

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO TAKEO ANEGAWA

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE PROCESSO DE
TERMOFORMAGEM EM UMA ENCARTELADORA SKIN**

LONDRINA

2022

BRUNO TAKEO ANEGAWA

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE PROCESSO DE
TERMOFORMAGEM EM UMA ENCARTELADORA SKIN**

Study of Heat Transfer During Thermoforming Process in a Skin Cartoner

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Rafael de Sene Lima.

LONDRINA

2022



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

BRUNO TAKEO ANEGAWA

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE PROCESSO DE
TERMOFORMAGEM EM UMA ENCARTELADORA SKIN**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 25/novembro/2022

Rafael Sene de Lima
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ismael de Marchi Neto
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ricardo de Vasconcelos Salvo
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2022

RESUMO

Na produção de alguns tipos de embalagens encarteladas, como é o caso das embalagens Skin, a termoformagem é utilizada como principal processo de fabricação. Indícios de não conformidades na operação real de uma máquina encarteladora Skin conduziram esse estudo a analisar a transferência de calor que ocorre no processo de termoformagem. Para isso, através da simulação numérica da transferência de calor que ocorre na etapa de aquecimento, foi analisada a distribuição de temperaturas ao longo da superfície de projeto. Os resultados da simulação de transferência de calor, conjugada entre radiação e condução, indicam que o sistema de aquecimento da máquina não proporciona homogeneidade de temperatura no filme termoplástico caracterizado como a superfície de projeto.

Palavras chave: termoformagem; transferência de calor; simulação.

ABSTRACT

In the production of some types of carton packs, such as Skin packs, thermoforming is used as the main manufacturing process. Evidence of non-conformities in a real operation of a Skin cartoner led this study to analyze the heat transfer that occurs in the thermoforming process. To do this, by numerically simulating the heat transfer that occurs in the heating step, the temperature distribution along the project surface was analyzed. The results of the heat transfer simulation, conjugated between radiation and conduction, indicate that the machine heating system does not provide temperature homogeneity in the thermoplastic film characterized as the project surface.

Keywords: thermoforming; heat transfer; simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Embalagem blister.....	11
Figura 2 – Embalagem Skin.....	12
Figura 3 – Máquina Skin e Sistema de aquecimento	13
Figura 4 – Chacoalhos de bebê termoformados	16
Figura 5 - Peça de caçamba de picape termoformada	18
Figura 6 – Cartela de remédio	18
Figura 7 – Esquema simplificado da técnica de termoformagem	19
Figura 8 – Antes e depois de aquecimento em termoformagem	20
Figura 9 – Exemplo de forno de aquecimento radiante	21
Figura 10 - Máquina Skin com aquecimento por resistência elétrica	21
Figura 11 – Exemplo de forno de aquecimento por condução	22
Figura 12 – Forno alimentado por queimadores infravermelhos à gás.....	23
Figura 13 – Processos de absorção, reflexão e transmissão associados a um meio semitransparente	26
Figura 14 – Distribuição direcional de radiação emitida por uma superfície.....	27
Figura 15 – Fluxograma do estudo	28
Figura 16 – Sistema de aquecimento da máquina Skin	29
Figura 17 – Vista superior do Sistema de aquecimento	30
Figura 18 – Geometria para determinação do fator de forma entre duas superfícies	33
Figura 19 – Termômetro infravermelho	37
Figura 20 – Sistema modelado para a simulação	39
Figura 21 – paredes laterais	40
Figura 22 - fundo	40
Figura 23 - filme termoplástico	41
Figura 24 – Resistências elétricas	41
Figura 25 – Ar interno	42
Figura 26 – Malha com 362.179 elementos	43
Figura 27 – Mapa de temperaturas no filme em $t = 20$ s, malha com 362.179 elementos.....	44
Figura 28 – Mapa de temperaturas do ar interno em $t = 20$ s, malha com 362.179 elementos.....	44
Figura 29 – Malha com 470.274 elementos	45
Figura 30 - Mapa de temperaturas no filme em $t = 20$ s, malha com 470.274 elementos.....	45
Figura 31 – Mapa de temperaturas no ar interno em $t = 20$ s, malha com 470.274 elementos.....	46
Figura 32 – Mapa de temperaturas do ar interno no plano $z = 0$	47
Figura 33 – Mapa de temperaturas do ar interno no plano $z = 165$ mm.....	47
Figura 34 – Mapa de temperaturas do ar interno no plano $z = -165$ mm	47
Figura 35 – Mapa de temperaturas no filme, $t = 10$ s.....	48
Figura 36 – Mapa de temperaturas no filme, $t = 20$ s.....	49
Figura 37 – Mapa de temperaturas no filme, $t = 30$ s.....	49
Figura 38 – Gráfico de temperaturas em pontos distintos do filme	50
Figura 39 – Linhas criadas para retirada de perfil de temperatura	51
Figura 40 – Perfis de temperatura ao longo da linha 1	51
Figura 41 – Perfis de temperatura ao longo da linha 2	52

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Principais Tipos de Embalagens e Suas Aplicações	10
Quadro 2 – Destaques da história da termoformagem	16
Tabela 1 – Temperatura x Tempo nas resistências	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	13
1.2	Justificativa	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Termoformagem	15
2.1.1	Histórico da termoformagem	15
2.1.2	Aplicações da termoformagem	17
2.1.3	Etapas do processo	18
<u>2.1.3.1</u>	<u>Aquecimento</u>	<u>19</u>
2.1.3.1.1	<i>Aquecimento radiante – predominância de radiação</i>	20
2.1.3.1.2	<i>Aquecimento por contato – predominância de condução</i>	22
2.1.3.1.3	<i>Aquecimento por gás – predominância de convecção</i>	22
<u>2.1.3.2</u>	<u>Conformação</u>	<u>23</u>
2.1.3.2.1	<i>Termoformagem à vácuo</i>	23
2.1.4	Polímeros	24
2.2	Transferência de calor	25
2.2.1	Condução	25
2.2.2	Convecção	25
2.2.3	Radiação	25
<u>2.2.3.1</u>	<u>Corpo negro e corpo cinza</u>	<u>25</u>
<u>2.2.3.2</u>	<u>Emissividade, absorvidade e refletividade</u>	<u>26</u>
<u>2.2.3.3</u>	<u>Intensidade de Radiação</u>	<u>26</u>
<u>2.2.3.4</u>	<u>Radiosidade</u>	<u>27</u>
3	METODOLOGIA	28
3.1	Modelo	28
3.2	Leis e equações governantes	30
3.2.1	Distribuição de Planck e Lei de Stefan-Boltzmann	30
3.2.2	Fator de forma	32
3.2.3	Troca de radiação entre superfícies: Solução em termos da radiosidade J 33	
3.3	Método numérico	35
3.3.1	Modelo de radiação <i>Surface-to-Surface (S2S)</i>	35
3.4	Hipóteses e condições de contorno	36

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	Dados do sistema real	37
4.2	Modelagem.....	39
4.3	Configurações da simulação.....	39
4.4	Estudo da independência de malha.....	42
5	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

Pela necessidade de contenção, proteção e transporte, as embalagens surgiram há milênios. Por volta de 1000 a.C. médicos egípcios utilizavam recipientes de bambu rotulados para embalar medicamentos (PRESAS e PRESAS, 2003). Desde então as embalagens passaram por grande desenvolvimento, sobretudo com a descoberta de novos materiais e tecnologias e pela competitividade de mercado, que fez com que atualmente as embalagens tenham mais utilidades do que apenas servir de recipiente para transporte e proteção.

O surgimento do autoatendimento proporcionado pelos supermercados fez com que as embalagens passassem a ter as novas funções de informar, identificar e promover os produtos (NEGRÃO; CAMARGO, 2008). Nessa vertente, as embalagens passaram a ter seu desenvolvimento atrelado ao design, que tornou-se importante ferramenta para a propaganda na busca de transmitir os valores da marca/empresa para o consumidor (MIRANDA, 2013).

Uma maneira de classificar as embalagens e consequentemente os processos industriais de embalagem correspondentes é de acordo com a matéria prima utilizada. O quadro 1 relaciona os principais tipos de embalagens e suas aplicações.

Quadro 1 - Principais Tipos de Embalagens e Suas Aplicações

Matéria-prima	Embalagens		Principais tipos de produtos
Vidro		Garrafas - frascos - potes- ampolas - copos	Bebidas - cosméticos - medicamentos - conservas - geléias - requeijão
Celulose	• Cartão (semi-rígido)	Cartuchos - caixas - envelopes	Farinhas - flakes - hambúrgueres - calçados - eletroeletrônicos – materiais de papelaria
	• Papelão e papelão microondulado	Cartonados - caixas	Leite longa vida – sucos - alimentos - frutas - eletroeletrônicos – embalagens de transporte
	• Papel	Sacos	Carvão - adubo – farinha de trigo - sementes - rações
Plástico	• Plásticos rígidos	Frascos - potes - garrafas	Prod. de higiene e limpeza - cosméticos – achocolatados - sorvetes - shakes - álcool - refrigerantes - sucos
	• Plásticos flexíveis	Sacos – flow packs - envoltórios	Café - açúcar - arroz - ração - macarrão - salgadinhos - biscoitos - balas
Metal	• Alumínio	Latas- blisters - selos	Cervejas - refrigerantes – cartelas de comprimidos- tampas aluminizadas

	● Folha de flandres	Latas	Conservas – leite em pó - tintas
Madeira		Caixas - engradados - barris	Bacalhau – Equipamentos e máquinas - charutos - frutas - verduras - vinhos
Embalagem composta		Combinam dois ou mais materiais	Encartelados - laminados – multifolhados
Tecido		Sacos de estopa – sacos de ráfia	Açúcar - cereais - batatas

Fonte: Adaptado de MESTRINER (2002).

Dentre os diversos tipos de embalagens estão as encarteladas, caracterizadas pela presença de uma cartela contendo as informações normativas e propagandistas relacionadas ao produto, e por um berço de filme polimérico com a utilidade de acondicionar e expor o produto. Devido a esta dualidade de componentes que formam as embalagens encarteladas, estas são caracterizadas como embalagem composta no quadro 1.

Para um melhor entendimento, as figuras 1 e 2 ilustram produtos embalados por dois diferentes processos que geram embalagens encarteladas.

Figura 1 – Embalagem blister



Fonte: <https://embalagemblisters.com/produto/blister-embalagem/>

Figura 2 – Embalagem Skin



Fonte: <https://www.plastifilme.com.br/pvc-skin>

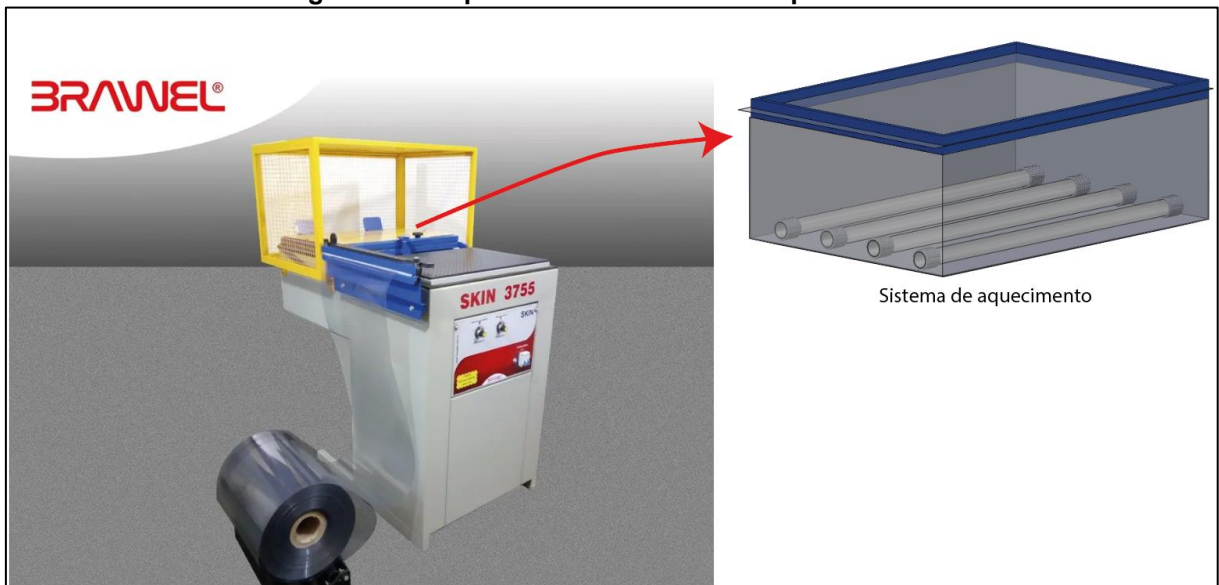
Na produção de embalagens encarteladas como as das figuras 1 e 2, a termoformagem é utilizada como o principal processo de fabricação, que é caracterizado por formar a geometria de acondicionamento do produto. Para tal, a técnica de termoformagem sucede-se pelo estiramento de uma chapa termoplástica aquecida através da ação de um molde, que determina os contornos adquiridos pelo material após o resfriamento (ALMEIDA, 2014).

No caso de uma embalagem termoformada blister, similar à da figura 1, o termoplástico é moldado em uma geometria aproximada do produto, que é adicionado à embalagem somente após o processo. Já na produção de uma embalagem Skin, ilustrada na figura 2 e que é o resultado da máquina em que este estudo se baseia, o termoplástico é estirado contra o próprio conteúdo a ser embalado, num processo que utiliza vácuo para formar uma embalagem justa às dimensões do produto (PACKAGING OF MATERIAL PRESERVATION, 1976).

Segundo Throne (2008), a transferência de calor da etapa de aquecimento conduz os resultados de uma operação de termoformagem, além de caracterizar a maior parcela dos custos de uma peça conformada por este processo, através do gasto energético.

Dessa forma, este estudo realizado como trabalho de conclusão de curso visa realizar simulações computacionais da transferência de calor do sistema de aquecimento de uma máquina de embalagens skin, mostrada no esquema da figura 3.

Figura 3 – Máquina Skin e Sistema de aquecimento



Fonte: Adaptado de Brawel máquinas.

Ainda, na análise desta transferência de calor, busca-se encontrar possíveis não uniformidades na distribuição de calor ao longo da área superficial do filme termoplástico, já que segundo Throne (2008), a temperatura uniforme na superfície do filme plástico deve ser um dos principais objetivos de uma operação de termoformagem.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal a realização de um estudo numérico da transferência de calor do processo de termoformagem em uma máquina Skin, sobretudo com o fomento de investigar a distribuição do calor no filme termoplástico. Os objetivos específicos são listados a seguir:

- I.Revisão da literatura pertinente ao tema de estudo;
- II.Adaptação com software empregado na simulação computacional do problema;
- III.Proposição de um modelo físico/computacional;
- IV.Construção da malha numérica;
- V.Execução das simulações propostas;
- VI.Análise dos resultados;
- VII.Confecção de relatório de TCC.

1.2 Justificativa

A análise de transferência de calor da máquina Skin impulsionou-se por resultados irregulares na operação real do equipamento, atrelados à indícios de desconformidades provenientes da etapa de aquecimento.

De acordo com Blass (1988), Throne (2008) e Almeida (2014), o controle da transferência de calor é de grande relevância para a qualidade de um processo de termoformagem. Idealmente, a temperatura da chapa no momento da conformação deve estar dentro do intervalo de formação característico do material utilizado e, além disso, a diferença de temperatura entre pontos centrais e periféricos da chapa deve ser a menor possível. Em vista disso, a obtenção de dados relacionados à distribuição de calor no filme plástico possibilita a avaliação do sistema de aquecimento.

Uma opção viável, que evita custos elevados na realização de experimentos físicos, é o uso de ferramentas computacionais para a simulação de processos e/ou fenômenos físicos. Neste trabalho, pretende-se utilizar uma ferramenta de simulação numérica de transferência de calor para prever os valores da transferência de calor na superfície do filme plástico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentadas definições, de acordo com referências bibliográficas, dos principais temas relacionados ao conteúdo do estudo.

2.1 Termoformagem

A termoformagem é o nome dado a um grupo de processos que formam produtos a partir da transformação de chapas ou filmes termoplásticos. Para isto, este método baseia-se na utilização de calor com finalidade de amolecer o filme plástico e de forma subsequente conformá-lo por meio da ação de um molde. Ainda, para a boa aquisição dos contornos do molde pelo plástico, vácuo e/ou pressão são aplicados (THRONE, 2008; BELOFSKY, 1995).

2.1.1 Histórico da termoformagem

Apontada como uma das técnicas mais antigas de conformação de itens plásticos, a termoformagem tem as primeiras indicações datadas da pré-história, porém os registros mais específicos de um processo similar aos atuais são dos anos de 1870. Nesta década, John Wesley Hyatt e Charles Burroughs utilizaram folhas de celuloide ou nitrato de celulose aquecidas por vapor sob pressão para amolecer o plástico e conformá-lo em moldes de aço. Os primeiros itens produzidos pelo processo de Hyatt e Burroughs incluíam garrafas pequenas, estojos para espelho e chacoalho de bebê como os da figura 4 (THRONE, 2008).

Figura 4 – Chacoalhos de bebê termofomados



Fonte: Throne, 2008.

A partir do fim do século XIX a termofomagem foi se desenvolvendo de maneira gradativa, com uma grande aceleração causada pela Segunda Guerra Mundial, sobretudo pela evolução das resinas plásticas e pelo aprimoramento dos processos de produção. Já nos anos 1970, a velocidade de fabricação do processo teve grande aumento devido ao desenvolvimento de blisters e embalagens alimentícias, que influenciaram a automatização das máquinas pela alta demanda e consequentemente elevaram a competitividade da termofomagem em relação à outros processos de produção (ALMEIDA, 2014).

O quadro 2 lista os principais avanços da termofomagem desde seu surgimento.

Quadro 2 – Destaques da história da termofomagem

Período	Local	Acontecimento
Pré-história	Egito e Micronésia	Casca de tartaruga é aquecida com óleo e moldada para produzir recipiente de comida
Pré-história	América e Micronésia	Casca de árvore é aquecida em água quente e moldada em tigelas e canoas
Anos 1870	Inglaterra	Parkes realizou experimento com derramamento de nitrocellulose
	EUA	Hyatt desenvolveu processo de moldagem para nitrato de celulose
	EUA	Charles Burroughs desenvolveu máquina hidráulica para cortar chapas finas de celulóide

1910	Inglaterra	Teclas de piano termoformadas sobre núcleos de madeira
Anos 1930	EUA	Garrafas formadas através de duas metades termoformadas (Fernlas Corp.)
	EUA	Mapas de relevo termoformados por US Coast & Geodetic Survey
1933	Europa	PVC rígido termoformado em refrigeradores Phillips
1935	EUA	Bolas de ping pong feitas com chapa dupla de acetato de celulose pela DuPont
1938	EUA	Embalagem Blister de nitrato de celulose
	EUA	Automatização de termoformadoras por Klaus B. Strauch Co.
	EUA	Pontas de cigarro e formas de gelo termoformadas automaticamente
1942	EUA Inglaterra	Acrílico termoformado em fechos de armas e para-brisas
1943	EUA Inglaterra	Janelas de planadores de acetato de celulose termoformado
1948	Inglaterra	Banheiras de acrílico termoformado pela Troman Brothers
1954	EUA	Embalagem Skin apresentada na Hardware Manufacturers Association, Chicago
1970	EUA	ABS termoformado em lataria de carros peça Borg-Warner Inc.
1985	EUA	CPET no uso de reaquecimento de alimentos por Viking Products

Fonte: Adaptado de Throne, 2008.

Dentre os principais destaques no avanço da termoformagem, Throne (2008) lista no quadro 1 o surgimento das embalagens Skin, que ocorreu nos Estados Unidos em 1954.

2.1.2 Aplicações da termoformagem

A vasta utilização da termoformagem na fabricação de embalagens é explicada pelo baixo custo, alta produtividade, versatilidade, proteção ao conteúdo e transparência que permite a visualização do produto. Ademais, esse processo é amplamente utilizado no setor automotivo para a fabricação de laterais de portas, consoles, protetores de caçamba e em outras áreas produzindo copos descartáveis, bandejas, portas de geladeira, cartelas de remédios entre outros. (ALMEIDA, 2014).

As figuras 5 e 6 ilustram exemplos de itens termoformados.

Figura 5 - Peça de caçamba de picape termoformada



Fonte: <https://www.protmolde.com.br/portfolio-item/moldes-para-termoformagem/>

Figura 6 – Cartela de remédio

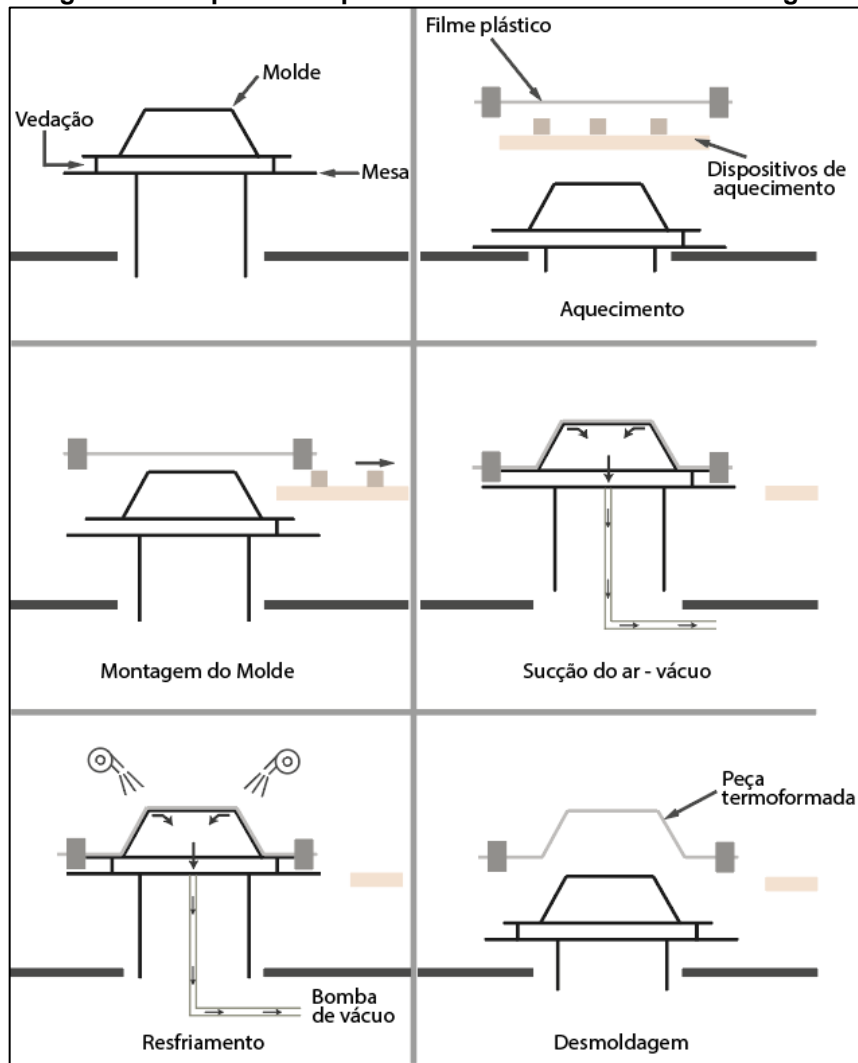


Fonte: <https://setorsaude.com.br/ans-regulamenta-oferta-de-medicacao-domiciliar/>

2.1.3 Etapas do processo

Throne (2008) e Muralisrinivasan (2009) afirmam que, independentemente do tipo de termoformagem, o processo é composto pelas etapas fundamentais e sequenciais de aquecimento, conformação e resfriamento. A figura 7 esquematiza as etapas em um procedimento genérico.

Figura 7 – Esquema simplificado da técnica de termoformagem



Fonte: Adaptado de Almeida, 2014.

2.1.3.1 Aquecimento

Como indicado pelo próprio nome, a termoformagem utiliza calor para promover a conformação das peças. O principal motivo de aquecer o termoplástico no processo é aumentar a capacidade de estiramento da chapa em relação aos processamentos a frio (ALMEIDA, 2014). No esquema da figura 8 é possível visualizar os efeitos desta etapa.

Figura 8 – Antes e depois de aquecimento em termoformagem



Fonte: Autoria própria

As fontes de energia comumente utilizadas para a geração de calor da etapa de aquecimento são gás e energia elétrica. Quando se opta pela utilização de gás o custo do aquecimento é menor, porém o controle da transferência de calor também é menor e a queima do gás gera monóxido de carbono que é altamente asfixiante. Já em relação às máquinas que possuem sistema de aquecimento elétrico, apesar do custo energético ser mais alto, o controle da temperatura e distribuição de calor também é maior, o que justifica a fonte elétrica na grande maioria dos processos de termoformagem, assim como na máquina de estudo deste trabalho.

Apesar da existência de variedades de sistemas de aquecimento e tipos de aquecedores, na termoformagem os três principais tipos de aquecimento são associados aos modos convencionais transferência de calor de condução, convecção e radiação (THRONE, 2008; ALMEIDA, 2014).

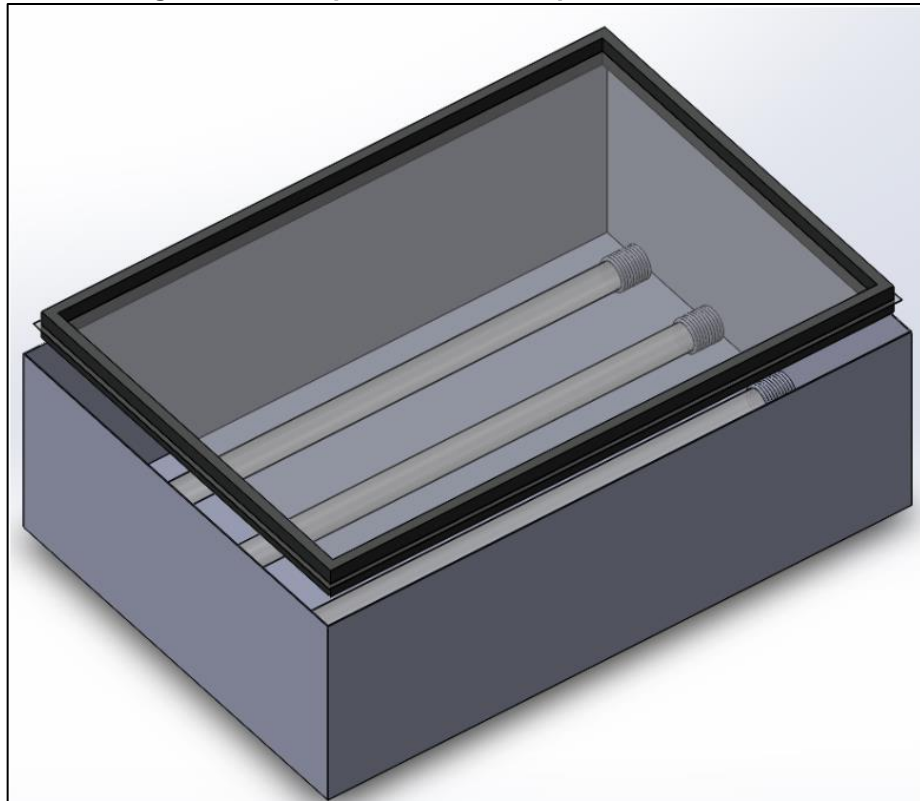
2.1.3.1.1 Aquecimento radiante – predominância de radiação

Este método de aquecimento do filme termoplástico é provocado pela utilização do espectro da região do infravermelho. Isso quer dizer que, sem a necessidade de contato físico entre as partes que trocam calor, o aquecimento ocorre através de ondas geradas que encontram e aquecem a superfície do polímero pelo fenômeno de transferência de calor chamado radiação. Com a superfície tendo a temperatura aumentada, ocorre a troca de calor por condução para o restante do volume do plástico, num fenômeno natural de equalização de temperatura (ALMEIDA, 2014).

Apesar dos processos de termoformagem que utilizam o aquecimento radiante possivelmente alimentarem o calor através de gás, a grande maioria das máquinas dispõe de alimentação por fonte elétrica. A figura 9 exemplifica um sistema

de aquecimento radiante e a figura 10 mostra um sistema similar utilizado na máquina skin estudada neste trabalho.

Figura 9 – Exemplo de forno de aquecimento radiante



Fonte: Autoria própria

Figura 10 - Máquina Skin com aquecimento por resistência elétrica



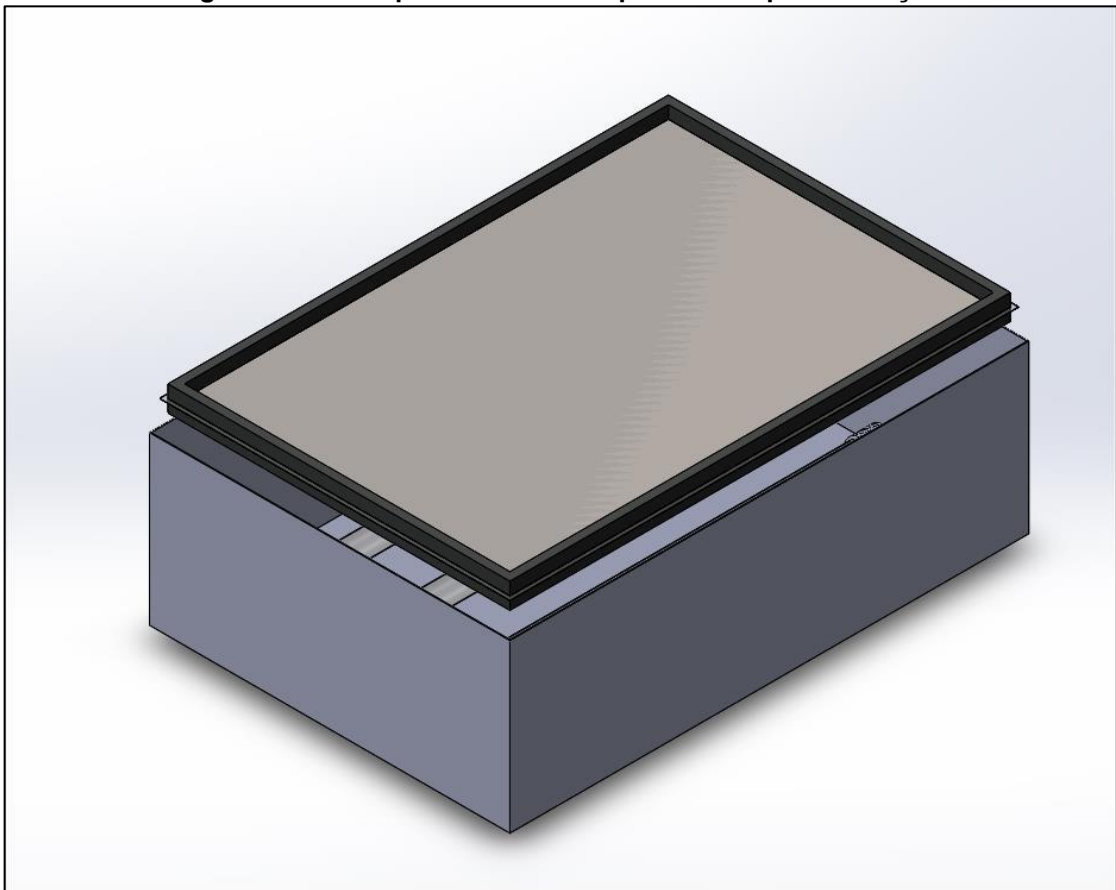
Fonte: Autoria Própria

2.1.3.1.2 Aquecimento por contato – predominância de condução

Este tipo de aquecimento ocorre por meio do contato entre o filme termoplástico e uma superfície aquecida, que geralmente é composta de metal. O aquecimento do metal que transfere calor para o filme plástico pode ser realizado por chama, num mecanismo que utiliza gás como fonte de energia, ou por resistências elétricas embutidas ou posicionadas próximas à chapa metálica. Uma das restrições do aquecimento por contato é que a folha plástica deve ter a espessura fina, de até 30 mm (THRONE, 2008; ALMEIDA, 2014).

A figura 11 ilustra um exemplo de sistema de aquecimento por contato.

Figura 11 – Exemplo de forno de aquecimento por condução



Fonte: Autoria própria

2.1.3.1.3 Aquecimento por gás – predominância de convecção

Alternativa economicamente interessante para o aquecimento de chapas largas e/ou espessas, devido à maior demanda de calor para chegar ao ponto de conformação e menor necessidade de precisão calorífica. Neste tipo de sistema o ar quente proveniente de uma câmara de combustão é soprado até o forno em que a

chapa termoplástica a ser aquecida está localizada. Por convecção, num processo que leva um elevado tempo de aquecimento, o calor é transferido do ar para o polímero (ALMEIDA, 2014).

A convecção é usualmente considerada o modo de transferência de calor de menor intensidade nos processos de termoformagem (THRONE, 2008).

A figura 12 ilustra o interior de um forno alimentado por queimadores infravermelhos à gás.

Figura 12 – Forno alimentado por queimadores infravermelhos à gás



Fonte: Zypishop

2.1.3.2 Conformação

Através da conformação do material de entrada aquecido de acordo com os contornos de um molde, o processo de termoformagem produz as peças. Esta etapa do processo caracteriza o tipo de técnica empregada no processo de termoformação.

Para a escolha da técnica de termoformagem mais adequada a ser utilizada em cada aplicação, deve ser analisada a capacidade da máquina, a geometria da peça e o grau de dificuldade de conformá-la.

2.1.3.2.1 Termoformagem à vácuo

Possivelmente a técnica mais econômica, a termoformagem à vácuo decorre de prender a chapa termoplástica no dispositivo de fixação da máquina para iniciar o

aquecimento até a temperatura desejada. Após isso o polímero aquecido é pressionado contra a superfície do molde com a aplicação de vácuo para potencializar a chegada da chapa nos locais mais fundos da geometria a ser adquirida.

Essa técnica restringe-se à capacidade de fabricar peças simples, por conta do congelamento imediato que ocorre devido ao resfriamento abrupto do plástico em contato com o molde, que faz com que regiões complicadas de serem atingidas como cavidades profundas não sejam perfeitamente conformadas. Além disto, esta técnica resulta em peças com paredes de espessura não uniforme, sendo indicada para aplicações que a variação da espessura não seja crítica ao funcionamento da peça (ALMEIDA, 2014; THRONE, 2008).

A máquina de embalagens Skin deste estudo utiliza esta técnica de Termoformagem à vácuo para produzir as embalagens encarteladas, num processo em que o molde é o próprio conteúdo a ser embalado. Nesta máquina é necessária a utilização de uma cartela furada e com um tipo de cola que é ativada quando entra em contato com o filme plástico aquecido. Desta forma, o vácuo atua passando pelos furos da cartela e a cola é responsável por selar o plástico nos locais da cartela em que o produto não está sobreposto, formando uma embalagem que pode ser considerada à vácuo, selada e sem necessidade de utilização de molde.

2.1.4 Polímeros

Polímeros são materiais sintéticos, naturais, orgânicos ou inorgânicos constituídos de longas cadeias repetitivas de monômeros, os quais são ligados entre si por ligações primárias e estáveis. Devido a essa constituição, formam um material de alto peso molecular (THRONE, 2008; MANRICH, 2005).

Uma das classificações aplicadas aos polímeros, que leva em conta o ponto de vista de características tecnológicas, os divide entre termofixos e termoplásticos. Polímeros que sofrem degradação de sua estrutura química desde o primeiro aquecimento e modelagem, e por conta disto não podem ser remodelados, são termofixos. Já os polímeros que podem ser aquecidos e moldados diversas vezes sem sofrer mudanças significativas em suas propriedades, e por conta disto aplicados aos processos de termoformagem, são os chamados termoplásticos (THRONE, 2008).

Para a escolha do termoplástico mais adequado à cada aplicação de termoformagem, devem ser levadas em conta as características exigidas pelo processo, tais como densidade, alongamento até a ruptura, transparência e

temperaturas de transição. A máquina Skin utiliza o policloreto de vinila (PVC) para a produção de embalagens pelo processo de termoformagem.

2.2 Transferência de calor

De forma simples e generalizada, a transferência de calor pode ser definida como o trânsito de energia térmica devido a um gradiente de temperatura no espaço. Além disto, somente a existência de um gradiente de temperatura entre meios ocasiona inevitavelmente uma transferência de calor.

A maneira mais usual de classificar um tipo de transferência de calor é de acordo com as particularidades dos meios que estão a diferentes temperaturas e do sistema em que ocorre o trânsito de energia térmica. Dentro desta classificação, existem os modos de transferência de calor de condução, convecção e radiação.

2.2.1 Condução

É o modo de transferência de calor que ocorre devido a um gradiente de temperatura em um meio estacionário, sendo este sólido ou fluido. Os processos de condução ocorrem em níveis de atividades atômicas e moleculares, de maneira que a energia é transferida de uma partícula mais energética para uma partícula menos energética devido à interação entre ambas (INCROPERA, 2008).

2.2.2 Convecção

Este modo compreende a transferência de calor entre uma superfície e um fluido em movimento que contata essa superfície. A convecção compreende o movimento global de advecção e o movimento aleatório das moléculas do fluido para a transferência de calor (INCROPERA, 2008).

2.2.3 Radiação

A transferência de calor por radiação ocorre sem a necessidade de um meio material, através do transporte de energia por ondas eletromagnéticas.

2.2.3.1 Corpo negro e corpo cinza

O conceito de corpo negro se baseia na idealização de propriedades de uma superfície, sendo utilizado para a comparação com características radiantes que

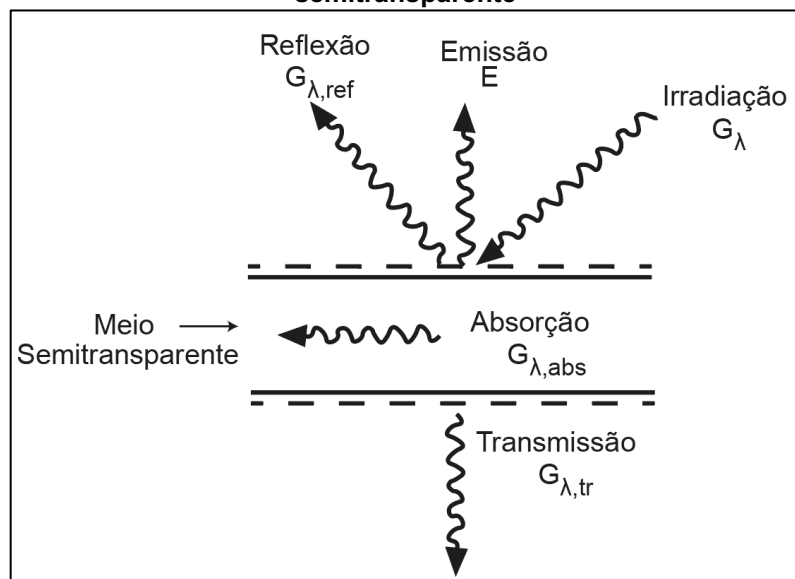
acontecem numa superfície real. O corpo negro é definido como perfeito absorvedor e emissor de radiação, sendo independente do comprimento e da direção de onda.

O corpo cinza é caracterizado por ter a emissividade e a absorptividade independentes do comprimento de onda da radiação incidente. Diferente do corpo negro, o corpo cinza absorve parte da energia incidente e pode refletir outra parcela (INCROPERA, 2008).

2.2.3.2 Emissividade, absorptividade e refletividade

A irradiação incidente em um corpo pode ser refletida, absorvida e transmitida. A figura 13 esquematiza essa distribuição na incidência da radiação, sendo G_λ a radiação térmica incidente e $G_{\lambda,ref}$, $G_{\lambda,abs}$ e $G_{\lambda,tr}$ as parcelas refletidas, absorvidas e transmitidas, respectivamente.

Figura 13 – Processos de absorção, reflexão e transmissão associados a um meio semitransparente

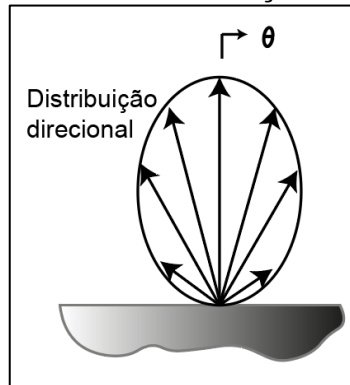


Fonte: Adaptado de INCROPERA (2008)

2.2.3.3 Intensidade de Radiação

A energia radiante que uma superfície emite pode ser propagada em várias direções, como exemplifica o esquema da figura 14. De forma análoga, uma superfície pode ter radiação incidente também proveniente de diversas direções, as quais influenciam diretamente na taxa de transferência de calor (INCROPERA, 2008).

Figura 14 – Distribuição direcional de radiação emitida por uma superfície



Fonte: Adaptado de INCROPERA (2008)

Ainda segundo Incropera (2008), a radiação incidente numa superfície, chamada de irradiação, pode ser oriunda da emissão e da reflexão de outras superfícies.

2.2.3.4 Radiosidade

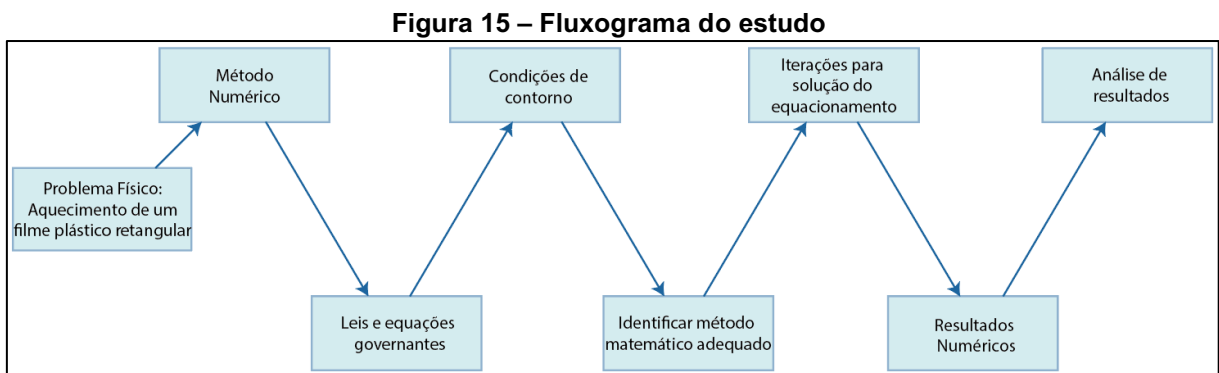
A radiosidade é estabelecida como o fluxo de toda a energia de radiação que deixa uma superfície. Devido à possibilidade de cada superfície da cavidade possuir condição de contorno de fluxo de calor radiante ou de temperatura, deve-se gerar uma equação para cada superfície da cavidade.

O método das radiosidades, aplicado por Rodrigues (2015), Reis (2001) e Hoffmann (2008), pode ser utilizado para solucionar problemas que envolvem cavidades radiantes, como é o caso do sistema de aquecimento em estudo. Este método fundamenta-se no emprego da radiosidade (radiação emitida e refletida) em um balanço de energia nas superfícies da cavidade, de maneira a obter um sistema de equações que possibilitam analisar a transferência de calor que ocorre na cavidade.

3 METODOLOGIA

O estudo de transferência de calor realizado durante este trabalho contempla uma análise de caráter físico que é abordada através de simulações numéricas. A escolha por esta maneira de resolução ocorre pela dificuldade matemática dos sistemas de equações que governam o problema, que se tornam extensos e complexos para desenvolvimento algébrico, dado o tempo para confecção do trabalho.

Para a obtenção de resultados referentes à aplicação de projetos de estudo, uma metodologia de desenvolvimento deve ser adotada. A deste estudo é exibida pelos passos sequenciais da figura 15.

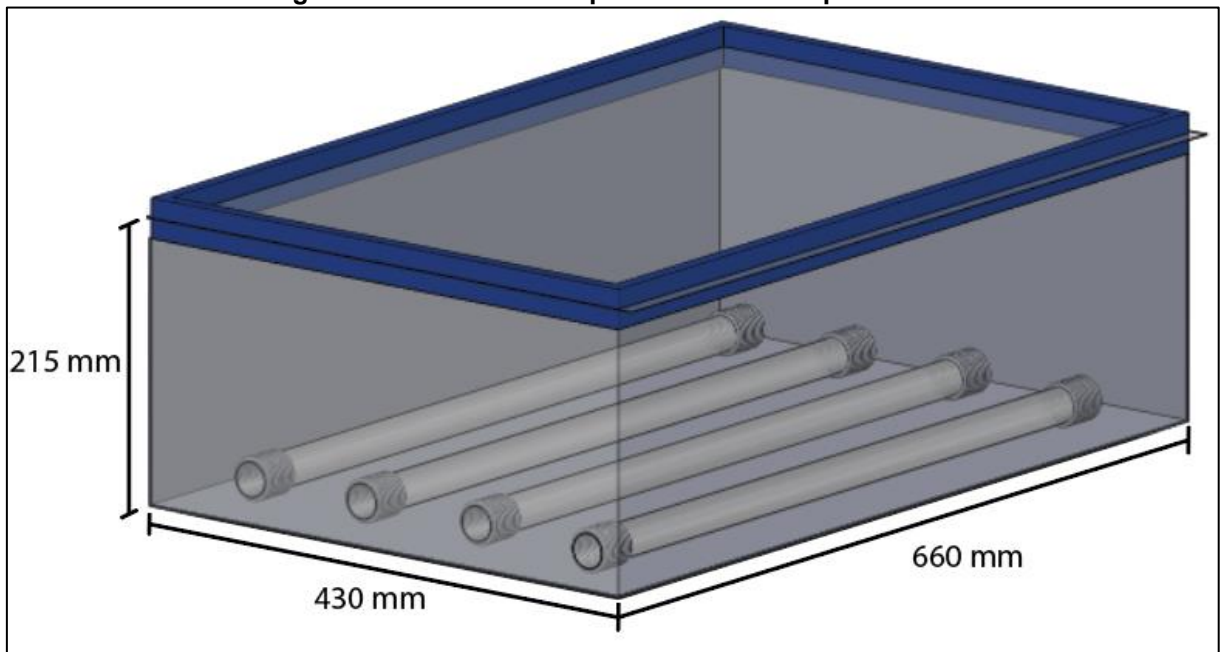


Fonte: Autoria própria

3.1 Modelo

Para a execução de uma simulação numérica é imprescindível o desenvolvimento de um modelo que represente o sistema real. Esse modelo é definido de acordo com o nível de fidelidade requerido para a análise e tem como principal objetivo a determinação do domínio físico, através da delimitação das condições de contorno. Quanto maior o número de simplificações adotadas na construção do modelo, mais simples é o estudo, mas menos fidedigno em relação ao processo real.

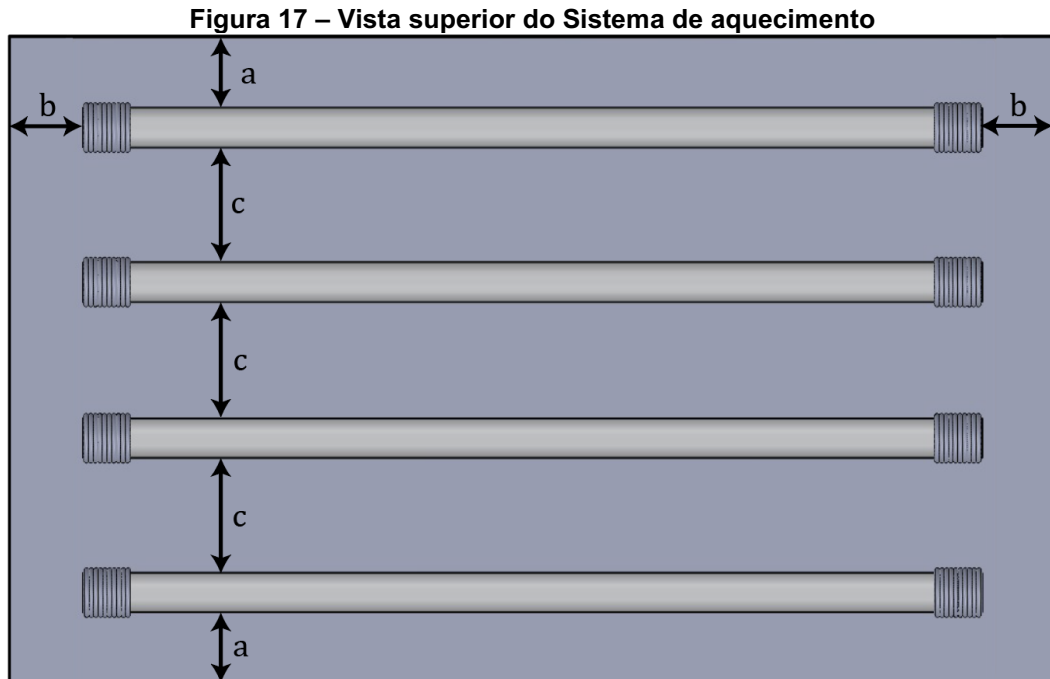
A Figura 16 replica o sistema de aquecimento da máquina. Apenas para efeito de melhor visualização, duas das chapas laterais estão com a aparência translúcida.

Figura 16 – Sistema de aquecimento da máquina Skin

Fonte: Autoria própria

Pela presença de base, paredes e face superior (chapa termoplástica), o sistema de aquecimento em questão será analisado de forma análoga à um forno. Aliado a isto, devido à predominância do modo de transferência de calor por radiação, que segundo Ibrahim e Salleh (2012) chega a mais de 90% do total de calor transferido em um forno, esse sistema de aquecimento será modelado como uma cavidade radiante retangular fechada.

O plano inferior da cavidade é o local das resistências elétricas, o qual tem as dimensões apresentadas na Figura 17. O plano superior é composto pela chapa termoplástica, e por isto, é considerado a superfície de projeto, onde pretende-se determinar a distribuição de temperaturas. As paredes laterais são consideradas superfícies refletivas e isoladas termicamente.



Fonte: Autoria própria

Sendo: $a = 45 \text{ mm}$; $b = 41 \text{ mm}$; $c = 98 \text{ mm}$.

As quatro resistências elétricas possuem a mesma dimensão, com 580 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro.

3.2 Leis e equações governantes

A radiação e a condução são os principais modos de transferência de calor que ocorrem no modelo em questão, governadas pelas leis e equações apresentadas nessa seção.

3.2.1 Distribuição de Planck e Lei de Stefan-Boltzmann

Um corpo negro possui a taxa máxima de emissão determinada pela Lei de Stefan-Boltzmann, expressa pela Eq. (1).

$$E_{cn} = \sigma \cdot T^4 \quad [W/m^2] \quad (1)$$

Sendo T [K] a temperatura do corpo, σ a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) e E_{cn} o poder emissivo de um corpo negro.

Com a simplificação de aquecimento em uma cavidade fechada que não possui trocas de calor por convecção, têm-se as transferências de calor por radiação e por condução no sistema. Dentro do conceito de radiação, a energia transferida entre uma superfície e sua vizinhança é dada pela Eq. (2),

$$Q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A_c (T_s^4 - T_{viz.}^4) \quad [W] \quad (2)$$

Na qual:

Q_{rad} é a taxa de troca de calor por radiação [W];

ε é a emissividade da superfície;

A_c é a área da superfície [m²];

T_s é a temperatura da superfície [K];

$T_{viz.}$ é a temperatura da vizinhança [K].

Já quando a transferência de calor por radiação ocorre entre duas superfícies, i e j , a taxa de transferência de calor por radiação é dada pela Eq. (3).

$$Q_{i,j} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A_i (T_i^4 - T_j^4) \quad [W] \quad (3)$$

Sendo as constantes e variáveis análogas às da Eq. (2), com a mudança apenas dos índices de referência.

No que diz respeito à condução, segundo Incropera (2006), o fluxo de calor pode ser calculado em uma superfície ou em qualquer ponto do meio através da lei de Fourier, descrita na Eq. (4).

$$q_x'' = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad [W/m^2] \quad (4)$$

Sendo:

q_x'' : o fluxo térmico [W/m²];

k : condutividade térmica do material [W/(m.K)];

x : direção da transferência de calor.

Para o cálculo da taxa de transferência de calor por condução que ocorre numa superfície de área A, têm-se a Eq. (5)

$$q_x = q_x'' \cdot A \quad (5)$$

Visando o cálculo da transferência de calor condutiva no sistema, a Lei da Conservação de energia, dada pela Eq. (6), deve ser respeitada.

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = 0 \quad (6)$$

Com \dot{E}_{ent} representando a energia que entra no sistema e \dot{E}_{sai} representando a energia que sai do sistema.

Como trata-se de um domínio tridimensional, as taxas de transferência de calor por condução são determinadas para as três coordenadas cartesianas x,y e z. Com a utilização do método de volumes e considerando-se a condição de conservação de energia, a Lei de Fourier converte-se nas Eqs. (7), (8) e (9) para o cálculo das taxas de transferência de calor nas três coordenadas.

$$q_x = -k \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (7)$$

$$q_y = -k \cdot dx \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \quad (8)$$

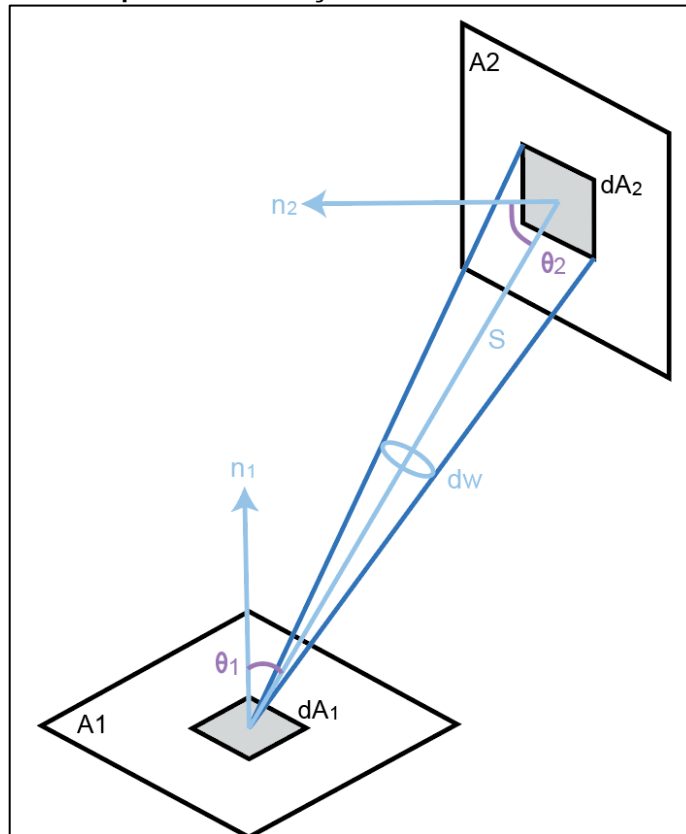
$$q_z = -k \cdot dx \cdot dy \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (9)$$

Nos quais dx , dy e dz são as arestas do volume de controle na direção de cada subscrito correspondente.

3.2.2 Fator de forma

Segundo Incropera (2006), a fração da radiação que deixa uma superfície i e é interceptada por uma superfície j é chamada de fator de forma. Para o desdobramento da equação que determina o fator de forma associado a duas superfícies que emitem e refletem de forma difusa, além de possuírem radiosidade uniforme, utiliza-se a representação da figura 18, com superfícies arbitrariamente orientadas.

Figura 18 – Geometria para determinação do fator de forma entre duas superfícies



Fonte: Adaptado de Valério e Bastos (2016)

Na Figura (17), nota-se que S é a distância entre dA_1 e dA_2 , n_1 e n_2 são os vetores normais às superfícies dA_1 e dA_2 , respectivamente, θ_1 e θ_2 são os ângulos entre n_1 e n_2 e a linha de radiação e dw representa o ângulo sólido.

A fração de radiação, função da geometria das superfícies, pode então ser determinada pela Eq. (10),

$$F_{ij} = F_{A_i \rightarrow A_j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi S^2} dA_i dA_j \quad (10)$$

No qual F_{ij} é o fator de forma entre as superfícies i e j ;

3.2.3 Troca de radiação entre superfícies: Solução em termos da radiosidade J

Esta abordagem, similarmente apresentada por Throne (2008) como Troca de radiação entre superfícies e por Siegel e Howell (2010) como Método de radiação líquida, leva em consideração o efeito líquido das interações radiantes que ocorrem

numa superfície, representada pela taxa líquida de radiação que deixa a superfície (q_i), expressa pela Eq (11).

$$q_i = A_i(J_i - G_i) \quad (11)$$

Com J_i representando a radiosidade e G_i a irradiação da superfície i .

Aplicando-se a definição de radiosidade e a consideração de opacidade da superfície, a Eq. (5) pode ser reescrita na forma da Eq. (12).

$$q_i = \frac{E_{cni} - J_i}{(1 - \varepsilon_i)/\varepsilon_i A_i} \quad (12)$$

Já em relação a uma superfície presente numa cavidade, como a superfície de projeto atual, a irradiação pode ser definida a partir das radiosidades de todas as outras superfícies da cavidade. Com a aplicação dos conceitos de fator de forma e a utilização de algumas operações matemáticas, têm-se a Eq. (13).

$$q_i = \sum_{j=1}^N q_{ij} = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} (J_i - J_j) \quad (13)$$

Igualando-se as Eqs. (12) e (13), obtém-se a Eq. (14), que representa o balanço de radiação associado à superfície i .

$$\frac{E_{cni} - J_i}{(1 - \varepsilon_i)/\varepsilon_i A_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{(A_i F_{ij})^{-1}} \quad (14)$$

Aplicando-se a Eq. (14) para cada uma das superfícies da cavidade, forma-se um sistema possível de N equações para N incógnitas de radiosidade. Através da solução deste sistema, o valor de cada radiosidade encontrado pode ser substituído na Eq. (12) para determinar o fluxo de radiação na superfície correspondente.

Como esta análise de troca de radiação entre superfícies requer que cada área superficial esteja em uma temperatura constante, para determinar uma variação de temperatura ao longo de uma área, esta deve ser subdividida em

elementos menores que não tenham área suficiente para variação acentuada de temperatura (SIEGEL e HOWELL, 2010).

3.3 Método numérico

Visando-se a obtenção dos resultados pertinentes ao estudo, será utilizado o *software ANSYS/Fluent* em versão estudantil para a execução de simulações.

3.3.1 Modelo de radiação *Surface-to-Surface* (S2S)

Para simular a troca de energia radiante no sistema de aquecimento modelado, será utilizado o modelo *Surface-to-Surface*. Esse método de solução numérica utiliza a resolução em termos da radiosidade, sendo apropriado para a aplicação em cavidades com superfícies cinzas e difusas (ANSYS, 2009; VAN ECK et. al, 2016).

O emprego do modelo de radiação S2S subdivide o sistema como um todo, mas principalmente a superfície de projeto, em pequenos elementos por meio da malha. Isto permite que, com a tolerância imposta pelo custo computacional desejado, em cada elemento a variação de temperatura seja mínima ou até nula. Somado a isso, o fator de forma pode ser calculado para cada elemento e os dados de transferência de calor também.

Uma sequência de etapas é necessária para a implementação do estudo numérico:

- Retirada de dados do sistema de aquecimento real;
- Modelagem, compatível com o *software*, da geometria do problema;
- Aplicação das propriedades dos materiais das superfícies;
- Criação da malha;
- Aplicação das condições de contorno e dos modelos;
- Realização das simulações numéricas;
- Pós-processamento/ retirada de resultados.

3.4 Hipóteses e condições de contorno

Seguindo as considerações de Siegel e Howell (2010) e de Incropera (2008) para a metodologia apresentada, as hipóteses e condições de contorno do sistema são:

- ✓ Sistema analisado em regime transiente;
- ✓ O filme termoplástico é fino o suficiente para que a condução na direção da espessura seja desprezada;
- ✓ Propriedades de uma mesma superfície são uniformes
- ✓ As superfícies que trocam calor por radiação são consideradas cinzas, difusas e opacas;
- ✓ Meio no interior da cavidade é participante;
- ✓ Superfícies externas do forno adiabáticas;
- ✓ Temperatura uniforme nas resistências;
- ✓ Fluxo de energia uniforme em cada área individual.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados nesse capítulo foram obtidos com a aplicação da metodologia de resolução numérica apresentada no capítulo 3. Para a realização da simulação numérica da transferência de calor do sistema, foi utilizada a versão estudantil do *software* Ansys/Fluent em um computador de uso pessoal.

4.1 Dados do sistema real

Inicialmente, foi necessário realizar a retirada de dados geométricos e de funcionamento da máquina que o sistema faz parte. Um paquímetro e uma trena foram utilizados para a medição das dimensões, que posteriormente foram empregadas na modelagem da geometria em *software* CAD.

Quanto aos dados de funcionamento da máquina que foram utilizados como entradas na simulação, devido à limitação no acesso à máquina e à necessidade de não atrapalhar o processo, foram medidas apenas as temperaturas em alguns pontos do sistema. Para isso, utilizando-se um termômetro infravermelho similar ao da Figura 19, foram gravados vídeos que registraram os valores de temperatura ao longo do tempo no processo de aquecimento.

Figura 19 – Termômetro infravermelho



Fonte: Autoria própria (2022)

A retirada das temperaturas nas paredes laterais externas do sistema mostrou que a variação de temperatura nesses locais não é significativa e, portanto, confere-se consistência para a hipótese de superfícies externas adiabáticas.

As resistências foram o outro alvo do registro de temperaturas durante o aquecimento. Para isso, múltiplos vídeos foram registrados apontando-se o termômetro em diferentes locais das resistências, afim de gerar arquivos que posteriormente foram utilizados para o cálculo da média da temperaturas nas resistências. Esse procedimento foi empregado com o intuito de diminuir o erro nas medições, já que devido às altas temperaturas, à limitação do instrumento e a dificuldade de acesso ao local, uma única retirada de temperaturas provavelmente resultaria em valores com maior desvio em relação à realidade.

Com a consideração de temperatura uniforme ao longo das resistências para um mesmo período de tempo, após o cálculo das médias de temperaturas registradas, chegou-se à distribuição de temperaturas em regime transiente listada na tabela 1.

Tabela 1 – Temperatura x Tempo nas resistências

Tempo de aquecimento [s]	Temperatura das resistências [K]
0	318.15
1	356.45
5	389.05
9	406.22
13	427.54
17	442.34
22	451.53
27	465.13
32	473.55
34	478.77

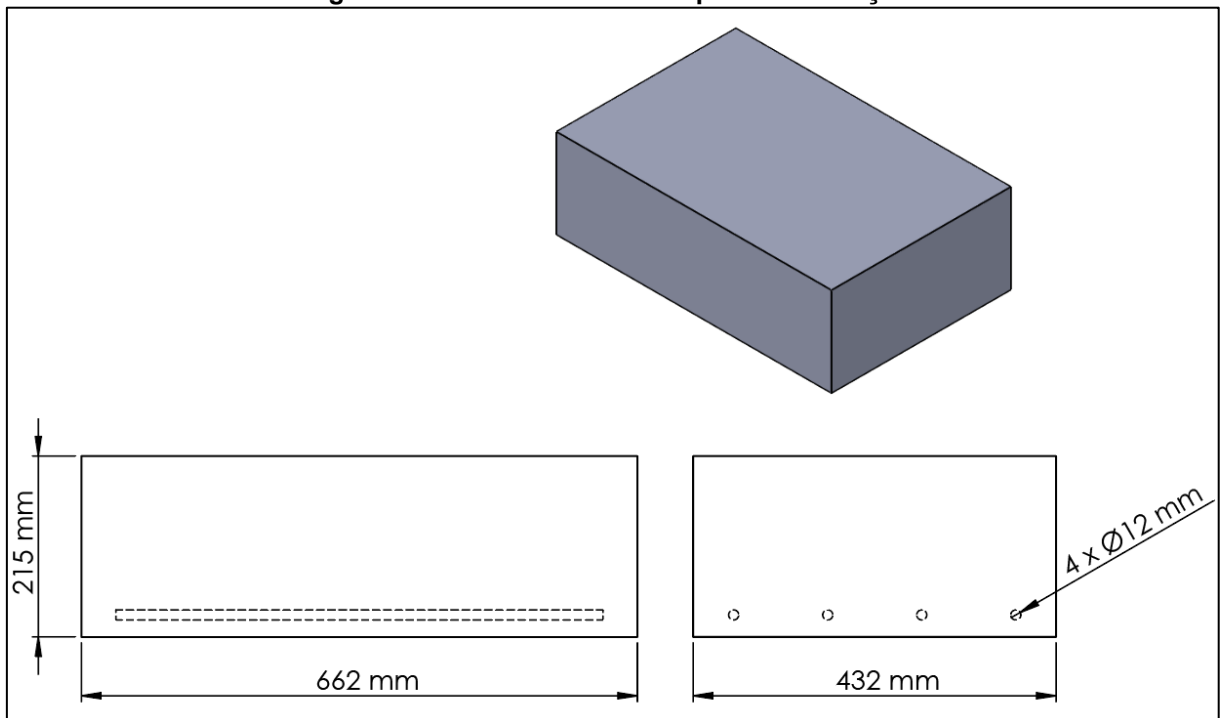
Fonte: Autoria própria (2022)

A temperatura inicial de 318.15 K, mais alta do que a habitual temperatura ambiente, ocorre devido às resistências não resfriarem totalmente entre ciclos de operação da máquina.

4.2 Modelagem

O sistema de aquecimento do presente estudo foi modelado considerando-se, de maneira precedente, algumas etapas posteriores da simulação de transferência de calor. Nesse contexto, o modelo foi desenhado sendo uma única peça, que representa a geometria do ar no interior da cavidade e descreve o domínio de estudo do trabalho. A Figura 20 ilustra o sistema modelado.

Figura 20 – Sistema modelado para a simulação

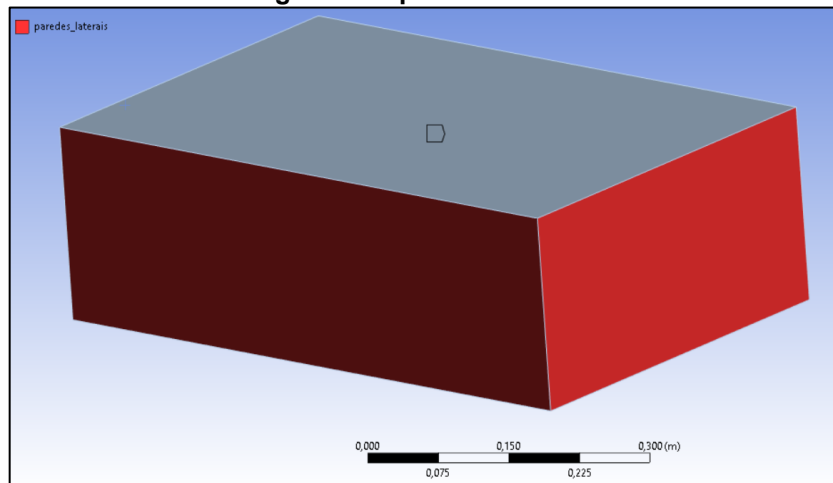


Fonte: Autoria própria (2022)

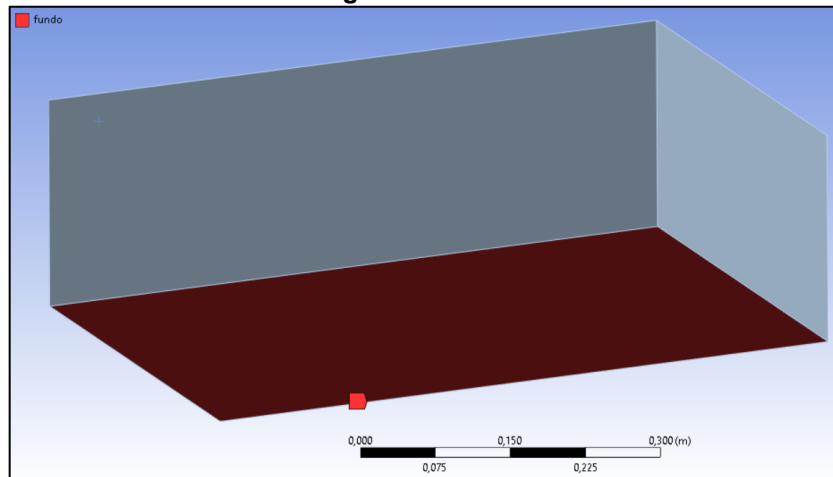
4.3 Configurações da simulação

Inicialmente no *software* de simulação, o domínio foi dividido em elementos, afim de gerar a malha necessária para a simulação da transferência de calor pelo método de elementos finitos.

Após a geração da malha, as principais regiões do domínio são definidas e denominadas através de *named selections*. Essa denominação é utilizada principalmente para distinguir os locais que abrangem diferentes condições de contorno. A nomenclatura foi designada conforme legenda das Figuras 21 a 25.

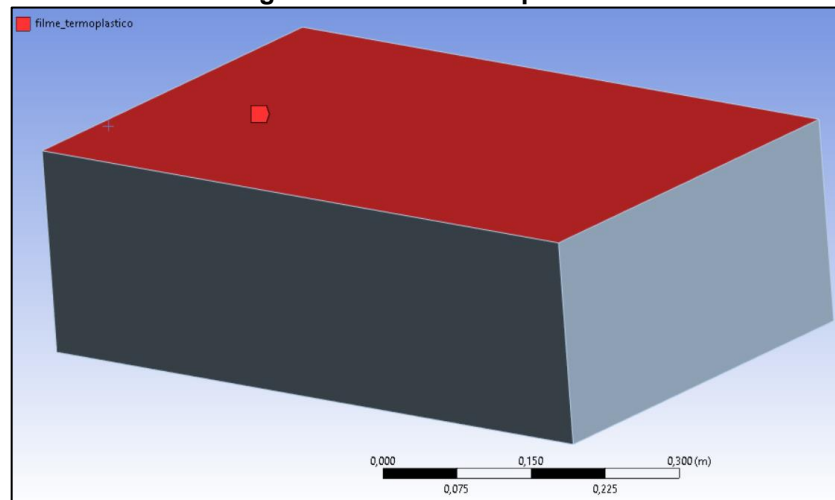
Figura 21 – paredes laterais

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 22 - fundo

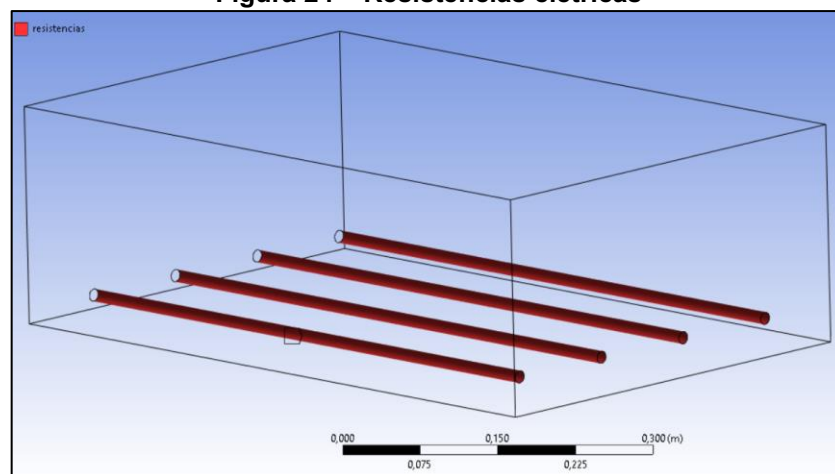
Fonte: Autoria própria (2022)

As paredes laterais e o fundo, apesar de terem sido caracterizadas em duas regiões diferentes, compreendem as mesmas condições de contorno para o estudo. Em ambas foram aplicadas as condições de parede de 1 mm de alumínio, de emissividade de 0,45 e de temperatura de vizinhança equivalente à temperatura das resistências para o cálculo da troca de calor por radiação.

Figura 23 - filme termoplástico

Fonte: Autoria própria (2022)

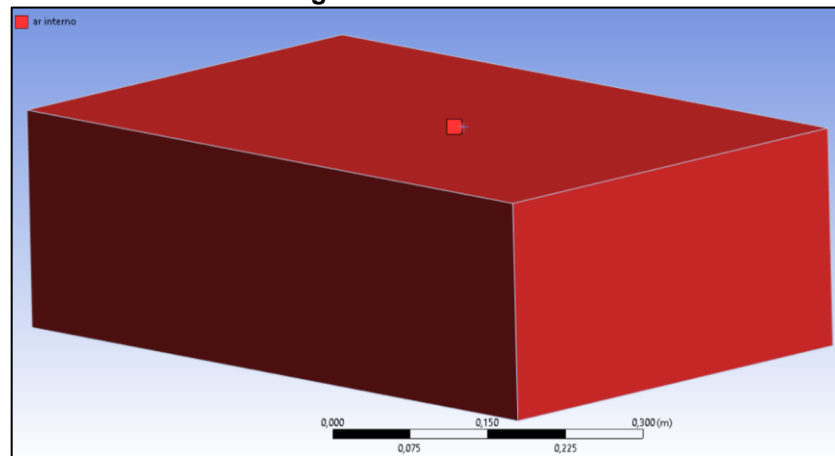
Para o filme termoplástico adotou-se a espessura de 0,3 mm com o material sendo PVC, a emissividade de 0,15 e a temperatura de vizinhança para o cálculo da radiação também correspondente à temperatura das resistências.

Figura 24 – Resistências elétricas

Fonte: Autoria própria (2022)

Nas resistências foi empregada a espessura de 0,4 mm e cobre como material. Além disso, através de uma *User Defined Function* (UDF), nessa zona foram aplicadas as temperaturas transientes descritas na Tabela 1.

Figura 25 – Ar interno



Fonte: Autoria própria (2022)

O ar interno, por ser um fluido, recebe apenas as propriedades do próprio material como entradas para a simulação.

Por último quanto às condições de contorno, as paredes laterais, o fundo, o filme termoplástico e as resistências foram impostos como paredes estáticas, com condições de não deslizamento e participantes do cálculo dos fatores de forma e da radiação na cavidade.

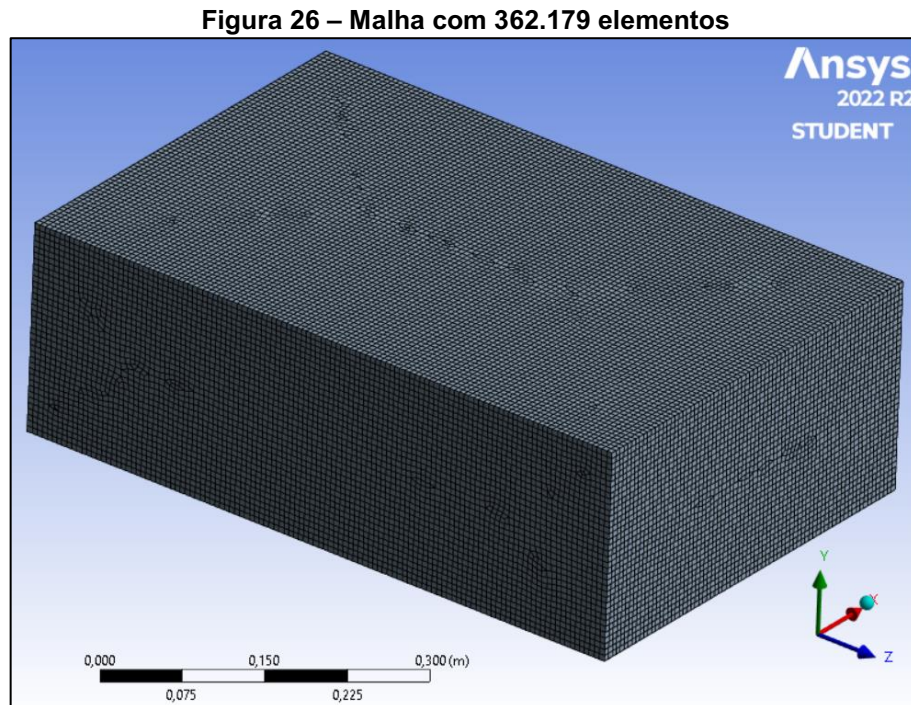
Após a caracterização de malha e a definição das condições de contorno pertinentes, os fatores de forma foram calculados com a utilização de *clusters*, que são zonas que aglomeram elementos das superfícies participantes da radiação com o intuito de reduzir o custo computacional. Nessa simplificação foi condicionado que cada superfície recebedora de condições de contorno e participante no cálculo dos fatores de forma seria dividida em 20 *clusters*.

Utilizando-se o modelo de radiação *Surface to Surface* em conjunto com as equações de conservação de energia, foi simulada a transferência de calor que ocorre no domínio configurado. A retirada dos resultados foi realizada por intermédio do *software* CFD-Post.

4.4 Estudo da independência de malha

Os primeiros resultados a serem analisados foram originados com o intuito de validar a malha numérica do estudo. Para tal, foram computadas simulações do sistema com duas malhas de refinamento diferentes.

A primeira simulação ocorreu com o domínio dividido em 362.179 elementos, gerando a malha mostrada na Figura 26.

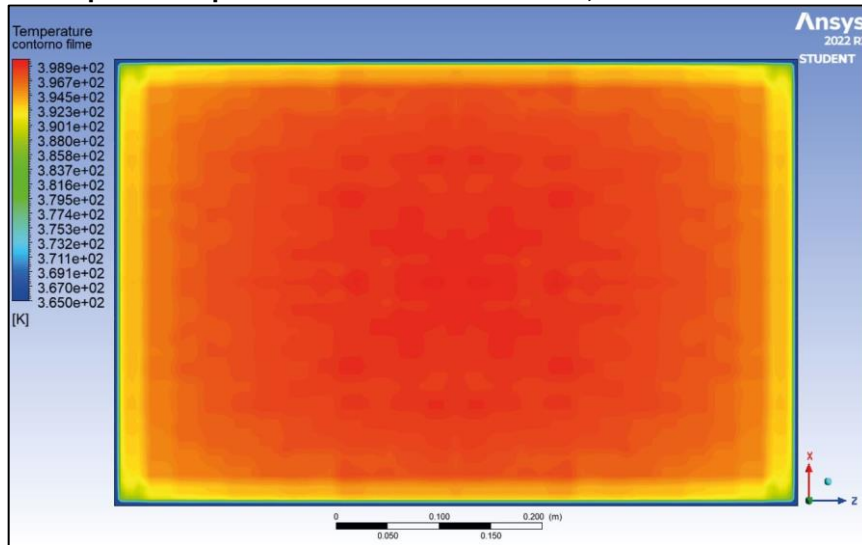


Fonte: Autoria própria (2022)

Dado que o domínio tem um volume total de $61.296.000 \text{ mm}^3$, a média de volume dos elementos dessa malha é de 169 mm^3 . Além disso, por se tratar de uma malha com predominância de elementos hexagonais, as arestas dos elementos possuem em média 5,53 mm.

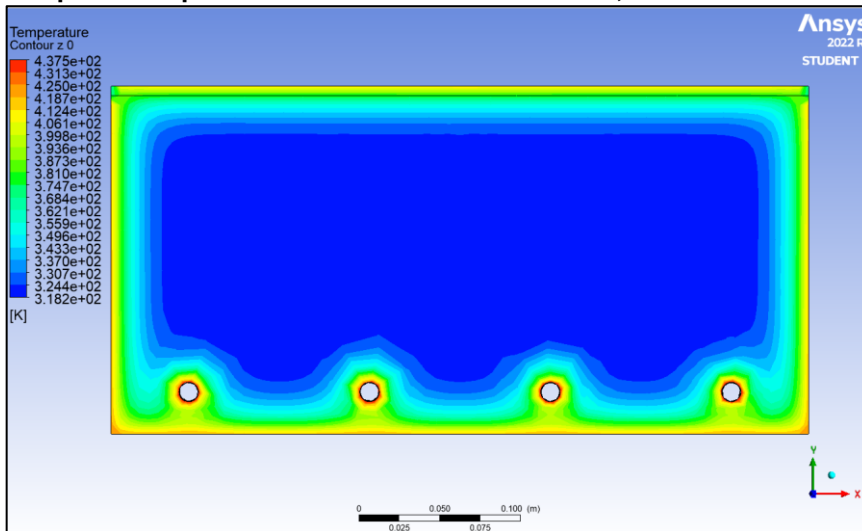
Resultados da simulação de transferência de calor com essa malha são mostrados nas Figuras 27 e 28. A primeira é respectiva ao mapa de temperaturas no filme termoplástico e a segunda é do ar interno numa vista ortogonal ao eixo z, ambas após 20 segundos do início do aquecimento.

Figura 27 – Mapa de temperaturas no filme em $t = 20$ s, malha com 362.179 elementos



Fonte: Autoria própria (2022)

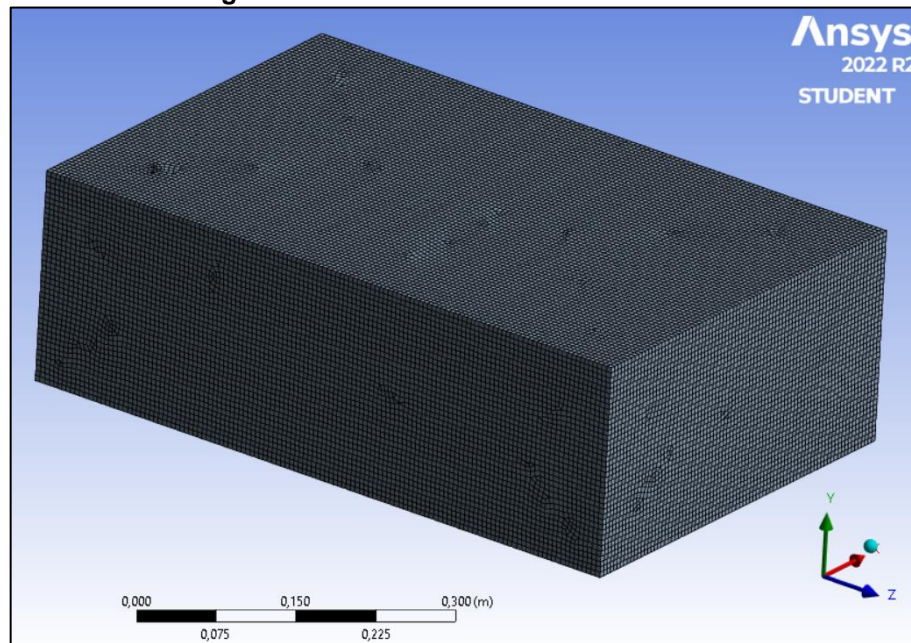
Figura 28 – Mapa de temperaturas do ar interno em $t = 20$ s, malha com 362.179 elementos



Fonte: Autoria própria (2022)

A segunda malha gerada no domínio, mostrada na Figura 29, é mais refinada que a primeira. Composta por 470.274 elementos predominantemente hexagonais, que possuem em média 150 mm^3 e arestas de 5,25 mm.

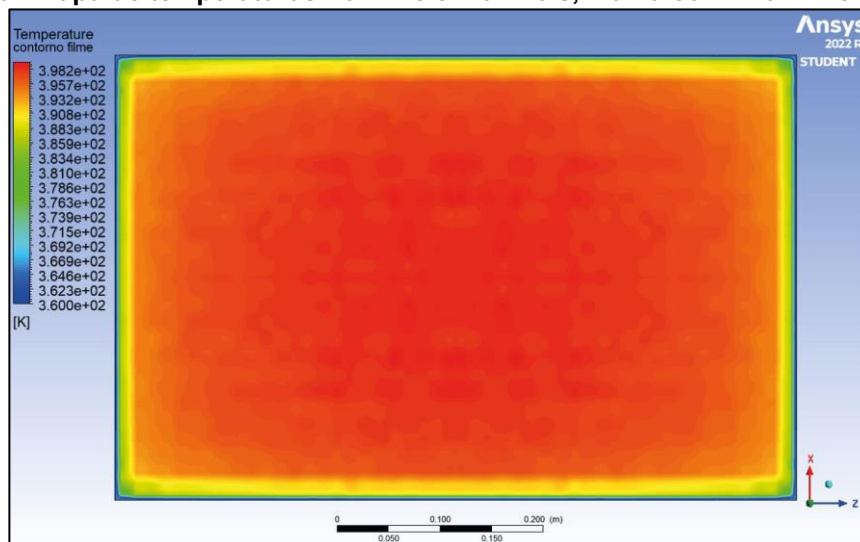
Figura 29 – Malha com 470.274 elementos



Fonte: Autoria própria (2022)

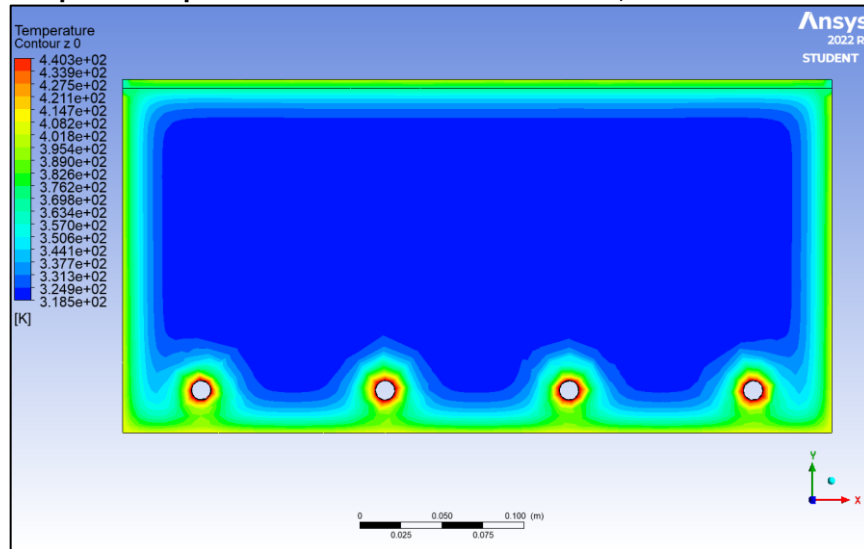
As Figuras 30 e 31 ilustram os mesmos contornos de temperatura das Figuras 27 e 28, porém aplicando-se a simulação com a malha mais refinada.

Figura 30 - Mapa de temperaturas no filme em $t = 20$ s, malha com 470.274 elementos



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 31 – Mapa de temperaturas no ar interno em $t = 20$ s, malha com 470.274 elementos

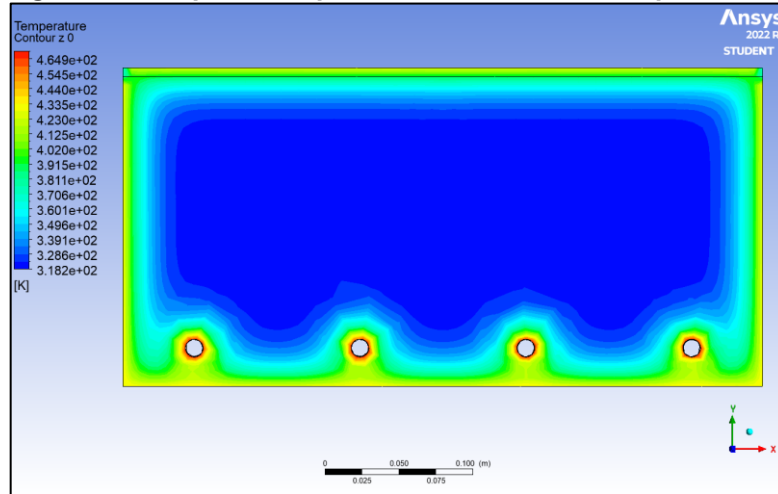


Fonte: Aatoria própria (2022)

Comparando-se os resultados obtidos para as duas diferentes malhas, nota-se que o perfil de temperaturas é similar tanto nos contornos do filme termoplástico quanto do ar interno. Além disso, analisando os mapas resultantes da simulação das duas malhas para o instante de 20 segundos, observa-se que a maior diferença de temperaturas é de apenas 2,8 K, que ocorre entre os valores máximos das figuras 28 e 31. Portanto, visando servir-se de simulações com custo computacional consideravelmente inferior, a primeira malha de 362.179 elementos pode ser considerada validada para o estudo.

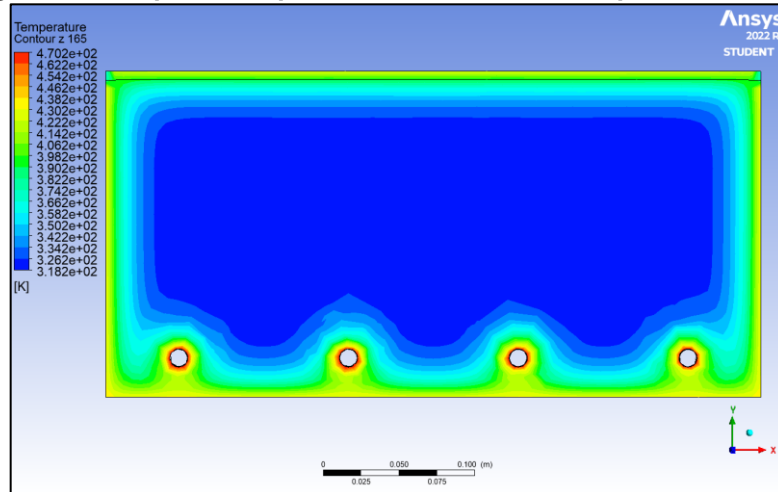
Tendo a malha validada, foram retirados os resultados das Figuras 32, 33 e 34, que esquematizam o mapa de temperaturas do ar interno em três diferentes planos no eixo z, ao final do intervalo de aquecimento.

Figura 32 – Mapa de temperaturas do ar interno no plano $z = 0$



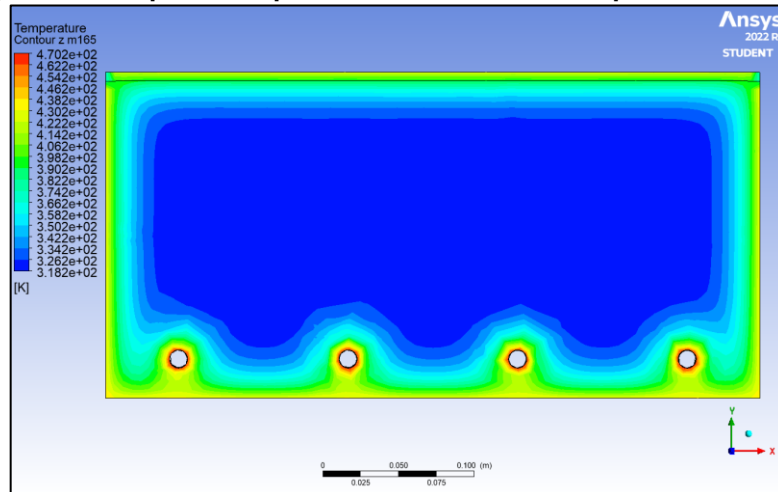
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 33 – Mapa de temperaturas do ar interno no plano $z = 165\text{mm}$



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 34 – Mapa de temperaturas do ar interno no plano $z = -165\text{mm}$

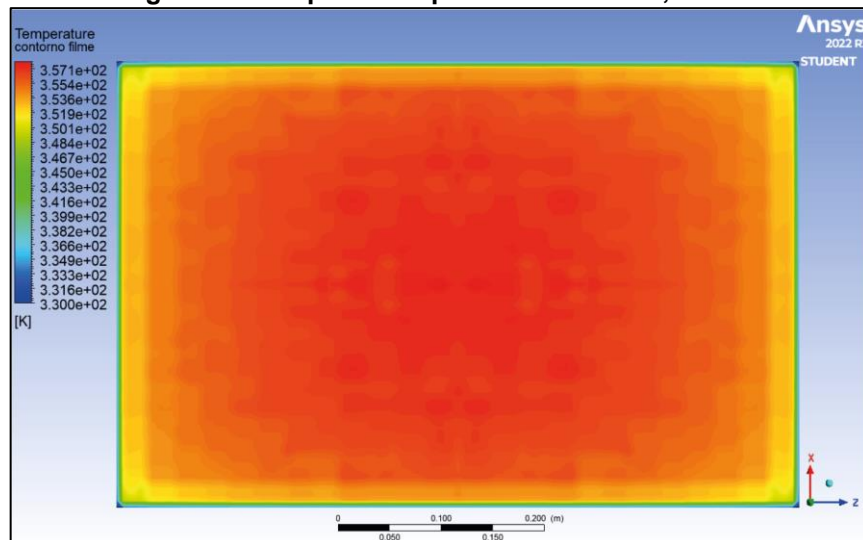


Fonte: Autoria própria (2022)

Das três figuras anteriores pode ser notado que os mapas de temperatura do ar em planos xy não são influenciados de maneira significativa pela variação da posição ao longo do eixo z, desde que dentro dos limites do ar na cavidade. Além disso, observa-se temperaturas mais altas próximas às paredes e temperaturas semelhantes aos valores iniciais no centro da cavidade, o que evidencia a predominância da radiação no aquecimento em relação à condução.

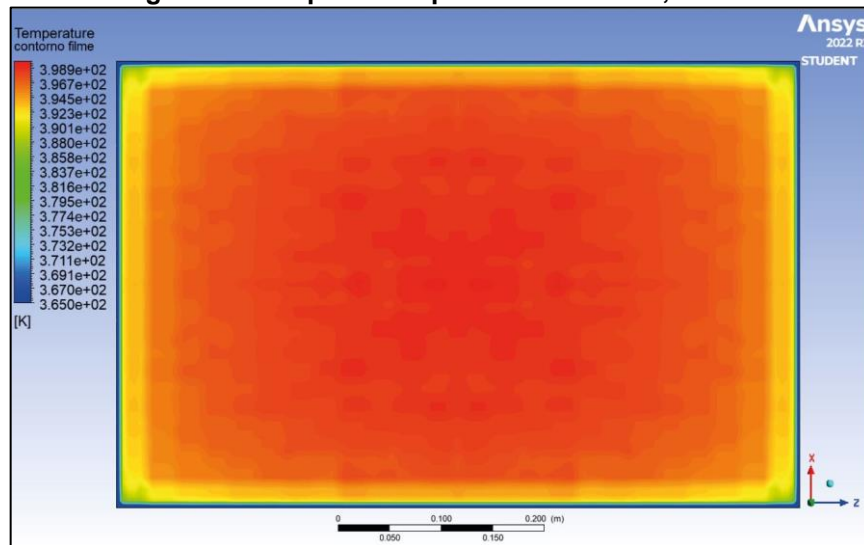
Quanto à transferência de calor que ocorre no filme termoplástico, os resultados da simulação revelam que a temperatura não é homogênea ao longo dessa superfície durante o aquecimento. As Figuras 35, 36 e 37 ilustram mapas de temperaturas nesse local após 10, 20 e 30 segundos do início do aquecimento, respectivamente.

Figura 35 – Mapa de temperaturas no filme, t = 10s



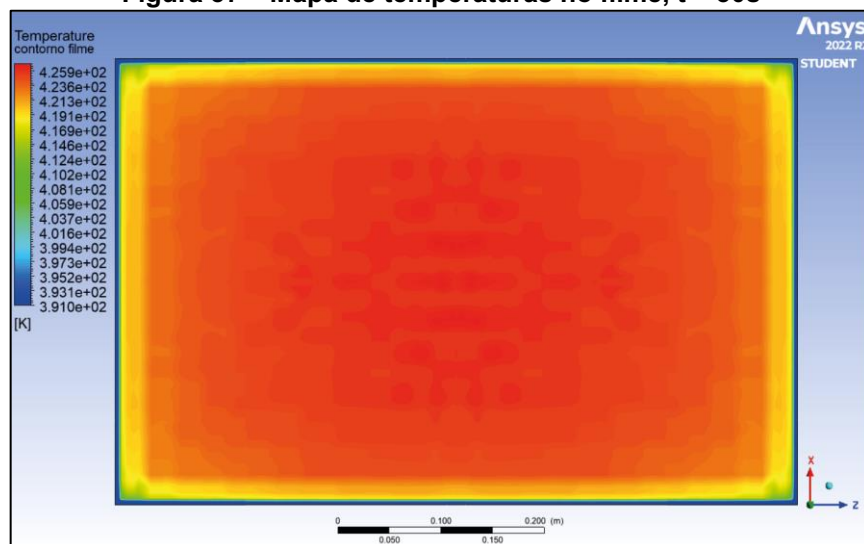
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 36 – Mapa de temperaturas no filme, $t = 20s$



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 37 – Mapa de temperaturas no filme, $t = 30s$

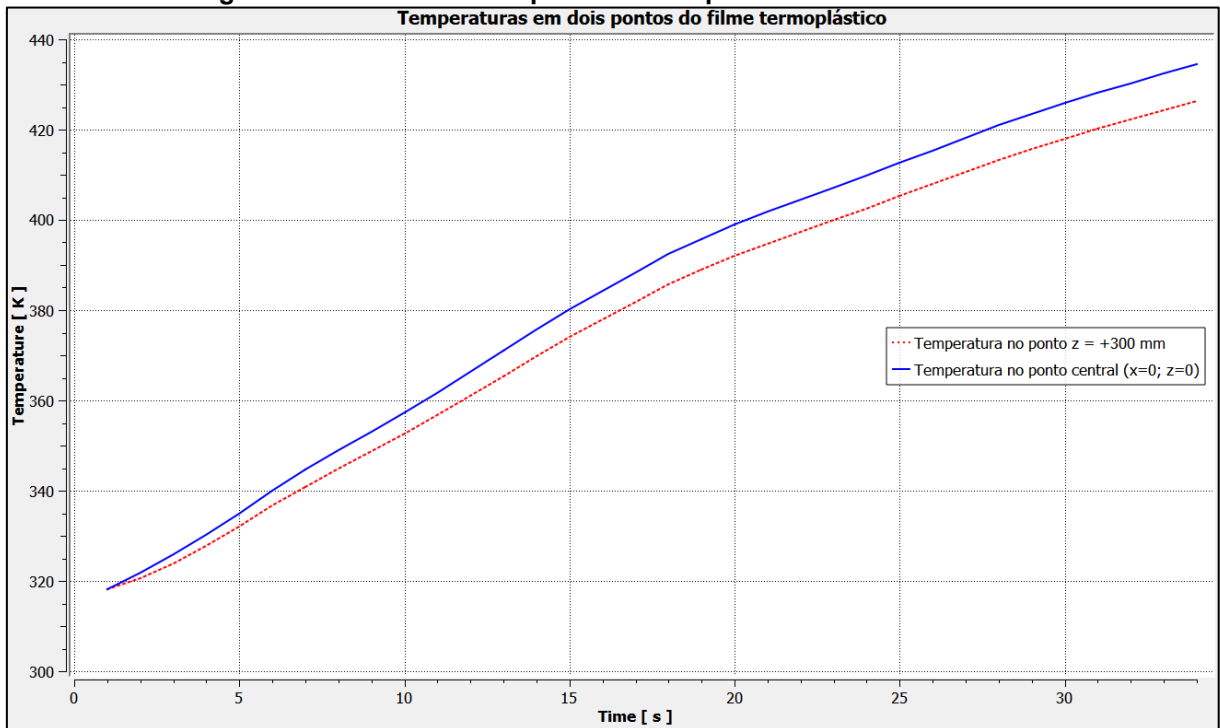


Fonte: Autoria própria (2022)

Observando-se os mapas da distribuição de temperaturas no filme termoplástico, pode ser afirmado que as regiões centrais da superfície possuem temperaturas mais altas se comparadas às regiões periféricas.

Reforçando o apontamento anterior, a figura 38 ilustra as curvas de temperatura em dois pontos distintos da superfície de projeto, sendo uma referente ao ponto central da área e a segunda em um ponto afastado 300 mm do centro na direção z.

Figura 38 – Gráfico de temperaturas em pontos distintos do filme

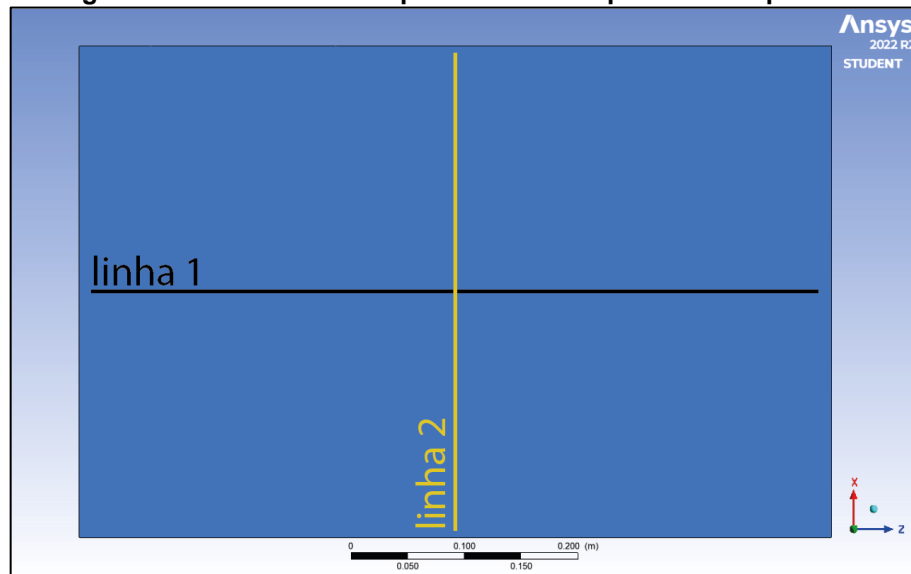


Fonte: Autoria própria (2022)

Comparando-se as duas curvas do gráfico nota-se que a temperatura no ponto central é superior à temperatura do ponto periférico em todo o intervalo de aquecimento do sistema. Com 20 segundos de aquecimento, por exemplo, a temperatura no ponto central do filme é de aproximadamente 400 K, enquanto no ponto periférico a temperatura é de aproximadamente 390 K.

Outra análise gráfica que pode ser realizada é acerca dos perfis de temperatura em linhas que percorrem o comprimento e a largura do filme termoplástico, equivalente às mostradas na Figura 39.

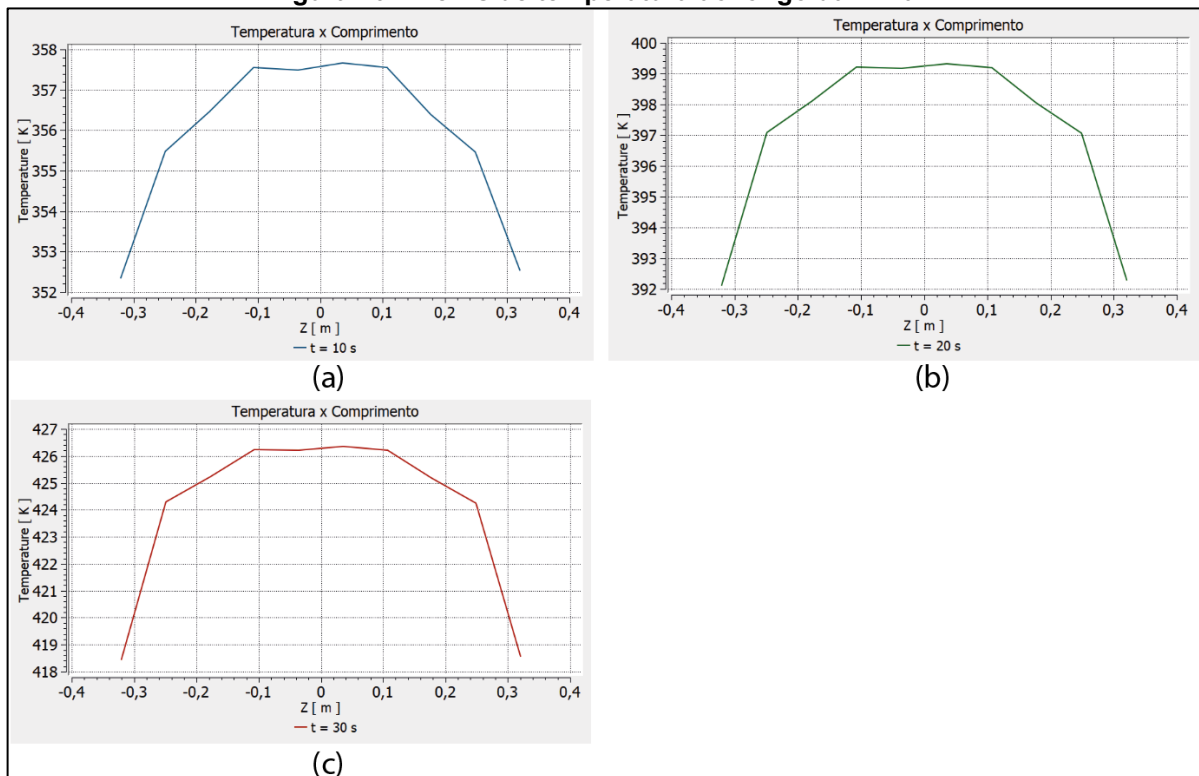
Figura 39 – Linhas criadas para retirada de perfil de temperatura



Fonte: Autoria própria (2022)

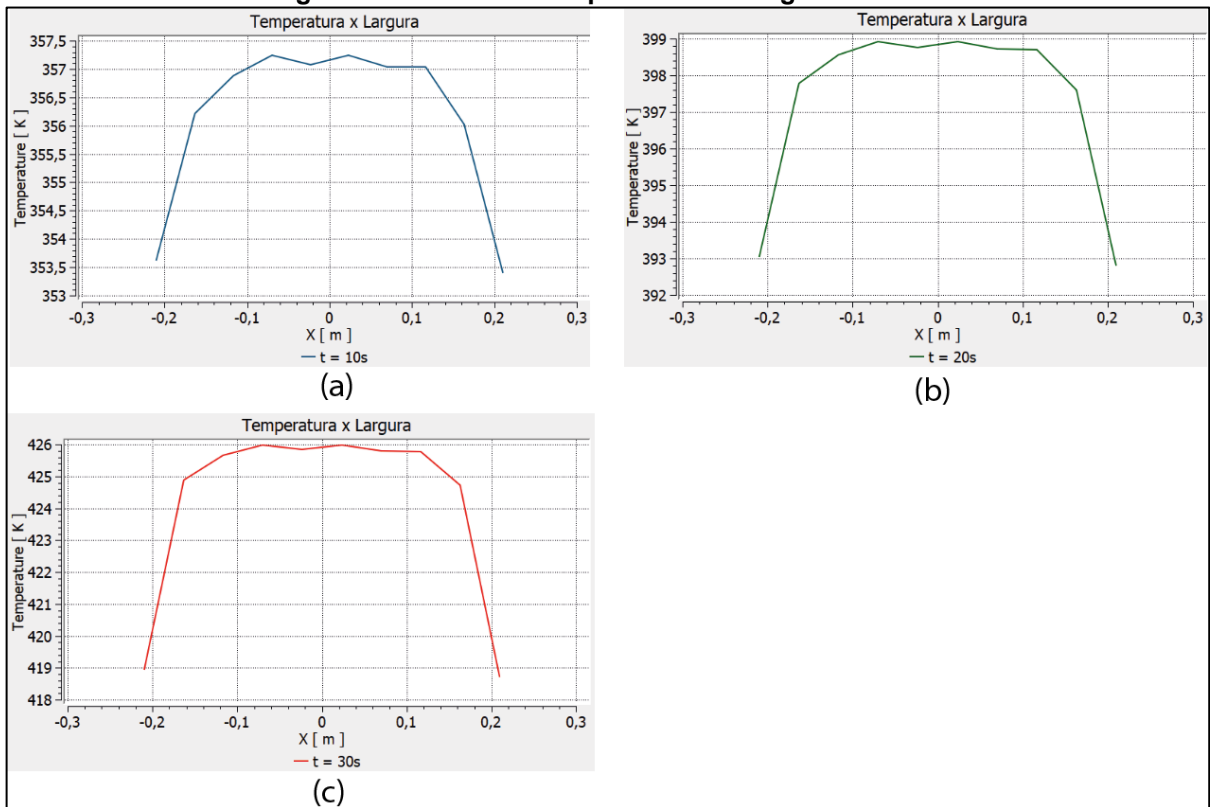
Dado que o eixo das coordenadas xz está localizado exatamente no centro da área do filme, as Figuras 40 e 41 ilustram os perfis de temperatura ao longo das linhas 1 e 2 da Figura 39. Além disso, cada figura contém gráficos (a), (b) e (c), referentes aos dados após 10, 20 e 30 segundos do início do aquecimento, respectivamente.

Figura 40 – Perfis de temperatura ao longo da linha 1



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 41 – Perfis de temperatura ao longo da linha 2



Fonte: Autoria própria

Os gráficos das figuras 40 e 41 reforçam as evidências de temperaturas mais altas na região central do filme termoplástico. Além disso é possível observar que o perfil das temperaturas no filme mantém um padrão ao longo do tempo, alterando-se a intensidade no decorrer do aquecimento.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho de conclusão de curso abordou um estudo de transferência de calor em uma cavidade radiante aquecida por resistências elétricas. Essa cavidade, que representou o domínio de estudo, corresponde ao sistema de aquecimento de uma máquina embaladora do tipo Skin, que utiliza o processo de termoformagem para a produzir embalagens.

Através da modelagem tridimensional e em escala real, foi realizada a simulação de transferência de calor que ocorre no sistema em regime transiente. Apesar das restrições quanto ao acesso e à retirada de informações do funcionamento real da máquina, os resultados obtidos indicam concordância com a hipótese, retirada da literatura, de predominância de radiação numa cavidade fechada com aquecedores. Além disso, as temperaturas atingidas pela superfície de projeto na simulação apresentaram-se razoáveis em comparação à temperaturas medidas com um termômetro infravermelho no processo real.

Dado o principal objetivo do trabalho de investigar a distribuição do calor no filme termoplástico, representado pela superfície superior da cavidade, os resultados obtidos na simulação indicam que a transferência de calor que ocorre no sistema proporciona variações de até 10 K aproximadamente ao longo do filme. Dentro dessa diferença, foi possível notar temperaturas mais altas na região central da área, durante todo o intervalo de aquecimento.

Uma sugestão para trabalhos futuros é a investigação quanto ao impacto que a diferença de temperaturas ao longo da superfície do filme termoplástico causa nos resultados do processo de termoformagem.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Gustavo Spina Gaudêncio. **Processo de Transformação**: Conceitos, Características e Aplicações de Termoformagem e Rotomoldagem de Termoplásticos. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.

ANSYS Inc., “ANSYS Fluent Theory Guide”, Release 12.0, 2009.

BELOFSKY, Harold. **Plastics: Product Design and Process Engineering**. Munich: Hanser Publishers, 1995.

CRIPPA, Agnaldo. **Estudo do desempenho de filmes multicamadas em embalagens termoformadas**. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

IBRAHIM, Umami Kalthum; SALLEH, Ruzitah Mohd. **Application of Network Representation Model for Radiation Analysis**. Selangor, Malaysia: Universiti Teknologi Mara, 2012.

HOFFMANN, Roger Schildt. **Projeto inverso em cavidades radiantes com superfícies não-cinzas**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

INCROPERA, Frank P. [et al.]. **Fundamentos de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. p. 4.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos**: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e molde, 1. ed. - São Paulo: Artiliber Editora, 2005.

MESTRINER, Fabio. **Design de embalagem**: curso básico. 2ª edição revisada. São Paulo: Pearson Makron Books, 2002.

MIRANDA, Ana Karolina Da Silva. **Design de embalagens como ferramenta de comunicação**: Estudo de caso das embalagens da Biotropic – linha infantil. Dissertação (Bacharel em Comunicação Social), Faculdade Cearense, Fortaleza, 2013.

MURALISRINIVASAN, N.S. **Update on troubleshooting in thermoforming**. 1. ed., United Kingdom, EUA: Smithers Rapra. 2010. ISBN: 978-1-84735-137-1.

NEGRÃO, C.; CAMARGO, E. P. **Design de embalagem**: do marketing à produção. São Paulo: Novatec Editora, 2008.

PACKAGING of Materiel Preservation. Estados Unidos: Defense Supply Agency, Departments of the Army, The Navy, and the Air Force . Washington, 1976.

Disponível em:

https://www.google.com.br/books/edition/Packaging_of_materiel_preservation/GHTb7HiCp1cC?hl=pt-BR&gbpv=0. Acesso em 10/05/2022.

PRESAS, Joaquim Fernandez; PRESAS, Patrícia Piana. **História da Embalagem: Uma Brevíssima Resenha do Século XX**, 2003.

REIS, Marcus V. F. dos. **Simulação Numérica da Transferência de Calor em Problemas Radiativos – Condutivos**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Especialidade Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

RODRIGUES, Andressa Mendes. **Modelagem de Fornos com Aquecedores de Filamento para Aquecimento Uniforme Utilizando o Software Fluent**. Monografia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

SIEGEL, Robert; HOWELL, John R.; MENGUÇ, M. Pinar. **Thermal Radiation Heat Transfer**. 5 ed, Nova York, EUA: Taylor e Francis, 2010.

THRONE, J.L. **Understanding thermoforming**. 2. edition, 2008. ISBN-10: 1569904286.

VALÉRIO, Bruna Guedes; BASTOS, Lucas Silva. **Validação da modelagem da transferência de calor em um forno mufla**. Trabalho de conclusão de curso – UnB, 2016.

VAN ECK, R., KLEP, M., & VAN SCHIJNDEL, A. W. M. (2016). **Surface to surface radiation benchmarks**. In COMSOL conference, 12-14 October 2016, Munich, Germany (pp. 1-6)