Effects of transportation on the tonic immobility fear reactions of broilers, **British Poultry Science**, [s.l.], v.30, n.2, p.211-221, 1989.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa**. Porto Alegre: AMGH Editora, 2009.

CHEN, J. S.; LIU, W. K. Meshless methods: recent advances and new applications. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [s.l.], v.193, n.12-14, p.933, 1321, 2004.

COLEMAN, S. A.; BAKER, C. J. An experimental study of the aerodynamic behaviour of high sided lorries in cross winds. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s.l.], v. 53, n.3, p.401-429, 1994.

COSTA, H. R. S.; SILVA, J. W.; ASSAYAG, E. S. **Túnel de vento de baixo custo para atividades acadêmicas do curso de Engenharia Mecânica**. Gramado: COBENGE, 2013.

DALLEY, S.; BAKER, C. J.; YANG, X.; KETTLEWELL, P; HOXEY, R. An Investigation of the Aerodynamic and Ventilation Characteristics of Poultry Transport Vehicles: Part 3, **Internal Flow Field Calculations**, [s.l.], v. 65, n.2, p.115-27, 1996.

EUROPEAN UNION. **Council Regulation (EC) No. 1/2005 of 22 December 2004 on the protection of animals during transport and related operations and amending Directives 64/432/EEC and 93/119/EC and Regulation (EC) No. 1255/97**. [S.l: s.n.], 2005.

FAUCITANO, L.; GOUMON, S. Transport to slaughter and associated handling. *In*: ŠPINKA, M. (ed.). **Advances in Pig Welfare**: woodhead Publishing. London: UK, 2014.

FARM ANIMAL WELFARE COMMITTEE. **The five freedoms**. [S.l.], 2009. Disponível em: <http://www.gov.uk/government/groups/farm-animal-welfare-committee-fawc>. Acesso em: 19 set. 2019.

FERREIRA, A. C; LAFRATTA, F. Conheça alguns meios para a obtenção de protótipos de peças injetadas. *In*: **PLÁSTICO industrial**. Minas Gerais: Aranda Editora Técnica, 1998, p. 24-30.

FIGUEIRA, R. J. M. **CAD/CAE/CAM/CIM Licenciatura em computadores e sistemas**. 2003. 68 f. Graduação (Engenharia de Informática) - Instituto Politécnico do Porto, São Paulo, 2003.

FINNIS, M. V. Low-Speed Wind Tunnel Testing. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, [s.l.], v.213, n.4, p. 268-273, 1999.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **How to feed the world in 2050**. [S.l.], 2018. Disponível em: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050_01.pdf. Acesso em: 8 out. 2018.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. São Paulo: Grupo Gen-LTC, 2014.

GATES, R. S.; USRY, J.L; NIENABER, J. A. An optimal misting method for cooling

livestock housing. **Transactions of ASAE**, [s.l.], v.34. n.5, p. 2199-2206, 1991.

GILKESON, C.A.; THOMPSON, H. M.; WILSON, M. C. T.; GASKELL, P.H.; BARNARD, R. H. An experimental and computational study of the aerodynamic and passive ventilation characteristics of small livestock trailers. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s.l.], v.97, n.9, p. 415-425, 2009.

GILKESON, C. A.; THOMPSON, H. M.; WILSON, M. C.T.; GASKELL, P.H. Quantifying passive ventilation within small livestock trailers using Computational Fluid Dynamics. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v. 124, n. 2, p. 84-99, 2016.

GORNI, A. A. **Introdução à prototipagem rápida e seus processos**. In: PLÁSTICO Industrial. Minas Gerais: Aranda Editora Técnica, 2001.

HAGUE, R. J. M.; REEVES, P. E. **Rapid Prototyping, Tooling and Manufacturing**. [S.l.]: iSmithers Rapra Publishing, 2000.

HE, Y.; YE, M.; WANG, C. A method in the design and fabrication of exact-fit customized implant based on sectional medical images and rapid prototyping technology. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v.28, n.5-6, p. 504-508, 2006.

HILLMAN, P. E.; SCOTT, N. R.; VAN TIENHOVEN, A. Physiological responses and adaptations to hot and cold environments. In: YOUSEF, M. K. **Stress physiology in livestock**. Boca Raton: CRC, v.3, n.3, p.1-71, 1985.

HOXEY, R. P.; KETTLEWELL, P.J.; MEEHAN, A.; BAKER, C. J.; YANG, X. An investigation of the aerodynamic and ventilation characteristics of poultry transport vehicles: Part I, Full-scale Measurements. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Pavia, v.65, n.1, p.77-83, 1996.

HULL, C. W. **Method for production of three-dimensional objects by stereolithography**. U.S. Patent n. 4,929,402, 29 may 1990.

HUNTER, R. R.; MITCHELL, M. A.; MATHEU, C. Distribution of "Dead on Arrivals" within the bo-load on commercial broiler transporters: correlation with climatic conditions and ventilation regimen. **British Poultry Science**, [s.l.], v.38, supplementary, p.7-9, 1997.

HUNTER, R. R.; MITCHELL, M.A.; CARLISLE, A. J. Wetting of broilers during cold weather transport: a major source of physiological stress? **British Poultry Science**, [s.l.], v.40, supplementary, p.48-49, 1999.

JACOBS, P. F. **Stereolithography and other RP&M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling**. [S.l.]: Society of Manufacturing Engineers, 1995/1996.

JANE, F. T.; JACKSON, P. **Jane's All the World's Aircraft**. **Jane's Information Group**. [S.l.], 2007. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=0zRKAQAIAAJ>. Acesso em: 21 de out. 2018.

JIN, Y.; LI, H.; HE, Y.; FU, J. Quantitative analysis of surface profile in fused deposition

modelling. **Additive Manufacturing**, Germany, v.8, p.142-148, 2015.

KASHKOVSKY, A. V.; VASHCHENKOV, P.; BANYAI, T. Modeling of reentry space vehicle aerodynamics with control thruster plume - free-stream interaction. **Thermophysics and Aeromechanics**, [s.l.], v.21, n.6, p.719-728, 2014.

KETTLEWELL, P. J.; TURNER, M. J. B. A review of broiler chicken catching and transportsystems, **Journal of Agricultural Engineering Research**, Pavia, v.31, n.2, p. 93-114, 1985.

KETTLEWELL, P.J.; MITCHELL, M.A.; MEEHAN, A. The distribution of thermal loads within poultry transport vehicles. **Agricultural Engineer**, [s.l.], v.48, n. 1, p.26-30, 1993.

KETTLEWELL, P.J.; MORAN, P. **A revised computer program for modelling heat stress in crated broiler chickens**. [S.l.]: AFRC Institute of Engineering Research. Silsoe, Beds, 1990.

KETTLEWELL, P. J.; MITCHELL, M. A. The thermal environment on poultry transport vehicles. COLLINS, E. ;BOON, C. (ed.). *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 4., 1993, St. Joseph. **Anais [...]** St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1993. p.345-389.

KETTLEWELL, P. J.; HOXEY, R.P.; HAMPSON, C.J.; GREEN, N.R.; VEALE, B.M.; MITCHELL, M.A. AP - Animal Production Technology: Design and operation of a prototype mechanical ventilation system for livestock transport vehicles. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Pavia, v.79, n.4, p. 429-439, 2001.

KWON, K-S. LEE, I-B; ZHANG, G. Q.; HA, T. Computational fluid dynamics analysis of the thermal distribution of animal occupied zones using the jet-drop-distance concept in a mechanically ventilated broiler house. **Biosystems Engineering**, [s.l.], v.136, p. 51-68, 2015.

LEUSCHEN, J.; COOPER, K. **Full-Scale wind tunnel tests of production and rototype, second-generation aerodynamic drag-reducing devices for tractor-trailers**. [S.l.: s.n.], 2006. Disponível em: <http://www.doi.org/10.4271/2006-01-3456>. Acesso em: 27 out. 2018.

LIMA, L. R. DE.; BARBOSA-FILHO, J. A. D.; FREITAS, E. R.; SOUZA, D. H.; VIANA, V. S. S.; MACHADO, N. A. F.; NEPOMUCENO, R. C. Effect of Different Breeding Densities and Inclusion of Soybean Oil on Performance, Carcass Trait and Heat Loss in Meat Quails. **Journal of Agricultural Science**, [s.l.], v.11, n.7, p.130-138, 2019.

LINO, F. J.; NETO, R. J. A prototipagem rápida na indústria nacional. *In*: ENCONTRO NACIONAL DO COLÉGIO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ORDEM DOS ENGENHEIROS, 2., 2000, Coimbra. **Anais [...]**. Coimbra: [s.n.], 2000. p. 4.15-4.22.

LINO, J. F.; BARBADO, H.; DUARTE, T.; NETO, R.J.; PAIVA, R. Aplicação da prototipagem rápida na área médica. **Revista Saúde Oral**, Lisboa, n. 50, v. 4, p 66-74, 2006.

LOTTI, R. S.; MACHADO A. W.; MAZZIEIRO Ê. T.; LANDRE JÚNIOR, J. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **Research Dental Press Ortodon Orto Facial**, [s.l.], v.11, n.2, p.35-43, 2006.

MACARI, M.; FURLAN, R.L. Ambiência na produção de aves de corte. *In: SILVA, I.J.O. (ed.). Ambiência na produção de aves em clima tropical*. Piracicaba: FUNEP, 2001. v.1, p.31-87.

MACARI, M.; FURLAN, R. L.; GONZALES, E. (ed.). **Fisiologia aviária aplicada a frangos de corte**. Campinas: FACTA, 2002.

MALEKI, S.; BURTON, D.; THOMPSON, M. C. Assessment of various turbulence models (ELES, SAS, URANS and RANS) for predicting the aerodynamics of freight train container wagons. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s.l.], v.170, n.3, p.68-80, 2017.

MARTINEZ, M. L.; ZUFFO, J. A. Uso de linhas de corrente de corrente, Linhas de Trajetória e Linhas de Emissão na Visualização de Fluxos. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO GRÁFICA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS (SIBGRAP'95)*, 8., 1995, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: [s.n.], 1995, p. 303-304, 1995.

MERZKIRCH, W. **Flow visualization**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

MITCHELL, M.A.; KETTLEWELL, P.J.; ALDRED, K.; MEEHAN, A. M. Characterisation of the broiler transport environment and associated physiological consequences. **Applied Animal Behaviour Science**, [s.l.], v.26, n. 90, p.283-284, 1990.

MITCHELL, M.A.; KETTLEWELL, P.J.; MAXWELL, M. H. Indicators of physiological stress in broiler chickens during road transportation. **Animal Welfare**, [s.l.], v.1, n.2, p.91-103, 1992.

MITCHELL, M. A.; KETTLEWELL, P. J. Road transportation of broiler chickens: induction of physiological stress. **World's Poultry Science Journal**, [s.l.], v.50, n.1, p. 57-59, 1994.

MITCHELL, M. A.; KETTLEWELL, P. J. Physiological stress and welfare of broiler chickens in transit: solutions not problems! **Poultry Science**, [Champaign], v.77, n.12, p.1803-1814, 1998.

MITCHELL, M.A. AP - Animal Production Technology: Design and operation of a prototype mechanical ventilation system for livestock transport vehicles. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Pavia,, v. 79, n. 4, p. 429-439, 2001.

MOREIRA JÚNIOR, O. **Construção e validação de um túnel de vento para ensaios de estimativa da deriva em pulverizações agrícolas**. 2009. 79 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciência Agronômica, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

MULLER, A. T.; PASCHOAL, E. C.; SANTOS, J. M. G. Impacto do manejo pré-abate na qualidade da carne de frango. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, Maringá, v.5, n.1, p.61-80, 2012.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentals of fluid mechanics**. 3. Ed. Ed. New York: Jonh Wiley & Sons, Inc., 1990.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H.; HUEBSCH, W. W. **Fundamentals of Fluid Mechanics**, 6. Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

NÄÄS, I. A. Princípios de bem-estar animal e sua aplicação na cadeia avícola. **Biológico**, São Paulo, v.70, n.2, p.105-106, 2008.

NICOL, C. J.; SCOTT, G. B. Pre-slaughter handling and transport of broiler chickens. **Applied Animal Behaviour Science**, [s.l.], v.28, n.1-2, p. 57-73, 1990.

NORTON, T.; GRANT, J.; FALLON, R.; DA-WEN. S. Optimising the ventilation configuration of naturally ventilated livestock buildings for improved indoor environmental homogeneity. **Building and Environment**, [s.l.], v.45, n. 4, p.983-995, 2010.

NORTON, T.; KETTLEWELL, P.; MITCHELL, M. A computational analysis of a fully-stocked dual-mode ventilated livestock vehicle during ferry transportation. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v.93, n.4, p.217-228, 2013.

WORLD ORGANIZATION FOR ANIMAL HEALTH . **Código sanitário dos animais terrestres**. [S.l.], 2016. Disponível em: <http://www.oie.int/en/international-standardsetting/terrestrialcode/access-online/>. Acesso em: 9 mai. 2017.

PEREIRA, T.L.; TITTO, E.A.L.; CONTE, S.; DEVILLERS, N.; SOMMAVILLA, R.; DIESEL T.; DALLA-COSTA, F.A.; GUAY, F.; FRIENDSHIP, R.; CROWE, T.; FAUCITANO, L. Application of a ventilation fan-misting bank on pigs kept in a stationary trailer before unloading: effects on trailer microclimate, and pig behaviour and physiological response. **Livestock Science**, [s.l.], v.216, p.67-74, 2018.

PINHEIRO, D. G. **Molhamento da carga como método de atenuação do estresse térmico durante o transporte de frangos vivos**. 2015. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

PRANDTL, L. Fluid motions with very small friction (in Germany). **Proc. of the Third International Congress on Mathematics**. Heidelberg: [University of Karlsruhe] 1904.

POINTER, W. D.; SOFU, T.; WEBER, D. Development of Guidelines for the Use of Commercial CFD in Tractor-Trailer Aerodynamic Design. Proceedings of the 2005. In: SAE Commercial Vehicle Engineering Conference, 2005., [s.l.]. **Anais [...]**. [S.l.: s.n.], 2005.

PURSWELL, J.; GATES, R. S.; LAWRENCE, L. M.; JACOB, J. D.; STOMBAUGH, T.; COLEMAN, R. Air exchange rate in a horse trailer during transport. **Transactions of the ASABE**, [s.l.], v.49, n.1, p.193-201, 2006.

QUEIROZ, M. L. V.; BARBOSA FILHO, J. A. D.; VIEIRA, F. M. C. Avaliação do desempenho térmico de frangos de corte de forma direta e prática. **Revista Avisite: Mundo Agro**, Campinas, v. 13, n. 6, p. 802-808, 2012. Disponível em: <http://www.avisite.com.br/cet/img/TabelasEntalpiaAviSite2012.pdf>. Acesso em: 25 out. 2019.

QUEIROZ, M. L. V.; BARBOSA FILHO, J. A. D.; SALES, F. A. L.; LIMA, L. R.; DUARTE, L. M. Variabilidade espacial do ambiente em galpões de frango de corte com

sistema de nebulização. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.48, n.4, p.586-595, 2017.

RAHMAN, M. M.; CHU, C. M.; KUMARESEN, S. Evaluation of the Modified Chimney Performance to Replace Mechanical Ventilation System for Livestock Housing. **Procedia Engineering**, [Bangladesh], v. 90, p. 245-248, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814029816>. Acesso em: 01 mar. 2018.

RITZ, C.W. Reducing caching and livehaul. DOA's. **Poultry Digest Online**, [s.l.], v.4, n.1, p.1-14, 2003.

RODRIGUES, V. C.; SILVA, I. O.; VIEIRA, F.; NASCIMENTO, S. T. A correct enthalpy relationship as thermal comfort index for livestock. **International Journal of Biometeorology**, [s.l.], v.55, n.3, p.455-459, 2011.

RODRIGUES, W. O. P.; GARCIA, R. G.; NÄÄS, C. O. R.; CALDARELLI, C. E. Evolução da avicultura de corte no Brasil. **Enciclopédia Biosfera**, Jandaia, v.10, n.18, p.1666- 1864, 2014.

RUI, B. R.; DE SOUZA, R. A. D.; DA SILVA, M. A. A. Pontos críticos no manejo pré-abate de frango de corte: jejum, captura, carregamento, transporte e tempo de espera no abatedouro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.7, p.1290–1296, 2011.

RONG, L.; NIELSEN, P. V.; BJERG, B.; ZHANG, G. Summary of best guidelines and validation of CFD modeling in livestock buildings to ensure prediction quality. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v.121, n.3, p.180-190, 2016.

ROSA, P.S.; ALBINO, J.J.; BASSI, L.J.; GRAH, R.A.; ROSA, D.R.; NIENDICKER T.P. **Manejo pré-abate em frangos de corte**: instrução técnica para o avicultor: número 36. Concórdia: Embrapa suínos e aves, 2012.

RYAN, D.P.; BOLAND, M. P.; KOPEL, E. Evaluating two different evaporative cooling management systems for dairy cows in a hot, dry climate. **Jornal of Dairy Science**, [s.l.], v.75, n.4, p.1052-1059, 1992.

SALMORIA, G. V.; CARDENUTO, M. R.; AHRENS, C. H.; LAFRATTA, F. Prototipagem rápida por impressão 3D com resinas fotocuráveis: uma análise sobre as tecnologias disponíveis no mercado nacional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 9., 2007. São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: ABPol, 2007. p.360-367.

SANTOS, J. P. A.; VALE, M. M., KARKOW, A. K.; BEVILAQUA, B.; SANTOS, M. P.; FALCONE, D. B. Perdas produtivas no pré-abate e carregamento de frangos de corte. **Nutritime**, Minas Gerais, v.12, n.6, p.4450-4456, 2015.

SEEDORF, J.; SCHMIDT, R.G. The simulated air flow pattern around a moving animal transport vehicle as the basis for a prospective biosecurity risk assessment. **Heliyon**, Maryland Heights, v.3, n.8, p.1-18, 2017.

SILVA, J. A. O.; SIMÕES, G. S. S.; OBA, A. R. A.; IDA, E. I.; SHIMOKOMAKI, M. Manejo pré-abate de transporte e banho sobre a incidência de mortalidade de frangos de corte.

Semina: Ciências Agrárias, Londrina v.32, n.2, p.795-800, 2011.

SOMMAVILLA, R.; FAUCITANO, L.; GONYOU, H.; SEDDON, Y.; BERGERON, R.; WIDOWSKI, T.; CROWE, T.; CONNOR, L.; SCHEEREN, M. B.; GOUMON, S.; BROWN, J. Season, Transport Duration and Trailer Compartment Effects on Blood Stress Indicators in Pigs: Relationship to Environmental, Behavioral and Other Physiological Factors, and Pork Quality Traits. **Animal Science Journal**, Oxford, v.7, n.2, p.1-12, 2017.

SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L. **Engenharia aplicada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC princípios e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2009.

SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. **Boundary-layer theory**. 8. th ed. [Alemanha]: Springer, 2000.

SCHWARTZKOPF-GENSWEIN, K. S.; FAUCITANO, L.; DADGAR, S.; SHAND, P.; GONZALEZ, L.A.; CROWE, T. G. Road transport of cattle, swine and poultry in North America and its impact on animal welfare, carcass and meat quality: A review. **Meat Science**, Illinois, v. 92, n.3, p.227-243, 2012.

SILVA, J. A. O.; SIMÕES, G. S.; ROSSA, A.; OBA, A.; IDA, E. I.; SHIMOKOMAKI, M. Manejo pré-abate de transporte e banho sobre a incidência de mortalidade de frangos de corte. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.32, n. 2, p.795-800, 2011.

SPURIO, R.S.; SOARES, A.L.; CARVALHO, R.H.; SILVEIRA JUNIOR, V.; GRESPAN, M.; OBA, A.; SHIMOKOMAKI, M. Improving transport container design to reduce broiler chicken PSE (pale, soft, exudative) meat in Brazil. **Animal Science Journal**, Oxford, v. 87, n.2, p. 277-283, 2015.

STUDART, N.; DAHMEN, S. R. A física do vôlei na sala de aula. **Física na Escola**, [s.l.], v. 7, n. 2, p. 36-42, 2006.

STIVERS, L. S.; ABBOTT, I H.; von DOENHOFF, A. E. **Summary of Airfoil Data: Relatório Técnico 824**. National Advisory Committee for Aeronautics, 1945. Disponível em: <http://hdl.handle.net/2060/19930092747>. Acesso em: 22 out. 2018.

TANNENBAUM, J. Ethics and animal welfare: The inextricable connection. **Journal American Veterinary Medical Association**, [s.l.], v.198, p.1360-1376, 1991.

TINOCO, I. de F. F. **Efeito de diferentes sistemas de condicionamento de ambientes e níveis de energia metabolizável na dieta sobre o desempenho de matrizes de frangos de corte, em condições de verão e outono**. 1996. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.

THOM, E.C. Cooling degrees - days air conditioning, heating, and ventilating. **Transactions of the ASAE**, [s.l.], v.55, n.7, p.65-72, 1958.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. 2019. **Estimativas da produção mundial de frangos**. [United States], 2018. Disponível em: <http://www.fas.usda.gov/data>. Acesso em: 20 set. 2019.

VAN HORNE, P. L. M.; BONDT, N. **Competitiveness of the EU poultry meat sector**. Wageningen: [s.n.], 2013.

VIEIRA, G. E. Uma revisão sobre a aplicação de simulação computacional em processos industriais. *In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 13., 2006, Bauru. **Anais [...]**. Bauru: SIMEP, 2006. Disponível em: http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/676.pdf. Acesso em: 9 set. 2018.

VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. v. 98, 2000. *In: VOLPATO, N. (Ed.). Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações*. São Paulo: Edgard Clucher, 2007.

VINCO, L. J.; ARCHETTI, I. L.; GIACOMELLI, S.; GUERINO, L. Influence of crate height on the welfare of broilers during transport. **Journal of Veterinary Behavior**, [s.l.], v. 14, s.n, p. 28-33, 2016.

WARRIS, P. D.; BROWN, S. N.; ROLPH, T.P.; KESTIN, S. C. Interactions between the beta-adrenergic agonist salbutamol and genotype on meat quality in pigs. **Journal Animal Science**, [s.l.], v.68, n.11, p. 3669-3676, 1990.

WEBSTER, A. J. F.; TUDDENHAM, A.; SAVILLE, C. A.; SCOTT, G. B. Thermal stress on chickens in transit. **British Poultry Science**, [s.l.], v. 32, n. 2, p. 267-277, 1993

WEBSTER, J.; TREVINO, L.K.; RYAN, L. The dimensionality and correlates of flow in human-computer interaction, **Computers in Human Behavior**, Quebec City, v.9, n.1, p. 411-426, 1993.

WEEKS, C. A. **Livestock Handling and Transport: Theories and Applications**. 4. ed. Colorado States University, USA , 2014.

WEHMANN, C. F.; ROCHA, P. A. C.; SILVA, M. E. V. DA.; ARAÚJO, F. A. A.; CORREIA, D. L. 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**, São Paulo, v.40, n.2, p.1-9, 2018.

WESTPHAL, R. V. Wind Tunnel Design, Chp 9. *In: AZAR, K. (ed.) Thermal Measurements in Electronic Cooling*. Boca Raton: CRC Press, p. 321-345, 1997.

WELTY, J. R.; WICKS, C.E.; WILSON, R. E. **Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer**. New York: John Wiley & Sons, 2009.

WHITE, F. **Mecânica dos Fluidos**, 8. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2018.

XIANG, H.; LIN, Y.; CHEN, S.; LI, C. A wind tunnel test method on aerodynamic characteristics of moving vehicles under crosswinds. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s.l.], v.163, n. 2, p.15-23, 2017.

XIAO-NI, Q. E.; YOU-QI, L. I.U. Experimental and Numerical Studies of Aerodynamic Performance of Trucks. **Journal of Hydrodynamics**, [s.l.], v. 23, p.752-758, 2011.

XU, Y. L.; GUO, W. H. Dynamic analysis of coupled road vehicle and cable-stayed bridge

systems under turbulent wind. **Engineering Structures**, [*s.l.*], v.25, n. 4, p.473-486, 2003.

ZHU, L. D.; LI, L.; XU, Y. L.; ZHU, Q. Wind tunnel investigations of aerodynamic coefficients of road vehicles on bridge deck. **Journal of Fluids and Structures**, [*s.l.*], v.30, n.2, p. 35-50, 2012.