



PAULA GIAROLLA SILVEIRA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE TRANSFERÊNCIA DE
MOMENTUM E CALOR EM UM TÚNEL DE
CONGELAMENTO**

**LAVRAS - MG
2021**

PAULA GIAROLLA SILVEIRA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE TRANSFERÊNCIA DE *MOMENTUM* E
CALOR EM UM TÚNEL DE CONGELAMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa
Orientador

Prof. Dr. Roney Alves da Rocha
Prof. Dr. Irineu Petri Júnior
Coorientadores

**LAVRAS - MG
2021**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Silveira, Paula Giarolla.

Simulação computacional de transferência de *momentum* e
calorem um túnel de congelamento / Paula Giarolla Silveira. - 2021.
53 p. : il.

Orientador(a): Jefferson Luiz Gomes Corrêa.

Coorientador(a): Roney Alves da Rocha, Irineu Petri Júnior.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. CFD. 2. Campos de velocidade. 3. Túnel estático de
congelamento. I. Corrêa, Jefferson Luiz Gomes. II. da Rocha, Roney
Alves. III. Petri Júnior, Irineu. IV. Título.

PAULA GIAROLLA SILVEIRA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE TRANSFERÊNCIA DE *MOMENTUM* E
CALOR EM UM TÚNEL DE CONGELAMENTO**

**COMPUTATIONAL SIMULATION OF MOMENTUM AND HEAT TRANSFER IN A
FREEZING TUNNEL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 19 de fevereiro de 2021.

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa

UFLA

Prof. Dr. Roney Alves da Rocha

UFLA

Prof. Dr. Pedro Esteves Duarte Augusto

USP/ESALQ

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa
Orientador

**LAVRAS - MG
2021**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço, à Deus, por todas as oportunidades a mim concedidas e por ser meu porto seguro em todos os dias da minha vida.

Aos meus pais, Valdemir e Talise, por sempre estarem presentes em minha vida, dando sempre muito amor e carinho.

Ao meu amado irmão por toda a ajuda, amor, carinho e paciência.

À minha cunhada, Aline, por sempre me ajudar a ser uma pessoa melhor.

À minha amiga e irmã Janaína, por todos os anos de amizade e parceria.

Aos meus amigos, Bruna, Amanda, Lais, Fernanda, Juliana, João Renato, Leandro, Rômulo, Ramon e Francielly, por tornarem meus dias alegres e sempre me apoiarem.

Ao amigo e orientador Jefferson, por todos os ensinamentos acadêmicos e de vida. Com certeza, trabalhar com você, me fez uma pessoa melhor.

Ao meu coorientador Roney, por sempre me incentivar e ajudar.

Ao meu coorientador Irineu, por toda a ajuda e disponibilidade em ensinar.

À UFLA e ao DCA, pela oportunidade de aprendizado.

À FAPEMIG, pelo auxílio financeiro.

RESUMO GERAL

O túnel de congelamento rápido tem como principal característica a presença de sopradores axiais ou centrífugos, estes circulam o ar sobre os produtos de maneira controlada, ocasionando um resfriamento extremamente rápido, devido à convecção forçada. Na indústria de alimentos, este equipamento é utilizado para congelamento de diversos produtos como legumes, produtos de panificação, filés de peixe e alimentos preparados. A dinâmica dos fluidos computacional, conhecida como CFD (*Computational Fluid Dynamics*), utiliza métodos computacionais para simulação de fenômenos de transporte, obtendo, assim, distribuições de campos de velocidade e temperatura. Este trabalho teve por objetivo a predição de tais campos em um túnel de congelamento. Adicionalmente, propôs-se, com a intenção de melhorar a uniformidade dos campos de velocidade e temperatura, a aplicação de aletas para o direcionamento do fluxo gasoso. O pacote comercial Ansys-Fluent[®] foi utilizado para a resolução do modelo computacional pelo método de volumes finitos. As simulações tridimensionais desenvolvidas envolveram as equações de transporte: conservação da massa, quantidade de movimento e transferência de energia. As equações algébricas foram resolvidas pelo algoritmo AMG (*Algebraic Multi-Grid*), utilizando como critério de convergência, que a soma dos resíduos normalizados fosse inferior a 1×10^{-5} para todas as variáveis. Considerou-se a distribuição uniforme de velocidade de gás na entrada. Os resultados obtidos mostraram que a geometria convencional do túnel de congelamento faz com que o fluxo de ar se concentre em uma região do túnel e que, ao se adicionar chicanas, o fluxo de ar foi direcionado para a região onde são armazenados os produtos. Este redirecionamento provocou uma queda de 15% nos valores de temperatura do túnel cheio, ademais, este apresentou comportamento semelhante ao túnel vazio. Além disso, as simulações computacionais mostraram-se suficientes para predizer o fenômeno de transferência de calor e *momentum*.

Palavras-chave: CFD. Campos de velocidade. Túnel estático de congelamento.

GENERAL ABSTRACT

The main characteristic of the rapid freezing tunnel is the presence of axial or centrifugal blowers, which circulate the air over the products in a controlled manner, causing extremely rapid cooling due to forced convection. In the food industry, this equipment is used to freeze various products such as vegetables, bakery products, fish fillets and prepared foods. The computational fluid dynamics, known as CFD (Computational Fluid Dynamics) uses computational methods for simulating transport phenomena, thus obtaining distributions of speed and temperature fields. This work aimed to predict such fields in a freezing tunnel. Additionally, it was proposed, with the intention of improving the uniformity of the speed and temperature fields, the application of fins to direct the gas flow. The Ansys-Fluent® commercial package was used to solve the computational model using the finite volume method. The three-dimensional simulations developed involved the transport equations: conservation of mass, amount of movement and energy transfer. The algebraic equations were solved by the AMG algorithm (Algebraic Multi-Grid), using as a convergence criterion that the sum of the normalized residues was less than 1×10^{-5} for all variables. The uniform distribution of gas velocity at the entrance was considered. The results obtained showed that the conventional geometry of the freezing tunnel causes the air flow to be concentrated in a region of the tunnel and that, when adding baffles, the air flow was directed to the region where the products are stored. This redirection caused a drop of 15% in the temperature values of the full tunnel, in addition, it presented a similar behavior to the empty tunnel. In addition, computer simulations proved to be sufficient to predict the phenomenon of heat transfer and momentum.

Keywords: CFD. Speed fields. Static freezing tunnel.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	17
1	INTRODUÇÃO GERAL	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1	Refrigeração	10
2.2	Túnel de congelamento rápido	11
2.3	Simulação computacional	12
2.3.1	Dinâmica dos fluidos computacional	12
2.3.2	Malha computacional	13
2.4	Modelos matemáticos	14
2.4.1	Equações de movimento e energia.....	14
2.4.2	Modelos de turbulência	15
2.4.3	Escoamento próximo à parede	18
2.5	Métodos de solução	19
2.5.1	Discretização da equação de transferência de momentum.....	19
2.5.2	Discretização da equação de energia	20
2.5.3	Interpolação da pressão	20
2.5.4	Acoplamento pressão-velocidade	20
2.6	Sistema de aquisição de dados experimentais.....	20
	REFERÊNCIAS.....	22
	SEGUNDA PARTE – ARTIGO	26
	ARTIGO 1 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE TRANSFERÊNCIA DE <i>MOMENTUM</i> E CALOR EM UM TÚNEL DE CONGELAMENTO RÁPIDO	27
3	CONCLUSÃO GERAL	53

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

Segundo a Brasil Food Trends, a tendência de conveniência e praticidade, atualmente, é o maior seguimento atitudinal dos consumidores brasileiros. Os alimentos industrializados, principalmente os congelados e os semiprontos, são fortes aliados dos consumidores, uma vez que representam mais praticidade no preparo das refeições (ITAL, 2010).

Nesse contexto, a indústria de alimentos congelados e semiprontos tem se fortalecido. Um dos setores que tem crescido exponencialmente no ramo é o setor de panificação. Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Panificação e Confeitaria (ABIP, 2014), a tendência do ramo é a criação de centrais de produção com produtos do setor de congelados, com produtos como o pão de queijo, pão francês, sonho, massas prontas para preparo de bolos, dentre outros.

O pão de queijo pode ser conservado por congelamento rápido em um túnel de congelamento estático. Este túnel pode ser um gabinete isolado, equipado com serpentinas de refrigeração e ventiladores axiais ou centrífugos, que circulam o ar sobre os produtos de maneira controlada. O túnel estacionário é um congelador universal, pois, quase todos os produtos podem ser congelados por ele. Legumes e outros produtos (por exemplo, itens de padaria, filés de peixe, alimentos preparados) podem ser congelados em caixas de papelão ou desembalados. A flexibilidade de um túnel de congelamento torna-o adequado para pequenas quantidades de produtos variados (ASHAE, 2010).

Isto posto, o estudo da transferência de *momentum* e calor é de suma importância, uma vez que, a eficiência do processo de congelamento está intrinsecamente associada a estes fenômenos de transporte. Segundo Han *et al.* (2017), Ambaw *et al.* (2013) e Wu e Defraeye (2018) a simulação numérica computacional é uma ferramenta que apresenta alta acurácia para prever os fenômenos de transferência em ambientes refrigerados e, assim, extremamente benéfica para o meio científico e industrial, pois, reduz o número de testes experimentais, bem como o número de protótipos.

Ademais, proporciona o estudo de modificações em equipamentos já existentes. Portanto, a simulação corrobora para a união dos conhecimentos teóricos e práticos e reduz o custo de melhoria e execução de projetos.

Diante disto, o presente trabalho teve por objetivo utilizar a simulação computacional para a predição dos fenômenos de transferência em um túnel de congelamento já instalado e estudar alterações no equipamento com vistas a melhor distribuição do ar.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Refrigeração

A refrigeração é um processo caracterizado pelo fenômeno físico de transferência de calor. Esse processo é comumente utilizado na indústria de alimentos para o armazenamento de alimentos crus e processados (STOECKER; JABARDO, 2018).

A transferência de calor ocorre em três diferentes mecanismos, condução, convecção e radiação, devido a um gradiente de temperatura. A condução se refere à energia térmica transportada entre partes de um meio contínuo pela transferência de energia cinética entre partículas ou grupo de partículas, ao nível molecular. A convecção consiste na transferência de energia entre um fluido em movimento e uma superfície. Essa pode se classificar em convecção natural ou forçada. A radiação é a energia térmica emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não nula (INCROPERA, 2003).

A convecção forçada pode ser promovida pela insuflação ou exaustão de ar através de ventiladores axiais. Como observado por Maliska (2010), este fenômeno está relacionado à velocidade do ar, com o coeficiente convectivo de troca térmica, função da mesma.

O armazenamento de alimentos em câmaras refrigeradas tem por objetivo manter a integridade do alimento durante todo o processo de estocagem. A temperatura definida para o armazenamento deve ser baseada no tipo de produto que será estocado. Na Tabela 1, tem-se a temperatura ótima de armazenamento de alguns dos alimentos que não exigem o congelamento para sua estocagem (STOECKER; JABARDO, 2018).

Tabela 1 - Temperaturas de armazenamento de diversos alimentos.

Produto	Temperatura de armazenamento (°C)
Abacate	4 a 13
Alface	0 a 1
Banana	13 a 14
Frango	-1 a 2
Maçã	-1 a 0
Pera	-2 a 0
Queijo	0 a 1
Repolho	0

Fonte: Adaptado de Stoeker e Jabardo (2018).

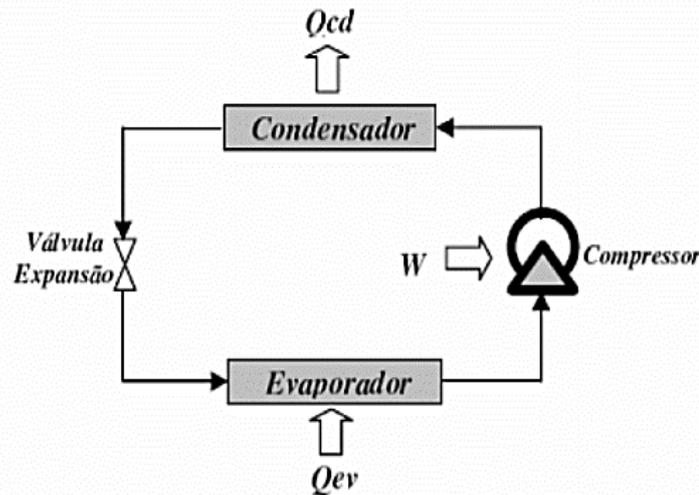
O congelamento de alimentos consiste na aplicação de baixas temperaturas, a partir de -18°C (FELLOWS, 2006). Os métodos mais comuns de congelamento são: túneis de congelamento, túneis de congelamento rápido, congelamento por contato, congelamento por imersão e congelamento criogênico (STOECKER; JABARDO, 2018).

2.2 Túnel de congelamento rápido

Os túneis de congelamento rápido têm como fenômeno principal de troca de calor a convecção forçada (ASHAE, 2010). Este fenômeno está, intimamente, relacionado à redução do ciclo de operação. O ciclo de refrigeração deste túnel é composto por evaporadores, compressores, condensadores e válvula de expansão.

Segundo Silva (2019), túneis de congelamento operam por meio da compressão mecânica do vapor. Nesta operação, o fluido refrigerante, que se encontra no evaporador, retira energia do meio e, como consequência deste processo, o fluido muda de fase, passando para a fase (vapor). Este vapor segue para o compressor, onde ele é comprimido e bombeado para o condensador. No condensador, o fluido perde calor, passando então para a fase líquida novamente. Por fim, entra no dispositivo de expansão, ingressando novamente, no evaporador. A Figura 1 esquematiza o ciclo de operação do sistema de refrigeração.

Figura 1 - Ciclo padrão de refrigeração por compressão.



Legenda: Q_{cd} significa calor liberado pelo condensador, Q_{ev} calor fornecido ao evaporador e W corresponde ao trabalho realizado pelo compressor.

Fonte: Garcia *et al.* (2007).

O ciclo de operação tem por objetivo resfriar o ar presente no interior do túnel. Este ar é utilizado como meio de resfriamento, ou seja, o alimento a ser congelado entra em contato direto com o ar. Portanto, a diferença de temperatura entre o ar e o alimento faz com que o alimento resfrie ao longo do tempo chegando, no final do processo, à temperatura de congelamento (REZENDE; NEVES FILHO; SILVEIRA JÚNIOR, 2002).

2.3 Simulação computacional

2.3.1 Dinâmica dos fluidos computacional

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD, *computational fluid dynamics*) consiste na solução numérica das equações de transporte. Estas descrevem os fenômenos de transferência de calor, *momentum* e massa. A CFD se divide em três etapas gerais: pré-processamento, processamento e pós-processamento. A partir dessas três etapas, é possível avaliar o transporte de uma determinada propriedade (MALISKA, 2010).

No pré-processamento, constrói-se o domínio do escoamento com uma representação do sistema, ou seja, desenvolvem-se geometria e malha. Identificam-se os modelos matemáticos que atendam as especificações do problema, relacionam-se as restrições do problema, com as devidas condições iniciais e de contorno conhecidas, além das propriedades físicas do projeto e do escoamento (COSTA *et al.*, 2016).

A etapa do processamento consiste na resolução dos modelos propostos utilizando uma formulação matemática adequada. Esse procedimento demanda tempo, pois, a convergência varia de acordo com a malha utilizada e com os parâmetros definidos no pré-processamento. Nos *softwares* de Engenharia Auxiliada por Computador (CAE), esta segunda etapa também pode ser referida como *solver*, e nesta, são obtidos os arquivos de resultados que são analisados no pós-processador (AMBAW *et al.*, 2013).

Por fim, na última fase de uma simulação, são visualizados os resultados, identificando o comportamento fluidodinâmico e as variáveis de interesse do problema (COSTA *et al.*, 2016). Ademais, a partir destes resultados, é possível identificar possíveis problemas de funcionamento de um equipamento, bem como é possível realizar propostas de melhorias.

Deste modo, estas etapas são de suma importância para garantir a um projeto uma maior acurácia, confiabilidade e redução no tempo gasto com testes experimentais.

2.3.2 Malha computacional

Para se tratar um modelo computacionalmente, o domínio deve ser discretizado, ou seja, dividido em volumes. Em cada um desses volumes, as soluções das equações governantes serão obtidas. O conjunto desses volumes discretos recebe o nome de malha computacional (FORTUNA, 2000). Os métodos de discretização mais utilizados são o método de diferenças finitas, o método de elementos finitos e o método de volumes finitos (KARPINSKI, 2011).

O método de volumes finitos é o mais comumente utilizado na CFD. Neste método, as equações governantes são discretizadas e a conservação de uma propriedade ao nível de volumes elementares é satisfeita, ou seja, um conjunto de volumes de controle passa a representar o domínio original (MALISKA, 2010).

A malha computacional é composta por elementos característicos. Estes podem possuir ordenação estruturada, ou não. Elementos são entes geométricos que cobrem todo o domínio computacional. As geometrias comumente usadas são hexaédricas, tetraédricas, prismáticas e piramidais, entre outras. No método de volumes finitos, estes elementos são bases para a geração dos volumes de controle (VERGEL, 2013).

Quando os volumes de controle são distribuídos em linhas e colunas alinhadas à malha computacional, é dita estruturada, considerando-se apenas aspectos geométricos da malha. Entretanto, em problemas reais, em função das complexidades das geometrias de estudo, as malhas estruturadas não são a melhor opção de discretização. Diante disso, as malhas não

estruturadas são aplicadas, garantindo que geometrias mais complexas sejam representadas (MALISKA, 2010).

No caso dos volumes finitos, as malhas estruturadas sempre utilizam elementos hexaédricos, enquanto as malhas não estruturadas podem utilizar elementos tanto de tipos hexaédricos, quanto tetraédricos ou elementos poliedricos. Ademais, elementos como prismas e pirâmides são usados, principalmente, em camadas adjacentes à parede (CHAWNER; DANNENHOFFER; TAYLOR, 2016).

De acordo com Zhao *et al.* (2019), a combinação entre malhas computacionais, malhas estruturadas e não estruturadas é chamada de malha híbrida, muito útil em situações de elevada complexidade da geometria e limitações na disponibilidade de recurso computacional. Este tipo de malha garante que refinamentos sejam aplicados em regiões específicas do domínio computacional, acarretando a economia do custo computacional (VERGEL, 2013).

Sabe-se que, quanto maior o refinamento da malha computacional, menor é o erro associado ao método numérico aplicado (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). O refinamento de malha pode ser dividido em: refinamentos globais e refinamentos locais. Refinamentos globais garantem o aumento do número dos elementos de malha em toda a extensão do domínio geométrico. Em contrapartida, o refinamento local é aplicado em uma região de interesse específica do domínio como, por exemplo, regiões de escoamento próximos às paredes, onde o refinamento é necessário, a fim de garantir maior acurácia (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Segundo Zhao *et al.* (2019), o ponto de partida do método dos volumes finitos é a discretização do domínio, ou seja, a geração da malha computacional. Posteriormente, as equações governantes do problema em estudo são resolvidas em cada um dos volumes que integram a malha computacional. Desse modo, faz-se necessário o conhecimento dos modelos matemáticos aplicados.

2.4 Modelos matemáticos

2.4.1 Equações de movimento e energia

Segundo Bird, Stewart e Lightfoot (2004), equação de quantidade de movimento para um fluido Newtoniano é descrita pela equação de Navier-Stokes (Equação 1) e a equação da continuidade (Equação 2).

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla\vec{p} + \mu\nabla^2\vec{v} + \rho\vec{g} \quad (1)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho\vec{v}) = 0 \quad (2)$$

Onde ρ , μ , p , $\frac{D\vec{v}}{Dt}$, \vec{v} , \vec{g} , correspondem, respectivamente, à densidade, viscosidade, dinâmica, pressão, derivada substantiva temporal do vetor velocidade, vetor velocidade e aceleração da gravidade.

O termo $\rho \frac{D\vec{v}}{Dt}$ denota a taxa de aumento do momento por unidade de volume, $-\nabla\vec{p}$ o gradiente de pressão, $\mu\nabla^2\vec{v}$ a taxa de adição de momento por convecção, $\rho\vec{g}$ a força externa sobre o fluido por unidade de volume, $\frac{\partial\rho}{\partial t}$ a taxa do aumento de massa e $(\nabla \cdot \rho\vec{v})$ a taxa de saída de massa.

O transporte de calor é regido pela equação da energia térmica, Equação 3 (LOU et al., 2019).

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (K\nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\bar{\tau} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (3)$$

Onde é \vec{v} o vetor velocidade, T é a temperatura, K é a condutividade térmica, S_h é o termo de geração/acúmulo, ρ é a densidade do material, E é a energia, h_j é a entalpia, \vec{j}_j é o fluxo difusivo e $\bar{\tau}$ é o tensor de tensões.

2.4.2 Modelos de turbulência

O escoamento turbulento apresenta trajetórias irregulares e movimentos aleatórios. Deste modo, a transferência de quantidade de movimento se torna mais intensa (SOARES; SILVEIRA, 2014). O estado caótico do comportamento das partículas, alta difusividade e altos números de Reynolds, formação de vórtices e por ser um regime altamente dissipativo, faz com que seja necessário o uso de modelos de turbulência que ajustem as flutuações das propriedades adequadamente (PATANKAR, 1980).

Segundo Rezende (2009), existem três métodos de análise dos escoamentos turbulentos: Simulação numérica de escoamentos turbulentos, via Equações Médias de Reynolds (RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*), ou seja, são equações obtidas através de médias das equações de Navier-Stokes e da continuidade. Simulação de Grandes Escalas (LES – *Large Eddy Simulation*), que consiste em considerar, para grandes escalas, a turbulência como

turbilhões que contém energia e, para pequenas escalas, utiliza-se modelos de sub-malha, que produz malhas refinadas em um domínio reduzido. Simulação Numérica Direta (DNS – *Direct Numerical Simulation*), que tem por objetivo resolver as equações de Navier-Stokes sem modelagem, em malhas extremamente refinadas e em tempos reduzidos (ZANG *et al.*, 2020).

Os modelos de turbulência podem ser classificados quanto à dependência ou não da viscosidade turbulenta (Equação 4), sendo esta, uma quantidade escalar isotrópica. Estes modelos relacionam as contribuições da turbulência, na transferência de quantidade de movimento linear à taxa de deformação de escoamento médio. Deste modo, estabelecem uma relação entre as tensões turbulentas e os gradientes de velocidade média do escoamento (PATANKAR, 1980).

$$\mu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

Onde c_μ é uma constante, k é a energia cinética turbulenta e ε é a dissipação de energia cinética turbulenta, escalares calculados através de duas equações de transporte e são denominados modelos de duas equações.

Modelos que dependem da viscosidade turbulenta são os modelos sub-malha, modelos a uma equação de transporte e modelos a duas equações de transporte. Modelos que não dependem da viscosidade turbulenta são os modelos das tensões de Reynolds e modelos baseados em relações algébricas (VERGEL, 2013).

Diferentes modelos têm sido propostos para a avaliação da viscosidade turbulenta. Cada modelo apresenta um grau de complexidade diferente e com uma abrangência diferente. Estes modelos são classificados em: modelos algébricos, modelos de uma equação diferencial, modelos de duas equações diferenciais, modelos de n equações diferenciais (WILCOX, 1994).

Modelos de duas equações utilizam a hipótese de gradiente de difusão para relacionar as tensões de Reynolds aos gradientes de velocidade média e da viscosidade turbulenta. Nestes modelos, a escala de velocidade de turbulência é calculada a partir da energia cinética turbulenta, fornecida através da resolução da equação de transporte (WILCOX, 1994).

Os dois principais modelos de duas equações são os modelos k- ε e k- ω . O modelo k- ε acopla às equações médias de Navier-Stokes, duas equações diferenciais parciais de transporte para descrever a evolução da viscosidade turbulenta. Uma dessas equações governa a distribuição de k, Equação 5, energia cinética média local do movimento flutuante, por todo o escoamento. A outra equação, Equação 6, refere-se ao termo ε que corresponde à taxa média

de dissipação da energia cinética. O conhecimento destas variáveis permite a avaliação da viscosidade turbulenta local e estimativa das tensões turbulentas (FERREIRA, 2001).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_j k)}{\partial x_j} = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = -c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

Onde $c_{\varepsilon 1}$, $c_{\varepsilon 2}$, \bar{u} , correspondem, respectivamente, à constantes do modelo, com valores numéricos iguais a 1,44 e 1,92 respectivamente, e vetor velocidade.

O modelo k- ω , desenvolvido por Wilcox (1988), resolve duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta, k, e uma para a frequência de turbulência, ω . As Equações 7 e 8 descrevem, respectivamente, os termos k e ω .

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_j k)}{\partial x_j} = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma^* \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \beta^* k \omega \quad (7)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_j \omega)}{\partial x_j} = -\overline{u'_i u'_j} \alpha \frac{\omega}{k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) - \beta \omega^2 \quad (8)$$

Onde α , β , β^* , σ e σ^* são constantes de fechamento do modelo iguais a $\frac{13}{25}$, $\frac{9}{125}$, $\frac{9}{100}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$, respectivamente.

Os dois modelos apresentados anteriormente possuem vantagens e desvantagens. O modelo k- ε , segundo Rouaud e Havet (2005), apresenta a vantagem de ter um custo computacional menor, pelo fato de ser menos robusto. Entretanto, o modelo carrega algumas deficiências tais como: a necessidade de um tratamento cuidadoso na região próxima à paredes, consequência do fato de que a equação para ε não chega a zero na parede, exigindo funções de amortecimento altamente não lineares adicionais para sua integração através da subcamada laminar, bem como superestima a tensão de cisalhamento.

O modelo k- ω , por ser um modelo mais robusto, quando comparado ao modelo k- ε , apresenta um gasto computacional maior. Entretanto, este modelo apresenta maior acurácia ao solucionar problemas onde há a transferência de calor predominantemente por convecção, pois, apresenta a possibilidade de integração direta através da subcamada laminar sem funções de amortecimento adicionais ou equações de transporte adicionais (DOW; WANG, 2011;

HELLSTEN, 2004; HELLSTEN; LAINE, 1997; MENTER, 1994; ROUAUD; HAVET, 2005; SOGUKPINAR; BOZKURT, 2018; SUKHOVICH, 2000; WILCOX, 2008).

2.4.3 Escoamento próximo à parede

O tratamento próximo às paredes de escoamentos turbulentos demanda uma análise mais detalhada, pois, os gradientes de velocidade, calor e massa apresentam maior variação nesta região. Segundo Olini (2010), quando um fluido entra em contato com uma superfície, a camada em contato com a mesma se estagna. Esta camada atua retardando o movimento das partículas de fluido das camadas adjacentes até uma certa distância, onde o efeito do retardamento é desprezível. Essa região onde o fluido sofre influência do seu contato com a superfície é chamada de camada limite.

A camada limite pode ser dividida em três camadas: subcamada viscosa, na qual o escoamento é, preferencialmente, laminar e a viscosidade molecular age de uma forma importante na transferência de calor e movimento. Camada amortecedora, onde os efeitos turbulentos e viscosos são de igual importância. E, por fim, camada turbulenta, onde os processos de transporte são dominados pela turbulência (VERGEL, 2013).

A maioria dos modelos de turbulência são deduzidos para regiões afastadas das paredes, ou seja, para os núcleos turbulentos. Diante disso, para escolher como ocorrerá o refino de malha na região próxima à parede, deve-se analisar o parâmetro adimensional y^+ . Este parâmetro representa a distância adimensional da parede até o primeiro elemento de malha (MARTINS, 2018).

Segundo Martins (2018), na região muito próxima à parede, os valores de y^+ variam entre 0 e 5, os efeitos da viscosidade e a difusão molecular são predominantes, ou seja, o perfil de velocidade média segue a relação viscosa linear, governada pela Equação 9.

$$y^+ = \frac{\rho u_t y}{\mu} \quad (9)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido, u_t é a velocidade de cisalhamento, y a distância normal à parede e μ a viscosidade do fluido.

A região de transição situa-se nos valores de y^+ entre 5 e 7 e $y^+=30$. Para valores superiores a 30, os cisalhamentos viscosos e turbulentos são significativos, por isso, essa camada segue um perfil logarítmico e o parâmetro y^+ é representado pela Equação 10.

$$\frac{\bar{u}}{u_t} = 2,5 \ln(y^+) + 5,0 \quad (10)$$

Onde \bar{u} , corresponde à velocidade média e u_t , à velocidade de cisalhamento.

Vergel (2013) sugere utilizar valores de $y^+ < 300$, para que seja válida a aproximação da função da parede baseada no perfil logarítmico. Entretanto, quando são usados modelos baseados na frequência turbulenta ω , como no caso dos modelos $k-\omega$, o parâmetro $y^+ < 2$ para que se tenha bons resultados.

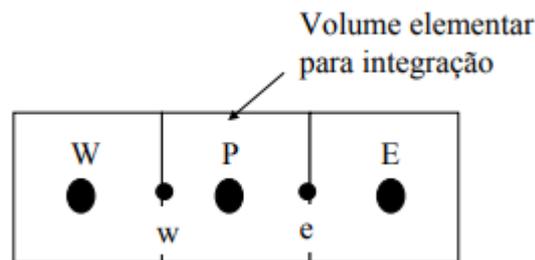
2.5 Métodos de solução

O *software* FLUENT baseia-se no volume de controle para converter as equações diferenciais parciais em equações algébricas. Desse modo, estas podem ser resolvidas numericamente. Esta técnica consiste na integração das equações sobre cada volume de controle, resultando em equações discretas (MALISKA, 2010).

2.5.1 Discretização da equação de transferência de momentum

Segundo Corrêa (2003), a discretização da equação de transferência de *momentum* em problemas que envolvem a convecção, pode ser feita através do esquema de interpolação upwind (Equações 11 e 12). Neste, o valor nominal do termo convectivo na face do volume (FIGURA 2) é igual ao valor do termo convectivo do centro da célula à montante (MALISKA, 2010).

Figura 2 - Volume elementar para a integração.



Fonte: Corrêa (2003).

$$\gamma_w = \gamma W; \gamma_e = \gamma P \text{ para } t > 0 \quad (11)$$

$$\gamma_w = \gamma P; \gamma_e = \gamma E \text{ para } t < 0 \quad (12)$$

Onde γ , corresponde a ρu e os índices e,w, E, W e P indicam a localização da variável.

2.5.2 Discretização da equação de energia

O esquema QUICK emprega um perfil de interpolação quadrático, para os termos advectivos, em cada uma das faces do volume de controle. Este baseia-se em uma média ponderada de segunda ordem e interpolações centrais da variável (Equação 13) (RODRIGUES, 2019).

$$\gamma_W = \frac{3}{8}\gamma_P + \frac{3}{4}\gamma_W - \frac{1}{8}\gamma_{WW} \quad (13)$$

2.5.3 Interpolação da pressão

O esquema para a interpolação da pressão, PRESTO! (*PREssure STaggering Option*) utiliza a equação da continuidade discretizada em um volume de controle para computar o valor numérico da pressão nas faces do volume (PATANKAR, 1980).

2.5.4 Acoplamento pressão-velocidade

A resolução das equações governantes anteriores em problemas envolvendo escoamento de fluidos não é trivial, principalmente, devido à não linearidade das equações de conservação do momento. Alguns métodos têm sido propostos para linearizar equações discretizadas para contornar este problema, como o método SIMPLE. Neste, as equações de continuidade e momentum são combinadas para obter uma equação para a pressão. Assim, uma equação de correção de pressão é usada para calcular diretamente a compressibilidade do fluido. Isso melhora consideravelmente a convergência do algoritmo (ALMEIDA *et al.*, 2019).

2.6 Sistema de aquisição de dados experimentais

Segundo Rezende, Neves Filho e Silveira Júnior (2002), a quantificação de variáveis como a temperatura, são de extrema importância a fim de monitorar a queda da temperatura ao longo do tempo, bem como, avaliar a distribuição da mesma no interior de túneis de congelamento, garantindo condições de operação ideais para o congelamento do produto.

A aquisição de dados de temperatura pode ser feita através de um microcontrolador acoplado a sensores de temperatura (MARGOLIS; JEPSEN; ROBERT, 2020). Este é um circuito integrado que possui um núcleo de processamento, memória e portas de entrada e saída

em um único chip. Um dos exemplos mais importantes de microcontrolador é a plataforma *open source* Arduino (SEBORG *et al.*, 2019).

O Arduino é composto por uma placa de circuito impresso, uma porta USB, uma entrada de fonte externa de energia e portas digitais e analógicas para conexão de sensores (MARGOLIS; JEPSEN; ROBERT, 2020). Este pode ser programado utilizando o *software* de desenvolvimento livre da Arduino – Arduino IDE, onde o código é escrito utilizando a linguagem própria do Arduino, baseada na linguagem de programação C ++ (CAMERON, 2019).

Nesse contexto, o uso de microcontroladores acoplados a sensores de temperatura mostra-se uma alternativa eficiente para o mapeamento da temperatura e validação da queda de temperatura no interior de túneis de congelamento estático, uma vez que, apresentam baixo custo e facilidade de acesso (CAMERON, 2019).

REFERÊNCIAS

- ABIP - Associação Brasileira da Indústria de Panificação e Confeitaria. **Visão do setor de panificação e confeitaria para o futuro**. 2014. Disponível em: <http://www.abip.org.br/site/visao-do-setor-de-panificacao-e-confeitaria-para-o-futuro/>. Acesso em: 15 out. 2019.
- ALMEIDA, E. *et al.* Theoretical study of pneumatic separation of sugarcane bagasse particles. **Biomass and Bioenergy**, [New York], v. 127, p. 105256, Aug. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953419302053?via%3Dihub>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- AMBAW, A. *et al.* Effect of box materials on the distribution of 1-MCP gas during cold storage: a CFD study. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 119, n. 1, p. 150-158, Nov. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877413002549>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- ASHAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. **Handbook**. Atlanta, 2010.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 856 p.
- CAMERON, N. **Arduino applied: Comprehensive projects for everyday electronics**. 1st ed. New York: Apress, 2019. 552 p.
- CHAWNER, J. R.; DANNENHOFFER, J. F.; TAYLOR, N. J. Geometry, mesh generation, and the CFD 2030 vision. **AIAA Journal**, [Reston], p. 2016-3485, June 2016. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2016-3485>. Acesso em: 21 nov. 2020.
- CORRÊA, J. L. G. **Discussão de parâmetros de projeto de secadores ciclônicos**. 2003. 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- DOW, E.; WANG, Q. **Quantification of structural uncertainties in the k- ω turbulence model**. Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2011. Disponível em: <http://web.mit.edu/qiqi/www/paper/AIAA-2011-1762-152.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- FELLOWS, P. **Food processing technology**. 2nd ed. Boca Raton: CRC, 2006. 602 p.
- FERREIRA, V. G. **Análise e implementação de esquemas de convecção e modelos de turbulência para simulação de escoamentos incompressíveis envolvendo superfícies livres**. 2001. 184 p. Tese (Doutorado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para dinâmica dos fluidos**. São Paulo: EdUSP, 2000. 426 p.

HAN, J.-W. *et al.* Mathematical modeling of the cooling efficiency of ventilated packaging: integral performance evaluation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [Oxford], v. 111, p. 386-397, Aug. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931016342120>. Acesso em: 10 out. 2019.

HELLSTEN, A.; LAINE, S. Extension of the k - ω -SST turbulence model for flows over rough surfaces. **AIAA Journal**, [Reston], p. 252–260, Aug. 1997. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.1997-3577>. Acesso em: 15 nov. 2020.

HELLSTEN, A. New advanced κ - ω turbulence model for high-lift aerodynamics. **AIAA Journal**, [Reston], v. 43, n. 9, p. 7018–7035, Sept. 2004. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.13754>. Acesso em: 20 out. 2019.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Transferência de Calor e de Massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 698 p.

ITAL - Instituto de Tecnologia de Alimentos. **Brasil Food Trends 2020**. São Paulo: ITAL/FIESP, 2010. Disponível em: <http://www.brazilfoodtrends.com.br/>. Acesso em: 2 jan. 2021.

KARPINSKI, L. **Aplicação do método dos volumes finitos baseado em elementos em um simulador de reservatórios químico-composicional**. 2011. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 874 p.

MARGOLIS, M.; JEPSEN, B.; ROBERT, N. **Arduino Cookbook**. 3rd ed. Califórnia: O'Reilly Media, 2020. 796 p.

MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. **AIAA Journal**, [Reston], v. 32, n. 8, p. 1598–1605, Aug. 1994. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.12149>. Acesso em: 20 dez. 2020.

OLIVEIRA, G. N. *et al.* Influência do refinamento da malha nos coeficientes de arrasto, sustentação e torque de uma turbina savonius de único estágio. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [Palotina], v. 6, n. 3, p. 438-453, 2017. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/328077683.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2021.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. Washington: Hemisphere, 1980. 197 p.

REZENDE, A. L. T. **Análise numérica da bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa plana fina inclinada**. 2009. 263 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

REZENDE, J. V.; NEVES FILHO, L. C.; SILVEIRA JÚNIOR, V. Effective heat transfer coefficients in forced air freezing of fruit pulp models in commercial boxes. **Brazilian Journal of food technology**, v. 5, n. 1, p. 33-42, 2002. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612002000300021. Acesso em: 21 dez. 2020.

RODRIGUES, G. **Desempenho de esquemas de discretização em volumes finitos na equação de transporte advectiva-difusiva**. 2019. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

ROUAUD, O.; HAVET, M. Numerical investigation on the efficiency of transient contaminant removal from a food processing clean room using ventilation effectiveness concepts. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 68, n. 2, p. 163–174, May 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877404002699>. Acesso em: 30 jan. 2021.

SEBORG, D. E. *et al.* **Process dynamics and control**. 4th ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2019. 512 p.

SILVA, J. G. **Introdução à tecnologia da refrigeração e da climatização**. 3. ed. São Paulo: Artliber, 2019. 264 p.

SOGUKPINAR, H.; BOZKURT, I. Implementation of different turbulence model to find proper model to estimate aerodynamic properties of airfoils. **AIP Conference Proceedings**, v. 1935, n. 1, Feb. 2018. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5025957>. Acesso em: 21 dez. 2020.

STOECKER, F. N.; JABARDO, J. M. **Refrigeração industrial**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2018. p. 10-26.

SUKHOVICH, E. P. Comparative analysis of turbulence models. **Inzhenerno-Fizicheskoi Zhurnal**, [United States], v. 73, n. 2, p. 328–339, Mar. 2000. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02681737>. Acesso em: 2 jan. 2021.

VERGEL, J. L. G. **Estudo da influência da malha computacional, modelos de turbulência e aspectos numéricos da modelagem CFD em impelidores PBT usando malhas não-estruturadas**. 2013. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: The Finite Volume Method**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2007. 503 p.

WILCOX, D. C. Formulation of the $k-\omega$ turbulence model revisited. **AIAA Journal**, [Reston], v. 46, n. 11, p. 2823–2838, Nov. 2008. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.36541> Acesso em: 21 dez. 2020.

WILCOX, D. G. Multiscale model for turbulent flows. **AIAA Journal**, [Reston], v. 26, n. 11, p. 1311-1320, Nov. 1988. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.10042> Acesso em: 5 jan. 2021.

WILCOX, D. G. **Turbulence modeling for CFD**. 2. ed. Davis: DCW Industries, 1994. 540 p.

WU, W. T.; DEFRAEYE, T. Identifying heterogeneities in refrigeration and the evolution of the quality of a pallet of fresh fruits packaged using virtual cold chains. **Applied Thermal Engineering**, [Oxford], v. 133, p. 407-417, Mar. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431116338492> Acesso em: 15 jan. 2021.

ZHAO, Z. High-order curvilinear meshing technique based on an improved basic radius function approach. **International Journal of Numerical Methods in Fluids**, [New York], v. 91, n. 3, p. 97-111, May 2019 Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/flid.4741>. Acesso em: 21 dez. 2020.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

ARTIGO 1 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE TRANSFERÊNCIA DE MOMENTUM E CALOR EM UM TÚNEL DE CONGELAMENTO RÁPIDO

RESUMO

O túnel de congelamento rápido tem como principal característica a presença de sopradores axiais ou centrífugos. Estes circulam o ar sobre os produtos, de maneira controlada, ocasionando um resfriamento extremamente rápido devido à convecção forçada. A dinâmica dos fluidos computacional, conhecida como CFD (*Computational Fluid Dynamics*), utiliza métodos computacionais para simulação de fenômenos de transporte, obtendo assim distribuições de campos de velocidade e temperatura. Este trabalho teve por objetivo a predição do perfil de velocidade e de temperatura em um túnel de congelamento rápido bem como a avaliação da influência da presença de aletas para o direcionamento do fluxo gasoso. O fluxo de escoamento do ar e os campos de velocidade foram determinados pelo pacote comercial Ansys-Fluent®. As simulações tridimensionais desenvolvidas, envolveram as equações de transporte: conservação da massa, quantidade de movimento e transferência de energia. Foi empregado método numérico, volumes finitos para a discretização e solução das equações diferenciais parciais. As equações algébricas foram resolvidas pelo algoritmo AMG (*Algebraic Multi-Grid*), utilizando como critério de convergência que a soma dos resíduos normalizados fosse inferior a 1×10^{-5} para todas as variáveis. Foram testadas quatro configurações geométricas para o túnel de congelamento: túnel vazio (caso 1), túnel cheio com carrinhos de congelamento (caso 2), túnel vazio com chicana (caso 3) e túnel cheio com chicana (caso 4). Os resultados obtidos mostraram que a geometria convencional do túnel de congelamento faz com que o fluxo gasoso se concentre em uma região do túnel, ao adicionar as chicanas o fluxo gasoso foi redirecionado para a região onde são armazenados e, como consequência disso, o caso 4 teve uma queda de 15% nos valores de temperatura, ademais, apresentou um comportamento semelhante ao caso 1. Além disso, as simulações computacionais mostraram-se suficientes para predizer o fenômeno de transferência de calor e *momentum*.

Palavras-chave: CFD. Campos de velocidade. Túnel estático.

1 INTRODUÇÃO

Os túneis de congelamento rápido têm sido amplamente utilizados em todo o mundo, a fim de aumentar a vida útil de diversos produtos alimentícios, tais como, pescados, pão de queijo, pães, entre outros (DEMPSEY; BANSAL, 2012). O congelamento reduz as reações químicas, enzimáticas e o crescimento de micro-organismos, uma vez que a cristalização da água livre reduz a atividade da água, retardando assim a deterioração dos alimentos (BELCHIOR; GIAROLA; RESENDE, 2014).

O congelamento rápido é um fenômeno de transferência de calor por convecção forçada, em que o uso de ventiladores axiais aumenta o coeficiente de transferência de calor (RESENDE; PRADO; JUNIOR, 2013). Este aumento está intrinsecamente relacionado à velocidade local e à intensidade da turbulência (HAN *et al.*, 2017).

A temperatura, o fluxo do ar e o layout determinam o tempo de congelamento em túneis de congelamento. Diversos trabalhos têm mostrado (DALVI-ISFAHAN; HAMDAMI; LE-BAIL, 2018; LIU *et al.*, 2019; MULOT *et al.*, 2019) que os perfis de velocidade do ar e de temperatura são dependentes da quantidade de produto, da distribuição dentro do equipamento, bem como, da geometria do túnel.

Neste contexto, a distribuição da velocidade do ar determina a eficiência e a homogeneidade dos tratamentos aos quais o produto está sendo submetido (RESENDE; PRADO; JUNIOR, 2013). Desse modo, o estudo da transferência de *momentum* e calor é de suma importância.

A dinâmica de fluidos computacional (CFD) pode ser usada para prever a transferência de calor e *momentum* em túneis de congelamento. Segundo Han *et al.* (2017), Ambaw *et al.* (2013), Wu e Defraeye (2018), Chauhan *et al.* (2019), Dempsey e Bansal (2012) e Hang *et al.* (2020ab) a simulação numérica é uma ferramenta que apresenta alta acurácia para prever os fenômenos de transferência em túneis de congelamento, bem como, está intimamente relacionada à redução do tempo gasto em projetos e à redução do custo.

Neste cenário, o presente trabalho tem por objetivo a predição do perfil de velocidade e de temperatura em um túnel de congelamento rápido, bem como a avaliação da influência da presença de chicanas para o direcionamento do fluxo gasoso, para isso, foram testados quatro casos distintos. Além disso, a validação da simulação numérica foi realizada através da coleta de dados experimentais, utilizando um sistema de aquisição de dados.

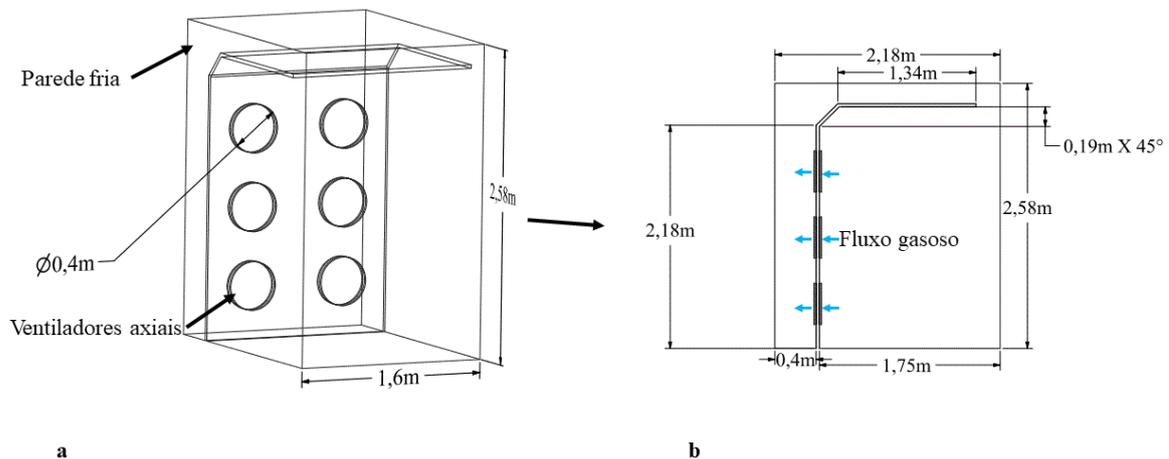
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Unidade experimental

2.1.1 Túnel de congelamento

O túnel de congelamento do presente estudo faz parte do processo de fabricação de pão de queijo congelado de uma indústria de panificação, sediada em Lavras-MG. A geometria do túnel está disposta na Figura 1.

Figura 1 – Geometria do túnel de congelamento.



Legenda: (a) geometria tridimensional para o túnel de congelamento, (b) vista lateral do túnel de congelamento contendo indicação da direção do fluxo gasoso.

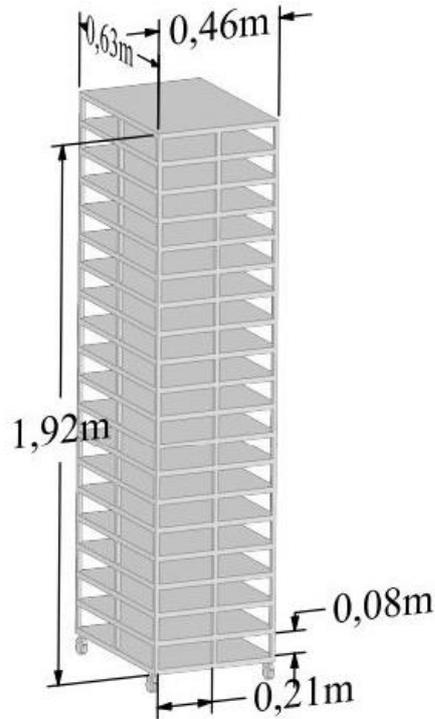
Fonte: Da autora (2021).

O túnel é composto de seis ventiladores axiais (modelo A4D450-AO18-09, Ziehl-Abegg. Inc., Cajamar, SP, BR) que direcionam o fluxo de gasoso (FIGURA 1b) para uma parede fria (FIGURA 1a). Nesta, o ar troca calor e, por consequência, a temperatura do ar e do produto diminuem, à medida que o ar é resfriado.

O produto é disposto no interior do túnel em 4 carrinhos de congelamento (FIGURA 2), com capacidade de 50 kg, divididos em 20 bandejas de produto em cada carrinho. Estes carrinhos, somando um total de quatro, são posicionados na parte direita do túnel e, desse modo, os ventiladores sugam o ar circundante ao produto e o projetam na parede fria. Posteriormente à troca térmica com a parede fria o ar retorna pela região superior do túnel e entrando em

contado novamente com o produto. Este processo ocorre até que a temperatura no interior do túnel atinja o equilíbrio térmico com a parede fria a uma temperatura de -16°C .

Figura 2 – Geometria dos carrinhos de congelamento.



Fonte: Da autora (2021).

2.1.2 Sistema de aquisição de dados experimentais

Para a aquisição de dados de temperatura, foi desenvolvido um sistema de amostragem, utilizando um microcontrolador acoplado a seis sensores de temperatura. O microcontrolador utilizado foi o Arduíno MEGA 2560 e os sensores de temperatura utilizados foram o LM 35.

Segundo Koenca *et al.* (2014), o Arduíno é um microcontrolador com plataforma *open source*, ou seja, está intimamente relacionado a baixo custo e fácil acesso, desse modo, o Arduíno é amplamente utilizado para a conversão de dados analógicos em dados digitais.

O sensor de temperatura LM 35 é capaz de coletar dados de temperatura entre -55 a 150°C . Ele apresenta como vantagens, seu baixo custo e ser à prova de água.

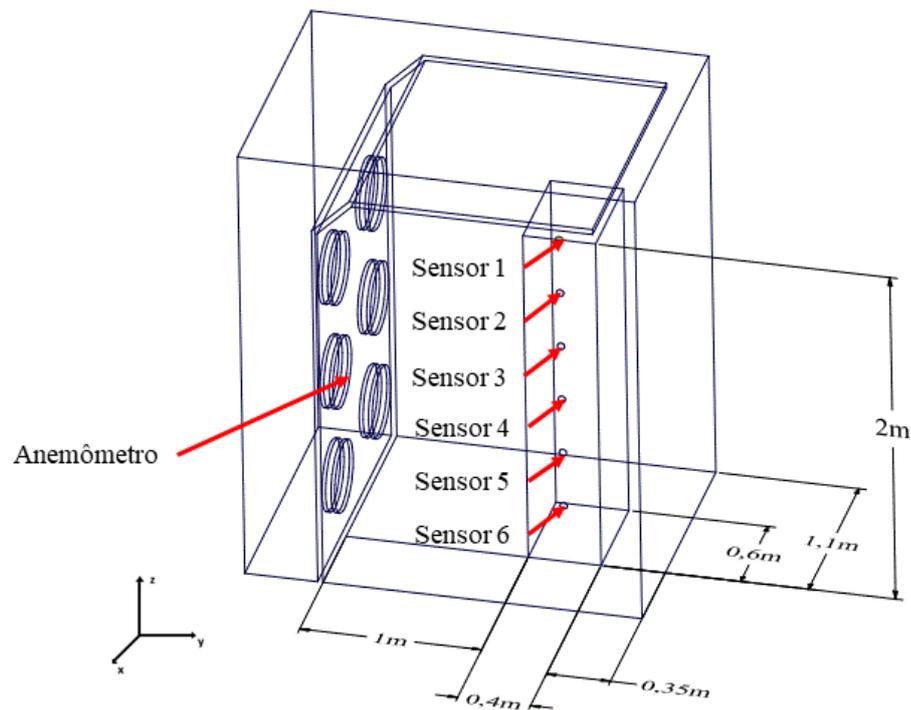
Para a coleta de dados de velocidade, foi utilizado um anemômetro de fio quente (modelo AK833, AKSO, Inc., São Leopoldo, RS, BR).

2.2 Procedimento experimental

Os dados de temperatura foram coletados nas posições indicadas na Figura 3 (sensor 1 a 6), variando de maneira equidistante verticalmente. As posições verticais correspondem ao eixo z do sistema de coordenadas cartesianas, sendo elas iguais a 1,68 m, 1,41 m, 1,15 m, 0,88 m, 0,62 m, 0,35 m, respectivamente. Os sensores estiveram apoiados em caixas plásticas durante a coleta dos dados e as dimensões das mesmas estão cotadas na Figura 3. Após o posicionamento dos sensores, foram coletados os dados de temperatura, durante um ciclo de operação do mesmo.

Para a coleta dos dados de velocidade do ar na saída dos ventiladores axiais, posicionou-se o anemômetro de fio quente conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Geometria tridimensional com indicação da posição da coleta de dados experimentais.



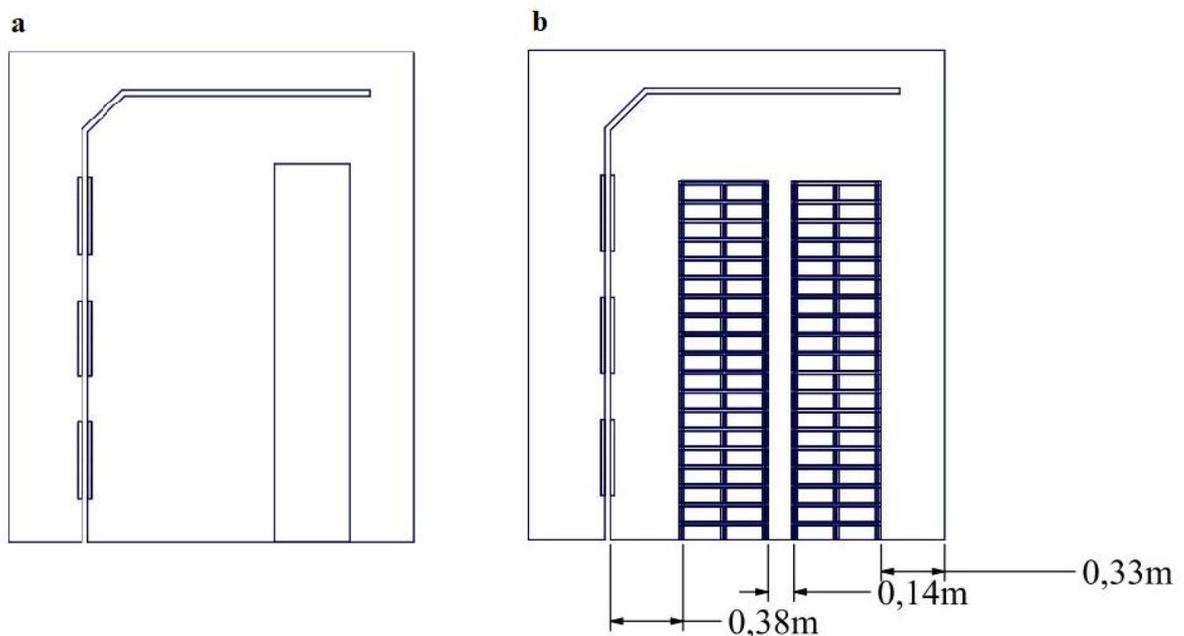
Fonte: Da autora (2021).

2.3 Simulações numéricas

As simulações numéricas foram utilizadas para prever a queda de temperatura do ar ao longo do tempo, no interior do túnel de congelamento. Além disso, testou-se quatro configurações geométricas para túnel, dispostas nas Figuras 4 e 5.

As quatro configurações geométricas correspondem aos casos estudados no presente trabalho. O caso 1 (FIGURA 4a) corresponde à geometria do túnel, contendo em seu interior, somente as caixas plásticas que foram utilizadas para a fixação dos sensores. O caso 2 (FIGURA 4b) corresponde à geometria, contendo quatro carrinhos de congelamento, estes são utilizados no processo real de fabricação e, por isso, faz-se necessário a avaliação da distribuição de velocidade e temperatura nestas condições. O caso 3 (FIGURA 5a) corresponde a uma avaliação de melhoria do equipamento, neste, foi adicionado uma chicana, a fim de melhorar a distribuição do fluxo gasoso. O caso 4 (FIGURA 5b) tem a mesma finalidade do caso 3, entretanto, o túnel contém quatro carrinhos de congelamento em seu interior.

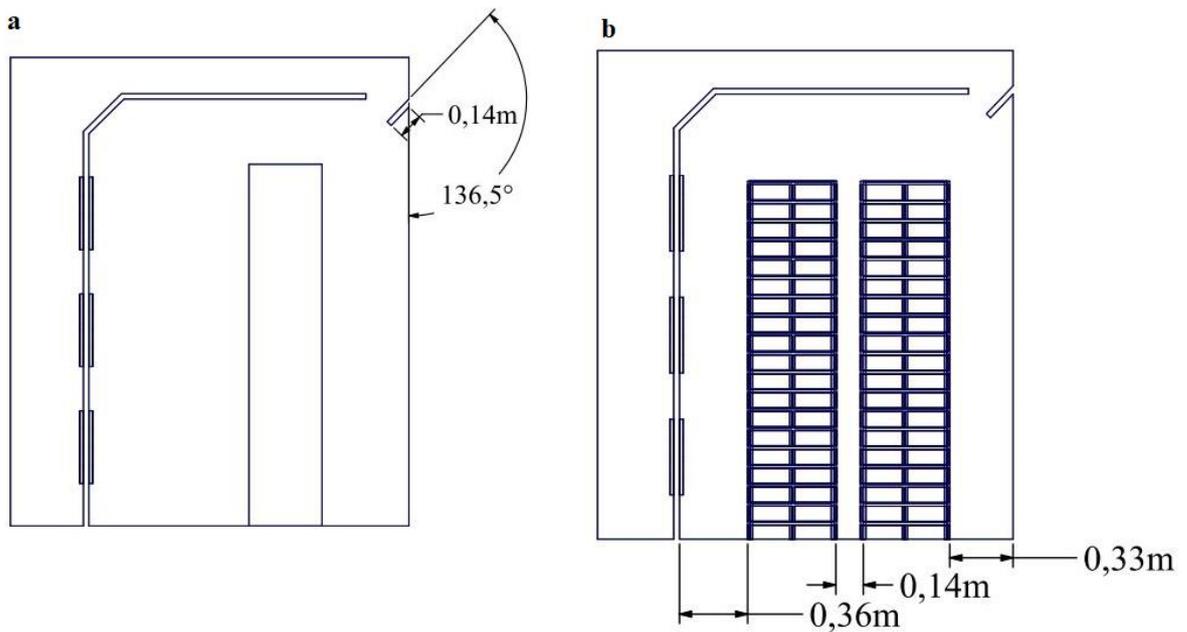
Figura 4 - Configurações geométricas para os casos 1 e 2.



Legenda: (a) Vista lateral para a geometria do túnel de congelamento vazio (caso 1), (b) Vista lateral para a geometria do túnel de congelamento, contendo quatro carrinhos de congelamento (caso 2).

Fonte: Da autora (2021).

Figura 5 – Configurações geométricas para os casos 3 e 4.



Legenda: (a) Vista lateral para a geometria do túnel de congelamento vazio, contendo a chicana (caso 3), (b) Vista lateral para a geometria do túnel de congelamento, contendo quatro carrinhos de congelamento contendo a chicana (caso 4).

Fonte: Da autora (2021).

As geometrias CAD, dos casos 1 a 4 do túnel para as simulações computacionais foram construídas usando o *software* SpaceClaim 20.2.

2.3.1 Malha computacional

Para a discretização do domínio foi utilizado o *software* Fluent Meshing. Neste, as geometrias dos quatro casos estudados foram discretizadas e um teste de independência de malha foi realizado.

Durante o desenvolvimento da malha computacional, aplicou-se um refino global no domínio, definindo-se o tamanho máximo e mínimo de células, conforme o disposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição da malha computacional.

Caso	Tamanho mínimo (m)	Tamanho máximo (m)
1	0,002	0,03
2	0,002	0,03
3	0,002	0,03
4	0,002	0,03

Fonte: Da autora (2021).

Posteriormente, foi aplicado um refino local na região de parede, onde foram criadas seis camadas de prismas, a fim de que a camada limite térmica e hidrodinâmica sejam capturadas com acurácia. Além disso, foi utilizada uma malha poly-hexcore em todo o domínio.

Após a aplicação dos refinamentos, foi realizado um teste de independência de malha, onde três diferentes malhas computacionais (malhas 1, 2 e 3) foram testadas para o caso 1 (TABELA 2) e os resultados dos valores de temperatura foram coletados na mesma região onde os sensores foram posicionados experimentalmente. Esses resultados obtidos foram comparados com os dados experimentais, a fim de definir a melhor malha computacional. O padrão de refino obtido pelo estudo de malha do caso 1 foi aplicado aos demais casos simulados e o número total de células para cada caso está disposto na Tabela 3.

Tabela 2 – Malhas computacionais utilizadas para o estudo de malha.

Malha	Número de células
1	687.267
2	702.077
3	813.458

Fonte: Da autora (2021).

Tabela 3 – Descrição do número de células para cada malha computacional.

Caso	Número de células
1	813.458
2	4.149.174
3	814.356
4	4.150.072

Fonte: Da autora (2021).

2.3.2 Modelo matemático

A distribuição do campo de velocidades é modelada através das equações de Navier-Stokes e da equação da continuidade, Equações 1 e 2, respectivamente (HAN *et al.*, 2017).

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla\vec{p} + \mu\nabla^2\vec{v} + \rho\vec{g} \quad (1)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho\vec{v}) = 0 \quad (2)$$

Onde ρ , μ , p , $\frac{D\vec{v}}{Dt}$, \vec{v} , \vec{g} , correspondem, respectivamente, à densidade, viscosidade dinâmica, pressão, derivada substantiva temporal do vetor velocidade, vetor velocidade e aceleração da gravidade.

O termo $\rho \frac{D\vec{v}}{Dt}$ denota a taxa de aumento do momento por unidade de volume, $-\nabla\vec{p}$ o gradiente de pressão, $\mu\nabla^2\vec{v}$ a taxa de adição de momento por convecção, $\rho\vec{g}$ a força externa sobre o fluido por unidade de volume, $\frac{\partial\rho}{\partial t}$ a taxa do aumento de massa e $(\nabla \cdot \rho\vec{v})$ a taxa de saída de massa.

O transporte de calor é regido pela equação da energia térmica, Equação 3 (LOU *et al.*, 2019).

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (K\nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\bar{\tau} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (3)$$

Onde é \vec{v} , o vetor velocidade, T é a temperatura, K é a condutividade térmica, S_h é o termo de geração/acúmulo, ρ é a densidade do material, E é a energia, h_j é a entalpia, \vec{j}_j é o fluxo difusivo e $\bar{\tau}$ é o tensor de tensões.

Na Equação 3, a taxa de aumento da energia por unidade de volume é dada por $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$, a taxa de adição de energia por condução de calor por unidade de volume é dada por $\nabla \cdot (K\nabla T)$ e a taxa de adição de energia interna pelo transporte convectivo é dada por Q .

2.3.3 Métodos numéricos

As condições de contorno utilizadas no software para a simulação computacional foram: condição de recirculação na entrada e na saída dos ventiladores axiais, com a velocidade igual a 3 m/s na saída, sendo esta coletada pelo anemômetro. Na parede fria, estabeleceu-se a

temperatura de -16°C , sendo esta fornecida pelo fabricante do túnel. Nas demais paredes aplicou-se a condição de não deslizamento (COSTA; MATEUS; PETRI, 2020). Além disto, as simulações foram realizadas em um regime transiente igual a dez minutos.

Os métodos de discretização utilizados foram: o método de volumes finitos para o domínio (SANTOS *et al.*, 2014), para a pressão, foi utilizado o método PRESTO! (COSTA; MATEUS; PETRI, 2020), para a transferência de *momentum*, foi utilizado o *First-Order-Upwind* (SANTOS *et al.*, 2014) e para a discretização da equação de conservação de energia foi utilizado o método QUICK (GHILOUFI; KHIR 2019).

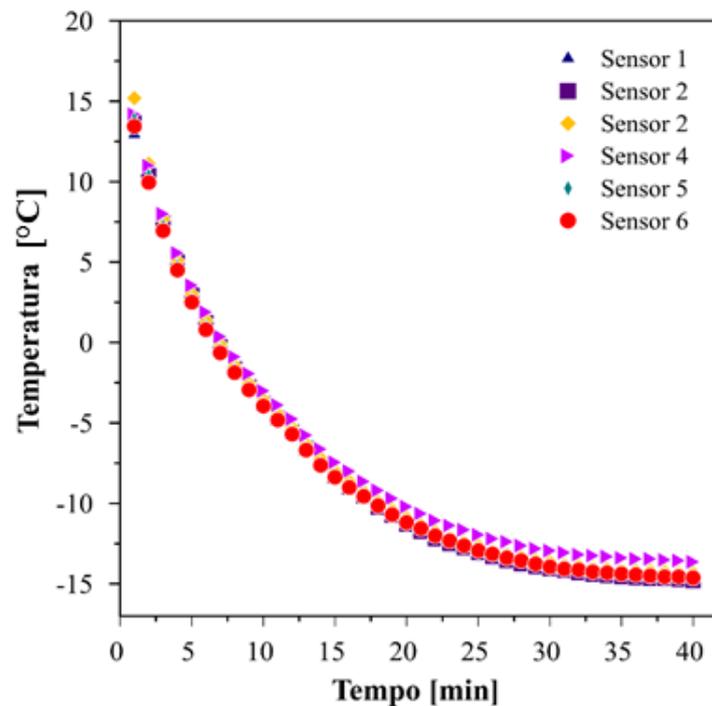
O acoplamento pressão-velocidade foi obtido usando o algoritmo SIMPLE (COSTA; MATEUS; PETRI, 2020) e a modelagem da turbulência foi feita utilizando o modelo $k-\omega$ (LUA *et al.*, 2018). Ademais, as simulações utilizaram um passo de tempo igual a 10^{-3} s e um critério de convergência igual a 10^{-5} .

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados experimentais

Na Figura 6, são apresentados os perfis de temperatura coletados pelos sensores no interior do túnel de congelamento.

Figura 6 – Registros de temperatura ao longo do tempo.



Fonte: Da autora (2021).

As curvas tempo-temperatura (FIGURA 6) mostraram uma queda exponencial da temperatura nos primeiros trinta minutos de operação do túnel. Posteriormente, o sistema tende a apresentar uma linearidade nos valores de temperatura coletados, indicando o equilíbrio térmico. Este comportamento, segundo Bainy, Corazza e Lenzi (2015), Pereira e Rezende (2020) e Biglia *et al.* (2016), é um comportamento típico de túneis de congelamento rápido, onde a convecção forçada induz a uma queda rápida da temperatura no interior do equipamento, causada pelo aumento do coeficiente convectivo de transferência de calor.

Neste contexto, o processo de congelamento rápido traz diversas vantagens para a indústria, visto que, segundo Bainy, Corazza e Lenzi (2015), menores tempos de congelamento

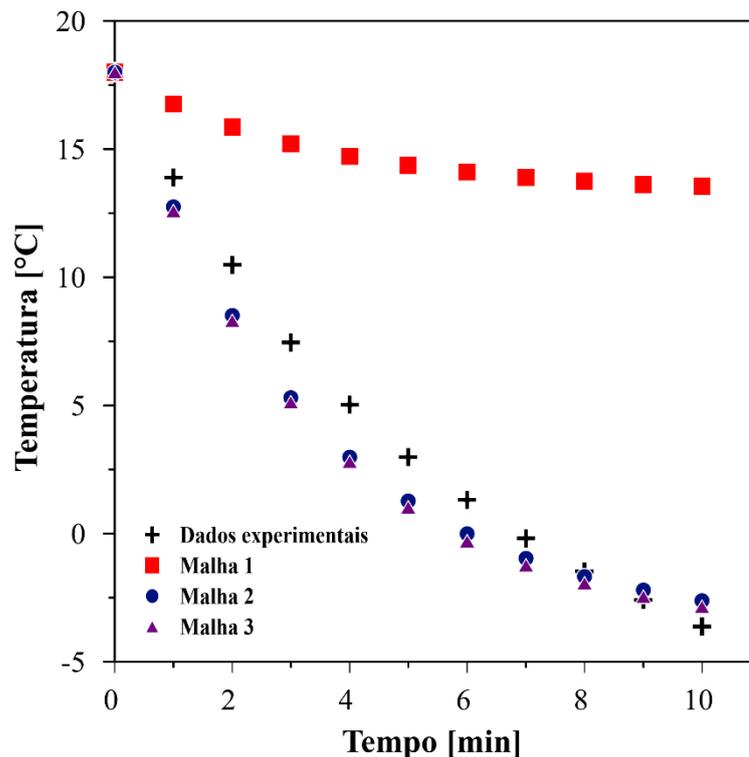
geram produtos alimentícios de maior qualidade, bem como, torna possível a produção de maiores quantidades de produto em um tempo menor.

3.2 Simulação numérica

3.2.1 Teste de independência de malha

Ao realizar-se o estudo de três diferentes malhas computacionais (malha 1, 2 e 3), coletaram-se os resultados dos valores de temperatura na mesma posição onde os sensores foram posicionados, experimentalmente, ao longo de 10 minutos de simulação em estado transiente. Posteriormente, esses resultados obtidos foram comparados com os dados experimentais na Figura 7.

Figura 7 - Teste de independência de malha.



Fonte: Da autora (2021).

Na Figura 7, estão dispostos os perfis de temperatura gerado em cada simulação, bem como os dados experimentais. A malha 1 não apresentou boa acurácia para prever os fenômenos de transferência, uma vez que, os valores de temperatura distanciaram-se muito dos

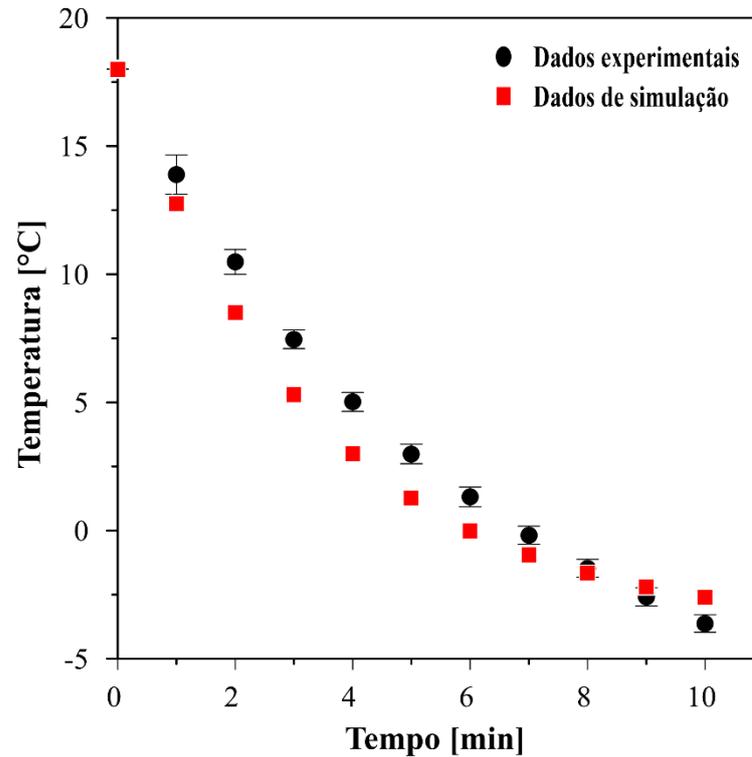
dados experimentais. Isto pode ser justificado pelo baixo refino desta malha computacional, principalmente, na região de parede, apresentando um valor de y^+ igual a 200. Em contrapartida, as malhas 2 e 3 apresentaram boa precisão para a predição da queda da temperatura. Seus valores de y^+ foram 1,5 e 1,22, respectivamente. Portanto, ambas apresentam uma boa captura dos gradientes de velocidade e de temperatura nas regiões de camada limite.

Segundo Delele *et al.* (2013), Le Bideau *et al.* (2018), Parpas, Amaris e Tassou (2018) e Rinaldi *et al.* (2018) a escolha da malha computacional adequada deve basear-se em parâmetros como: tamanho da malha, valor do y^+ e resultados próximos aos dados experimentais. Neste contexto, a malha 2 apresentou as características e a acurácia, satisfatórias e, por isso, foi utilizada nas demais simulações.

3.2.2 Distribuição de temperatura e velocidade no túnel de congelamento para os casos 1 e 2

Os dados experimentais coletados e os dados simulados estão dispostos na Figura 8. Nesta está disposta a variação temporal da média de temperatura na região onde foram posicionados os sensores para o monitoramento da queda de temperatura. Estes sensores foram colocados na mesma posição, tanto para a coleta de dados experimentais, quanto para a coleta dos dados simulados.

Figura 8 – Variação temporal da temperatura.

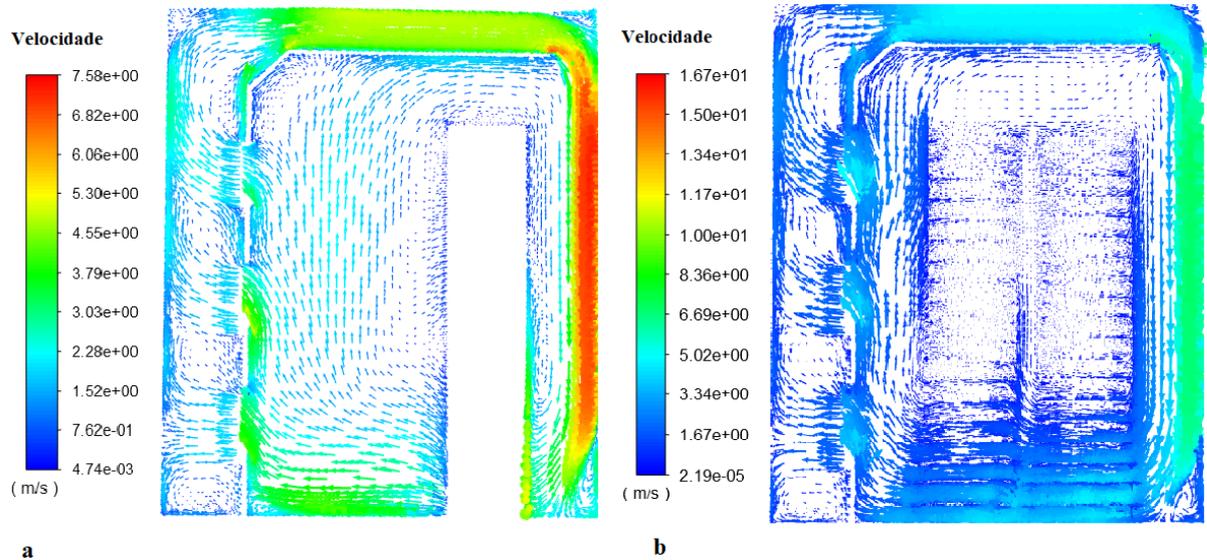


Fonte: Da autora (2021).

A partir da Figura 8, é possível perceber uma queda exponencial da temperatura ao longo do tempo, isto também foi observado por Ambaw, Mukama e Opara (2017) e Getahun *et al.* (2017), que avaliaram a queda de temperatura em sistemas de refrigeração. Segundo estes autores, este comportamento exponencial é característico de sistemas de refrigeração no qual o ar circula por convecção forçada. Ademais, nota-se uma boa concordância entre os dados simulados e os dados experimentais, assim como observado nos trabalhos de Ambaw, Mukama e Opara (2017), Getahun *et al.* (2017), O’Sullivan *et al.* (2016) e Sajadiye e Zolfaghari (2017). Portanto, as simulações computacionais são suficientes para prever os fenômenos de transferência de *momentum* e calor em túneis de congelamento rápido.

A distribuição de velocidades para os casos 1 e 2 ao final dos 10 min de simulação transiente está disposta na Figura 9.

Figura 9 - Perfis de velocidade para os casos 1 e 2.



Legenda: (a) Distribuição de velocidades para o túnel de congelamento vazio (caso 1), (b) Distribuição de velocidades para o túnel de congelamento contendo carrinhos (caso 2).

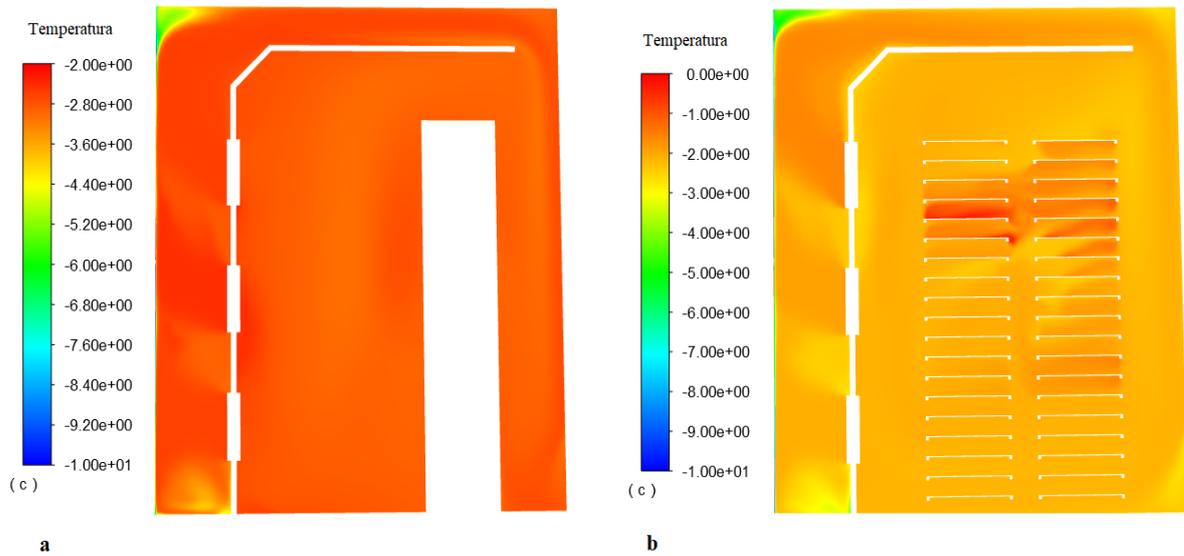
Fonte: Da autora (2021).

Na Figura 9, é possível observar que a presença dos carrinhos no interior do túnel de congelamento impacta em uma maior resistência a transferência de *momentum* no interior do equipamento, gerando zonas mortas, ou seja, zonas com velocidades extremamente baixas (AJANI; ZHU; SUN, 2020; HOANG *et al.*, 2020a, 2020b). Além disso, é possível observar que o fluxo gasoso segue um caminho preferencial que se encontra na parte direita, onde há uma maior velocidade do fluido.

O caminho preferencial do fluido pode ser justificado pela geometria do equipamento, assim como foi observado por Dempsey e Bansal (2012), OKITA *et al.* (2013), Phuekpan e Tangchaichit (2014). Esta possui em sua parte superior uma constrição que faz com que a velocidade do fluido aumente e seja projetada na parede à jusante desta. Ademais, o fluxo concentra-se na região adjacente à parede na qual é projetado, seguindo o caminho preferencial para a parte inferior do túnel, criando assim zonas de baixa velocidade no centro do túnel.

A distribuição de temperatura para os casos 1 e 2 está disposta na Figura 10.

Figura 10 – Distribuição de temperatura para os casos 1 e 2.



Legenda: (a) Distribuição de temperatura para o túnel de congelamento vazio (caso 1), (b) Distribuição de temperatura para o túnel de congelamento cheio (caso 2).

Fonte: Da autora (2021).

A distribuição mostrada na Figura 10 evidencia temperaturas menores na região próxima à parede esquerda, isto já era esperado, uma vez que esta parede se encontra a uma temperatura igual a -16°C .

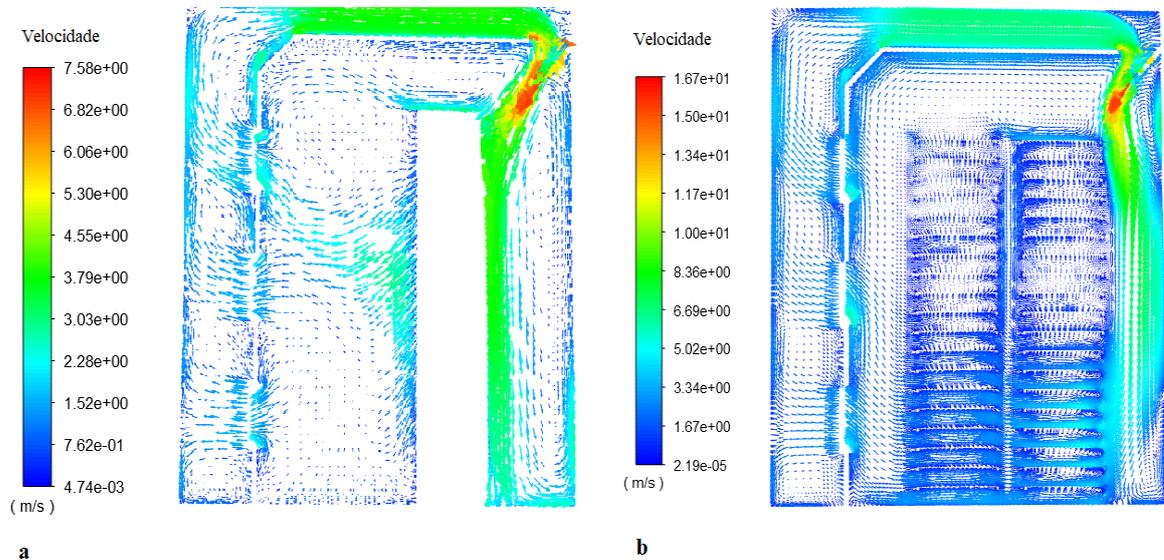
A alta velocidade nas regiões próximas à parede fria favorecem a troca térmica entre o ar e a parede, já que, escoamentos turbulentos tendem a ter coeficientes convectivos de troca térmica maior. Neste sentido, regiões do túnel onde a velocidade tende a ser muito pequena podem criar regiões com temperaturas maiores. Isto pode ser observado na Figura 10b, onde existe uma região em que a velocidade é menor e a temperatura é maior (CHAUHAN *et al.*, 2019; DEMPSEY; BANSAL, 2012; HOANG *et al.*, 2020a, 2020b; OKITA *et al.*, 2013; STEBEL *et al.*, 2020; SYAKA; WAYAN SUGITA; BIJAKSANA, 2019; XIE *et al.*, 2006).

Neste contexto, o túnel de congelamento em estudo possui vantagens e desvantagens. A maior vantagem associada ao equipamento é o uso da convecção forçada que auxilia na troca térmica no interior do equipamento e, a principal desvantagem é justamente a má distribuição do fluxo gasoso, gerada pela geometria do túnel.

3.2.3 Distribuição de temperatura e velocidade no túnel de congelamento para os casos 3 e 4

Diante dos resultados obtidos para os casos 1 e 2 foram estudados os casos 3 e 4, a fim de propor uma melhoria para a distribuição do fluxo gasoso no interior do equipamento. A Figura 11 mostra a distribuição de velocidades para os casos 3 e 4.

Figura 11 - Distribuição de velocidades para os casos 3 e 4.



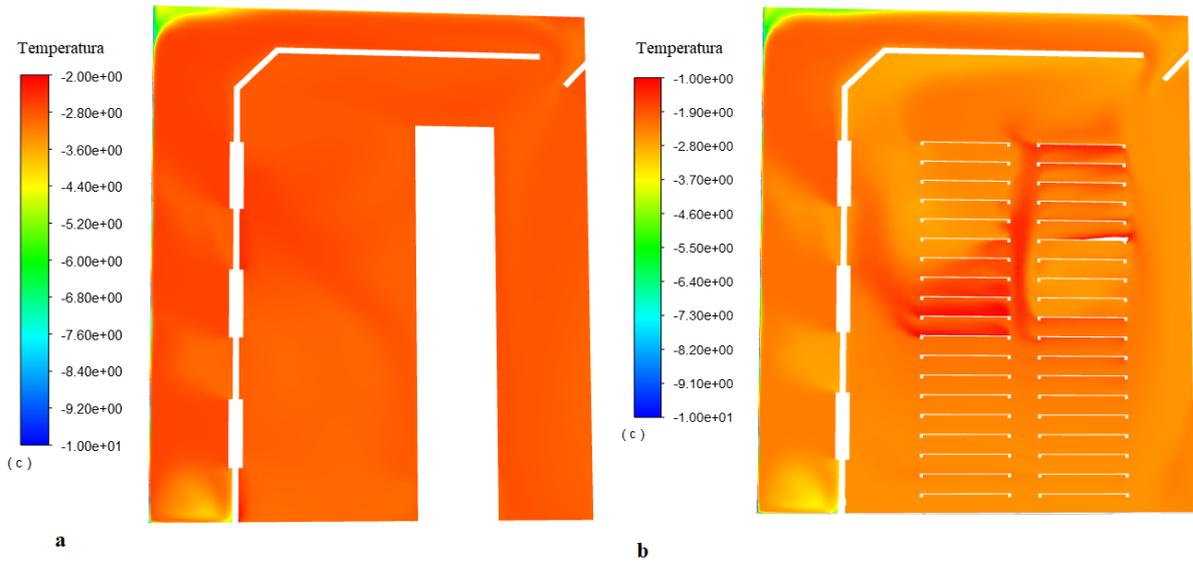
Legenda: (a) Distribuição de velocidade para o túnel de congelamento vazio, contendo a chicana (caso 3), (b) Distribuição de velocidade para o túnel de congelamento cheio, contendo a chicana (caso 4).

Fonte: Da autora (2021).

A partir da Figura 11 é possível inferir que, o fluxo gasoso foi redirecionado para a região central do túnel, melhorando, consideravelmente, a distribuição do fluxo gasoso. Entretanto, esta distribuição ainda pode ser melhorada e, por isso, faz-se necessário que sejam estudadas outras configurações geométricas para o túnel, bem como, outra distribuição dos carrinhos no interior do equipamento, assim como foi proposto por Ajani, Zhu e Sun (2020); Hoang *et al.* (2020); Okita *et al.* (2013); Phuekpan e Tangchaichit (2014), que avaliaram a influência desses parâmetros em diversos túneis de congelamento rápido e, através da CFD, encontraram a melhor condição de operação para o equipamento.

Os perfis de temperatura para os casos 3 e 4 estão dispostos na Figura 12.

Figura 12 – Distribuição de temperatura para os casos 3 e 4.

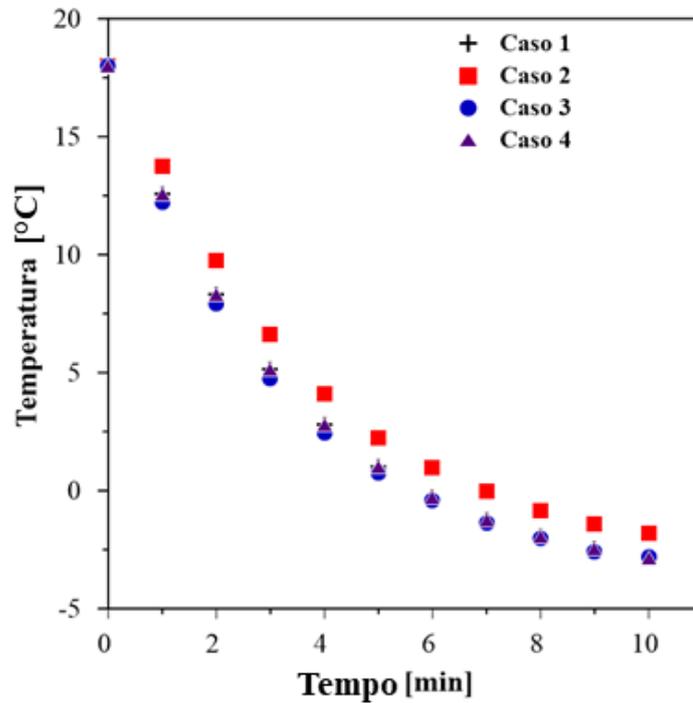


Legenda: (a) Distribuição de velocidade para o túnel de congelamento vazio, contendo a chicana (caso 3), (b) Distribuição de velocidade para o túnel de congelamento cheio, contendo a chicana (caso 4).

Fonte: Da autora (2021).

Na Figura 12, a distribuição de temperatura evidencia que para regiões onde a velocidade é menor, a temperatura tende a permanecer maior. Além disso, nota-se que a redistribuição do fluxo gasoso impactou em uma queda nos valores de temperatura, isto torna-se mais claro na Figura 13.

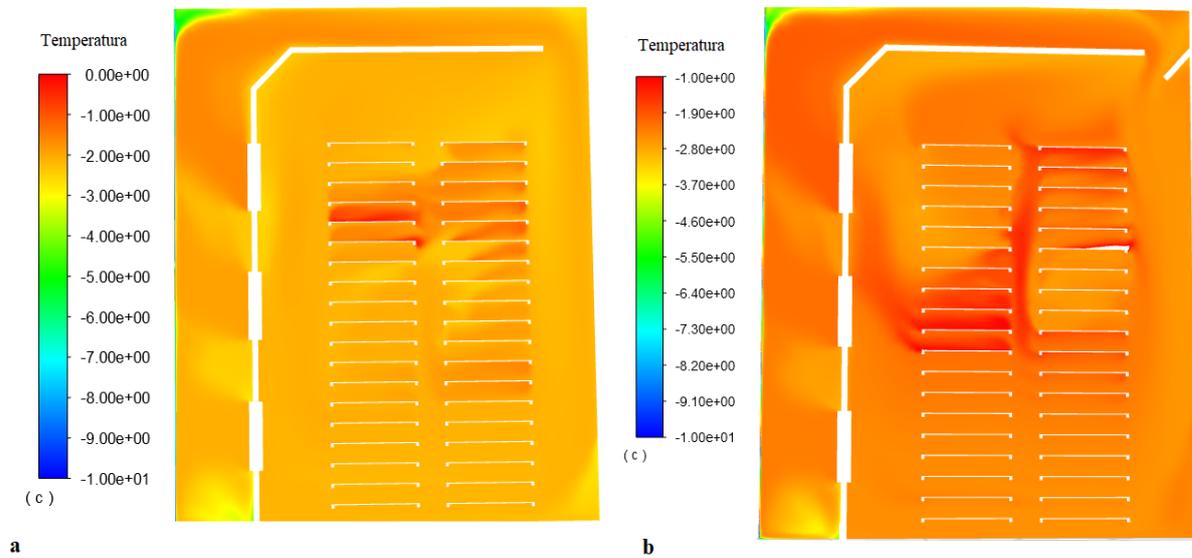
Figura 13 – Distribuição da temperatura ao longo do tempo para os casos 1 a 4.



Fonte: Da autora (2021).

A Figura 13 evidencia que a implantação da chicana na parede direita do túnel gerou uma queda de 15% nos valores de temperatura para o caso 4, quando comparado ao caso 3. Além disso, nota-se que a inserção das chicanas fez com que a queda de temperatura no túnel cheio (caso 4) tivesse um comportamento similar à queda de temperatura no túnel vazio (caso 1). Ademais, quando se compara os contornos de temperatura dos casos 2 e 4, nota-se uma diferença na distribuição de temperatura (FIGURA 14), demonstrando a eficácia da implantação das chicanas no túnel cheio.

Figura 14 – Distribuição de temperatura para os casos 2 e 4.



Legenda: (a) Distribuição de velocidade para o túnel de congelamento cheio (caso 2), (b) Distribuição de velocidade para o túnel de congelamento cheio, contendo a chicana (caso 4).

Fonte: Da autora (2021).

Os trabalhos de Béttega *et al.* (2011), Souza, Freire e Béttega (2018) e Souza *et al.* (2012) mostram que para que se tenha um impacto ainda maior na queda de temperatura, deve-se aumentar o tempo de residência do ar na parede fria. Neste sentido, para que o tempo de residência do ar aumente, faz-se necessário a implantação de aletas na parede fria, o que fará com que o ar fique retido na mesma por um tempo maior, corroborando para uma queda mais efetiva da temperatura do ar, ao longo do tempo.

4. CONCLUSÃO

O uso de simulação computacional se mostrou muito eficaz para prever a transferência de *momentum* e calor em um túnel de congelamento. Além disso, esta ferramenta tornou possível identificar falhas no processo, bem como, tornou possível o estudo de novas configurações de operação.

A implantação de uma superfície estendida no interior do túnel, mostrou-se uma boa alternativa para a redistribuição do fluxo gasoso, entretanto, para que haja uma forte influência na queda de temperatura, faz-se necessário o aumento do tempo de residência do ar na parede fria do equipamento. Este aumento do tempo de residência pode ser feito adicionando aletas na parede fria, um estudo que pode ser feito posteriormente com o auxílio da simulação computacional.

Neste cenário, cabe ressaltar que a simulação computacional se mostrou uma excelente ferramenta para a proposta de melhorias do equipamento e otimização do processo, trazendo para o meio científico e industrial, a possibilidade de melhorar processos com um menor gasto.

REFERÊNCIAS

- AJANI, C. K.; ZHU, Z.; SUN, D. W. Recent advances in multiscale CFD modelling of cooling processes and systems for the agrifood industry. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [Philadelphia], p. 1–16, Sept. 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408398.2020.1809992>. Acesso em: 24 jan. 2021.
- AMBAW, A. *et al.* Effect of box materials on the distribution of 1-MCP gas during cold storage: a CFD study. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 119, n. 1, p. 150-158, Nov. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877413002549>. Acesso em: 25 jan. 2021.
- AMBAW, A.; MUKAMA, M.; OPARA, U. L. Analysis of the effects of package design on the rate and uniformity of cooling of stacked pomegranates: Numerical and experimental studies. **Computers and Electronics in Agriculture**, [Oxford], v. 136, p. 13–24, Apr. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816991630878X>. Acesso em: 26 jan. 2021.
- BAINY, E. M.; CORAZZA, M. L.; LENZI, M. K. Measurement of freezing point of tilapia fish burger using differential scanning calorimetry (DSC) and cooling curve method. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 161, p. 82–86, Sept. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877415001429>. Acesso em: 2 jan. 2021.
- BELCHIOR, N. C.; OLIVEIRA, T. M. G.; RESENDE, J. V. Effects of airflow induction on heat transfer and energy consumption while freezing passion fruit pulp in stacked boxes. **Energy Efficiency**, [Netherlands], v. 7, n. 5, p. 777–790, Oct. 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12053-014-9253-y>. Acesso em: 21 jan. 2021.
- BÉTTEGA, R. *et al.* Mathematical simulation of radial heat transfer in packed beds by pseudohomogeneous modeling. **Particuology**, [New York], v. 9, n. 2, p. 107–113, Apr. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674200110002051>. Acesso em: 25 dez. 2020.
- BIGLIA, A. *et al.* Case studies in food freezing at very low temperature. **Energy Procedia**, [Amsterdam], v. 101, p. 305–312, Nov. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216312486>. Acesso em: 26 jan. 2021.
- CHAUHAN, A. *et al.* Experimental and CFD validation of the thermal performance of a cryogenic batch freezer with the effect of loading. **Energy**, [New York], v. 171, p. 77–94, Mar. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218325210>. Acesso em: 24 dez. 2020.

- COSTA, F. O.; MATEUS, F. L. B.; PETRI, I. J. Influence of partitioning methods on computational cost of CFD simulations applied to hydrocyclones. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, [New York], v. 6, n. 4, p. 528-532, Oct. 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/10617>. Acesso em: 25 nov. 2020.
- DALVI-ISFAHAN, M.; HAMDAMI, N.; LE-BAIL, A. Effect of combined high voltage electrostatic with air blast freezing on quality attributes of lamb meat. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 41, n. 6, p. 1–6, July 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.12811>. Acesso em: 21 dez. 2020.
- DELELE, M. A. *et al.* 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**, [Amsterdam], v. 86, p. 546–555, Dec. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092552141300272X>. Acesso em: 22 dez. 2020.
- DEMPSEY, P.; BANSAL, P. The art of air blast freezing: Design and efficiency considerations. **Applied Thermal Engineering**, [Oxford], v. 41, p. 71–83, Aug. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431111007101>. Acesso em: 24 nov. 2020.
- GETAHUN, S. *et al.* Analysis of airflow and heat transfer inside fruit packed refrigerated shipping container: Part I – Model development and validation. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 203, p. 58–68, June 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877417300493>. Acesso em: 24 nov. 2020.
- GHILOUFI, Z.; KHIR, T. Modeling and optimization of CFDs from pre-cooling conditions in a cold chamber located in southern Tunisia and filled with dates. **Food Science and Technology Journal-Mysore**, [Campinas], v. 56, n. 8, p. 3668-3676, Aug. 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31413394/>. Acesso em: 24 nov. 2020.
- HAN, J. W. *et al.* Mathematical modeling of the cooling efficiency of ventilated packaging: integral performance evaluation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [Oxford], v. 111, p. 386-397, Aug. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931016342120>. Acesso em: 12 dez. 2020.
- HOANG, D. K. *et al.* Experimental measurement and numerical modelling of cooling rates of bulk-packed chicken drumsticks during forced-air freezing. **International Journal of Refrigeration**, [Oxford], v. 114, p. 165–174, June 2020b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140700720301249>. Acesso em: 12 dez. 2020.
- HOANG, D. K. *et al.* Validated numerical model of heat transfer in the forced air freezing of bulk packed whole chickens. **International Journal of Refrigeration**, [Oxford], v. 118, p. 93–103, Oct. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014070072030270X>. Acesso em: 14 dez. 2020.

LE BIDEAU, P. *et al.* Experimental and numerical studies for the air cooling of fresh cauliflowers. **Applied Thermal Engineering**, [Oxford], v. 137, p. 238–247, June 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111737998X>. Acesso em: 25 nov. 2020.

LIU, Z. *et al.* Experimental study on cold storage phase-change materials and quick-freezing plate in household refrigerators. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 42, n. 7, p. 1–9, Oct. 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.13279>. Acesso em: 14 jan. 2021.

LOU, J. C. *et al.* Computational fluid dynamics simulations of polarization phenomena in direct contact membrane distillation. **Journal of Membrane Science**, [Amsterdam], v. 591, p. 18, Dec. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037673881833388X>. Acesso em: 12 dez. 2020.

LUA, J. H. *et al.* Numerical study of the flow and heat transfer characteristics of the air jet cooling system. **Journal of Mechanical Science and Technology**, [Seoul], v. 32, n. 12, p. 6021–6027, Dec. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-018-1152-2>. Acesso em: 15 dez. 2020.

MULOT, V. *et al.* Experimental and numerical characterization of food dehydration during freezing. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 263, p. 13–24, May 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877419302043>. Acesso em: 20 nov. 2020.

O’SULLIVAN, J. *et al.* Modelling the forced-air cooling mechanisms and performance of polylined horticultural produce. **Postharvest Biology and Technology**, [Amsterdam], v. 120, p. 23–35, Oct. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925521416301028>. Acesso em: 1 nov. 2020.

OKITA, W. M. *et al.* Heat transfer analyses using computational fluid dynamics in the air blast freezing of guava pulp in large containers. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 811–824, Dec. 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0104-66322013000400013&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 12 nov. 2020.

PARPAS, D.; AMARIS, C.; TASSOU, S. A. Investigation into air distribution systems and thermal environment control in chilled food processing facilities. **International Journal of Refrigeration**, [Oxford], v. 87, p. 47–64, Mar. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700717304036>. Acesso em: 20 nov. 2020.

PEREIRA, C. G.; RESENDE, J. V. Behavior of the effective heat transfer coefficient and global thermal resistancfreezing of fruit juice model solutions in cylindrical packages. **Food Science and Technology**, [Campinas], v. 40, n. 4, p. 993–999, Dec. 2020. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0101-20612020000400993&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 6 jan. 2021.

PHUEKPAN, K.; TANGCHAICHIT, K. Design and development the pressure chamber of the continuous belt air-blast freezer in freezing shrimp process. **Advanced Materials Research**, [Timișoara], v. 931–932, p. 1163–1167, May 2014. Disponível em: <https://www.scientific.net/AMR.931-932.1163>. Acesso em: 8 jan. 2021.

RESENDE, J. V.; PRADO, M. E. T.; JUNIOR, V. S. Non-uniform heat transfer during air-blast freezing of a fruit pulp model in multilayer boxes. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 6, n. 1, p. 146–159, Dec. 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-011-0757-6>. Acesso em: 26 nov. 2020.

RINALDI, M. *et al.* Investigation of influence of container geometry and starch concentration on thermal treated in-package food models by means of Computational Fluid Dynamics (CFD). **Food and Bioproducts Processing**, [England], v. 108, p. 1–11, Mar. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308517301578>. Acesso em: 12 jan. 2021.

SAJADIYE, S. M.; ZOLFAGHARI, M. Simulation of in-line versus staggered arrays of vented pallet boxes for assessing cooling performance of orange in cool storage. **Applied Thermal Engineering**, [Oxford], v. 115, p. 337–349, Mar. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116341321>. Acesso em: 24 nov. 2020.

SANTOS, D. A. *et al.* An Investigation of the different flow regimes in a rotating drum through experimental and simulation. **Materials Science Forum**, [Switzerland], v. 802, p. 215–219, Dec. 2014. Disponível em: <https://www.scientific.net/MSF.802.215>. Acesso em: 22 nov. 2020.

SOUZA, A. S.; FREIRE, J. T.; BÉTTEGA, R. Computational fluid dynamics evaluation of the influence of cone geometry on solids circulation in spouted beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [New York], v. 57, n. 41, p. 13876–13888, Sept. 2018. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.8b03505>. Acesso em: 22 out. 2020.

SOUZA, G. F. M. V. *et al.* Experimental analysis of heat transfer inside packed beds of soybean seeds. **Materials Science Forum**, [Switzerland], v. 727–728, p. 1818–1823, Aug. 2012. Disponível em: <https://www.scientific.net/MSF.727-728.1818>. Acesso em: 23 out. 2020.

STEBEL, M. *et al.* Numerical investigation of the fluid flow distribution for the hydrofluidisation food freezing method. **International Journal of Thermal Sciences**, [Paris], v. 151, May 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1290072919311846>. Acesso em: 21 nov. 2020.

SYAKA, D. R. B.; WAYAN SUGITA, I.; BIJAKSANA, M. Characteristics study of two-stage cascade refrigeration system design for household air blast freezing. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**, [New York], v. 10, n. 1, p. 1804–1813, Jan. 2019. Disponível em: http://www.iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_10_ISSUE_1/IJMET_10_01_178.pdf. Acesso em: 23 dez. 2020.

WU, W. T.; DEFRAEYE, T. Identifying heterogeneities in refrigeration and the evolution of the quality of a pallet of fresh fruits packaged using virtual cold chains. **Applied Thermal Engineering**, [Oxford], v. 133, p. 407-417, Mar. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431116338492>. Acesso em: 25 out. 2020.

XIE, J. *et al.* W. Effects of design parameters on flow and temperature fields of a cold store by CFD simulation. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 77, n. 2, p. 355–363, Nov. 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877405004504>. Acesso em: 22 nov. 2020.

3 CONCLUSÃO GERAL

A simulação computacional mostrou-se uma excelente ferramenta para prever os fenômenos de transferência de *momentum* e calor em um túnel de congelamento estático. Através delas foi possível identificar problemas na operação do equipamento, bem como foi possível propor novas configurações para o caso estudado.

Através do presente estudo foi possível prever os perfis de temperatura para quatro diferentes casos em um mesmo equipamento o que demonstra a alta capacidade da simulação computacional em agregar melhorias tanto para o equipamento quanto para a redução do tempo e do dinheiro gasto para novos projetos.

Nesse sentido, cabe ressaltar que o presente trabalho traz a abertura para novos estudos a serem realizados a respeito deste túnel de congelamento tais como: avaliar o efeito da implantação de aletas na parede fria do equipamento no tempo de residência do ar e na queda de temperatura do mesmo e avaliar novas configurações para os carrinhos de congelamento no interior do equipamento, visando sempre agregar melhorias ao funcionamento do mesmo.