



**Estudo paramétrico por Dinâmica de Fluidos  
Computacional do escoamento do ar e  
transferência de calor para otimização do  
desempenho de embalagens de produtos  
alimentares**

Versão Final Após Defesa

**Ricardo Bengi Nanga**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Eletromecânica**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Miguel Dinis Oliveira Gaspar  
Co-orientador: Prof. Doutor José Manuel Santos Cruz

**Janeiro de 2023**



## **Agradecimentos**

Ao Professor Doutor Pedro Dinis Gaspar, orientador desta dissertação pela disponibilidade prestada ao longo da concretização da presente tese, pela paciência, pelo conhecimento transmitido, pelas opiniões e críticas.

Ao Professor Doutor José Manuel Santos Cruz, Co-orientador desta dissertação, pela disponibilidade, opiniões e críticas que contribuíram de forma significativa para a realização desta tese. Agradeço o apoio incondicional e pelo incentivo.

Ao Professor Doutor Jaime Manuel Pombo Vilinga pelo apoio moral, pela oportunidade e por acreditar mais uma vez em nós.

Direciono em especial os meus agradecimentos aos meus familiares, Garcia Santos, Sita Nanga Santos, por me proporcionarem constante apoio emocional, física e espiritual.



## Resumo

Atualmente existe uma necessidade crescente de prolongar a vida útil dos produtos alimentares perecíveis, quer para garantir a qualidade e segurança alimentar, quer para reduzir o desperdício alimentar, que no caso dos produtos hortícolas atinge aproximadamente 50%. Para produtos hortícolas, tais como frutas, legumes e flores cortadas, a temperatura é um parâmetro extrínseco muito importante que afeta a taxa de deterioração do produto e a vida pós-colheita. A rápida remoção de calor do campo após a colheita por arrefecimento e manutenção da temperatura ideal do produto em abastecimento logístico são, portanto, de extrema relevância. A presente dissertação tem como objetivo desenvolver estudos paramétricos por Dinâmica de Fluidos Computacional de acomodação e estrutura de embalagens envolvendo simultaneamente parâmetros estruturais, geométricos e térmicos para a previsão do escoamento do ar e transferência de calor que permitam avaliar o desempenho de embalagens de produtos alimentares. Um modelo tridimensional transitório de CFD de uma câmara fria com caixas de embalagem cheias de frutos é apresentado para prever o escoamento de ar transitório e a transferência de calor por convecção e condução no interior dos frutos. Na construção dos modelos CFD, foi definido um modelo físico-matemático baseado nas equações da continuidade, da quantidade de movimento e da energia. A turbulência foi considerada através do modelo de turbulência SST- $k-\omega$ . O estudo paramétrico considera o desenvolvimento de modelos de CFD com diferentes disposições: empilhamento lateral, empilhamento vertical e o modelo de orientação das caixas, para analisar o escoamento de ar e a transferência de calor durante o período de arrefecimento para extrair o calor do campo após a colheita dos frutos.

Ao final das 8 horas de arrefecimento, a variação da temperatura média prevista nas esferas de ágar para o (1) modelo com três embalagens de frutas (modelo padrão), indica que na embalagem do topo, em contacto com ar refrigerado, os simuladores dos produtos apresentam a temperatura mais baixa. A diferença de temperatura nas esferas localizadas nas embalagens a diferentes alturas atinge o máximo de 1,3°C; (2) caso de estudo do empilhamento lateral, que a temperatura média nos produtos localizados nas embalagens que não ficam na direção do ar refrigerado da câmara, seja cerca 0,5°C mais elevada. Neste modelo, a discrepância em altura dos valores de temperatura dos produtos é superior que no modelo padrão, atingindo mais de 2°C; (3) o modelo de empilhamento vertical, é previsto que a temperatura média nos produtos aumenta à

medida que a altura decresce, sendo a variação média entre o valor máximo e mínimo de temperatura dos produtos de cerca 4°C; (4) o modelo orientado a 90° relativamente ao escoamento de ar refrigerado, a temperatura média dos produtos é mais elevada aproximadamente 1°C do que no modelo padrão (orientado a 0°).

Assim, os resultados permitem avaliar o tempo e/ou a temperatura e velocidade do ar de descarga necessária para que todas as frutas dentro das caixas de embalagem atinjam a temperatura de conservação que garanta a sua qualidade e segurança das frutas antes de entrarem na cadeia de distribuição. Com base nestes resultados, os operadores podem tomar decisões acerca do armazenamento das embalagens de forma a promover uma temperatura mais baixa dos produtos, com ganhos a nível energético, de segurança e qualidade alimentar.

## **Palavras-chave**

CFD; Embalagem; Arranjos de caixas; Refrigeração das frutas; Desempenho térmico

## Abstract

Currently, there is an increasing need to extend the shelf life of perishable food products, both to ensure food quality and safety and to reduce food waste, which in the case of vegetables reaches approximately 50%. For vegetables, such as fruits, vegetables and cut flowers, temperature is a very important extrinsic parameter that affects the rate of product spoilage and post-harvest life. Rapid removal of heat from the field after harvest by cooling and maintenance of optimum product temperature in logistical supply are therefore of utmost relevance. The present dissertation aims to develop parametric studies by Computational Fluid Dynamics of packaging accommodation and structure involving simultaneously structural, geometric and thermal parameters for the prediction of air flow and heat transfer that allow to evaluate the performance of food product packaging.

A three-dimensional transient CFD model of a cold room with packaging cases filled with fruits is presented to predict the transient airflow and heat transfer by convection and conduction inside the fruits. In the construction of the CFD models, a physico-mathematical model based on the equations of continuity, quantity of motion and energy was defined. Turbulence was considered through the turbulence model SST-  $k - \omega$ . The parametric study considers the development of CFD models with different layouts: lateral stacking, vertical stacking and the box orientation model, to analyze the airflow and heat transfer during the cooling period to extract heat from the field after fruit harvest.

After 8 hours cooling, the variation of the average temperature predicted on the agar spheres for the (1) model with three fruit packaging (standard model), indicates that in the top packaging, in contact with the cold air, the product simulators have the lowest temperature. The temperature difference in the spheres located in packaging at different heights reaches a maximum of 1.3°C; (2) case study of lateral stacking, that the average temperature in the products located in the packaging that are not in the direction of the cold air, is about 0.5°C higher. In this model, the discrepancy of the products' temperature values due to height location is higher than in the standard model, reaching more than 2°C; (3) vertical stacking model, it is predicted that the products' average temperature increases as the height decreases, with a variation between the maximum and minimum products' temperature around 4°C; (4) 90° oriented model in relation to

the cold air flow, the products' average temperature is approximately 1°C higher than in the standard model (0° oriented).

Thus, the results allow us to evaluate the time and/or temperature and velocity of the discharge air required for all the fruit inside the packaging boxes to reach the preservation temperature that guarantees their quality and fruit safety before entering the distribution chain.

Based on these results, operators can make decisions about the packaging cold storage to promote a lower temperature of the products, with gains in terms of energy, safety and food quality.

## **Keywords**

CFD; Packaging box; Boxes arrangements; Fruit refrigeration; Thermal performance

---

# Índice

|                                                                                                          |             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Agradecimentos</b> .....                                                                              | <b>i</b>    |
| <b>Resumo</b> .....                                                                                      | <b>iii</b>  |
| <b>Abstract</b> .....                                                                                    | <b>v</b>    |
| <b>Índice</b> .....                                                                                      | <b>vii</b>  |
| <b>Lista de Figuras</b> .....                                                                            | <b>ix</b>   |
| <b>Lista de Tabelas</b> .....                                                                            | <b>xi</b>   |
| <b>Nomenclatura</b> .....                                                                                | <b>xiii</b> |
| <br>                                                                                                     |             |
| <b>1. Introdução</b> .....                                                                               | <b>1</b>    |
| 1.1. Enquadramento .....                                                                                 | 1           |
| 1.2. O problema em estudo e a sua relevância .....                                                       | 6           |
| 1.3. Objetivos e contribuição da dissertação .....                                                       | 6           |
| 1.4. Visão geral e organização da dissertação.....                                                       | 7           |
| <b>2. Estado da Arte</b> .....                                                                           | <b>9</b>    |
| 2.1. Introdução .....                                                                                    | 9           |
| 2.2. Modelação matemática.....                                                                           | 10          |
| 2.3. Nota conclusiva.....                                                                                | 15          |
| <b>3. Materiais e Métodos</b> .....                                                                      | <b>23</b>   |
| 3.1. Materiais .....                                                                                     | 23          |
| 3.2. Métodos .....                                                                                       | 24          |
| 3.2.1. Modelo físico-matemático.....                                                                     | 24          |
| 3.2.2. Modelo de Turbulência .....                                                                       | 26          |
| 3.2.3. Modelo Numérico .....                                                                             | 30          |
| 3.3. Nota conclusiva.....                                                                                | 39          |
| <b>4. Análise de Discussão de Resultados</b> .....                                                       | <b>41</b>   |
| 4.1. Introdução .....                                                                                    | 41          |
| 4.2. Previsões Numéricas.....                                                                            | 41          |
| 4.2.1. Análise das proximidades entre as caixas de embalagem.....                                        | 41          |
| 4.2.2. Comparação da distribuição da temperatura em diferentes<br>modelos de embalagens ventiladas ..... | 44          |
| 4.2.3. Análise do escoamento de ar em diferentes modelos de embalagem<br>ventiladas .....                | 48          |
| 4.3. Previsões Numéricas em função da orientação das embalagens.....                                     | 51          |

|                                           |           |
|-------------------------------------------|-----------|
| 4.4. Nota conclusiva .....                | 56        |
| <b>5. Conclusões .....</b>                | <b>57</b> |
| 5.1. Conclusões gerais .....              | 57        |
| 5.2. Conclusões específicas .....         | 57        |
| 5.3. Sugestões de trabalhos futuros ..... | 59        |
| <b>Referências Bibliográficas .....</b>   | <b>61</b> |

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Vendas de embalagens no mundo (Ey, 2013).....                                                                                                                                                                                                                     | 3  |
| Figura 2. Materiais utilizados pela indústria mundialmente para a produção de embalagem (Ey, 2013). .....                                                                                                                                                                   | 3  |
| Figura 3. Os três níveis das embalagens alimentares (Castilho, 2012). .....                                                                                                                                                                                                 | 5  |
| Figura 4. Geometria e dimensões das caixas de papelão ondulado padrão e Supervent e da caixa plástica reutilizável Ecopack (Defraeye <i>et al.</i> ,2014).....                                                                                                              | 12 |
| Figura 5. Regiões em embalagens em camadas e a granel para produtos frescos (Zou <i>et al.</i> ,2006a). .....                                                                                                                                                               | 13 |
| Figura 6. Configuração geométrica do modelo (Tutar <i>et al.</i> ,2009). .....                                                                                                                                                                                              | 14 |
| Figura 7. Configuração de modelos de paredes de caixa (Curto <i>et al.</i> , 2021).....                                                                                                                                                                                     | 15 |
| Figura 8. Configuração geométrica do modelo: (a) parede da caixa com as respectivas dimensões; (b) vista de cima da caixa, (c) vista frontal da caixa.....                                                                                                                  | 31 |
| Figura 9. Volume de controlo bidimensional (Oliveira, 2001).....                                                                                                                                                                                                            | 33 |
| Figura 10. Domínio computacional: (a) malha do modelo completo, (b) vista de perto no plano de simetria. ....                                                                                                                                                               | 34 |
| Figura 11. Modelo computacional da câmara fria. Lenda: 1. Entrada de ar; 2. saída de ar; 3. Plano de simetria, 4. três caixas de embalagem cheias de frutas. ....                                                                                                           | 35 |
| Figura 12. Três caixas de fruta de embalagem escalonadas. ....                                                                                                                                                                                                              | 37 |
| Figura 13. Três caixas de fruta de embalagem escalonadas com empilhamento lateral: (a) Vista de Cima, (b) Vista lateral, c1. caixa superior, c2. caixa intermédia, c3. caixa inferior. ....                                                                                 | 37 |
| Figura 14. Seis caixas de fruta de embalagem escalonadas com empilhamento vertical: (a) Vista de cima, (b) Vista lateral, G1. Primeiro grupo de três caixas, G2. segundo grupo de três caixas, G3. terceiro grupo de três caixas, G4. quarto grupo de três caixas, c1. .... | 38 |
| Figura 15. Três caixas de fruta de embalagem escalonadas com orientação de 90 °: (a) Vista de Cima, (b) Vista lateral, c1. caixa superior, c2. caixa intermédia, c3. caixa inferior. ....                                                                                   | 38 |
| Figura 16. Distribuição da temperatura no plano vertical dos modelos (padrão, empilhamento lateral e empilhamento vertical), após 8 horas de .....                                                                                                                          | 45 |
| Figura 17. Distribuição da temperatura e da velocidade do ar, no plano horizontal, do modelo individual (padrão) após 8 horas de arrefecimento. ....                                                                                                                        | 46 |

Figura 18. Distribuição da temperatura e da velocidade do ar, no plano horizontal, do modelo com empilhamento lateral após 8 horas de arrefecimento .....47

Figura 19. Distribuição da temperatura do ar e da velocidade do modelo com empilhamento vertical após 8 horas de arrefecimento no plano horizontal. ....47

Figura 20. Linhas de corrente de ar após 8 horas de arrefecimento. ....49

Figura 21. Linhas de corrente de ar visto no plano  $y-z$  em  $x= -1.3m$  (detalhes das embalagens),após 8h de arrefecimento. ....50

Figura 22. Distribuição da temperatura dos modelos de empilhamento vertical e após 8 horas de arrefecimento no plano vertical.....52

Figura 23. Distribuição da temperatura e da velocidade do modelo de empilhamento na vertical com disposição angular de  $0^\circ$ , após 8 horas de arrefecimento. ....53

Figura 24. Distribuição da temperatura e da velocidade do ar modelo com disposição angular a  $90^\circ$ , após 8 horas de arrefecimento. ....54

---

## Lista de Tabelas

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Embalagens rígidas, semi-rígidas e flexíveis (Poças <i>et al.</i> , 2007).....                                                                                    | 4  |
| Tabela 2. Resumo das aplicações recentes de CFD na caracterização e avaliação de desempenho e design de embalagens dos produtos hortícolas frescos.....                     | 17 |
| Tabela 3. Tamanho ideal e configurações de ventilação das embalagens para diferentes tipos de produtos frescos. ....                                                        | 21 |
| Tabela 4. Estudos de CFD na análise de caixas de papelão ondulado usadas na indústria de frutas. ....                                                                       | 22 |
| Tabela 5. Propriedades dos materiais do ar dos materiais sólidos usados no modelo numérico. ....                                                                            | 32 |
| Tabela 6. Variação das temperaturas médias registadas para as esferas de ágar para o modelo padrão, após 8 horas de arrefecimento. ....                                     | 42 |
| Tabela 7. Temperaturas médias previstas para as esferas de ágar para o modelo de empilhamento latera, após 8 horas de arrefecimento.....                                    | 42 |
| Tabela 8. Variação das temperaturas médias previstas para as esferas de ágar para o modelo de empilhamento vertical, após 8 horas de arrefecimento. ....                    | 43 |
| Tabela 9. Variação das temperaturas médias previstas para as esferas de ágar para o modelo orientada a 90°, após 8 horas de arrefecimento.....                              | 43 |
| Tabela 10. Variação das temperaturas médias previstas para as esferas de ágar para o modelo de empilhamento vertical com orientação a 0°. ....                              | 55 |
| Tabela 11. Variação das temperaturas médias previstas para as esferas de ágar para o modelo com orientação a 90°. ....                                                      | 55 |
| Tabela 12. Dados recolhidos da simulação efetuada com nova condição de fronteira e o histórico dos dados numéricos do modelo com embalagens com empilhamento vertical. .... | 55 |
| Tabela 13. Dados recolhidos da simulação efetuada com nova condição de fronteira e o histórico dos dados numéricos do modelo com disposição angular de 90°. ....            | 56 |



---

## Nomenclatura

**Geral:**

|           |                                                                                         |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| $A$       | Área, [m <sup>2</sup> ];                                                                |
| $a$       | Comprimento da divisão, [m];                                                            |
| $b$       | Largura da divisão, [m];                                                                |
| $D$       | Diâmetro [m];                                                                           |
| $g$       | Aceleração da gravidade, {9,81 m·s <sup>-2</sup> };                                     |
| $Gr$      | Número de Grashof;                                                                      |
| $h$       | Coefficiente convectivo de transmissão de calor, [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]; |
| $k$       | Condutibilidade térmica, [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ];                         |
| $L$       | Comprimento característico, [m];                                                        |
| $n$       | Número de renovações por hora, [ren·h <sup>-1</sup> ]                                   |
| $p$       | Pressão, [Pa];                                                                          |
| $Pr$      | Número de Prandtl;                                                                      |
| $q$       | Fluxo de calor total perdido, [W·m <sup>-2</sup> ];                                     |
| $\dot{Q}$ | Potência térmica, [W];                                                                  |
| $R$       | Resistência elétrica, [Ω];                                                              |
| $S$       | Taxa de armazenamento de calor, [W·m <sup>-2</sup> ];                                   |
| $t$       | Tempo, [s];                                                                             |
| $T$       | Temperatura, [K ou °C];                                                                 |
| $U$       | Diferença de potencial, [V];                                                            |
| $V$       | Volume, [m <sup>3</sup> ];                                                              |
| $Q$       | Caudal volumétrico, [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ];                                 |
| $v$       | Velocidade, [m·s <sup>-1</sup> ];                                                       |

**Índices inferiores:**

|       |              |
|-------|--------------|
| $a$   | Ar;          |
| $c$   | Convectivo;  |
| $i$   | Índice mudo; |
| $in$  | Entrada;     |
| $out$ | Saída;       |
| $w$   | Água;        |

|          |                            |
|----------|----------------------------|
| $w_s$    | Vapor saturado;            |
| conv     | Convecção;                 |
| $\infty$ | Escoamento não perturbado; |

**Simbologia grega:**

|               |                                                                                                             |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\sigma$      | Constante de Stefan-Boltzmann $\{5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}\}$ . |
| $\delta$      | Espessura, [mm];                                                                                            |
| f             | Humidade relativa, [%];                                                                                     |
| $\rho$        | Massa específica, [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ];                                                      |
| D             | Variação;                                                                                                   |
| $\beta$       | Coefficiente de dilatação térmica, [ $\text{K}^{-1}$ ];                                                     |
| $\varepsilon$ | Emissividade;                                                                                               |

**Acrónimos:**

|        |                                                                             |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------|
| ANSI   | American National Standards Institute;                                      |
| ASHRAE | American society of heating, refrigerating and air-conditioning;            |
| CFD    | Computational Fluid Dynamics                                                |
| EN     | European standards;                                                         |
| HVAC   | Heating, ventilation, and air conditioning;                                 |
| ISO    | International organization for standardization;                             |
| SCE    | Sistema de certificação energética e qualidade do ar interior de edifícios; |
| UBI    | Universidade da Beira Interior;                                             |
| UTP    | Unshielded twisted pair;                                                    |
| XPS    | Poliestireno extrudido.                                                     |

# **1. Introdução**

## **1.1. Enquadramento**

“Se observarmos a natureza, facilmente podemos concluir que esta foi a primeira produtora de embalagens alimentares, com diferentes formas de estruturas de proteção, ou seja, com uma estrutura rígida como a noz, semirrígida como o ovo e flexível como a vagem das ervilhas (Castilho, 2012).

As primeiras embalagens alimentares fabricadas pelo homem surgiram na pré-história, há mais de dez mil anos, com a necessidade de preservar e transportar os alimentos, começando por envolver carne crua em folhas de árvore. Ao tornar-se nómada, o Homem teve a necessidade de acondicionar e transportar os alimentos, acabando por utilizar o que a natureza lhe proporcionava, tais como troncos e folhas de árvores, conchas, crânios e peles de animais que serviam de embalagens. Com o passar dos tempos, essas embalagens evoluíram depois para cestos fabricados com raízes, pequenos galhos e caules ou até vasos cerâmicos. Mais tarde, na era dos descobrimentos por via marítima, a necessidade de aumentar o tempo de conservação de alimentos, levou o homem a desenvolver embalagens mais resistentes. Essa evolução foi progressiva, passando pelas embalagens de vidro, de papel, de metal, e mais tarde surgiram as embalagens de plástico” (Castilho, 2012)”.

De seguida estão descritas as evoluções cronológicas do plástico e do papel (cartão) utilizado na produção de embalagens, visto serem estes materiais, os mais utilizados.

O plástico é o mais recente material de embalagem em comparação ao papel (cartão). Embora descoberto no século XIX, a maioria dos plásticos eram reservados para uso militar e em tempo de guerra. Neste contexto, uma grande variedade de plástico foi desenvolvida nos últimos 170 anos, tornando-se um material de elevada importância. Vários plásticos foram descobertos no século XIX: estireno em 1831, cloreto de vinilo em 1835, e celuloide no final da década de 1860. No entanto, nenhum destes materiais tornou-se prático para embalagem até ao século XX. Em 1831, foi descoberto o processo de destilação do estireno, a partir da árvore de bálsamo, teve de ser refinado em 1933 na Alemanha, pois os produtos produzidos com este material eram frágeis e quebravam com extrema facilidade. Na década de 50 este tipo de plástico estava disponível em todo mundo, tendo sido utilizado em vários tipos de isolamento e amortecimento de materiais, bem como caixas de espuma e bandejas de carne para a indústria alimentar. A celuloide foi inventada durante a Guerra Civil Americana. Devido à escassez de marfim,

um fabricante nos Estados Unidos de bolas de bilhar ofereceu uma recompensa 10.000 dólares para um substituto do marfim. Um engenheiro de Nova York, John Wesley Hyatt, em parceria com o seu irmão Isaías Smith Hyatt, criaram este tipo de material. Patenteado em 1870, "celuloide" poderia então ser esculpida e moldada, assim como o marfim. O polietileno tereftalato é um dos plásticos mais utilizados no fabrico de garrafas de bebidas desde 1977, ano em que foram colocados no mercado. Desde 1980 que este tipo de plástico também é utilizado em embalagem de alimentos quentes e congelados (Berger, 2012). Ao longo da história, os chineses foram considerados como os primeiros a utilizarem embalagens de papel, pois no Século I A.C. utilizavam folhas de casca da amoreira para acondicionar os alimentos, dando origem, séculos mais tarde ao desenvolvimento e aperfeiçoamento das técnicas de fabricação de papel, que se estendeu progressivamente a toda a Ásia e à Europa, mais precisamente em 1310 com a primeira fabricação do papel na Inglaterra. Esta técnica apenas chegou à América em 1690. O papel é basicamente uma folha fina de celulose. A celulose é um material fibroso derivado de plantas. A utilização das fibras de celulose originou o desenvolvimento dos sacos de papel. Os primeiros sacos foram fabricados em 1844, em Bristol, Inglaterra. Mais tarde, em 1852, nos Estados Unidos, Francis Wolle inventou a primeira máquina de fabrico de sacos. Pouco a pouco, com as sucessivas melhorias, o saco de papel passou a substituir o saco de algodão no acondicionamento de farinha. Apenas em 1925, com a aplicação de multicamadas e de costuras nas extremidades, o saco de papel passou também a substituir o saco de tecido no acondicionamento de maiores quantidades de produto, tais como, rações (Berger, 2012).

As embalagens são consideradas um negócio extremamente rentável, movimentando mundialmente mais de US\$ 500 bilhões ao ano. Este mercado representa dentre 1 e 2,5% do PIB (Produto Interno Bruto) de cada país (ABRE, 2016). A Ásia, a América do Norte e a Europa Oeste são as três maiores regiões do mundo em vendas de embalagens (Raconteur, 2014). Os mercados do Brasil, Rússia, Índia e China compreendem aproximadamente 30% da procura global e apresentam crescimento conforme as suas economias se desenvolvem. O aumento do consumo e da procura de bens em países em desenvolvimento impulsiona a necessidade de mais embalagens (Ey, 2013).

A indústria de alimentos é a maior utilizadora de embalagens, conforme apresentando na Figura. 1.1, compreendem 51% das vendas, mundialmente (Ey,2013). Alguns dos principais fatores responsáveis pelo crescimento do setor de alimentos são o desenvolvimento económico acelerado, e o crescimento da população (Wallis *et al.*, 2012).

Segundo Brody *et al.* (2008), o uso de embalagens para alimentos é um indicador socioeconómico da capacidade de gastos da população.

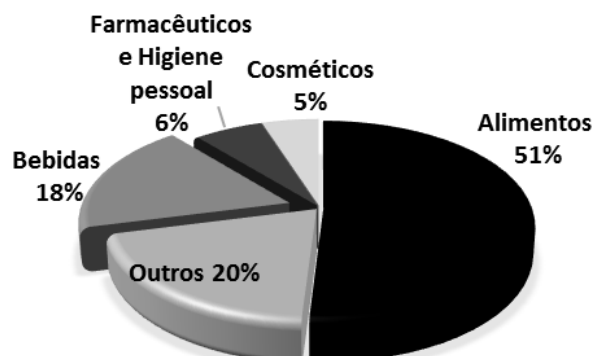


Figura 1. Vendas de embalagens no mundo (Ey, 2013).

A proporção de papel e papelão tem a maior participação no mercado, 34%, seguido dos plásticos rígidos com 31% (Ey, 2013). Atualmente, na indústria de alimentos é comum combinarem diversos materiais na confecção de embalagens, com o objetivo de explorar cada um, o máximo das suas propriedades e características funcionais (Verghese *et al.*, 2013; Marsh & Bugusu, 2007).

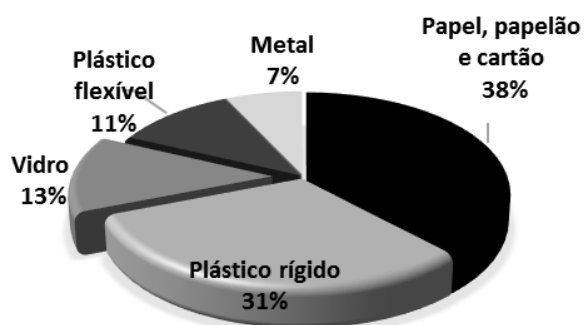


Figura 2. Materiais utilizados pela indústria mundialmente para a produção de embalagem (Ey, 2013).

As embalagens de produtos alimentares podem ser de metal, plástico, vidro ou papel. Ainda podem ser encontradas embalagens de madeira, têxteis e cortiça. As embalagens podem ser classificadas como rígidas, semi-rígidas ou flexíveis, conforme apresentado na Tabela .1 Em alguns casos é a espessura do material que classifica a embalagem.

Tabela 1. Embalagens rígidas, semi-rígidas e flexíveis (Castilho, 2012).

| <b>Embalagens</b> | <b>Plástica</b>                                                                                                                         | <b>Papel</b>                                                                                                                        |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rígida            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bandejas, garrafas, potes, grades e caixas</li> </ul>                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caixas de papelão</li> </ul>                                                               |
| Semi rígida       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bandejas em poliestireno expandido</li> <li>• Frascos, copos e potes termo-formados</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caixas e cartuchos em cartolina</li> <li>• Bandejas e alvéolos em polpa moldada</li> </ul> |
| Flexíveis         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estruturas laminadas</li> </ul>                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Folha de papel</li> <li>• Estruturas laminadas</li> </ul>                                  |

Quanto à função, as embalagens podem ser primárias, secundária e terciárias. A embalagem primária, como a lata, a garrafa ou o saco está em contato direto com o produto e é normalmente responsável pela conservação e contenção do produto permitindo o seu armazenamento por longos períodos. A embalagem primária é aquela que o consumidor leva para casa, e que tipicamente é descartada no lixo, seja ele separado ou não. As embalagens primárias são agrupadas em cargas unitárias, em paletes de madeira ou plásticas.

A embalagem secundária, como é o caso das caixas de cartão ou cartolina que contém uma ou várias embalagens primárias e é normalmente responsável pela proteção físico-mecânica durante a distribuição. A embalagem secundária é, muitas vezes, também responsável pela comunicação, sendo o suporte da informação, principalmente nos casos em que contém apenas uma embalagem primária.

A embalagem terciária (ver Fig. 3), agrupa diversas embalagens primárias ou secundárias para o transporte, como caixas de papelão, ou grades plásticas para garrafas de bebidas ou paletes. A escolha de embalagens deste tipo depende da natureza da embalagem individual (rígida, semi-rígida ou flexível); do esquema de paletização (dimensionamento da embalagem coletiva com vista a maximizar o aproveitamento do palete) e dos custos (Castilho, 2012).



Figura 3. Os três níveis das embalagens alimentares (Castilho, 2012).

A seleção do sistema de embalagem para um dado produto depende de muitos fatores como o tipo de produto, os requisitos de proteção, a vida útil requerida para o produto, o mercado a que se destina e o circuito de distribuição e venda, etc. Todos os materiais apresentam aspectos positivos e negativos e as principais características do plástico e do papel/cartão, adequados às embalagens, são mencionadas a seguir:

### **Papel**

- Várias espessuras e formatos;
- Combinação com vários materiais para formar produtos laminados ou revestidos;
- Baixa resistência mecânica;
- Baixa barreira;
- Falta de inércia;
- Resistente à baixas temperaturas;

### **Plástico**

- Leve;
- Resistência mecânica e térmica;
- Barreira e inércia relativa;
- Reciclável;
- Possibilidade de combinação com papel e alumínio ou outros plásticos.

## **1.2. O problema em estudo e a sua relevância**

Atualmente assiste-se a uma necessidade crescente de estender a vida útil de produtos alimentares perecíveis, quer seja para garantir a qualidade e segurança alimentar quer seja para reduzir o desperdício alimentar, que no caso de produtos hortofrutícolas atinge aproximadamente 50%. Para produtos hortofrutícolas como frutas, legumes e flores cortadas, a temperatura é um parâmetro extrínseco mais importante que afeta a taxa de deterioração do produto e a vida pós-colheita (Robertson, 2013; Thompson *et al.*, 2008). De acordo com (Defraeye *et al.*, 2015), a rápida remoção do calor do campo após a colheita através do arrefecimento e manutenção da temperatura ideal do produto em abastecimento logístico são, portanto, de extrema relevância. Dessa forma, a cadeia de frio ajuda a preservar a qualidade do produto e a prolongar a vida útil, reduzindo assim as perdas de alimentos após a colheita e o desperdício alimentar. Segundo o Gustavsson *et al.* (2011), as perdas e os resíduos pós-colheita na cadeia de abastecimento de frutas e legumes podem chegar a 13 a 38%, antes mesmo de chegar ao consumidor. Além disso, até 20% de todos os alimentos perecíveis podem ser perdidos devido à falta de infraestrutura (adequada) de refrigeração ou acesso à energia (IIR, 2009). Uma enorme quantidade de recursos naturais, como energia e água, está incorporada nessas perdas de alimentos, mas também nas emissões de dióxido de carbono (Masanet *et al.*, 2008; Thompson *et al.*, 2010). Essa energia incorporada representa aproximadamente 38% de toda a energia consumida na indústria de alimentos (FAO, 2011; Gustavsson *et al.*, 2011). Dessa forma, e numa perspetiva de melhorar a sustentabilidade das embalagens, em pontos de vista energético, ambiental e segurança alimentar, surge a necessidade de se realizar um estudo paramétrico por Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) do escoamento do ar e transferência de calor e de massa para otimização do desempenho de embalagens de produtos alimentares.

## **1.3. Objetivos e contribuição da dissertação**

A presente dissertação tem como objetivo desenvolver estudos paramétricos por Dinâmica de Fluidos Computacional de acomodação e estrutura de embalagens envolvendo simultaneamente parâmetros estruturais, geométricos, térmico e mássicos para a previsão do escoamento do ar e transferência de calor que permitam avaliar o desempenho de embalagens de produtos alimentares.

## **1.4. Visão geral e organização da dissertação**

A dissertação encontra-se organizada por 5 capítulos.

-No primeiro capítulo é realizada a introdução e enquadramento ao tema.

- No segundo capítulo é realizado uma análise do estado de arte com intuito de abordar estudos científicos mais relevantes ligados ao tema em estudo.

-No terceiro capítulo é feita uma abordagem concernente aos materiais e métodos usados para a realização e a obtenção dos resultados do estudo.

-O quarto capítulo apresenta os resultados dos estudos paramétricos por CFD de configurações e sua acomodação, culminando assim com a análise e discussão dos resultados.

-O quinto capítulo apresenta as conclusões, gerais e específicas do trabalho, assim como as propostas de trabalho futuro.



## 2. Estado da Arte

### 2.1. Introdução

A temperatura é o fator mais importante que afeta a qualidade da fruta, as taxas de deterioração e o tempo de vida útil dos produtos (Thompson *et al.*, 2008). Para reduzir rapidamente a temperatura de produtos hortícolas dentro das embalagens ventiladas e mantê-las em temperatura ideal durante o transporte e armazenamento, são utilizados os métodos de pré-arrefecimento. Dentre os métodos de pré-arrefecimento existentes temos, o arrefecimento a ar forçado e arrefecimento por água, sendo duas técnicas mais recomendadas para o processo de pré-arrefecimento (Tutar, 2009). Neste estudo, apenas será destacada o processo de arrefecimento por ar forçado por ser considerado um método muito comum e eficiente aplicado comercialmente (Castro *et al.*, 2004b; Zou *et al.*, 2006a). Um problema com o arrefecimento por ar forçado é que muitas vezes é encontrada heterogeneidade significativa de arrefecimento entre as frutas frescas. O'Sullivan *et al.* (2016) identificaram essa heterogeneidade de arrefecimento em embalagens paletizadas de kiwis submetidas a pré-arrefecimento com ar forçado. Han *et al.* (2015) revelou a distribuição complexa e desigual do fluxo de ar e campos de temperatura dentro de uma embalagem ventilado com duas camadas de produtos empilhados. Defraeye *et al.* (2015) e Delele *et al.* (2013) relataram uma grande heterogeneidade de arrefecimento entre caixas individuais em diferentes alturas em um palete e também entre frutas individuais em uma única caixa.

Inúmeros factores afectam o processo de pré-arrefecimento dos produtos hortícolas, como características do produto, do sistema de ventilação, da temperatura inicial do ar, da temperatura final desejada para o adequado armazenamento do produto, da geometria do produto (tamanho, forma, porosidade, massa específica, etc.), da configuração da embalagem, propriedades térmicas, e do design de ventilação da embalagem ( tamanho, forma da ventilação, posições da ventilação, área total da ventilação, etc.), da organização e acomodação das embalagens na palete e na câmara (Opara, 2011). Todos esses factores são importantes, pois contribuem significativamente no processo de transferência de calor e massa durante o pré-arrefecimento (Castro *et al.*, 2004b; Vigneault & Castro, 2005a).

Este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de um estudo paramétrico que permite compreender como a orientação, a localização e o número de caixas influenciam de uma forma significativa no processo de transferência de calor e massa durante o processo de arrefecimento dos produtos alimentares.

## **2.2. Modelação matemática**

Vários pesquisadores como o caso do Castro *et al.* (2005), Opara & Zou (2007) e Ngcobo *et al.* (2012) estudaram o fluxo de ar, bem como a transferência de calor e massa em embalagens de produtos hortícolas usando métodos experimentais. No entanto, tais estudos são restritos devido às complicações causadas pelo manuseio de materiais biológicos e flutuações nas propriedades físicas dos produtos hortícolas (Han *et al.*, 2015). Além disso, os estudos experimentais são geralmente caros e demorados e, portanto, difíceis de conduzir. Com o rápido desenvolvimento de técnicas de modelagem dinâmica de fluidos computacional (CFD), os modelos CFD tornaram-se amplamente usados em vários campos reduzindo assim a necessidade de experimentos de campo complexos (Mooney *et al.*, 2014). Em particular, o uso de modelos CFD está se tornando mais popular porque eles podem obter padrões de fluxo de ar e valores de temperatura em uma alta resolução espaço-temporal (Defraeye *et al.*, 2013). Alguns pesquisadores utilizaram simulações de CFD para analisar como o design da embalagem afeta o fluxo de ar, bem como os processos de transferência de calor e massa de produtos hortícolas em caixas ventiladas. Nos últimos anos, inúmeras pesquisas têm sido direcionadas em estudos e análises aprofundados das características do fluxo de ar e transferência de calor dentro de embalagens ventiladas durante o pré-arrefecimento. O objetivo destes estudos resume-se em melhorar a eficiência do pré-arrefecimento, garantir um arrefecimento rápido e uniforme dos produtos. Nesta sequência de ideia, Delele *et al.* (2013) desenvolveu um modelo de dinâmica de fluido computacional tridimensional (3D) para estudar como a área de ventilação, forma de ventilação e número e posição de ventilação afetam o fluxo de ar e a transferência de calor durante o manuseio pós-colheita dos produtos. Os resultados indicam que o número de aberturas e sua posição e forma afetam principalmente a uniformidade do fluxo de ar e arrefecimento. Um aumento na área de ventilação em até 7% deu um aumento razoável na taxa de arrefecimento, no entanto, um aumento adicional na área de ventilação apenas levou a um aumento relativamente baixo no arrefecimento. Os resultados previstos foram consistentes com os resultados medidos. No entanto, o estudo não considerou o efeito do calor evaporativo no fluxo de calor dentro da zona de produção. Dehghannya *et al.* (2011) desenvolveu um sistema matemático para modelar o fluxo de ar e a transferência de calor durante o arrefecimento

por convecção forçada de produtos agrícolas para investigar os padrões de fluxo de ar e a distribuição de temperatura resultante durante o processo de arrefecimento. Os resultados mostraram que a distribuição do fluxo de ar durante o processo de arrefecimento não é homogênea. Uma distribuição mais uniforme do fluxo de ar é obtida aumentando a área de ventilação de 2,4% para 12,1%. No entanto, os autores usaram esferas de plástico em vez de produtos reais, o que diminui a confiabilidade dos resultados da simulação. Posteriormente Dehghannya *et al.* (2012) relataram diferenças consideráveis na distribuição na temperatura de conservação, na heterogeneidade do arrefecimento e no tempo de arrefecimento para diferentes configurações de ventilação da embalagem. Os autores evidenciaram que o aumento da área de ventilação não diminui necessariamente o tempo de arrefecimento, e que isso pode até aumentar o tempo de arrefecimento se as aberturas não forem distribuídas adequadamente nas paredes da embalagem. Ngcobo *et al.* (2012) desenvolveram um estudo em embalagens multicamadas de uvas frescas de mesa, mostrando que a perfuração dos revestimentos melhorou as taxas de arrefecimentos das frutas, mas reduziu significativamente a umidade relativa em torno destas. Os autores também previram que o baixo valor de umidade relativa em revestimentos perfurados resultou num aumento significativo da desidratação do caule e no seu escurecimento, em comparação aos revestimentos não perfurados.

Defraye *et al.* (2014) estudaram o arrefecimento por convecção forçada de frutas cítricas, assim como a influência das condições de arrefecimento e no consumo de energia em relação ao design da caixa. A influência das condições de pré-arrefecimento nas frutas (taxa de escoamento de ar, temperatura de arrefecimento) na taxa de arrefecimento e no consumo de energia do sistema foi avaliada para três projetos de embalagens, uma caixa padrão existente e dois novos designs de caixa, Supervent e Ecopack (ver Fig. 4). O escoamento de ar e a transferência de calor nestas caixas acomodadas numa palete foram avaliados por meio de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD). Com relação ao arrefecimento, foi previsto para a caixa Ecopak uma taxa de transferência de calor convectiva menor do que nas outras caixas, para o mesmo caudal de ar através das caixas. Na caixa Ecopack, no entanto, o arrefecimento das laranjas ocorreu mais uniformemente na caixa padrão e na caixa Supervent, que foi atribuído à velocidade mais elevada do ar prevista nas aberturas das caixas.

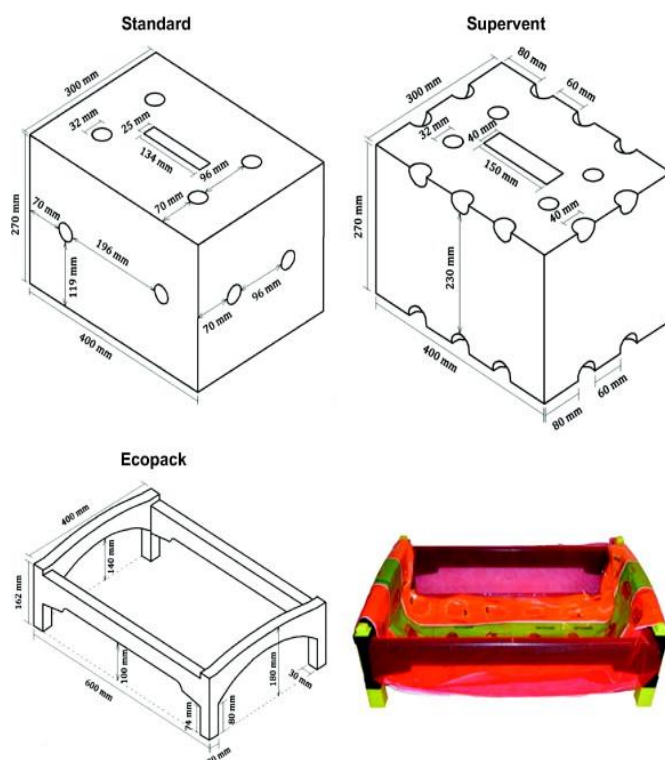


Figura 4. Geometria e dimensões das caixas de papelão ondulado padrão e Supervent e da caixa plástica reutilizável Ecopack (Defraeye *et al.*,2014).

Zou *et al.* (2006a) desenvolveram uma modelação por CFD do escoamento de ar e transferência de calor em embalagens ventiladas para alimentos frescos. As embalagens ventiladas foram divididas em dois tipos, embalagens a granel e em camadas (ver Fig. 5). As regiões de fluxo de ar dentro das embalagens a granel ou entre as bandejas nas embalagens em camadas, foram tratadas como meios porosos, nos quais foram empregues equações de transporte de volume médio. Posteriormente Zou *et al.* (2006b) aplicaram o modelo CFD para resolver numericamente este modelo matemático de uma gama de embalagens de frutas ventiladas e encontraram boa correlação entre os dados previstos e experimentais para as temperaturas centrais dos produtos. Foi encontrada uma falta de ajuste em certos locais dentro da embalagem, o que foi atribuído a medições de temperatura imprecisas e incerteza nos dados de entrada do modelo. Existe uma relação entre a eficácia de arrefecimento e a resistência mecânica. O design das embalagens ventiladas é amplamente baseado na sua resistência mecânica, mas a sua capacidade de promover um arrefecimento rápido e uniforme dos produtos embalados costuma ser deficiente. Ferrua & Singh (2009a) relataram que a homogeneidade do processo de arrefecimento é amplamente influenciada pela estrutura e design da embalagem. No entanto, Vigneault & Goyette (2002a) demonstraram o importante efeito

da área total de abertura no escoamento de ar, até que essa superfície aberta atinja 25% das paredes de um recipiente de plástico. Durante investigações mais recentes, o mesmo grupo de trabalho demonstrou que a melhor eficácia do arrefecimento do ar é obtida usando uma área de superfície aberta entre 8 e 16% das paredes do recipiente (Castro et al, 2005b).

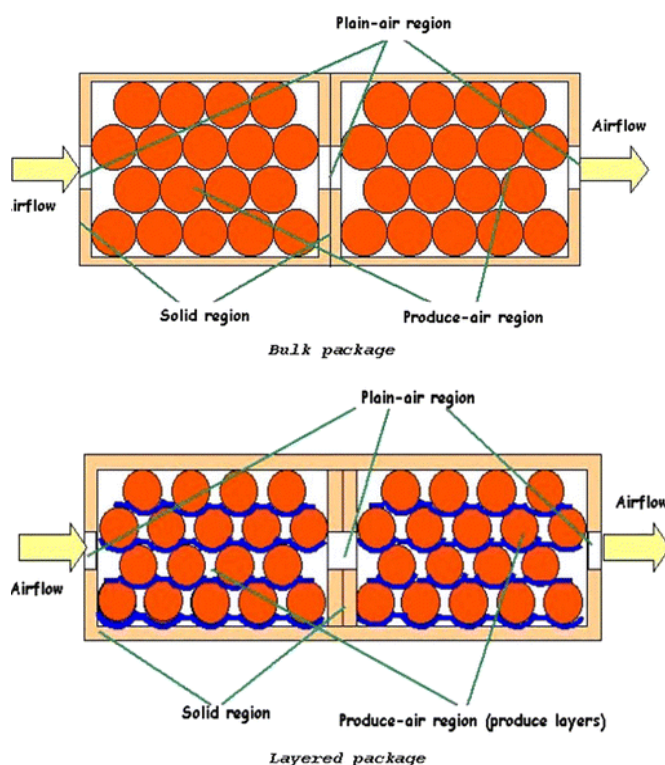
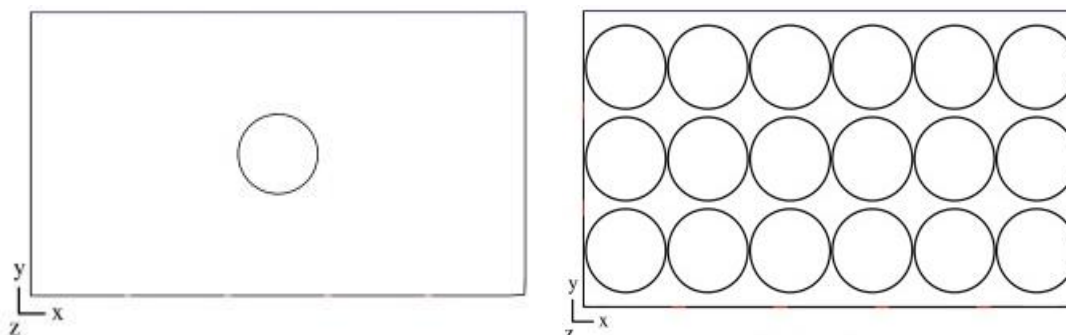


Figura 5. Regiões em embalagens em camadas e a granel para produtos frescos (Zou *et al.*, 2006a).

Opara & Zou (2007), aplicaram análise de sensibilidade ao sistema de modelagem sob arrefecimento de maçãs em caixa de papelão ventilada. A imprecisão na medição da velocidade do ar de entrada teve um efeito pequeno, mas perceptível na precisão das previsões numéricas, enquanto a temperatura prevista é insensível à variação na velocidade do ar ao longo das paredes externas da embalagem em  $\pm 20\%$  não alteraram significativamente as previsões do modelo na região próxima à entrada, mas tiveram efeitos perceptíveis no centro da embalagem e nas regiões próximas a saída. As mudanças na posição da ventilação tiveram efeitos consideráveis nas previsões do modelo, pois alteram a distribuição do escoamento do ar entre as camadas e, conseqüentemente, afetam a transferência de calor entre o ar e os produtos. Tutar *et al.* (2009), estudaram os padrões de fluxo de ar e distribuição de temperatura em embalagens ventiladas, incluindo camadas empilhadas de esferas (ver Fig. 6), usando

CFD. Foram investigados os efeitos do escoamento de ar, intensidade da turbulência, tamanho da abertura de ventilação e taxa de ar na entrada, os quais mostraram que houve uma ligeira melhora no desempenho de arrefecimento com inclusão de 20% de abertura na área de superfície lateral da embalagem.



(a) Configuração da geometria 2-D para uma única esfera.

(b) Configuração da geometria 2-D para as esferas empilhadas.

Figura 6. Configuração geométrica do modelo (Tutar *et al.*, 2009).

Recentemente, Curto *et al.* (2021), desenvolveu um estudo paramétrico por Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) para otimização das diferentes configurações de embalagens e posteriormente validado com os resultados medidos (Leitão *et al.*, 2021). Neste estudo, três diferentes modelos foram desenvolvidos (ver Fig. 7). O primeiro tipo é o modelo A, consistia numa parede com furos em forma de cone para circulação de ar. O segundo tipo é o modelo B, consistia numa parede com quatro grandes aberturas localizadas perto do topo da caixa. O terceiro tipo é o modelo C, consistia em duas paredes, uma parede anterior com 36 pequenas aberturas e uma parede posterior com o mesmo número de abertura maiores. Ao comparar a evolução da temperatura entre os três modelos, os resultados mostraram que as maiores aberturas do modelo B, são mais eficazes no processo de arrefecimento comparativamente aos modelos A e C, pois o modelo B prevê claramente temperaturas mais baixas e tempo de arrefecimento para os produtos embalados.

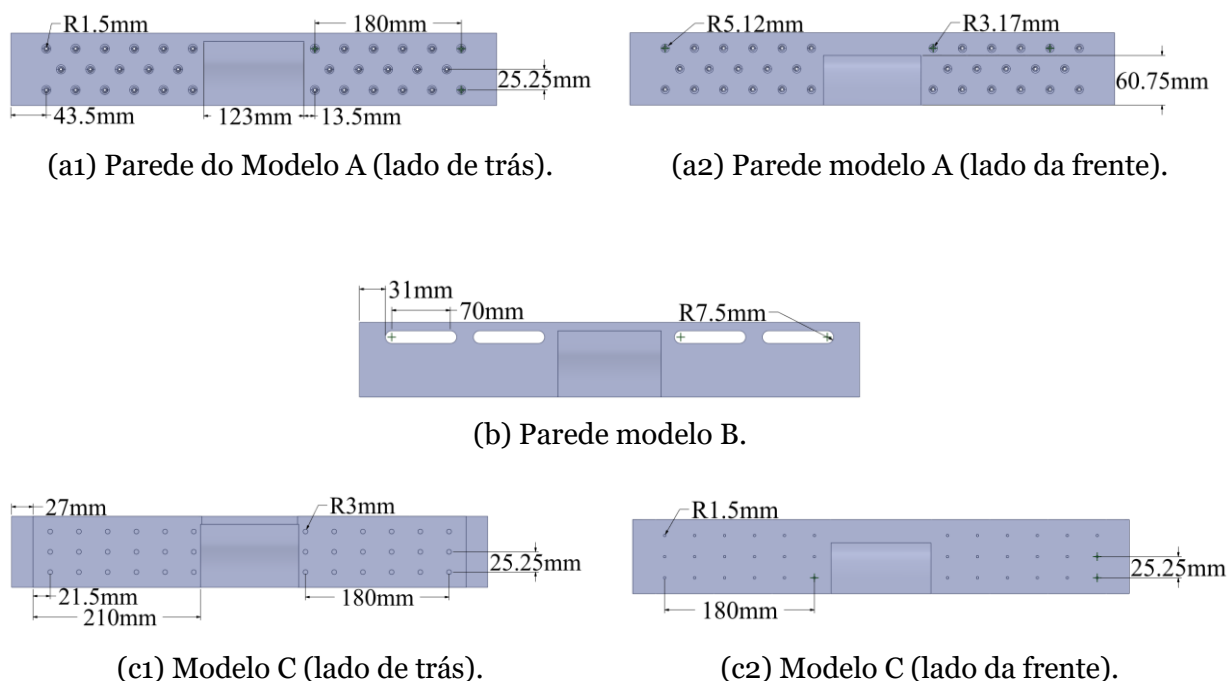


Figura 7. Configuração de modelos de paredes de caixa (Curto *et al.*, 2021).

### 2.3. Nota conclusiva

Neste capítulo foram descritos estudos científicos que contribuiriam para o entendimento fundamental dos efeitos dos parâmetros de projeto de ventilação na taxa e homogeneidade da circulação de ar e arrefecimento de produtos hortícolas embalados. Foram discutidos os requisitos de resistência da embalagem hortícolas ventiladas e modelos matemáticos usados no design de embalagens ventiladas. O efeito da área de ventilação, número de ventilação, posição e forma foram considerados denominadores comuns em todas as investigações analisadas, visto que a taxa de arrefecimento e a uniformidade do escoamento de ar e a temperatura do produto têm sido constantemente influenciados por estes parâmetros. A embalagem deve ter como objetivo a máxima ventilação sem comprometer a integridade mecânica do produto acumulado durante o armazenamento e o transporte.



Tabela 2. Resumo das aplicações recentes de CFD na caracterização e avaliação de desempenho e design de embalagens dos produtos hortícolas frescos.

| Descrição física            |                     |                                                                                                                                          |                    | Modelação por CFD                         |                              |                              |                 |
|-----------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|
| Referência                  | Produto             | Sistema Modelado                                                                                                                         | Regime de trabalho | Modelo de turbulência                     | Algoritmo de acoplamento p-v | volumes de controlo          | Método Numérico |
| Tutar <i>et al.</i> (2009)  | Esferas             | Padrões de fluxo de ar e transferências de calor através de camadas empilhadas de produtos em uma caixa ventilada durante o resfriamento | Transiente         | $k - \varepsilon$ e RNG $k - \varepsilon$ | SIMPLE                       | $26 \times 10^6$ elementos   | Volumes finitos |
| Delele <i>et al.</i> (2012) | Maças               | Sistema de nebulização com fungicida termobulizador                                                                                      | Transiente         | SST- $k - \omega$                         | SIMPLE                       | $4 \times 10^6$ de elementos | Volumes finitos |
| Delele <i>et al.</i> (2013) | Esferas de plástico | Característica de fluxo de ar e transferência de calor em caixas ventiladas de produtos hortícolas                                       | Transiente         | SST- $k - \omega$                         | SIMPLE                       | -                            | Volumes finitos |

Tabela 3. Resumo das aplicações recentes de CFD na caracterização e avaliação de desempenho e design de embalagens dos produtos hortícolas frescos. (cont.)

| Descrição física                |          |                                                                                                                                    |                    | Modelação por CFD     |                              |                              |                 |
|---------------------------------|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|
| Referência                      | Produto  | Sistema Modelado                                                                                                                   | Regime de trabalho | Modelo de turbulência | Algoritmo de acoplamento p-v | volumes de controlo          | Método Numérico |
| Defraeye <i>et al.</i> (2014)   | Laranjas | Arrefecimento por ar forçado de frutas cítricas; Condições de arrefecimento e consumo de energia em relação ao design da embalagem | Transiente         | SST- $k - \omega$     | SIMPLE                       | $5 \times 10^6$ de elementos | Volumes finitos |
| Han <i>et al.</i> (2015)        | Maças    | Modelagem computacional do fluxo de ar e transferência de calor em uma caixa ventilada durante o arrefecimento                     | Transiente         | $k - \omega$          | SIMPLE                       | 319 elementos                | Volumes finitos |
| O'Sullivan <i>et al.</i> (2016) | Kiwis    | Modelagem dos mecanismos de arrefecimento por ar forçado e desempenho de produtos hortícolas polilinhados                          | Transiente         | $k - \varepsilon$     | SIMPLE                       | $7 \times 10^6$ de elementos | Volumes finitos |

Tabela 4. Resumo das aplicações recentes de CFD na caracterização e avaliação de desempenho e design de embalagens dos produtos hortícolas frescos. (cont.)

| Descrição física         |                 |                                                                                                                        |                    | Modelação por CFD     |                               |                               |                 |
|--------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| Referência               | Produto         | Sistema Modelado                                                                                                       | Regime de trabalho | Modelo de turbulência | Algoritmo de acoplamento p-v  | volumes de controlo           | Método Numérico |
| Han <i>et al.</i> (2017) | Maçãs           | Arrefecimento de embalagens ventiladas: avaliação integral do desempenho                                               | Transiente         | SST- $k - \omega$     | SIMPLE                        | -                             | Volumes finitos |
| Han <i>et al.</i> (2018) | Maçãs           | Arrefecimento com ar forçado de maçã paletizada: avaliação da eficiência de arrefecimento                              | Transiente         | SST- $k - \omega$     | PISO                          | $6 \times 10^6$ de elementos  | Volumes finitos |
| Wu <i>et al.</i> (2018)  | Frutas cítricas | Identificação de heterogeneidades no arrefecimento e evolução da qualidade para uma palete de frutas frescas embaladas | Transiente         | SST- $k - \omega$     | SIMPLE e PISO-SIMPLE (PIMPLE) | $26 \times 10^6$ de elementos | Volumes finitos |

Tabela 5. Resumo das aplicações recentes de CFD na caracterização e avaliação de desempenho e design de embalagens dos produtos hortícolas frescos. (cont.)

| Descrição física              |                                   |                                                                                                                              |                    | Modelação por CFD     |                              |                               |                 |
|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| Referência                    | Produto                           | Sistema Modelado                                                                                                             | Regime de trabalho | Modelo de turbulência | Algoritmo de acoplamento p-v | volumes de controlo           | Método Numérico |
| Ilangovan <i>et al</i> (2020) | Esfera de gel-ágar                | Estudo paramétrico e avaliação do desempenho dos ventiladores com configuração da furação da caixa de armazenamento de fruta | Transiente         | SST- $k - \omega$     | SIMPLE                       | $1 \times 10^6$ de elementos  | Volumes finitos |
| Curto <i>et al.</i> (2021)    | Esfera de gel-ágar e poliestireno | Estudo paramétrico de diferentes configurações de aberturas de ventilação de embalagens                                      | Transiente         | $k - \omega$          | SIMPLEC                      | $25 \times 10^6$ de elementos | Volumes finitos |

Tabela 6. Tamanho ideal e configurações de ventilação das embalagens para diferentes tipos de produtos frescos.

| Referência                     | Tipo de produção            | Tipo de recipiente/ embalagem com dimensões              | Característica de ventilação recomendadas                               |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Vigneault & Goyette (2002a, b) | Maçã e cebola               | Recipientes plásticos de 400 a 600 mm e altura de 250 mm | 25% das paredes do contentor                                            |
| Ladaniya & Singh (2002)        | Citrino                     | Placa de fibra de papelão ondulado ( 50×30×30 cm)        | Até 6% de área de ventilação                                            |
| Singh <i>et al.</i> (2003)     | Pêssego                     | Sacos de polietileno (500 g)                             | 2.5% de abertura                                                        |
| Anderson <i>et al.</i> (2004)  | Morango                     | Diferentes combinações de garra e bandeja                | Posicionamento do orifício de ventilação próximo ao centro da embalagem |
| Aswaney (2007)                 | Uva de mesa                 | Papelão ondulado (5/10 kg)                               | Aproximadamente 5% da superfície                                        |
| Ladaniya (2008)                | Tangerinas e laranjas doces | Bolsa de polietileno                                     | 0.5-1% da área da sacola de PE                                          |
| Ladaniya (2008)                | Mandarim `Nagpur`           | Caixas de papelão ondulado (50×30×30 cm)                 | Área lateral de 4-5%, área final de 1.65%                               |
| Ferrua & Singh (2011)          | Morangos                    | Conchas                                                  | Maior área de ventilação e distribuição uniforme do ar de refrigeração  |

Tabela 7. Estudos de CFD na análise de caixas de papelão ondulado usadas na indústria de frutas.

| <b>Referência</b>              | <b>Tipo de produção</b> | <b>Tipo de recipiente/ embalagem com dimensões</b>       | <b>Característica de ventilação recomendadas</b>                        |
|--------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Vigneault & Goyette (2002a, b) | Maçã e cebola           | Recipientes plásticos de 400 a 600 mm e altura de 250 mm | 25% das paredes do contêiner                                            |
| Ladaniya & Singh (2002)        | Citrino                 | Placa de fibra de papelão ondulado (50×30×30 cm)         | Até 6% de área de ventilação                                            |
| Singh <i>et al.</i> (2003)     | Pêssego                 | Sacos de polietileno (500 g)                             | 2.5% de abertura                                                        |
| Anderson <i>et al.</i> (2004)  | Morango                 | Diferentes combinações de garra e bandeja                | Posicionamento do orifício de ventilação próximo ao centro da embalagem |
| Aswaney (2007)                 | Uva de mesa             | Papelão ondulado (5/10 kg)                               | Aproximadamente 5% da superfície                                        |
| Ladaniya (2008)                | Tangerinas e laranjas   | Bolsa de polietileno                                     | 0.5-1% da área da sacola de PE                                          |
| Ladaniya (2008)                | Mandarim `Nagpur`       | Caixas de papelão ondulado (50×30×30 cm)                 | Área lateral de 4-5%, área final de 1.65%                               |
| Ferrua & Singh (2011)          | Morangos                | Conchas                                                  | Maior área de ventilação e distribuição uniforme do ar de refrigeração  |

## **3. Materiais e Métodos**

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos usados no desenvolvimento desta dissertação, desde a etapa inicial até a obtenção dos resultados.

### **3.1. Materiais**

A dinâmica do fluido computacional (CFD) faz uso de cálculo computacional de modelos matemáticos e escoamento de fluidos. Os programas computacionais de CFD são agora considerados ferramentas numéricas padrão que predizem não apenas o comportamento do fluxo de fluidos, mas também a transferência de calor, de massa (como a transpiração ou dissolução), mudança de fase (como em congelamento, fusão ou ebulição), reação química (como combustão ou enferrujamento), movimento mecânico (como rotação de um impulsor, pistões, ventiladores ou lemes) e estresse ou deformação de estruturas sólidas relacionadas (como um mastro dobrando ao vento). O CFD também tem sido aplicado na área de processamento de alimentos (Scott, 1994). Como a procura dos consumidores por refeições convenientes e de alta qualidade tem vindo a crescer nos últimos anos, o desenvolvimento de novas práticas e tecnologias de processamento de alimentos têm sido estimuladas. A aplicação de CFD na indústria alimentar serve para a melhor compreensão dos complexos mecanismos físicos que regem as propriedades térmicas, físicas e biológicas dos alimentos. Para realizar uma análise por CFD, primeiramente deve se definir a física do problema e usar conhecimentos científicos para expressá-lo matematicamente. Em seguida o software CFD incluirá esse conhecimento e expressará o problema declarado em termos científicos. Por fim, o sistema computacional realizará os cálculos prescritos pelo software CFD e posteriormente são avaliados e interpretados os resultados.

De acordo com o Shaw, (1992), são três as tarefas principais que devem ser feitas para realização de uma simulação. Todas as tarefas que ocorrem antes do processo de solução numérica são chamadas de pré-processamento. Isso envolve a física do problema, na qual se deve considerar o problema do escoamento do fluido e tentar entender o máximo possível sobre ele. Análise das malhas, cria-se a forma do domínio do problema a ser analisada. Isso geralmente pode ser feito com ajuda de um programa CAD padrão que permite importar dados gerados por esse programa em CFD. Em seguida, o domínio do problema é subdividido em inúmeras células, também conhecidas como volumes e

elementos. Uma vez concluída a malha, os limites do domínio do problema podem ser encontrados e as condições de limite necessárias, determinadas na fase inicial, devem ser aplicadas. Essas condições, juntamente com alguns parâmetros de fluido e propriedades físicas, especificam o problema real de escoamento a ser resolvido. A tarefa do processamento envolve o uso de sistemas computacionais para resolver as equações matemáticas de escoamento de fluidos. Uma vez concluída a malha, os valores de entrada do modelo devem ser especificados e, em seguida, o software pode resolver as equações de estado para cada célula até que uma convergência aceitável seja alcançada. Este é um processo muito intensivo e geralmente requer que os sistemas computacionais resolvam milhares de equações. Em cada caso, as equações são integradas e as condições de limite são aplicadas. Este todo processo é, conhecido como discretização de equação, e é aplicado a cada célula particular da malha. O processo é repetido de forma iterativa até que uma precisão necessária seja alcançada. A tarefa pós-processamento é utilizado para fazer a avaliação dos dados gerados pela análise de CFD. Depois de obtenção dos resultados, estas podem ser analisados numericamente ou graficamente.

## **3.2. Métodos**

### **3.2.1. Modelo físico-matemático**

Nesta subseção é efetuada uma revisão teórica relativa à representação física e matemática dos fenômenos físicos que exprimem o escoamento de fluidos com transferência de calor associado. Inicialmente é definida as equações gerais que governam o fenômeno físico, a partir da lei de conservação adequadas ao fenômeno, como a conservação de massa, de energia e de quantidade de movimento. Em função da abordagem seguida para a definição do fenômeno, foram usadas as seguintes referências de base: Ansys (2013), Ansys (2018), Fortuna (2000), Wilcox (1998), Defraeye *et al.*(2013a), Defraeye *et al.*(2013b), Han *et al.* (2018), Oliveira (2001) e Gaspar (2008). No modelo físico-matemático também são descritos os modelos de turbulência.

#### **3.2.1.1. Equação de Conservação da Massa**

A equação de conservação da massa, ou equação de continuidade, é dada pela Equação 1.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 \quad [1]$$

O primeiro termo representa a variação temporal da massa específica do fluido, enquanto o segundo descreve a taxa da variação da massa por unidade de volume. O  $\rho$ , representa a massa específica;  $v_i$  representa a componente da velocidade segundo as direcções cartesianas  $x$ ,  $y$  e  $z$ ;  $t$  representa o tempo e  $x_i$  representa a componente das coordenadas cartesianas  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

### 3.2.1.2. Equação de Conservação de Quantidade de Movimento

A equação de conservação de quantidade de movimento, ou de Navier-Stokes, pode ser descrita pela Equação 2.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad [2]$$

Onde  $p$  é a pressão estática,  $\rho$  é a massa específica,  $v$  é o vector velocidade,  $\bar{\tau}$  é o tensor de tensões,  $\rho \vec{g}$  e  $\vec{F}$  são a força gravitacional do corpo e forças externas (ver Equação 3).

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad [3]$$

Em que  $\mu$ , é a viscosidade molecular,  $I$  é o tensor unitário e o segundo termo da equação corresponde ao efeito da dilatação volumétrica.

### 3.2.1.3. Equação de Conservação de Energia

A equação da energia reflecte o princípio da conservação de energia exposto pela 1ª lei da termodinâmica aplicada a um fluido em movimento, dada pela Equação 4.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho e + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_i h_i \vec{J}_i + (\bar{\tau} \cdot \vec{v}) \right) + S \quad [4]$$

Em que  $k_{eff}$  representa a condutividade térmica efectiva e  $\vec{J}_i$  representa o fluxo de calor difusivo da espécie  $i$ .  $S$  representa o termos fonte.

Onde nesta equação a energia específica é dada pela Equação 5:

$$e = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad [5]$$

Para gases ideais, a entalpia sensível é definida pela Equação 6:

$$h = \sum_i Y_i h_i \quad [6]$$

#### **3.2.1.4. Equação de Estado**

Assumindo que o ar ambiente é considerado como um gás ideal, é possível relacionar a massa específica e a temperatura de maneira a avaliar a variação de massa específica em função da variação da temperatura do fluido que traduzem o seu efeito na força de impulsão que é descrita pela Equação 7.

$$\rho = \frac{p_{op}}{\frac{R}{M_w} T} \quad [7]$$

Onde  $p_{op}$  é a pressão de funcionamento,  $p$  é a pressão estática em relação à pressão de funcionamento,  $R$  é a constante universal dos gases e  $M_w$ , é a constante do peso molecular.  $T$  é a temperatura, que será calculada a partir da equação de energia.

#### **3.2.2. Modelo de Turbulência**

“A turbulência é um fenômeno que ocorre praticamente em todos os escoamentos de engenharia. Os movimentos turbulentos são caracterizados por flutuações instantâneas de velocidade, temperatura e outros escalares. Como consequência destas flutuações, o estado turbulento em um fluido contribui significativamente no transporte de momento, transferência de calor e massa na maioria dos escoamentos de interesse prático e, por isso, têm uma influência determinante nas distribuições destas propriedades no campo de escoamento (Souza *et al.*, 2011). Muitas teorias e conceitos têm sido formulados na tentativa de obter uma descrição universal para o fenômeno da turbulência que seja adequada a qualquer problema de interesse prático. Enquanto tal descrição não é alcançada, e há dúvidas se algum dia o será, modelos simplificados têm sido propostos como forma de analisar problemas específicos em cada área de interesse (Eiger, 1989)”. Existem algumas soluções para formulação do modelo de turbulência, isto é, entre a aproximação média de Reynolds (*Reynolds-averaged Navier-Stokes* - RANS), a

simulação directa da turbulência (*Direct Numerical Simulation* - DNS) ou a simulação das grandes escalas da turbulência (*Large Eddy Simulation* - LES).

As equações de Navier-Stokes modelam o escoamento de fluidos compressíveis e incompressíveis, turbulentos e laminares. Dependendo das propriedades do escoamento e do fluido, podem-se simplificar consideravelmente as equações, visando reduzir as dificuldades inerentes a sua solução numérica (Fortuna, 2000).

### Modelo de turbulência Padrão

O modelo de turbulência  $k$ - $\omega$  padrão é baseado no modelo Wilcox (1998), que incorpora modificações para efeitos de baixo número de Reynolds, compressibilidade e dispersão do escoamento de cisalhamento. Um dos pontos fracos do modelo Wilcox é a sensibilidade das soluções aos valores para  $k$  e exterior à camada de cisalhamento. O modelo padrão é um modelo empírico baseado em equações de transporte da energia cinética turbulenta ( $k$ ) e da sua taxa de dissipação específica ( $\omega$ ) (Ansys, 2013).

### Equações de Transporte para o Modelo Padrão $k$ - $\omega$

A energia cinética turbulenta e a sua taxa de dissipação específica, são obtidas a partir das seguintes Equações 8 e 9, respetivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial \rho}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - Y_k + S_k \quad [8]$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial \rho}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad [9]$$

Onde,  $G_k$  representa a geração de energia cinética turbulenta devido à velocidade média.  $G_\omega$  representa a geração de  $\omega$ .  $\Gamma_k$  e  $\Gamma_\omega$  representam a difusividade efetiva para o  $k$  e  $\omega$ .  $Y_k$  e  $Y_\omega$  representam a dissipação de  $k$  e  $\omega$  devido à turbulência.

Para realização deste estudo, foi utilizado um modelo de Navier-Stokes (RANS) com média de Reynolds em combinação com o modelo de transporte de tensão de cisalhamento  $k$ - $\omega$ . Alguns estudos anteriores, validaram extensivamente utilização deste modelo para simular o fluxo e arrefecimento de frutas esféricas (Defraeye *et al.*, 2014, Berry *et al.*, 2017, Han *et al.*, 2018). É de realçar, o modelo aplicado para desenvolvimento deste estudo, proporcionou resultados satisfatórios nos estudos anteriores (Han *et al.*, 2017, Han *et al.*, 2018, Wu & Defraeye, 2018).

### Modelo de turbulência de transporte de tensão de cisalhamento $k-\omega$

Na realização deste estudo, conforme já mencionado anteriormente, foi usado o modelo de transporte de tensão de cisalhamento  $k-\omega$ , uma variante do modelo  $k-\omega$  desenvolvido para misturar eficazmente a formulação robusta e precisa do modelo  $k-\omega$  na região das paredes (Menter, 1994). O modelo de transporte de tensão de cisalhamento  $k-\omega$  é semelhante ao modelo padrão, mas inclui os seguintes aperfeiçoamentos:

- O modelo de transporte de tensão de cisalhamento  $k-\omega$  utiliza uma função de mistura para fazer uma transição gradual do modelo padrão  $k-\omega$  perto da parede para uma versão de número alto de Reynolds do modelo  $k-\varepsilon$  na porção exterior da camada limite.
- Contém uma formulação modificada de viscosidade turbulenta para contabilizar os principais efeitos turbulentos do transporte de tensão de cisalhamento.
- O modelo de transporte de tensão de cisalhamento fornece geralmente uma previsão precisa do início e do tamanho de separação sob gradiente de pressão adverso.

Estas características tornam o modelo de transporte de tensão de cisalhamento  $k-\omega$ , mais precisos e fiáveis para uma classe mais vasta de fluxos do que o modelo padrão  $k-\omega$  (fluent, 2013).

### Equações de Transporte para o Modelo de transporte de tensão de cisalhamento $k-\omega$

O modelo de transporte de tensão de cisalhamento  $k-\omega$ , tem uma forma semelhante ao modelo padrão  $k-\omega$ , sendo expresso pelas Equações 10 e 11.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) \frac{\partial \rho}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - Y_k + S_k \quad [10]$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) \frac{\partial \rho}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega + D_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad [11]$$

Nestas equações,  $G_k$  representa a geração de energia cinética de turbulência devido à velocidade média.  $G_\omega$  representa a geração de  $\omega$ .  $\Gamma_k$  e  $\Gamma_\omega$  representam a difusividade

efetiva para o  $k$  e  $\omega$ .  $Y_k$  e  $G_\omega$  representam a dissipação de  $k$  e  $\omega$  devido à turbulência.  $D_\omega$  representa o termo de difusão cruzada.  $S_k$  e  $S_\omega$  são termos fontes.

### Modelação da Difusividade Efetiva

A difusividade efetiva para o modelo de transporte de tensão de cisalhamento  $k$ - $\omega$  é dada pelas Equações 12 e 13:

$$\Gamma_k = \mu \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad [12]$$

$$\Gamma_\omega = \mu \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad [13]$$

Onde  $\mu_t$  A viscosidade turbulenta,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\omega$  são os números Prandtl turbulentos para  $k$  e  $\omega$ , respetivamente.

### Modelação da Produção de Turbulência

#### Produção de $k$

O termo  $G_k$  representa a produção de energia cinética de turbulência, e é definido da mesma forma como no modelo padrão  $k$ - $\omega$ .

#### Produção de $\omega$

O termo  $G_\omega$  representa a produção de  $\omega$  e é dado pela Equação 14:

$$G_\omega = \frac{\alpha}{v_t} G_k \quad [14]$$

### Modelação da dissipação da Turbulência

O termo  $Y_k$  representa a dissipação da energia cinética de turbulência, e é definida de forma semelhante como no modelo padrão  $k$ - $\omega$ , vem dado pela Equação 15.

$$Y_k = \rho \beta \cdot k \omega \quad [15]$$

O termo  $Y_\omega$  representa a dissipação de  $\omega$ , e é definido de forma semelhante como no modelo padrão  $k-\omega$ , expresso pela Equação 16.

$$Y_\omega = \rho \beta \cdot k \omega^2 \quad [16]$$

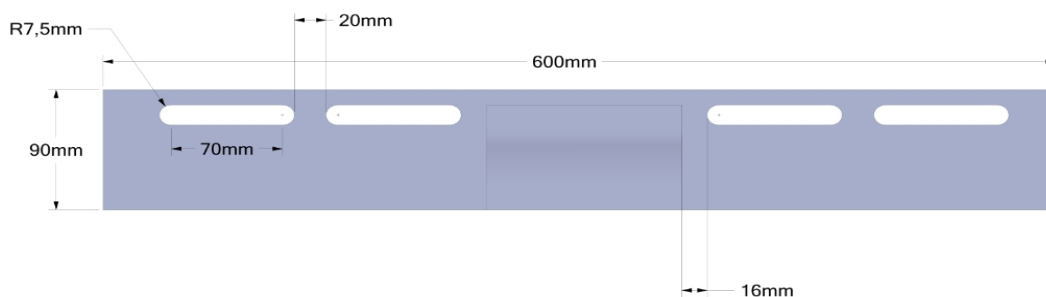
### **3.2.3. Modelo Numérico**

Nesta subseção é descrito o método numérico de resolução das equações que governam o fenômeno físico descrito no modelo físico-matemático. Para resolução destas equações que governam o escoamento, foram usadas as seguintes referências de base: Mesh (2019), Han *et al.* (2018), Oliveira (2001) e Gaspar (2008).

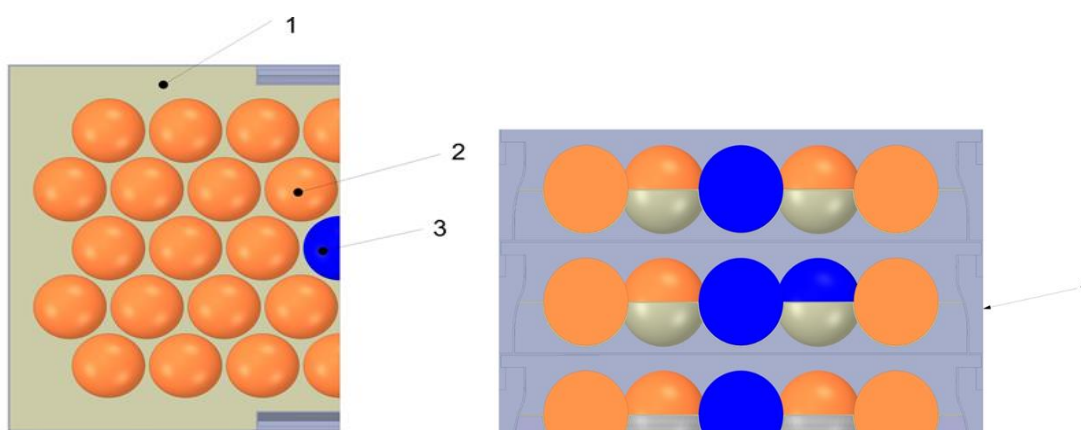
Os modelos numéricos são amplamente utilizados em muitas áreas para analisar ou melhorar um processo e projeto existentes e para desenvolver novos projetos. Com o rápido desenvolvimento da modelação por CFD, os modelos numéricos tornaram-se amplamente empregados em vários campos porque reduzem a necessidade de experimentos de campo complexos, particularmente para o processo de arrefecimento com ar forçado de produtos hortícolas frescos (Han *et al.*, 2018). O modelo numérico transforma as equações diferenciais parciais em equações algébricas, que são resolvidos num número de finitos pontos.

#### **3.2.3.1. Configuração Geométrica**

Neste estudo, é utilizada uma caixa de polipropileno com dimensões 0,6m×0,4m×0,09 m, espessura 1,5mm (Fig. 8(a)). Este desenho de caixa resulta de estudos experimentais anteriores (Madham *et al.*, 2021; Leitão *et al.*, 2021a; Leitão *et al.*, 2021b) e numéricos (Ilangovan *et al.*, 2020a, 2020b, 2020c; Curto *et al.*, 2020) para melhorar o fluxo de ar e a transferência de calor dentro de caixas de fruta de embalagem. A caixa tem quatro aberturas na frente e no verso. Uma bandeja de cartão com dimensões 0,63×0,39×0,001 m<sup>3</sup> é utilizado para armazenar as frutas. A caixa modelada é preenchida com 35 frutas, colocadas dentro de uma câmara refrigerada que tem grelhas de entrada e saída (ver fig. 8(b)). As frutas são modeladas como esferas de gel-agar e poliestireno com um diâmetro de 70 mm, como mostrado na Fig. 8(b).



(a)



(b)

(c)

Figura 8. Configuração do modelo: (a) parede da caixa com as respectivas dimensões; (b) vista de cima da caixa, (c) vista frontal da caixa. (Legenda: 1. Bandeja de Cartão, 2. Esferas de poliestireno, 3. Esferas de gel-agar, 4. Caixa de polipropileno)

### 3.2.3.2. Configuração Numérica

#### Propriedades termofísicas

A determinação das propriedades termofísicas dos materiais é de extrema relevância, visto que interferem diretamente nos cálculos para a resolução das equações que governam o fenómeno em estudo.

As principais propriedades usadas para simulação são: calor específico ( $c_p$ ), condutibilidade térmica ( $k$ ) e massa específica ( $\rho$ ). Na Tabela 5 encontra-se indicados os valores constantes considerados para as propriedades do fluido e sólidos.

Tabela 8. Propriedades dos materiais do ar dos materiais sólidos usados no modelo numérico.

| Propriedades                          | Material              |               |           |         |              |
|---------------------------------------|-----------------------|---------------|-----------|---------|--------------|
|                                       | Ar                    | Polipropileno | Ágar (2%) | Bandeja | Poliestireno |
| Massa específica (kg/m <sup>3</sup> ) |                       | 800           | 1000      | 930     | 16           |
| Calor específico (J/kg·K)             | 1006,513              | 1200          |           | 1340    | 1210         |
| Condutibilidade térmica (W/m·K)       | 0,024352              | 0.150         | 0.550     | 0.180   | 0.040        |
| Viscosidade (Pa·s)                    | 1,72×10 <sup>-6</sup> | -             | -         | -       | -            |
| Peso molecular (g/mol)                | 28,966                | -             | -         | -       | -            |

### 3.2.3.3. Malha Computacional

De um modo geral, o método dos volumes finitos é o principal método numérico usado para se resolver as equações de transporte para uma variável  $\phi$  numa simulação CFD, é dada pela Equação 18. Neste método, o domínio de cálculo é dividido em um certo volume de controlo adjacentes, de forma a existir um volume de controle em torno de cada ponto da malha e a equação diferencial é integrada em cada volume de controlo (Figura. 9).

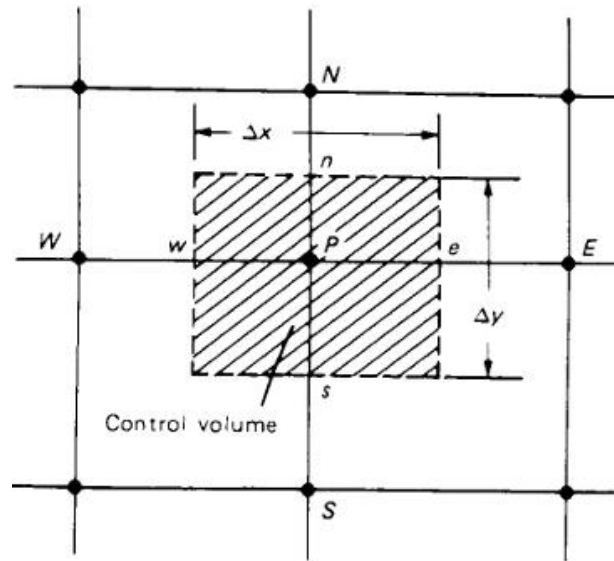


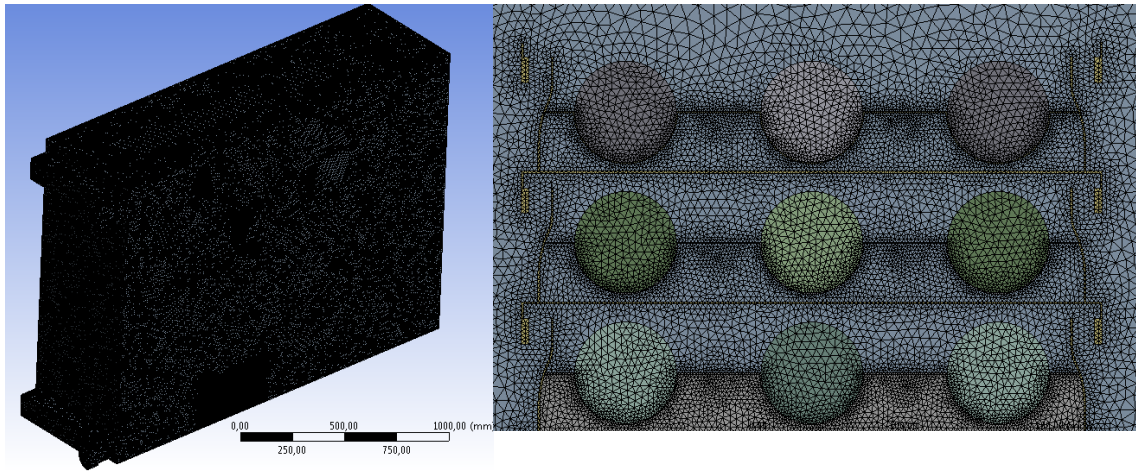
Figura 9. Volume de controle bidimensional (Oliveira, 2001).

A equação geral de transporte para uma variável  $\phi$ , que representa um princípio de conservação, é dada pela Equação 18.

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} \phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \overrightarrow{\text{grad}}(\phi)) + S_{\phi} \quad [18]$$

Onde  $\Gamma_{\phi}$  é o coeficiente difusivo de  $\phi$ ,  $S_{\phi}$  termo fonte de  $\phi$  e o  $\vec{u}$ , vetor velocidade.

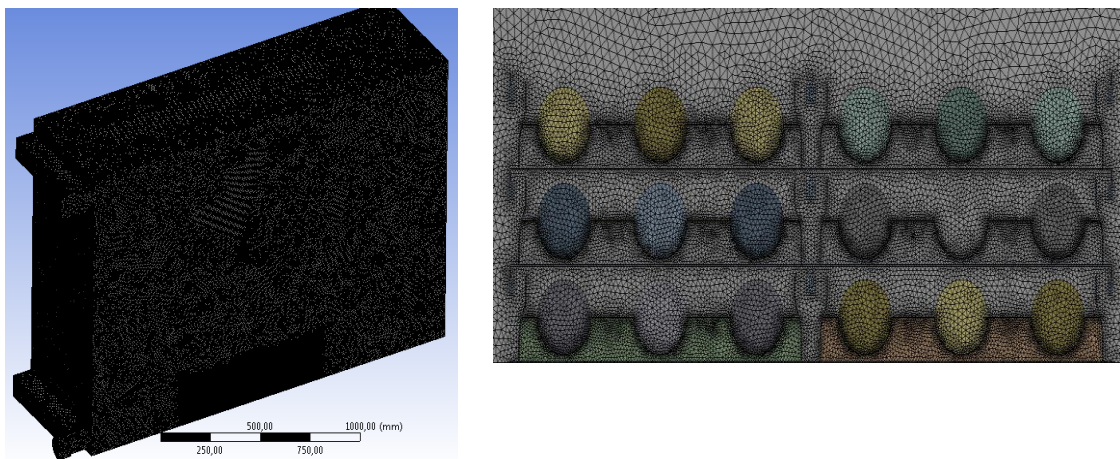
A malha computacional, foi elaborada utilizando o software de geração de malha ANSYS (Meshing, 2019 R3). Os elementos foram gerados usando volumes tetraedros com um número total de  $25 \times 10^6$ ,  $34 \times 10^6$  e  $54 \times 10^6$  elementos (ver Fig. 10).



(a1) Domínio computacional.

(a2) Detalhe da malha.

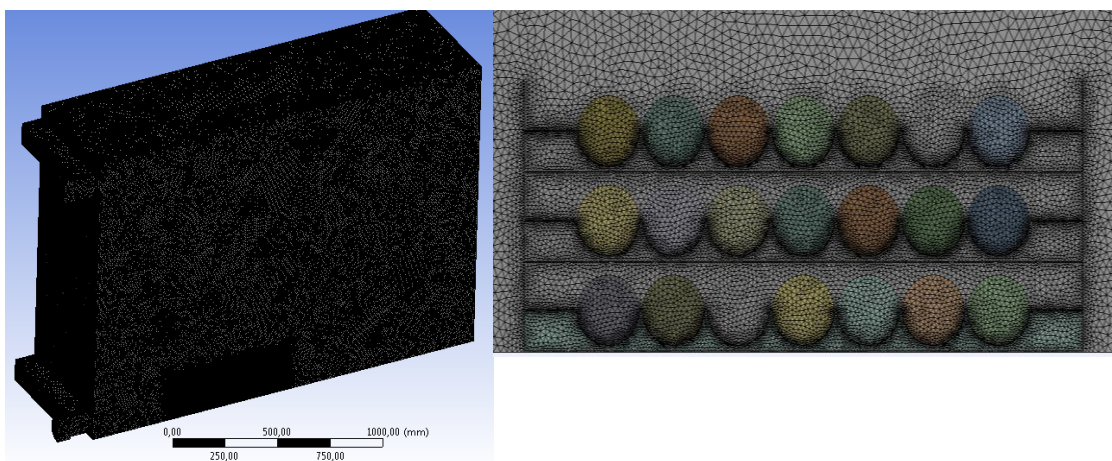
(a) Malha computacional com  $25 \times 10^6$  volumes de controlo.



(b1) Domínio computacional.

(b2) Detalhe da malha.

(b) Malha computacional com  $34 \times 10^6$  volumes de controlo.



(c1) Domínio computacional.

(c2) Detalhe da malha.

(c) Malha computacional com  $54 \times 10^6$  volumes de controlo.

Figura 10. Domínio computacional.

### 3.2.3.4. Condições iniciais e de fronteira

As condições iniciais e as condições de fronteira relevantes foram utilizadas para resolver o conjunto de equações governantes. A condição de limite de entrada na câmara fria foi definida como uma velocidade de entrada de 2,5 m/s, com uma intensidade de turbulência (2%). A temperatura do ar de admissão foi definida como uma temperatura medida experimentalmente de 2,5°C. A condição limite de saída foi definida como pressão de saída com subpressão imposta. A temperatura inicial da embalagem e do produto foi 22° C. Para minimizar o tempo computacional, apenas metade do domínio foi considerado e assumiu simetria. A Figura 11, mostra o modelo computacional da câmara fria com três caixas de embalagem empilhadas contendo os modelos de fruta.

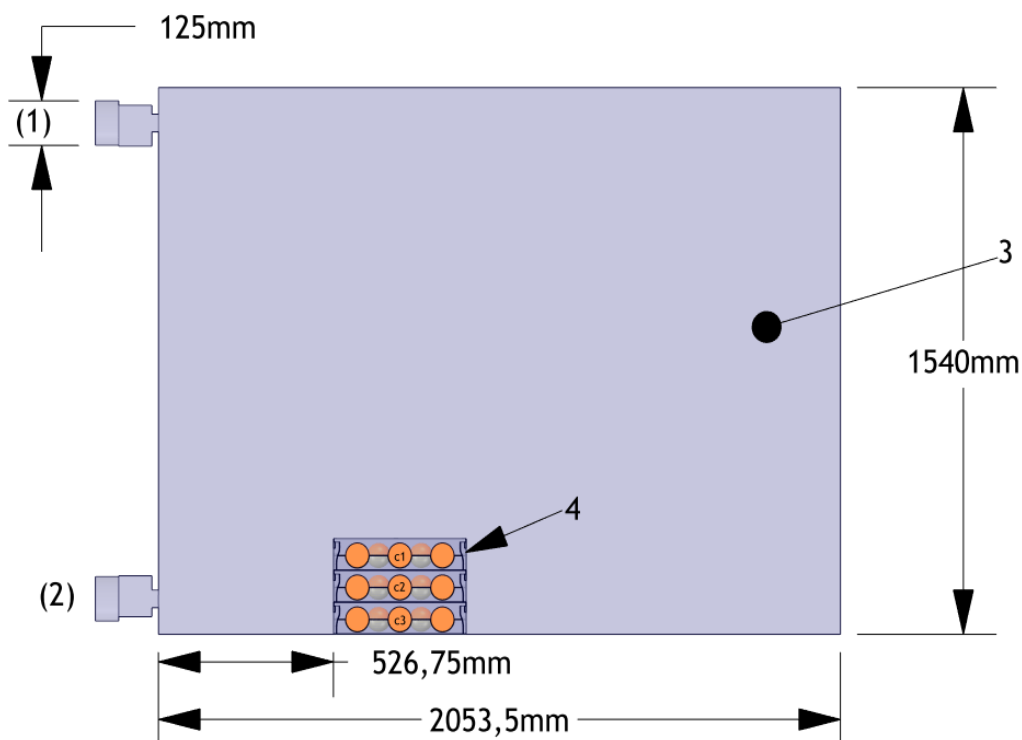


Figura 11. Modelo computacional da câmara fria. (Legenda: 1. Entrada de ar; 2. saída de ar; 3. Plano de simetria, 4. três caixas de embalagem cheias de frutas.)

### 3.2.3.5. Modelos paramétricos

Neste estudo, foram considerados diferentes tipos de modelos paramétricos para análise do escoamento de ar e transferência de calor durante o tempo de arrefecimento. O primeiro modelo paramétrico a considerar, foi de Três caixas de fruta de embalagem

colocadas uma por cima da outra (ver Fig. 12). O segundo modelo paramétrico a considerar, foi o modelo com empilhamento lateral. Este modelo consiste em avaliar a influência da proximidade de dois grupos de caixas (ver Fig. 13). O terceiro modelo paramétrico a considerar, foi o modelo com empilhamento vertical. Este modelo consiste em colocar grupos de caixas uma por cima da outra (ver Fig. 14) com o intuito de avaliar a influência da localização das caixas em altura no desempenho térmico. Os Modelos com disposição angular de 0 e 90 °, foram considerados para o estudo paramétrico (ver Fig. 15). Nestes modelos, é analisado a como a mudança de orientação impacta no desempenho térmico.

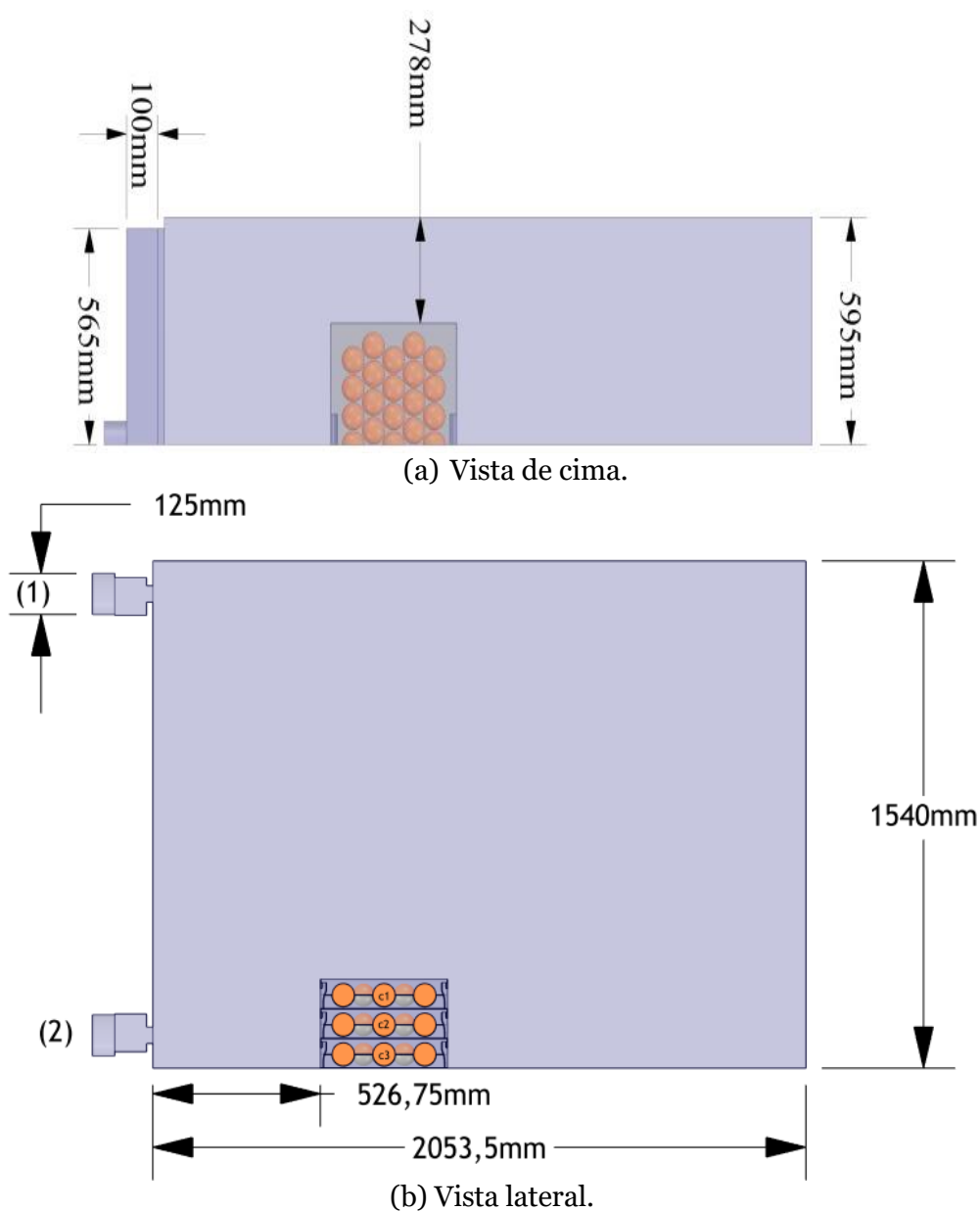


Figura 12. Três caixas de fruta de embalagem escalonadas.

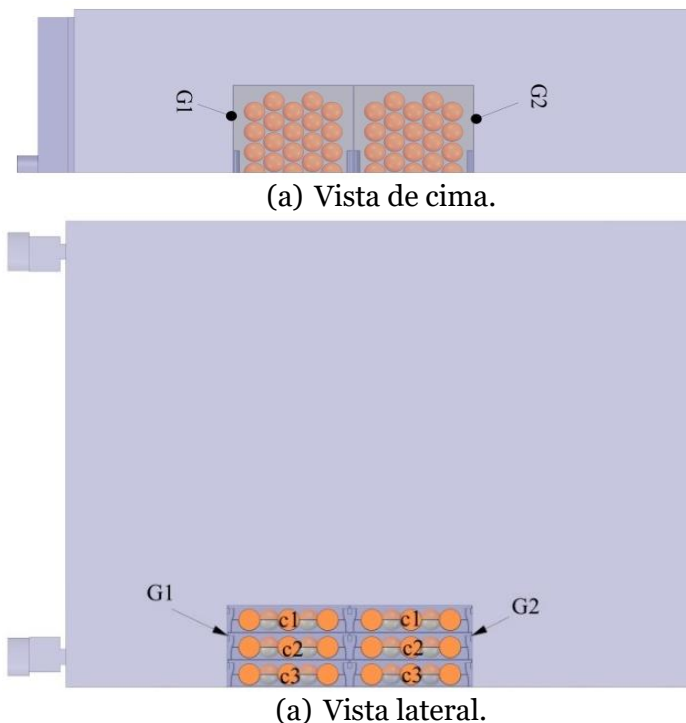


Figura 13. Três caixas de fruta de embalagem escalonadas com empilhamento lateral: (a) Vista de Cima, (b) Vista lateral, c1. caixa superior, c2. caixa intermédia, c3. caixa inferior.

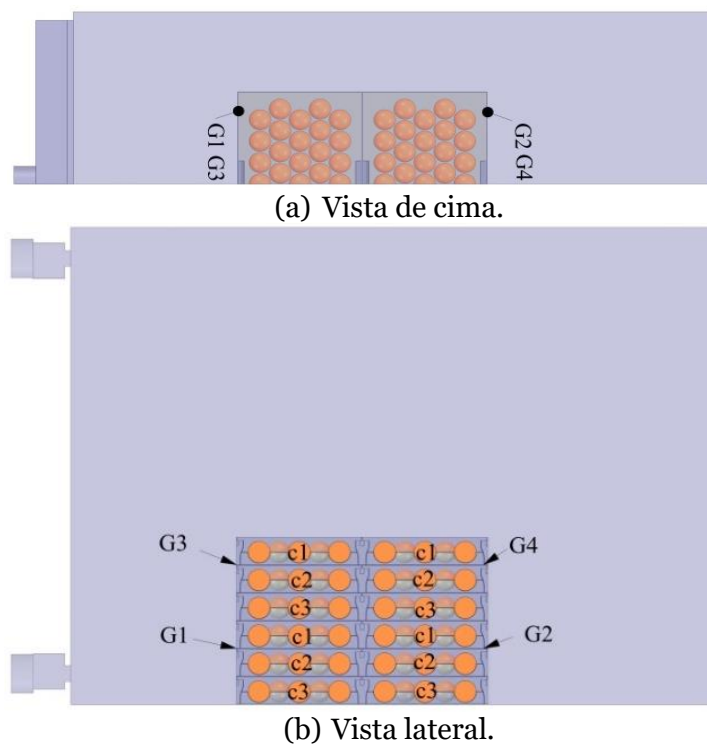


Figura 14. 12 caixas de fruta de embalagem escalonadas com empilhamento vertical: (a) Vista de cima, (b) Vista lateral, G1. Primeiro grupo de três caixas, G2. segundo grupo de três caixas, G3. terceiro grupo de três caixas, G4. quarto grupo de três caixas, c1.

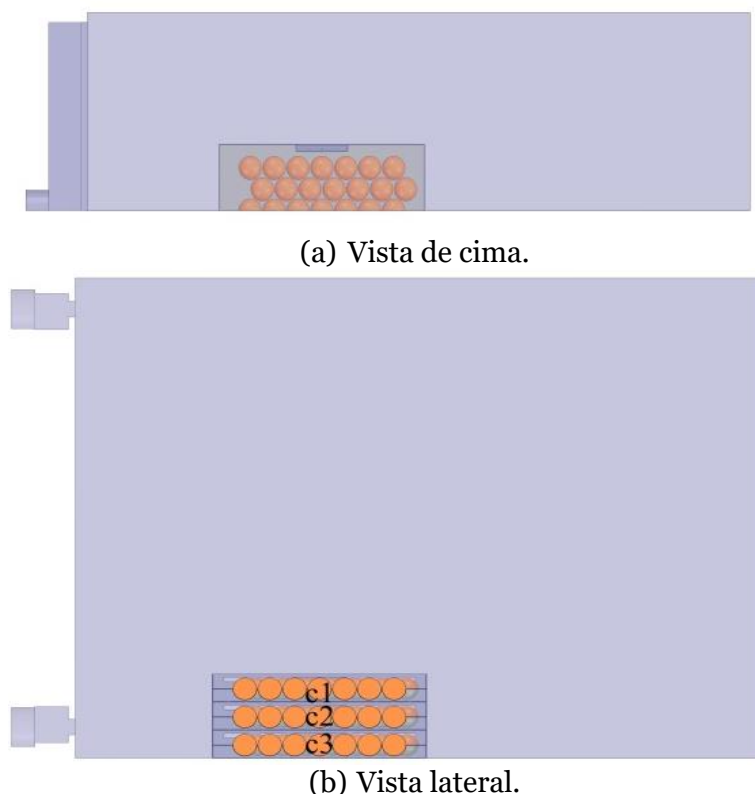


Figura 15. Três caixas de fruta de embalagem escalonadas com orientação de 90°: (a) Vista de Cima, (b) Vista lateral, c1. caixa superior, c2. caixa intermédia, c3. caixa inferior.

### **3.2.3.6. Simulação Numérica**

As simulações numéricas foram realizadas com o software ANSYS Fluent v19 (ANSYS, Canonsbourg, PA, EUA). As equações foram discretizadas usando um esquema upwind de segunda ordem. Foi considerado um critério de convergência de valor  $\lambda = 10^{-4}$  para os resíduos das equações de continuidade, quantidade de movimento e turbulência e de  $\lambda = 10^{-6}$  para a equação de energia. Para acoplar a pressão à velocidade, foi usado o método Semi-Implícito (SIMPLE), desenvolvido por Patankar e Spalding em 1972, para as equações ligadas à pressão. Este método utiliza a relação entre as correções de velocidade e pressão para impor a conservação de massa e obter o campo de pressão. O cálculo SIMPLE, é iniciado com um campo de pressão adivinhado e a equação de

momento discretizada é resolvida usando o campo de pressão adivinhado. Este método consiste nos seguintes passos a serem aplicados a cada iteração (Oliveira, 2001):

1. Fixar o campo de pressão  $p^*$ ;
2. Resolver as equações da quantidade de movimento para obter o campo de velocidade intermédio,  $u^*$ ,  $v^*$  e  $w^*$ ;
3. Resolver a equação da correção de pressão,  $p'$ ;
4. Obter novo campo de pressão, somando a correção de pressão a pressão existente  $p = p^* + p'$ ;
5. Calcular novas velocidades, somando aos campos existentes as correções de velocidades,  $u$ ,  $v$  e  $w$ ;
6. Resolver as equações discretizadas de transporte para qualquer outra variável (por exemplo, temperatura ou turbulência)

As simulações do regime transitório foram realizadas para  $t = 8$  h, com um intervalo de tempo de  $t = 120$  s e  $it = 20$  iterações por intervalo de tempo. A simulação foi executada num computador Windows 7 de 64 bits com um CPU Intel ® Core™ i7 de 3,10 GHz e 256 GB de RAM. As simulação do regime transitório para os três modelos paramétricos, perduraram cerca de 72h (modelo padrão 3), 168h( modelo com empilhamento lateral) e 216h (modelo vertical).

### **3.3. Nota conclusiva**

Este capítulo foi de extrema relevância, pois serviu para apresentar um resumo das equações que governam o fenómeno em estudo, e os métodos para sua resolução. Foram apresentados modelos com diferentes configurações que serviram de ponto de partida para os estudos paramétricos que são abordados nos capítulos subsequentes.



## 4. Análise de Discussão de Resultados

### 4.1. Introdução

No capítulo que se inicia, são apresentados e discutidos os resultados das previsões numéricas dos estudos paramétricos realizados com base nas previsões numéricas dos modelos computacionais, tridimensional, é desenvolvido. Os resultados das previsões numéricas são analisados individualmente e comparados com um modelo já existente, desenvolvido em estudos anteriores. É também apresentado um estudo paramétrico de otimização, onde é possível analisar a distribuição da temperatura e a velocidade do ar dentro das embalagens ventiladas. Os estudos paramétricos de otimização do desempenho térmico, com base nas previsões numéricas dos diferentes modelos computacionais, envolvem a:

- Aumento do empilhamento horizontal (aumento das embalagens em profundidade) e vertical (aumento da altura de empilhamento) para analisar o escoamento de ar e a transferência de calor durante o período de arrefecimento.
- Orientação paralela e perpendicular em relação as grelhas de entrada e saída de ar das caixas de embalagem colocadas dentro da câmara de refrigeração;

### 4.2. Previsões Numéricas

A simulação numérica foi realizada com o intuito de antever e analisar a distribuição dos campos de temperaturas e de velocidades do ar em torno e no interior das embalagens, após 8 horas de arrefecimento partindo de temperatura inicial dos produtos de 22 °C, representando a colocação das embalagens no ambiente refrigerado com produto ainda com o calor do campo.

#### 4.2.1. Análise das proximidades entre as caixas de embalagem

A Tabela 9 mostra os resultados da variação da temperatura média prevista ( $\Delta T = T_{\text{inicial}} - T_{\text{final}}$ ), com  $T_{\text{inicial}} = 22^{\circ}\text{C}$ , nas esferas de ágar para o modelo com três embalagens de frutas (denominado doravante de modelo padrão), ao final das 8 horas de arrefecimento. As esferas de ágar na caixa superior e inferior (ver Figura. 13) atingem

variações de temperatura média mais baixas em comparação a esfera de ágar na caixa central (Curto *et al.*, 2021).

Tabela 9. Variação das temperaturas médias registadas nas esferas de ágar para o modelo padrão, após 8 horas de arrefecimento.

| Localização da esfera | $\Delta T$ [°C] |
|-----------------------|-----------------|
| c1                    | 14.0            |
| c2                    | 12.7            |
| c3                    | 13.3            |
| Valor médio           | 13.3            |

A Tabela 10 mostra os resultados da variação da temperatura prevista ( $\Delta T = T_{\text{inicial}} - T_{\text{final}}$ ), com  $T_{\text{inicial}} = 22^{\circ}\text{C}$ , nos produtos de ágar para o modelo com empilhamento lateral (ver Figura. 13), após 8 horas de arrefecimento. Para cada caixa houve uma discrepância nos valores da temperatura média. Esta discrepância decorreu do segundo grupo de caixas (G2) localizado na frente, se encontrar na direcção do escoamento do ar, fazendo com que as esferas de ágar do primeiro grupo de caixas (G1) arrefecessem menos, mostrando assim, valores de variação de temperatura média mais elevada em comparação ao segundo grupo de caixas (G2).

Tabela 10. Temperaturas médias previstas nas esferas de ágar para o modelo de empilhamento latera, após 8 horas de arrefecimento.

| Localização da esfera | $\Delta T_{\text{G1 temperatura}}$ [°C] | $\Delta T_{\text{G2 temperatura}}$ [°C] |
|-----------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| c1                    | 11.7                                    | 4.3                                     |
| c2                    | 15.4                                    | 18.7                                    |
| c3                    | 13.9                                    | 18.7                                    |
| Valor médio           | 13.5                                    | 13.9                                    |

A Tabela 11 resume os resultados da variação da temperatura média prevista ( $\Delta T = T_{\text{inicial}} - T_{\text{final}}$ ), com  $T_{\text{inicial}} = 22^{\circ}\text{C}$ , para o modelo com embalagens empilhadas verticalmente (ver Figura. 14), após 8 horas de arrefecimento. O aumento da altura das embalagens afecta significativamente a temperatura média, causando um arrefecimento não uniforme entre as esferas de ágar. Como também se pode ver nos resultados

apresentados na Tabela 11, os valores da variação da temperatura da esfera de ágar na embalagem superior (c1), na embalagem média (c2) e embalagem inferior (c3) dos grupos de embalagens empilhadas vertical (G2, G4), que se encontram na direcção do escoamento do ar, apresentam temperaturas médias mais baixas do que os grupos de embalagens (G1, G3), localizados na parte posterior. Como seria expectável, as embalagens localizadas na direcção do escoamento de ar apresentam uma taxa de arrefecimento superior, dado a transmissão de calor por convecção ser mais elevada.

Tabela 11. Variação das temperaturas médias previstas nas esferas de ágar para o modelo de empilhamento vertical, após 8 horas de arrefecimento.

| Localização da esfera | $\Delta T_{G1}$ temperatura [°C] | $\Delta T_{G2}$ temperatura [°C] | $\Delta T_{G3}$ temperatura [°C] | $\Delta T_{G4}$ temperatura [°C] |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| C1                    | 15.9                             | 19.0                             | 9.3                              | 18.0                             |
| C2                    | 15.1                             | 19.2                             | 17.4                             | 18.4                             |
| C3                    | 13.9                             | 19.1                             | 19.2                             | 19.2                             |
| Valor médio           | 14.9                             | 19.1                             | 15.3                             | 18.5                             |

A Tabela 12 resume os resultados da variação da temperatura média prevista ( $\Delta T = T_{\text{inicial}} - T_{\text{final}}$ ), com  $T_{\text{inicial}} = 22^{\circ}\text{C}$ , para o modelo com disposição angular a  $90^{\circ}$  (ver Figura. 15), após 8 horas de arrefecimento. As esferas de ágar na caixa superior (c1) e na central (c2) atingem variações de temperatura média mais elevadas em comparação com a esfera de ágar na caixa inferior (c3).

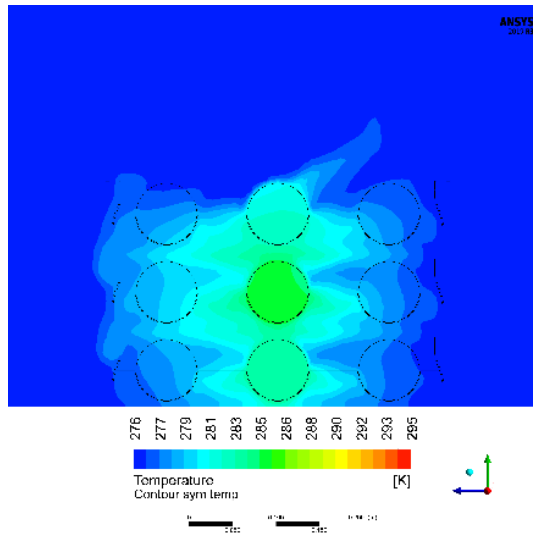
Tabela 12. Variação das temperaturas médias previstas nas esferas de ágar para o modelo orientada a  $90^{\circ}$ , após 8 horas de arrefecimento.

| Localização da esfera | $\Delta T$ [°C] |
|-----------------------|-----------------|
| c1                    | 12.0            |
| c2                    | 12.4            |
| c3                    | 13.1            |
| Valor médio           | 12.5            |

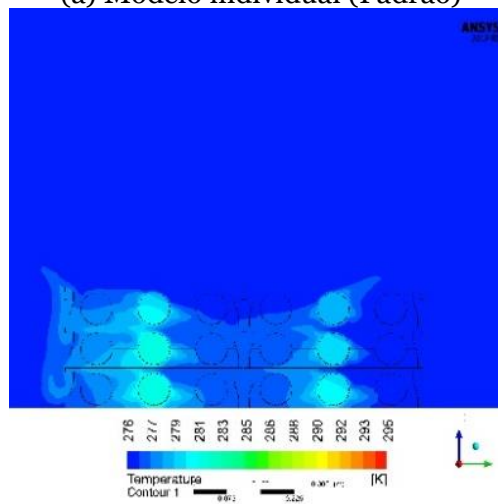
#### **4.2.2. Comparação da distribuição da temperatura em diferentes modelos de embalagens ventiladas**

A Fig. 16 mostra a distribuição dos perfis de temperatura das embalagens no plano  $y-z$ , e as Figs. 17 a 19 mostram a distribuição da temperatura e da velocidade do ar na caixa central acima das esferas de ágar no plano  $x-y$ , considerando uma temperatura do ar de  $2,5^{\circ}\text{C}$  e uma temperatura inicial dos produtos de  $22^{\circ}\text{C}$ , nos quatro modelos diferentes respectivamente (Tabela 6 a Tabela 9), após arrefecimento. Nas previsões de todos os modelos, as esferas de ágar nas embalagens que se encontram na direção do escoamento, são geralmente arrefecidos mais rapidamente em comparação com as caixas localizadas posteriormente (ou seja, ao longo da direção do fluxo de ar).

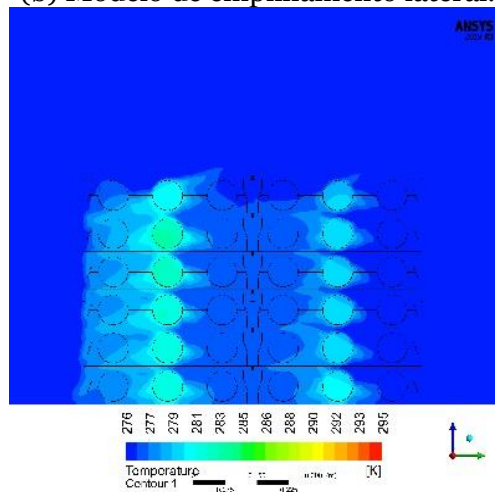
A Fig. 16(a), prevê que o ar frio que entra através dos orifícios de ventilação proporciona uma transferência de calor mais rápida para os produtos colocados nas extremidades das embalagens e uma taxa de arrefecimento mais lenta para as esferas de ágar localizados na parte central da embalagem, resultando num arrefecimento mais heterogéneo. Nas embalagens com empilhamento lateral (ver Fig. 16(b)), consegue-se um arrefecimento mais rápido em comparação com a embalagem individual (Fig. 16(a)) para os produtos em ágar localizadas na parte superior, centro e inferior das embalagens à direita (direção do escoamento do ar da câmara). Por outro lado, as esferas de ágar localizadas nas embalagens inferiores à esquerda (Fig. 16(b)), arrefecem mais lentamente em comparação com as esferas de ágar da embalagem individual (Fig. 16(a)). Nas embalagens empilhadas verticalmente (ver Fig. 16(c)), independentemente da altura, as esferas de ágar localizadas no centro da parte superior ou inferior arrefecem mais rapidamente em comparação com as esferas centrais localizadas na parte posterior. Estes resultados sugerem que o empilhamento das embalagens tanto lateralmente como verticalmente, influencia significativamente no tempo de arrefecimento e a temperatura das embalagens ventiladas durante o processo de arrefecimento forçado a ar.



(a) Modelo individual (Padrão)



(b) Modelo de empilhamento lateral.



(c) Modelo de empilhamento vertical

Figura 16. Distribuição da temperatura no plano vertical dos modelos (padrão, empilhamento lateral e empilhamento vertical), após 8 horas de arrefecimento.

A Fig 17 a Fig 19, mostram a distribuição da temperatura e da velocidade do ar na embalagem central acima das esferas de ágar para o modelo individual (padrão), empilhamento lateral e empilhamento vertical no plano vertical, respectivamente.

Os perfis de temperatura previstos são apresentados na Fig. 17(a) a 19(a), respectivamente. A Fig. 17(a) ilustra o perfil de temperatura em que se pode visualizar que as esferas de ágar central e o lado da embalagem central encontram-se com temperatura mais elevada em comparação com as restantes. Analisando o perfil de temperatura nestas posições, pode-se ver que foram obtidas diferenças consideráveis a partir dos três modelos diferentes. Por exemplo, na Fig. 18(a), as esferas de ágar na mesma posição que na Fig. 17(a), mostram uma diferença significativa em termos de temperatura de arrefecimento para as embalagens dianteiras direitas, que não é prevista para as embalagens traseiras. Contudo, este comportamento é observável também na Fig. 19(a). Note-se que estes diferentes perfis de temperatura foram obtidos utilizando a mesma velocidade e temperatura do ar, bem como a temperatura inicial do produto.

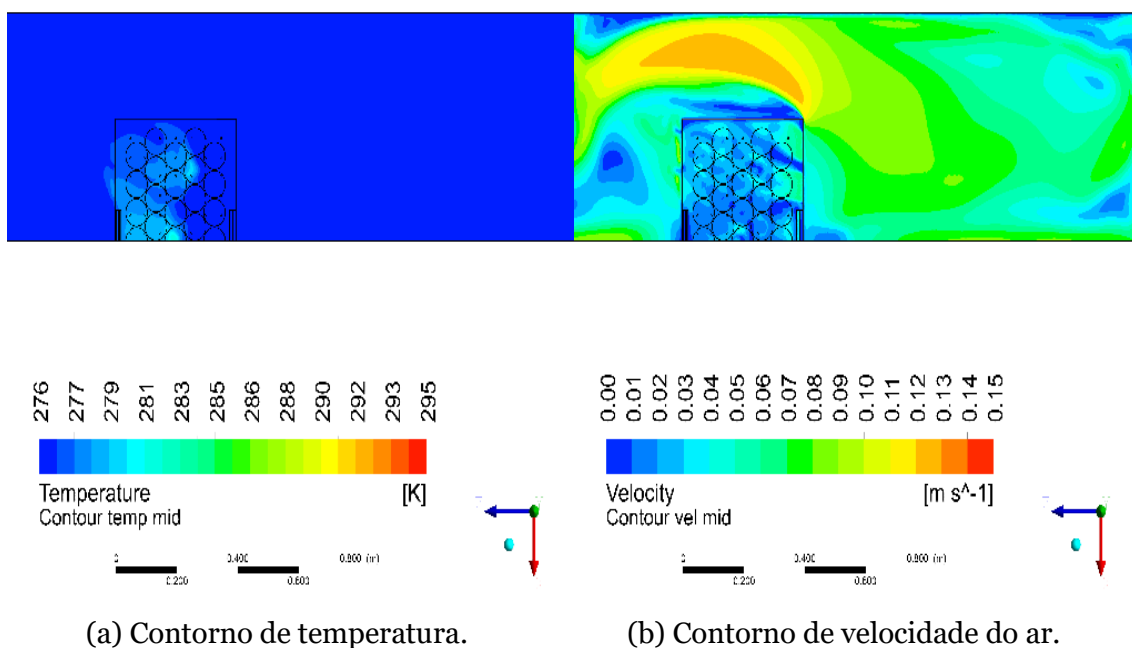
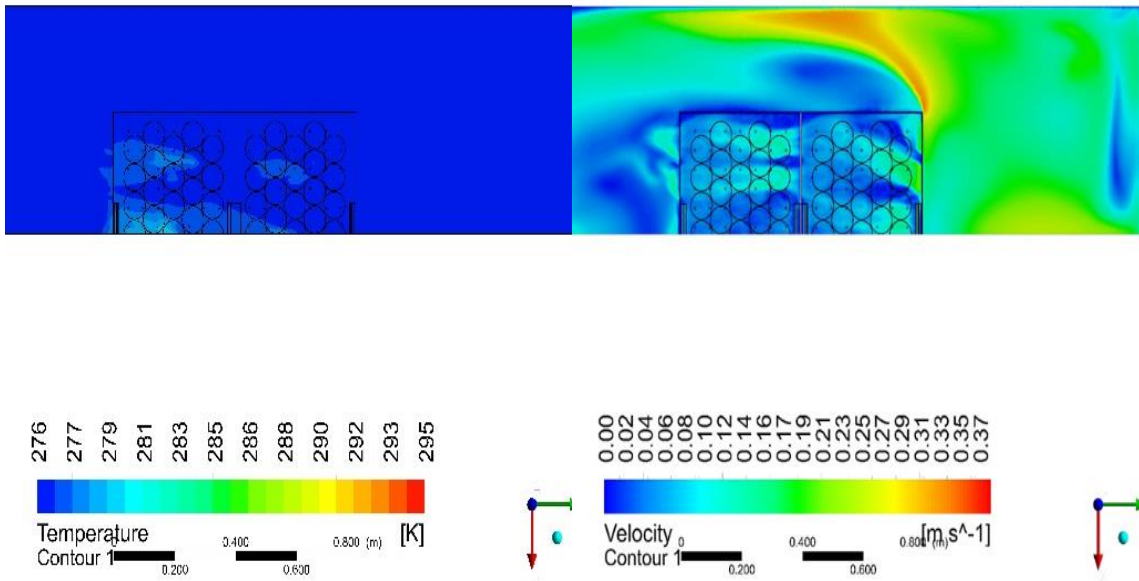


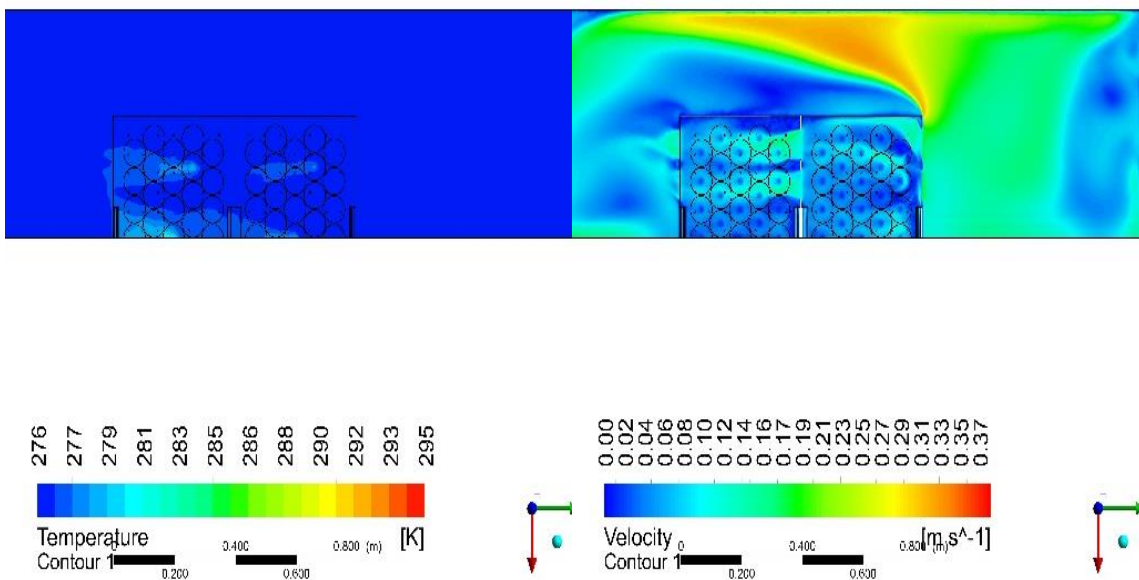
Figura 17. Distribuição da temperatura e da velocidade do ar, no plano horizontal, do modelo individual (padrão) após 8 horas de arrefecimento.



(a) Contorno de temperatura.

(b) Contorno de velocidade do ar.

Figura 18. Distribuição da temperatura e da velocidade do ar, no plano horizontal, do modelo com empilhamento lateral após 8 horas de arrefecimento



(a) Contorno de temperatura.

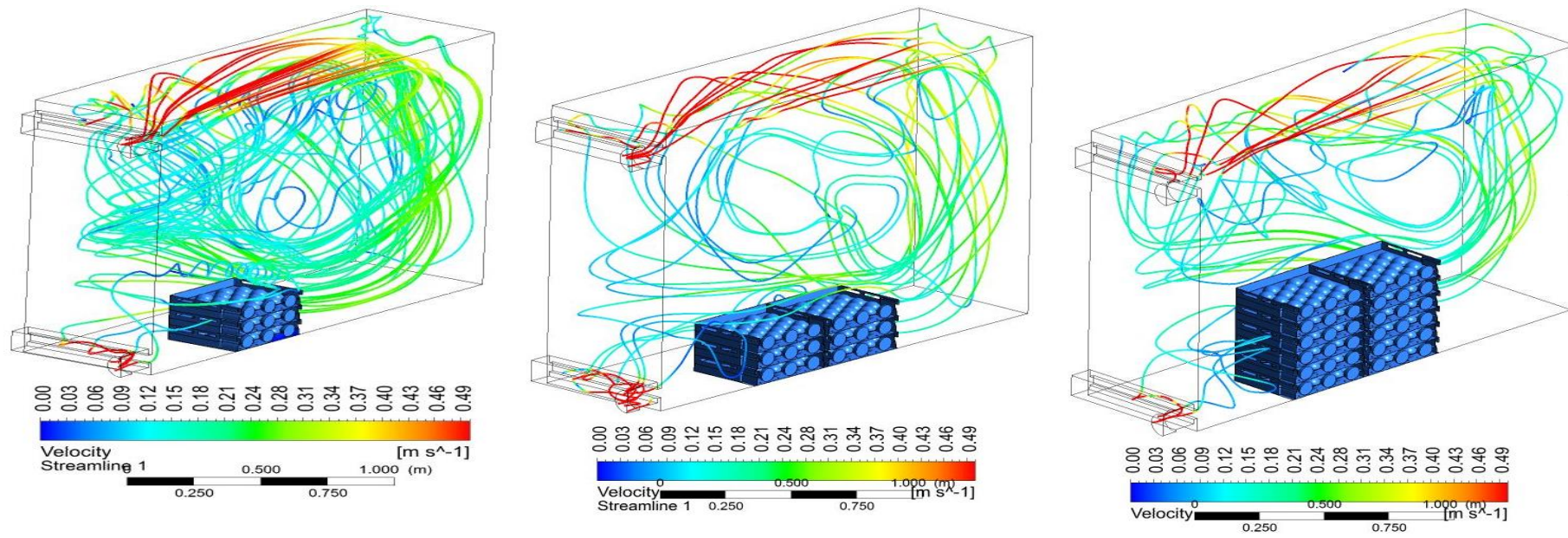
(b) Contorno de velocidade do ar.

Figura 19. Distribuição da temperatura e da velocidade do ar, no plano horizontal do modelo com empilhamento vertical, após 8 horas de arrefecimento.

Os perfis de velocidade previstos são mostrados na Fig. 17(b) a 19(b). O ar frio de elevada velocidade na entrada desloca-se junto ao tecto da câmara fria (efeito de Coanda), desce até à parede direita da câmara, arrefece os produtos, e sai da câmara pela grelha de aspiração. Uma grande parte do ar frio flui sobre a superfície dos produtos. Apenas parte do ar de arrefecimento consegue passar através das aberturas de ventilação. A velocidade do ar dentro das embalagens na direção do escoamento é mais elevada do que nas embalagens posteriores. Como se pode visualizar na Fig. 17(b), apenas uma parte do ar de arrefecimento é capaz de passar através dos orifícios de ventilação. Na medida que o escoamento de ar se move da direita para a esquerda, é possível observar que as velocidades mais elevadas foram previstas nos orifícios de ventilação onde o escoamento de ar entra e as velocidades mais baixas na saída. A Fig. 18(b) mostra que um empilhamento lateral que afeta a distribuição do escoamento de ar dentro das embalagens, causando um arrefecimento heterogéneo dos produtos. Com este empilhamento, é possível observar para as embalagens da Fig. 18(b) que estão na direção favorável à saída, uma maior circulação de ar entre os produtos em comparação com a embalagem da Fig. 17(b), o que não é o caso das embalagens posteriores apresentadas na Fig. 18(b). O mesmo fenómeno acontece para o modelo de empilhamento vertical Fig. 19(b), onde é possível observar uma maior circulação de ar nas embalagens posteriores, em comparação com a Fig. 18(b), e o que não acontece com as embalagens posteriores da Fig. 19(b).

#### **4.2.3. Análise do escoamento de ar nos modelos de embalagem**

Com a finalidade de prever o comportamento das embalagens no processo de arrefecimento das frutas, é realizada uma comparação entre o escoamento do ar sobre as embalagens no interior de uma câmara fria, utilizando as diferentes modelos de embalagem ventiladas. A principal intenção desta etapa reside em avaliar as linhas de corrente de ar sobre o produto a ser arrefecido. A Fig. 20, mostra as linhas de corrente de ar nos diferentes modelos. É possível observar uma maior concentração das linhas de corrente de ar na Fig. 20 (a) em comparação com as Fig. 20(b) e Fig. 20(c). Esta concentração das linhas de corrente de ar, provoca aumento da turbulência e, conseqüentemente, aumento na transferência de calor por convecção na superfície das esferas de ágar. O empilhamento de embalagens, seja lateral ou vertical, por redução do escoamento, influencia de forma significativa as linhas de corrente de ar e no processo de transferência de calor. Na Fig. 21 são apresentadas mesmas linhas de corrente, mas detalhadas no interior das embalagens.

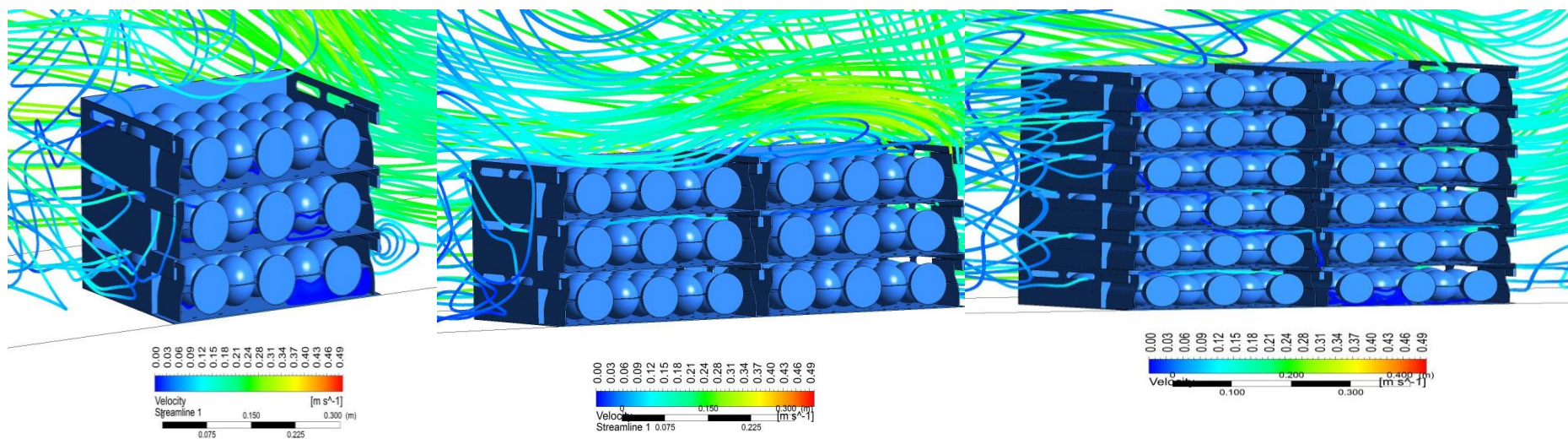


(a) Modelo individual (Padrão)

(b) Modelo de empilhamento lateral

(c) Modelo de empilhamento vertical

Figura 20. Linhas de corrente de ar após 8 horas de arrefecimento.



(a) Modelo individual (Padrão)

(b) Modelo de empilhamento lateral

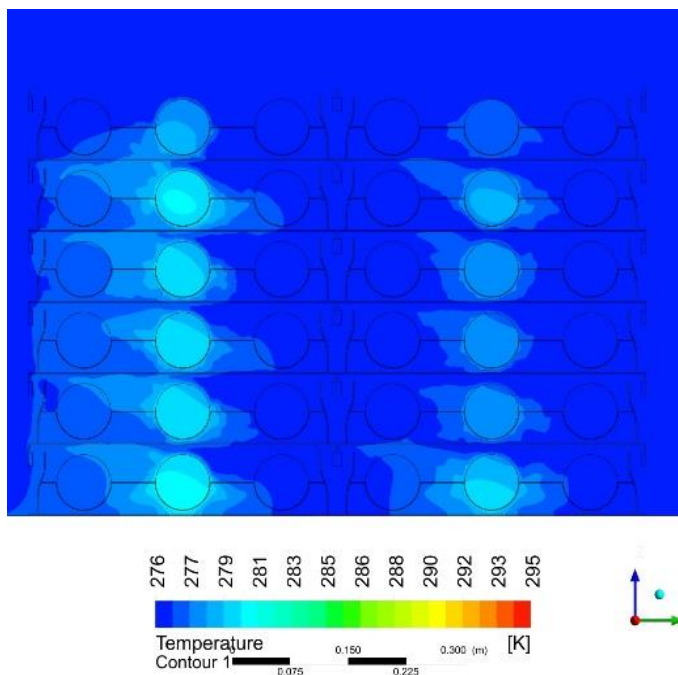
(c) Modelo de empilhamento vertical

Figura 21. Linhas de corrente de ar visto no plano  $y-z$  em  $x= -1,3$  m (detalhes das embalagens), após 8h de arrefecimento.

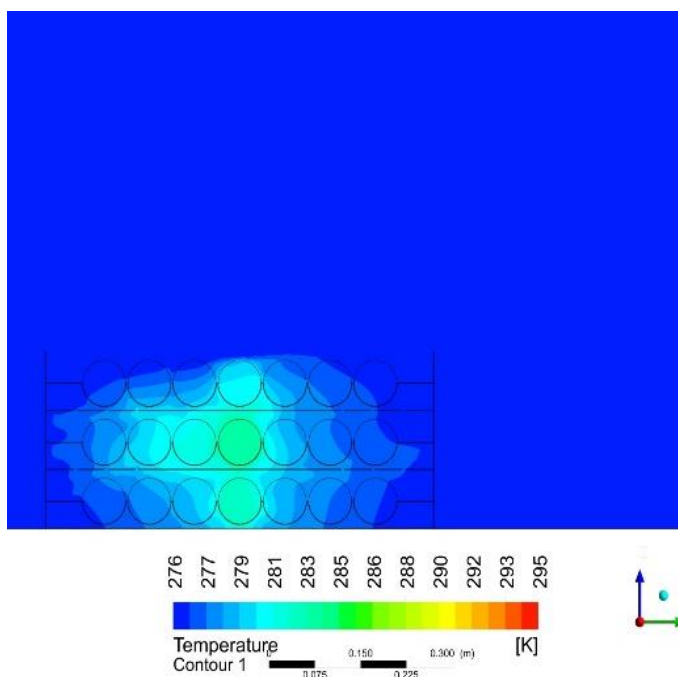
### **4.3. Previsões Numéricas em função da orientação das embalagens**

O objetivo do presente estudo paramétrico, é identificar uma solução na qual possa se reduzir o consumo de energia durante o processo de pré-arrefecimento dos produtos alimentares, visto que as diferentes configurações das embalagens contribuí de forma significativa no consumo de energia. Neste estudo, serão avaliadas as disposições angulares das caixas dentro de uma camara fria. Para a concretização desta análise, procedeu-se a alteração de algumas condições de fronteira, verificando deste modo o comportamento do perfil de velocidade do ar e temperatura no interior das embalagens. A condição de fronteira que foi alterada neste estudo paramétrico, foi o valor da velocidade do ar de insuflação, que inicialmente era 2,5 m/s, passando para o dobro do seu valor inicial, 5 m/s, e mantendo as condições iniciais de temperatura insuflação, 2,5°C respetivamente.

A Fig. 22 mostra os perfis de temperatura de ar e dos produtos, previstos para os dois modelos, usando uma velocidade de insuflação de ar de 5 m/s após 8h de arrefecimento. As esferas de ágar localizadas na direção do escoamento de ar, apresentaram maiores taxas de arrefecimento, enquanto as esferas localizadas no lado da saída do ar, apresentaram menores taxas de arrefecimento. A Fig. 22 (a), prevê que o ar frio que entra através dos orifícios de ventilação proporciona uma transferência de calor mais rápida para as esferas de ágar colocados nas extremidades da embalagem e uma taxa de arrefecimento mais lenta para as esferas de ágar localizados na parte central da embalagem, resultando num arrefecimento mais heterogéneo. Na embalagem com disposição angular à 90° (Fig. 22(b)), é prevista um arrefecimento mais rápido na esfera de ágar localizada na embalagem superior do que nas esferas localizadas nas embalagens central e inferior. Comparando as esferas de ágar da Fig. 22(a) e da Fig. 22(b), na mesma posição, constata-se um arrefecimento mais lento nas esferas de ágar da Fig. 22(b). Esta situação deve-se à pouca circulação do ar dentro da embalagem.



(a) Modelo com empilhamento na vertical com disposição angular de  $0^\circ$ .



(b) Modelo com disposição de  $90^\circ$ .

Figura 22. Distribuição da temperatura no plano vertical dos modelos de empilhamento vertical com diferente orientação ( $0^\circ$  e  $90^\circ$ ), após 8 horas de arrefecimento.

As Fig 23 e Fig 24, mostram a distribuição da temperatura e da velocidade do ar na embalagem central acima das esferas de água, para os modelos com empilhamento vertical, e com disposição angular de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , respectivamente.

Os perfis de temperatura previstos são mostrados na Fig. 23(a) a Fig. 24(a), respectivamente. A Fig. 23(a) mostra o perfil de temperatura, em que se pode visualizar as esferas de ágar da embalagem central, à direita, no sentido em que se dá o escoamento, apresentar um arrefecimento mais uniforme, e os produtos centrais da embalagem à esquerda, estão muito próximo de atingir um arrefecimento uniforme, com uma diferença mínima de temperatura média  $-0,7^{\circ}\text{C}$  em relação a embalagem de frente. É possível observar na Fig. 24(a), que as esferas de ágar na mesma posição que a Fig. 23(a) estão mais quentes, evidenciado assim, pouca circulação de ar na embalagem central.

Os perfis de velocidade do ar previstos são mostrados na Fig. 23(b) a 24(b), respectivamente. A velocidade do ar dentro das embalagens na direção do escoamento, é mais elevada do que nas embalagens posteriores. Como se pode visualizar na Fig. 23(b), há uma maior circulação de ar no interior da embalagem à direita, o que não se verifica na embalagem à esquerda. Comparando a Fig. 24(b) na mesma posição que a Fig. 23(b), percebe-se que a disposição angular da embalagem, influencia de forma significativa o escoamento de ar dentro da embalagem ventilada, o que dificulta o processo de transferência de calor entre o ar frio e as esferas de ágar. Além disso, na Fig. 24(b), verificou-se pouca circulação de ar dentro das embalagens em comparação com a Fig. 23(b).

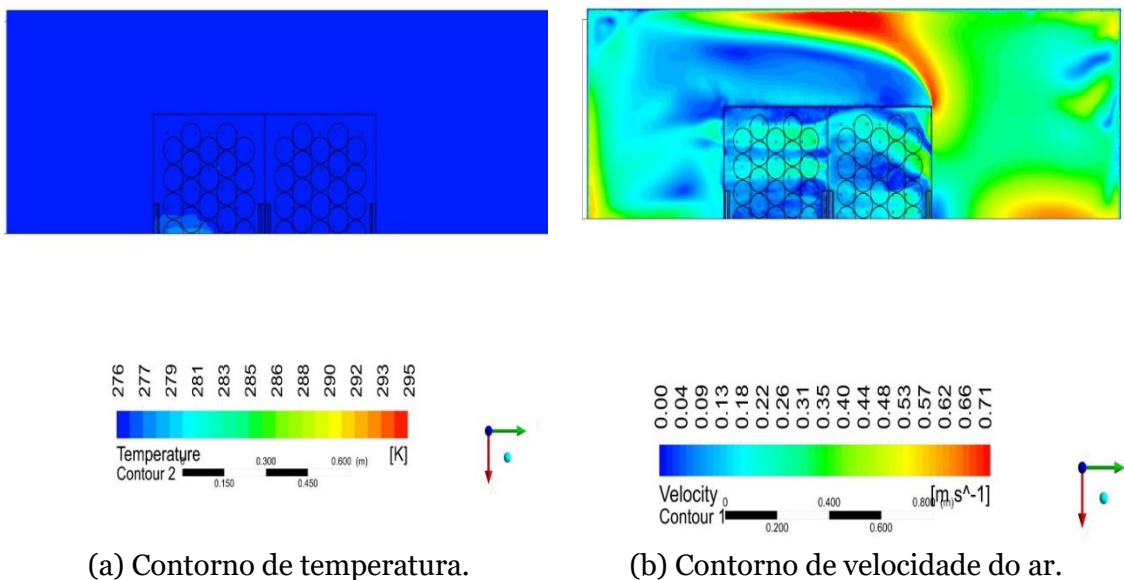


Figura 23. Distribuição da temperatura e da velocidade do modelo de empilhamento na vertical com disposição angular de  $0^{\circ}$ , após 8 horas de arrefecimento.

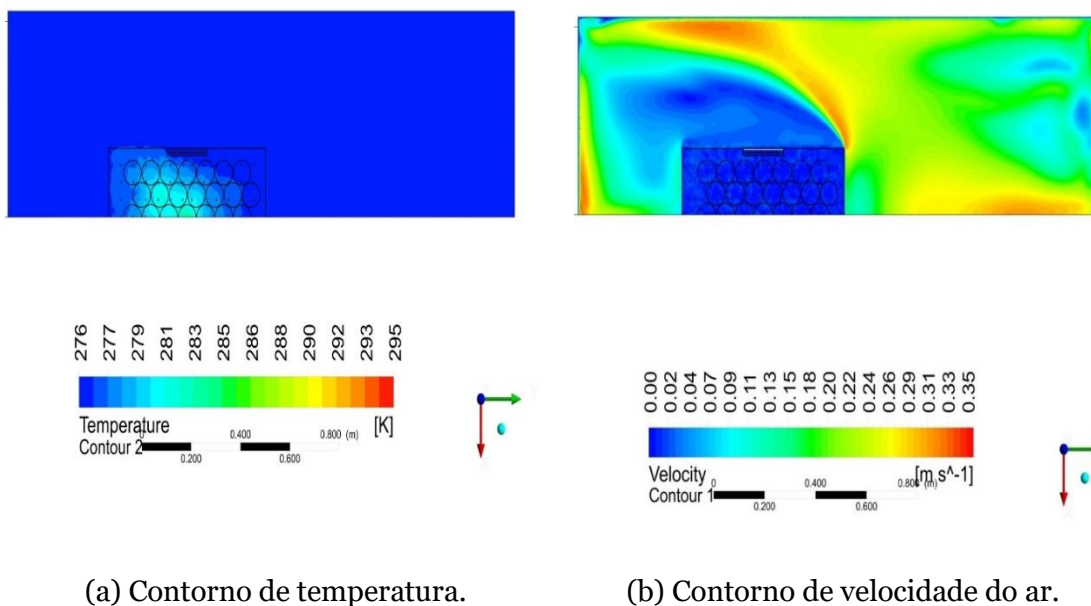


Figura 24. Distribuição da temperatura e da velocidade do ar modelo com disposição angular a 90°, após 8 horas de arrefecimento.

A Tabela 15 e 16, mostram os resultados da variação da temperatura média prevista ( $\Delta T = T_{\text{inicial}} - T_{\text{final}}$ ), com  $T_{\text{inicial}} = 22^{\circ}\text{C}$ , para as esferas de ágar nas novas simulações efetuadas. Com a imposição do valor da velocidade de insuflação, consegue-se um arrefecimento mais uniforme nos grupos de embalagens empilhadas na vertical (G2, G4) em comparação aos grupos de embalagens empilhadas na vertical localizadas posteriormente (G1, G3), com uma diferença de temperatura de  $-1,3^{\circ}\text{C}$ . Como também se poder analisar na Tabela 11, os resultados das variações de temperatura médias registadas para as esferas de ágar da embalagem com disposição angular de 90°, em que a esfera de ágar nas embalagens superior(c1), arrefece mais em comparação às esferas localizadas na embalagem central (c2) e inferior (c3).

Portanto, ao arrefecer as esferas de ágar, localizadas em embalagens com a disposição angular de 90°, com uma mesma temperatura inicial até alcançar a mesma temperatura final, levaria mais tempo e consumiria mais energia. No momento, a orientação a 90° faz com que as esferas (produtos) apresentem uma temperatura cerca de 6°C superior à embalagem com orientação a 0° ao final de 8 horas. Portanto, enquanto se mantém a resistência mecânica das embalagens, a estrutura da embalagem deve ser otimizada para reduzir a variação de temperatura média dos produtos e melhorar a uniformidade no processo de arrefecimento, reduzindo assim a energia necessária para o pré-arrefecimento.

Tabela 13. Variação das temperaturas previstas para as esferas de ágar para o modelo de empilhamento vertical com orientação a 0°.

| Localização da Esfera | $\Delta T_{G1}$ temperatura [°C] | $\Delta T_{G2}$ temperatura [°C] | $\Delta T_{G3}$ temperatura [°C] | $\Delta T_{G4}$ temperatura [°C] |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| c1                    | 17.8                             | 18.1                             | 16.6                             | 18.2                             |
| c2                    | 17.3                             | 16.5                             | 15.3                             | 18.4                             |
| c3                    | 15.6                             | 18.3                             | 17.8                             | 18.1                             |
| Valor médio           | 16.9                             | 17.6                             | 16.6                             | 18.2                             |

Tabela 14. Variação das temperaturas médias previstas para as esferas de ágar para o modelo com orientação a 90°.

| Localização da Esfera | $\Delta T$ [°C] |
|-----------------------|-----------------|
| c1                    | 5.6             |
| c2                    | 13.9            |
| c3                    | 13.6            |
| Valor médio           | 11.03           |

As Tabelas 15 e 16, mostram os dados recolhidos da simulação efetuada com nova condição de fronteira e o histórico das previsões numéricas de cada um dos modelos estudado. Com a imposição do valor da velocidade do ar na grelha de insuflação, constatou-se uma redução nos valores de temperatura média em cada uns dos grupos de embalagens onde o valor mínimo da variação da temperatura média foi de 19.1 °C.

Tabela 15. Dados recolhidos da simulação efetuada com nova condição de fronteira e o histórico dos dados numéricos do modelo com embalagens com caixas uma por cima da outra.

| Modelo      | $\Delta T_{G1}$ temperatura média [°C] | $\Delta T_{G2}$ temperatura média [°C] | $\Delta T_{G3}$ temperatura média [°C] | $\Delta T_{G4}$ temperatura média [°C] |
|-------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| Numérico    | 14.9                                   | 19.1                                   | 15.3                                   | 18.5                                   |
| Paramétrico | 16.9                                   | 17.6                                   | 16.6                                   | 18.2                                   |

Tabela 16. Dados recolhidos da simulação efetuada com nova condição de fronteira e o histórico dos dados numéricos do modelo com disposição angular de 90°.

| Modelo      | $\Delta T_{\text{temperatura média}} [^{\circ}\text{C}]$ |
|-------------|----------------------------------------------------------|
| Numérico    | 12.6                                                     |
| Paramétrico | 11.0                                                     |

#### 4.4. Nota conclusiva

Neste capítulo, foram apresentados e discutidos os resultados das previsões numéricas e dos estudos paramétricos das quatro diferentes configurações das embalagens propostas. Foi ainda possível concluir, no presente capítulo, que o modo de empilhamento das caixas, seja ela lateral, vertical e a disposição angular influenciam significativamente no processo de arrefecimento do produto.

No âmbito dos resultados obtidos, também foi possível apresentar a diferença de temperatura dos modelos desenvolvidos, modelos com pior orientação e pior empilhamento ao fim de 8 horas, usando o modelo padrão como referência. Conforme mencionado anteriormente, em termos de orientação, o modelo com embalagens empilhadas na vertical é a pior, pois ao final das 8 horas, ainda apresentava produtos com temperaturas elevadas acima da temperatura que se pretendia, e comparativamente ao o modelo de referência ( padrão), apresentou diferenças de temperaturas de 1.6 °C e 2°C, isto é, para o primeiro e terceiro grupo de embalagens (G1, G3), enquanto para o segundo e quarto grupo de embalagens (G2, G4), de 5.8°C e 5.2°C, respetivamente. Ao final de 8 horas os modelos desenvolvidos apresentaram também as seguintes variações de temperatura médias: 13.3 °C para o modelo padrão, 13.5°C e 13.9°C para o modelo com embalagens empilhadas na lateral, e para o modelo com embalagens empilhadas na vertical a variação da temperatura é de 14.9°C, 19°C, 15.3°C e 18.5°C, respetivamente.

## 5. Conclusões

### 5.1. Conclusões gerais

Neste trabalho, a modelação matemática foi desenvolvida para avaliar o arrefecimento dos produtos em relação à configuração da embalagem durante o arrefecimento por ar forçado. Quatro modelos diferentes, incluindo o modelo individual, o modelo com empilhamento lateral e vertical, e o modelo com disposição angular de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , foram simulados. A distribuição da temperatura do produto e o tempo de arrefecimento são significativamente influenciados pelos diferentes modelos investigados. Para superar este inconveniente apresentado pelos modelos, pois tendem a afetar diretamente o desempenho térmico dos produtos, foi proposto um estudo paramétrico para as mesmas condições de simulação, reduzindo a temperatura de insuflação,  $2,5^\circ\text{C}$  para  $1,5^\circ\text{C}$  e duplicar a velocidade de insuflação,  $2,5\text{ m/s}$  para  $5\text{ m/s}$ . É de notar que um aumento no número de embalagens, seja lateral, vertical ou uma mudança de orientação, afetará significativamente a remoção de calor dos frutos, pois existe maior estrangimento ao escoamento. Este estudo visa analisar qual a expressão desse efeito.

### 5.2. Conclusões específicas

Todos os estudos que foram consultados foram essenciais para a realização da presente dissertação. O modelo físico-matemático utilizado, recorre às equações da continuidade, quantidade de movimento e energia para descrever o escoamento de ar com transferência de calor. A equação dos gases ideais foi considerada para definição das características do fluido de trabalho, o ar. Adicionalmente, foi utilizado o modelo de turbulência SST-  $k-\omega$  para levar em consideração esta propriedade do fluido.

A geometria tridimensional de uma câmara fria com embalagem cheias de frutas para prever o escoamento de ar e a transferência de calor por convecção e condução das frutas, foi discretizada segundo a técnica dos volumes finitos.

A malha computacional, foi elaborada utilizando o software de geração de malha ANSYS (Meshing, 2019 R3). Os elementos foram gerados usando volumes tetraedros com um número total de  $25 \times 10^6$ ,  $34 \times 10^6$  e  $54 \times 10^6$  elementos. As equações foram discretizadas usando um esquema upwind de segunda ordem. Foi considerado um critério de

convergência de valor  $\lambda = 10^{-4}$  para os resíduos das equações de continuidade, quantidade de movimento e turbulência e de  $\lambda = 10^{-6}$  para a equação de energia. Para acoplar a pressão à velocidade, foi usado o método SIMPLE (Semi-Implícito) para as equações ligadas à pressão. A condição de limite de entrada na câmara fria foi definida como uma velocidade de entrada de 2,5 m/s, com uma intensidade de turbulência (2%). A temperatura do ar de admissão foi definida como uma temperatura medida experimentalmente de 2,5°C. A condição limite de saída foi definida como pressão de saída com subpressão imposta. A temperatura inicial da embalagem e do produto foi 22 °C. Para minimizar o custo computacional, apenas metade do domínio foi considerado e assumiu simetria.

Ao final das 8 horas de arrefecimento, a variação da temperatura média prevista nas esferas de ágar para:

(1) modelo com três embalagens de frutas (modelo padrão), indica que na embalagem do topo, em contacto com ar refrigerado, os simuladores dos produtos apresentam a temperatura mais baixa. A diferença de temperatura nas esferas localizadas nas embalagens a diferentes alturas atinge o máximo de 1,3°C;

(2) caso de estudo do empilhamento lateral, que a temperatura média nos produtos localizados nas embalagens que não ficam na direção do ar refrigerado da câmara, seja cerca 0,5°C mais elevada. Neste modelo, a discrepância em altura dos valores de temperatura dos produtos é superior que no modelo padrão, atingindo mais de 2°C;

(3) o modelo de empilhamento vertical, é previsto que a temperatura média nos produtos aumenta à medida que a altura decresce, sendo a variação média entre o valor máximo e mínimo de temperatura dos produtos de cerca 4°C;

(4) o modelo orientado a 90° relativamente ao escoamento de ar refrigerado, a temperatura média dos produtos é mais elevada aproximadamente 1°C do que no modelo padrão (orientado a 0°).

Assim, os resultados permitem avaliar o tempo e/ou a temperatura e velocidade do ar de descarga necessária para que todas as frutas dentro das caixas de embalagem atinjam a temperatura de conservação que garanta a sua qualidade e segurança das frutas antes de entrarem na cadeia de distribuição. Com base nestes resultados, os operadores podem

tomar decisões acerca do armazenamento das embalagens de forma a promover uma temperatura mais baixa dos produtos, com ganhos a nível energético, de segurança e qualidade alimentar.

### **5.3. Sugestões de trabalhos futuros**

Tendo em vista a conclusão dessa dissertação, para estudos vindouros é proposto que sejam realizados os seguintes trabalhos:

1. Avaliação do efeito do alvéolo ou bandeja no processo de arrefecimento das frutas, pois influencia na troca de calor entre as camadas de produtos empilhados.
2. Avaliação do consumo de energia do sistema de arrefecimento com ar forçado, pois o consumo de energia é determinado principalmente com base na potência necessária para produzir o escoamento de ar por meio de embalagens empilhadas e o tempo necessário para manter esse escoamento de ar (ou seja, tempo de arrefecimento). Obviamente, questões econômicas, especialmente associadas ao gasto de energia, devem ser consideradas para a determinação das condições ideais de operação.



## Referências Bibliográficas

- ABRE. (2016). Protocolo global sobre sustentabilidade de embalagens. [http://www.abre.org.br/apres\\_setor\\_materia.php](http://www.abre.org.br/apres_setor_materia.php).
- Ambaw, M. D. (2013). The use of CFD to characterize and design post-harvest storage facilities: Past, present and future. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93 (2013), pp. 184-194.
- Ambaw, P. V. (2014). CFD-based analysis of 1-MCP distribution in commercial cool storerooms: Porous medium model application. *Food and Bioprocess Technology*, 7 (7) (2014), pp. 1903-1916.
- Anderson, B. S. (2004). Commercial-scale forced-air cooling of packaged strawberries. *Transactions of ASAE*, 47, 183-190.
- ANSYS. (2015). ANSYS FLUENT 15.0 Users Guide. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, EUA.
- Ansys, F. T. (2013). *Guide, Ansys Fluent Theory*.
- Ansys, F. T. (2018).
- ANSYS. (2015). ANSYS FLUENT 15.0 Users Guide. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, EUA. (s.d.).
- Berger, K. R. (2005). *University of Flórida*. Obtido de A Brief History of Packaging: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/AE/AE20600.pdf>
- Berger, K. R. (2012). A Brief History of Packaging., (pp. pp.1-5). University of Florida.
- Berry, T. F. (2017). The role of horticultural carton vent-hole design on cooling efficiency and compression strength: A multiparameter approach. *Postharvest Biology and Technology*, 124 (2017), pp. 62-74.
- Brody AL, B. B. (2008). Innovative food packaging solutions. *Journal of Food Science.*, 73(8):107-116.
- Caleb, O. J. (2011). Modified atmosphere packaging of pomegranate fruit and arils: a review *Food and Bioprocess Technology*. *Food and Bioprocess Technology*. doi:10.1007/s11947-011-0525-7, Pages 15-30.

- Castilho, M. S. (de 2012). Manual de boas práticas de fabrico de embalagens alimentares.
- Curto, J. I. (2020). Impact on cooling behaviour of vent-holes design on fruit packaging boxes: Experimental and numerical study. 14th World Congress in Computational Mechanics (WCCM) ECCOMAS Congress 2020, Paris, France, January, 11-15, 2021.
- Curto, J. I. (2021). Numerical study of impact on cooling behaviour of vent- holes design on fruit packaging boxes.
- De Castro, C. V. (1 (2004)). Container opening design for horticultural produce cooling efficiency. *Food, Agriculture & Environment*, pp. 135-140.
- De Castro, L. R. (2004b). Effect of container opening area on air distribution during precooling of horticultural produce. *Transactions of ASAE*, 47(6), 2033-2038.
- De Castro, L. R. (2005b). Effect of container openings and airflow on energy required for forced air cooling of horticultural produce. *Canadian Biosystems Engineering*, Page 47, 3.1-3.9.
- Defraeye, P. C. (2015). Exploring ambient loading of citrus fruit into reefer containers for cooling during marine transport using computational fluid dynamics. *Postharvest Biology and Technology*, 108 (2015), pp. 91-101.
- Defraeye, P. V. (2013b). CFD modelling of flow and scalar exchange of spherical food products: turbulence and boundary-layer modelling. *J. Food Eng*, 114, pp. 495-504.
- Defraeye, R. L. (2013a). Forced-convective cooling of citrus fruit: Package design. *J. Food Eng* 118, pp. 8-18.
- Defraeye, R. L. (2014). Forced-convective cooling of citrus fruit: Cooling conditions and energy consumption in relation to package design. *Journal of Food Engineering*, Pages 118-127.
- Dehghannya, J. N. (2012). Transport phenomena modelling during produce cooling for optimal package design: thermal sensitivity analysis. *Biosystems Engineering*.doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.01.001., Pages 315-324.
- Dehghannya, M. N. (2011). Mathematical modeling of airflow and heat transfer during forced convection cooling of produce considering various package vent areas. *Food Control*, 22 (8) (2011), pp. 1393-1399.

- Delele, M. N. (2013). Studying airflow and heat transfer characteristics of a horticultural produce packaging system using a 3-D CFD model. Part II: Effect of package design. *Postharvest Biology and Technology*, Pages 546-555.
- Delele, M. N. (2013a). Studying airflow and heat transfer characteristics of a horticultural produce packaging system using a 3-D CFD model. Part II: Effect of package design. *Postharvest Biology and Technology*, 86 (2013), pp. 546-555.
- enter, F. (1994) *Duas Equações Eddy-Viscosity Turbulence Modeling for Engineering Applications*. *Revista AIAA*, 32, 1598-1605. (s.d.).
- Ey. (2013). *Unwrapping the packaging industry*. Obtido de <https://images.app.goo.gl/uoY2NwvS7j1P7j489>
- FAO. (2011). Energy-smart food for people and climate. [www.fao.org](http://www.fao.org), Page 74.
- Ferrua, M. J. (2009a). Modeling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages, part I: numerical model. *International Journal of Refrigeration*, 32(2), 335-348.
- Ferrua, M. J. (2011). Improved airflow method and packaging system for forced-air cooling of strawberries. *International Journal of Refrigeration*, 34(4) ,1162-1173.
- Fluent. (2019). Fluent. *Ansys Inc., Canonsburg, PA* .
- Fluent. (2019). Fluent. *Ansys Inc., Canonsburg, PA* . (s.d.).
- Fortuna, A. d. (2000). *Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos-Conceitos Básicos e Aplicações*.
- Gaspar, P. M. (2008). Otimização do desempenho e da eficiência energética de equipamento de refrigeração.
- Gustavsson, C. S. (2011). Global food losses and food wastes - Extent, causes and prevention. [www.fao.org](http://www.fao.org).
- Han, C. Z.-G. (2018). Numerical modeling of forced air cooling of palletized apple: Integral evaluation of cooling efficiency. *International Journal of Refrigeration*, 89 (2018), pp. 131-141.
- Han, J. &. (2007). Finite element analysis of vent/hand hole designs for corrugated fibreboard boxes. *Packaging Technology*, 20(1), 39-47.

- IIR. (2009). 5th inforatory note on refrigeration and food: The role of refrigeration in worldwide nutrition. *www.iifir.org*, Page 1-3.
- Ilangovan, A. G. (2020). A parametric study and performance evaluation of the different vent hole configuration for fruit packaging using Computational Fluid Dynamics. 6th IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain (ICCC 2020). Nantes, France, August, 26-28.
- Ilangovan, A. G. (2020). CFD parametric study of the thermal performance of different fruit packaging box designs. AIP Conference Proceedings, 15th International Symposium on Numerical Analysis of Fluid Flows, Heat and Mass Transfer - Numerical Fluids 2020 (ICNAAM 2020), Rhodes, .
- Ilangovan, A. S. (2020). Airflow and thermal behavior within Peachs packaging box using Computational Fluid Dynamics - A preliminary study. *KnE Engineering*, 5(6), 222-231.
- J.W. Han, C. Z. (2015). Computational modeling of airflow and heat transfer in a vented box during cooling: optimal package design. *Appl. Therm. Eng*, pp. 883-893.
- J.W. Han, C. Z. (s.d.). Computational modeling of airflow and heat transfer in a vented box during cooling: optimal package design. *Appl. Therm. Eng*, pp. 883-893.
- J.W. Han, J. Q. (2017). Mathematical modelling of cooling efficiency of ventilated packaging: integral performance evaluation. *Int. J. Heat Mass Transfer*, pp. 386-397.
- Jedermann, T. P. (2014). Communication techniques and challenges for wireless food quality monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 372 (2014), p. 20130304.
- José Francisco Almeida de Souza, L. R., & José Luiz Lima de Azevedo, I. D. (2011). Revisão sobre a turbulência e sua modelagem.
- Ladaniya, M. &. (2002). Packaging of horticultural produce with special reference to citrus fruits. *Packaging India*, 34(5), 9-22.
- Ladaniya, M. S. (2008). Citrus fruit: biology. *technology and evaluation*. USA: Academic Press.
- Leitão, F. M. (2021). Experimental testing of the thermal response of different food alveoli solutions for packaging boxes. World Congress on Engineering (WCE 2021), London, U.K., 7-9 July 2021.
- Leitão, F. S. (2021). Experimental study of thermal performance of different fruit packaging box designs. *Energies* 2021.

- M, A. (2007). Forced-air precooling of fruits and vegetables. *Air Conditioning and Refrigeration Journal*, 57-62.
- Madham, S. L. (2021). Experimental tests of the thermal behaviour of new sustainable bio-packaging food boxes. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management* 2021, 8(1), 215-223.
- Masanet, E. W. (2008). Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the fruit and vegetable processing industry an ENERGY STAR guide for energy and plant managers. pp. 1-175.
- Ngcobo, M. D. (2012). Resistance to airflow and cooling patterns through multi-scale packaging of table grapes. *International Journal of Refrigeration*, 35 (2012), pp. 445-452.
- O'Sullivan, M. F. (2017). Forced air cooling of polylined horticultural produce: Optimal cooling conditions and package design. *Postharvest Biology and Technology*, 126 (2017), pp. 67-75.
- O'Sullivan, M. F. (2017). Forced air cooling of polylined horticultural produce: Optimal cooling conditions and package design. *Postharvest Biology and Technology*, 126 (2017), pp. 67-75.
- Oliveira, P. J. (2001). *Mecânica computacional*. p.108-110.
- Opara, Q. Z. (2007). Sensitivity analysis of a CFD modelling system for airflow and heat transfer of fresh food Packaging: Inlet air flow velocity and inside-package configurations. *International Journal of Food Engineering*, 3 (5) (2007), pp. 1-15.
- Opara, U. L. (2011). From hand holes to vent holes: what's next in innovative horticultural packaging? *Inaugural Lecture, Faculty of AgriSciences*, pp. 1-24.
- Opara, U. L. (2011). From hand holes to vent holes: what's next in innovative horticultural packaging? *Inaugural Lecture, Faculty of AgriSciences*, pp. 1-24.
- Poças MFF, M. R. (2007). *Segurança alimentar e embalagem*.
- Raconteur. (2014). Future of packaging. <http://raconteur.net/future-of-packaging-2014>.
- Ravindra, M. R. (2008). Comparative performance of precooling methods for the storage of mangoes (*Mangifera indica* L. CV. amrapali). *Journal of Food Process Engineering*, 31(3), 354-371.

- Robertson, G. (2013). Food Packaging: Principles and practice. (Third., p. 703) Taylor & Francis Group LLC, Boca-Raton.
- S, E. (1989). Modelos de Escoamentos Turbulentos. Vol. 1, Cap. 2, p. 84-155.
- Scott, G. (1994). Computational fluid dynamics for the food industry Food Technology International Europe. p.49-51.
- Shaw, C. (1992). Using Computational Fluid Dynamics. Prentice Hall, New Jersey.
- Singh, D. M. (2003). Effect of ventilation on shelf life and quality of peaches. In VII International symposium on temperate zone fruits in the tropics and subtropics. Part two 696, References.
- Singh, J. O. (2008). The effect of ventilation and hand holes on loss of compression strength in corrugated boxes. *Journal of Applied Packaging Research*, 2(4), 227-238.
- T.M. Berry, T. D. (2016). Multiparameter analysis of cooling efficiency of ventilated fruit cartons using CFD: Impact of vent hole design and internal packaging. *Food Bioprocess Technol*, pp. 1481-1493.
- Thompson, D. M. (2010). Energy use in commercial forced-air coolers for fruit. *Applied Engineering in Agriculture*, 26 (5), pp. 919-924.
- Thompson, J. (2008). Personal Communication. Department of Biological and Agricultural Engineering. University of California, Davis.
- Thompson, T. R. (2008). Forced air cooling . *Commercial cooling of fruits, vegetables, and flowers, University of California Department of Agriculture and Natural Resources, Oakland, California*, Revised ed. Pp. 8-17.
- Tutar, F. E. (2009). Computational modeling of airflow patterns and heat transfer prediction through stacked layers' products in a vented box during cooling. *International Journal of Refrigeration*, 32 (2009), pp. 295-306.
- Wallis G, W. D. (2012). O mercado de embalagem. Page 23-38.
- Wentao Wu, T. D. (2018). Identifying heterogeneities in cooling and quality evolution for a pallet of packed fresh fruit by using virtual cold chains. *Applied Thermal Engineering*, pp. 407-417.

- Wentao Wu, T. D. (2018). Identifying heterogeneities in cooling and quality evolution for a pallet of packed fresh fruit by using virtual cold chains. *Applied Thermal Engineering*, pp. 407-417.
- Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence modeling for CFD*.
- Zou, Q. O. (2006a). A CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: I. Initial analysis and development of mathematical model. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 1037-1047.
- Zou, Q. O. (2006b). A CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods:II. Computational solution, software development, and model testing. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 1048-1058.