

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JEAN LEONE DA CONCEIÇÃO ESTEVES

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DE UM PROCESSO MANUAL DE INJEÇÃO
DE POLÍMEROS**

GUARAPUAVA

2021

JEAN LEONE DA CONCEIÇÃO ESTEVES

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DE UM PROCESSO MANUAL DE INJEÇÃO
DE POLÍMEROS**

Computational Analysis of a Manual Polymer Injection Process

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Mecânica, como requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Msc. Luan José Franchini Ferreira

GUARAPUAVA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

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

JEAN LEONE DA CONCEIÇÃO ESTEVES

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DE UM PROCESSO MANUAL DE INJEÇÃO DE
POLÍMEROS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Mecânica, como requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 08/dezembro/2021

Luan José Franchini Ferreira
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Sérgio Dalmás
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Aldo Przybysz
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2021

RESUMO

Constantemente, empreendedores vem buscando sua independência financeira. Com isso existe uma grande busca por produtos inovadores que ajudem nesse objetivo e, a partir dessas ideias que surgem, trabalhar por conta própria. O desenvolvimento de projetos em universidades contribui para que novas tecnologias e oportunidades apareçam. A maioria dessas tecnologias precisam de estudos de simulação computacional para que sua performance seja a melhor possível. Este trabalho faz uma simulação do processo de injeção do polímero PET sobre um canal de saída em uma máquina de injeção de polímeros manual com o objetivo de se obter conhecimento do método e se ter uma análise completa desse processo para esse sistema. Essa máquina analisada, pode ser usada na produção independente de pequenas peças de plástico. Foram realizadas simulações que mostram o tempo que os processos levam e a temperaturas alcançadas, além de que foi possível verificar pontos de melhoria no trabalho. A simulação é feita no software ANSYS 2021 R2 Student usando o fluidflow (fluyente) e o Transient Thermal.

Palavras-chave: Escoamento, Simulação Computacional Multifásica, Polímeros, Injeção plástica.

ABSTRACT

Constantly, entrepreneurs are looking for their financial independence. There is a great search for innovative products that help in this objective and these ideas that arise, work on their own. The development of projects at universities contributes to the emergence of new technologies and opportunities. Most of these technologies need computer simulation studies for their performance to be the best. This work makes a simulate of PET polymer injection processes in an outlet channel in a manual polymer injection machine in order to obtain knowledge and to have a complete analyze for this system. This machine can be used in the independent production of small plastic parts. The simulation is making in the ANSYS 2021 R2 Student software using fluid flow (fluent) and the Transient Thermal.

Keywords: Flow, Multiphase Computer Simulation, Polymers, Plastic Injection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de polimerização do etileno.....	13
Figura 2 - Rosca do processo de injeção plástica.....	16
Figura 3 - Comportamento físico-mecânico de um polímero como função de sua massa molar e das temperaturas característica, Tg e Tm.	17
Figura 4 - Diferença entre os estados sólido, líquido e gasoso.	20
Figura 5 - Deformação do sólido e escorregamento do líquido.	20
Figura 6 - Perfil de velocidades lineares.	21
Figura 7 - Representação dos planos do fluido com velocidades e tensões de cisalhamento.	22
Figura 8 - Demonstração de uma camada limite e perfil de velocidades.	23
Figura 9 - Desenvolvimento da camada limite de perfil de velocidades em um tubo.....	24
Figura 10 - Vista da extremidade do volume de controle.	26
Figura 11 - Corte do fluido e diagrama de corpo livre.....	27
Figura 12 - Representação de um volume de controle com um nó no centro usado no MVF.....	32
Figura 13 - Ambiente Workbench do ANSYS STUDENT 2021 R2.	34
Figura 14 - Fluxograma das etapas para a simulação.....	35
Figura 15 - Projeto da Máquina desenvolvida na Iniciação Tecnológica	36
Figura 16 – Tela do ANSYS com <i>geometry</i> e <i>transient thermal</i>	39
Figura 17 - Janela do ANSYS com a geometria importada.	39
Figura 18 - Janela do ANSYS com condições de simulação adicionadas.	40
Figura 19 - Configurações da simulação de aquecimento do cilindro.	41
Figura 20 - Configuração do aquecimento do polímero no ANSYS.....	42
Figura 21 - Modelo 3D do polímero com o molde no DM do ANSYS.	43
Figura 22 - Ligação do <i>Geometry</i> com o <i>Fluid Flow (Fluent)</i>	43
Figura 23 - Malha e nome das superfícies e sólidos do modelo.....	44
Figura 24 - Ambiente de <i>setup</i> do ANSYS Fluent	44
Figura 25 - Coeficientes de lei de potência para o PET.	45
Figura 26 - Seleção de resultados para ser exportados.	46
Figura 27 - Sólido pronto para o cálculo.	46
Figura 28-a – Erro de solução no cilindro de Aquecimento com 5 mm de elemento de malha.	47
Figura 29 - Temperatura do cilindro com 1.5 mm e 60 segundos.....	50
Figura 30 – Gráfico e tabela das temperaturas da simulação do cilindro de aquecimento.	51
Figura 31 – Simulação do cilindro de aquecimento para 23 segundos e potência de 2804W.....	52
Figura 32 – Tabela e gráfico da simulação do cilindro de aquecimento tempo de 23 segundos e potência de 2804W.	52
Figura 33 – Simulação do Cilindro de aquecimento para tempo de 60 segundos e potência de 1100W.	53
Figura 34 - Tabela e gráfico da simulação do cilindro de aquecimento para tempo de 60 segundos e potência de 1100W	53
Figura 35 - Simulação do cilindro de aquecimento para fluxo de calor.....	54
Figura 36 – Erro de simulação do polímero com 5 mm de elementos de malha.	55
Figura 37 - Simulação de aquecimento do polímero para tempo de 120 segundos.	56
Figura 38 - Simulação de aquecimento do polímero com tempo de 180 segundos.	57
Figura 39 - Geometria utilizada para simulação de escoamento.....	58
Figura 40 - Geometria pronta para simulação com dois planos.	59
Figura 41 - Polímero sendo injetado no início do escoamento.	59
Figura 42-a - Escoamento do polímero no time step 91.	60

Figura 43 - Escoamento do polímero time step 20012.....	62
Figura 44 - Sólido com fração volumétrica final da simulação.....	63
Figura 45 - Gráfico gerado do erro residual na simulação de escoamento com elementos de malha de 0,335mm.	64
Figura 46 - Comportamento de divergência para a simulação.....	64
Figura 47 - Velocidades no processo de escoamento.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedade dos Polímeros.....	14
Tabela 2 - Dados de entrada	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAE	Engenharia Assistida por Computador (do inglês - <i>Computer-Aided Engineering</i>)
UTFPR-GP	Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Guarapuava
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ANSYS	Software comercial utilizado para simulações
T_f	Temperatura de fusão
PET	Politereftalado de etileno
ρ	Densidade
c	Calor Específico
γ	Condutividade Térmica
E	Módulo de Elasticidade
2D	Duas dimensões
σ	Tensão
η	Coefficiente de atrito viscoso
v_x	Velocidade na direção x
v_y	Velocidade na direção y
$\frac{\partial}{\partial y}$	Derivada parcial em relação a y
$\frac{\partial}{\partial x}$	Derivada parcial em relação a x
σ_{xy}	Tensão de cisalhamento no plano xy
ϵ_{xy}	Deslocamento no plano xy
G	Módulo de cisalhamento
μ	Viscosidade dinâmica
τ	Tensão de cisalhamento
$V_{méd}$	Velocidade médias

R	Raio do tubo
r	Raio variável
$u(r)$	Velocidade em função do raio
Re	Número de Reynolds
D	Diâmetro do tubo
L_E	Comprimento de entrada
\vec{F}	Força
m	Massa
\vec{a}	Aceleração
P	Pressão axial
g	Aceleração da gravidade
z	Diferença de altura
ΔP	Queda de pressão
f	Fator de Darcy
K	Índice de Consistência
n	Índice de Lei de Potência
$\dot{\gamma}$	Taxa de Cisalhamento
$\dot{\gamma}_{xy}$	Componente do tensor taxa de cisalhamento
$\eta(\dot{\gamma})$	Viscosidade aparente
ϕ	Variável independente
∇	Operador matemático
Q	Coefficiente de difusividade
CAD	Projeto Assistido por Computador (do inglês - <i>Computer-Aided Design</i>)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
1.1	JUSTIFICATIVA.....	10
1.2	OBJETIVOS	10
1.2.1	Objetivo Geral	10
1.2.2	Objetivos Específicos	11
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1	POLÍMEROS.....	12
2.1.1	Polímeros Termofixos ou Termorrígidos	13
2.1.2	Polímeros Termoplásticos	14
2.1.3	Moldagem de Polímeros por Injeção Plástica	15
2.1.4	Comportamento mecânico dos Polímeros	16
2.1.4.1	Viscoelasticidade de polímeros	17
2.2	MECÂNICA DOS FLUIDOS	19
2.2.1	Fluidos Newtonianos.....	21
2.2.1.1	Escoamento	21
2.2.1.2	Camada Limite	23
2.2.1.3	Escoamento Interno em tubos	23
2.2.1.3.1	Escoamento Laminar em Tubos	25
2.2.1.3.2	Perda de Carga e Queda de Pressão em um Escoamento Laminar	28
2.2.2	Fluido Não-Newtoniano	29
2.2.2.1	Modelo de Lei de Potência.....	29
2.3	MÉTODOS NUMÉRICOS	31
2.3.1	Método dos Volumes Finitos	32
3.	ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	34
3.1	PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE	34
3.1.1	Procedimentos Iniciais	34
3.1.2	ANSYS.....	34
3.2	SIMULAÇÕES	36
3.2.1	Parâmetros iniciais	37
3.2.1.1	Pré-Aquecimento do Cilindro	38
3.2.2	Aquecimento do Polímero.....	41
3.2.3	Escoamento do Polímero.....	42
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	AQUECIMENTO DO CILINDRO	47
4.1.1	Convergência da Malha.....	47
4.1.2	Resultados do Aquecimento mudando parâmetros	51
4.2	AQUECIMENTO DO POLÍMERO	54
4.2.1	Convergência da Malha.....	54
4.3	PROCESSO DE ESCOAMENTO DO POLÍMERO	58
5.	CONCLUSÃO	66
5.1	AQUECIMENTO DO CILINDRO	66
5.2	AQUECIMENTO DO POLÍMERO	66
5.3	ESCOAMENTO DO POLÍMERO	66
5.4	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	67
	APENDICE	68

APENDICE A – DESENHO 2D DA TAMPA DO CILINDRO DE AQUECIMENTO.....	69
APENDICE B – DESENHO 2D DO CILINDRO DE AQUECIMENTO.....	70
REFERÊNCIAS	71

1. INTRODUÇÃO

Novas tecnologias estão sempre em constante desenvolvimento, elas são criadas para se adaptarem às necessidades da sociedade. Atualmente, com todas as crises e catástrofes mundiais, muitos estão tendo que se reinventar e, com isso, buscam soluções alternativas para se manterem financeiramente.

As universidades desempenham um papel importante no desenvolvimento tecnológico, pois estão nelas as maiores possibilidades de encontrar projetos que incentivem o crescimento e desenvolvimento tecnológico e científico. Existem projetos de extensão, iniciação científica, iniciação tecnológica, entre outros, que tem a finalidade de inserir o estudante em um ambiente mais profissional e que possibilita o desenvolvimento de novos produtos, novas pesquisas e o aprimoramento do que já foi ou é feito.

Os projetos de iniciação tecnológica têm o objetivo de inserir os estudantes em pesquisa aplicada, visando o desenvolvimento de algo que possa ser acessível e produzido. A geração de relatórios e divulgação dos resultados também fazem parte do cronograma do projeto, para que as outras pessoas saibam o que tem sido desenvolvido e também das novas tecnologias que surgem.

Com os avanços nos últimos anos do uso de plásticos e a substituição de metais por polímeros e compósitos visando diferentes propriedades, tem-se uma vasta literatura em relação ao mundo dos polímeros, inclusive como moldar os diferentes tipos de polímeros.

Um processo bastante utilizado para trabalhar com polímeros é o de injeção. Dentro dos processos de injeção, tem-se ainda dentro do processo de injeção, tem-se a injeção manual, que consiste em utilizar a força de trabalho de algum operador da máquina para exercer pressão sobre o polímero derretido a fim de que ele possa ser injetado em um molde e adquirindo assim sua forma geométrica. Esse tipo de processo requer uma máquina que armazene o polímero fundido e injete em um molda, máquina essa que pode ser desenvolvida em projetos de universidades.

Pequenos projetos como esse, precisam de alguns tipos de estudo e testes devido aso fenômenos físicos envolvidos como, por exemplo, o escoamento do polímero. Antigamente os métodos de testes e análises eram cálculos manuais e também a produção de um protótipo, porém esses métodos ou custam muito tempo ou recursos financeiros mais elevados, para depois poder fazer uma versão melhoradas e otimizada. O estudo de tecnologias de simulação

computacional possibilita agora, uma análise intermediária entre o tempo e o valor financeiro envolvido. Proporcionando estudos mais rigorosos que permite analisar e realizar mudanças antes mesmo de produzir um protótipo. Análises como essa podem ser feitas para avaliar como vai se comportar o polímero derretido ao ser injetado no molde por intermédio de uma injetora manual, por exemplo.

1.1 JUSTIFICATIVA

Na UTFPR-GP foi desenvolvido um trabalho de iniciação tecnológica cujo objetivo era o de se projetar um sistema para moldagem de polímeros por injeção. Esse projeto foi idealizado para ser uma máquina econômica e de trabalho manual, com foco nas ODSs 8 (Trabalho decente e crescimento econômico) e 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), Para que pessoas possam começar o próprio negócio no ramo de plástico moldado e assim obterem independência financeira ou uma renda extra.

Esse projeto é composto por algumas partes: um sistema de alavanca, um cilindro de aquecimento, e a saída do polímero para o molde. A saída do polímero é de extrema importância, pois ela mostra como se dá o comportamento inicial do escoamento ao entrar no molde e, através dela, é possível fazer uma melhora na geometria do canal para aproveitar melhor todo o fluxo e as pressões desenvolvidas pela alavanca de força.

Uma análise de escoamento deve ser feita no canal de saída do polímero para o molde, utilizando alguma ferramenta de CAE para que se obtenha uma geometria melhorada, que minimize a energia gasta no processo de injeção manual.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Neste trabalho o objetivo é analisar os processos que envolvem a máquina de injeção manual de polímeros, realizando sugestões de melhorias possíveis observadas a partir das simulações feitas.

1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de cumprir o objetivo geral, serão realizados os objetivos específicos a seguir:

- Projetar uma geometria para dar início ao estudo, e um molde de peça para ser usado como referência;
- Analisar as malhas e realizar o refinamento das mesmas;
- Fazer simulações térmicas do cilindro de aquecimento por meio do *Transient Thermal*;
- Fazer simulações do aquecimento do polímero dentro do cilindro de aquecimento por meio do *Transient Thermal*;
- Fazer simulações de escoamento do polímero para o molde por meio do software ANSYS que utiliza o método dos volumes finitos;
- Analisar os principais parâmetro da simulação a fim de melhorar alguns resultados;
- Demonstrar a aplicabilidade dos modelos propostos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste trabalho é possível encontrar alguns assuntos no qual precisam de certo entendimento, para isso foi necessário separar esses assuntos nos tópicos abaixo. A fim de se ter uma base teórica do problema abordado.

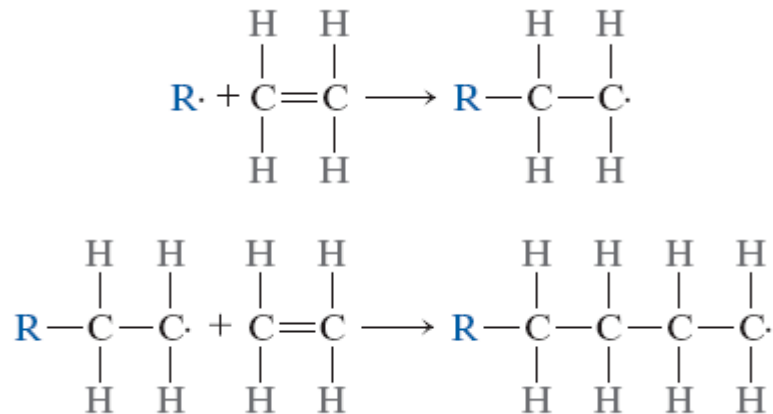
2.1 POLÍMEROS

Os polímeros são materiais formados por milhões de moléculas juntas, geralmente em ligações interatômicas covalentes, que é o tipo de ligação em que os átomos compartilham elétrons com os átomos vizinhos, formando uma ligação com forças intramoleculares. As moléculas se repetem em um padrão ao longo da estrutura. Esses padrões são chamados de meros. Os polímeros são encontrados no estado sólido, em condições normais de pressão e temperatura (CANEVAROLO JR, 2013).

A maioria das moléculas dos polímeros são formadas por hidrocarbonetos, ou seja, formadas de carbono e hidrogênio. Existem polímeros naturais e sintéticos. Os sintéticos precisam passar por um processo chamado de polimerização, no qual as moléculas são expostas a um catalizador que inicia a formação do polímero através das ligações covalentes. O nome dado ao padrão de repetição do polímero é “unidades repetidas”, ele serve de base para toda a cadeia polimérica (CRAWFORD, 1998).

Para entender melhor como funciona a polimerização, considere o etileno, que é um hidrocarboneto, gás em condições normais de pressão e temperatura, e tem fórmula química C_2H_4 . Quando adicionado um catalizador, a unidade monomérica inicial é forçada a se ligar ao catalizador, deixando uma das ligações do carbono livre, o que faz com que outra unidade monomérica se una a esse elétron sem ligação, deixando a mesma com uma ligação sobrando. Essa reação ocorre até que todos estejam ligados entre si, formando polietileno, que é um polímero sólido em temperaturas e pressão ambiente. A **Figura 1** ilustra essas ligações químicas (CALLISTER, Jr.; RETHWISCH, 2018).

Na ciência, sempre é estudado a interação entre os corpos, estejam eles com pequena ou grande distância. Alguns estudos se referem a corpos com comportamento mecânico e propriedades semelhantes.

Figura 1 - Processo de polimerização do etileno

Fonte: Mecânica dos Fluidos, BRUNETTI (2008).

Dois parâmetros importantes quando se trata de polímeros são as temperaturas de transição vítrea e a temperatura de fusão. Callister, Jr.; Rethwisch (2018) diz que enquanto o polímero se torna líquido na T_f , temperatura de fusão, suas moléculas se rearranjam de uma forma ordenada para a forma desordenada. Mas essa condição depende de sua composição química, pois alguns polímeros não permitem rearranjos de suas moléculas. Já a temperatura de transição vítrea é aquela em que o polímero passa de seu estado sólido e rígido para um borrachoso. Suas moléculas se permitem alguns movimentos porém não o rearranjo.

A relação do comportamento mecânico, diante a uma elevação de temperatura, leva a uma subdivisão dos polímeros em duas partes: termoplásticos e termorrígidos.

2.1.1 Polímeros Termofixos ou Termorrígidos

Segundo Canevarolo Jr. (2013), os termorrígidos só se permitem ser modelados uma vez, na fase de pré-polímero. Ao entrarem em contato com calor a primeira vez, formam ligações covalentes cruzadas em rede para que o mesmo fique rígido e isento da deformação plástica, evitando a deformação. Após a solidificação, esses polímeros não podem mais ser modelados novamente, a temperatura alta não os influencia mais e, se a temperatura for elevada demais, causa a degradação desses polímeros.

2.1.2 Polímeros Termoplásticos

Um outro tipo de polímero na classificação do comportamento em relação a temperatura é o termoplástico. Esse tipo de polímero é ligado por uma força fraca de Van Der Waals. Quando sujeito a temperaturas mais elevadas, as ligações que já são fracas se tornam ainda mais fracas. Os termoplásticos permitem ser remodelados se expostos novamente a pressão e temperatura mais elevadas, que faz com que o polímero se torne um líquido viscoso, e volta a ser sólidos quando resfriado, tomando a forma do molde em que foi inserido. Esse processo de remodelagem pode ser repetido inúmeras vezes, o que torna o termoplástico uma classe de material muito utilizada (CRAWFORD, 1998).

Os termoplásticos são maioria na produção de polímeros no mundo. O fator que contribui é por ele poder ser reciclado e reutilizado tanto por grandes indústrias como por pessoas em trabalhos artesanais. Eles são comumente usados em embalagens, acessórios, utensílios de casa e também na engenharia, como dispositivos mecânicos, peças automobilísticas, etc (CANEVAROLO JR, 2013).

O polímero utilizado nesse trabalho será o PET (politereftalado de etileno). Esse polímero é muito conhecido por ser usado em recipientes de líquidos como refrigerantes e sucos. Ele pode ser facilmente encontrado no dia-a-dia e existe uma certa facilidade em reciclá-lo. Na Tabela 1 é possível ver algumas propriedades do polímero PET e alguns outros polímeros mais conhecidos.

Tabela 1 - Propriedade dos Polímeros.

Polímero	Densidade (ρ) (kg/m^3)	Calor Específico (c) ($kJ/kg K$)	Condutividade Térmica (γ) ($W/K.m$)	Módulo de Elasticidade (E) (GPa)	Temp. de Fusão (T_f) ($^{\circ}C$)	Temp. Máx. de Operação ($^{\circ}C$)
ABS	1040	1,3	0,25	1,9 - 2,3	175	70
PET	1360	1,0	0,2	2,76 - 4,14	260	110
Polipropil	905	2,0	0,2	1,14 - 3,24	160	100
PVC	1400	0,9	0,16	2,41 - 4,14	180	50

Fonte: CRAWFORD (1998).

2.1.3 Moldagem de Polímeros por Injeção Plástica

Existem diversas formas de moldar os polímeros, como a prensagem a quente e a extrusão, porém, segundo Granada (2012), o processo industrial para moldagem de polímeros mais importante é a moldagem por injeção.

Esse processo requer algumas etapas para completar um ciclo completo. É bom que o polímero esteja na forma granulada, para facilitar a mudança de fase ao ser adicionado no recipiente de aquecimento. Após a fusão do material, é imposta uma força sobre ele para que ele possa escoar pelo canal de saída, que é um dos objetivos de estudo deste trabalho. Ao passar pela geometria de saída, o polímero preenche a cavidade do molde até que este seja preenchida por completo ou que se esgote o material do recipiente de aquecimento. Depois da injeção do polímero no molde, é preciso esperar um tempo até que material se solidifique por completo, a fim de não causar falhas na peça. Passado esse tempo, o molde pode ser removido ou aberto para a extração da peça moldada. Assim, com o fechamento do molde e reabastecimento do recipiente com polímero, o processo está pronto para ser reiniciado (MURTI, 2010).

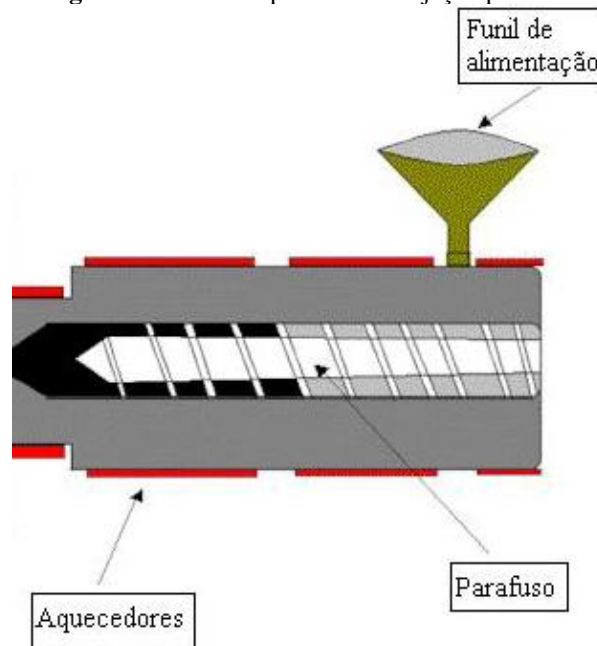
Conforme observado na **Tabela 1**, o ponto de fusão do polímero PET é de 260°C , portanto o recipiente de aquecimento deve ter potência suficiente a ponto de aquecer até um pouco acima desse valor, para que se possa ter certeza da fusão do material.

Na fase da injeção do material, grandes e pequenas máquinas industriais utilizam o sistema de eixo com rosca infinita, como mostrado na **Figura 2**. Nesse sistema, enquanto a rosca gira o material vai percorrendo o tubo, ganhando pressão pela geometria em que vai escoando e saindo para o molde.

Esse trabalho tem como base uma máquina de injeção manual, cujo sistema de pressão utiliza um pistão cilíndrico que pressiona o polímero conforme o operador aciona a alavanca de força para baixo.

A etapa de saída do polímero do tubo de pressão e aquecimento para o molde é extremamente importante, pois ela define a vazão do líquido para o molde, a pressão em que o material derretido irá sair e o quão ordenado será esse escoamento.

Figura 2 - Rosca do processo de injeção plástica.



Fonte: Estacio (2004).

Para a peça terminar o fim do ciclo no processo, é necessário um tempo de resfriamento para a solidificação do polímero. A maioria das máquinas industriais utilizam um sistema de resfriamento próprio, para diminuir o tempo do ciclo. Na máquina que serviu de inspiração para o trabalho feito na iniciação tecnológica, o resfriamento é feito na temperatura ambiente, sem elementos adicionais.

2.1.4 Comportamento mecânico dos Polímeros

Os polímeros possuem um comportamento diferente dos demais materiais que em geral relacionam a deformação e a tensão por uma constante de proporcionalidade, como o próprio módulo de elasticidades. Segundo Canevarolo Jr. (2013), para saber como um polímero vai se comportar mediante a uma tensão ou deformação deve ser analisadas alguns fatores: estrutura química, temperatura, tempo e as condições de processamento do polímero.

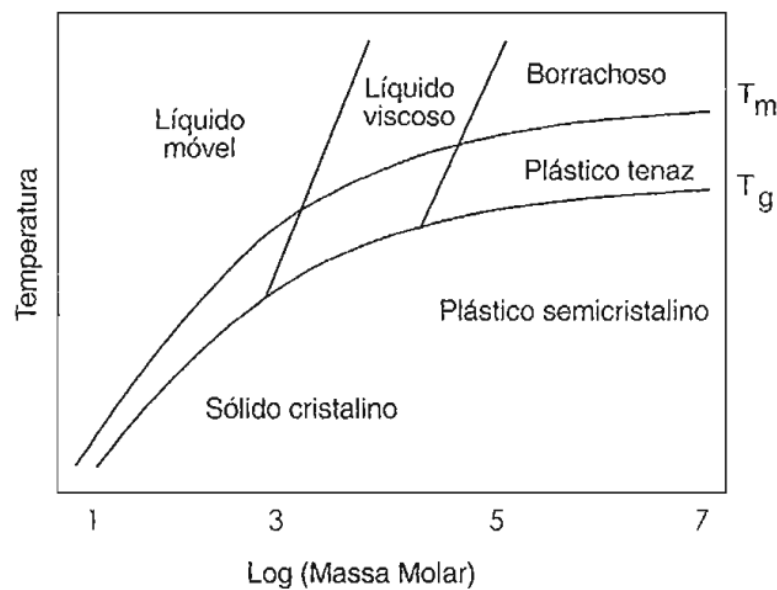
Em geral, existem duas características primárias, uma para sólido e outra para fluidos. Os fluidos são ditos viscosos, enquanto os sólidos, elásticos.

2.1.4.1 Viscoelasticidade de polímeros

O modo como os polímeros responde às solicitações mecânicas aplicadas o caracterizam, e isso é consequência de suas estruturas. Os polímeros apresentam um comportamento intermediário, e tem características de sólidos e líquidos, por isso são chamados de substâncias viscoelásticas.

Outro fator importante que é usado para analisar o comportamento de um polímero é a *massa molar*. Abaixo, na **Figura 3**, vemos o comportamento de um polímero em relação a temperatura, com linhas traçadas de suas temperaturas característica e massa molar.

Figura 3 - Comportamento físico-mecânico de um polímero como função de sua massa molar e das temperaturas característica, T_g e T_m .



Fonte: CANEVAROLO JR (2013).

Para entender como se dá o comportamento viscoelástico é preciso analisar os fenômenos de viscosidade e elasticidade de forma separada.

A lei de viscosidade de Newton, para uma análise 2D, relaciona a soma dos gradientes de velocidades multiplicados ao coeficiente de atrito viscoso com a tensão. Essa relação pode ser mostrada na **Equação (1)**.

$$\sigma = \eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \quad (1)$$

sendo σ a tensão, η o coeficiente de atrito viscoso, e sendo $\frac{\partial v_x}{\partial y}$ e $\frac{\partial v_y}{\partial x}$ os gradientes das componentes x e y da velocidade nas direções y e x respectivamente.

$$v_x = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

$$v_y = \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3)$$

$$\sigma_{xy} = \eta \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (4)$$

onde u e v são os deslocamentos nas direções x e y .

Sabendo que as componentes de velocidades nas direções y e x podem ser representadas pelas Equações (2) e (3), respectivamente, rearranjando os termos dentro da **Equação (1)**, se obtém a equação da tensão dada na **Equação (4)**.

A **Equação (4)** representa a tensão cisalhante durante um escoamento no plano xy , mostrando que é diretamente proporcional às taxas de velocidades. Como a variação do deslocamento em cada direção é uma deformação, é possível substituir o termo de dentro dos parênteses por ε_{xy} que representa a deformação no plano xy , obtendo-se, então, forma simplificada.

$$\sigma_{xy} = \eta \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial t} \quad (5)$$

Um modelo similar a esta equação é utilizado para o comportamento elástico. A lei de Hooke para o cisalhamento nos mostra uma relação simples para o comportamento de um sólido elástico linear. Essa relação pode ser dada por

$$\sigma_{xy} = G \varepsilon_{xy} \quad (6)$$

onde G é o módulo de cisalhamento.

Se tratando de um modelo de viscoelasticidade, tem os dois fenômenos unidos os efeitos viscosos e elásticos. Kelvin e Voight propuseram um modelo simples para simular este comportamento, que consiste na adição simples dos termos de tensão.

$$\sigma_{xy} = G\varepsilon_{xy} + \eta \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial t} \quad (7)$$

Esse modelo, mostrado na **Equação (7)**, é simples e limitado, se comparado a outros. Modelos mais complexos foram desenvolvidos, e para outras condições. O modelo de superposição de Boltzmann é um deles, e prevê carregamentos com etapas diferentes sendo o aumento de tensão uma contribuição independente para a deformação total, todos contribuindo para o efeito de deformação, porém um não sendo influenciando o outro. Através desse princípio de Boltzmann tem-se outra equação que é a equação de relaxação de tensão (WASILKOSKI, 2006).

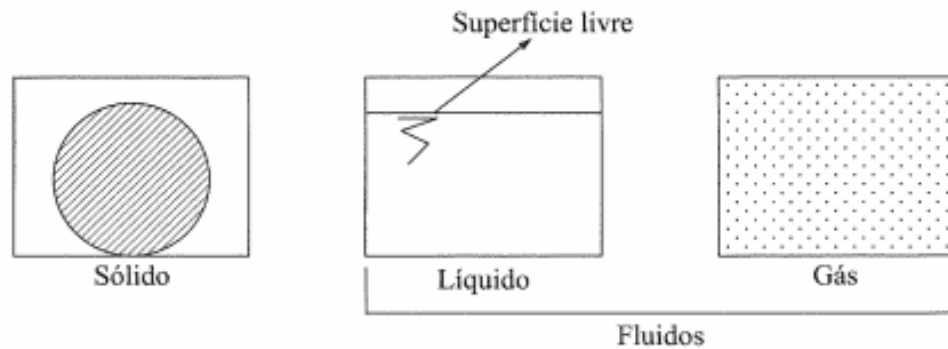
$$\sigma(t) = G\varepsilon + \int_{-\infty}^t G(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (8)$$

2.2 MECÂNICA DOS FLUIDOS

Em todos os casos a engenharia está presente e, se tratando de fluido, é possível restringir a uma área de estudo que embora seja muito grande é focada em analisar o comportamento de fluidos de três possíveis formas: em repouso, em movimento ou interagindo com sólidos e outros fluidos, é a Mecânica dos Fluidos (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

De acordo com XIMENES (2000), fluido é o corpo líquido ou gasoso que se molda ao recipiente em que está inserido. A **Figura 4** abaixo ilustra a diferença entre substâncias nos estados sólido, líquido e gasoso.

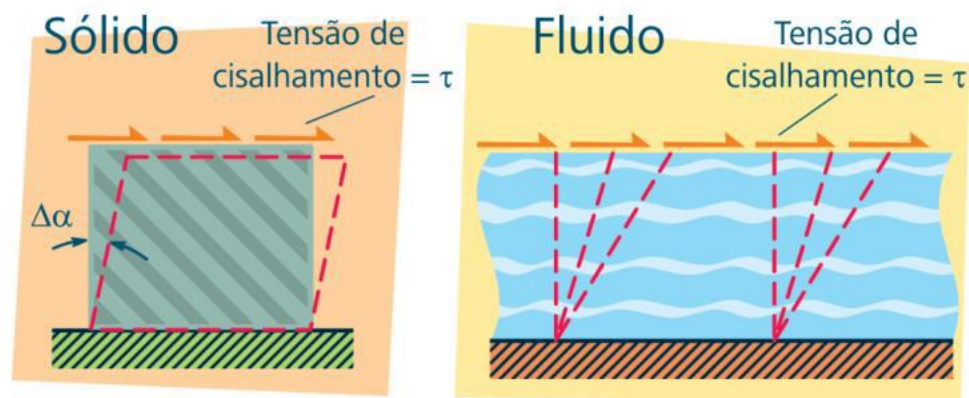
Figura 4 - Diferença entre os estados sólido, líquido e gasoso.



Fonte: BRUNETTI (2008).

Para compreender o comportamento de um fluido, deve-se pensar em substâncias que estejam em três estados físicos diferentes, limitadas por placas superiores e inferiores. Aplicando uma força sobre uma das placas, o sólido tende a se deformar com uma certa proporção em relação a força aplicada, buscando o equilíbrio. Se não ultrapassado o limite elástico do material, após retirada a força, o material retorna a sua condição original. Já no fluido, aplicando-se uma força em uma das placas, todos os planos intermediários aos planos em contato com as placas planas vão escorregar umas sobre as outras continuamente. Sendo removida a força ele permanece na mesma condição em que ficou. Esse experimento pode ser ilustrado com a **Figura 5** abaixo.

Figura 5 - Deformação do sólido e escorregamento do líquido.



Fonte: VILANOVA (2010).

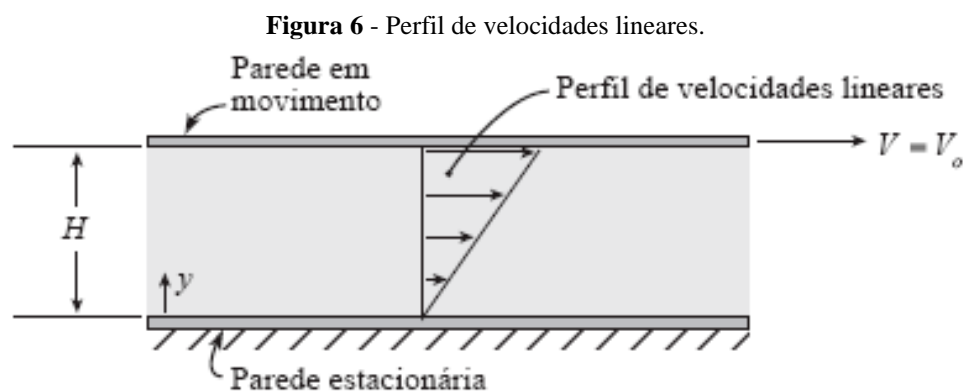
2.2.1 Fluidos Newtonianos

Fluidos newtonianos, são fluidos que apresentam uma relação linear entre as camadas do fluido e a taxa de cisalhamento.

2.2.1.1 Escoamento

Como mostrado na **Figura 5** é possível saber que os planos do fluido escorregam sobre os planos vizinhos, e assim se caracteriza um escoamento. Isso pode ser causado por alguns fatores como: diferença de pressão entre 2 pontos, força que gera uma tensão de cisalhamento sobre o fluido, gravidade.

Para todo escoamento onde o fluido está em contato com uma superfície, existe a chamada condição de não escorregamento. Essa condição diz que o fluido que está imediatamente em contato com o sólido não escorrega sobre ele, mas sim permanece com velocidade nula em relação ao mesmo. É possível se ver na **Figura 6** que na parede estacionária a velocidade do perfil é zero e na parede móvel o fluido acompanha o movimento com mesma velocidade da placa (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).



Fonte: ELGER et al. (2019).

A facilidade com que os planos do fluido conseguem deslizar entre si, está diretamente ligada à viscosidade dele, pois quanto maior a viscosidade, maior será tensão de cisalhamento que atua sobre cada plano. A tensão de cisalhamento para escoamentos simples, que são analisados de forma unidimensional, pode ser encontrada pelo produto do diferencial de

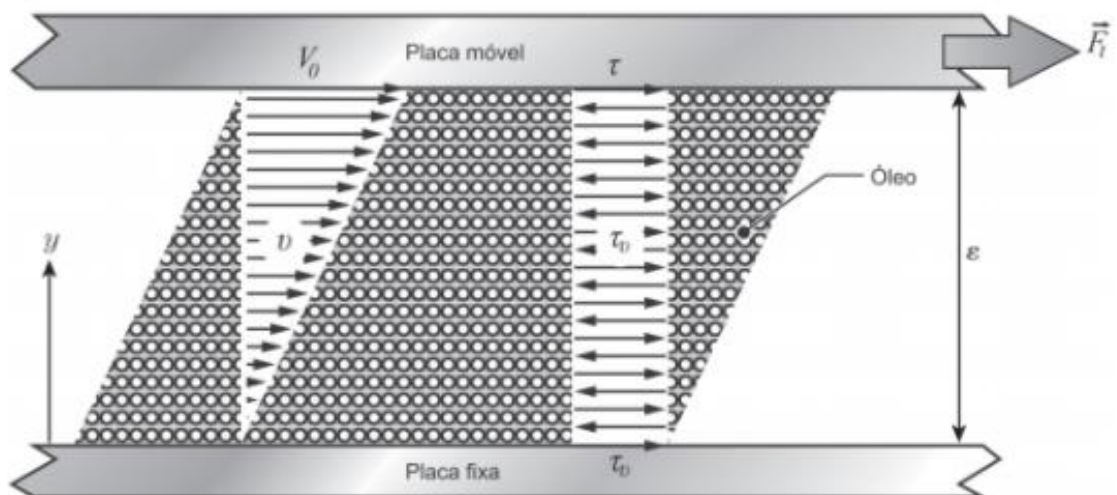
velocidade dv , em relação ao diferencial de distância dy entre os planos extremos, com a viscosidade dinâmica μ . É possível igualar a viscosidade a um atrito interno, mostrando que é a propriedade que monitora a resistência que o fluido tem ao se deslocar, ou seja, resistência à tensão cisalhante.

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (9)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento.

A análise da tensão de cisalhamento no fluido é extremamente importante para saber as forças que atuam sobre ele e que afetam diretamente no escoamento. A **Figura 7** mostra que as tensões de cisalhamento em cada plano são numericamente iguais, porém com a diferença de que seu sentido se alterna em cada camada.

Figura 7 - Representação dos planos do fluido com velocidades e tensões de cisalhamento.



Fonte: BISTAFA (2018).

Se durante um escoamento o fluido for dividido em várias camadas, sendo feita uma análise dos valores que envolvem o processo, será visto que as velocidades mudam para cada uma delas. Isso se dá pelo perfil de velocidades que se forma em um escoamento. Para o caso de apenas uma placa se movendo, pela condição de não escorregamento, a camada do fluido que terá maior velocidade será a que estiver em contato com a placa. E sobre a placa que

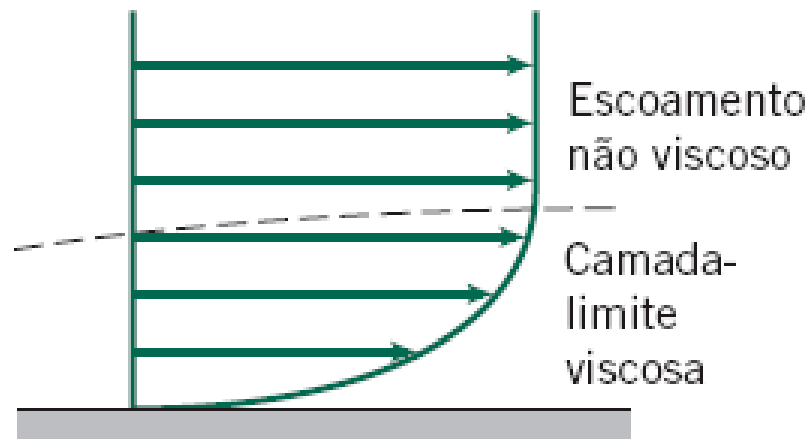
permanece imóvel, também pela condição de não escorregamento, é a camada em que a velocidade se mantém nula, formando um gradiente de velocidades (**Figura 7**).

2.2.1.2 Camada Limite

Em todo escoamento que haja gradientes de velocidade, existe a influência da viscosidade do fluido. Isso faz com que apareça uma região em que os planos do fluido entram em atrito uns com os outros devido a viscosidade, gerando uma tensão de cisalhamento que, conseqüentemente, desacelera o fluido. Essa região é chama de camada limite, pois é o limite até onde é notado os efeitos do cisalhamento viscoso (BISTAFA, 2018).

A **Figura 8** mostra o perfil de velocidades dentro e fora da camada limite.

Figura 8 - Demonstração de uma camada limite e perfil de velocidades.



Fonte: FOX et al. (2018).

2.2.1.3 Escoamento Interno em tubos

Quando se considera escoamento em um tubo não é possível mais notar igualdade com os exemplos dados anteriormente, em que a placa superior é móvel e a inferior é fixa. Para escoamentos em tubos, quem tem a iniciativa do movimento é o próprio fluido, escoando em contato com toda a área interna do tubo e pode ser mantido apenas por diferenças de pressão, inclinações ou inércia.

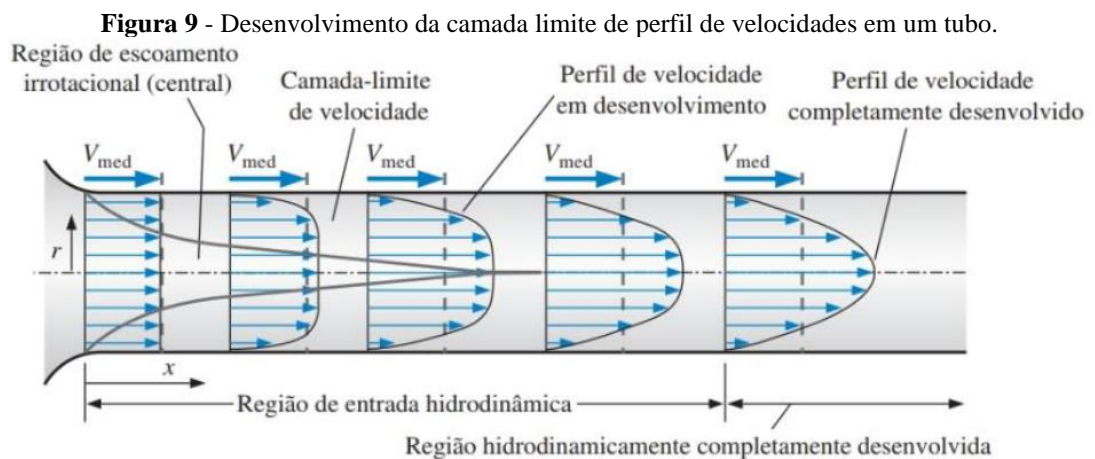
O escoamento em tubo é um escoamento interno, que se limitada pela geometria própria geometria do tubo ao longo de um raio. Essa limitação faz com que a camada limite com seus efeitos viscosos de atrito seja mais perceptível. Considerando um escoamento com

um determinado perfil de velocidades na entrada do tubo, o fluido tem seu início de escoamento nele quase sem os efeitos viscosos. Ao longo do escoamento, as camadas limites vão aumentando até se encontrarem no centro, formando um perfil de velocidades completamente desenvolvido, podemos observar esse comportamento na **Figura 9**. A camada limite mostra a zona que é afetada pelos efeitos de atrito viscoso que, como foi visto, faz com que as camadas sejam desaceleradas. Para compensar essa desaceleração e manter o fluxo de massa constante, o centro do escoamento é onde concentra uma aceleração maior, gerando uma velocidade média do escoamento (WHITE, 2018).

Segundo ÇENGEL; CIMBALA (2015), é possível determinar a velocidade média $V_{méd}$ a partir do princípio da conservação de massa

$$V_{méd} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(r)r dr \quad (10)$$

sendo R o raio do tubo, r a coordenada radial e $u(r)$ a velocidade em função do raio.



Fonte: ÇENGEL; CIMBALA (2015).

Os escoamentos podem ser divididos por 3 regimes diferentes: escoamento laminar, de transição e turbulento. Para saber qual regime de escoamento se trata, deve-se analisar o número de Reynolds. Esse número relaciona as forças inerciais de um escoamento com as forças viscosas, gerando valores de referências que são adimensionais. Se no escoamento os efeitos inerciais dominam e os efeitos das forças viscosas são relativamente baixos, será encontrado um alto número de Reynolds e o escoamento é chamado de regime turbulento, pois

as flutuações do fluido não são controladas pelas forças viscosas. Porém quando as forças viscosas são suficientemente grandes de forma a criar um equilíbrio, o número de Reynolds passa a ser baixo e o escoamento está em regime laminar. A **Equação (11)** descreve o comportamento do número de Reynolds (POTTER; WIGGERT, 2018).

$$Re = \frac{\rho V_{méd} D}{\mu} \quad (11)$$

onde ρ é a densidade do fluido, D é o diâmetro do tubo e Re é o próprio número de Reynolds.

Na prática, a determinação do regime do escoamento também depende se o sistema está sofrendo alguma perturbação externa, como impactos que causam vibrações e da rugosidade superficial do tubo. Para a maiorias dos casos de engenharia é de costume adotar números de Reynolds fixos como referências. É considerado um escoamento laminar se $Re \leq 2300$, e se $Re \geq 4000$ o escoamento é turbulento. O escoamento é de transição se os valores de Reynolds estiverem entre essas duas referências (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Fluidos que tem alta viscosidade é mais fácil de manter em um escoamento laminar, pelo maior controle das flutuações pelas forças viscosas.

Com o número de Reynolds, é possível determinar o tamanho do comprimento de entrada hidrodinâmica, região onde o perfil de velocidades começa a se desenvolver até o seu desenvolvimento completo, como mostrado na **Figura 9**, com um escoamento dinamicamente estabelecido, pois o comprimento de entrada é uma função do número de Reynolds. Na **Equação (12)** vemos a relação entre o comprimento de entrada L_E , o diâmetro D e o número de Reynolds para escoamento laminar (POTTER; WIGGERT, 2018).

$$\frac{L_E}{D} = 0,065 Re \quad (12)$$

2.2.1.3.1 Escoamento Laminar em Tubos

Neste trabalho é tratado do fluxo de um polímero derretido. No geral, polímeros tendem a ter uma viscosidade alta, e por isso é considerado um escoamento laminar.

Na seção anterior, foi observado como ocorre o desenvolvimento do fluxo de um fluido através de uma entrada tubular. Para entender um escoamento totalmente desenvolvido é

preciso fazer uma análise de segunda lei de Newton sobre o fluido. De acordo com (HALLIDAY et al., 2018), a segunda lei de Newton, também chamada de princípio fundamental da dinâmica, diz que a força resultante que atua sobre um corpo é igual ao produto de sua massa pela aceleração que o corpo está sofrendo. A **Equação (13)** ilustra a segunda lei de Newton.

$$\vec{F} = m \vec{a} \quad (13)$$

sendo \vec{F} a força, m a massa do corpo ou fluido e \vec{a} a aceleração imposta.

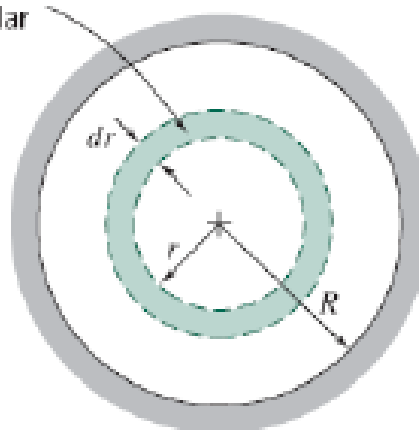
Considerando a análise sobre um escoamento totalmente desenvolvido, pode-se notar que a velocidade axial permanece constante, ou seja, sua velocidade se mantém constante ao longo de todo o escoamento. Se a velocidade permanece constante, o somatório de forças será zero, como mostra a **Equação (14)**. Nota-se também que não há velocidades ou movimentação na direção normal ao escoamento, essa condição é chamada de regime permanente (POTTER; WIGGERT, 2018).

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (14)$$

Para os cálculos, é necessário considerar um pequeno volume de controle diferencial e trabalhar sobre ele. Como o escoamento é totalmente circular, essa porção do fluido será em forma de um anel, como pode ser observado na **Figura 10**.

Figura 10 - Vista da extremidade do volume de controle.

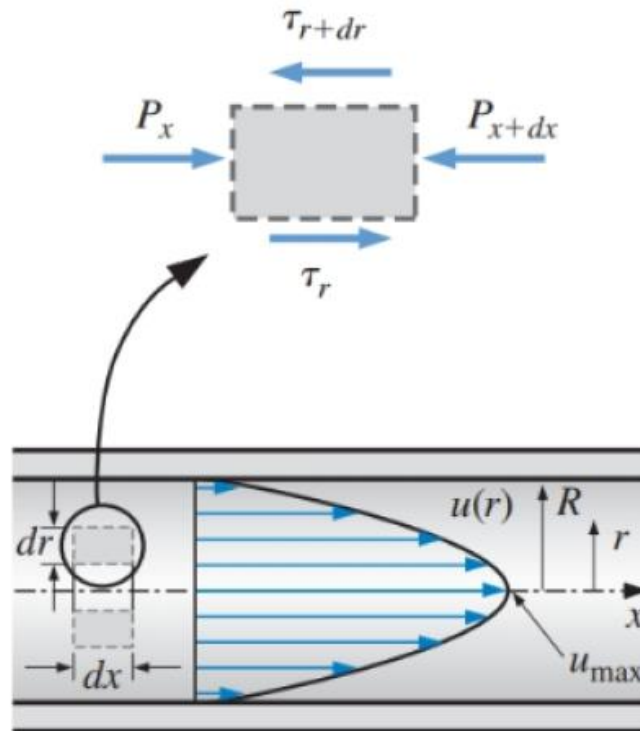
Volume de controle
diferencial
anular



Fonte: FOX et al. (2018).

Ainda, para ser feito o somatório de forças será considerado um corte axial, e para qualquer variação angular possível nesse corte, os valores serão os mesmos, pois o escoamento é axissimétrico. A **Figura 11** ilustra o corte axial e o diagrama de corpo livre mostrando as forças atuantes em uma parte diferencial do fluido.

Figura 11 - Corte do fluido e diagrama de corpo livre.



Fonte: ÇENGEL; CIMBALA (2015).

Fazendo o somatório de forças nas direções do raio e do eixo x , como demonstrado no diagrama de corpo livre da Figura 10, e igualando a zero, pois é o resultado da segunda lei de Newton, obtém-se a **Equação (15)** abaixo.

$$(2\pi r dr P)_x - (2\pi r dr P)_{x+dx} + (2\pi r dx \tau)_r - (2\pi r dx \tau)_{r=dr} = 0 \quad (15)$$

onde P é a pressão axial sobre o fluido, necessário para manter o escoamento com fluxo constante, dr é o diferencial de raio ou também a espessura da forma anelar, x é a posição no eixo de referência e dx é o diferencial de posição ou a largura olhando para a forma anelar.

Fazendo todas as substituições e ajustes matemáticos demonstrado por ÇENGEL; CIMBALA (2015), é possível chegar a uma simplificação da Equação (15) da velocidade em função do raio. Pode-se perceber que o perfil formado no escoamento laminar totalmente

desenvolvido é em formato parabólico, devido à natureza quadrática do raio encontrado na **Equação (16)**, tendo seu ponto de inflexão como velocidade máxima no centro do escoamento.

$$u(r) = 2V_{méd} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (16)$$

sendo o valor de $V_{méd}$ podendo ser encontrado através da razão entre a vazão e a área do tubo em que se tem o fluxo.

2.2.1.3.2 Perda de Carga e Queda de Pressão em um Escoamento Laminar

Como observado anteriormente, no escoamento existem forças viscosas de atrito agindo sobre o fluido, então é normal que haja uma diminuição na pressão.

Para saber quais fatores influenciam para essa diminuição de pressão é possível ignorar o atrito por um momento, então a **Equação (17)**, chamada de equação de Bernoulli, passa a ser válida. Com isso, é mais simples analisar o que influencia para a perda de carga no escoamento.

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V_{méd}^2}{2} + gz = constante \quad (17)$$

sendo P a pressão no escoamento, g a aceleração da gravidade e z a diferença de altura que pode haver no escoamento. Nesta equação é possível notar que os dois fatores contribuintes para o decréscimo de pressão é a diferença de altura positiva e um aumento da área do tubo, pois que afeta diretamente a velocidade (FOX et al., 2018).

A perda de pressão geralmente é vista em relação a direção do escoamento, ou comprimento L que ele possa ter. Nas hipóteses é pensado em algo que faça a vazão ficar constante, como uma bomba. Com isso, a queda de pressão em relação a distância percorrida pelo fluido será constante. Tendo como parâmetro a velocidade média do fluido e a viscosidade, é possível encontrar uma relação que forneça a queda de pressão e mostrando que ela é diretamente proporcional a viscosidade do fluido, essa relação é mostrada na **Equação (18)**.

$$\Delta P = \frac{32\mu LV_{méd}}{D^2} \quad (18)$$

Em tubo circular, que é as condições desse trabalho, sempre se tem alguma rugosidade. A rugosidade do tubo influencia totalmente na queda de pressão e conseqüentemente no escoamento. Para isso, é dado o fator de Darcy f que leva em conta possíveis rugosidades no tubo. A **Equação (19)**, mostra esse fator para caso em que o tubo é circular com o escoamento laminar.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (19)$$

com o fator de Darcy, a nova relação é dada pela **Equação (20)**.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{méd}^2}{2} \quad (20)$$

2.2.2 Fluido Não-Newtoniano

A maioria dos polímeros e alguns outros fluidos apresentam um comportamento diferente dessa relação de linearidade. Para essa diferença é diferenciado esse tipo de fluido como não-newtoniano.

O modelo de Lei de Potência começou a ser estudado por volta da década de sessenta por ACRIVOS et al. (1960) e foi passando por diversos aprimoramentos desde então, com resultados de simulações numéricas mais precisas e exatas com ajustes no modelo teórico. A Lei de Potência é o método analítico usado para caracterizar escoamentos de um fluido não-newtoniano.

2.2.2.1 Modelo de Lei de Potência

O modelo de Lei de potência trata-se da equação de tensão de cisalhamento para fluidos não-newtonianos, estabelecendo uma relação dessa tensão com alguns índices do próprio modelo. Essa relação pode ser vista abaixo na **Equação (21)**.

$$\tau_{xy} = K |\dot{\gamma}|^{n-1} \dot{\gamma}_{xy} \quad (21)$$

onde os termos K e n , são os índices de consistência e de lei de potência respectivamente, $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento e $\dot{\gamma}_{xy}$ o componente do tensor taxa de cisalhamento. É possível simplificar a fórmula se for considerado um termo chamado viscosidade aparente $\eta(\dot{\gamma})$, dada pela **Equação (22)** abaixo.

$$\eta(\dot{\gamma}) = K|\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (22)$$

A taxa de cisalhamento e o movimento do fluido, que será tratado de forma macroscópica, ou seja, tratando o fluido como um meio contínuo. Para ter informações sobre as características do fluido é necessário conhecer as velocidades, temperatura, pressão e densidade. Estas características são totalmente dependentes das coordenadas e do tempo e é preciso que se tenha alguma equação que seja possível conectar todos esses termos e com conservação de massa do fluido.

O modelo apresentado na **Equação (22)** apresenta grandes semelhanças com o modelo reológico lei de potência apresentado por CALDAS (2015) que utiliza alguns termos diferentes mas tendo o mesmo formato como base. Essa nova forma é apresentada na **Equação (23)** abaixo.

$$\mu(\dot{\gamma}) = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (23)$$

sendo K o índice de consistência, n o índice de potência μ o a viscosidade dinâmica e $\dot{\gamma}$ a taxa de deformação.

Algumas adaptações do modelo de potência foram sendo feitas, uma delas é a forma proposta por Carreau-Yasuda, que utiliza uma generalização dele (**Equação (24)**).

$$\tau_{xy} = \eta_0 \left[1 + \psi^2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial q_y} + \frac{\partial v_y}{\partial q_x} \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \left(\frac{\partial v_x}{\partial q_y} + \frac{\partial v_y}{\partial q_x} \right) \quad (24)$$

OSWALD e RUDOLPH (2015), propuseram um modelo que considera os efeitos da mudança de temperatura e de pressão no material durante o escoamento. Para o índice de consistência K é proposto que o mesmo seja dependente da temperatura, como mostra a equação a baixo.

$$K(T) = K_0 \cdot \exp[-a(T - T_0)] \quad (25)$$

sendo a , o parâmetro de dependência de temperatura.

Um fator que deve ser considerado importante para o escoamento é a pressão e sua mudança. BAUROS (1883), propôs adicionar um termo a mais na equação de Lei de Potência para que se possa considerar a mudança de pressão no escoamento. O modelo de Lei de Potência com os termos de temperatura e de pressão são apresentados na **Equação (26)**.

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = K_0 \cdot \exp[-a(T - T_0)] \cdot \exp[-b(p - p_0)] \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (26)$$

O ANSYS CFX utiliza em sua programação um modelo reológico similar ao visto anteriormente. Onde μ é o coeficiente de viscosidade aparente, $\dot{\gamma}$ a taxa de cisalhamento. Essa fórmula é dada abaixo.

$$\mu = K(\lambda\dot{\gamma})^{n-1} \quad (27)$$

2.3 MÉTODOS NUMÉRICOS

O aumento constante da tecnologia tem proporcionado um ambiente cada vez mais sofisticado quando o assunto é simulação computacional. Computadores mais velozes e com maior poder de processamento, nos permite uma melhor implementação de métodos numéricos.

Os métodos numéricos são modelos matemáticos que tem o objetivo de resolver problemas físicos através das equações de governantes de conservação. Existem alguns métodos numéricos. Dentre os métodos numéricos existentes, os mais utilizados são: Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Volumes Finitos (MVF), as siglas em inglês ficam FEM e FVM respectivamente.

O Método dos Elementos Finitos geralmente é utilizado para problemas que envolvam questões elasto-plásticos, enquanto o Método dos Volumes Finitos é utilizado mais para problemas que envolvem transporte de calor e massa em mecânica dos fluidos. Porém os usos dos mesmos não se limitam a isso, mas sim a preferência de quem estará utilizando (JÚNIOR, 2006).

A implementação desses métodos se dá através de códigos em programas e softwares e são utilizados modelando o problema na plataforma em que for escolhido para tratar deles.

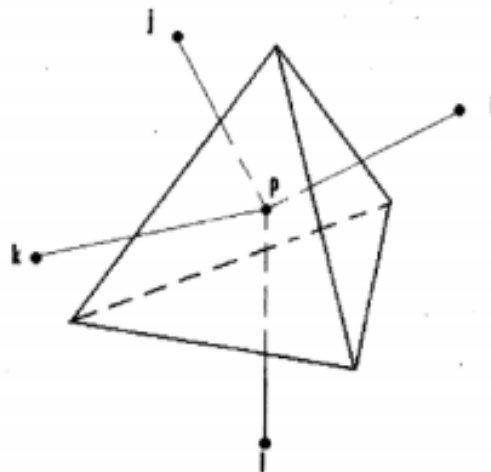
Este trabalho utiliza a implementação feita no ANSYS utilizando o Método dos Volumes Finitos.

2.3.1 Método dos Volumes Finitos

O Método dos Volumes Finitos foi desenvolvido em meados de 1970 por McDonald, MacCormack e Paullay, começando a se tornar um dos métodos preferidos entre cientistas e engenheiros que atuam na área de mecânica dos fluidos. A complexidade que pode existir em um problema com fluxos multifásicos ou turbulentos e a necessidade de um método que tenha uma boa aproximação fazem com que haja essa preferência. Uma das vantagens desse método é sua aplicabilidade a qualquer tipo de malha, podendo se adaptar a geometrias complexas (GONÇALVES, 2007).

A modelagem matemática no MVF tem como base a integração das equações de conservação de massa, energia e momentum, que devem estar na forma diferencial. Essa integração é dada em pequenos volumes de controle finitos, mostrados na **Figura 12** abaixo que são formados com base nos nós que se dispõem ao longo da geometria, usados para fazer todo o balanço para a conservação em todas as direções. Em casos bidimensionais os volumes de controle são retângulos ou triângulos, em casos tridimensionais, são usados hexaedros (HURTADO, 2011).

Figura 12 - Representação de um volume de controle com um nó no centro usado no MVF.



Fonte: Gonçalves (2007).

A equação de conservação geral de uma variável dependente ϕ é dada a seguir. A mesma está em forma diferencial divergente.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi v) = \nabla \cdot (Q\nabla\phi) + \psi \quad (28)$$

onde Q é o coeficiente de difusividade da grandeza dependente, v é a velocidade e ∇ o operador nabla.

Para o Método dos Volumes Finitos, a **Equação (28)** deve ser integrada. Com isso temos uma que representa o balanço em um volume de controle V , no qual é limitado pela superfície S .

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho\phi dV + \int_S \rho\phi v \cdot dS = \int_S Q\nabla\phi \cdot dS + \int_V \psi dV \quad (29)$$

As parcelas na equação representam os termos não estacionário, convectivo, difusivo e o termo fonte respectivamente (GONÇALVES, 2007).

Para obter as equações discretizadas da variável dependente, deve-se integrar a equação para cada um dos volumes de controle separados no domínio, ou seja, uma nova equação a cada vértice. Isso deve ser feito também para cada direção. As soluções do problema são finalmente obtidas com a resolução dos sistemas de equações que surgirem do balanço, geralmente resolvidos com uma programação em forma matricial.

3. ASPECTOS METODOLÓGICOS

3.1 PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE

O software que será utilizado é o ANSYS STUDENT 2021 R2, um software gratuito para estudantes que é disponibilizado pela ANSYS que é a empresa desenvolvedora. O notebook que será utilizado para as simulações possui as seguintes configurações: marca DELL do modelo Inspiron 14000, SSD HP S700 2.5", processador Intel® Core™ I5-4210U CPU@ 1.70GHz, com 8Gb de memória RAM e placa de Vídeo Nvidia GeForce 820M.

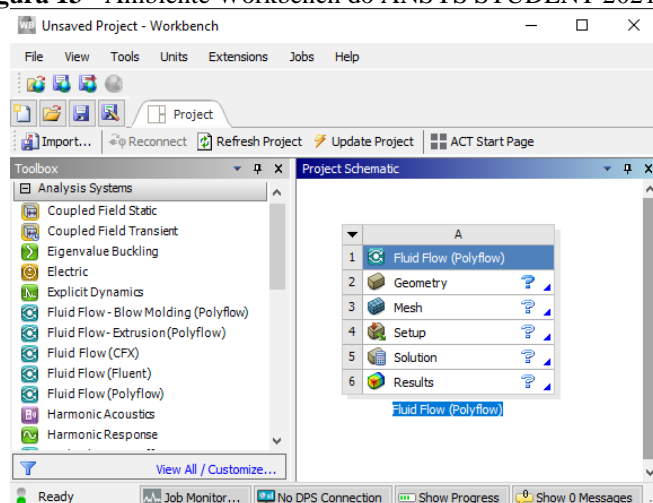
3.1.1 Procedimentos Iniciais

Para dar início a rotina de simulação, será necessário importar o sólido de um software para o outro, no caso, do software Inventor 2021 para o ANSYS. Afim de se obter a geometria de trabalho dentro do ambiente de simulações.

3.1.2 ANSYS

O ANSYS possui uma plataforma chamada Workbench. Nela é escolhido o tipo de simulação que se deseja fazer. Esse ambiente pode ser visto na **Figura 13** a seguir.

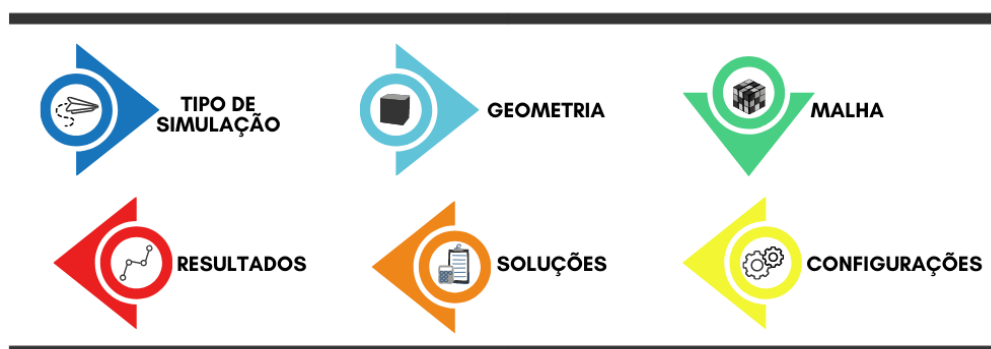
Figura 13 - Ambiente Workbench do ANSYS STUDENT 2021 R2.



Fonte: Autoria própria (2020).

Para poder chegar ao resultado desejado, o ANSYS estipula que seja dado alguns passos em sequência. Essas etapas garantem que tudo o que o programa precisa para gerar os resultados, seja feito passo a passo. Na Figura 14 a seguir, é possível ver um fluxograma do processo que deve ser seguido, desde o início, na escolha do tipo de simulação, até a última etapa que são os resultados.

Figura 14 - Fluxograma das etapas para a simulação.



Fonte: RODRIGUES (2020).

Na primeira etapa, é necessário saber o tipo de simulação que deseja realizar. Esse trabalho se trata de uma simulação de escoamento de um fluido não-newtoniano com troca de calor. Para isso, as opções *Geometry*, *Transiente Termal* e *Fluid Flow (Fluent)* devem ser escolhidas.

Em *geometry*, o sólido 3D que foi modelado geometricamente no Inventor 2020 deve ser importado ao ANSYS para ser trabalhado. Essa geometria será usada em todas as próximas etapas.

Chegando na terceira parte, deve ser gerado uma malha que será usada pelo programa para separar todos os volumes finitos utilizado que é necessário para a solução através do MVF. O tamanho da malha determina quão sofisticada ou próxima do real será a solução apresentada. Essa etapa é a que influencia no tempo total que ficará processando a simulação.

Após definir tudo sobre a malha, a próxima etapa é configurar as condições de contorno do problema abordado, como: tipo de fluido, velocidade, temperatura, pressão, etc. Esses parâmetros são de extrema importância para o resultado que se deseja obter, portanto deve-se ter muita cautela.

Com o sólido, a malha e as condições de contorno definidas, a solução do problema é o que vem a seguir. O ANSYS junta todas as informações, e começa a gerar os sistemas de

equações conservativas em todas as direções para cada nó que foi gerado na malha, resolvendo cada um deles.

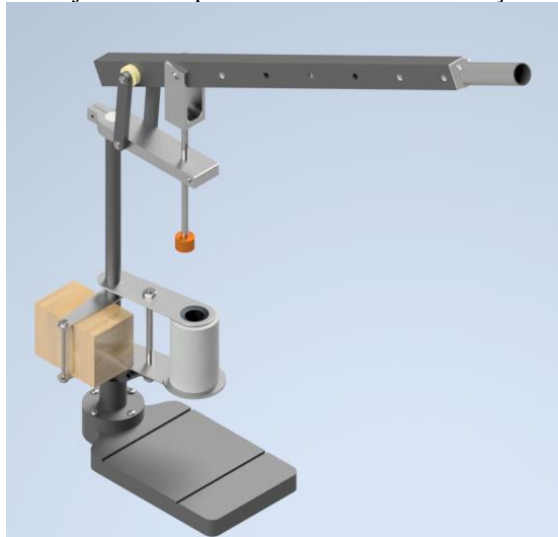
Por fim, os resultados são gerados a partir de toda solução encontrada. Os resultados podem ser apresentados em formas de imagens, animações e gráficos, tudo isso com diferença de cores para temperaturas e velocidades diferentes. Isso torna a análise mais fácil de ser efetuada a fim de se poder melhorar alguns aspectos.

3.2 SIMULAÇÕES

Para a realização desse estudo de escoamento é necessário entender as etapas do processo que envolvem a máquina desenvolvida mostrada na **Figura 15** abaixo. Ela é composta por um cilindro de aquecimento, onde ficará o polímero a ser fundido, envolto de uma resistência elétrica isolada por hastes de cerâmica.

Conectada ao cilindro de aquecimento, fica a tampa inferior que contém a geometria de saída, por onde o polímero escoará. As dimensões do cilindro e da tampa projetados inicialmente podem ser vistas no anexo 1 e 2.

Figura 15 - Projeto da Máquina desenvolvida na Iniciação Tecnológica



Fonte: Autoria própria (2019).

Para dar os primeiros passos, se faz necessário definir alguns fatores que serão usados como condições de partida e parâmetros iniciais da análise aqui proposta.

3.2.1 Parâmetros iniciais

A primeira condição inicial a definir é a temperatura média em que se deve deixar o polímero para que haja uma completa fusão do material. De acordo com a **Tabela 1**, a temperatura de fusão do PET é 260°C . Será usado 292°C como temperatura média.

Com a temperatura média de aquecimento do cilindro definida, pode-se determinar um intervalo de tempo e, com isso, definir a potência necessária da resistência que será utilizada, com base em um aquecimento prévio do cilindro. Desde a temperatura ambiente até a temperatura de fusão média definida.

Para saber qual a espessura do fio de resistência deveria ser usado, foram feitos cálculos simplificados da quantidade de calor necessária no sistema, e relacionado com o tempo para se achar a potência e conseqüentemente o diâmetro do fio.

$$Q = m_c c_c \Delta T + m_p c_p \Delta T + m_p l \quad (30)$$

$$Pt = \frac{1,2Q}{\Delta t} \quad (31)$$

$$R = \frac{V^2}{Pt} \quad (32)$$

$$d = \sqrt{\frac{4L\rho}{\pi R}} \quad (33)$$

A **Tabela 2** abaixo mostra os dados de entrada utilizados nessas equações.

Tabela 2 - Dados de entrada		
Descrição	Símbolo	Valores
Massa do cilindro	m_c	1,3
Massa máxima do polímero	m_p	1,0
Calor específico do cilindro a pressão constante	c_c	$486 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$
Calor específico do polímero	c_p	$1030 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$
Calor latente específico do polímero	l	$140000 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$
Diferença de temperatura	ΔT	270 K
Resistividade	ρ	$1390 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Fonte: Autoria própria (2019)

Com isso, os parâmetros aceitáveis para um fio usado como resistência elétrica, enrolado ao cilindro de aquecimento, elevar a temperatura em uma diferença de $270K$ em $60s$ seriam os seguintes:

Diâmetro de $1mm$;

Comprimento de $3,25m$;

Potência de aproximadamente $2804W$;

Isso também, considerando uma tensão de rede de $127V$.

3.2.1.1 Pré-Aquecimento do Cilindro

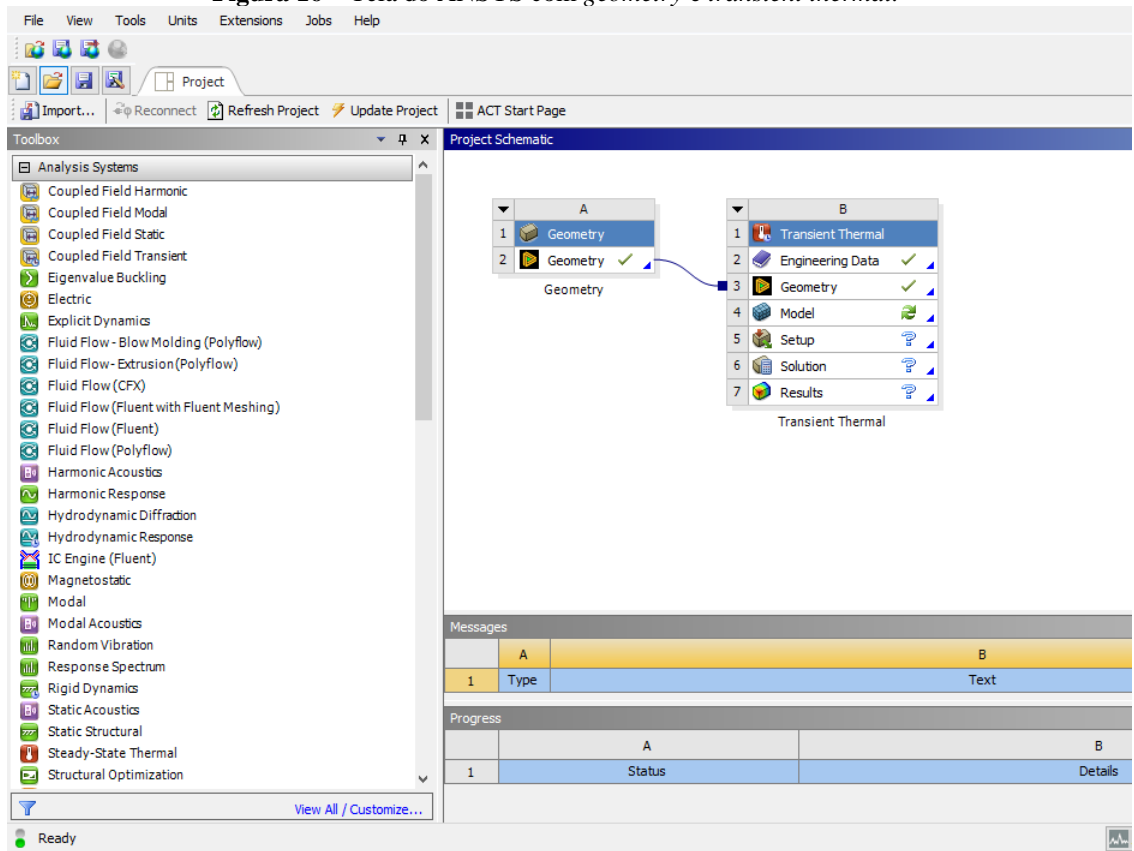
Para esta etapa, será considerado os parâmetros utilizados no artigo escrito para a Iniciação Tecnológica. A potência do fio utilizado como resistência será de $2804W$.

Será feito uma simulação do aquecimento com a potência dada acima, utilizando o *Transient Termal* do *TollBox* do ANSYS. Os passos a serem seguidos em uma simulação de aquecimento, são os seguintes:

- Definição da Geometria;
- Geração da Malha;
- Condições de Contorno;
- Solução;
- Resultados.

Inicialmente, deve ser modelada a geometria de trabalho, podendo ser feito no software de preferência e salvo em um formato genérico de arquivo para modelos 3D. Após a modelagem estar completa, deve-se abrir o *workbench* do ANSYS e adicionar o *geometry* no *Project Schematic*. Com *geometry* adicionado, é necessário abrir algum dos ambientes de desenho e importar o modelo que foi desenhado. Após isso, é possível adicionar a ferramenta *Transient Termal* ao *Project Schematic* e fazer a ligação com o *geometry*, a **Figura 16** mostra como deve ficar a tela do ANSYS.

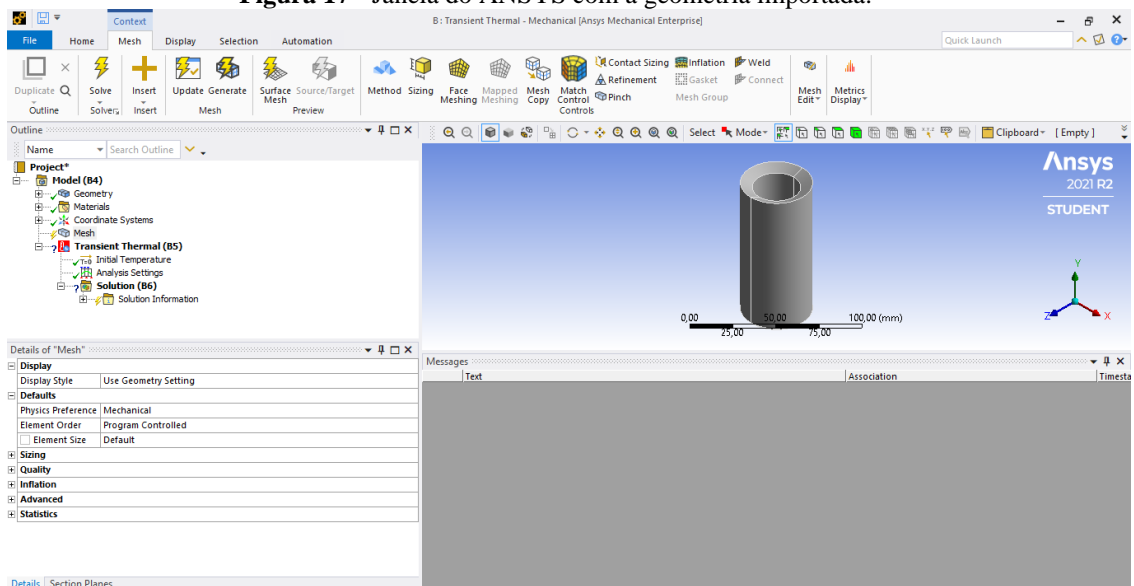
Figura 16 – Tela do ANSYS com *geometry* e *transient thermal*.



Fonte: Autoria própria (2021).

Passado essas etapas, o próximo a se fazer é gerar a malha clicando com o botão direito do mouse em *model* e escolhendo a opção *edit*. A interface será aberta, como mostrado na **Figura 17**.

Figura 17 - Janela do ANSYS com a geometria importada.

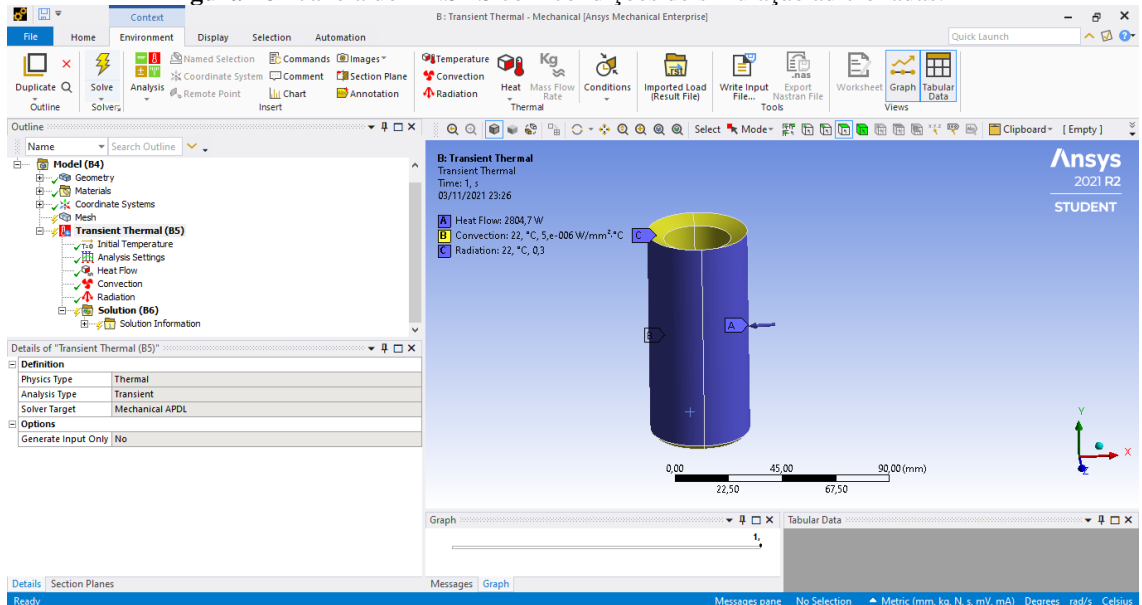


Fonte: Autoria própria (2021).

Na árvore mostrada a esquerda, clicando na opção *mesh*, deve ser inserido o tamanho de elemento de malha que se deseja em *elemente size*.

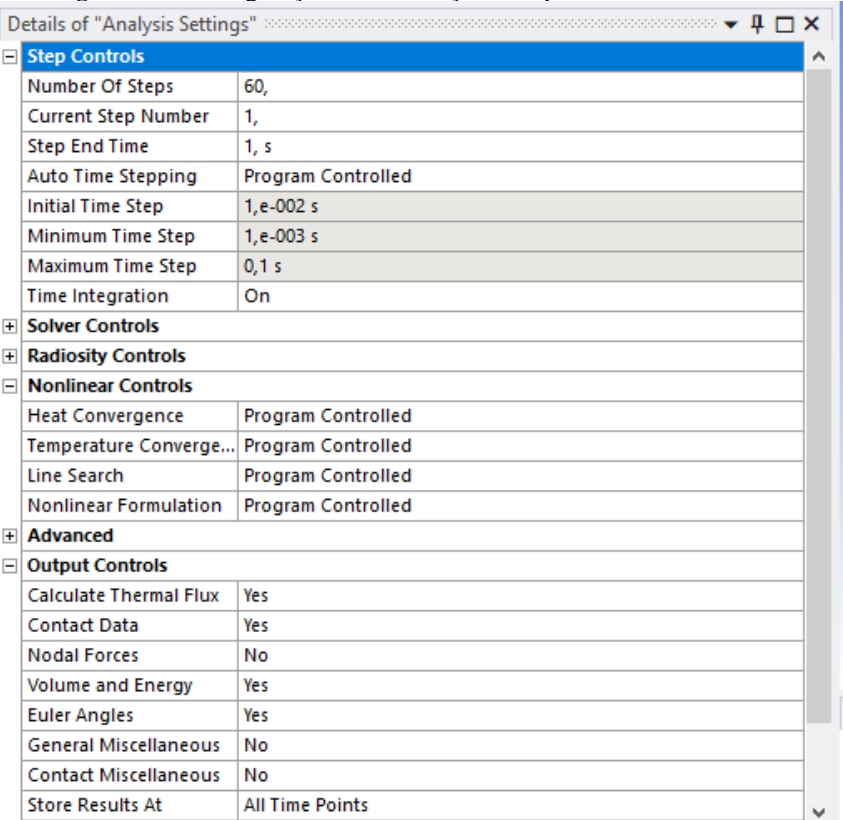
Agora, para que a simulação se aproxime o máximo da realidade, é necessário que sejam definidas as condições de contorno da forma mais realista possível. Na árvore do lado esquerdo, clicando em *Transient Thermal*, aparecerá algumas opções para serem definidas como condições de contorno. Para esse problema, será adicionado a função *Heat Flow* com a potência do fio de resistência escolhido, convecção a ar estagnado com temperatura ambiente de 22°C , e radiação pelas superfícies externas. A **Figura 18** ilustra as configurações adicionadas.

Figura 18 - Janela do ANSYS com condições de simulação adicionadas.



Fonte: Autoria própria (2021).

Após adicionar as condições de contorno, o que resta são as configurações de tempo e quantidade de etapas de cálculo. Como o fio de resistência foi dimensionado para aquecimento do cilindro em um tempo de 60s, também será usado este tempo na simulação. Ficando as configurações da forma mostrada na **Figura 19**.

Figura 19 - Configurações da simulação de aquecimento do cilindro.


Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Number Of Steps	60,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Initial Time Step	1,e-002 s
Minimum Time Step	1,e-003 s
Maximum Time Step	0,1 s
Time Integration	On
Solver Controls	
Radiosity Controls	
Nonlinear Controls	
Heat Convergence	Program Controlled
Temperature Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Nonlinear Formulation	Program Controlled
Advanced	
Output Controls	
Calculate Thermal Flux	Yes
Contact Data	Yes
Nodal Forces	No
Volume and Energy	Yes
Euler Angles	Yes
General Miscellaneous	No
Contact Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points

Fonte: Autoria própria (2021).

A próxima etapa é o cálculo da solução e análise dos resultados. Clicando em *Solve* na barra superior, o ANSYS começa a fazer os cálculos.

3.2.2 Aquecimento do Polímero

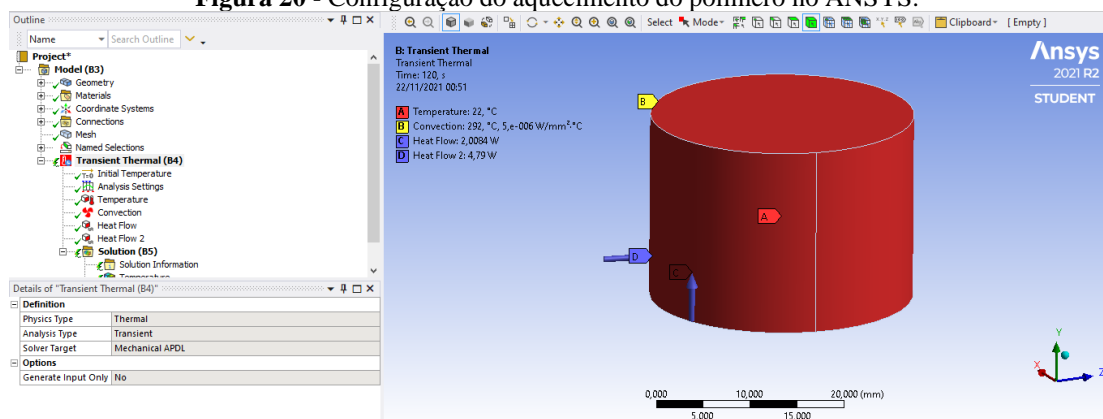
No aquecimento do polímero, será utilizado a temperatura ambiente do cilindro aquecido como condição inicial, estando o polímero em temperatura ambiente. A simulação de transferência de calor será realizada para ter uma aproximação do tempo necessário que o polímero levará para chegar a uma temperatura média de 292°C , que será considerado a fusão total do material que estará dentro do cilindro.

Para essa simulação, as etapas iniciais são iguais a da simulação anterior: definição de geometria, importação para o ANSYS *geometry*, fazer a ligação com o *transient thermal* e geração de malha.

Após as primeiras etapas básicas, é possível definir as condições de contorno para esse problema. Como a fusão do polímero se dará dentro do cilindro de aquecimento através de um

ambiente de temperatura controlado, a primeira condição é a temperatura média que será usada. Para ter uma aproximação melhor, pode ser colocada uma condição de convecção no alto da geometria, considerando um ar estagnado na temperatura média de aquecimento e na parte de baixo e nas paredes laterais, será considerado uma condução de calor por conta do contato com o cilindro de aquecimento. A configuração deve ficar como mostrado na figura.

Figura 20 - Configuração do aquecimento do polímero no ANSYS.



Fonte: Autoria própria (2021)

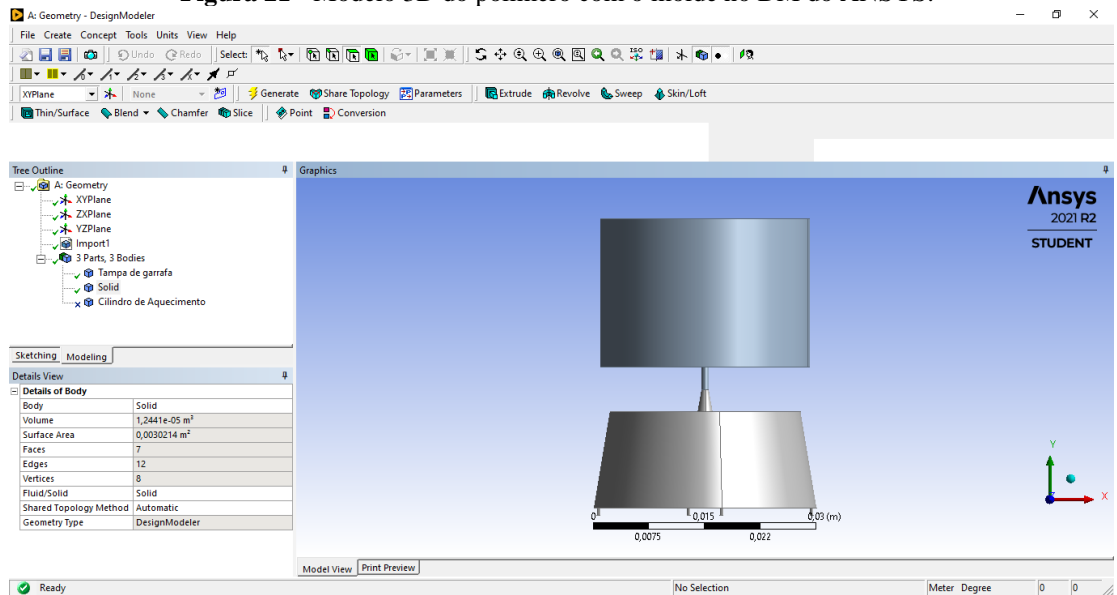
Logo após, deve-se ir para a etapa de resolução do problema.

3.2.3 Escoamento do Polímero

Esta etapa é a que mais demanda atenção. Será utilizado a temperatura ambiente do cilindro de aquecimento. O modelo utilizado para escoar o material será um sólido aproximado de uma tampa de garrafa pet de 2L.

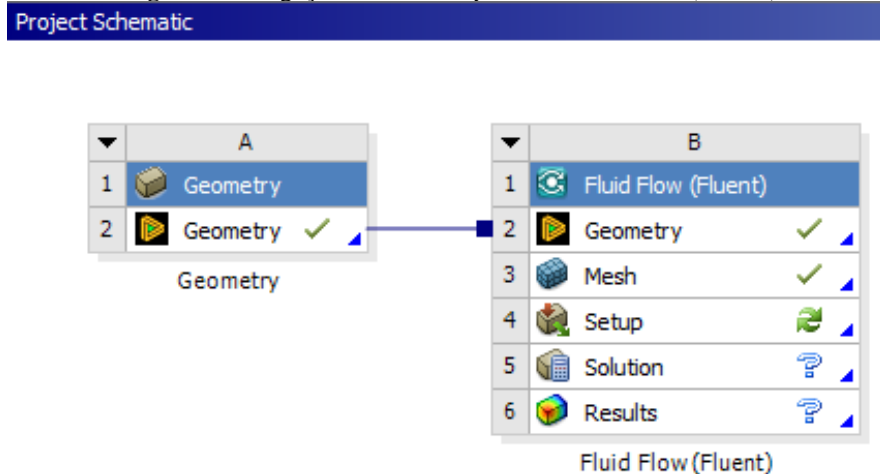
No procedimento inicial, deve-se importar, para o *geometry*, o modelo que contém o local onde o polímero estará e também o local que será preenchido por ele no processo de injeção. A **Figura 21** mostra como deve ficar o modelo 3D. Logo após, deve-se fazer a ligação com o *Fluid Flow (Fluent)*. O ambiente do *workbench* deve ficar como mostrado na **Figura 22**.

Figura 21 - Modelo 3D do polímero com o molde no DM do ANSYS.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 22 - Ligação do *Geometry* com o *Fluid Flow (Fluent)*

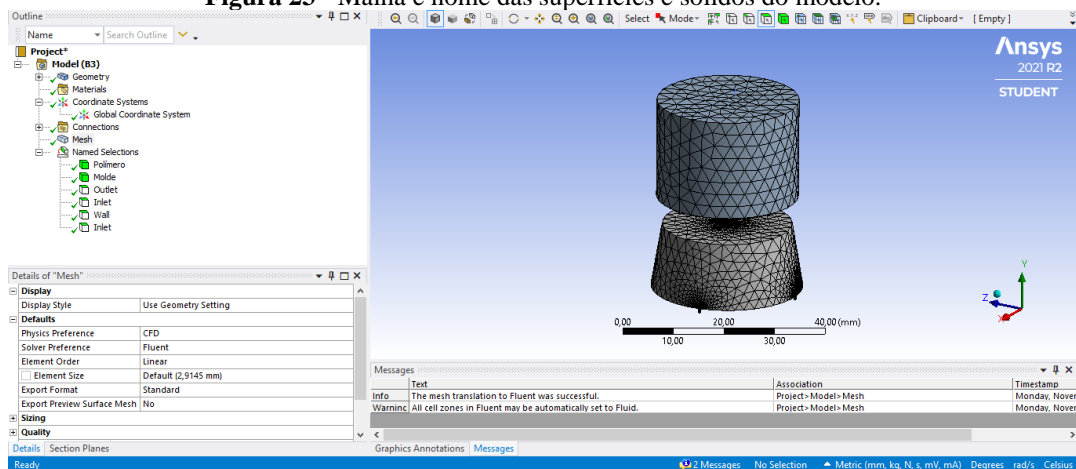


Fonte: Autoria própria (2021).

A próxima etapa é a criação da malha. Nessa simulação é necessário definir algumas superfícies e sólidos, e nomeá-los, a fim de facilitar nas configurações posteriores. Será feito a definição das seguintes superfícies e sólidos: o polímero, o model, a saída de ar, as paredes. A configuração deve ficar como mostrado na **Figura 23**.

Com essas definições, já é possível gerar a malha.

Figura 23 - Malha e nome das superfícies e sólidos do modelo.

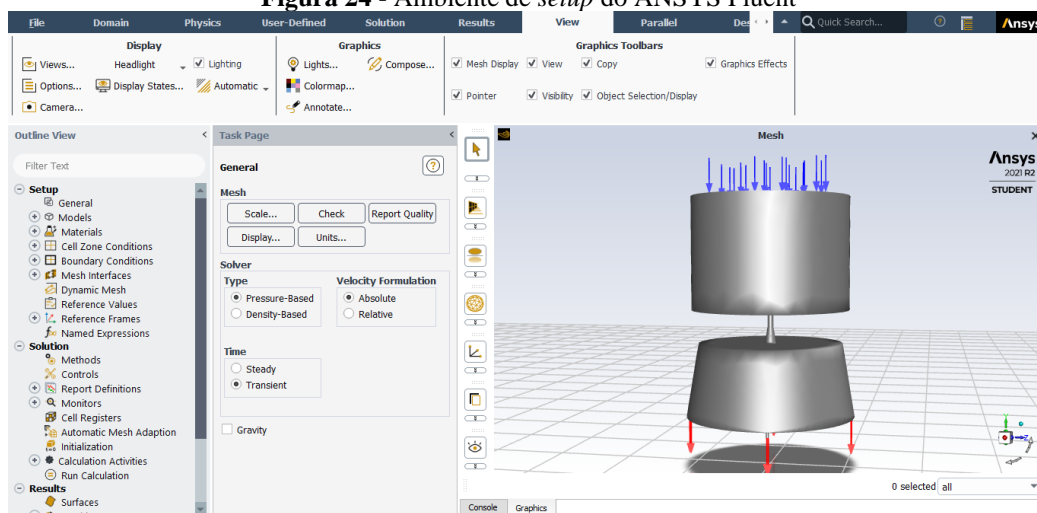


Fonte: Autoria própria (2021).

Após a geração da malha, deve-se atualizar as etapas do *Project Schematic* e ir para a etapa de configuração da simulação dando duplo clique ou clicando com o botão direito do mouse, e clicando em *edit*.

É nesta etapa de configuração onde se consegue definir como será a simulação, os materiais, as condições que estarão submetidos, temperatura, pressão e velocidade. A interface do tópico *setup* pode ser vista na **Figura 24**.

Figura 24 - Ambiente de *setup* do ANSYS Fluent



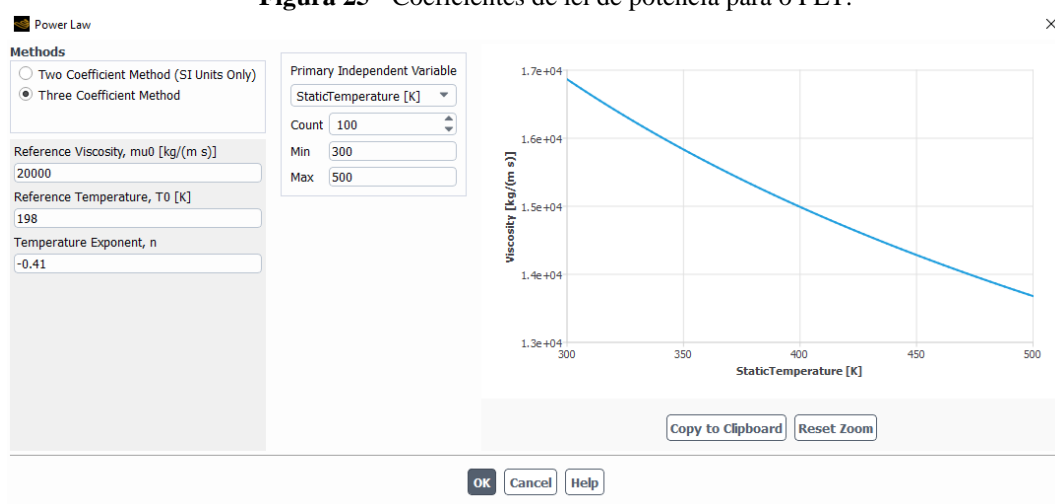
Fonte: Autoria própria (2021).

Primeiro, deve-se escolher a opção *transient* para que se possa ter um problema resolvido de forma transiente ou não estacionário, e também a opção *gravity*. Em seguida, na árvore *outline view* deverá ser colocado as seguintes configurações de acordo com cada tópico ali mostrado:

- Models, multiphase, models, Volume of Fluid;
- Models, viscous, k-epsilon;
- Materials, Fluid, Create/Edit, Fluent Database, water-liquid, copy, ok, Viscosity, power-law.

Com essa etapa, será necessário colocar os valores de referência para o PET na lei de potência, como mostrado na **Figura 25**, indicando o PET como a segunda fase física do problema.

Figura 25 - Coeficientes de lei de potência para o PET.



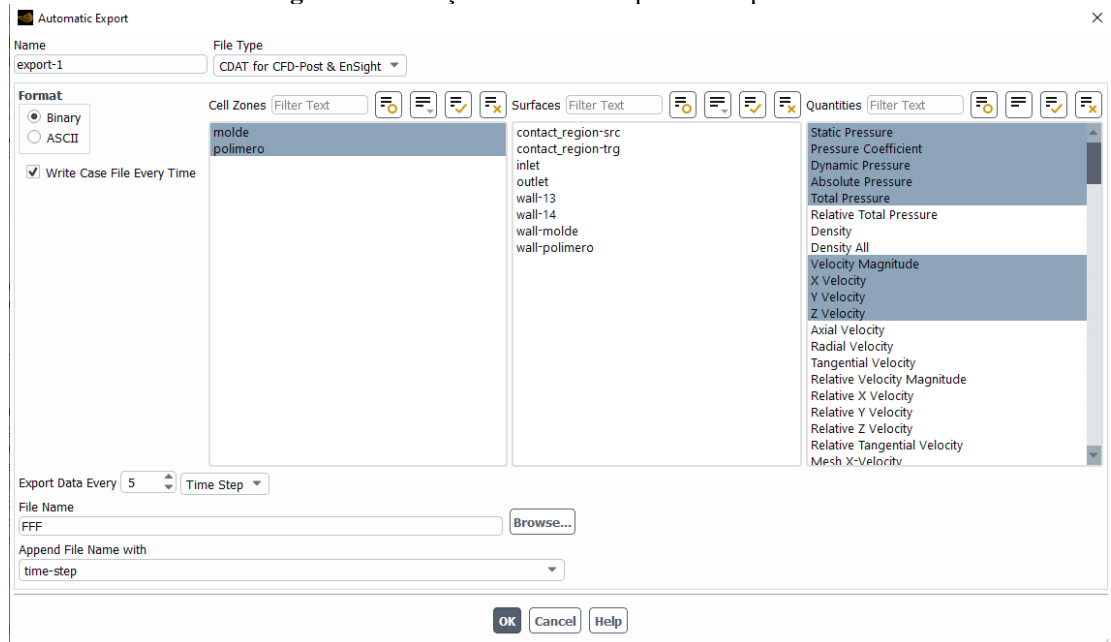
Fonte: Autoria própria (2021).

Continuando, deve-se ir em *cell zone conditions* para editar e pressão inicial do problema e o local em que está agindo e logo depois em *initialization* configurar onde cada fração volumétrica será aplicada.

- Cell zone conditions, operations conditions, 10MPa;
- Initialization, hybrid, initialize, patch, phase, phase 2, polímero, value, 1, patch;

Para exportar os resultados que serão calculados é preciso ir em *Calculation activities* e configurar as saídas de resultados de acordo com a necessidade, como mostrado na **Figura 26** abaixo.

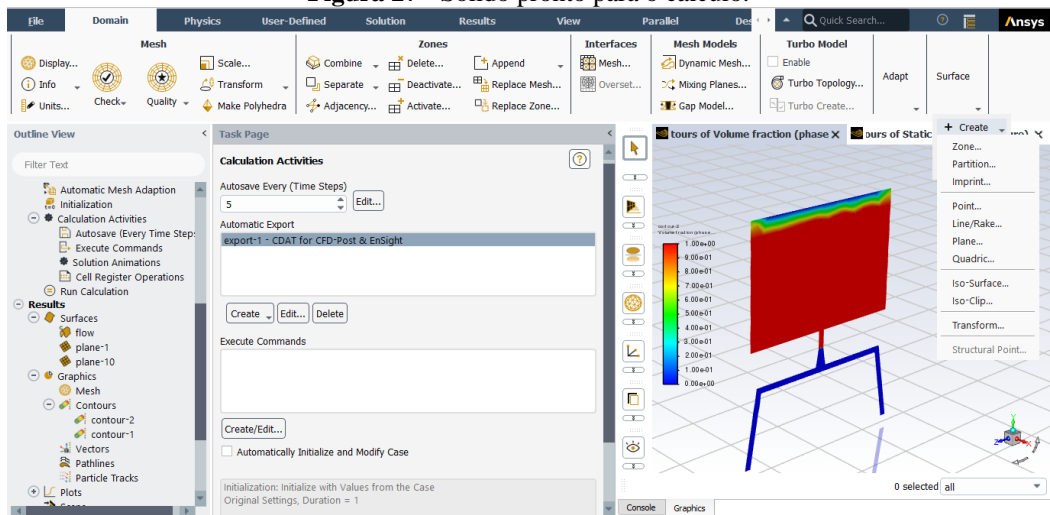
Figura 26 - Seleção de resultados para ser exportados.



Fonte: Autoria própria (2021).

Uma das últimas etapas de configuração, é preparar a visualização do processo para o momento em que se estará sendo calculado o problema. Para isso, deve-se criar uma *surface* no local indicado na **Figura 27**, ir em *contour*, selecionar a opção *Volume Fraction* e *Phase 2*, que representa o polímero de trabalho utilizado.

Figura 27 - Sólido pronto para o cálculo.



Fonte: Autoria própria (2021).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AQUECIMENTO DO CILINDRO

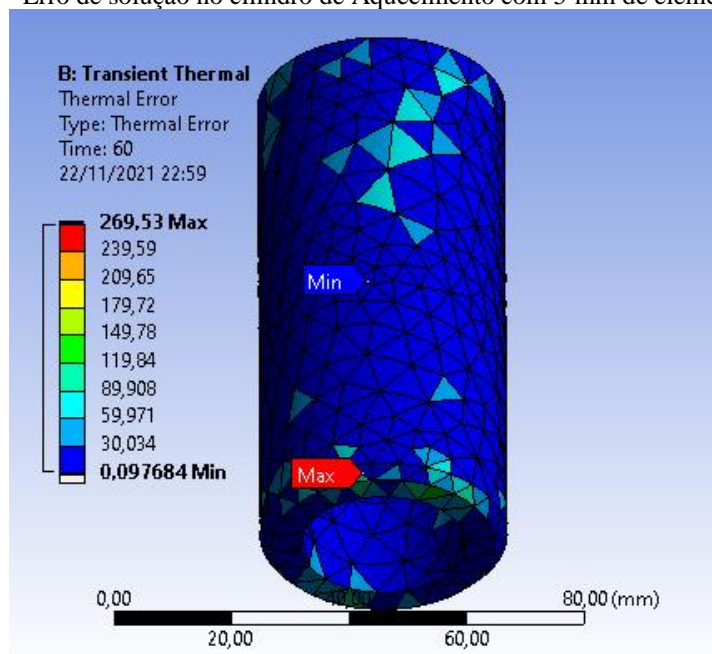
Antes de analisar as simulações propriamente dita, é necessário avaliar o erro relativa relacionado aos tamanhos de elementos da malha.

4.1.1 Convergência da Malha

Para saber se a condição da malha é o suficiente para o problema, é feito o teste para analisar o erro térmico relativo com os tamanhos de elementos de malha. Testou-se 3 tamanhos distintos mantendo os outros parâmetros de simulação iguais.

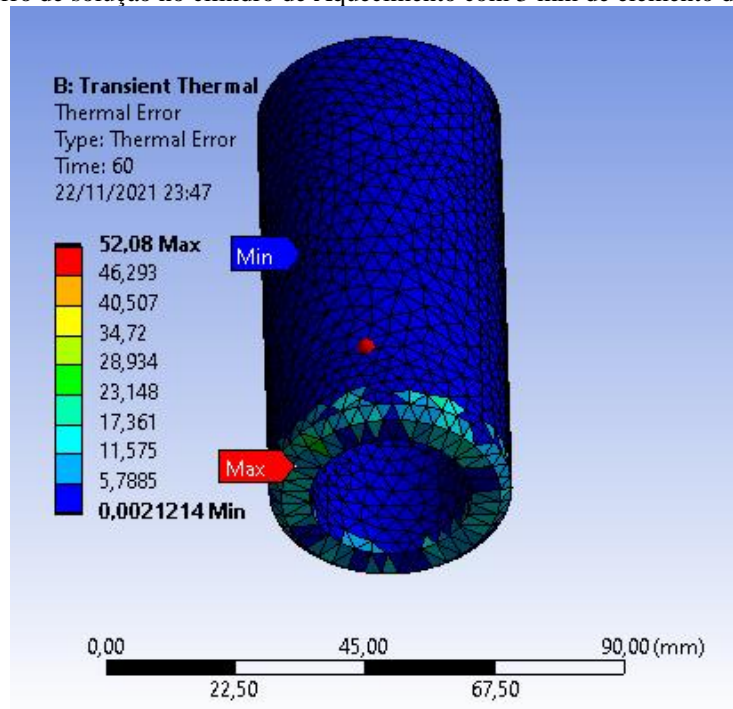
Nas figuras abaixo, os testes de erros podem ser vistos. Foram feitos testes para malhas com elementos de 5 mm (2758 volumes), 3 mm (8590 volumes) e 1,5 mm (42470 volumes).

Figura 28-a – Erro de solução no cilindro de Aquecimento com 5 mm de elemento de malha.



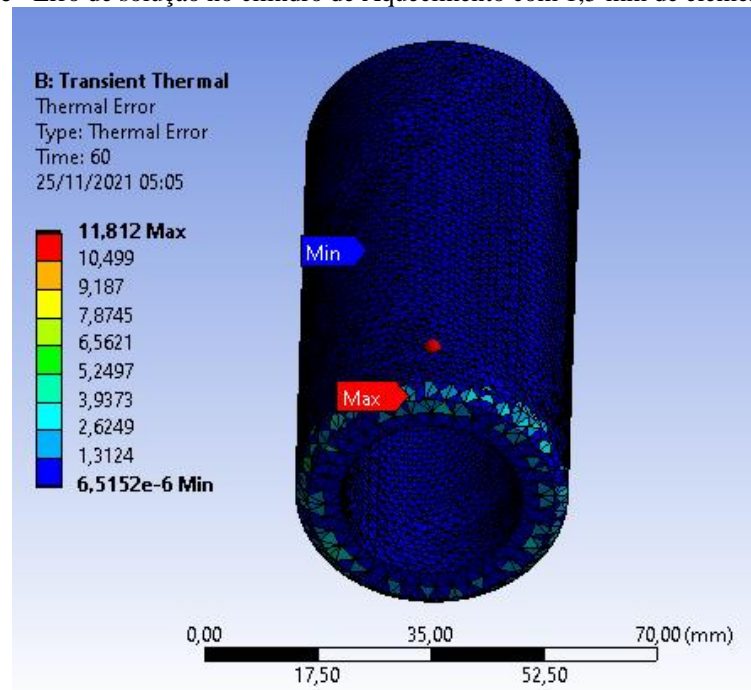
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 28-b - Erro de solução no cilindro de Aquecimento com 3 mm de elemento de malha.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 28-c - Erro de solução no cilindro de Aquecimento com 1,5 mm de elemento de malha.



Fonte: Autoria própria (2021).

Nota-se que na **Figura 28-a** que o erro relativo à temperatura do cilindro fica em uma média entre 59°C e 30°C , chegando a ter regiões que esse erro ultrapassa 200°C . Isso

mostra o quão impreciso pode ser os resultados obtidos da simulação com elementos de malha nesse tamanho para um caso como esse.

A **Figura 28-b**, de elementos com 3 *mm*, mostra uma média de erro entre 5 °C e 11 °C, o que ainda não será considerado aceitável. Pelo fato de que o controlador de temperatura que será usado, considera aquecer 2°C acima da temperatura requerida, desligando e esperando que a temperatura atinja 2°C abaixo dessa mesma temperatura média desejada para que possa retornar a ligar a resistência. Tendo, assim, 4°C de variação.

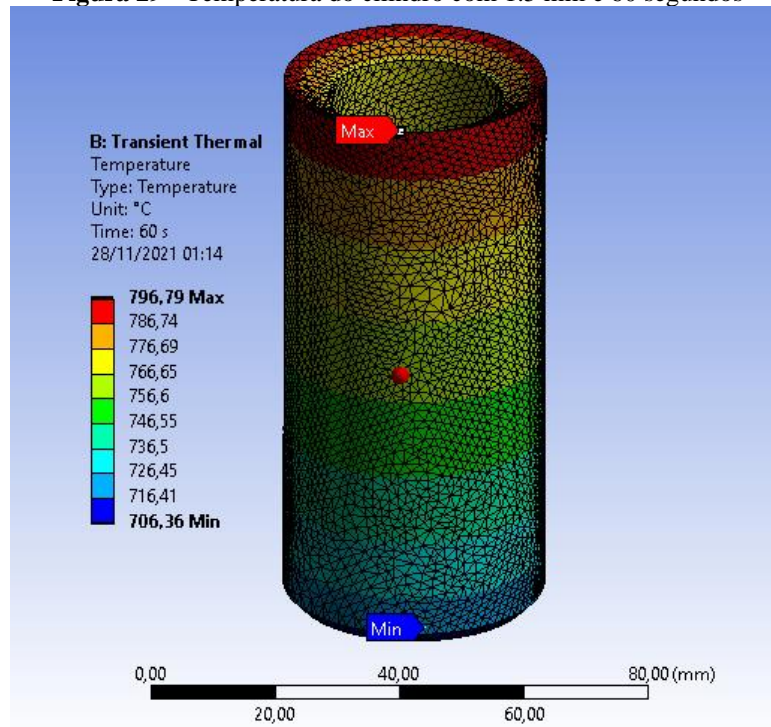
É possível ver na **Figura 28-c**, que a média de erro está bem menor do que as anteriores, mostrando uma média que varia entre 1 °C e 2 °C. O valor máximo do erro encontrado foi 11,8 °C em um único ponto. Os erros maiores são acumulados na parte inferior do cilindro devido ao fato de que não foi imposto nenhuma condição de contorno naquela região. Poderia ser adicionado uma pequena condução de calor, por ser a região em que fica a tampa e a geometria de saída.

Essa malha gerada com 1,5 *mm*, mostra uma média de erro baixa e aceitável para o problema aqui desenvolvido. Caso ainda não fosse possível obter um valor médio de erro que fosse aceito para o problema, não seria possível melhorar a malha devido a restrições quanto ao número de elementos de malha na versão estudantil do ANSYS.

Será usado a malha com elementos de 1,5 *mm* para que seja analisado o aquecimento do cilindro de aquecimento.

A simulação de aquecimento foi feita utilizando 60 segundos como tempo definido para que fosse aquecido o cilindro com a potência de 2804 *W* do fio de resistência. Essa simulação é mostrada na figura abaixo.

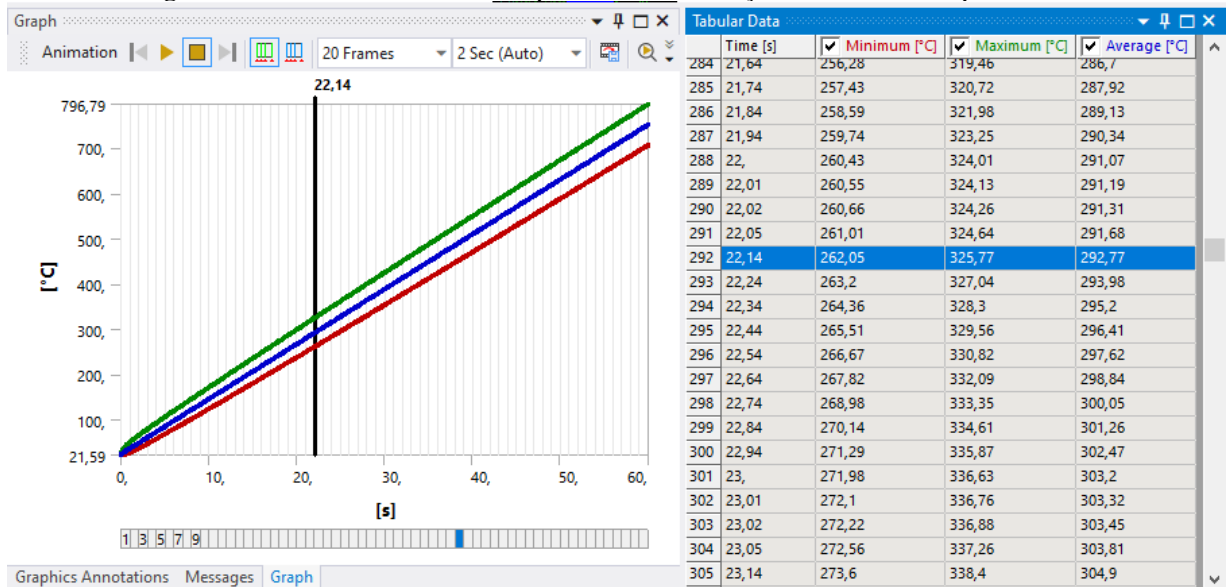
Figura 29 - Temperatura do cilindro com 1.5 mm e 60 segundos



Fonte: Autoria própria (2021).

Como mostrado na figura acima, os parâmetros iniciais impostos para essa simulação foram mais que o suficiente para ultrapassar a temperatura de aquecimento requerida. Com 60 segundos de aquecimento do cilindro, seria possível chegar a $796\text{ }^{\circ}\text{C}$, e isso gastando um tempo de processamento de $2\text{ h }41\text{ m}$. A **Figura 30** abaixo, mostra a imagem de um gráfico e uma tabela gerada pelo ANSYS mostrando em que tempo foi atingido os valores de temperatura que já seriam satisfatórios para o problema.

Figura 30 – Gráfico e tabela das temperaturas da simulação do cilindro de aquecimento.



Fonte: Autoria própria (2021).

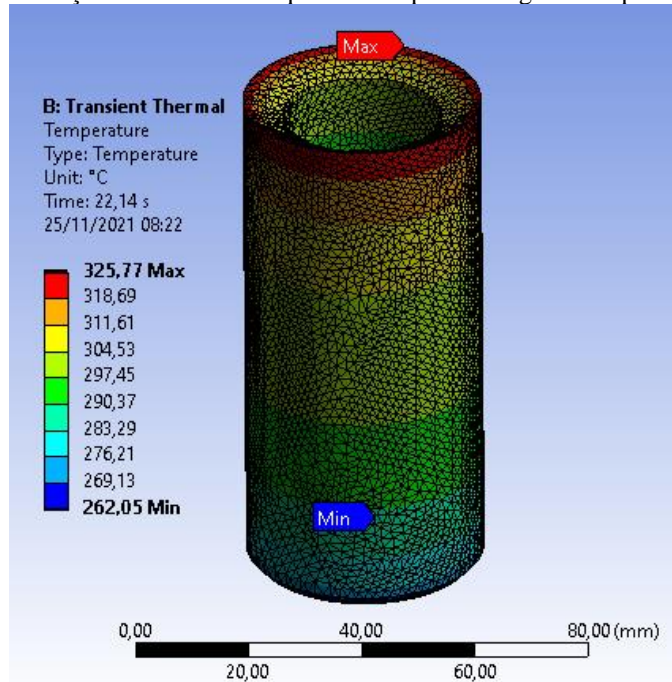
Pode-se ver que no tempo 22,14 segundos, o cilindro atinge uma temperatura média de 292,77 °C que é a temperatura média requerida.

4.1.2 Resultados do Aquecimento mudando parâmetros

Sabendo que o fio de resistência está superdimensionado para o tempo definido, tem-se duas possíveis melhorias viáveis: reduzir o tempo que o cilindro ficará aquecendo, deixando o processo um pouco mais rápido, e também, diminuir a potência do fio escolhido, o que deixaria o custo de aquisição mais baixo, fazendo com que seja usado os 60 segundos atingindo apenas a temperatura desejada.

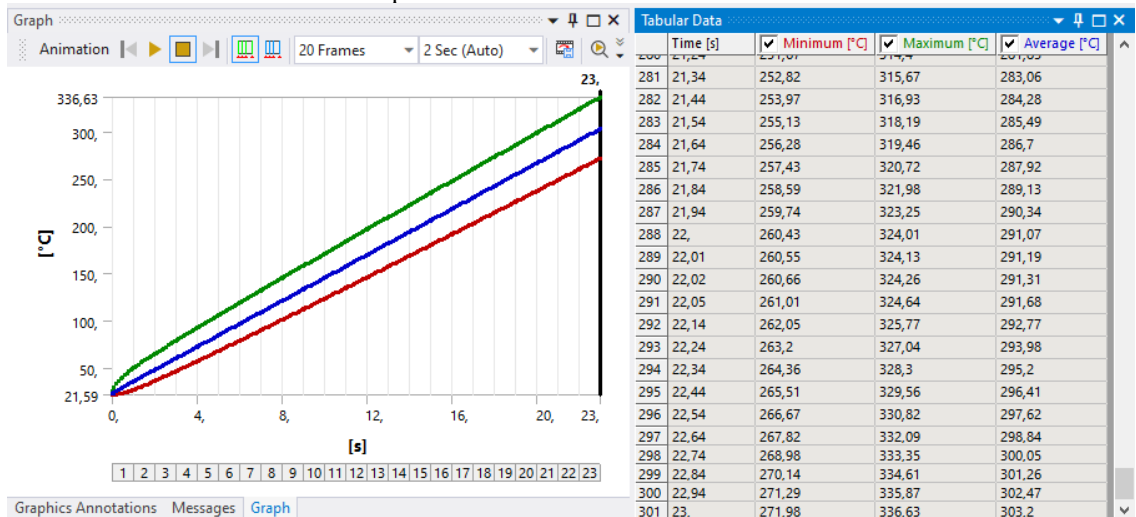
Repetindo a simulação, porém, desta vez, tendo o tempo total de aquecimento como 23 s, foi obtido os mesmos valores mostrados até os 23 s da **Figura 30**. Essa nova simulação e também a tabela e gráfico, podem ser vistas na **Figura 31** e **Figura 32** abaixo respectivamente.

Figura 31 – Simulação do cilindro de aquecimento para 23 segundos e potência de 2804W.



Fonte: Autoria própria (2021).

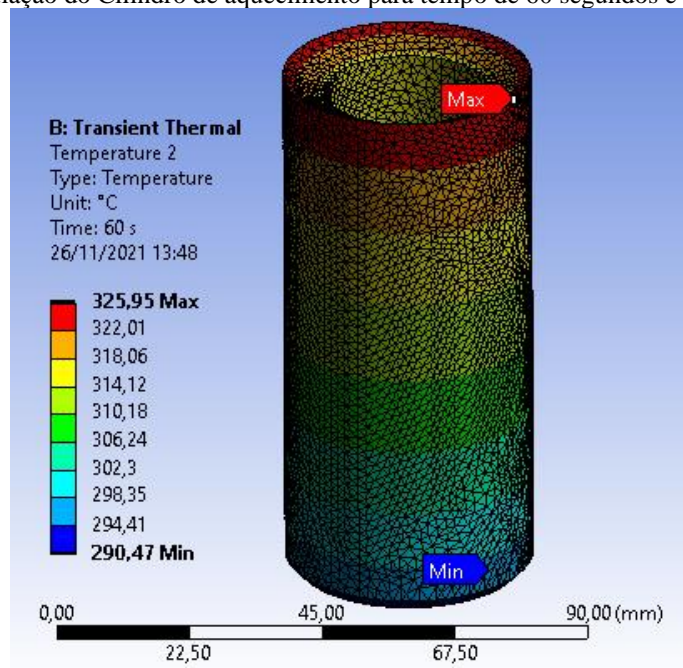
Figura 32 – Tabela e gráfico da simulação do cilindro de aquecimento tempo de 23 segundos e potência de 2804W.



Fonte: Autoria própria (2021).

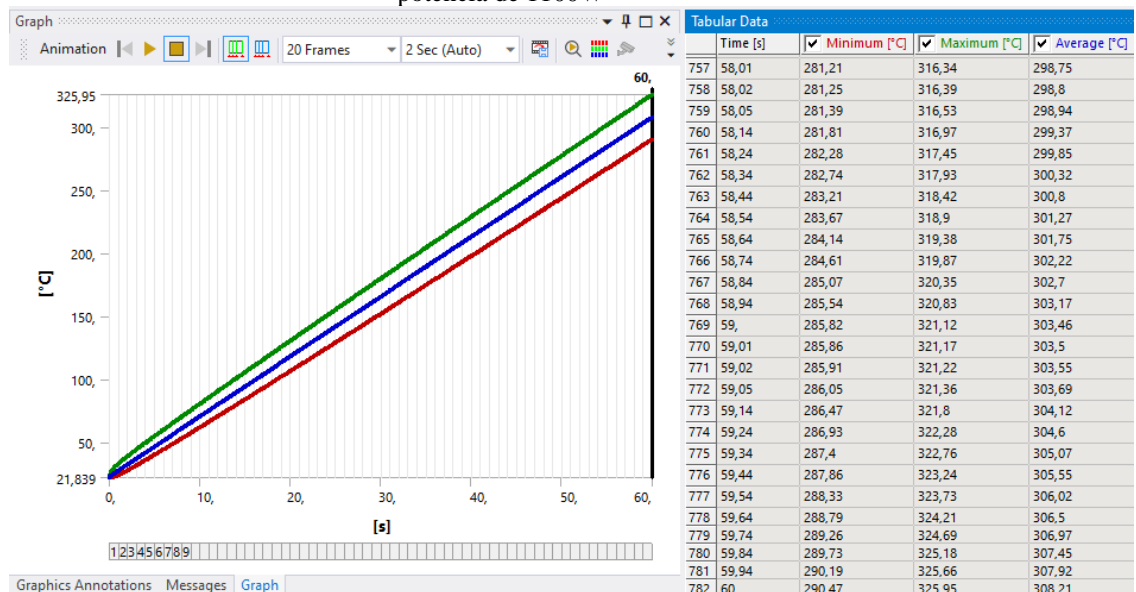
Da mesma forma, a **Figura 31** apresenta uma simulação que pode indicar qual a potência do fio a se escolher, para o tempo de 60 segundos.

Figura 33 – Simulação do Cilindro de aquecimento para tempo de 60 segundos e potência de 1100W.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 34 - Tabela e gráfico da simulação do cilindro de aquecimento para tempo de 60 segundos e potência de 1100W

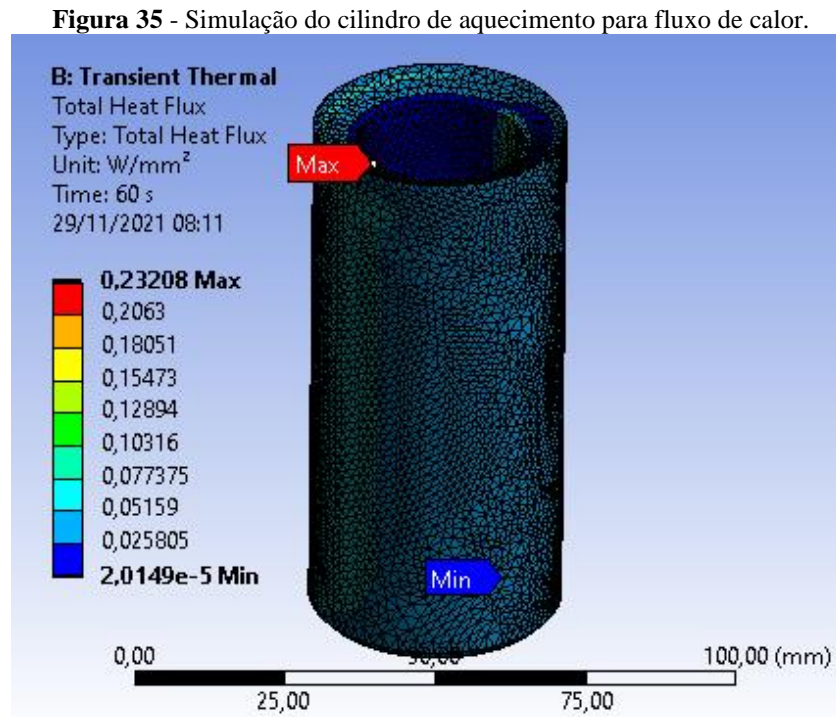


Fonte: Autoria própria (2021).

Com base na simulação realizada da figura anterior, pode-se ter um fio de potência 1100 W que será possível aquecer o cilindro até a temperatura média desejada.

Foi testado também uma simulação com parâmetros diferentes. Desta vez especificando o tempo de aquecimento e as temperaturas iniciais e finais, a fim de se obter o

fluxo de calor médio. A **Figura 35** mostra como ficou essa simulação com os valores máximos e mínimos do fluxo de calor.



Fonte: Autoria própria (2021).

Com esse resultado, o software também nos fornece o fluxo de calor médio que é de $4,7079 \cdot 10^{-2} W/mm^2$. Assim é possível multiplicar esse valor por $23396 mm^2$ que é a área de superfície do cilindro, que será a superfície de aquecimento, para poder obter um valor de potência aproximado para o fio utilizado como resistência. Fazendo essa conta, se encontra o valor de $1101,46 W$, que é aproximadamente igual ao com a potência sugerida pela **Figura 33**.

4.2 AQUECIMENTO DO POLÍMERO

Para a simulação de aquecimento do polímero também foi feito primeiro os testes de erros térmico e depois a análise da simulação.

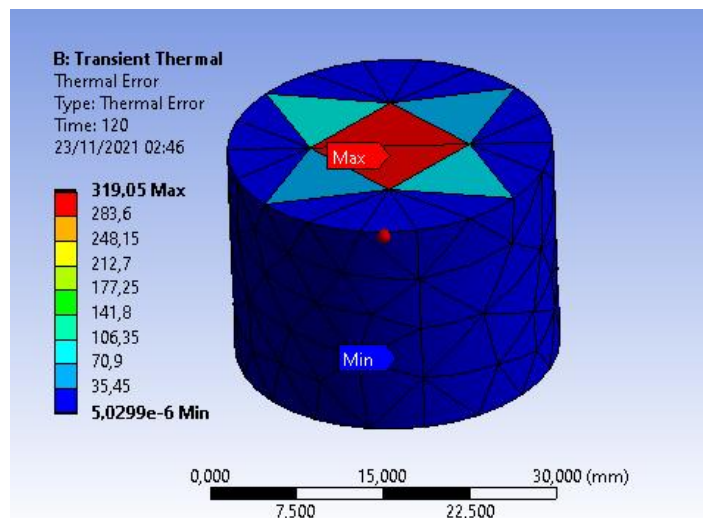
4.2.1 Convergência da Malha

Para saber se a condição da malha é o suficiente para o problema, foi feito novamente o teste para analisar o erro de temperatura relativo com os tamanhos de elementos de malha

escolhidos, mas dessa vez com a geometria que representa um volume de polímero a ser aquecido.

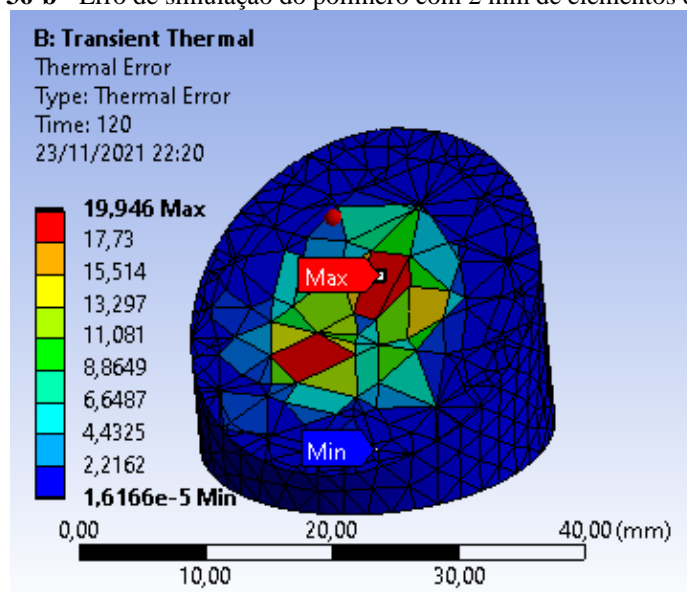
Inicialmente, para o polímero foi testado os erros com um tempo de 120 segundos e as condições de contorno já descritas. Nas **Figura 36, Figura** e podem-se ver os erros térmicos relativos com elementos de malha de 5 mm (552 volumes), 2 mm (2759 volumes) e 0,5 mm (47195 volumes) respectivamente.

Figura 36 – Erro de simulação do polímero com 5 mm de elementos de malha.



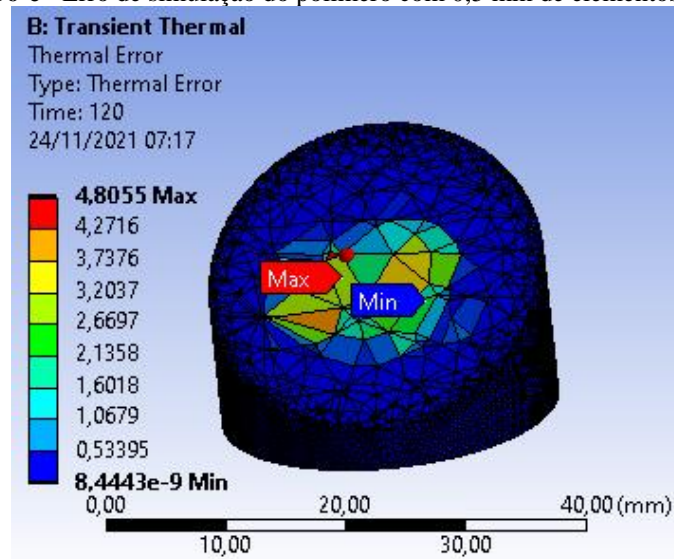
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 36-b - Erro de simulação do polímero com 2 mm de elementos de malha.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 36-c - Erro de simulação do polímero com 0,5 mm de elementos de malha.

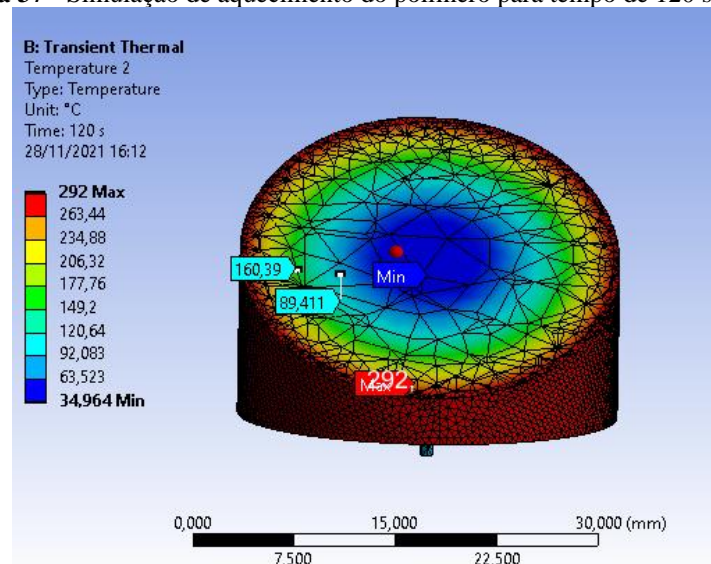


Fonte: Autoria própria (2021).

Pode-se notar nas figuras acima mostradas, que o erro térmico relativo sai do seu máximo de $319^{\circ}C$, em elementos definidos de 5 mm , para um máximo de $4,8^{\circ}C$ na simulação em que os elementos são de $0,5\text{ mm}$.

Abaixo na **Figura 37** tem-se a simulação do polímero aquecido para elementos de malha de $0,5\text{ mm}$ e um tempo de 120 segundos.

Figura 37 - Simulação de aquecimento do polímero para tempo de 120 segundos.



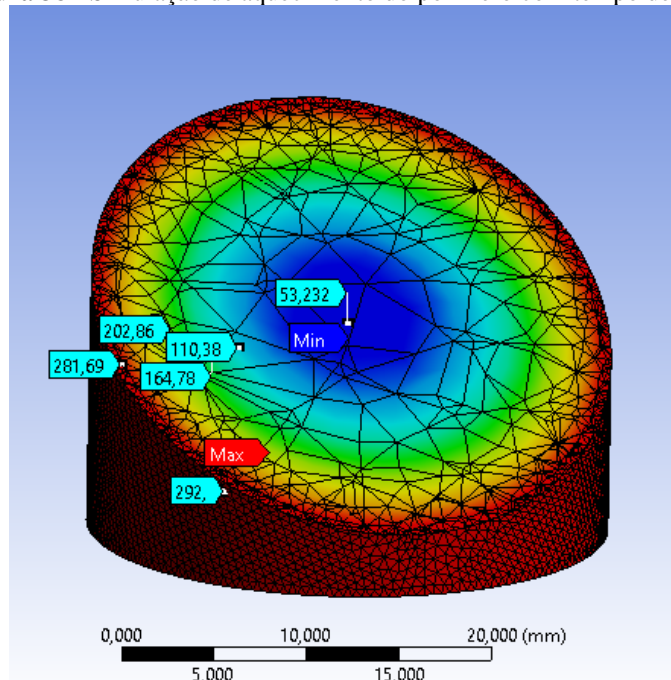
Fonte: Autoria própria (2021).

Como é possível ver na **Figura 37** acima, as menores temperaturas são registradas no centro do sólido que representa o polímero. Isso se dá devido às condições de contorno impostas

a esse problema, como a temperatura da parede estar em $292\text{ }^{\circ}\text{C}$, condição que foi colocada devido ao contato direto com o cilindro de aquecimento que estará nesta temperatura, respeitando então, a condição de não escorregamento para transferência de calor. Os locais mostrados em azul, representam um menor registro de temperatura, no caso dessa simulação, foi exatamente no centro. Esse fato ocorre, pois, a região de maior troca térmica é a parede, que pode ser observada em tons mais vermelhos, que representam as maiores temperaturas.

Também foi testado a simulação, submetendo o polímero a um tempo maior de aquecimento. A **Figura 38** ilustra a simulação feita com um tempo de 180 segundos.

Figura 38 - Simulação de aquecimento do polímero com tempo de 180 segundos.



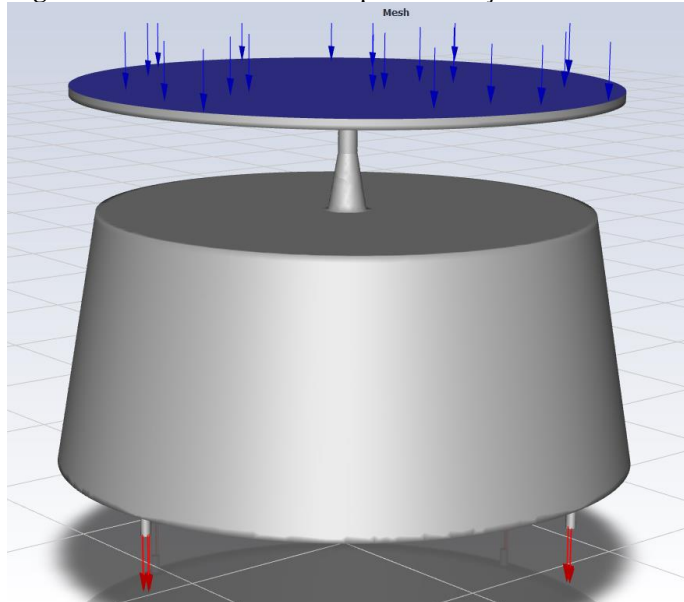
Fonte: Autoria própria (2021).

É possível observar que no interior do sólido tem-se, ainda, temperaturas bem abaixo do ponto de fusão do polímero PET, que é de $260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sendo a média de temperatura obtida igual a $267\text{ }^{\circ}\text{C}$, essa aproximação pode ser considerada razoavelmente eficaz, pelo fato de que, em um processo real, teríamos sólidos granulados que escoariam para a base do cilindro quando derretido, fazendo com que alguns grânulos sejam submersos pelo polímero já fundido. Isso melhoraria a troca térmica na superfície deles. E, também, esse escoamento para a parte inferior do cilindro, faz com que haja um contato de outros pedaços do polímero ainda sólido com a parede do cilindro, o que acelera o processo de aquecimento deles.

4.3 PROCESSO DE ESCOAMENTO DO POLÍMERO

Na simulação do escoamento foi preciso definir o tempo que se desejaria preencher o molde, já conhecendo o volume do mesmo. Tendo isso definido, sabendo o volume necessário a ser injetado e a área da seção transversal interna do cilindro de aquecimento, foi encontrado a velocidade de entrada do polímero, usada como condição na simulação. O polímero será injetado com uma velocidade de $1,6827 \text{ mm/s}$ na superfície que pode ser vista em azul na **Figura 39**.

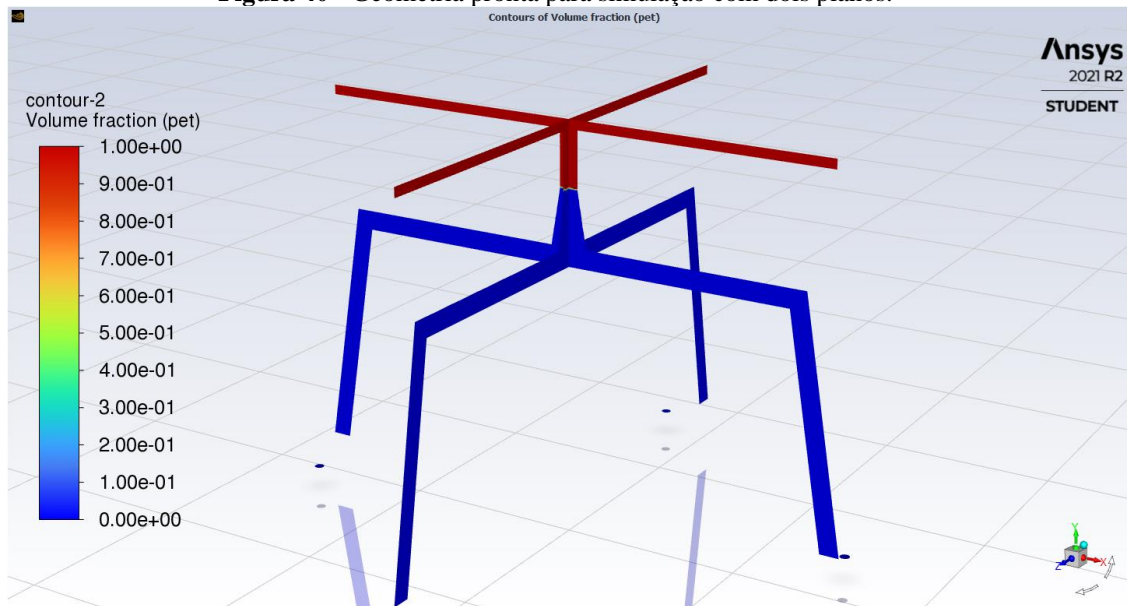
Figura 39 - Geometria utilizada para simulação de escoamento.



Fonte: Autoria própria (2021).

A fim de se conseguir realizar a simulação, foi necessário diminuir a geometria que representa o polímero para que não tivesse elementos de malha a mais do que o permitido pelo software. O tamanho mínimo conseguido foi de $0,335 \text{ mm}$ para os elementos de malha. O modelo ajustado para a simulação pode ser visto na **Figura 40** abaixo.

Figura 40 - Geometria pronta para simulação com dois planos.

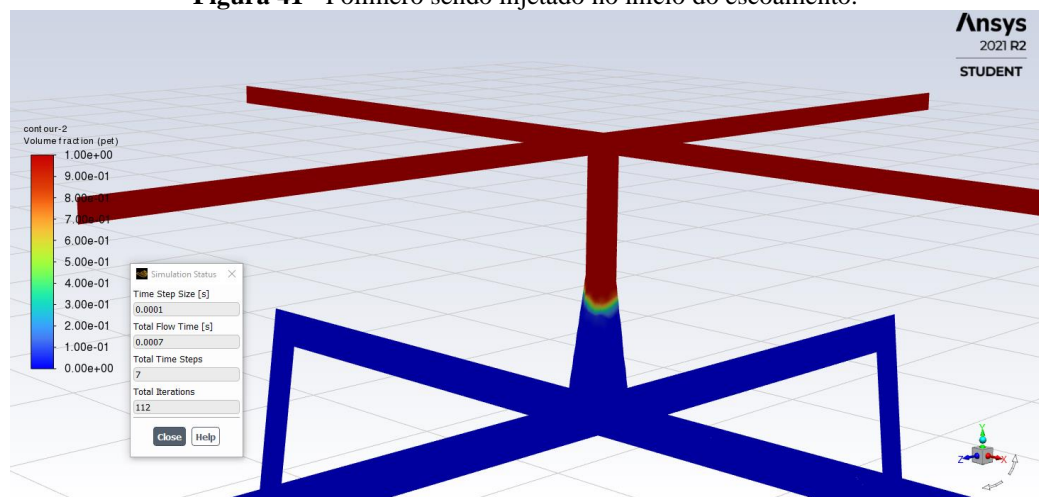


Fonte: Autoria própria (2021).

Para essa simulação, não é possível fazer o teste de convergência de malha. Por se tratar de um escoamento multifásico, o mesmo tamanho de elementos de malha inicial que é possível rodar a solução sem que a mesma venha a divergir rapidamente, também é o tamanho mínimo que o software permite pela versão estudantil.

A **Figura 41** mostra o início do processo de injeção.

Figura 41 - Polímero sendo injetado no início do escoamento.



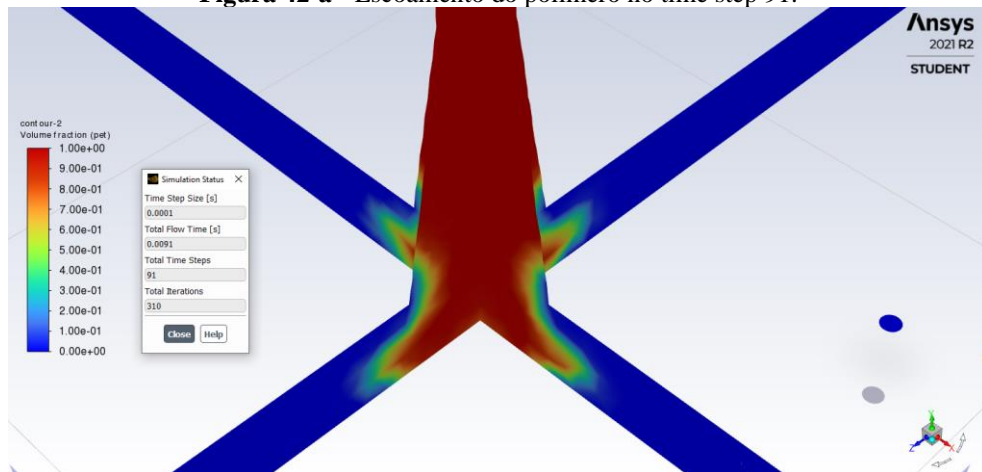
Fonte: Autoria própria (2021).

É possível ver na **Figura 41** a cima, o início do processo formando um perfil de escoamento. As regiões de cores que vão do azul para o vermelho, representam a fração

volumétrica do polímero de 0 a 1 respectivamente, sendo 1 totalmente polímero e 0 totalmente ar.

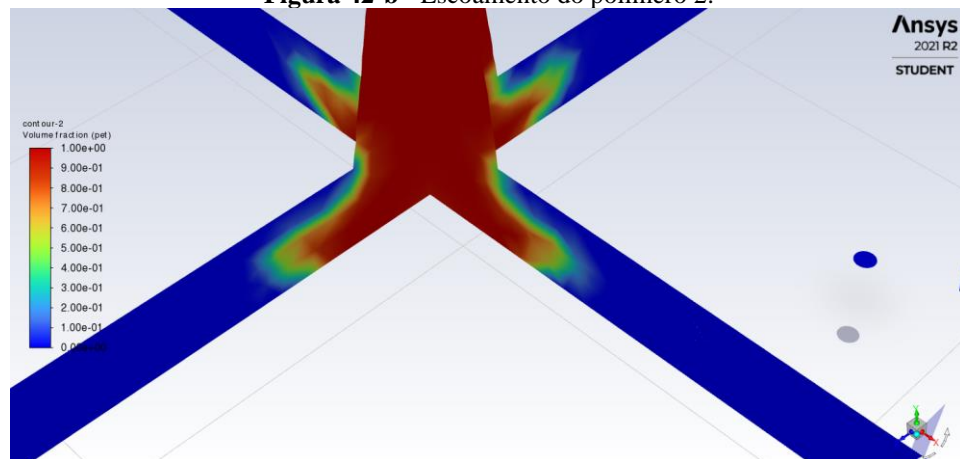
A seguir, será mostrado uma sequência de figuras que mostram a evolução do escoamento do polímero.

Figura 42-a - Escoamento do polímero no time step 91.

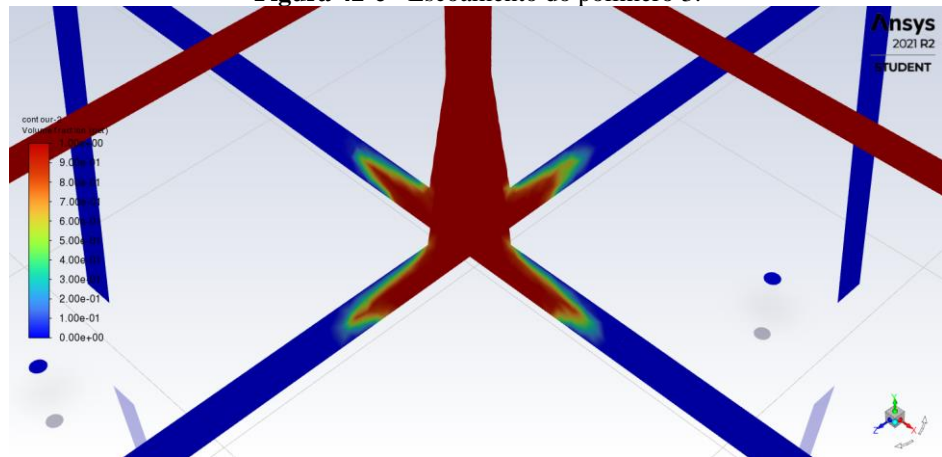


Fonte: Autorial própria (2021).

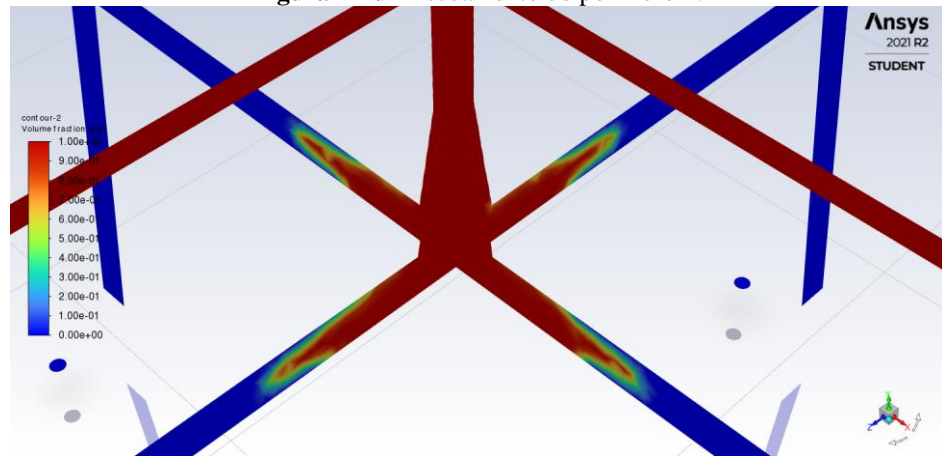
Figura 42-b - Escoamento do polímero 2.



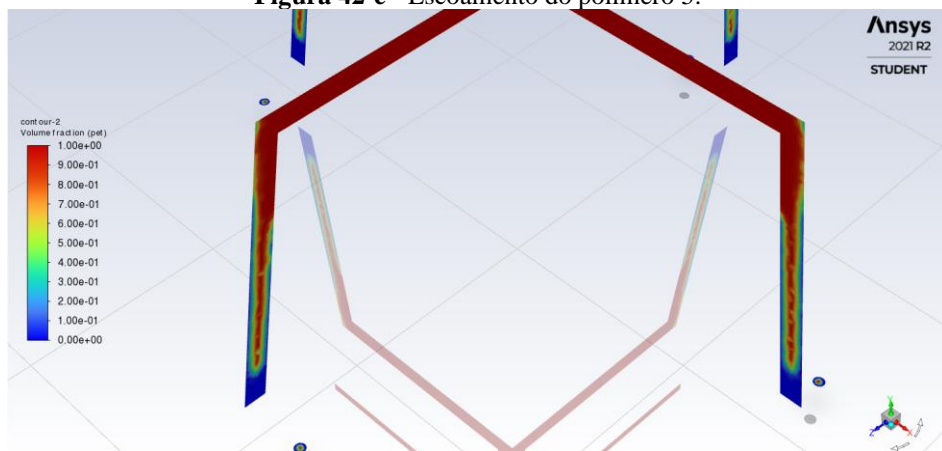
Fonte: Autorial própria (2021).

Figura 42-c - Escoamento do polímero 3.

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 42-d - Escoamento do polímero 4.

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 42-e - Escoamento do polímero 5.

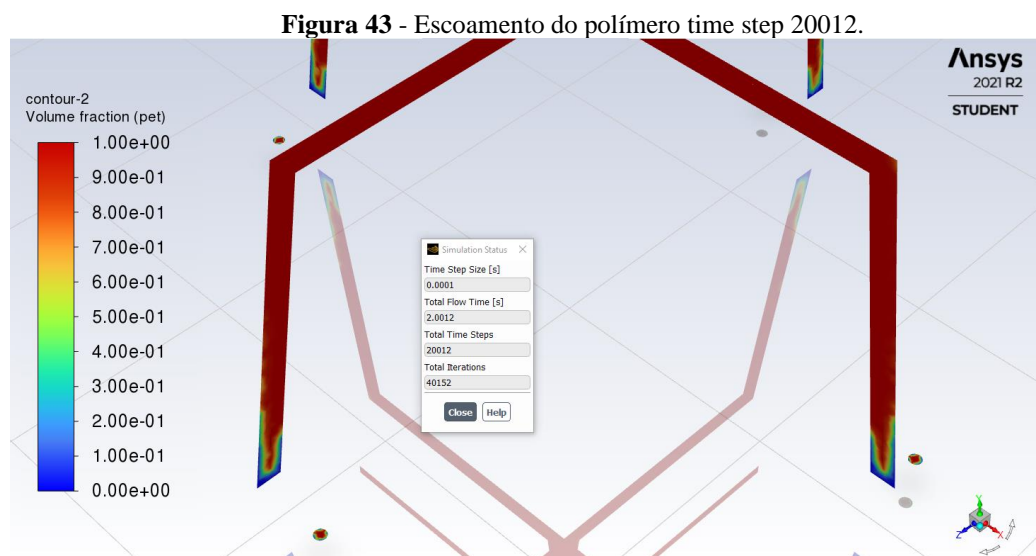
Fonte: Autoria própria (2021).

Na primeira figura da sequência, a **Figura 42**, já é possível notar o não preenchimento de polímero na quina formada entre a geometria de saída e o molde. Local em que possivelmente será um ponto de fragilidade da peça. Esse problema pode ser resolvido, deixando aquele local com um ângulo mais aberto quando estiver perto do molde, pois será mais fácil de impedir que o ar fique preso na região em que será a peça, deixando a fragilidade na parte em que será cortada.

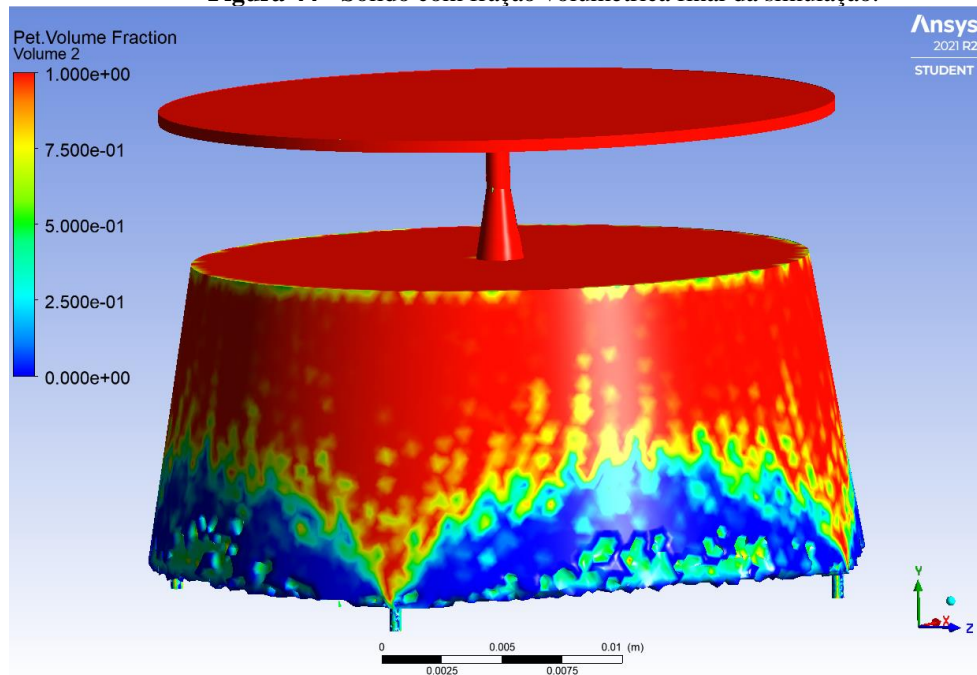
Seguindo, na **Figura** , pode-se ver uma evolução de escoamento bem consistente, em que o polímero foi preenchendo a maior parte dos locais que passou, mas com alguns pontos que é possível ver uma certa de fração de ar no local, principalmente nas paredes da parte de cima e de baixo.

A **Figura** , mostra o escoamento do polímero na fase em que ele se encontra em um movimento de linha de frente mais vertical do que horizontal. É possível ver que tem um grande acúmulo de ar novamente na quina superior do molde, em que se muda bruscamente a direção do escoamento. Uma solução possível, seria a aplicação de um arredondamento nesse canto, para que o polímero possa fazer uma curva mais suave sem gerar grande turbulência, e também, podendo empurrar o ar com mais facilidade.

Abaixo, na **Figura 43**, tem-se o escoamento em sua etapa final. Essa figura representa até onde foi possível chegar na simulação com os parâmetros apresentados, as configurações de hardware do notebook utilizado e o software disponível.



Fonte: Autoria própria (2021).

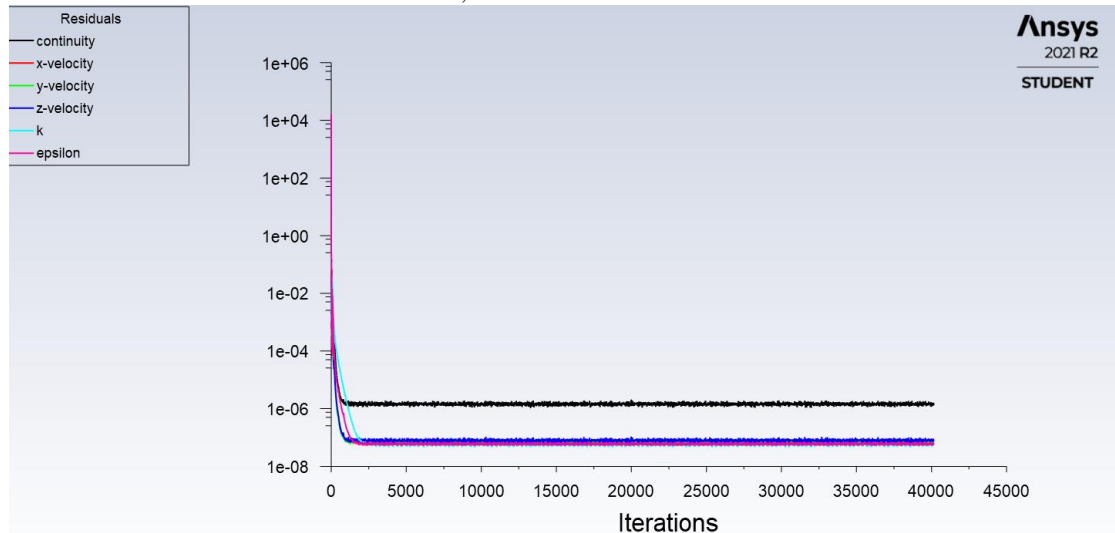
Figura 44 - Sólido com fração volumétrica final da simulação.

Fonte: Autoria própria (2021).

O sólido mostrado na **Figura 44** acima, foi gerado ao final da simulação. Esse sólido representa o último estado do processo de injeção da peça que foi usada de base. Pode-se facilmente ver as regiões que não foram preenchidas, com uma coloração mais azulada, e também o local de mudança na direção do fluxo de escoamento em que ficou um pouco de mistura com ar, os pontos em amarelo na parte de cima do molde da tampa, como comentado anteriormente. Também é possível ver que o polímero tende a escoar para a geometria de saída antes de preencher o molde por completo. Para melhorar essa saída e ter menos desperdício de material, poderia ser diminuído o diâmetro das geometrias de saída de ar, e aumentado a quantidade ao redor da superfície, para que, de forma mais uniforme, o polímero vá preenchendo o molde e o ar sendo expelido devidamente.

Abaixo tem-se uma representação gráfica da convergência da simulação feita. O gráfico de erro residual é gerado automaticamente pelo ANSYS para acompanhamento da convergência ou divergência dos cálculos que estão sendo feitos.

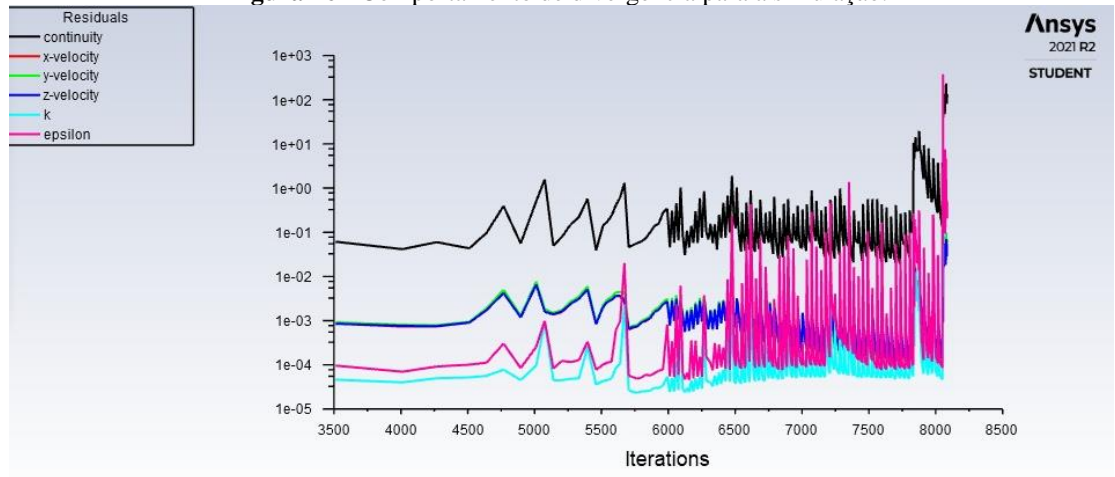
Figura 45 - Gráfico gerado do erro residual na simulação de escoamento com elementos de malha de 0,335mm.



Fonte: Autoria própria (2021).

Nota-se com a **Figura 45** que a simulação apresentou um bom comportamento ao longo do tempo e das interações. Um comportamento completamente diferente pode ser visto na **Figura 46** abaixo, onde tem-se uma representação gráfica da divergência de uma simulação feita com tamanho de elementos de malha de 0,5 mm.

Figura 46 - Comportamento de divergência para a simulação.

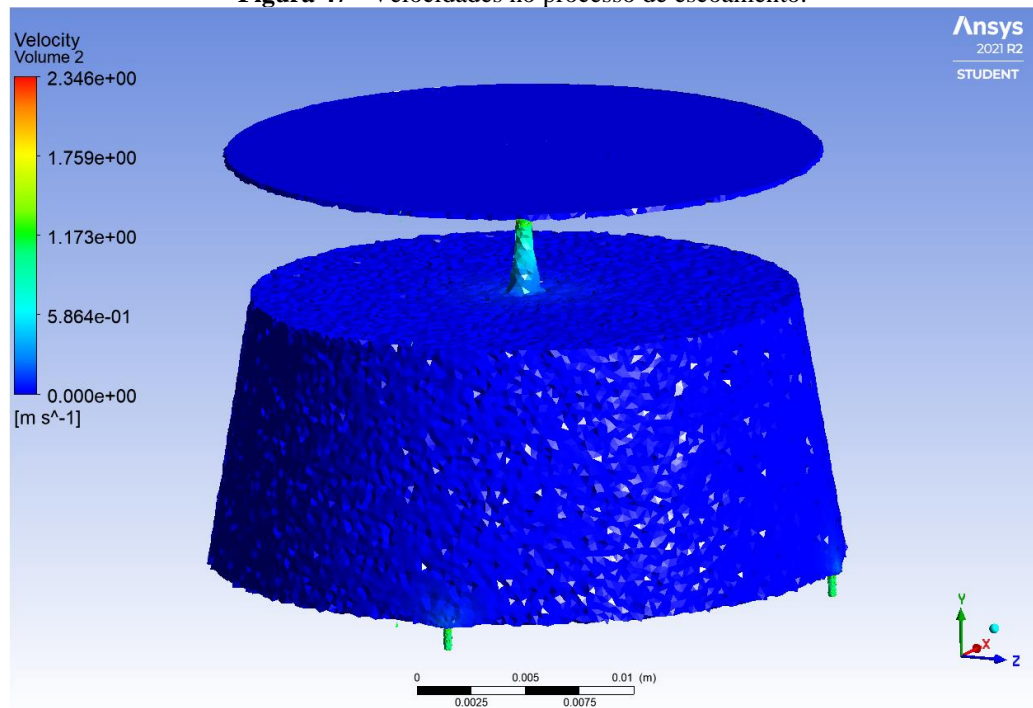


Fonte: Autoria própria (2021).

Abaixo tem-se uma representação gráfica da convergência da simulação feita. O gráfico de erro residual é gerado automaticamente pelo ANSYS para acompanhamento da convergência ou divergência

Também foi obtido uma representação das velocidades que envolvem esse escoamento. Essas velocidades foram obtidas no instante final do processo, mas ao longo do desenvolvimento foi possível notar que não há muitas alterações nas velocidades em cada local do molde. Isso é possível ver na **Figura 47**

Figura 47 - Velocidades no processo de escoamento.



Fonte: Autoria própria (2021).

Como mostrado na figura anterior, as regiões de maiores velocidades são as geometrias de escape de ar, localizadas na parte de baixo do molde, e também, a geometria de saída do cilindro de aquecimento para o molde.

5. CONCLUSÃO

5.1 AQUECIMENTO DO CILINDRO

Foi possível ver que as simulações feitas para a troca de calor do cilindro de aquecimento, podem ter uma aproximação eficiente. Alguns fatores que podem fazer diferir com um modelo de aquecimento real é, por exemplo, a falta de um refinamento das condições de contorno. Isso pode ser feito fazendo uma análise de transferência de calor mais detalhada no cilindro, para poder aplicar na simulação e obter resultados melhores.

Na **Figura 33** foi possível mostrar que um fio de resistência com potência de 1100 W já seria o suficiente para o tempo de aquecimento planejado inicialmente de 60 segundos. E também, com a **Figura 35**, foi possível conferir que esse resultado, de 1100 W de potência para aquecer em 60 segundos o cilindro da temperatura ambiente de 22°C até 292° , é bem confiável.

5.2 AQUECIMENTO DO POLÍMERO

Na **Figura 38**, é notável uma temperatura bem abaixo do ideal no centro da geometria que está com uma visualização em corte. Isto ocorre principalmente ao fato de que foi considerado um bloco sólido como polímero a ser fundido. Mesmo sendo considerado um bloco sólido, a temperatura média ficou em $267,13^\circ\text{C}$, como mostrado. Pode-se dizer então, que é uma aproximação razoável para o tempo de aquecimento, visto que, no modelo real serão vários granulados de polímero sólido que estarão submetidos ao ambiente de temperatura de 292°C .

5.3 ESCOAMENTO DO POLÍMERO

Apesar de não ter sido possível completar todo o processo de injeção, este apresentou um bom comportamento no seu escoamento, mostrando que é possível fazer boas análises com essa ferramenta computacional. O tempo total para o preenchimento do molde seria de aproximadamente 1,5 segundos, sendo injetado cerca de $1563,9\text{ mm}^3$ de polímero.

Para o modelo proposto as modificações comentadas na saída de ar e nos cantos podem melhorar a qualidade do preenchimento da peça e também facilitar um escoamento mais laminar.

Melhores aproximações poderiam ser feitas se aplicadas outras condições como a de fluxo térmico ao escoamento, para avaliar a mudança de temperatura durante o escoamento, condições de pressão no escoamento, para avaliar a perda de pressão durante o escoamento e o aumento na superfície de entrada. Entretanto, quanto mais rigorosas forem as análises, melhor precisa ser o refinamento da malha e conseqüentemente o poder de processamento do computador. Pois se não for feito um refinamento da malha, esse tipo de escoamento tende a divergir facilmente.

A maior dificuldade para a realização desse trabalho foi encontrar material de apoio para os processos que foram propostos, e também um equipamento de qualidade para que as simulações rodassem da melhor forma. Visto que o ANSYS versão estudantil limita ainda mais o poder de processamento do software depois de passadas uma hora que está fazendo os cálculos, foi bastante dificultoso conseguir finalizar cada simulação dessas, chegando a gastar certa de 5 dias de dedicação exclusiva do computador.

Contudo, os objetivos desses trabalhos foram alcançados. Foi possível fazer uma análise completa de um processo de injeção de polímero manual, desde seu aquecimento até a injeção em molde, com os dados de entrada da máquina projetada na iniciação tecnológica realizada durante a graduação do autor.

5.4 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

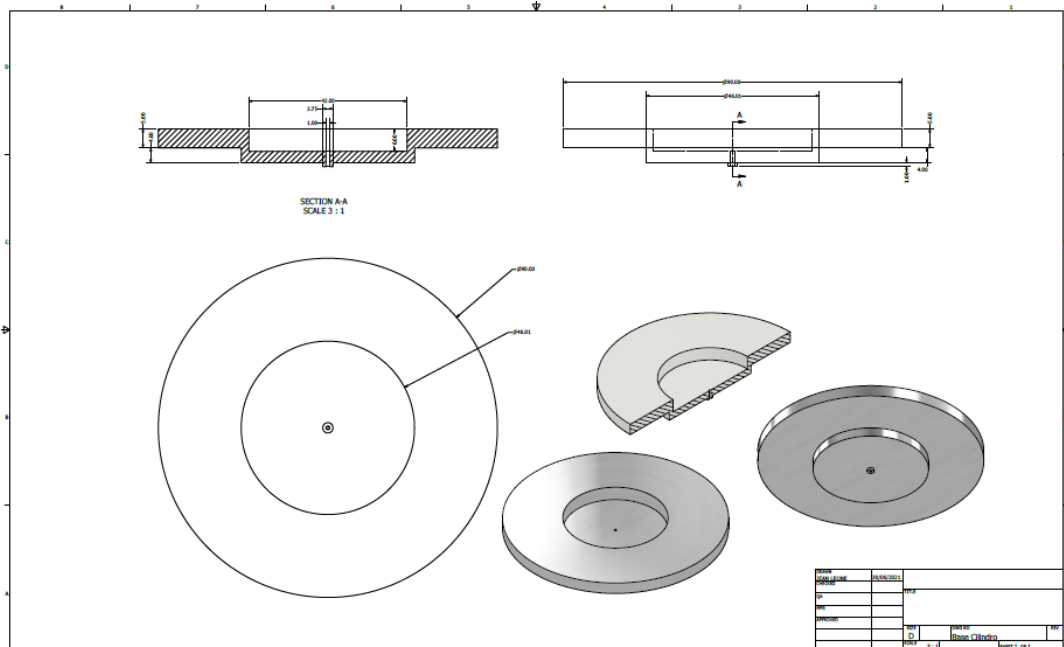
Em próximas etapas de evolução desse trabalho, poderiam ser trabalhados modelo mais apropriados para o aquecimento do polímero, talvez trabalhando com grãos ou só refinando as condições de aquecimento térmicas.

Também poderia ser avaliado outros polímeros, analisando tanto a diferença no aquecimento quanto no escoamento, usando um molde como base.

Em ambas as opções citadas acima, melhorar as condições de contorno do escoamento, adicionando pontos de pressão e fluxo térmico.

APENDICE

APENDICE A – Desenho 2D da tampa do cilindro de aquecimento.



REFERÊNCIAS

- ACRIVOS, A.; SHAH, M. J.; PETERSEN, E. E. **On The Flow of a Non-Newtonian Liquid on a Rotating Disk.**, p. 963–968, 1960. Appl. Phys.
- BAURUS, C., **Isothermals, isopiestic and isometrics relative to viscosity.** Am. J. Sci., 45, 87–96 (1883).
- BISTAFA, S. R. **Mecânica dos Fluidos - Noções e Aplicações.** 2º ed. São Paulo: Blucher, 2018.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos.** 2º ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- CALDAS, F. A. M. **Transferência de calor num escoamento entre placas paralelas de fluidos lei de potência, uma abordagem alternativa,** 2015. Dissertação de Mestrado, Porto: Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia.
- CALLISTER, JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução.** 9º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** 3º ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. W. **Mecânica dos Fluidos - Fundamentos e aplicações.** 3º ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.
- CRAWFORD, R. J. **Plastics Engineering.** 3º ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.
- ELGER, D. F.; LEBRET, B. A.; CROWE, C. T.; ROBERSON, J. A. **Mecânica dos Fluidos para Engenharia.** 11º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- ESTACIO, K. C. **Simulação do processo de moldagem por injeção 2D usando malhas não estruturadas,** 29. mar. 2004. text, Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/55/55134/tde-28072004-145944/>>. Acesso em: 27/7/2020.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J.; MITCHELL, J. W. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** 9º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- GONÇALVES, N. D. F. **Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas,** 2007. Mestrado, Porto - PT: Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

GRANADA, J. E. Simulação da etapa de preenchimento no processo de moldagem por injeção de polímeros. , 2012. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/110134>>. Acesso em: 27/7/2020.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 10^o ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

HURTADO, F. S. V. **Formulação Tridimensional de Volumes Finitos Para Simulação de Reservatórios de Petróleo com Malhas Não-Estruturadas Híbridas**, 2011. Program de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis - SC: Universidade Federal de Santa Catarina.

JÚNIOR, M. V. **Introdução ao Método de Volumes Finitos**. 4^o ed. Joinville -SC: LAMEC - Laboratório de Mecânica Computacional, 2006.

MURTI, B. Simulation and analysis of Injection Moulding product and rapid prototyping. , p. 74, 2010.

OSSWALD, T.; RUDOLPH, N. **Polymer Rheology. Fundamentals and Applications**. Munich: Hanser Publications, 2015.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. **Mecânica dos Fluidos**. Porto Alegre: Bookman, 2018.
VILANOVA, L. C. **Mecânica dos Fluidos**. 3^o ed. Santa Maria - RS: CTISM, 2010.

WASILKOSKI, C. M. Comportamento Mecânico dos Materiais Poliméricos. , p. 82, 2006.
WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 8^o ed. Porto Alegre: AMGH, 2018.

XIMENES, S. **Minidicionário Ediouro da Língua Portuguesa**. 2^o ed. Rio de Janeiro: Ediouro, 2000.

ANEXO A - Direitos autorais - Lei n. 9.610, de 19 de fevereiro de 1998



**Presidência da República
Casa Civil
Subchefia para Assuntos Jurídicos**

LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998¹.

Mensagem de veto

Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

O PRESIDENTE DA REPÚBLICA Faço saber que o Congresso Nacional decreta e eu sanciono a seguinte Lei:

Título I - Disposições Preliminares

Art. 1º Esta Lei regula os direitos autorais, entendendo-se sob esta denominação os direitos de autor e os que lhes são conexos.

Art. 2º Os estrangeiros domiciliados no exterior gozarão da proteção assegurada nos acordos, convenções e tratados em vigor no Brasil.

Parágrafo único. Aplica-se o disposto nesta Lei aos nacionais ou pessoas domiciliadas em país que assegure aos brasileiros ou pessoas domiciliadas no Brasil a reciprocidade na proteção aos direitos autorais ou equivalentes.

Art. 3º Os direitos autorais reputam-se, para os efeitos legais, bens móveis.

Art. 4º Interpretam-se restritivamente os negócios jurídicos sobre os direitos autorais.

Art. 5º Para os efeitos desta Lei, considera-se:

I - publicação - o oferecimento de obra literária, artística ou científica ao conhecimento do público, com o consentimento do autor, ou de qualquer outro titular de direito de autor, por qualquer forma ou processo;

II - transmissão ou emissão - a difusão de sons ou de sons e imagens, por meio de ondas radioelétricas; sinais de satélite; fio, cabo ou outro condutor; meios óticos ou qualquer outro processo eletromagnético;

III - retransmissão - a emissão simultânea da transmissão de uma empresa por outra;

IV - distribuição - a colocação à disposição do público do original ou cópia de obras literárias, artísticas ou científicas, interpretações ou execuções fixadas e fonogramas, mediante a venda, locação ou qualquer outra forma de transferência de propriedade ou posse;

V - comunicação ao público - ato mediante o qual a obra é colocada ao alcance do público, por qualquer meio ou procedimento e que não consista na distribuição de exemplares;

VI - reprodução - a cópia de um ou vários exemplares de uma obra literária, artística ou científica ou de um fonograma, de qualquer forma tangível, incluindo qualquer armazenamento permanente ou temporário por meios eletrônicos ou qualquer outro meio de fixação que venha a ser desenvolvido;

VII - contrafação - a reprodução não autorizada;

VIII - obra:

a) em co-autoria - quando é criada em comum, por dois ou mais autores;

b) anônima - quando não se indica o nome do autor, por sua vontade ou por ser desconhecido;

c) pseudônima - quando o autor se oculta sob nome suposto;

d) inédita - a que não haja sido objeto de publicação;

e) póstuma - a que se publique após a morte do autor;

f) originária - a criação primígena;

g) derivada - a que, constituindo criação intelectual nova, resulta da transformação de obra originária;

h) coletiva - a criada por iniciativa, organização e responsabilidade de uma pessoa física ou jurídica, que a publica sob seu nome ou marca e que é constituída pela participação de diferentes autores, cujas contribuições se fundem numa criação autônoma;

i) audiovisual - a que resulta da fixação de imagens com ou sem som, que tenha a finalidade de criar, por meio de sua reprodução, a impressão de movimento, independentemente dos processos de sua captação, do suporte usado inicial ou posteriormente para fixá-lo, bem como dos meios utilizados para sua veiculação;

IX - fonograma - toda fixação de sons de uma execução ou interpretação ou de outros sons, ou de uma representação de sons que não seja uma fixação incluída em uma obra audiovisual;

X - editor - a pessoa física ou jurídica à qual se atribui o direito exclusivo de reprodução da obra e o dever de divulgá-la, nos limites previstos no contrato de edição;

XI - produtor - a pessoa física ou jurídica que toma a iniciativa e tem a responsabilidade econômica da primeira fixação do fonograma ou da obra audiovisual, qualquer que seja a natureza do suporte utilizado;

XII - radiodifusão - a transmissão sem fio, inclusive por satélites, de sons ou imagens e sons ou das representações desses, para recepção ao público e a transmissão de sinais codificados, quando os meios de decodificação sejam oferecidos ao público pelo organismo de radiodifusão ou com seu consentimento;

XIII - artistas intérpretes ou executantes - todos os atores, cantores, músicos, bailarinos ou outras pessoas que representem um papel, cantem, recitem, declamem, interpretem ou executem em qualquer forma obras literárias ou artísticas ou expressões do folclore.

Art. 6º Não serão de domínio da União, dos Estados, do Distrito Federal ou dos Municípios as obras por eles simplesmente subvencionadas.

¹ Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19610.htm.