

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEMEC - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA

GUSTAVO SOUZA BARBOSA

**ESTUDO NUMÉRICO DO PROCESSO DE EXTRUSÃO DE  
ABS CONSIDERANDO DIFERENTES GEOMETRIAS DO  
BICO EXTRUSOR E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO.**

SÃO CARLOS  
2024

GUSTAVO SOUZA BARBOSA

**ESTUDO NUMÉRICO DO PROCESSO DE EXTRUSÃO DE  
ABS CONSIDERANDO DIFERENTES GEOMETRIAS DO  
BICO EXTRUSOR E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao DEMec -  
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta

SÃO CARLOS  
2024



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 28/2024/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

GUSTAVO SOUZA BARBOSA

ESTUDO NUMÉRICO DO PROCESSO DE EXTRUSÃO DE ABS CONSIDERANDO DIFERENTES GEOMETRIAS DO BICO EXTRUSOR E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 20 de setembro de 2024

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Alexandre Tácito Malavolta
Membro da Banca 1	Mariano Eduardo Moreno
Membro da Banca 2	João Gustavo Pereira da Silva



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Tácito Malavolta, Docente**, em 20/09/2024, às 15:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Gustavo Pereira da Silva, Docente**, em 20/09/2024, às 15:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mariano Eduardo Moreno, Docente**, em 20/09/2024, às 15:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1579199** e o código CRC **BB1B777F**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.027917/2024-75

SEI nº 1579199



Dedico este trabalho principalmente aos meus avós, a minha família, minha esposa e a todos aqueles que perseveraram até o fim.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a todos aqueles que me acompanharam e acreditaram em mim. Ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta, pela oportunidade, orientação e suporte. Um agradecimento aos membros da banca avaliadora, Prof. Dr. Mariano Eduardo Moreno e Prof. João Gustavo Pereira da Silva, por suas contribuições, comentários e aconselhamentos, para a formalização deste trabalho.

## RESUMO

A popularidade da manufatura aditiva (MA) vem crescendo nas últimas décadas devido à sua característica de fabricação enxuta e à possibilidade de fabricação de geometrias complexas. Com isso, a indústria anseia e investe em estudos e geração de conhecimentos para o desenvolvimento de técnicas deste processo, visando melhorias na qualidade, tempo e custo de fabricação. Este trabalho visa avaliar novos métodos de investigação e estudos sobre a técnica de deposição de material fundido (FDM - *Fused Deposition Modeling*), conhecida como impressão 3D, utilizando como material o polímero ABS. A fim de avaliar a viabilidade de uma ferramenta simulacional de extrusão, foram considerados esforços e geometrias de duas matrizes, uma com perfil circular de 3 mm e outra com perfil quadrado côncavo inscrito em uma circunferência de 3 mm, seguindo como referência equipamentos presentes no laboratório de Engenharia Mecânica da UFSCar. Foi realizada, para cada matriz, uma combinação variando a temperatura (80°C e 100°C) e a velocidade do aríete (3 mm/s e 6 mm/s), totalizando oito combinações. Esses dados foram incluídos no software QformUK para estudar suas capacidades e limitações na análise do processo de extrusão de filamento polimérico. Os resultados mostraram que, o modelo constitutivo de Hensel-Spittel é insuficiente para descrever o comportamento reológico dos polímeros e, as simulações não conseguiram replicar com precisão as geometrias observadas experimentalmente. Isso se deve, em grande parte, à simplificação realizada para ajustar os modelos constitutivos para metais nos materiais poliméricos. O modelo Hensel-Spittel, se mostrou inadequado para descrever o comportamento não-Newtoniano típico dos polímeros. Dessa forma, as simulações não consideram efeitos viscosos avançados, limitando sua capacidade de representar com fidelidade o processo de extrusão polimérica. Trabalhos futuros poderão explorar essa ferramentas de forma mais adequada, através do desenvolvimento de subrotinas específicas para modelar de maneira mais precisa esses materiais no QformUK.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, Modelagem de deposição fundida, Simulação Computacional, Polímeros, Reologia.

## ABSTRACT

The increasing popularity of additive manufacturing (AM) over the past decades is attributed to its lean production characteristics and the capacity to fabricate complex geometries. This growth has spurred industry efforts and investments in research to advance techniques that improve manufacturing quality, efficiency, and cost-effectiveness. This study aims to evaluate new investigative methods and approaches related to fused deposition modeling (FDM), commonly known as 3D printing, using ABS polymer as the material of choice. To assess the feasibility of extrusion simulation tools, two die geometries were considered: one with a 3 mm circular profile and another with a concave square profile inscribed within a 3 mm circle, based on the equipment available at the Mechanical Engineering Laboratory of UFSCar. For each die, combinations of temperature (80°C and 100°C) and ram speed (3 mm/s and 6 mm/s) were tested, yielding eight distinct conditions. These parameters were entered into the QformUK software to analyze its capabilities and limitations in simulating the polymer extrusion process. The results revealed that the Hensel-Spittel constitutive model is inadequate for accurately describing the rheological behavior of polymers, as the simulations did not replicate the experimentally observed geometries with precision. This shortfall is primarily attributed to the oversimplifications made when adapting constitutive models for metals to polymeric materials. Specifically, the Hensel-Spittel model proved insufficient in capturing the non-Newtonian behavior characteristic of polymers. Consequently, the simulations failed to account for advanced viscous effects, limiting the software's ability to faithfully represent the polymer extrusion process. Future research should explore the use of more suitable tools, such as the development of specialized subroutines, to more accurately model polymer materials in QformUK.

Keywords: Additive manufacturing, FDM, Polymeric materials, computational simulation, Rheology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pilares da Indústria 4.0. . . . .	20
Figura 2 – Desenho esquemático extrusora monorosca. . . . .	21
Figura 3 – Desenho esquemático extrusora de aríete. Extrusão de estado sólido direta. . . . .	21
Figura 4 – Modelo viscoelástico de Maxwell. . . . .	23
Figura 5 – Modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt. . . . .	23
Figura 6 – Representação esquemática da mudança do perfil de velocidade na saída da matriz. . . . .	24
Figura 7 – Parâmetros que afetam o <i>design</i> dos sistemas de calibração/resfriamento	25
Figura 8 – Perfil de pressões em matriz de extrusão polimérica . . . . .	26
Figura 9 – Seção de filamento extrudado em matriz de perfil Quadrado Côncavo. .	27
Figura 10 – Relação da Geometria do extrudado com a matriz. . . . .	27
Figura 11 – Escoamento em matriz. . . . .	29
Figura 12 – Módulo de Young do <i>ABS</i> . . . . .	31
Figura 13 – Coeficiente de Expansão Térmica do <i>ABS</i> . . . . .	32
Figura 14 – Comportamento da Tensões do <i>ABS@20°C</i> . . . . .	33
Figura 15 – Curvas experimentais e de quatro modelos constitutivos @ $10^{-2}s^{-1}$ . . .	33
Figura 16 – Desenho técnico D300. . . . .	34
Figura 17 – Desenho técnico D330. . . . .	34
Figura 18 – Malha para ferramenta D300. . . . .	35
Figura 19 – Malha para ferramenta D330. . . . .	35
Figura 20 – Gradiente de Temperaturas D300T80v3 . . . . .	39
Figura 21 – Gradiente de Temperatura D300T80v6 . . . . .	40
Figura 22 – Gradiente de Temperatura D300T100v3 . . . . .	41
Figura 23 – Gradiente de Temperatura D330T100V6 . . . . .	42
Figura 24 – Tensões Médias D300T80v3 . . . . .	43
Figura 25 – Tensões Médias D300T80v6 . . . . .	44
Figura 26 – Tensões Médias D300T100v3 . . . . .	45
Figura 27 – Tensões Médias D300T100v6 . . . . .	46
Figura 28 – Gradiente de Temperaturas D330T80v3 . . . . .	48
Figura 29 – Gradiente de Temperatura D330T80v6 . . . . .	49
Figura 30 – Gradiente de Temperatura D330T100v3 . . . . .	50
Figura 31 – Gradiente de Temperatura D330T100V6 . . . . .	51
Figura 32 – Tensões Médias D330T80v3 . . . . .	52
Figura 33 – Tensões Médias D330T80v6 . . . . .	53
Figura 34 – Tensões Médias D330T100v3 . . . . .	54

Figura 35 – Tensões Médias D330T100v6 . . . . .	55
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens <i>FDM</i> . . . . .	20
Tabela 2 – Propriedades <i>ABS</i> . . . . .	30
Tabela 3 – Constantes ajustadas modelo de Hensel-Spittel para <i>ABS</i> . . . . .	30
Tabela 4 – Propriedades das malhas das matrizes . . . . .	32
Tabela 5 – Condições de atrito. . . . .	35
Tabela 6 – Combinações das simulações. . . . .	36
Tabela 7 – Condições de contorno . . . . .	36
Tabela 8 – Velocidades de Impressão . . . . .	38
Tabela 9 – Influência das variações na Tensão Média . . . . .	38
Tabela 10 – Velocidades de Impressão . . . . .	47
Tabela 11 – Influência das variações na Tensão Média . . . . .	48
Tabela 12 – Velocidades de Impressão . . . . .	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CAD	Desenho Assistido por Computador
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
FDM	Deposição de Material Fundido
MA	Manufatura Aditiva
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
YM	Módulo de Young
CET	Coefficiente de Expansão Térmica
PET	Politereftalato de etileno
PLA	Ácido Polilático
PP	Polipropileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade <sup>3</sup>
IOT	<i>Internet of Things</i>

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1 Motivação	17
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
<b>2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
2.1 Manufatura Aditiva	18
2.1.1 Contexto	18
2.1.2 Deposição de Material Fundido ( <i>FDM</i> )	19
2.2 Extrusão	19
2.3 Polímeros	21
2.3.1 Extrusão Polimérica	21
2.3.2 Comportamento Visco-Elástico	22
2.3.3 Efeito Barus	24
2.4 Matrizes	24
2.5 Seção do Filamento	25
<b>3 – MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>28</b>
3.1 Considerações	28
3.2 Modelagem	29
3.2.1 Acrilonitrila butadieno estireno ( <i>ABS</i> )	29
3.2.2 Matrizes	30
3.2.3 Simulação	32
<b>4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>37</b>
4.1 Matriz de Perfil Circular - D300	37
4.2 Matriz de Perfil Quadrado Côncavo - D330	47
4.3 Velocidade de Impressão	56
<b>5 – CONCLUSÃO</b>	<b>57</b>
5.1 Trabalhos Futuros	57
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>58</b>
<b>ANEXO A – Propriedades ABS</b>	<b>60</b>

ANEXO B–Propiedades ABS . . . . .	62
ANEXO C–Módulo de Young . . . . .	64

## 1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA), amplamente conhecida como impressão 3D, tornou-se uma das tecnologias de fabricação mais inovadoras e de rápido crescimento nas últimas décadas. Este processo oferece uma abordagem altamente flexível e personalizada para a produção de peças, utilizando técnicas como a deposição de material em camadas. A popularização das impressoras 3D, que empregam principalmente filamentos poliméricos como matéria-prima, possibilitou a criação de protótipos e até mesmo produtos finais com um custo reduzido e tempos de produção mais curtos. Contudo, apesar de suas vantagens, a impressão 3D ainda enfrenta desafios técnicos relacionados à qualidade da peça, incluindo a adesão entre camadas e a presença de vazios que comprometem a integridade do produto final (DURGUN; ERTAN, 2014).

O método *Fused Deposition Modeling* (FDM), conforme estudado por Georgopoulou e Clemens (2022), é uma das formas mais comuns de manufatura aditiva e consiste na extrusão de material fundido, camada por camada, até que a peça seja completamente formada. No entanto, esse processo está sujeito a limitações, como o controle preciso da temperatura e da vazão do material, fatores que influenciam diretamente a qualidade superficial e as propriedades mecânicas da peça. Nos últimos anos o desenvolvimento de tecnologias de extrusão de polímeros associadas ao uso de grãos poliméricos (*pellets*) tem se mostrado uma alternativa promissora ao uso dos tradicionais filamentos. Esta nova abordagem não só reduz custos como também amplia o leque de materiais que podem ser utilizados no processo.

Outro aspecto importante na evolução da manufatura aditiva é o surgimento de ferramentas computacionais avançadas. Softwares como simuladores físico-mecânicos e termo-fluídicos, além de fatiadores inteligentes, permitem maior controle e previsibilidade no processo de impressão. Esses programas têm sido fundamentais para otimizar a produção em larga escala, especialmente no contexto da *Large-Format Additive Manufacturing* (LFAM). De acordo com Vijay *et al.* (2018), a capacidade de simular o comportamento do material durante a impressão possibilita uma redução significativa nos erros de fabricação, além de melhorar a eficiência do processo através de controle das vazões, densidade de bolhas, temperatura do processo e adesão de camadas.

O uso de polímeros no processo de extrusão é uma área de crescente interesse, especialmente pela possibilidade de trabalhar com diferentes tipos de polímeros, incluindo materiais reciclados e blendas poliméricas. A adoção de pellets no lugar de filamentos tradicionais não apenas reduz os custos, mas também amplia as opções de materiais e isso possibilita o uso de polímeros com distintas propriedades térmicas e mecânicas, o que é essencial para a produção de peças que precisam atender a requisitos específicos de desempenho. No entanto, essa transição para o uso de grãos poliméricos também exige

uma adaptação nos parâmetros do processo, como a configuração do bico de extrusão e o controle da vazão (URBANIC; HEDRICK, 2016).

A qualidade da peça impressa por manufatura aditiva é influenciada por diversos parâmetros de impressão, incluindo a vazão volumétrica e a temperatura de operação. Esses parâmetros devem estar devidamente ajustados para garantir uma boa adesão entre as camadas e evitando a formação de vazios, que são um problema recorrente na impressão 3D. A geometria do bico de extrusão também desempenha um papel crítico na distribuição do material, impactando diretamente a densidade e a integridade da peça final. Estudos como o de Shah *et al.* (2019) indicam que a escolha adequada do bico e o controle preciso da temperatura e da vazão podem minimizar a presença de falhas e aumentar a qualidade da impressão.

Dada a complexidade do processo de manufatura aditiva e as inúmeras variáveis envolvidas, a simulação computacional tem se mostrado uma ferramenta a ser estudada para entender a sua capacidade de prever o comportamento do material durante o processo de impressão, oferecendo uma oportunidade de comparar os resultados simulados com experimentos empíricos e permitindo ajustes nos parâmetros de impressão antes mesmo da produção física das peças (LIU *et al.*, 2017).

Estudos anteriores já indicaram que o uso de *pellets* no processo de extrusão oferece uma série de vantagens, como a eliminação de etapas no processo de fabricação e a possibilidade de utilizar materiais reciclados, o que torna o processo mais sustentável. No entanto, a adoção dessa tecnologia ainda enfrenta desafios, como o controle preciso da vazão do material e a sincronização entre os diferentes parâmetros de impressão. Assim como Ceruti *et al.* (2019) traz o conceito de digitalizar o controle do processo, as simulações computacionais oferecem uma solução promissora para esses desafios, permitindo uma melhor previsão do comportamento do material durante a impressão.

Neste trabalho, o foco é simular utilização de polímeros no processo de extrusão para impressão 3D. O objetivo é investigar se os resultados das simulações realizadas no software QFormUK se aproximam dos resultados obtidos experimentalmente, contribuindo para uma melhor capacidade de modelagem e controle da qualidade do processo de fabricação.

Pode-se considerar que o polímero plastificado é um material viscoelástico, caracterizado como um fluido não newtoniano, ou seja, não apresenta um comportamento linear. Nesse tipo de fluido, a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação. Além disso, esses fluidos estão sujeitos ao efeito Barus, no qual o fluido se expande ao sair de um orifício, devido a aceleração das camadas mais externas do fluxo quando o escoamento atinge espaços abertos (TANNER, 1985).

Com isso, foram selecionadas duas matrizes de extrusão: uma com perfil circular de 3 mm e outra com perfil quadrado côncavo inscrito em uma circunferência de 3 mm. O objetivo foi aprofundar o entendimento das capacidades e limitações do software QformUK

na análise do processo de extrusão de filamento polimérico. Isso permitirá sua aplicação em atividades específicas voltadas para a impressão 3D, utilizando diretamente a alimentação com pellets poliméricos em vez de filamentos convencionais.

## 1.1 Motivação

Este trabalho surgiu com a ideia de contribuir com a busca pelo desenvolvimento de processos de fabricação modernos, econômicos e socio-economicamente impactantes. Motivado pelo Prof. Dr. Alexandre Tacito Malavolta, o potencial deste processo destacou-se pelas amplas possibilidades, sendo desde a capacidade de processar materiais reciclados até em seus estados mais avançados onde é possível gerar peças com biomateriais.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal promover um estudo numérico, via simulação por elementos finitos, do processo de extrusão do material polimérico ABS, na manufatura aditiva. Neste estudo serão consideradas diferentes geometrias de matrizes e condições de operação. Essas simulações se deram por meio do software QFormUK, com condições de operação aproximadas de testes experimentais realizadas no Laboratório de Engenharia Aplicada da UFSCar por OLIVEIRA (2023)

### 1.2.2 Objetivos Específicos

De maneira a compreender as capacidades simulacionais do software QFormUK, para polímeros, as seguintes atividades foram realizadas:

- Modelagem de matrizes para processo de extrusão;
- Parametrização dos domínios de escoamento e ferramenta;
- Modelagem das propriedades do material a ser deformado ABS;
- Definição dos parâmetros de processo;
- Simulação variando matrizes e temperaturas do processo abaixo da  $T_g$ ;
- Avaliação da geometria, velocidades e esforços do perfil do filamento.

Os resultados das simulações foram cruzados com resultados experimentais de Oliveira (2023), além de serem realizadas avaliações das influências dos parâmetros avaliados no resultado final da extrusão.

---

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo direciona o estudo do trabalho de um escopo abrangente para o específico. Será contextualizada a posição das tecnologias de manufatura aditiva nos campos industriais e acadêmicos, bem como a especificidade do trabalho realizado. Aqui, buscou-se compreender melhor os fundamentos, condições e comportamento de um processo simulacional de extrusão polimérica.

A revisão abrangente dos fundamentos da manufatura aditiva evidencia tópicos cruciais para o desenvolvimento e assertividade de estudos alinhados com o futuro desta tecnologia de fabricação. Os estudos sobre as especificidades do processo, nos ajudam moldar o trabalho simulacional no sentido de considerar, avaliar e reproduzir condições e efeitos aproximados da realidade.

### 2.1 Manufatura Aditiva

#### 2.1.1 Contexto

A manufatura aditiva consiste em um processo de fabricação onde, a partir de um modelo digital, objetos são construídos através de deposição sequencial de camadas de um determinado material. O desenvolvimento desta forma de fabricação se deu por volta da década de 1980. Logo, diversas técnicas foram surgindo ao longo dos anos como:

- Estereolitografia (SLA): É um método e aparato para produzir objetos sólidos 'imprimindo' sucessivamente finas camadas de material curável, por exemplo, através de luz UV. (HULL, 1986)
- Sinterização a laser seletiva (SLS): Emprega lasers para sinterizar pós de polímeros ou metais, permitindo a produção de peças de alta resistência e complexidade geométrica. É amplamente utilizado na indústria automotiva e aeroespacial. (GU W MEINERS; POPRAWA, 2012)
- Fusão por feixe de elétrons (EBM): Tecnologias de sinterização que permitem a criação de peças metálicas funcionais. Estes métodos têm sido cada vez mais utilizados na produção de peças funcionais e personalizadas em indústrias como a médica e aeroespacial. (HERZOG *et al.*, 2016)
- Deposição de material fundido (FDM): consiste na adição de material extrudado para criar um objeto tridimensional camada por camada. (GIBSON *et al.*, 2020)

Através de suas diversas técnicas de produção, a MA tem capacidade para atuação em inúmeros campos da indústria. A técnica de manufatura aditiva é uma abordagem flexível e econômica para imprimir complexas peças de corpo, suportando crescimento de tecidos, e provendo soluções personalizadas para uma larga amplitude de problemas (RUBAN *et al.*, 2022). Áreas como indústria aeroespacial, automotiva e médica não ficam

de fora da demanda por esse tipo de tecnologia. A indústria aeroespacial tem sido uma das pioneiras na adoção da MA, especialmente pela capacidade de produzir peças complexas e leves com alto desempenho mecânico (FRAZIER, 2014). A impressão em metais com alta rigidez, resistência e reatividade como ligas de titânio, zircônio e aço é possível graças a tecnologias como DMLS e EBM (HERZOG *et al.*, 2016).

A manufatura aditiva pode empregar o uso de diversos materiais, a depender de alguns fatores como: complexidade do modelo, tempo de fabricação, dimensões e qualidade final. Embora promissora, atualmente, a MA encontra desafios como a produção em massa, peças com grandes volumes e custo relativamente elevado para fabricação com metais (GIBSON *et al.*, 2020).

Como evidenciado por Butt (2020), na Figura 1. Para o futuro da MA, podemos esperar maior integração horizontal e vertical dos processos, *Big data Analytics*, robôs autônomos, telemetria em nuvem e *IoT*.

### 2.1.2 Deposição de Material Fundido (*FDM*)

O processo de (*FDM*) realiza a extrusão de um material termoplástico, geralmente aquecido, ao pressionar este material contra uma matriz de geometria específica para a criação de peças tridimensionais (RAUWENDAAL, 2014). Segundo Gibson *et al.* (2020) a escolha dos polímeros comuns neste tipo de processo deve levar em consideração suas resistências, ponto de fusão e durabilidade sendo alguns deles PET, PLA, PP, PEAD, PEBD e o objeto deste estudo o ABS.

Para garantir a eficiência do processo, são destacados alguns parâmetros críticos e, que devem ser controlados durante todo processo.

- **Temperatura de Extrusão:** O controle de temperatura influencia diretamente no comportamento visco-elástico do polímero, que é crucial para o controle das deformações e adesões entre camadas.
- **Velocidade de impressão:** Enquanto velocidades mais baixas podem aumentar tempo de fabricação e custo, as altas velocidades aumentam densidades de vazios prejudicando integridade estrutural da peça.
- **Espessura da Camada:** A espessura da camada influencia diretamente na resolução da peça. Camadas mais finas possibilitam maior detalhamento, entretanto, aumentam o tempo de fabricação.

Na Tabela 1, temos a comparação de algumas vantagens e desvantagens deste método de fabricação.

## 2.2 Extrusão

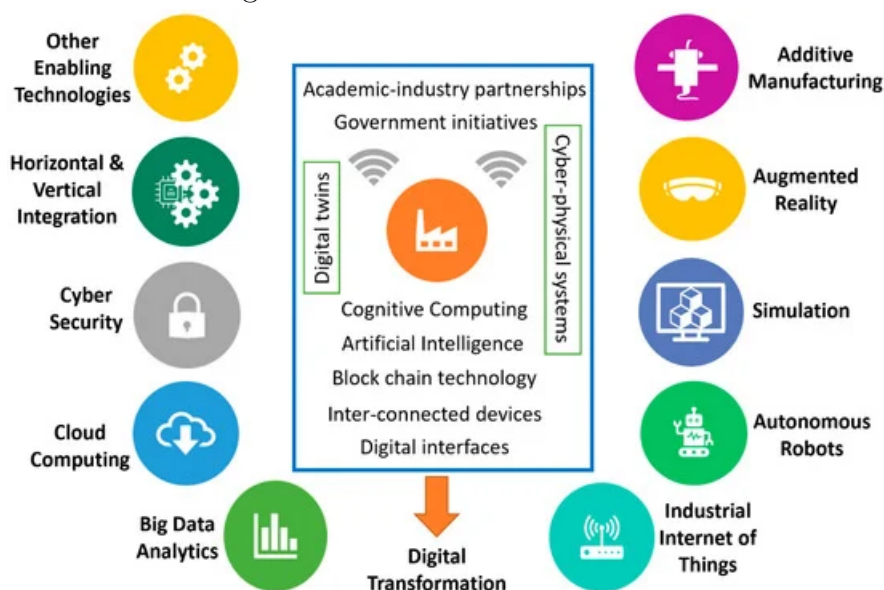
Em Rauwendaal (2014), um dos principais autores sobre o assunto, é comentado sobre aspectos dos processos de extrusão. Um dos métodos de extrusão polimérica é dado

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens *FDM*

Método	Vantagens	Desvantagens
FDM	Baixo Custo Geometrias Complexas Prototipagem Rápida Peças Leves Variedade de Aplicações	Precisão Detalhamento Lento Controle Dimensional Anisotropia Pós-Processamento

Fonte: Autor.

Figura 1 – Pilares da Indústria 4.0.



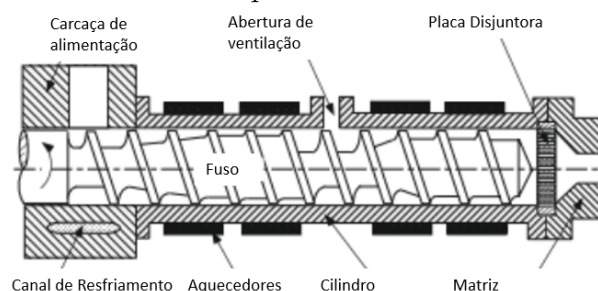
Fonte: Butt (2020)

através do processo monorosca. O material em forma de *pellet* ou pó é conformado ao ser fundido em um cilindro aquecido e ser pressionado contra uma matriz por uma rosca giratória para formação perfis em tubos e filamentos. A fricção do material ao avançar, causa um aquecimento que junto ao efeito dos aquecedores, conduz o material ao ponto de fusão onde um filme é formado na superfície do cilindro. Na Figura 2, vemos um esquema de uma extrusora monorosca com aberturas de ventilação. Esse esquema exemplifica a grosso modo o funcionamento do processo utilizado nos experimentos em laboratório por OLIVEIRA (2023). Como descrito por (RAUWENDAAL, 2014), conforme o polímero deixa a matriz, a seção transversal do filamento tende a ter a mesma geometria da porção final do canal de escoamento da matriz.

Para fins simulacionais, o métodos de extrusão utilizado foi o de extrusora de aríete. Este método possui *design* simples, rude e opera de maneira ciclica. São essencialmente dispositivos de deslocamento positivo. Com alta capacidade para gerar elevadas pressões, porém, capacidade limitada para controle da homogeneidade da temperatura e ponto de

fusão (RAUWENDAAL, 2014). Exemplificada na Figura 3, essas extrusoras são populares por trabalhar forçando o polímero contra uma matriz abaixo do seu ponto de fusão, causando uma orientação molecular efetiva. O tarugo é posicionado em contato direto com as paredes do cilindro e do êmbolo, que também tem papel de contenção do material deformado.

Figura 2 – Desenho esquemático extrusora monorosca.



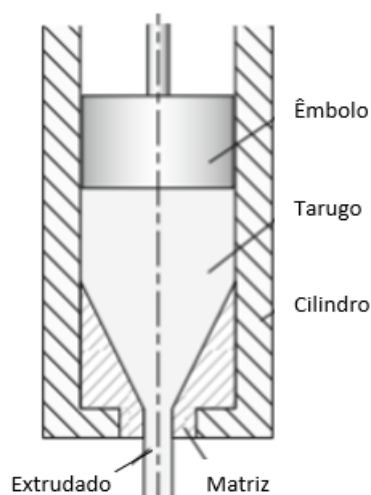
Fonte: Traduzido de Rauwendaal (2014)

## 2.3 Polímeros

### 2.3.1 Extrusão Polimérica

A extrusão de polímeros é um processo de elevada eficiência mas que exige precisão no controle de parâmetros como temperatura, pressão e taxa de cisalhamento. O *design* da rosca e sua relação com a qualidade da extrusão são estudados por Rauwendaal (2014). Em contrapartida, (TADMOR; GOGOS, 2005) abordam a mecânica dos fluídos não-Newtonianos e trazem destaques para a reologia dos polímeros, as influências de suas propriedades viscosas. Eles avaliam o impacto do comportamento não-Newtoniano no fluxo

Figura 3 – Desenho esquemático extrusora de aríete. Extrusão de estado sólido direta.



Fonte: Traduzido de Rauwendaal (2014)

do canal de escoamento da matriz descrevem como este comportamento pode ser modelado pela equação constitutiva de Carreau-Yasuda, relacionando o impacto da temperatura e da taxa de cisalhamento na viscosidade do material.

A extrusão de polímeros granulares *pellets* é uma técnica amplamente utilizada para a transformação de polímeros termoplásticos em produtos acabados ou semiacabados. Esse processo é particularmente eficiente devido à capacidade dos polímeros na forma de grânulos de serem facilmente alimentados em extrusoras. Na extrusão de *pellets* é crucial que sejam controlados os parâmetros da operação de maneira a garantir homogeneidade e a qualidade do produto final. Geralmente utilizados em extrusoras monorosca, os *pellets* de polímeros com viscosidade reduzida tem maior facilidade em atingir ponto de fusão, melhorando a homogeneidade do material. Devido a uniformidade dos tamanhos dos grânulos, sua elevada densidade e baixa área de superfície, estes polímeros necessitam de menos energia para serem fundidos e, além disso, permitem alimentação contínua na extrusora, garantindo taxa constante de produção.

Em matrizes mais complexas, o desafio é garantir que o material tenha fusão completa e esteja homogêneo ao ser conformado. A heterogeneidade pode gerar defeitos de orientação das moléculas, imperfeições estruturais ou bolhas que acarretam na diminuição da densidade do perfil (VOLPATO *et al.*, 2015). Com isso em mente, para a simplificação da simulação, levou-se em consideração a operação em regime estável e com material contínuo.

### 2.3.2 Comportamento Visco-Elástico

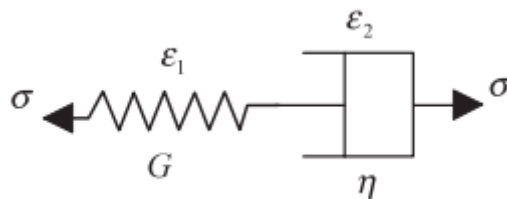
Polímeros apresentam uma combinação de propriedades elásticas, características de sólidos, e viscosas, como flúidos, caracterizando assim seu comportamento viscoelástico. Esse comportamento pode ser explicado de forma simplificada por modelos como de Maxwell e de Kelvin-Voigt, combinando conceitos elásticos da lei de Hooke e viscosos da lei de Newton. Nesses modelos, elementos viscosos são considerados como amortecedores e elásticos como molas.

Esses modelos são descritos pelas equações 1 e 2, respectivamente, onde:

- $\sigma$  é a tensão;
- $G$  é o módulo elástico;
- $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon$  é a deformação total;
- $\eta$  é a viscosidade.

Esses modelos apresentam o comportamento das tensões e relaxamento em fluxos cisalhantes de polímeros fundidos, em sua forma mais simplificada. A viscosidade é altamente dependente da temperatura e das taxas de cisalhamento, o que indica uma forte relação entre parâmetros mecânicos e de fluxos térmicos. O escoamento do polímero causa variação da temperatura, logo sua viscosidade é alterada e, portanto, as condições de escoamento são modificadas como consequência (CARNEIRO; NÓBREGA, 2012).

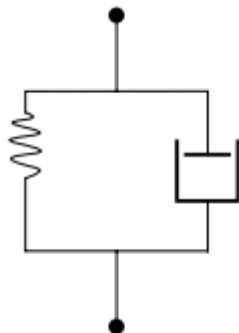
Figura 4 – Modelo viscoelástico de Maxwell.



Fonte: Carneiro e Nóbrega (2012)

$$\sigma(t) + \frac{\eta}{G} \frac{d\sigma(t)}{dt} = \eta \frac{\varepsilon(t)}{dt} \quad (1)$$

Figura 5 – Modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt.



Fonte: Tadmor e Gogos (2005)

$$\sigma(t) = G\varepsilon(t) + \eta \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (2)$$

Como abordado em Carneiro e Nóbrega (2012), a descrição do comportamento viscoso para uma ampla faixa de taxas de cisalhamentos é melhor descrito pela lei de Carreau (ou Carreau-Yasuda), que relaciona as viscosidades em determinado instante, com a viscosidade de repouso e as taxas de cisalhamento efetivo.

$$\eta = \eta_0 [1 + (\lambda \dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}} \quad (3)$$

Sendo:

- $\eta_0$  é a viscosidade do fluido em repouso (Platô Newtoniano);  $\lambda$  é uma constante de tempo;
- $a$  é um parâmetro que descreve a transição do platô newtoniano para a região de afinamento por cisalhamento.
- $n$  é um índice de comportamento do fluxo.

### 2.3.3 Efeito Barus

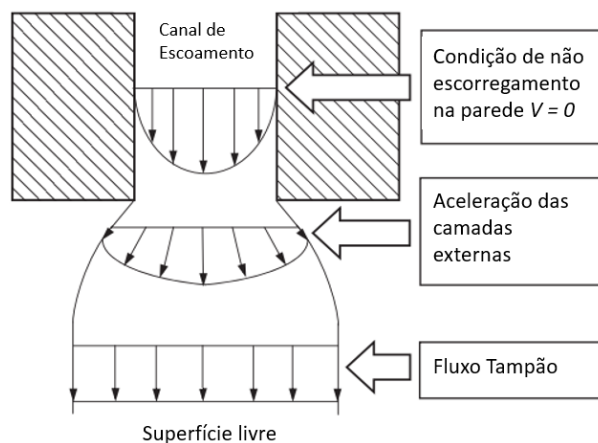
Conhecido como inchamento pós-extrusão, o efeito Barus descreve a diferença das dimensões do extrudado com o orifício da matriz. Ao deixar a matriz, a expansão é promovida devido ao alívio das tensões, o que causa uma aceleração das camadas externas do polímero e a recuperação do caráter elástico do material fundido. Um modelo popular utilizado para simulações de processos de extrusão é o de Tanner (1985). A Figura 6 exemplifica o efeito de expansão na saída da matriz.

$$B = \frac{D}{D_0} = \left[1 + \frac{1}{8} \left(\frac{N_1}{\tau}\right)_w^2\right]^{\frac{1}{6}} \quad (4)$$

onde:

- $B$  é o inchamento pós-extrusão;
- $D_0$  é o diâmetro do canal da matriz;
- $D$  é o diâmetro do extrudado;
- $N_1$  é diferença da primeira tensão normal;
- $\tau$  é a tensão de cisalhamento;
- $w$  indica que o valor é considerado na parede do canal.

Figura 6 – Representação esquemática da mudança do perfil de velocidade na saída da matriz.



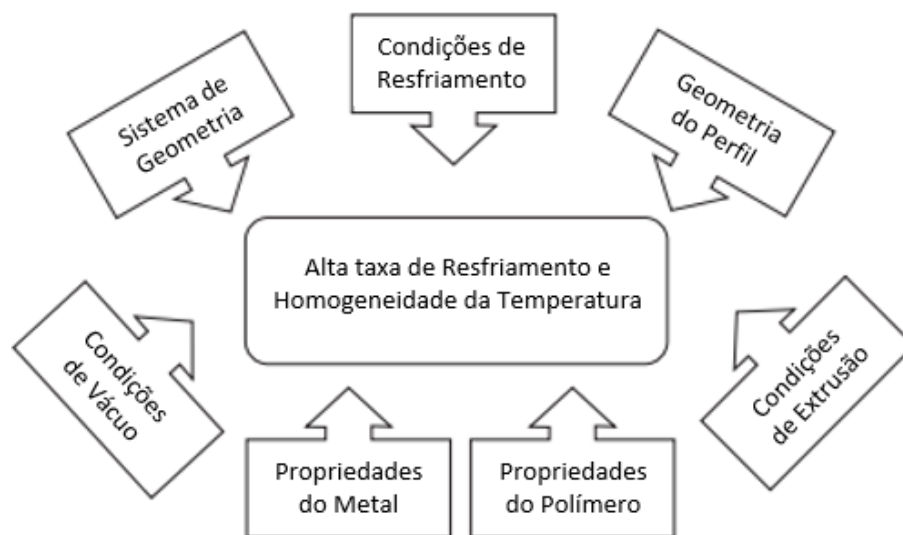
Fonte: Traduzido de Carneiro e Nóbrega (2012)

## 2.4 Matrizes

Os avanços nas tecnologias de *design* de matrizes e as novas opções de automação, tem sido possível criar sistemas para controle de parâmetros em tempo real, através de sensores de pressão e temperatura. Como evidenciado na Figura 7, os processos com matrizes complexas dependem do desenvolvimento e controle das taxas de resfriamento e homogeneidade da temperatura a partir dos seguintes parâmetros:

- Condições de Resfriamento;

- Geometria do Perfil;
- Condições de Extrusão;
- Propriedades do Material;
- Condições de Vácuo;
- Geometria do sistema.

Figura 7 – Parâmetros que afetam o *design* dos sistemas de calibração/resfriamento

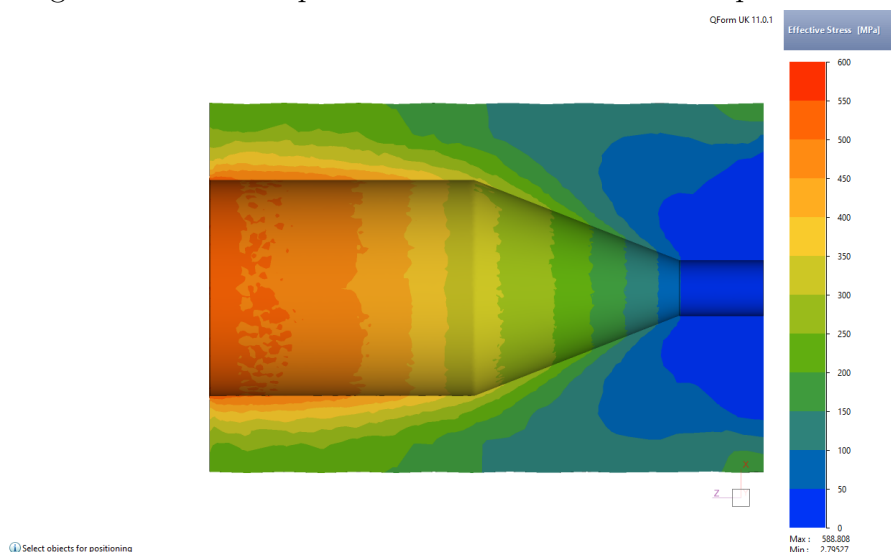
Fonte: Traduzido de Carneiro e Nóbrega (2012)

Carneiro e Nóbrega (2012) discutem o impacto das diferentes geometrias de matrizes no fluxo de material. Matrizes com perfís complexos exigem um planejamento detalhado para evitar distorções no produto final, já que o fluxo de material deve ser balanceado por toda a seção transversal. Matrizes para perfís ocos, por exemplo, requerem a inserção de mandrís para formar o vazio interno, o que pode complicar o *design* devido às forças internas e ao resfriamento desigual. Da mesma forma, para formas mais complexas, a simulação computacional e a modelagem matemática são ferramentas essenciais para prever como o material se comportará dentro da matriz e ajustar o *design* conforme necessário. Outro aspecto relevante no projeto de matrizes é a distribuição de pressão e velocidade ao longo da matriz. Para que a extrusão seja uniforme, é importante que a pressão interna seja distribuída de maneira equilibrada. Matrizes mal projetadas podem levar a uma pressão desbalanceada, resultando em variações na espessura ou na qualidade do produto extrudado. Carneiro e Nóbrega (2012) sugerem que uma análise de fluxo assistida por software, como o método de elementos finitos (MEF), pode ser usada para prever e otimizar a distribuição de pressão.

## 2.5 Seção do Filamento

A seção transversal do filamento extrudado é uma característica crítica, especialmente em aplicações como impressão 3D, filmes plásticos e fibras. A seção do filamento é

Figura 8 – Perfil de pressões em matriz de extrusão polimérica



Fonte: Autor.

diretamente influenciada pelo design da matriz e pela homogeneidade do polímero fundido. Conforme discutido por Tadmor e Gogos (2005), o escoamento do polímero dentro da extrusora e na saída da matriz depende de variáveis como:

- **Viscosidade do polímero fundido**, que é função da temperatura e das taxas de cisalhamento;
- **Taxa de estiramento**, que depende da velocidade de impressão, geometria do canal e perfil de pressões internas.

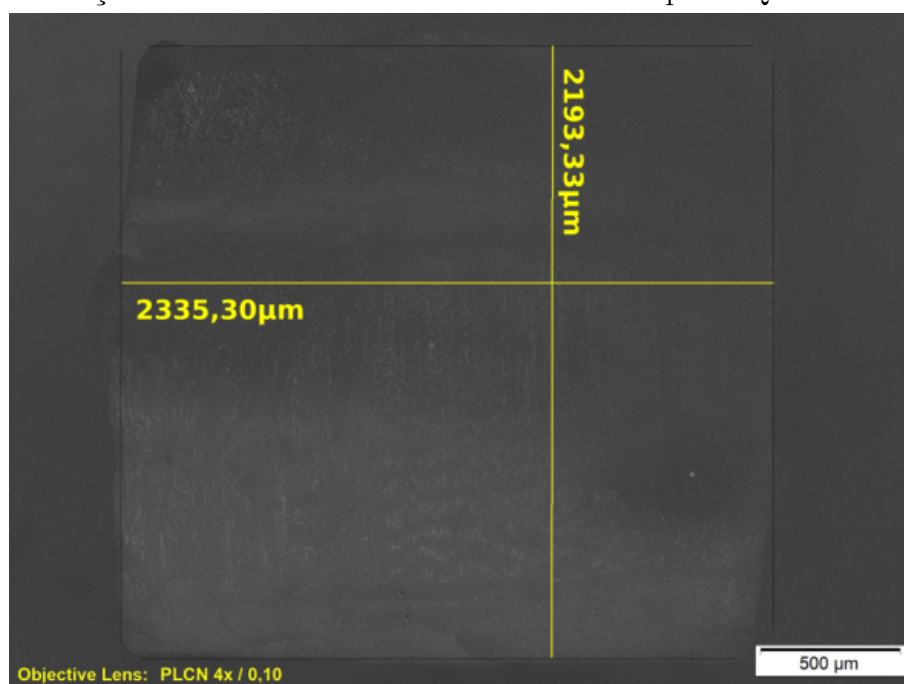
Um grande desafio na produção de filamentos é a expansão da extrusão mencionada anteriormente, que pode resultar em uma seção de filamento maior do que a originalmente projetada na matriz. Para mitigar este efeito, a taxa de resfriamento do filamento após a extrusão precisa ser cuidadosamente controlada. Conforme descrito por Röthemeyer e Sommer (2013), o resfriamento gradual e controlado pode minimizar deformações e garantir que o filamento mantenha a geometria desejada.

A seção do filamento tem implicações diretas nas propriedades mecânicas e funcionais do produto final. Por exemplo, na impressão 3D, o controle do diâmetro do filamento é essencial para garantir precisão nas camadas impressas. De forma semelhante, em aplicações como a produção de fibras e filmes, a uniformidade da seção do filamento determina a resistência mecânica e a qualidade do produto final.

Na Figura 10 vemos a relação da geometria do filamento extrudado com a as razões dimensionais da geometria da matriz, onde:

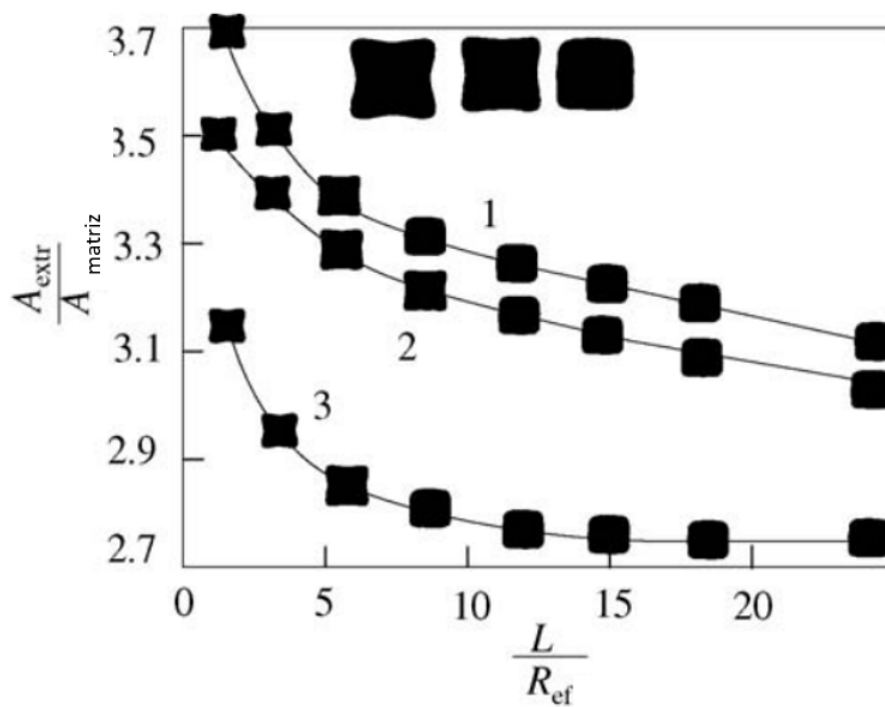
- $A_{extr}$  é a área da seção transversal do extrudado;
- $A_{matriz}$  é a área da seção do perfil da matriz;
- $L$  é o comprimento do canal
- $R_{ef}$  é o "raio efetivo". ( $R_{ef} = 2A_{matriz}/\text{perímetro da matriz}$ )

Figura 9 – Seção de filamento extrudado em matriz de perfil Quadrado Côncavo.



Fonte: OLIVEIRA (2023)

Figura 10 – Relação da Geometria do extrudado com a matriz.



Fonte: Adaptado de Tadmor e Gogos (2005)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os métodos, softwares e parâmetros de operação utilizados ao longo do trabalho. Este trabalho tem como finalidade apresentar, simular e analisar o comportamento do polímero *ABS* em um processo de extrusão. Essas análises serão cruciais para desenvolver o estudo sobre controle de condições nos processos de impressão 3D, envolvendo o polímero *ABS*. É de grande importância entender os fatores que influenciam no processo de deposição de material fundido, para que seja possível otimizar as tecnologias que envolvem este processo de fabricação. O desenvolvimento destas tecnologias é crítico para que haja avanços no *design* das matrizes, economia de material, velocidade de impressão, fabricação peças de grande escala e geometrias complexas.

Para melhor compreender o processo simulado, foram algumas considerações e simplificações na modelagem do material conformado e sobre as condições de contorno adotadas no processo. Este estudo foi dividido em três etapas: Considerações iniciais, Modelagem e simulações.

#### 3.1 Considerações

A literatura mostra que para realizar simulações numéricas precisas de conformações com materiais poliméricos, é necessário levar em consideração fatores como as influências das taxas de cisalhamento e temperatura no comportamento visco-elástico do material. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o *software* licenciado para o Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar, QFormUK. Este programa é usualmente empregado em processos de conformações com materiais metálicos. Logo, seu banco de dados é carregado com equações constitutivas que descrevem o comportamento de metais e, que apesar de não ser o melhor ajuste, foram utilizadas para modelar e descrever o *ABS*.

Uma das considerações que devemos destacar é a possibilidade de não ocorrência do efeito de expansão pós extrusão, uma vez que o modelo constitutivo utilizado foi o de Hensel-Spittel [5] e este não considera efeitos viscosos e sua dependência das taxas de cisalhamento.

$$\sigma = A \cdot e^{m_1 T} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_3} \cdot e^{\frac{m_4}{\varepsilon}} \cdot (1 + \varepsilon)^{m_5 T} \quad (5)$$

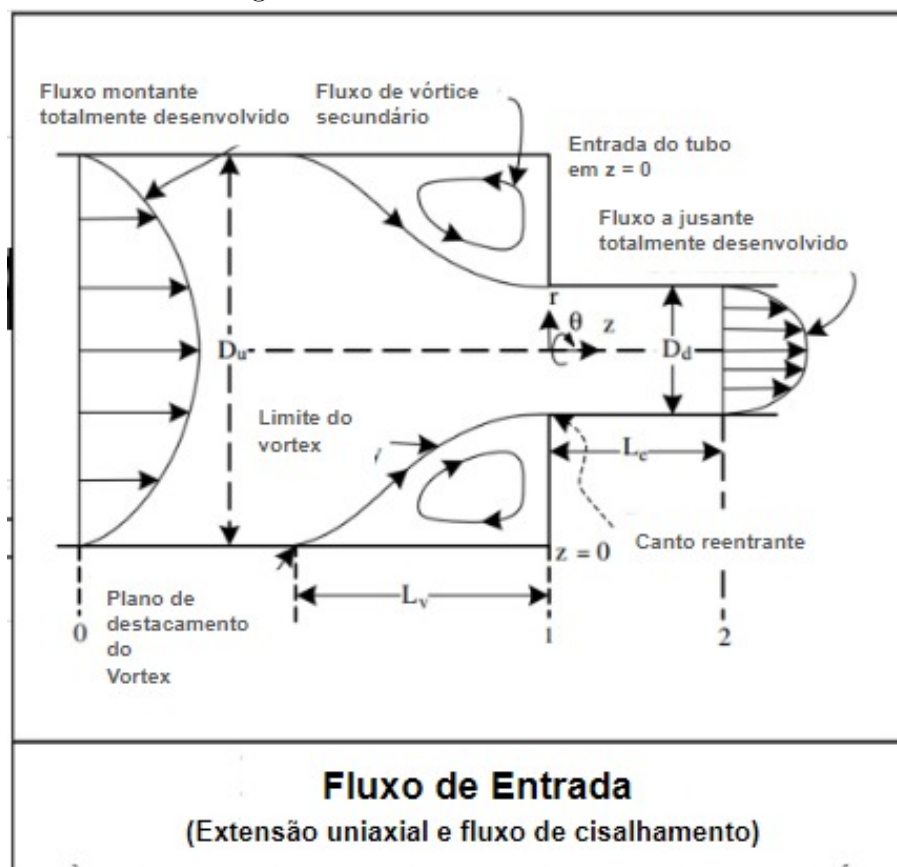
Onde:

- Constante do material  $A$  [MPa]
- Termo de sensibilidade térmica  $m_1$
- Termo de endurecimento  $m_2$

- Termo de sensibilidade a taxa de deformação  $m_3$
- Termo de amolecimento  $m_4$
- Termo de ajuste combinado da deformação e temperatura  $m_5$

O comportamento do escoamento não-Newtoniano de um polímero fundido é demonstrado na Figura 11.

Figura 11 – Escoamento em matriz.



Fonte: traduzido de Tadmor e Gogos (2005)

## 3.2 Modelagem

Aqui serão mostradas todas as propriedades, ajustes, nomenclaturas e detalhes das modelagens realizadas sobre o material a ser deformado, das matrizes, condições de contorno e folha de processo utilizada durante as simulações.

### 3.2.1 Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)

Para que fosse possível avaliar a ferramenta de extrusão do QFormUK, foi necessário alimentar o banco de dados do *software* com as propriedades do polímero Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). Para a modelagem do ABS, foram utilizados valores médios obtidos através da plataforma *MatWeb* e apresentados nos anexos A e B. A densidade, foi

baseada nos resultados obtidos por OLIVEIRA (2023), que mostrou uma estabilidade no valor da densidade nas condições sugeridas pelo fabricante. As propriedades do material modelado são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades *ABS*

Propriedade	Valor	Unidade
Calor Específico	2000	$kJ/kg \cdot K$
Condutividade Térmica	0.171	$W/m \cdot K$
Constante de Poisson	0.364	
Densidade	1040	$kg/m^3$

Fonte: Autor.

Propriedades como o Módulo de Young ( $YM$ ) e coeficiente de expansão térmica (CET) foram definidos através de uma função de tabela e são adaptadas dos anexos C e B, apresentadas nas figuras 12 e 13, respectivamente. O comportamento das tensões descrito pela equação 5 é definido pelas constantes apresentadas na Tabela 3 e, foram ajustadas manualmente seguindo como referência as curvas obtidas por Wang *et al.* (2018) e apresentadas na Figura 15. Família de curvas modelada é apresentada na Figura 14. O caráter crescente das curvas apresentadas por Wang *et al.* (2018) para deformações acima de 0.3 precisou ser adaptado para que as tensões não ficassem ilimitadas para grandes deformações, uma vez que não se tem informações sobre o comportamento do material sobre essas condições.

Tabela 3 – Constantes ajustadas modelo de Hensel-Spittel para *ABS*

Propriedade	Valor	Unidade
A	53	MPa
$m_1$	-0.008	
$m_2$	-0.2542	
$m_3$	0.035	
$m_4$	-0.01	
$m_5$	0.0005	

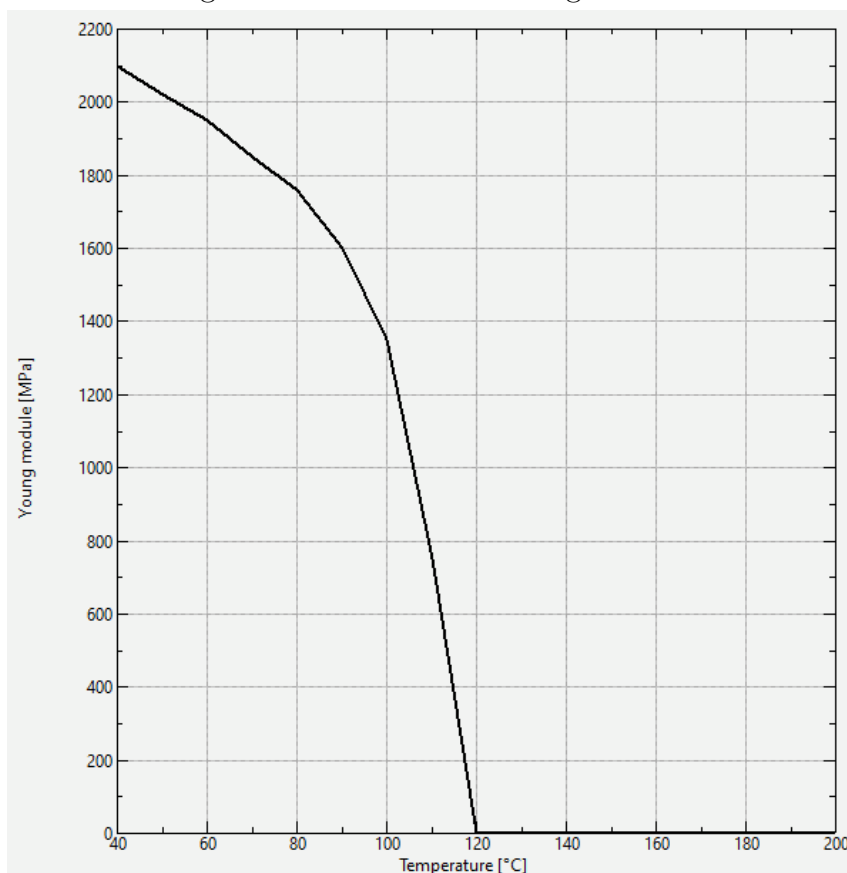
Fonte: Autor.

Para que o comportamento elasto-plástico do material deformado seja bem reproduzido, é crítico que o  $YM$ , CET e coeficiente de Poisson estejam bem definidos. O módulo de Young foi descrito através dos estudos realizados por Palanisamy *et al.* (2021) e faixa de CET apresentado por Ashby e Jones (1986).

### 3.2.2 Matrizes

Baseado nos estudos levantados por OLIVEIRA (2023), foram projetadas duas matrizes cilíndricas no *software* NX12.0, referentes ao bocais de impressão 3D, presentes nos laboratórios do departamento de engenharia mecânica UFSCar.

Figura 12 – Módulo de Young do ABS



Fonte: Autor.

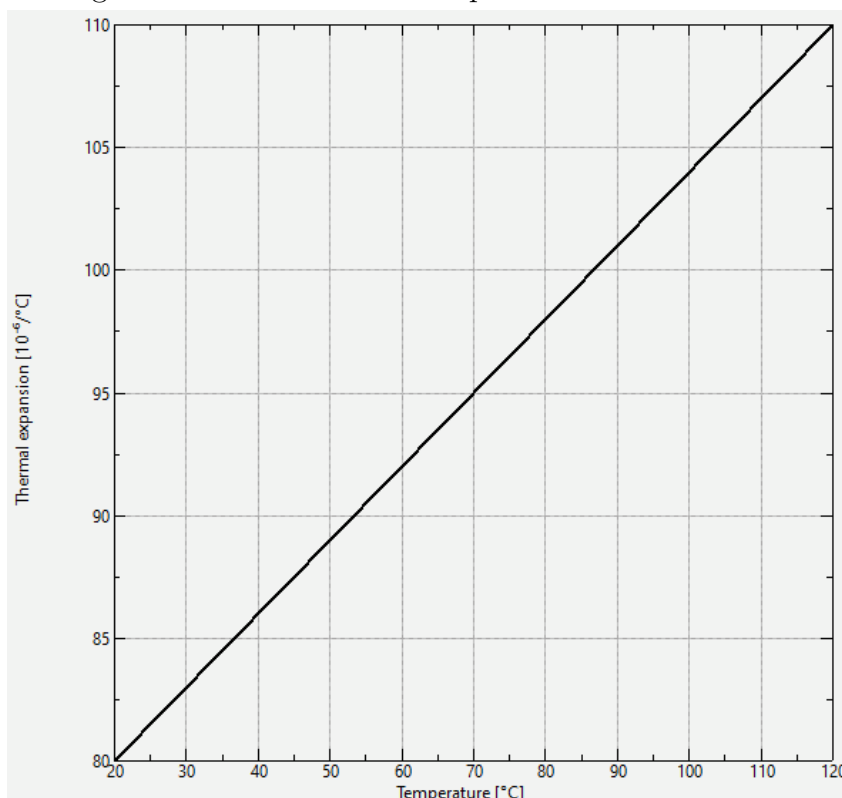
As matrizes são definidas como:

- **Perfil Circular:** 3mm de diâmetro denominada D300;
- **Perfil Quadrado Côncavo:** Inscrito em circunferência de 3mm de diâmetro denominada D330.

Estas matrizes são apresentadas nas figuras 16 e 17. Para simplificar a parametrização da ferramenta e do domínio de escoamento, as matrizes foram modeladas de maneira que o perfil seja extrudado na direção -OZ. Para simplificação das malhas, é indicado que sejam realizados alguns arredondamentos nas bordas onde o material irá escoar.

A ferramenta QShape, presente no *software* QFormUK, realiza a parametrização da matriz e seu domínio de escoamento através de poucos passos e de maneira quase autônoma. Assim que as malhas para os volumes do material e da ferramenta são gerados, temos acesso as informações do número total de nós e elementos. Como as malhas são adaptativas, conforme o material é extrudado, ao fim da operação o número de nós aumenta. As malhas são exibidas nas figuras 18 e 19 e as propriedades das malhas antes e após operação de extrusão estão na tabela 4.

Figura 13 – Coeficiente de Expansão Térmica do ABS.



Fonte: Autor.

Tabela 4 – Propriedades das malhas das matrizes

Objeto	Total nós $t_0$	Total nós $t_f$	Elem. Vol. $t_0$	Elem. Vol. $t_f$
D300	297988	305034	1578216	1615578
D330	306285	314735	1647318	1689750

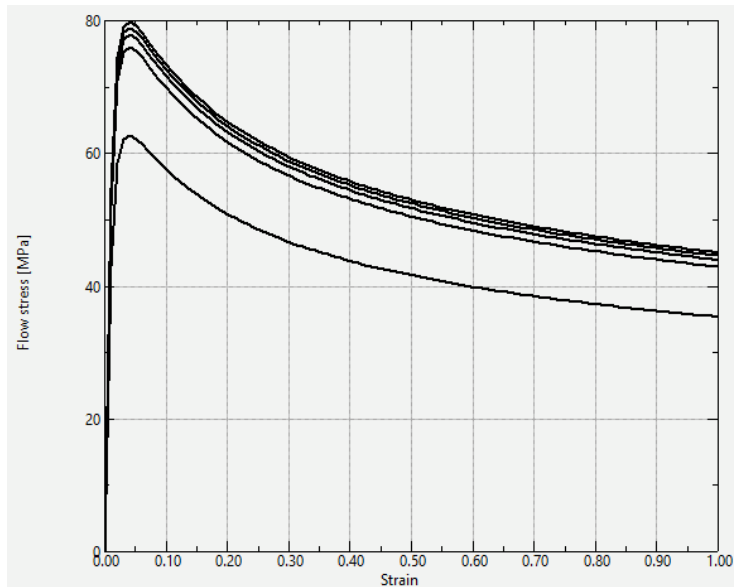
Fonte: Autor.

### 3.2.3 Simulação

Após modelar o material, a ferramenta e o domínio da simulação, definiu-se os parâmetros a serem variados e as condições de contorno. Os parâmetros que foram variados são a temperatura do tarugo de ABS e a velocidade do aríete que realiza o processo de conformação. Uma boa definição das condições de contorno, é crítica para o andamento da simulação em termos de controle da operação e sobre o tempo de processamento. Dentro das condições definidas, podemos listar:

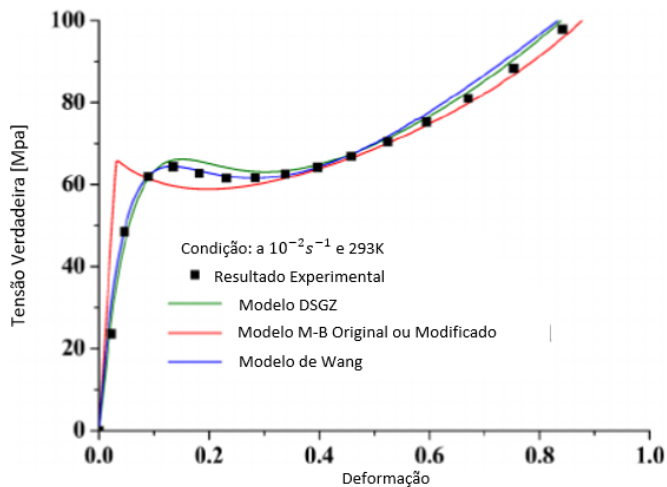
- **Tipo do problema (*Profile flow after die filling*):** Resolve o escoamento do material para o estágio permanente do processo de extrusão.
- **Estágio de preenchimento (*Equal to main stage*):** É o caso onde a velocidade do aríete é igual ao estágio principal.
- **Ferramenta:** Material da ferramenta definido como aço H13 para extrusão e condições de atrito padrão de extrusão.

Figura 14 – Comportamento da Tensões do ABS@20°C.



Fonte: Autor.

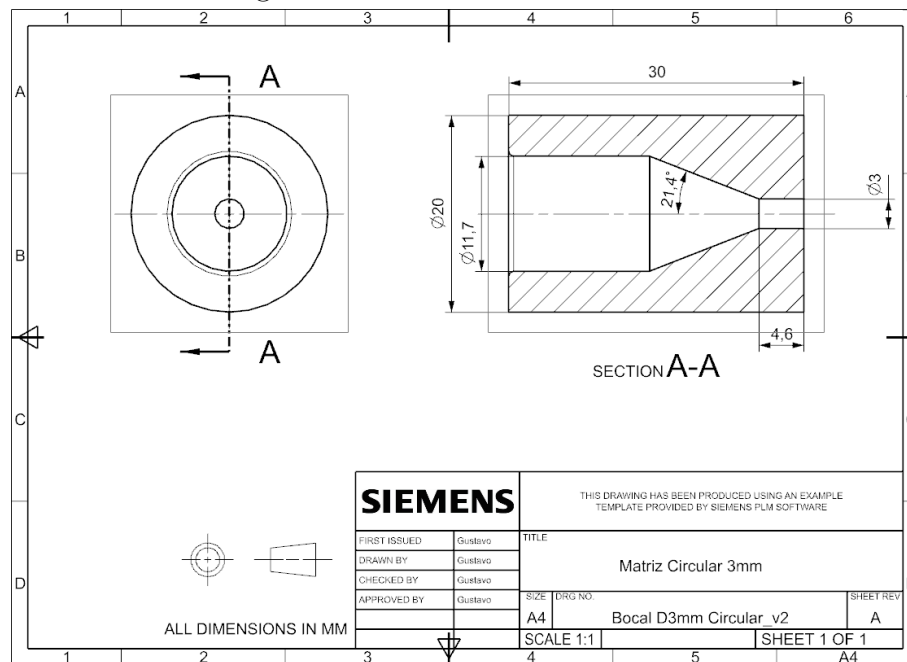
Figura 15 – Curvas experimentais e de quatro modelos constitutivos @ $10^{-2}s^{-1}$



Fonte: Traduzido de (WANG *et al.*, 2018).

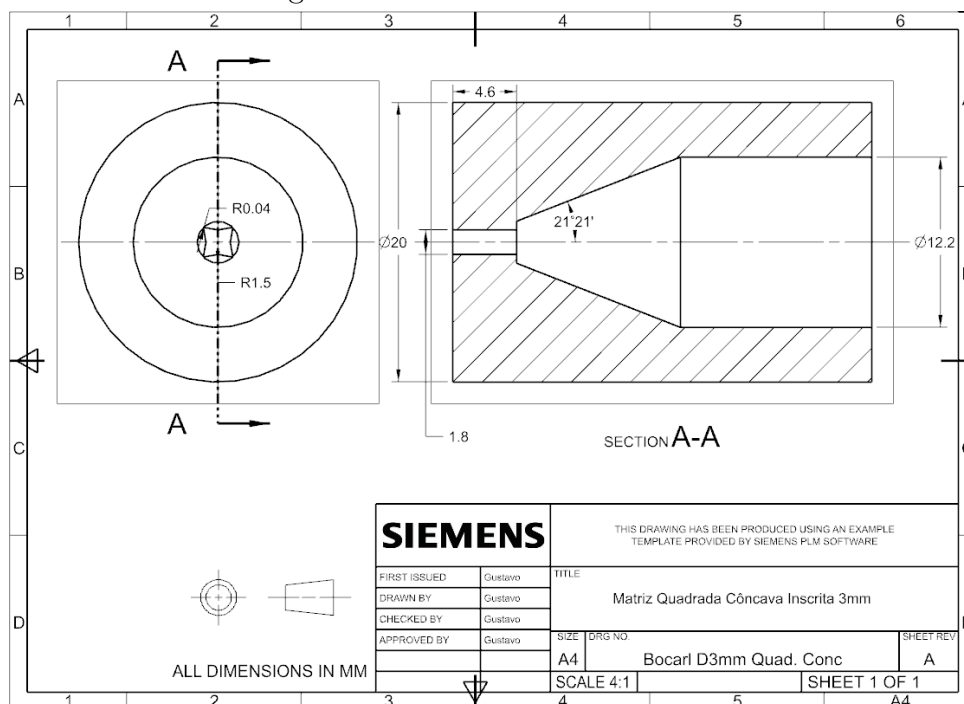
Para o nome de cara operação, deu-se o nome da matriz seguida das propriedades avaliadas e seus módulos, como é demonstrado na tabela 6. As condições de contorno são definidas diretamente na folha de processo do *software*. Definiu-se que as temperaturas das matrizes, contenção, fixadores, aríete e ar ambiente como mostra a tabela 7.

Figura 16 – Desenho técnico D300.



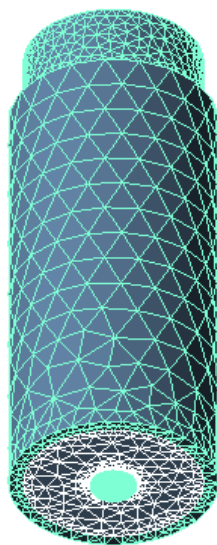
Fonte: Autor.

Figura 17 – Desenho técnico D330.



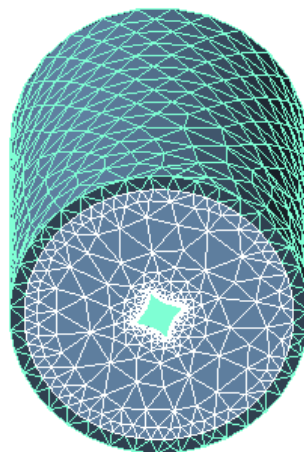
Fonte: Autor.

Figura 18 – Malha para ferramenta D300.



Fonte: Autor.

Figura 19 – Malha para ferramenta D330.



Fonte: Autor.

Tabela 5 – Condições de atrito.

Descrição	Valor	Unidade
Lei de atrito	Levanov	
Fator de fricção	1	
Coefficiente Levanov	1.25	
Transferência de calor	30000	$W/m^2K$

Fonte: Autor.

Tabela 6 – Combinações das simulações.

<b>Objeto</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Velocidade [mm/s]</b>
D300T80v3	80	3
D300T80v6	80	6
D300T100v3	100	3
D300T100v6	100	6
D330T80v3	80	3
D330T80v6	80	6
D330T100v3	100	3
D330T100v6	100	6

Fonte: Autor.

Tabela 7 – Condições de contorno

<b>Objeto</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
Matriz	60
Contenção	60
Aríete	90
Anel de Pressão	60
Fixador	60

Fonte: Autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos nas simulações definidas anteriormente e avaliar se os resultados se aproximam dos resultados obtidos por Oliveira (2023). Os resultados serão apresentados para que sejam avaliados os parâmetros ao variar a temperatura de operação e a velocidade do êmbolo.

Nesta seção, vamos verificar e avaliar os efeitos e influências que a peça sofre no perfil temperaturas do conjunto, ao variarmos as temperaturas iniciais do tarugo, a velocidade do êmbolo e a geometria da matriz. Tendo as temperaturas da matriz e contenção com temperaturas iniciais iguais a 60°C e êmbolo a uma temperatura de 90°C. O padrão de distribuição de temperaturas é avaliado no estágio de regime permanente, nos mostrando os principais pontos de aquecimento e a direção das dissipações de calor.

### 4.1 Matriz de Perfil Circular - D300

As figuras 20 e 23 revelam os perfis de distribuição de temperaturas para a ferramenta e a peça de trabalho. É possível notar que a velocidade teve pouca influência nos focos de geração de calor. Ao comparar a variação de velocidades, podemos notar que em ambos os casos, o cerne da distribuição de temperaturas é dado na região de entrada do canal do perfil. Isso vai de acordo com a literatura, uma vez que essa é uma região de estrangulamento, onde há um aumento da velocidade de escoamento que acaba causando um grande aumento nas tensões, como apresentado nas figuras 26 e 27. Também podemos notar que o aumento da velocidade causa um aumento na temperatura na porção média da matriz. Esse efeito aparece devido a maior dificuldade da matriz de dissipar o calor, devido ao maior fluxo de calor. Com a maior velocidade do êmbolo, aparecem novos picos de temperatura no início do cilindro que, em combinação com a porção do estrangulamento, aumentam a temperatura média do conjunto.

Em seguida, foi avaliado que as velocidades de impressão não variam com relação à temperatura. Na Tabela 8 podemos verificar as velocidades de saída do material. Essa tabela revela que a variação na temperatura não teve influência sobre as velocidades e que estas estão se comportando segundo a equação 6. Esse comportamento demonstra o caráter newtoniano do escoamento nesta simulação.

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (6)$$

Já quando avaliamos as tensões médias, é possível notar que as tensões são mais sensíveis as variações de velocidade do que variações de temperaturas, como é demonstrado na Tabela 9.

Tabela 8 – Velocidades de Impressão

<b>Combinação</b>	<b>Velocidade de Saída</b>	<b>Unidade</b>
D300T80v3	-47.3	<i>mm/s</i>
D300T80v6	-94.6	<i>mm/s</i>
D300T100v3	-47.3	<i>mm/s</i>
D300T00v6	-94.6	<i>mm/s</i>

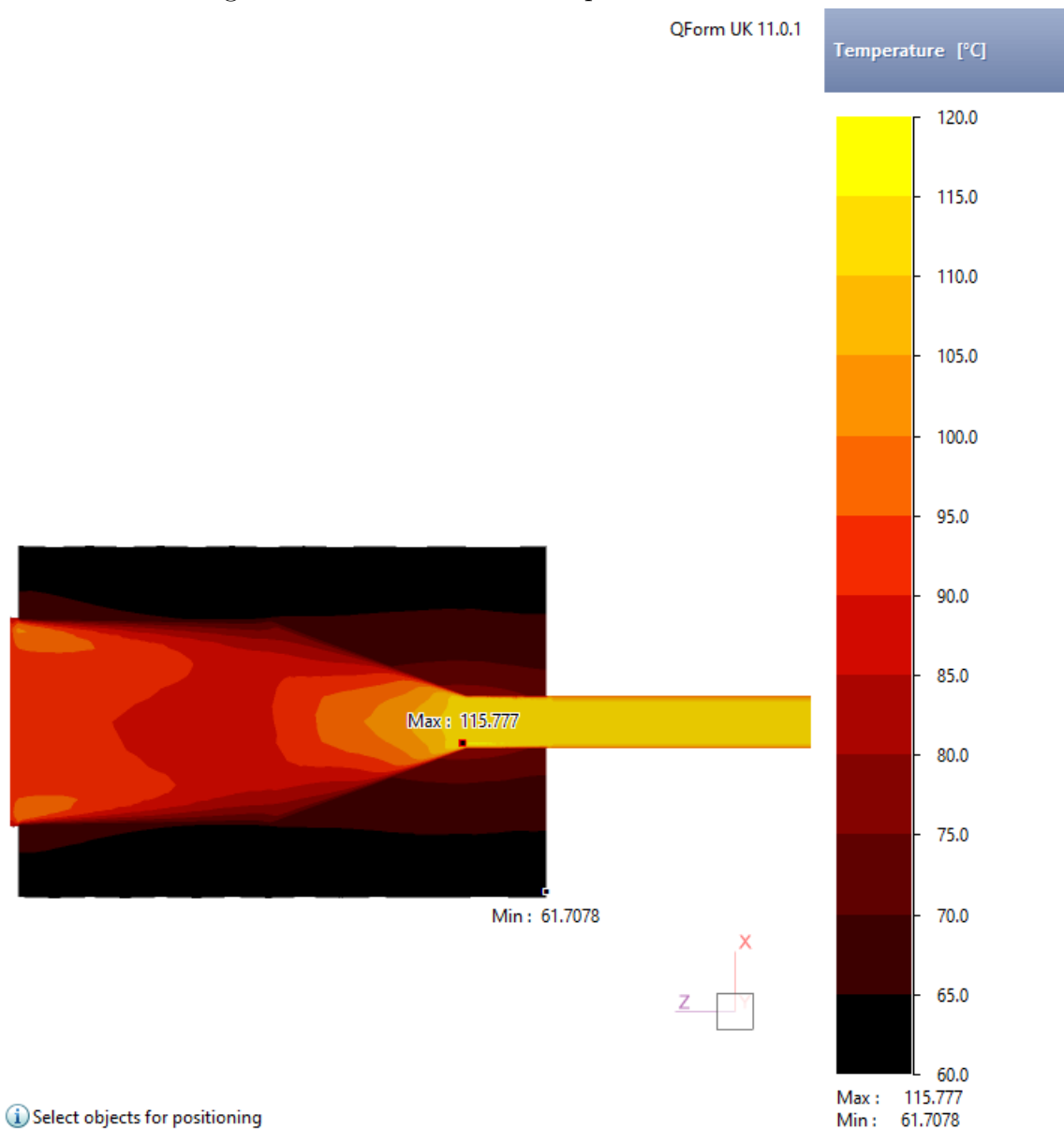
Fonte: Autor.

Tabela 9 – Influência das variações na Tensão Média

<b>Combinação</b>	$\Delta T$	$\Delta v$	$\Delta \sigma_m$ [MPa]
D300v3	x		1.52
D300T80		x	4.53
D300T100		x	4.37
D300v6	x		1.34

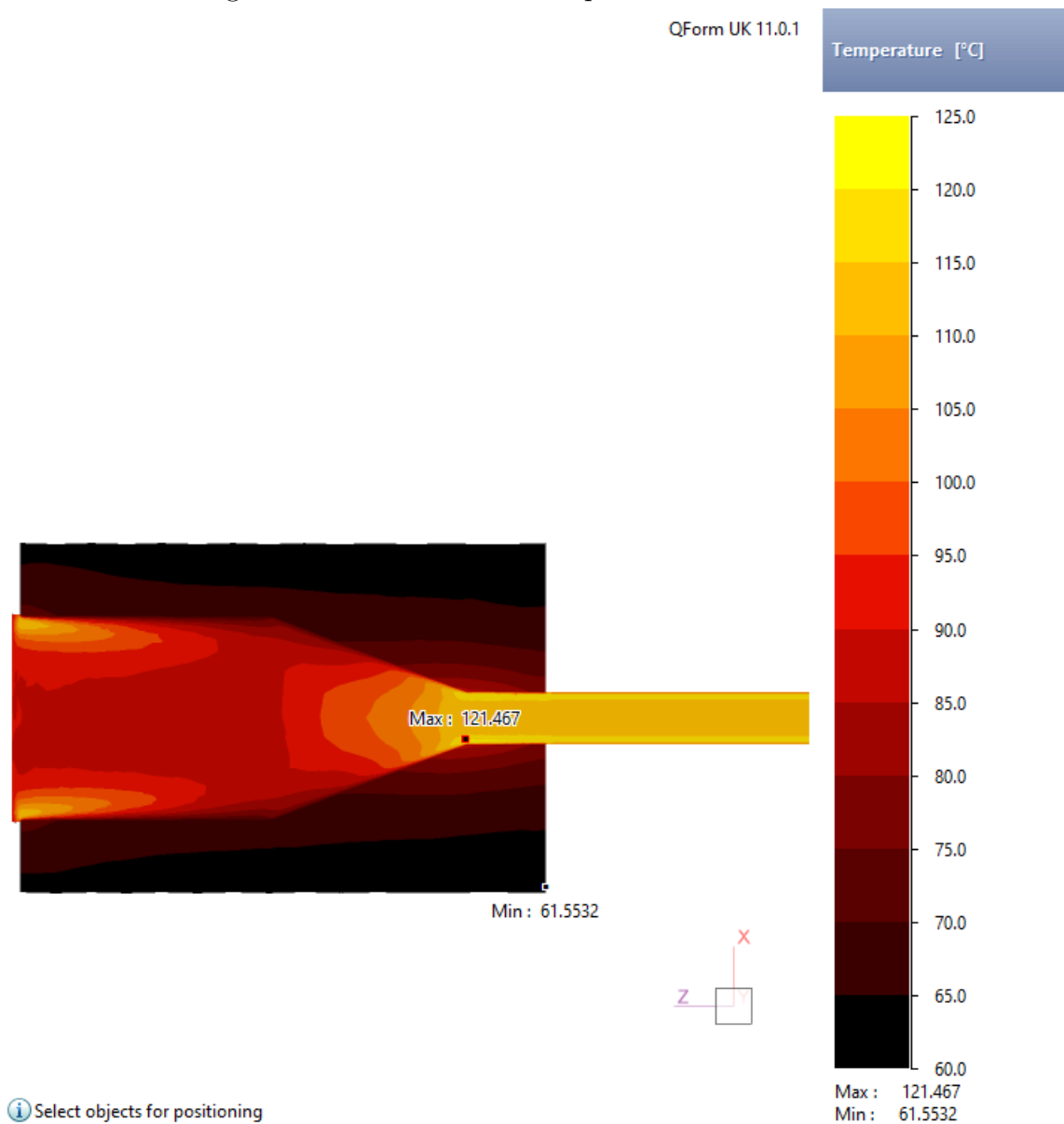
Fonte: Autor.

Figura 20 – Gradiente de Temperaturas D300T80v3



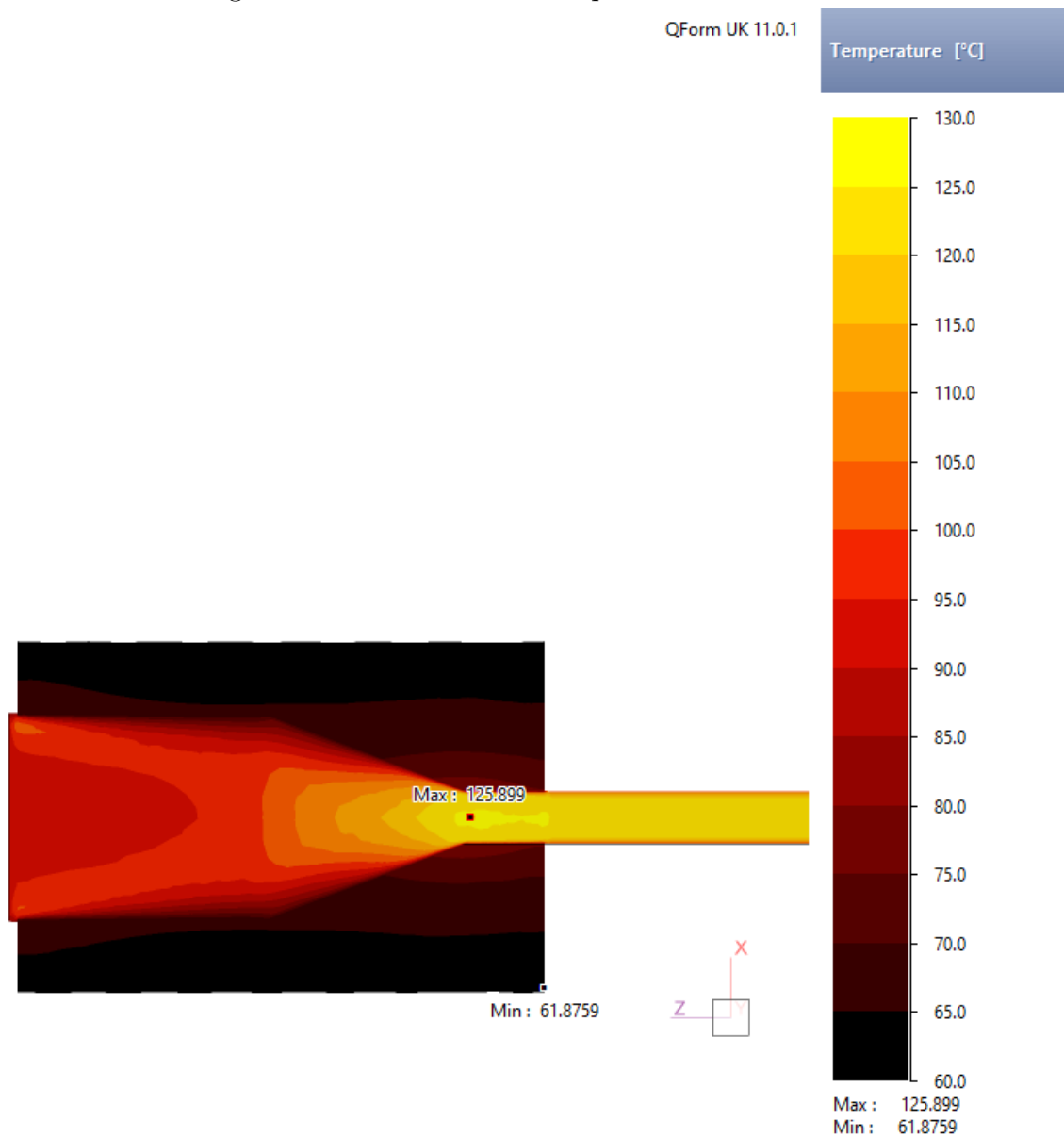
Fonte: Autor.

Figura 21 – Gradiente de Temperatura D300T80v6



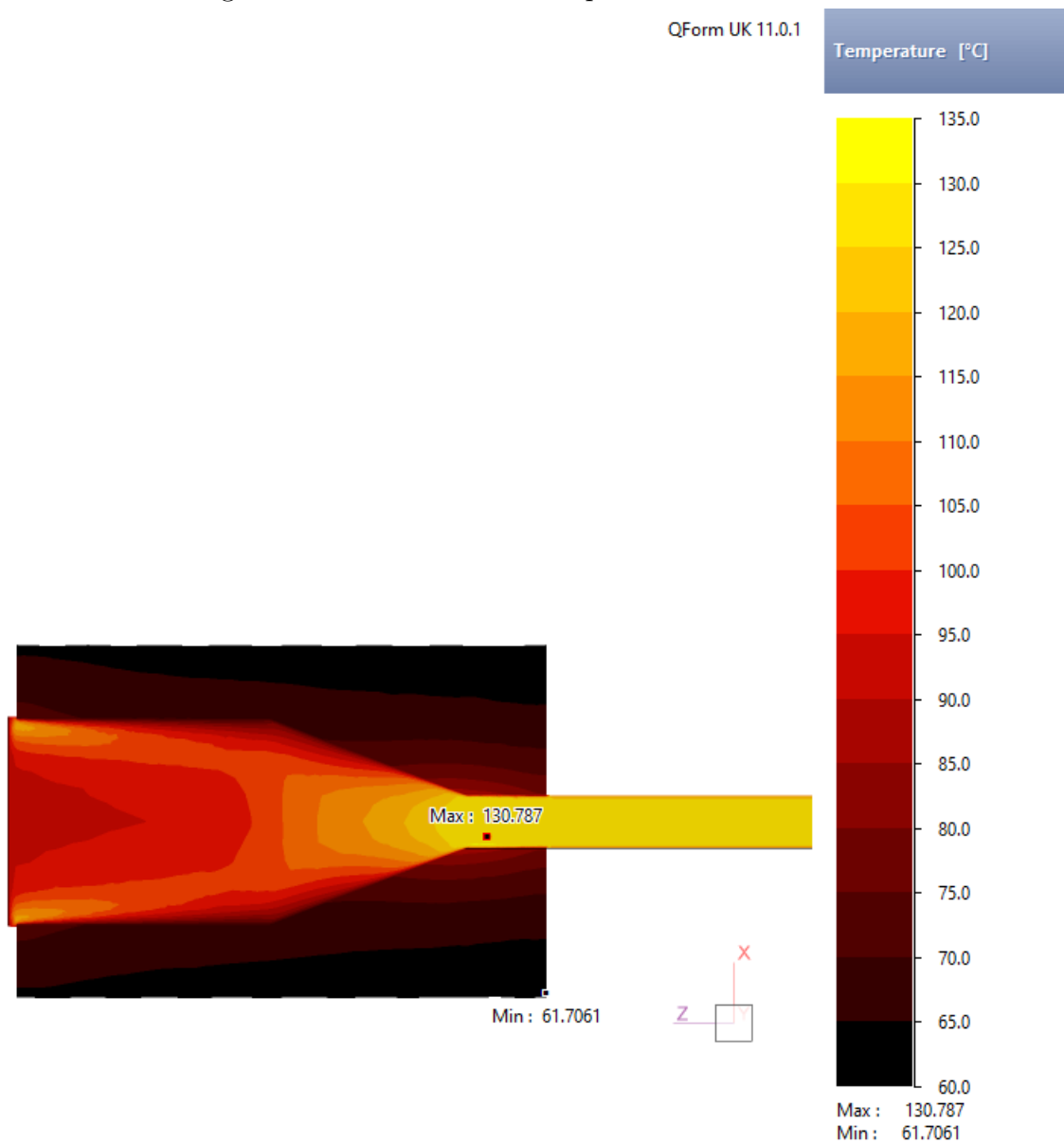
Fonte: Autor.

Figura 22 – Gradiente de Temperatura D300T100v3



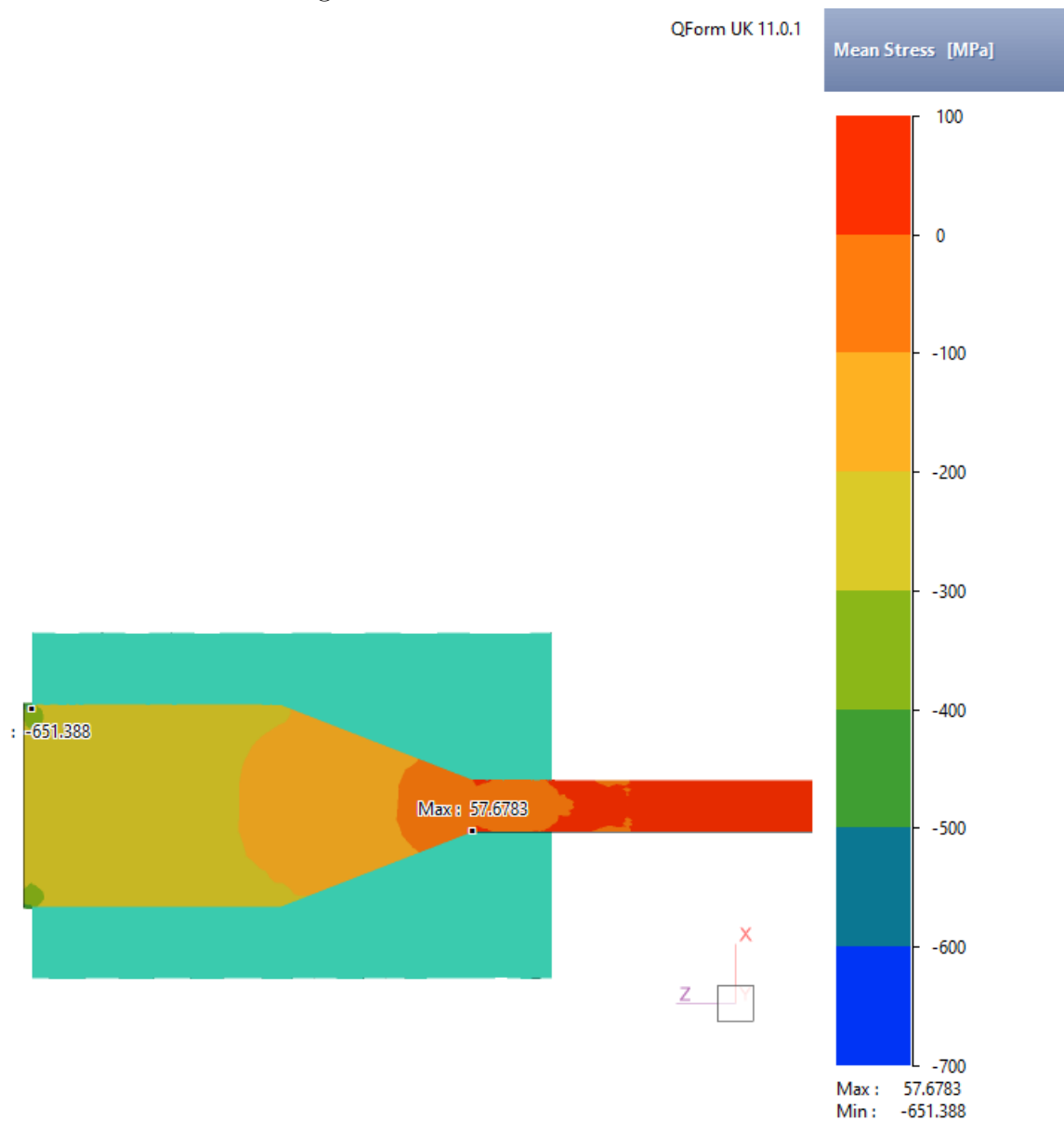
Fonte: Autor.

Figura 23 – Gradiente de Temperatura D330T100V6



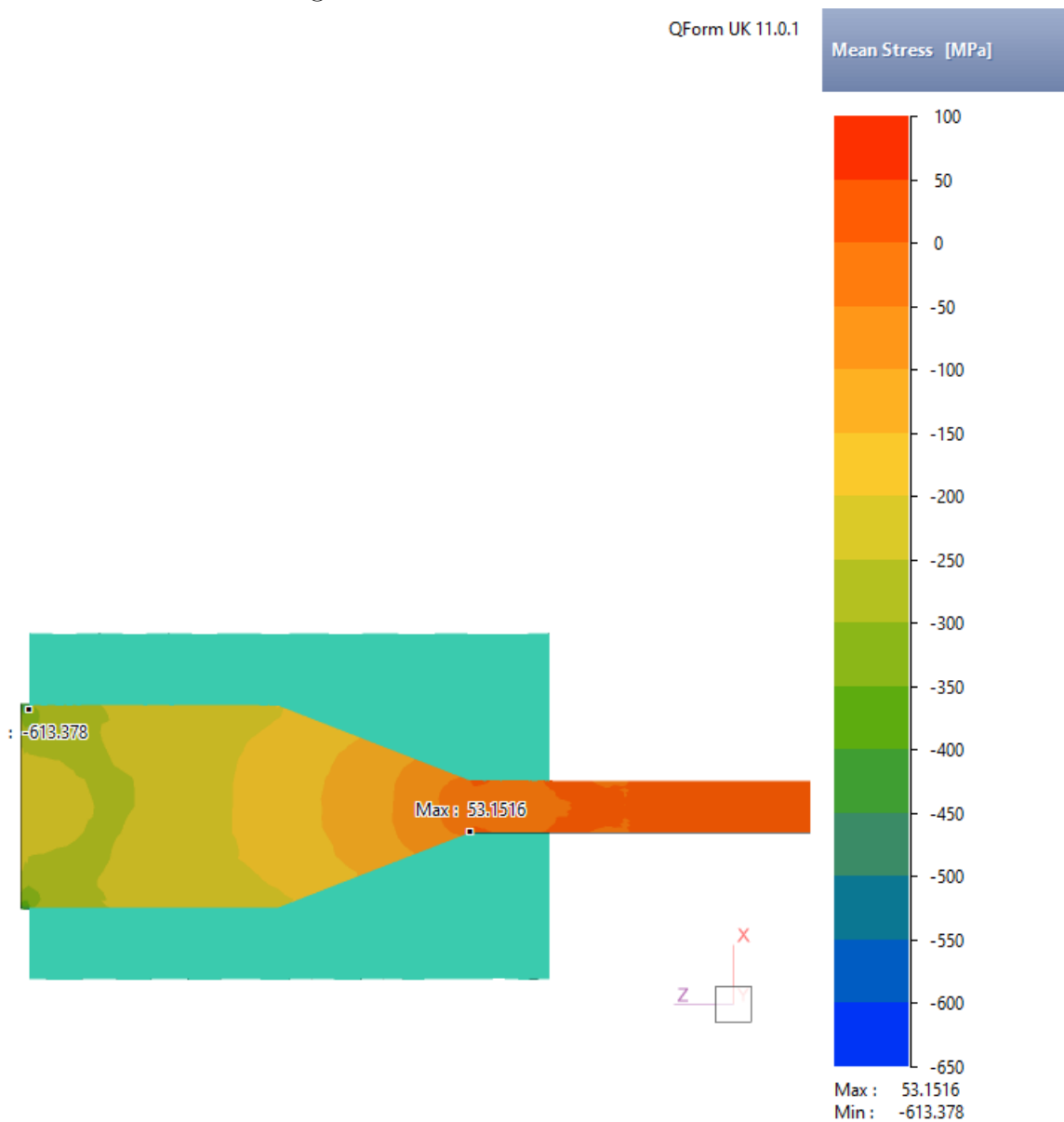
Fonte: Autor.

Figura 24 – Tensões Médias D300T80v3



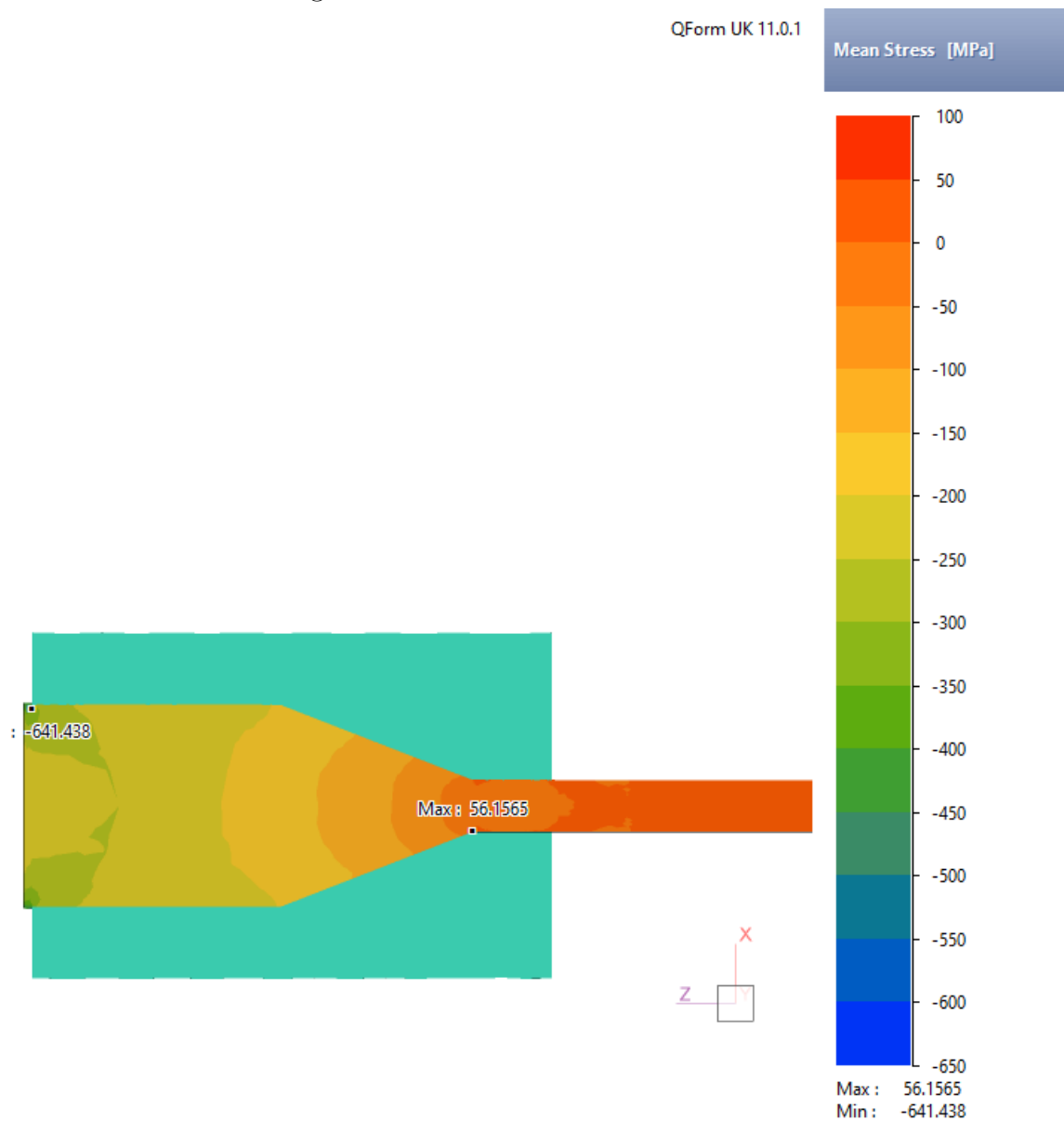
Fonte: Autor.

Figura 25 – Tensões Médias D300T80v6



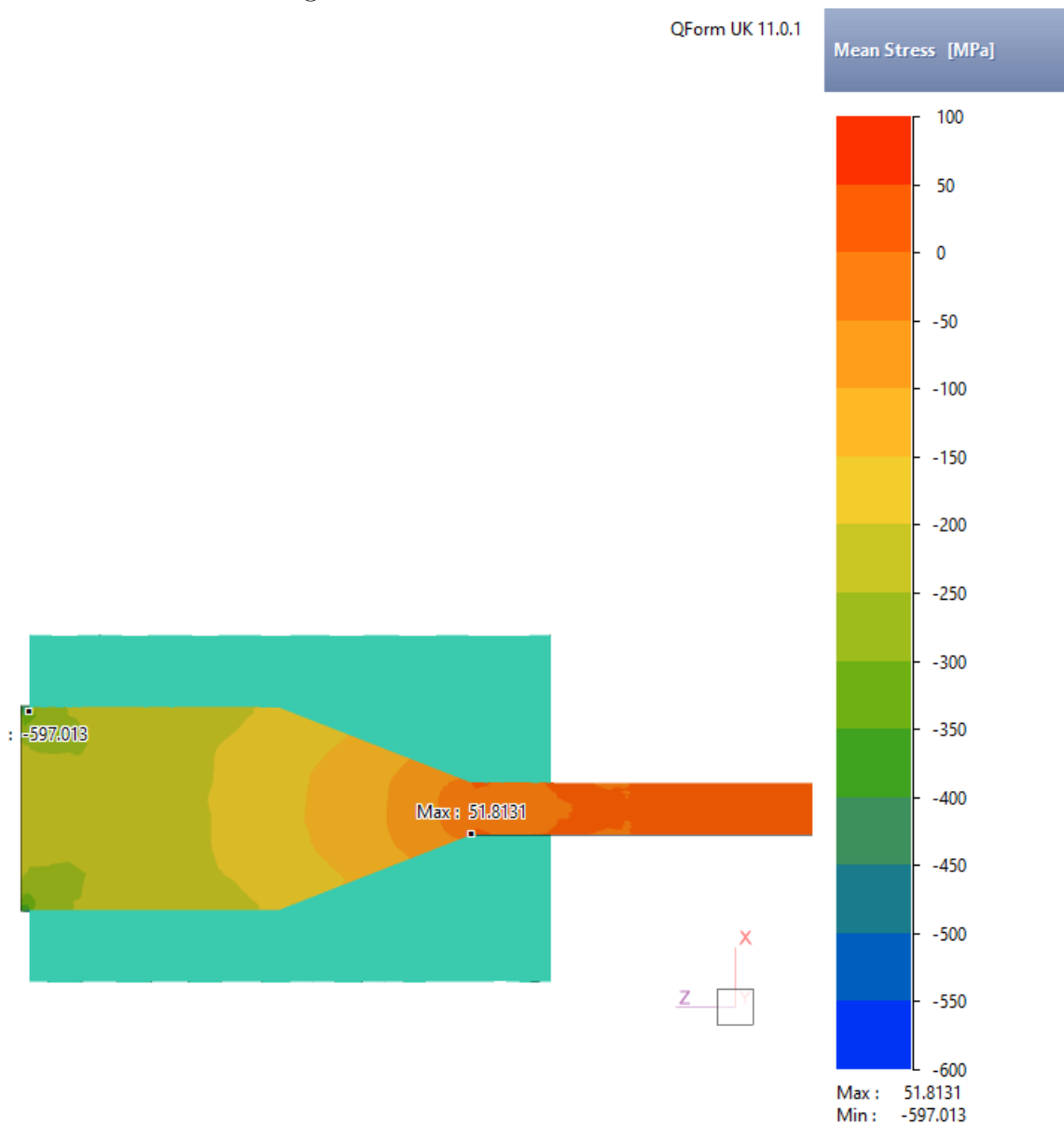
Fonte: Autor.

Figura 26 – Tensões Médias D300T100v3



Fonte: Autor.

Figura 27 – Tensões Médias D300T100v6



Fonte: Autor.

## 4.2 Matriz de Perfil Quadrado Côncavo - D330

Assim como foi feito para a matriz D300, as figuras 28, 29,30 e 31 revelam os perfis de distribuição de temperaturas para a ferramenta e a peça de trabalho. Mais uma vez, possível notar que a velocidade teve influência reduzida no gradiente de temperaturas, quando falamos sobre os pontos onde o calor se concentra. De maneira análoga ao exemplo anterior, o aumento da velocidade do escoamento causou um aumento da temperatura na seção média do cilindro.

Ao comparar a variação de velocidades, podemos notar que em ambos os casos, o cerne da distribuição de temperaturas é dado na região de entrada do canal do perfil. Isso vai de acordo com a literatura, uma vez que essa é uma região de estrangulamento, onde há um aumento da velocidade de escoamento que acaba causando um grande aumento nas tensões, como apresentado nas figuras 34 e 35. Também podemos notar que o aumento da velocidade causa um aumento na temperatura na porção média da matriz. Esse efeito aparece devido a maior dificuldade da matriz de dissipar o calor, devido ao maior fluxo de calor. Com a maior velocidade do êmbolo, aparecem novos picos de temperatura no início do cilindro que, em combinação com a porção do estrangulamento, aumentam a temperatura média do conjunto.

Em seguida, foi avaliado que as velocidades de impressão não variam com relação à temperatura. Na Tabela 10 podemos verificar as velocidades de saída do material. Essa tabela revela que a variação na temperatura não teve influência sobre as velocidades e que estas estão se comportando segundo a equação 6. Esse comportamento demonstra o caráter newtoniano do escoamento nesta simulação.

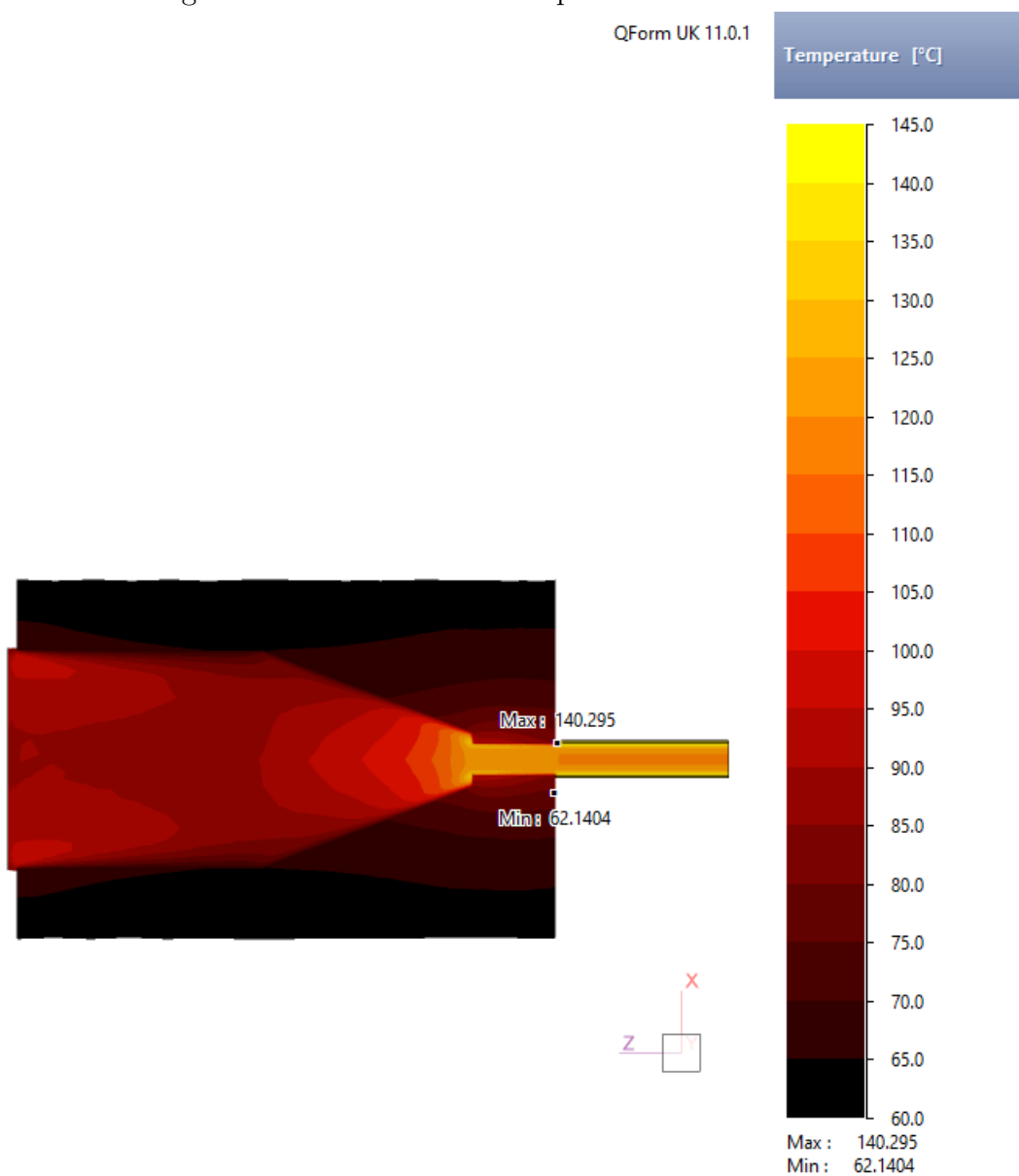
Já quando avaliamos as tensões médias, é possível notar que as tensões são mais sensíveis as variações de velocidade do que variações de temperaturas, como é demonstrado na Tabela 11.

Tabela 10 – Velocidades de Impressão

<b>Combinação</b>	<b>Velocidade de Saída</b>	<b>Unidade</b>
D330T80v3	-104.2	<i>mm/s</i>
D330T80v6	-208.4	<i>mm/s</i>
D330T100v3	-104.2	<i>mm/s</i>
D330T00v6	-208.4	<i>mm/s</i>

Fonte: Autor.

Figura 28 – Gradiente de Temperaturas D330T80v3



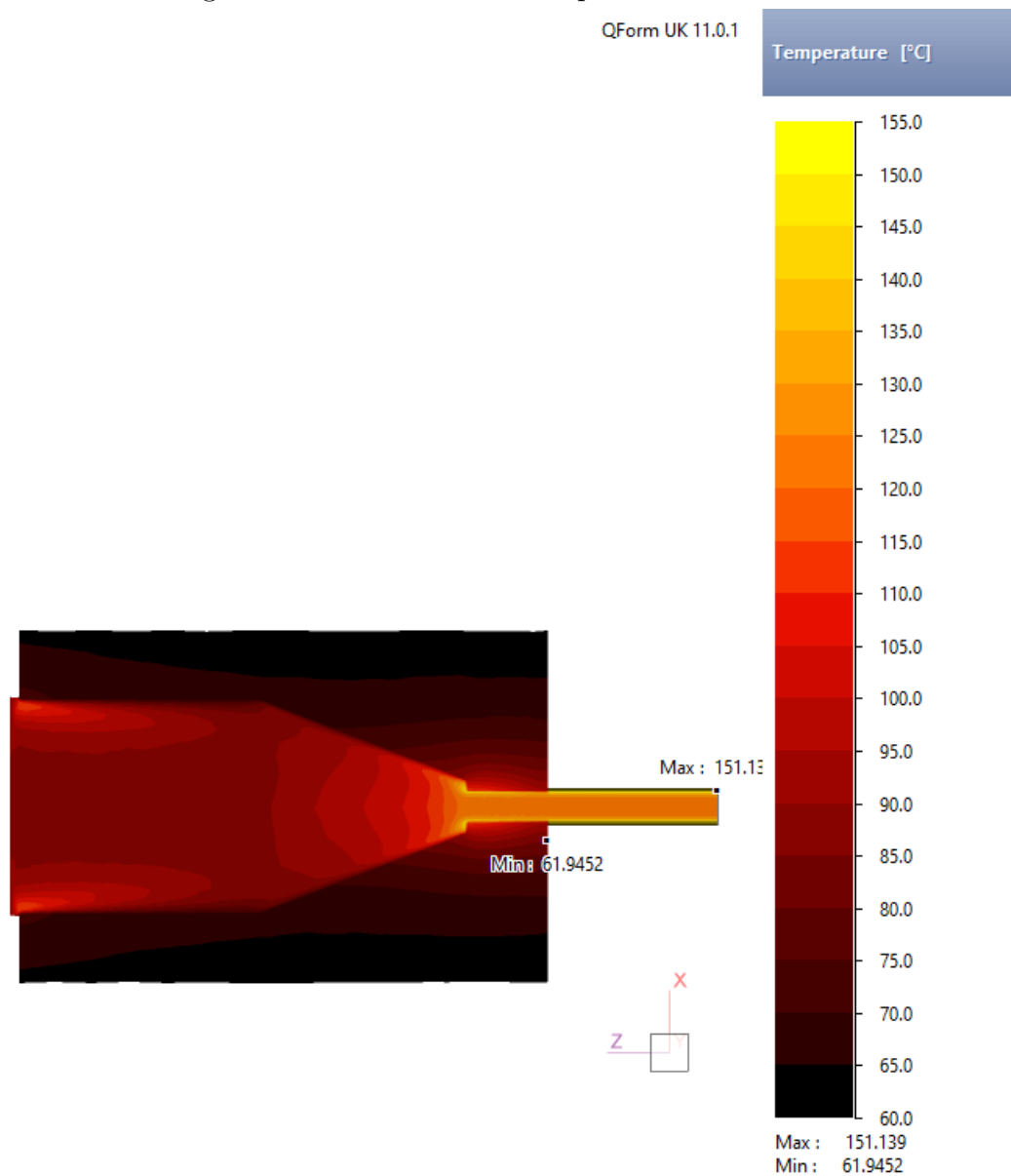
Fonte: Autor.

Tabela 11 – Influência das variações na Tensão Média

Combinação	$\Delta T$	$\Delta v$	$\Delta \sigma_m$ [MPa]
D330v3	x		0.46
D330T80		x	3.95
D330T100		x	3.14
D330v6	x		0.35

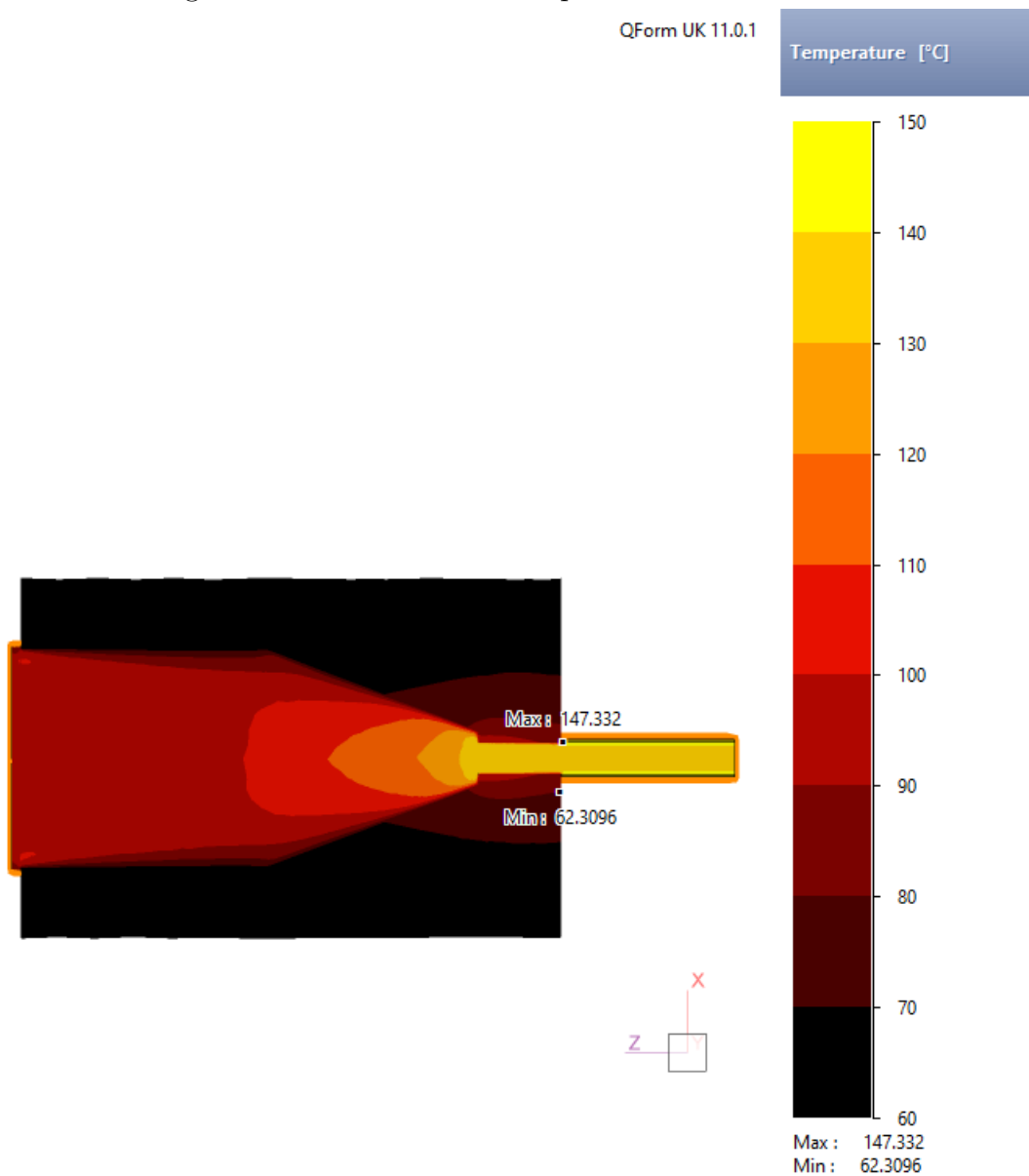
Fonte: Autor.

Figura 29 – Gradiente de Temperatura D330T80v6



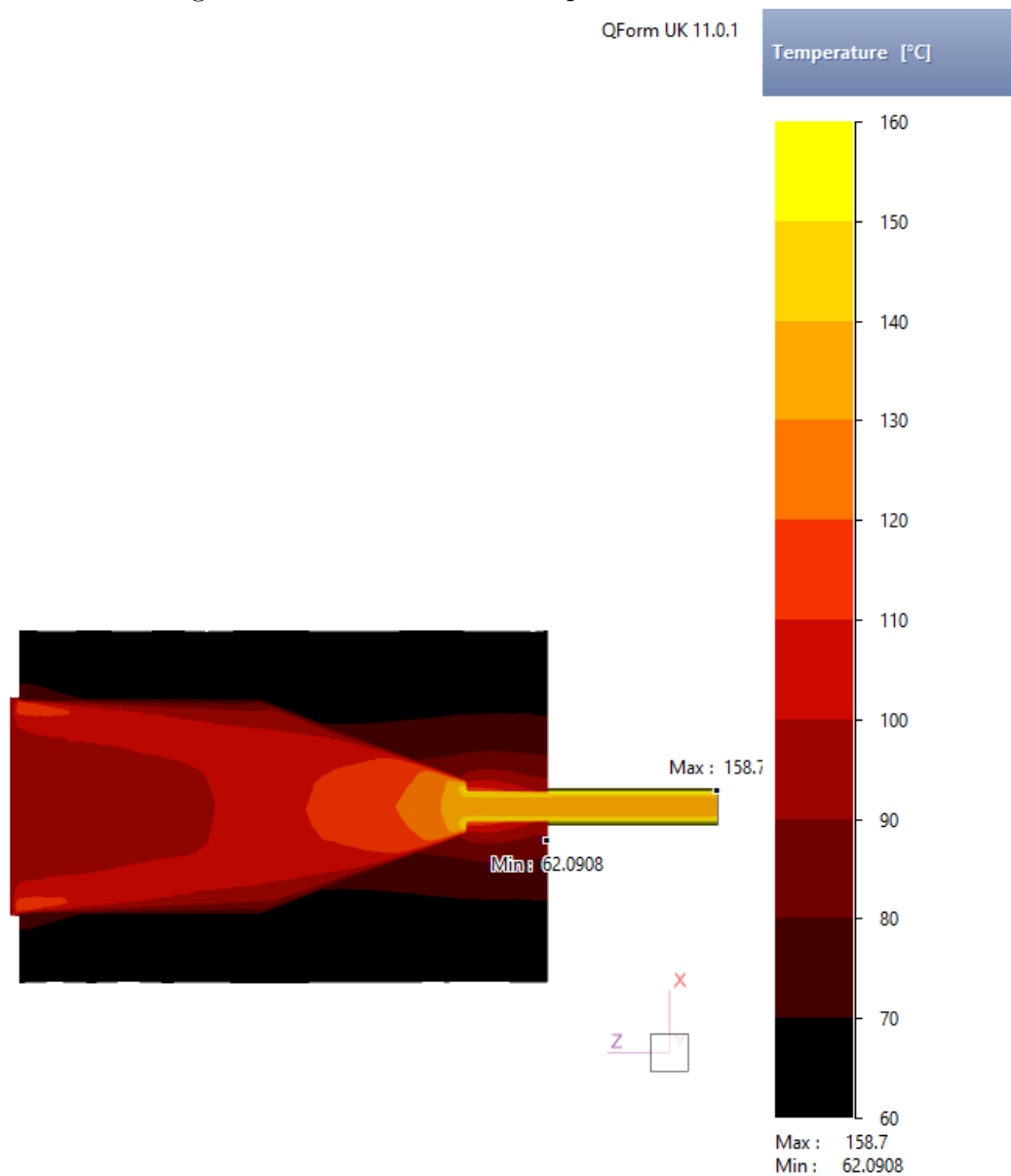
Fonte: Autor.

Figura 30 – Gradiente de Temperatura D330T100v3



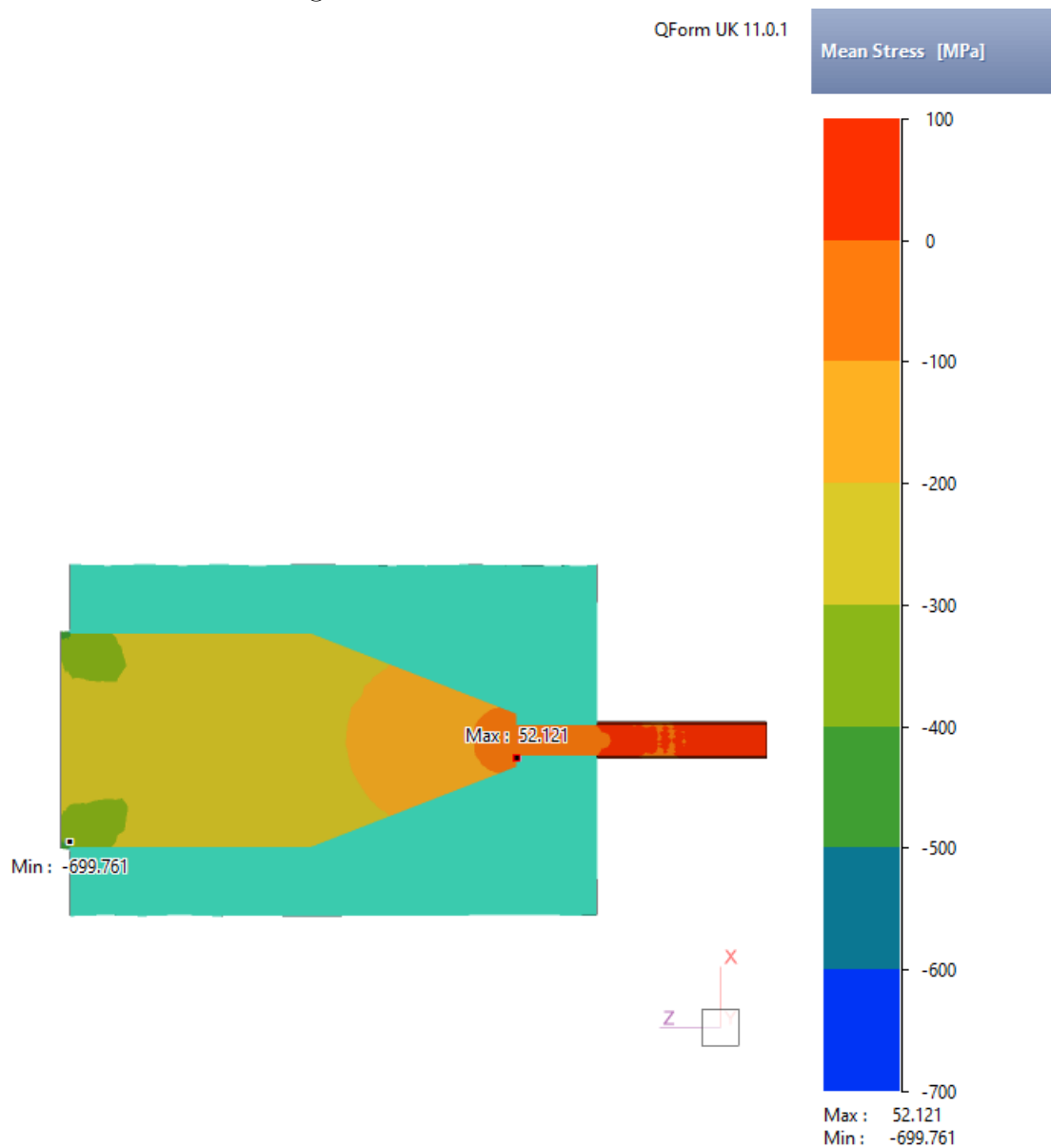
Fonte: Autor.

Figura 31 – Gradiente de Temperatura D330T100V6



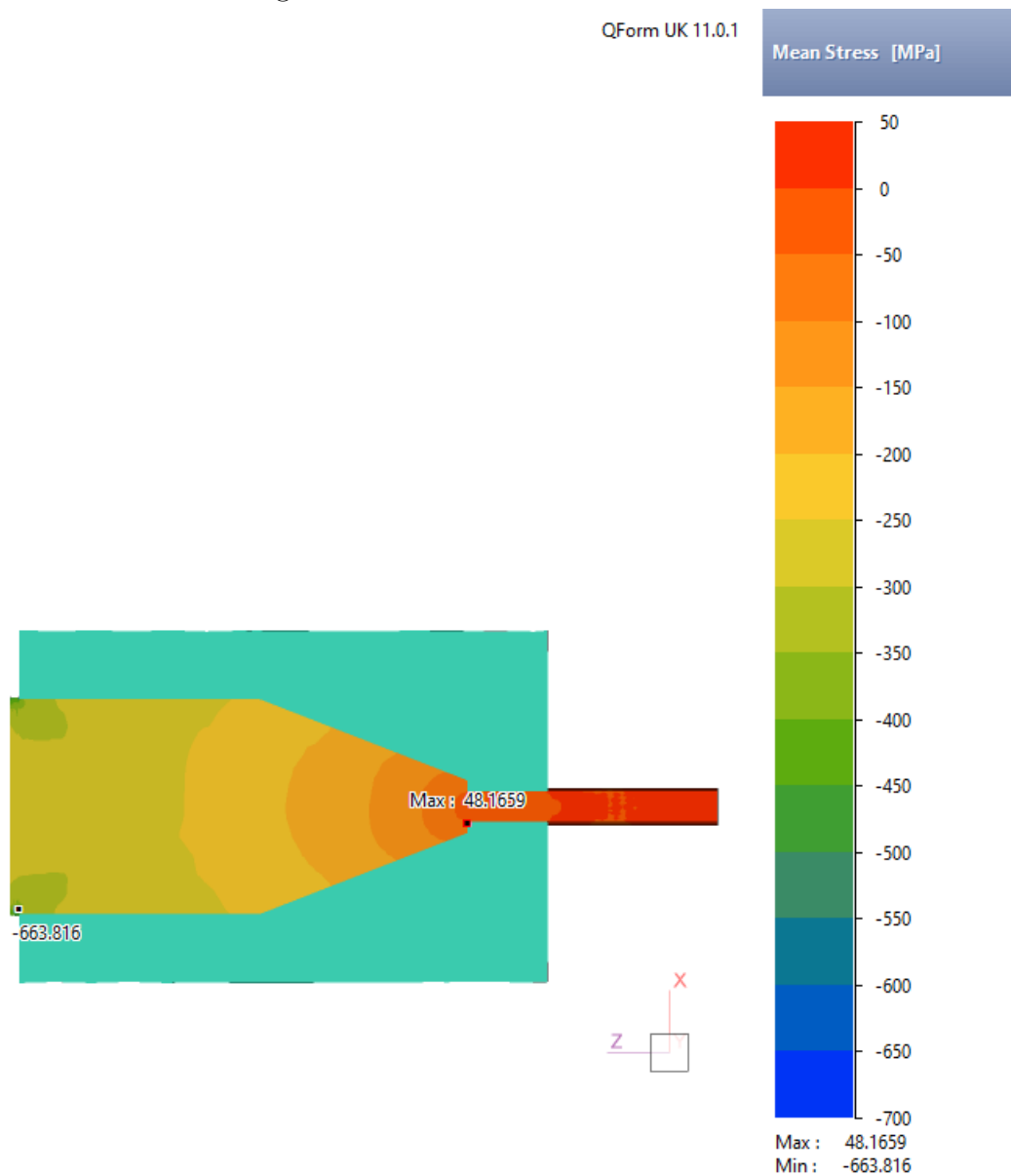
Fonte: Autor.

Figura 32 – Tensões Médias D330T80v3



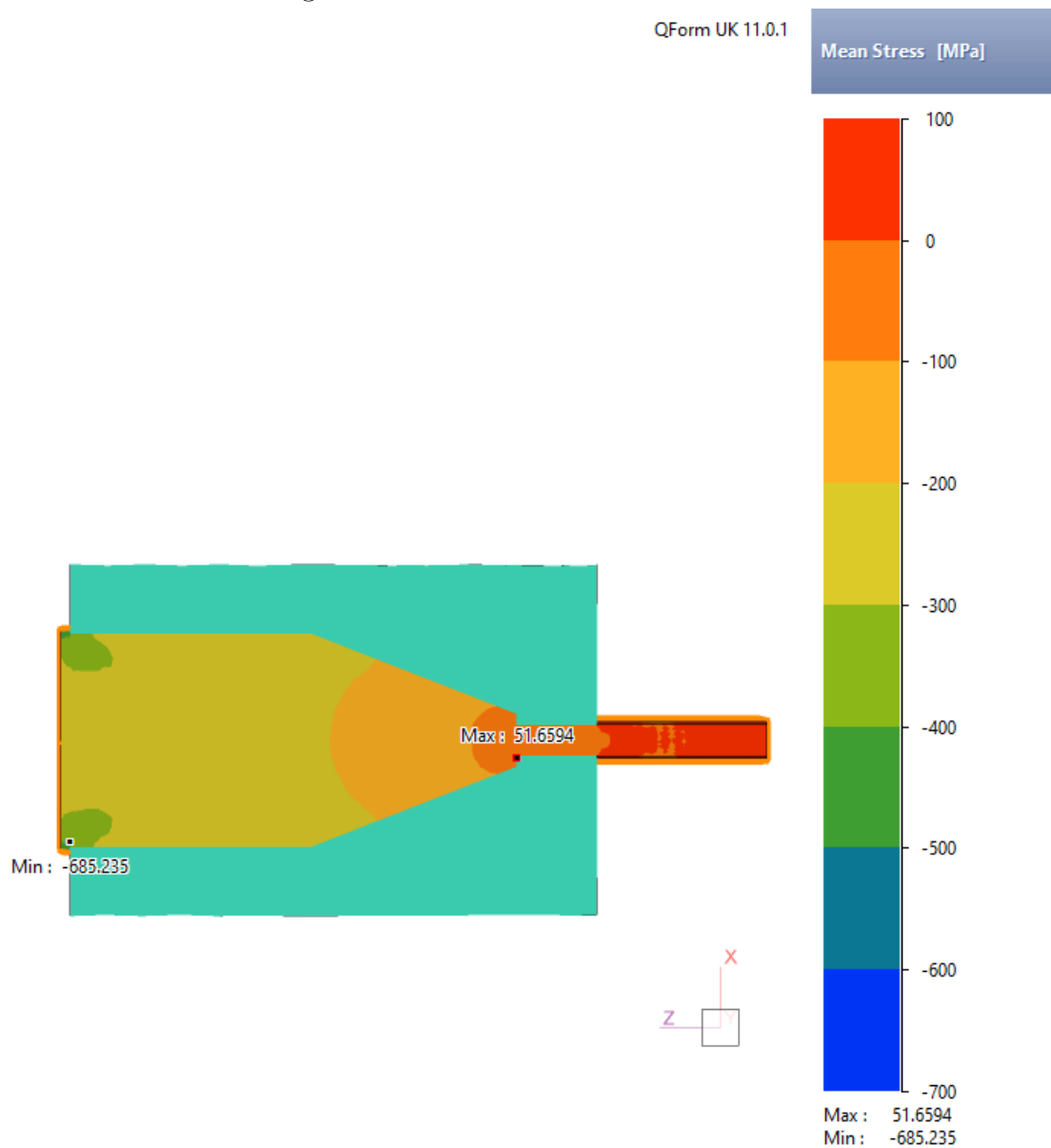
Fonte: Autor.

Figura 33 – Tensões Médias D330T80v6



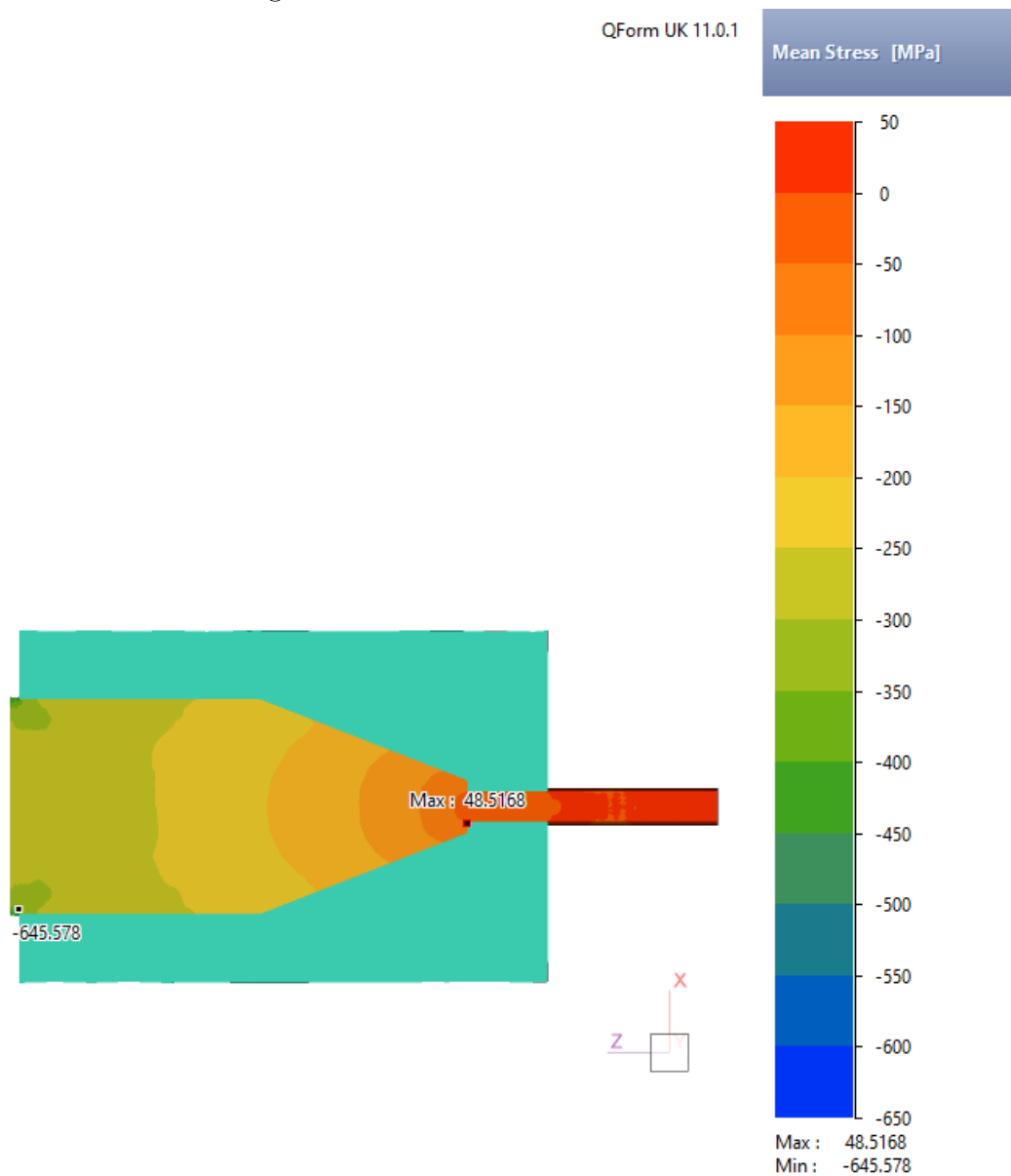
Fonte: Autor.

Figura 34 – Tensões Médias D330T100v3



Fonte: Autor.

Figura 35 – Tensões Médias D330T100v6



Fonte: Autor.

### 4.3 Velocidade de Impressão

Ao avaliarmos as velocidades de impressão, verificamos que elas não apresentam sensibilidade à variação da temperatura e, são influenciadas principalmente da velocidade do êmbolo. Isso apresenta uma inconsistência com os conhecimentos levantados durante os estudos, sobre o comportamento real do polímero nesse processo. O modelo constitutivo de Carreau evidência como a viscosidade sofre influência da temperatura e das taxas de cisalhamento, fazendo com que incrementos na velocidade do fluxo e na temperatura tenham resposta direta com a velocidade de impressão.

O modelo constitutivo adotado despreza efeitos viscoelásticos durante o escoamento do material e, como esperado, a simulação não foi capaz de reproduzir, o efeito de inchamento pós extrusão. O escoamento newtoniano é evidenciado quando avaliamos que as velocidades podem ser descritas pela equação 6.

Ao longo do trabalho, foram realizadas análises de 8 combinações entre matriz, velocidade de impressão e temperatura inicial. Na Tabela 12, temos destacadas todas as velocidades obtidas para das diferentes configurações.

Tabela 12 – Velocidades de Impressão

<b>Combinação</b>	<b>Velocidade</b>	<b>Unidade</b>
D330v3	-104.2	<i>mm/s</i>
D330v6	-208.4	<i>mm/s</i>
D3000v3	-47.8	<i>mm/s</i>
D300v6	-94.6	<i>mm/s</i>

Fonte: Autor.

## 5 CONCLUSÃO

As simulações realizadas neste trabalho não retornaram a geometria observada experimentalmente, apesar das variações aplicadas nas velocidades e temperaturas durante as operações. As principais causas desse fenômeno, são as premissas adotadas para adequar os modelos constitutivos disponíveis. O modelo de Hensel-Spittel se mostrou insuficiente para representar com precisão o comportamento dos polímeros. A utilização deste modelo, originalmente desenvolvido para ligas metálicas, desconsidera o comportamento não-newtoniano típico dos polímeros. Esse comportamento reológico é fundamental na caracterização da fluidez e resistência do material desde o seu amolecimento até o resfriamento e expansão.

Devido as considerações iniciais, fatores como a viscosidade dependente da taxa de cisalhamento e a presença de tensões viscoelásticas, que influenciam diretamente a deformação e o perfil do material extrudado, não foram explorados. Isso comprometeu a precisão das simulações, demonstrando a limitação do modelo em reproduzir fenômenos típicos de processos de extrusão de polímeros.

Portanto, os resultados obtidos indicam a necessidade de aprimorar os modelos constitutivos empregados, bem como de se definir condições de contorno que aproximem a simulação de polímeros, de casos mais reais, de forma a contemplar com fidelidade o comportamento não-newtoniano e os efeitos viscosos que influenciam diretamente a geometria final do produto extrudado.

### 5.1 Trabalhos Futuros

Dada a limitação observada nas simulações realizadas com o software QFormUK, uma direção promissora para futuros trabalhos é a exploração de ferramentas mais avançadas para descrever as características específicas do comportamento polimérico nas simulações. O software QformUK possui uma ferramenta de subrotina, com a capacidade para modelar o processo via linguagem de programação. Desta forma, é possível adicionar modelos constitutivos adequados ao processo de extrusão de polímeros. Representar o comportamento não-newtoniano dos polímeros, é crucial para que a simulação se aproxime de efeitos reais.

Modelos como de Carreau ou Cross, que são mais apropriados para representar o comportamento reológico dos polímeros sob diferentes condições de processamento. Essas subrotinas poderiam incorporar características importantes, como a viscosidade dependente da temperatura e da taxa de cisalhamento, além de efeitos viscoelásticos.

Essas pesquisas permitiriam não apenas obter simulações numéricas mais precisas para processos de extrusão de polímeros, mas também contribuir para o desenvolvimento de ferramentas computacionais mais robustas no campo da simulação de polímeros.

## REFERÊNCIAS

- ASHBY, M.; JONES, D. **Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing, and Design**. Elsevier Science & Technology Books, 1986. (Advances in Materials Science and Engineering). ISBN 9780080325316. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=req8wqe7GOsC>>. Citado na página 30.
- BUTT, J. Exploring the interrelationship between additive manufacturing and industry 4.0. **Designs**, v. 4, n. 2, 2020. ISSN 2411-9660. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2411-9660/4/2/13>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- CARNEIRO, O.; NÓBREGA, J. **Design of Extrusion Forming Tools**. Smithers Rapra, 2012. ISBN 9781847355188. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=fQpMwEACAAJ>>. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 24 e 25.
- CERUTI, A. *et al.* Maintenance in aeronautics in an industry 4.0 context: The role of augmented reality and additive manufacturing. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 6, n. 4, p. 516–526, 2019. ISSN 2288-4300. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2288430018302781>>. Citado na página 16.
- DURGUN, I.; ERTAN, R. Experimental investigation of fdm process for improvement of mechanical properties and production cost. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, 04 2014. Citado na página 15.
- FRAZIER, W. Metal additive manufacturing: A review. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 23, 06 2014. Citado na página 19.
- GEORGOPOULOU, A.; CLEMENS, F. Pellet-based fused deposition modeling for the development of soft compliant robotic grippers with integrated sensing elements. **Flexible and Printed Electronics**, v. 7, 05 2022. Citado na página 15.
- GIBSON, I. *et al.* **Additive Manufacturing Technologies**. [S.l.: s.n.], 2020. ISBN 978-3-030-56127-7. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- GU W MEINERS, K. W. D. D.; POPRAWA, R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. **International Materials Reviews**, Taylor & Francis, v. 57, n. 3, p. 133–164, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>>. Citado na página 18.
- HERZOG, D. *et al.* Additive manufacturing of metals. **Acta Materialia**, v. 117, p. 371–392, 2016. ISSN 1359-6454. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645416305158>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- HULL, C. W. **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography**. [S.l.]: Google Patents, 1986. US Patent 4,575,330. Citado na página 18.
- LIU, X. *et al.* A large-scale double-stage-screw 3d printer for fused deposition of plastic pellets: Article. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 134, 04 2017. Citado na página 16.

- OLIVEIRA, R. O. d. **Investigação dos efeitos da posição de impressão e geometria da matriz no processo de extrusão polimérica com pellets visando a manufatura aditiva**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, 2023. Citado 4 vezes nas páginas 17, 20, 27 e 30.
- PALANISAMY, R. p. *et al.* Guided wave monitoring of nano-fe<sub>3</sub>o<sub>4</sub> reinforced thermoplastic adhesive in manufacturing of reversible composite lap-joints using targeted electromagnetic heating. **NDT E International**, v. 122, p. 102481, 06 2021. Citado na página 30.
- RAUWENDAAL, C. **Polymer Extrusion**. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2014. ISBN 9781569905166. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=DKuQAqAAQBAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 21.
- RÖTHEMEYER, F.; SOMMER, F. **Kautschuktechnologie: Werkstoff-Verarbeitung-Produkte**. [S.l.]: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2013. Citado na página 26.
- RUBAN, R. *et al.* Role of additive manufacturing in biomedical engineering. In: \_\_\_\_\_. **Innovations in Additive Manufacturing**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 139–157. ISBN 978-3-030-89401-6. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-030-89401-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89401-6_7)>. Citado na página 18.
- SHAH, J. *et al.* Large-scale 3d printers for additive manufacturing: design considerations and challenges. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, p. 1–15, 10 2019. Citado na página 16.
- TADMOR, Z.; GOGOS, C. G. **Principles of polymer processing**. [S.l.]: J. Wiley, 2005. Citado 5 vezes nas páginas 21, 23, 26, 27 e 29.
- TANNER, R. I. **Engineering rheology**. Oxford [Oxfordshire: Clarendon Press, 1985. (The Oxford engineering science series). ISBN 019856144X. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 24.
- URBANIC, R. J.; HEDRICK, R. Fused deposition modeling design rules for building large, complex components. **Computer-Aided Design and Applications**, v. 13, p. 1–21, 01 2016. Citado na página 16.
- VIJAY, Y. *et al.* Control of process settings for large-scale additive manufacturing with sustainable natural composites. In: . [S.l.: s.n.], 2018. Citado na página 15.
- VOLPATO, N. *et al.* Experimental analysis of an extrusion system for additive manufacturing based on polymer pellets. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, p. 1–13, 05 2015. Citado na página 22.
- WANG, H. *et al.* Establishment and comparison of four constitutive relationships of pc/abs from low to high uniaxial strain rates. **Mechanics of Time-Dependent Materials**, v. 22, 11 2018. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 33.

## ANEXO A – Propriedades ABS

## Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Molded

Categories: [Polymer](#); [Thermoplastic](#); [ABS Polymer](#); [Acrylonitrile Butadiene Styrene \(ABS\)](#), [Molded](#)

**Material Notes:** This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Molded". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

**Vendors:** [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Original Value	Comments
Density	0.882 - 3.50 g/cc	Average value: 1.07 g/cc Grade Count:774
Water Absorption	0.0250 - 2.30 %	Average value: 0.383 % Grade Count:85
Moisture Absorption at Equilibrium	0.100 - 0.300 %	Average value: 0.232 % Grade Count:26
Water Absorption at Saturation	0.00950 - 1.03 %	Average value: 0.561 % Grade Count:14
Maximum Moisture Content	0.0100 - 0.150	Average value: 0.0459 Grade Count:71
Linear Mold Shrinkage	0.000 - 0.0290 cm/cm	Average value: 0.00533 cm/cm Grade Count:581
Linear Mold Shrinkage, Transverse	0.00200 - 0.00900 cm/cm	Average value: 0.00522 cm/cm Grade Count:52
Melt Flow	0.0800 - 125 g/10 min	Average value: 16.5 g/10 min Grade Count:805
Mechanical Properties	Original Value	Comments
Hardness, Rockwell M	53.0 - 92.0	Average value: 71.8 Grade Count:4
Hardness, Rockwell R	13.0 - 122	Average value: 108 Grade Count:431
Hardness, Shore D	79.0 - 103	Average value: 87.0 Grade Count:3
Ball Indentation Hardness	70.0 - 120 MPa	Average value: 101 MPa Grade Count:68
Tensile Strength, Ultimate	2.60 - 73.1 MPa	Average value: 41.0 MPa Grade Count:346
	20.0 - 43.0 MPa @Temperature 60.0 - 90.0 °C	Average value: 31.8 MPa Grade Count:2
Tensile Strength, Yield	2.00 - 77.0 MPa	Average value: 44.8 MPa Grade Count:624
Elongation at Break	1.40 - 110 %	Average value: 28.5 % Grade Count:493
Elongation at Yield	1.70 - 40.0 %	Average value: 3.66 % Grade Count:189
Modulus of Elasticity	0.778 - 21.2 GPa	Average value: 2.35 GPa Grade Count:356
Flexural Yield Strength	0.379 - 655 MPa	Average value: 70.6 MPa Grade Count:626
Flexural Modulus	0.0241 - 6.89 GPa	Average value: 2.33 GPa Grade Count:699
	1.50 - 4.00 GPa @Temperature 60.0 - 90.0 °C	Average value: 2.84 GPa Grade Count:2
Poissons Ratio	0.360 - 0.380	Average value: 0.364 Grade Count:5

**ANEXO B – Propriedades ABS**

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	40.0 - 110 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	22.2 - 61.1 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$	Average value: 82.8 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ Grade Count:70
CTE, linear, Transverse to Flow	87.0 - 104 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	48.3 - 58.0 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$	Average value: 97.9 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ Grade Count:5
Thermal Conductivity	0.150 - 0.200 W/m-K	1.04 - 1.39 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	Average value: 0.171 W/m-K Grade Count:11
Maximum Service Temperature, Air	80.0 - 100 °C	176 - 212 °F	Average value: 89.2 °C Grade Count:4
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	70.0 - 107 °C	158 - 225 °F	Average value: 94.6 °C Grade Count:55
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	70.0 - 130 °C	158 - 266 °F	Average value: 95.8 °C Grade Count:172
Vicat Softening Point	87.0 - 125 °C	189 - 257 °F	Average value: 99.9 °C Grade Count:135
Glass Transition Temp, Tg	108 - 109 °C	226 - 228 °F	Average value: 108 °C Grade Count:3
UL RTI, Electrical	50.0 - 120 °C	122 - 248 °F	Average value: 85.0 °C Grade Count:47
UL RTI, Mechanical with Impact	50.0 - 105 °C	122 - 221 °F	Average value: 83.1 °C Grade Count:42
UL RTI, Mechanical without Impact	50.0 - 120 °C	122 - 248 °F	Average value: 88.0 °C Grade Count:41
Flammability, UL94	HB - V-0	HB - V-0	Grade Count:148
Oxygen Index	19.0 %	19.0 %	Average value: 19.0 % Grade Count:7
Glow Wire Test	650 - 960 °C	1200 - 1760 °F	Average value: 677 °C Grade Count:20

## ANEXO C – Módulo de Young

