

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

**PROJETO DE UM CABEÇOTE DE EXTRUSÃO DE UMA
MÁQUINA DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA FDM**

Marcus Vinicius Sena Casagrande

2013



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

PROJETO DE UM CABEÇOTE DE EXTRUSÃO DE UMA MÁQUINA DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA FDM

Marcus Vinicius Sena Casagrande

Projeto de Graduação apresentado ao Curso
de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica,
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte
dos requisitos necessários à obtenção do título de
Engenheiro.

Orientador: Prof. José Stockler Canabrava Filho

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MARÇO DE 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO



Departamento de Engenharia Mecânica
DEM/POLI/UFRJ



**PROJETO DE UM CABEÇOTE DE EXTRUSÃO DE UMA
MÁQUINA DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA FDM**

Marcus Vinicius Sena Casagrande

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof. José Stockler Canabrava Filho

Prof. Flávio de Marco Filho

Prof. Nísio de Carvalho Lobo Brum

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2013

Casagrande, Marcus Vinicius Sena

Projeto de um cabeçote de extrusão de uma máquina de prototipagem rápida FDM / Marcus Vinicius Sena Casagrande – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

XVIII, 110 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: José Stockler Canabrava Filho, DSc.

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Mecânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 99-103.

1. Prototipagem rápida.
 2. FDM.
 3. Cabeçote de extrusão.
 4. Manufatura Aditiva.
 5. ABS.
- I. Stockler, José. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica. III. Projeto de um cabeçote de extrusão de uma máquina de prototipagem rápida FDM.

“No que diz respeito ao desempenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação,
não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem-feita ou não faz.”

Ayrton Senna.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Marco e Veronica, e meu irmão, Caio, sem os quais eu não teria uma base, um suporte, e nem o incentivo necessário para chegar a este ponto da minha vida.

À minha namorada, Caroline, pela maravilhosa companhia ao longo dos últimos anos, pelo amor, pela abdicação das horas de lazer e pelo apoio e compreensão ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

À minha família e namorada pelo suporte em todos os momentos e por formar quem hoje sou.

Aos meus amigos da faculdade, que estiveram comigo durante toda essa jornada.

Ao meu orientador, Prof. José Stockler, sem o qual não seria possível a realização deste trabalho.

Ao Centro de Pesquisa e Projeto para o Desenvolvimento Gerencial Tecnológico de MPMEs – PRO-PME, em especial ao Prof. Francisco Moura Duarte, por permitir o uso total do laboratório e ao Felipe Lopes pelo suporte.

Ao Laboratório de Processamento Termomecânico – TERMIC, ao Prof. Luiz Carlos Pereira que cedeu o laboratório para os experimentos necessários, e também ao técnico Laércio Guzela que deu suporte aos experimentos.

Ao Laboratório de Apoio Tecnológico do IMA - LAPTEC e ao Prof. Victor Pita pela realização dos ensaios de materiais.

Ao Prof. Christopher Williams, do laboratório DREAMS, Virgina Tech, que proporcionou a minha base na manufatura aditiva.

Às equipes de competição Aerodesign e Baja, cujas experiências vividas me tornaram um profissional mais completo.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Projeto de um cabeçote de extrusão de uma máquina de prototipagem rápida

FDM

Marcus Vinicius Sena Casagrande

Março/2013

Orientador: José Stockler Canabrava Filho

Curso: Engenharia Mecânica

A manufatura aditiva é um novo método que vem se tornando mais viável ao longo dos últimos anos de se fabricar produtos de forma mais sustentável e eficaz. A Modelagem por Deposição de Material Fundido (Fused Deposition Modeling - FDM) é uma das tecnologias de manufatura aditiva, sendo baseada na extrusão de um material fundido por um orifício. Ela é o foco deste trabalho, por apresentar uma alta viabilidade econômica e uma ampla faixa de aplicações. Neste trabalho é realizado o projeto do cabeçote de extrusão de uma máquina FDM, e, após uma vasta revisão bibliográfica, são realizados os estudos necessários para o projeto, assim como dois experimentos, um relativo ao desempenho de uma máquina FDM comercial e outro às propriedades do material utilizado na extrusão, o ABS. Após o projeto, são realizadas simulações numéricas, reforçando as previsões de desempenho do sistema projetado.

Palavras-chave: Prototipagem rápida, FDM, Cabeçote de extrusão, Manufatura Aditiva, ABS

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Design of a head extrusion for a rapid prototyping FDM machine

Marcus Vinicius Sena Casagrande

March/2013

Advisor: José Stockler Canabrava Filho

Course: Mechanical Engineering

The additive manufacturing is a new method that is becoming more feasible over the last few years to manufacture products more efficiently and sustainably. Fused Deposition Modeling (FDM) is an additive manufacturing technology based on the extrusion of molten material through an orifice. It is the focus of this paper, because it presents a high economic viability and a wide range of applications. This work is carried out the design of an extrusion head FDM machine, and, after an extensive literature review, are conducted the necessary studies for the project, as well as two experiments, one concerning the performance of a commercial FDM machine and other concerning the properties the material used in extrusion, ABS. After the project, numerical simulations are performed, reinforcing predictions of system performance designed.

Key-words: Rapid Prototyping, FDM, Extrusion Head, ABS

Sumário

1	<i>Introdução</i>	1
2	<i>Prototipagem Rápida</i>	2
2.1	A Prototipagem Rápida.....	3
2.1.1	O processo da Manufatura Aditiva	5
2.1.2	Características da prototipagem rápida e aplicações.....	7
2.1.3	Classificação dos processos de prototipagem rápida	9
2.1.4	Principais processos de prototipagem rápida	13
2.1.4.1	Processos baseados em material líquido	13
2.1.4.2	Processos baseados em material sólido.....	17
2.1.4.3	Processos baseados em material a base de pó	20
2.2	Seleção da tecnologia para o projeto mecânico	23
3	<i>O FDM</i>	24
3.1	Introdução	24
3.2	Carregamento do material.....	25
3.3	Plastificação	27
3.4	Extrusão	28
3.5	Solidificação	29
3.6	Controle de formação da camada.....	30
3.7	Ligação entre camadas	33
3.8	Inclusão de estruturas de suporte	34
3.9	Propriedades mecânicas	35
4	<i>Revisão Bibliográfica de Polímeros</i>	39
4.1	Introdução a Polímeros	39
4.1.1	Polímeros termoplásticos e termorrígidos.....	40
4.1.2	Cristalinidade dos polímeros.....	40

4.1.3	Temperaturas de transição	40
4.1.4	Composição dos polímeros	41
4.2	Viscoelasticidade	42
4.3	Taxa de cisalhamento.....	44
4.4	Viscosidade	44
5	Análise experimental de uma Máquina FDM	47
6	Estudo do cabeçote de extrusão.....	53
6.1	Definição dos principais parâmetros do cabeçote extrusor.....	53
6.1.1	Definição do sistema de carregamento	53
6.1.2	Definição do sistema de plastificação	54
6.1.3	Definição do sistema de extrusão.....	54
6.2	Estudo preliminar da câmara de plastificação	55
6.2.1	Escoamento em canais de seção circular	56
6.2.2	Estimativa analítica da queda de pressão	59
6.3	Aprimoramento da câmara de plastificação.....	66
6.4	Seleção do material da câmara de plastificação.....	70
6.5	Estudo térmico da câmara de plastificação.....	70
6.5.1	Perda de calor por radiação	71
6.5.2	Perda de calor por convecção natural	71
6.5.3	Calor demandado para o aquecimento do fluido	73
6.5.4	Seleção do elemento de aquecimento	74
6.5.4.1	Aquecedor de filamento NiCr	74
6.5.4.2	Aquecedor tipo cartucho	75
6.5.5	Seleção do sensor de temperatura	77
6.5.6	Seleção do controlador de temperatura.....	78
6.5.7	Dimensionamento do aquecedor	80
6.5.8	Estudo do resfriamento da câmara	81

6.5.8.1	Dimensionamento do condensador	82
6.5.8.2	Indicações para o sistema de resfriamento.....	85
6.6	Estudo mecânico do cabeçote	85
6.6.1	Dimensionamento da parede da câmara.....	85
6.6.2	Dimensionamento da fixação da câmara	86
6.6.3	Fabricação	86
7	<i>Ensaio experimental do ABS P430</i>	87
8	<i>Simulação numérica do cabeçote de extrusão</i>	90
8.1	Estimativa da queda de pressão	91
8.2	Distribuição de velocidade no polímero	92
8.3	Distribuição de temperatura no sistema.....	94
8.4	Distribuição da viscosidade e da taxa de cisalhamento	96
9	<i>Conclusões, comentários e sugestões</i>	97
10	<i>Referências</i>	99
11	<i>Anexos</i>	104
<i>Anexo I – Especificação da impressora 3D Dimension Elite ..</i>		104
<i>Anexo II – Tabela com as coordenadas internas do bocal</i>		105
<i>Anexo III – Especificação do aço inoxidável Corroplast</i>		106
<i>Anexo IV – Resistência de cartucho</i>		107
<i>Anexo V – Especificação do termopar.....</i>		108
<i>Anexo VI – Especificação do controlador de temperatura</i>		109
<i>Desenhos</i>		110

Lista de Figuras

Figura 1: Comparação entre manufatura subtrativa e aditiva [1]	3
Figura 2: O processo genérico da manufatura aditiva [4]	6
Figura 3: Custo de acordo com o processo de manufatura [1]	7
Figura 4: (a) Proposta para o estádio de Pequim em modelo a esquerda e (b) a direita uma ilustração deste estádio [13].....	9
Figura 5: Bomba de combustível otimizada da Delphi [6].....	10
Figura 6: Exemplo de redução de montagem com manufatura aditiva [6]	10
Figura 7: Matriz morfológica para processos AM [15].....	11
Figura 8: Conceito da Estereolitografia (SL) [1].....	14
Figura 9: A tecnologia IJP Polyjet [1]	16
Figura 10: Impressão com diferentes materiais [1]	17
Figura 11: Tecnologia FDM [1]	18
Figura 12: Funcionamento da impressora a jato de tinta Thermojet [1]	19
Figura 13: O processo SLS [1]	21
Figura 14: Dodecaedro feito de um compósito de aço e bronze pela SLS [1]	22
Figura 15: Princípio de funcionamento 3DP indireta [1]	23
Figura 16: Carregamento por Seringa e Atuador Linear [18]	26
Figura 17: Carregamento por Seringa e Ar Comprimido [18]	26
Figura 18: Rosca simples para extrusão [19]	27
Figura 19: Carregamento para filamentos [18].....	27
Figura 20: Efeito viscoelástico inchamento do extrudado [21].....	29
Figura 21: Distorção devido a tensões térmicas [1]	30
Figura 22: Variação da pressão com a velocidade de extrusão [1]	32
Figura 23: Padrões de preenchimento [6].....	32
Figura 24: Influência da temperatura na geometria das camadas. Temperatura baixa (a), temperatura ideal (b) e temperatura elevada (c) [1]	33
Figura 25: Geração de estrutura de suporte (em preto) com material secundário [4]	35
Figura 26: Ângulo crítico de parede para geração de suporte [1]	35
Figura 27: Vista de uma seção transversal de uma peça feita em ABS mostrando a existência de vazios [24].....	36
Figura 28: Sobreposição de filamentos para aumento da resistência mecânica [24]	37

Figura 29: Resistência à tração do ABS P400 com diferentes padrões de preenchimento [25]	38
Figura 30: Fotografias das superfícies de fratura de (a) um corpo de prova orientado [0°] e (b) [45°-45°] [25]	38
Figura 31: Modelos da viscoelasticidade linear [26]	43
Figura 32: Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento [21]	45
Figura 33: Variação da viscosidade para diferentes taxas de cisalhamento obtidas em reômetros e processos [21]	46
Figura 34: Experimento para determinação da velocidade de impressão. (a) modelo em CAD, (b) linhas de preenchimento e (c) modelo impresso.	48
Figura 35: Modelo para o segundo experimento	49
Figura 36: Fotografias da seção transversal ressaltando o formato circular do filamento (à esquerda) e o formato elíptico (à direita)	50
Figura 37: Mediçãoes da altura e da largura do filete extrudado	50
Figura 38: Seleção das áreas de cada filamento da seção transversal (acima) e organização por tamanho dos mesmos (abaixo).....	51
Figura 39: Câmara de plastificação simplificada	56
Figura 40: Equilíbrio de forças em um elemento cilíndrico [35]	56
Figura 41: Perfil de velocidade para diversos valores de n	58
Figura 42: Gráfico da tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento ilustrando os diversos possíveis comportamento de um polímero.....	59
Figura 43: Temperatura no centro do filamento em função do tempo	62
Figura 44: Queda de pressão para diversos L/D e ângulo da região cônica	63
Figura 45: Participação de cada região na queda de pressão total para $\beta = 120^\circ$	64
Figura 46: Observação da estagnação do material no canto da câmara para diversos valores do ângulo do cone β	65
Figura 47: Comparação do perfil de velocidades para o perfil cônico e o perfil corneta.....	68
Figura 48: Zona de estagnação no perfil corneta.....	68
Figura 49: Procedimento para suavização do perfil corneta. Geometria inicial (a), rastreamento (b), definição dos pontos (c), interpolação por spline (d) e Geometria final (e).....	69
Figura 50: Renderização do bocal com aquecimento NiCr	75
Figura 51: Estrutura do aquecedor tipo cartucho.....	76
Figura 52: Renderização do bocal com aquecimento por cartucho	77

Figura 53: Termopar flexível Alutal TFX12 com ponteira, mola e baioneta.....	78
Figura 54: Controlador de temperatura Contemp C404	80
Figura 55: Aquecedor	81
Figura 56: Desenho do condensador (a) e dos canais de refrigeração (b)	83
Figura 57: Distribuição de temperatura no sistema	84
Figura 58: Reômetro capilar Rheograph 25	87
Figura 59: ABS P430 cortado para ensaio no reômetro capilar	88
Figura 60: Gráfico da viscosidade em função da taxa de cisalhamento	90
Figura 61: Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento	90
Figura 62: Distribuição de pressão na câmara	92
Figura 63: Perfil de velocidade no bocal	93
Figura 64: Perfil de velocidade na câmara	93
Figura 65: Distribuição de temperatura no sistema	94
Figura 66: Distribuição de temperatura na saída do bocal	95
Figura 67: Distribuição de temperatura no sensor de temperatura	96
Figura 68: Distribuição de velocidade e de temperatura do fluido refrigerante.....	96
Figura 69: Distribuição da viscosidade	97
Figura 70: Distribuição da taxa de cisalhamento.....	97

Lista de Tabelas

Tabela 1:Matriz de Seleção	24
Tabela 2: Área da seção transversal de cada filete	51
Tabela 3: Principais parâmetros globais	53
Tabela 4: Parâmetros da máquina após o estudo da Dimension Elite	66
Tabela 5: Propriedades do ABS utilizadas	66
Tabela 6: Resumo da análise de convecção.....	72
Tabela 7: Resumo da análise do calor necessário para aquecer o fluido.....	73
Tabela 8: Resumo da simulação inicial do condensador.....	84
Tabela 9: Resumo do ensaio reológico para $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$	89
Tabela 10: Resumo do ensaio reológico para $T = 240\text{ }^{\circ}\text{C}$	89

Lista de Símbolos

A	Área
b	Constante da variação da viscosidade com a temperatura de um polímero
c_p	Calor específico
g	gravidade
h	Coeficiente de transferência de calor
k	Condutividade térmica
K	Constante da lei das potências
L	Comprimento do cilindro
m	Inverso do expoente da lei das potências
n	Expoente da lei das potências
Nu_L	Número de Nusselt
P	Pressão
Pr	Número de Prandtl
q	fluxo de calor
Q	Vazão volumétrica
\dot{Q}_{rad}	Taxa de radiação
Ra_L	Número de Rayleigh
r	Raio do cilindro
R	Raio externo do cilindro
T	Temperatura
T_g	Temperatura de transição vítreia
T_m	Temperatura de fusão cristalina
v	Velocidade do fluido
z	Direção axial do cilindro
α	Difusividade térmica
β	Ângulo do cone
β	Coeficiente de dilatação térmica
γ	Deformação cisalhante
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento
$\dot{\gamma}_A$	Taxa de cisalhamento aparente na parede
ε	Deformação
ϵ	Emissividade

η	Viscosidade
η_A	Viscosidade aparente
η_0	viscosidade de zero cisalhamento
η_{ref}	viscosidade em uma determinada temperatura de referência
λ	Constante de tempo da lei das potências
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Densidade
σ	Tensão normal
σ_{SB}	Constante de Stefan-Boltzmann
τ	Tensão de cisalhamento
τ_w	Tensão cisalhante na parede
τ	Número de Fourier

1 Introdução

Em um mundo cada vez mais eficiente, com a engenharia mais preocupada ecologicamente, desperdícios não são mais autorizados. As indústrias procuram aperfeiçoar seus processos para reduzir custos e respeitar as normas de poluição. Desta forma, a pesquisa por equipamentos inovadores, com alto desempenho, está aumentando.

A manufatura aditiva é uma das tecnologias que apresenta uma proposta ecológica, pois não há retirada de material durante a fabricação, portanto, a quantidade de resíduos é muito menor, poluindo menos, e em alguns casos específicos, gerando menor custo.

Este trabalho tem como objetivo apresentar e desenvolver um protótipo baseado em uma tecnologia que se enquadra na manufatura aditiva, a Modelagem por Deposição de Material Fundido (Fused Deposition Modeling - FDM). Nesta tecnologia, um material é extrudado através de um pequeno orifício, e, com a movimentação da extrusora, é possível fabricar um produto sem a necessidade de ferramental ou desperdício de material.

Devido à complexidade elevada de toda uma máquina FDM, o autor optou por desenvolver com profundidade apenas o cabeçote extrusor, que transforma a matéria-prima no filamento que será utilizado para construir o produto final. Entretanto, o restante da máquina está sendo desenvolvido em paralelo por outros colaboradores, com o objetivo final de projetar e construir uma máquina FDM, com tecnologia nacional, de qualidade equiparável ou superior às disponíveis no mercado global atualmente.

Este trabalho está estruturado de forma que o leitor, mesmo não tendo conhecimento sobre a manufatura aditiva, compreenda quais são as principais tecnologias existentes. Para isto, no Capítulo 2 é feita uma ampla revisão bibliográfica sobre prototipagem rápida, ou manufatura aditiva, se aprofundando nas principais tecnologias consolidadas. No Capítulo 3 a tecnologia FDM é apresentada com maior profundidade, consolidando quais os parâmetros mais importantes no projeto, assim como quais são as interfaces do cabeçote extrusor com o resto da máquina. No Capítulo 4 é feita uma revisão bibliográfica dos polímeros, necessária para o pleno entendimento dos fenômenos existentes. O Capítulo 5 trata de análise experimental de uma máquina FDM comercial. Já no Capítulo 6 é realizado o projeto mecânico do cabeçote. O

Capítulo 7 apresenta uma análise experimental do polímero ABS, cujos dados são utilizados nas análises numéricas realizadas no Capítulo 8. Por fim, no Capítulo 9 são expostas as conclusões sobre este projeto e considerações futuras.

2 Prototipagem Rápida

A manufatura atual não tem mais o foco de apenas produzir da forma mais lucrativa possível, sem pensar nos dejetos provenientes da fabricação, isto é insustentável. A indústria está evoluindo e as preocupações atuais não estão apenas nos negócios, mas também nas pessoas e no planeta.

O termo manufatura sustentável é o que melhor define o que a indústria deve procurar para o futuro, organizando a sua cadeia de maneira a associar de forma complexa vários elementos, como a eficiência do processo em si, os custos, problemas sociais como saúde e segurança, problemas ambientais de rejeitos e até mesmo a preservação do meio ambiente através da reciclagem, de forma equilibrada.

Porém a mudança para uma infraestrutura mais sustentável é difícil e de grande inércia. Até pouco tempo atrás, em torno de 20 anos, o índice de desenvolvimento de uma empresa poderia ser estimado através da quantidade de fumaça que ela conseguia produzir, quanto mais poluição, melhor, pois significava maior produção. Esta mentalidade fica bem explícita quando cita-se frases do grande economista ganhador do Prêmio Nobel em Economia de 1976 Milton Friedman como: "The Social Responsibility Business is to Increase its Profits." e "The business of business is business.".

Claramente as empresas estão com outra mentalidade, as máquinas são mais eficientes energeticamente, os processos geram menos resíduos, a maioria dos resíduos são reciclados, dentre outras evoluções. Porém, a grande massa estuda como melhorar o processo atual, melhorar sua eficiência em 1% de cada vez, fazê-lo evoluir, e esta inovação evolucionária já não está mais se tornando suficiente para o nível de crescimento que o mundo está sofrendo.

Soluções devem vir de uma inovação disruptiva, criando um processo novo, 100% mais eficiente e idealizado para a determinada função. Apesar deste tipo de inovação apresentar muitas dificuldades econômicas e tecnológicas, em longo prazo elas se tornam as mais sustentáveis.

Uma tecnologia que teve um aumento considerável no seu desenvolvimento nos últimos 15 anos e que se enquadra em uma inovação disruptiva é a manufatura aditiva.

Em oposição a produzir uma peça de um bloco de matéria prima e retirar o material não desejado como é realizada na manufatura subtrativa, como a usinagem, a manufatura aditiva adiciona material onde é necessário, tornando o processo praticamente sem resíduos e com uma liberdade muito maior de design, o que acarreta em produtos mais eficientes. Na Figura 1 é exemplificada a diferença de desperdício de material em uma estrutura aeronáutica [1].

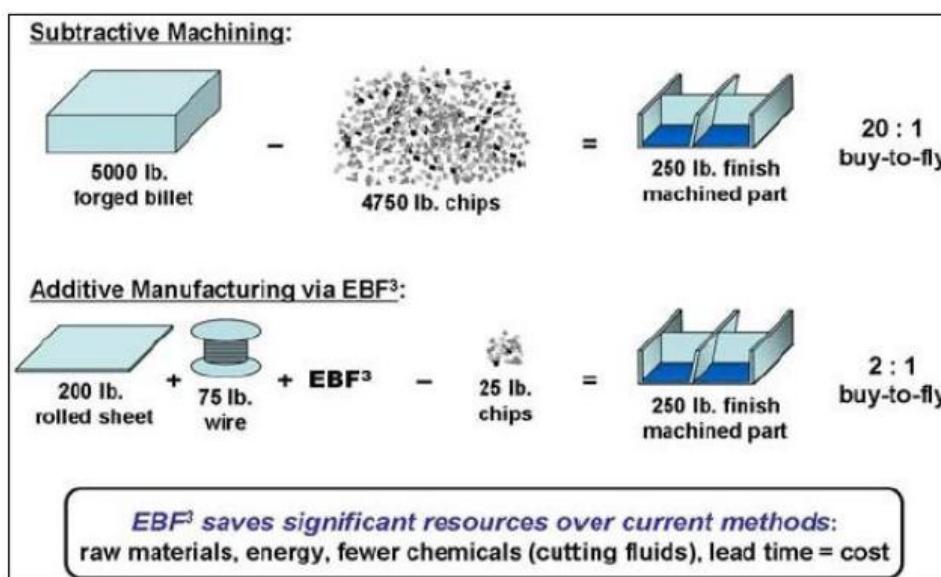


Figura 1: Comparação entre manufatura subtrativa e aditiva [1]

2.1 A Prototipagem Rápida

O termo manufatura aditiva é bastante abrangente e de acordo com [2] pode incluir até mesmo modelagem manual e maquetismo. Neste texto os termos Manufatura Aditiva (Additive Manufacturing - AM), Prototipagem Rápida (Rapid Prototyping - RP), Ferramental Rápido (Rapid Tooling - RT), Manufatura Rápida (Rapid Manufacturing - RM) e Manufatura por Camadas (Layer Manufacturing) terão o mesmo significado.

Esta diversidade de nomenclaturas tem um motivo histórico. No final dos anos 80 surgiram as primeiras tecnologias para fabricação de protótipos, seja diretamente através da construção do protótipo em si, seja indiretamente através da criação de moldes para fabricar o protótipo [3]. Já que o tempo de produção do protótipo ou do ferramental para posterior fabricação do protótipo era reduzido drasticamente

comparado à metodologia usual, estes ficaram conhecidos como Prototipagem Rápida (RP) e Ferramental Rápido (RT).

Nesta época os materiais utilizados tinham baixas propriedades mecânicas, térmicas e químicas, ou seja, não eram duráveis e ainda tinham um alto custo, portanto não serviam como produtos finais. Entretanto, com o desenvolvimento dos materiais que poderiam ser utilizados nas máquinas de RP as suas propriedades já eram suficientes para algumas aplicações em produtos finais e o custo já não era mais exorbitante.

A evolução dos modelos podem ser representada pelos “3 Fs”, de *form*, *fit* e *function* [4]. Para os primeiros modelos, com a função de ser apenas um protótipo, era necessário apenas que a forma fosse adequada para visualizar um novo design (*form*). Com a melhoria da acuracidade os protótipos possuíam tolerância suficiente para fazer parte de uma montagem (*fit*) e com o avanço das propriedades dos materiais os modelos começaram a exercer uma função de uma peça final (*function*).

O termo prototipagem não era mais adequado. Apesar das tecnologias utilizadas para a fabricação serem as mesmas, a aplicação teve uma mudança, assim foi criada a Manufatura Rápida (RM).

A base para fabricação dos produtos consistia em modelos 3D feitos em CAD (Computer Aided Design) manufaturados por adição de material camada sobre camada [5]. Este foi o motivo da criação do nome Manufatura por Camadas (LM).

Contudo, já há projetos que, ao invés de utilizarem camadas 2D, utilizam uma abordagem de deposição multiaxial [6]. Este fato demonstra que, mesmo já existindo diversas definições para um mesmo princípio de fabricação, com os desenvolvimentos tecnológicos ainda existirão mais. Algumas das definições mais usadas atualmente pelas referências no assunto estão listadas abaixo.

Kai, Jacob e Mei [7] definem a RP como sendo um processo que produz peças camada por camada diretamente de um modelo gerado em CAD.

Já Pham e Gault [8] definem RP como um grupo de novas tecnologias para produção precisa de peças diretamente dos modelos de CAD em algumas horas, com a mínima necessidade de intervenção humana.

Para Kaminski [9], a definição que melhor se enquadra é que a RP é uma tecnologia que produz modelos físicos a partir de modelos tridimensionais de sistemas CAD e que compõe os modelos a partir de materiais básicos depositado em camadas subsequentes cujo contorno é obtido diretamente destes sistemas.

Upcraft e Fletcher [10] definem a RP afirmando que este é um termo genérico para um conjunto de tecnologias que disponibilizam componentes sem a necessidade de farramental em um primeiro momento, ou sem a necessidade de prototipadores.

Volpato [11] define a RP como um processo de fabricação através da adição de material na forma de camadas planas sucessivas, permitindo fabricar componentes físicos em 3D com informações obtidas diretamente do modelo geométrico gerado no sistema CAD, de forma rápida, automatizada e totalmente flexível.

Hopkinson, Hague e Dickens [6] definem RM como o processo de manufatura aditiva automatizada baseada no uso do desenho assistido por computador (CAD) para construir peças que serão utilizadas como produtos finais ou componentes.

Desta forma, apesar de pequenas diferenças, a RP é a fabricação de um produto por deposição de camadas geradas por um modelo CAD, sem a necessidade de mudança de farramental, para uma determinada finalidade.

2.1.1 O processo da Manufatura Aditiva

Todo processo de manufatura aditiva é composto de pelo menos oito passos: desenho CAD, conversão para STL, transferência de arquivo para a máquina, ajuste da máquina, construção, remoção, pós-tratamento e aplicação [4]. A Figura 2 ilustra estes passos.

Todas as partes necessitam ter uma descrição completa da sua geometria. Esta descrição pode resultar de uma modelagem em um software especializado em desenho computacional (CAD) ou advir de um equipamento de engenharia reversa como scanner a laser. Ao final desta etapa, deve haver alguma descrição matemática de um sólido 3D ou superfície.

A conversão é feita para o arquivo do tipo STL, pois atualmente é o formato padrão na manufatura aditiva e praticamente todo software CAD faz esta conversão. Este arquivo aproxima a superfície externa fechada por triângulos, estes são a base para o cálculo dos cortes.

Após a conversão o arquivo é transferido para a máquina de AM e algumas manipulações são feitas pelo usuário, como por exemplo, corrigir a escala, posicionamento e orientação.

O ajuste da máquina deve ser totalmente realizado antes do início da construção do modelo. Os ajustes típicos são referentes ao tipo de material utilizado, à fonte de energia e à altura da camada (layer thickness).

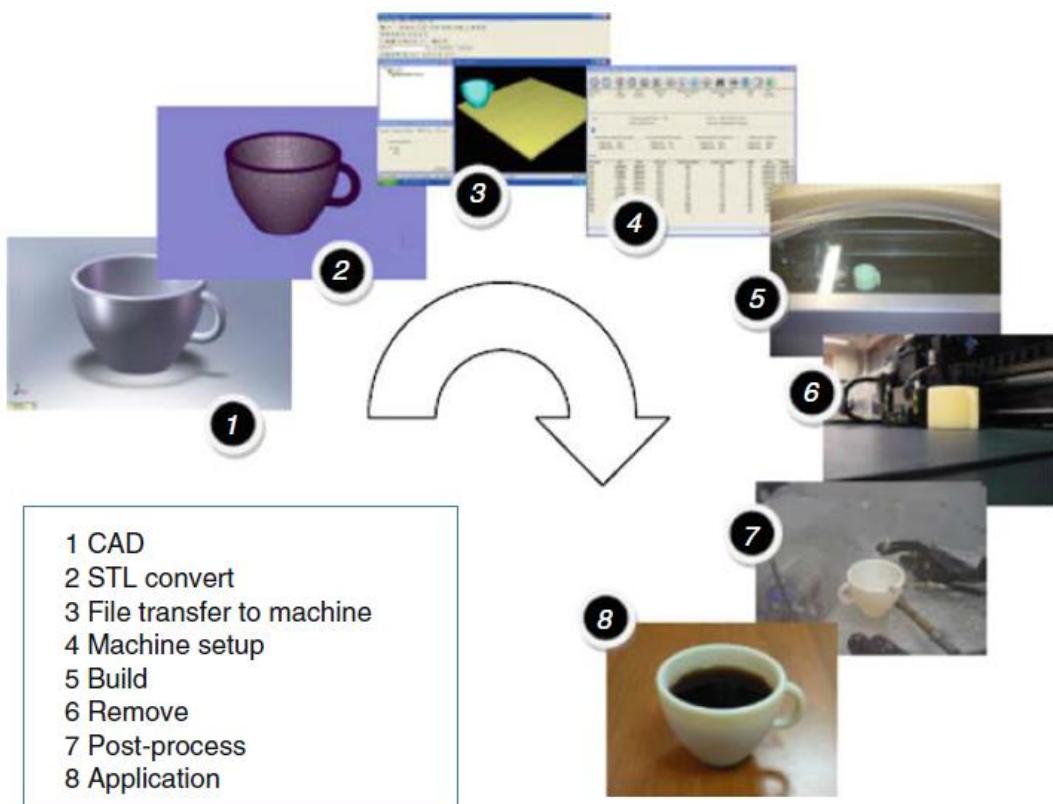


Figura 2: O processo genérico da manufatura aditiva [4]

A construção, ou fabricação, da peça é realizada de forma automatizada e na maioria dos casos não necessita de intervenção humana. Apenas o monitoramento superficial da máquina é feito para evitar erros como falta de material, energia ou erros de software. Há casos especiais onde a construção é interrompida para uma usinagem mais específica ou para processos de embutimento (embedding process).

Após o final da fabricação é necessário remover a peça. Este procedimento depende muito da tecnologia usada, pois ele pode variar desde a simples retirada manual ao final da fabricação como a espera por um tempo de cura ou resfriamento e uso de material de proteção apropriado.

Algumas tecnologias demandam um pós-tratamento da peça mais detalhado. Alguns necessitam da simples retirada de material e outros de processos químicos.

A aplicação é um estágio que consiste na finalização da peça para um uso específico. Muitas vezes, mesmo a peça pronta para o uso, ainda é necessária a pintura para ter um acabamento superficial desejado. A montagem das peças também se enquadra neste estágio.

2.1.2 Características da prototipagem rápida e aplicações

Inicialmente, será considerado o caráter de rapidez dessa tecnologia. Ao contrário do que se possa parecer à primeira vista a velocidade de fabricação da RP é lenta comparada a outros processos como, por exemplo, a injeção. Por exemplo, uma peça que leva alguns segundos para ser produzida por injeção pode levar algumas horas para ser produzida pela RP.

A real vantagem em relação ao tempo neste processo é observada somente considerando todo o processo de criação do produto produzido. Isso se deve ao fato de que as intervenções humanas são praticamente todas feitas através do computador.

Independentemente da complexidade da peça a sua fabricação é feita em apenas um passo. A maioria dos processos usuais requer múltiplos estágios de iterações e este número aumenta dramaticamente ao incluir maiores complexidades. Dentre as possíveis iterações na injeção, pode-se citar o estudo do molde, a fabricação do molde e as mudanças na geometria para poder ser fabricado. A Figura 3 compara os custos de algumas tecnologias de RP e a injeção [6]. Como já mencionado, o custo das tecnologias de RP praticamente não varia, enquanto que o custo da injeção para poucas peças é exorbitante e para um grande número o custo é o menor dentre as mencionadas.

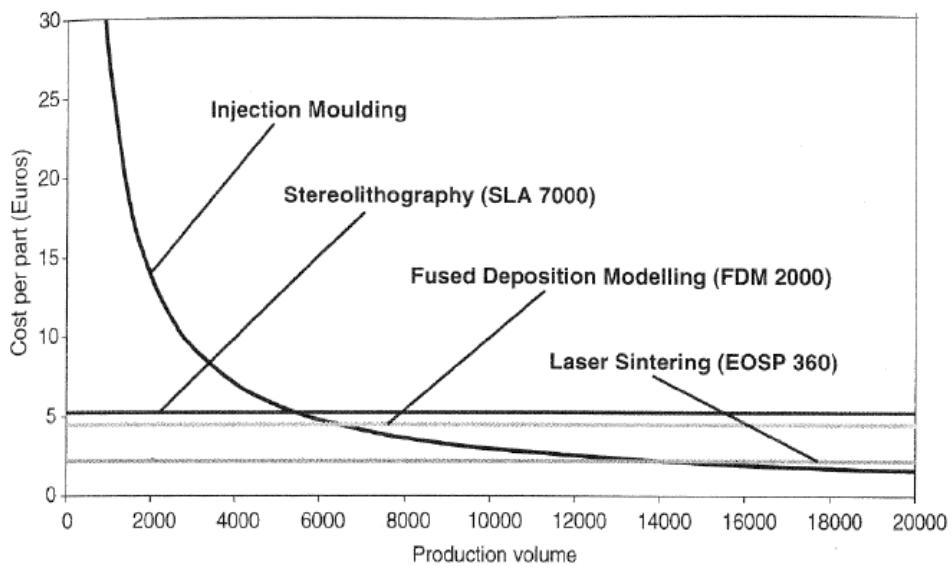


Figura 3: Custo de acordo com o processo de manufatura [1]

Sem a preocupação de como fabricar, o projetista tem uma liberdade muito maior na geometria, desenhando a peça pensando somente na sua função. Assim o tempo gasto para adaptar a peça ao processo de manufatura não existe mais e da mesma

forma o custo se mantém o mesmo independentemente da complexidade geométrica, além de não haver o gasto com ferramentas específicas.

O campo de aplicações da manufatura aditiva é extremamente vasto. Designers, artistas, médicos, engenheiros, todos têm um crescente interesse nessa recente tecnologia. Os principais motivos são a diversidade de materiais e a liberdade de geometria. Já é possível processar partes em diversos polímeros, metais e cerâmicos, além de diversas combinações destes materiais ponto a ponto como nunca visto antes. Projetos em desenvolvimento conseguem até mesmo criar objetos feitos de tecidos vivos.

Na curta vida da prototipagem rápida, já se tem o domínio suficiente para criar geometrias antes impensáveis de se construir. Obviamente, existem algumas limitações tecnológicas, mas já é possível construir peças com microestruturas treliçadas, ou aparelhos auditivos que têm o exato formato do canal auditivo do usuário, até mesmo próteses em tecido vivo com micro-porosidades.

Devido às características já apresentadas, pode-se considerar a manufatura aditiva como uma tecnologia disruptiva. Diversas possibilidades são oferecidas em um longo espectro. O modo de pensar na concepção de um novo produto através desta tecnologia é totalmente novo, com várias barreiras rompidas, porém muitos ainda vêem seu potencial apenas como protótipos.

A necessidade de um ferramental específico para uma dada peça limita muito o design de um produto. Os produtos em atual desenvolvimento estão expostos às várias restrições recomendadas pelo “Design for Manufacturing and Assembly” (DFMA) [12], que consiste de um manual para facilitar a produção e montagem, que já não é mais válida na manufatura aditiva.

A manufatura rápida tem como características ser flexível e reconfigurável, o que trará grandes benefícios tanto para os produtores quanto para os consumidores. Algumas das principais vantagens são:

- Produção econômica em baixa escala
- Aumento da flexibilidade
- Produtividade e liberdade de design

A filosofia atual se concentra no “Design for Manufacture”. Dentre as principais indicações para o desenvolvimento de um produto podemos citar: definir ângulo de inclinação para retirada da peça, minimizar o número de reentrâncias, evitar paredes

muito finas já que estas esfriam mais rapidamente, usar paredes com espessura uniforme, minimizar as linhas de solda e evitar cantos vivos.

Com esta nova tecnologia, este assunto pode ser abordado com a filosofia “Manufacture for Design”. Alguns dos exemplos mais atuais é o uso otimizado de treliças para o projeto estrutural de uma construção, como Estádio Nacional de Beijim proposto por Arup [13], que utilizou a prototipagem rápida para construir um modelo em escala visto na Figura 4.

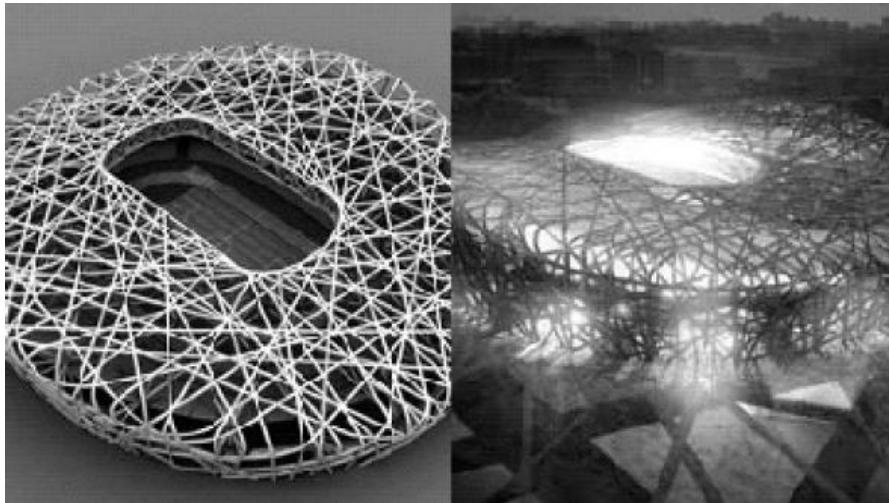


Figura 4: (a) Proposta para o estádio de Pequim em modelo a esquerda e (b) a direita uma ilustração deste estádio [13]

Sem a restrição das ferramentas de manufatura alguns produtos já foram remodelados e são produzidos inteiramente pela manufatura aditiva. A Delphi Diesel Systems [14] remodelou os canais que passam óleo diminuindo a perda de carga, já que antes o canal era feito pela junção de furos retos e na remodelagem os canais se tornaram curvos, como ilustrado na Figura 5. Algumas aeronaves de caça já estão usando a vantagem da manufatura aditiva para construir dutos de ar que são uma peça e não necessitam de montagem (Figura 6), diminuindo o custo do projeto.

2.1.3 Classificação dos processos de prototipagem rápida

Existem diversas maneiras de se classificar os processos de prototipagem rápida, sendo que a escolha de cada um deles depende do objetivo do autor. A primeira distinção mais comum que aparece nas referências é quanto ao material de trabalho (polímeros, metais, cerâmicos, etc.) e a técnica de construção da forma da camada [14]. Classificações binárias quanto ao equipamento específico utilizado (e.g., laser VS sem laser) também são comuns. Os processos também podem ser subdivididos de acordo

com o estado físico inicial do material base (e.g., líquido, lâminas, partículas discretas e sólido) e da física de transformação do material base.

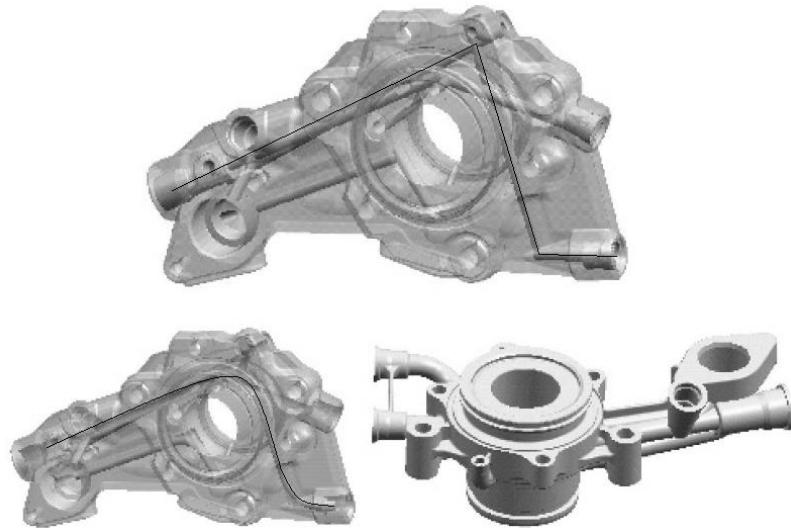


Figura 5: Bomba de combustível otimizada da Delphi [6]

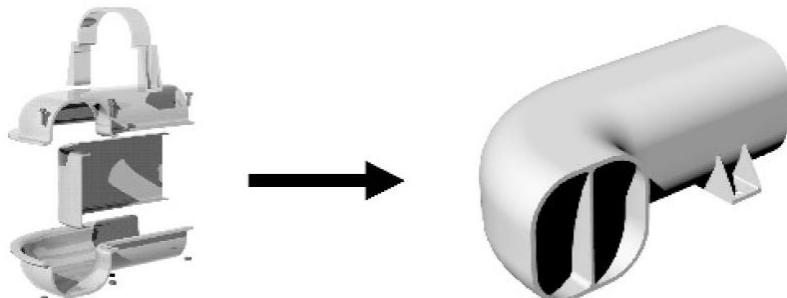


Figura 6: Exemplo de redução de montagem com manufatura aditiva [6]

Upcraft e Fletcher [10] optaram por classificar o processo de uma maneira simples, mas que ainda consiga distinguir adequadamente os processos de acordo com o processo físico de construção a seguir:

- *Curing process* – um polímero fotossensível é exposto a uma fonte de luz para endurecer o polímero.
- *Sheet process* – lâminas finas do material base são cortadas na forma da camada e sobrepostas uma sobre a outra.
- *Dispensing process* – o material é derretido e então depositado como um filamento aquecido ou como gotas aquecidas individuais.

- *Sintering process* – o material base se encontra em pó e então é sinterizado usando uma fonte de calor, usualmente um feixe de laser.
- *Binding process* – uma cola líquida é depositada no material em pó para uní-lo.

Williams, Mistree e Rosen [15] fizeram um framework mais completo, que considera diversos fatores e cada tecnologia possui uma característica de cada linha da

Solutions										
Store Material	Single-phase powder	Two-phase powder	Coated powder	Tape / Sheet	Wire / Rod	Liquid polymer	Molten material	Binder / Structural powder suspension	Two-phase gas	
Pattern Material	1D extrusion	1D powder deposition		2D suspension ejection		2D tape / sheet		2D powder deposition	No material patterning	
Pattern Energy	1D light source	1D heat source		2D light source		2D heat source		2D mechanical joining	No energy patterning	
Create Primitive	Polymerization via catalyst	Photo-polymerization	Thermal polymerization	Adsorption adhesion	Electrostatic adhesion	Fusion	Freeze	Evaporate solution	Mechanical adhesion	Solidify melt
Provide Material for Next Layer	Recoat by spreading		Recoat by spraying		Recoat by dipping			Directly place primitive	Directly place layer	
Provide Support	Bed of build material	Thin trusses of build material	Dissolvable support material	Breakable support material		Pyrolyzable support material	5-axis deposition			

Figura 7: Matriz morfológica para processos AM [15]
matriz apresentada na Figura 7.

Como ilustração a tecnologia FDM se classificaria como *Wire/Rod*, *1D extrusion*, *No energy patterning*, *Fusion*, *Directly place primitive* e *Dissolvable support material*.

Devido à enorme variedade de tecnologias existentes não será possível apresentar todas. A seguir serão listadas 42 tecnologias apresentadas por Upcraft e Fletcher [10] no ano de 2003.

3DP *Three-Dimensional Printing*

3DWM *Three-Dimensional Welding and Milling*

BPM *Ballistic Particle Manufacture*

CAM-LEM *Computer Aided Manufacturing – Laminated Engineering Materials*

CC *Contour Crafting*

CLOM *Curved Laminated Object Manufacturing*

DLF	<i>Direct Light Fabrication</i>
DLMS	<i>Direct Laser Material Sintering</i>
ECLD-SFF	<i>Electrochemical Liquid Deposition Of Semi-solid Metals</i>
EFF	<i>Extrusion Freeforming</i>
EPDFF	<i>Electrophotographic Powder Deposition for Freeform Fabrication</i>
FDC	<i>Fused Deposition of Ceramics</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
FDMet	<i>Fused Deposition of Metals</i>
FFF	<i>Fast Freeform Fabrication</i>
FI	<i>Fast Inkjet</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
LCR HLS	<i>Local Chemical Reaction Heat by Laser Scanning</i>
LCVD	<i>Laser Chemical Vapour Deposition</i>
LDM	<i>Laser Diode Manufacturing</i>
LENS	<i>Laser Engineering Net Shape</i>
LM	<i>Layered Manufacture</i>
LML	<i>Laser Microchemical Lathe</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
M2SLS	<i>Multimaterial Selective Laser Sintering</i>
Meso SDM	<i>Mesoscopic Shape Deposition Manufacturing</i>
Mold SDM	<i>Mold Shape Deposition Manufacturing</i>
PLD	<i>Pulsed Laser Deposition</i>
PPD	<i>Pointwise Powder Deposition</i>
RFP	<i>Rapid Freeze Prototyping</i>
RBC	<i>RoboCasting</i>
RPBPS	<i>Rapid Pattern Based Powder Sintering</i>
RSLA	<i>Refrigerative Stereolithography</i>
SALD	<i>Selective Area Laser Deposition</i>
SADVI	<i>Selective Area Laser Deposition and Vapour Infiltration</i>
SGC	<i>Solid Ground Curing</i>
SL	<i>Stereolithography</i>
SLPR	<i>Selective Laser Powder Remelting</i>

SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
TIF	<i>Temperature Induced Forming</i>
TLP	<i>Thick Layer Prototyping</i>
WFDM	<i>Wirefeed Direct Metals</i>

De acordo com Silva [16], as tecnologias disponíveis no mercado são poucas e estas são bem distinguidas de acordo com uma classificação simples em três grupos: materiais líquidos, sólidos e a base de pó. No próximo capítulo as tecnologias serão apresentadas de acordo com essa classificação.

2.1.4 Principais processos de prototipagem rápida

No grupo de materiais líquidos os processos de estereolitografia (SL) e impressão a jato de tinta (IJP) Polyjet são os de maior destaque. Já no grupo de materiais sólidos as tecnologias de modelagem por deposição de material fundido (FDM) e a impressão por jato de tinta (IJP) “Thermojet” são as principais. Finalmente os processos de sinterização seletiva a laser (SLS) e impressão tridimensional indireta (3DP) são os destacados no grupo de materiais em base de pó.

2.1.4.1 Processos baseados em material líquido

2.1.4.1.1 Estereolitografia (SL)

Este foi o primeiro processo de prototipagem rápida disponível comercialmente, apresentado em 1988.

A Estereolitografia (*Stereolithography*) baseia-se na transformação de uma resina composta por monômeros fotossensíveis que se transformam em cadeias poliméricas. Esta reação química resulta em cadeias poliméricas com estruturas cruzadas.

Para iniciar esta reação e ocorrer a solidificação são usados feixes de laser, geralmente ultravioleta (UV), com comprimento de onda específico.

A resina fica confinada em um recipiente, neste há uma plataforma móvel que se desloca no sentido vertical, de forma a controlar a espessura da camada de resina fotossensível ao feixe de laser.

De acordo com Volpato [11], o laser comumente utilizado nesse equipamento é o do tipo Hélio-Cádmio (He – Cd) com potência entre 6 mW e 12 mW. O comprimento de onda é de 325 mm.

O diâmetro do feixe é de 0,25mm, porém em aplicações especiais de alta resolução este valor pode diminuir para até 0,075mm. O gerador do feixe fica imóvel, o que gera a mobilidade é um par de espelhos movimentados por galvanômetros. Um conjunto de lentes e um sistema de abertura calibram o feixe que percorre a superfície da resina.

A construção de uma nova camada é iniciada com a submersão da plataforma e com a sua imersão, resultando na formação de uma fina camada que será solidificada sobre a camada anterior. A espessura de cada camada é de aproximadamente 0,25mm.

Após a finalização da peça a mesma é levada a um forno UV para cura total da resina, aumentando a sua resistência mecânica. Dependendo da aplicação pode ser necessário um acabamento superficial do produto.

Em alguns casos, com a geometria complexa, as partes poderiam se soltar ou flutuar na resina durante o processo. Então são gerados suportes pelo software da máquina, que posteriormente possam ser removidos. A Figura 8 apresenta o conceito da tecnologia.

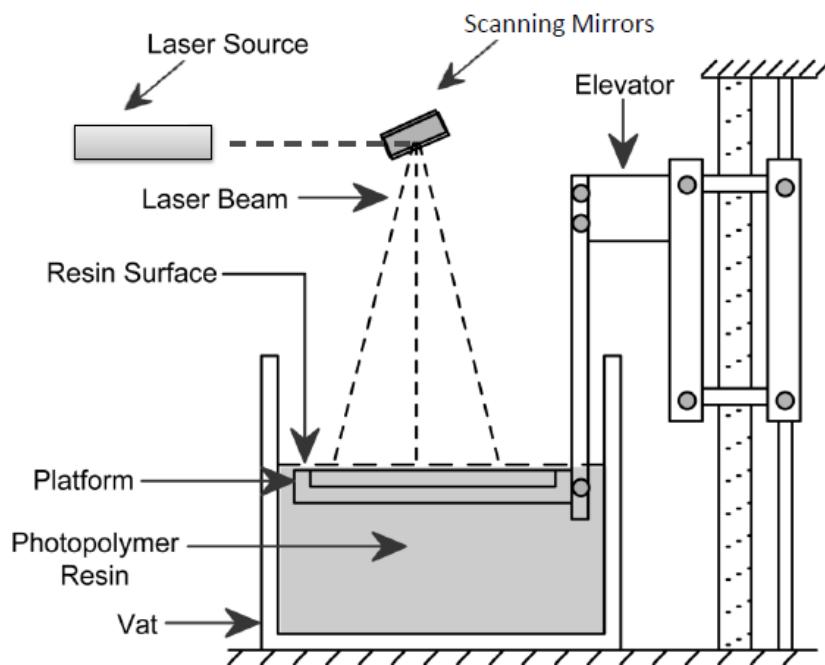


Figura 8: Conceito da Estereolitografia (SL) [1]

Os materiais fotossensíveis disponíveis para uso no processo de SL são resinas a base de acrilatos, epoxy, ou uma combinação destes. A maior parte dos produtos é a base de epoxy devido à menor concentração e melhores propriedades mecânicas e térmicas, porém esta requer maior energia para polimerização, resultando em um maior tempo de processamento.

Dentre as principais vantagens da SL, pode-se citar:

- Alta resolução;
- Alta velocidade de construção;
- Laser com maior vida útil;
- Versatilidade do sistema;
- Serviço com suporte universal;
- Excelente acabamento superficial;
- Alto detalhamento e paredes finas.

As principais desvantagens são:

- Necessidade de pós-cura;
- Remoção manual dos suportes;
- Material caro, frágil e sensível ao calor, umidade e luz solar;
- Toxidade do material ainda não curado;
- Necessidade de o material ser polimérico.

2.1.4.1.2 Impressão a jato de tinta Polyjet

Esta tecnologia é patenteada pela empresa Object, e consiste na injeção de material fotopolimérico em camadas ultrafinas de até 16 μm depositadas sobre uma plataforma de construção e na fotocura da camada recém-injetada por uma luz ultravioleta. Desta forma não há necessidade de pós-cura e a peça pode ser utilizada imediatamente após a sua construção.

A Polyjet da Object usa um sistema idêntico aos das impressoras de jato de tinta, porém utilizando resina em pequenas gotas ao invés de tinta. Após a “impressão” da camada do material este é exposto a uma luz UV. A Figura 9 ilustra seu funcionamento.

Diversos tipos de materiais podem ser utilizados na Polyjet. Devido à sua grande acuracidade e a possibilidade da utilização de cera como material base, esta tecnologia é bastante usada para criação de moldes para fundição em cera perdida.

Outra característica que distingue a Polyjet é a sua facilidade de uso de diversos materiais e no seu controle ponto a ponto. Com isto é possível criar uma peça com diferentes materiais, desde materiais rígidos a flexíveis, e qualquer combinação desses materiais (*graded material*), criando um novo material com propriedades intermediárias entre os utilizados. A Figura 10 exemplifica o uso de um material rígido para

representar o osso humano e de um material gelatinoso para representar a carne em um protótipo construído pela Polyjet.

Suas principais vantagens são:

- Alta velocidade;
- Combinação de materiais;
- Excelente acabamento superficial;
- Baixo custo (sem laser);
- Sem necessidade de reservatórios;
- Alta precisão com paredes muito finas (de até 600 μm) ;
- Não requer pós-cura;

E suas desvantagens são:

- Necessidade de suportes em regiões não conectadas do produto;
- Pós-processamento para remoção dos suportes;
- Uso apenas de resinas fotopolimerizáveis;

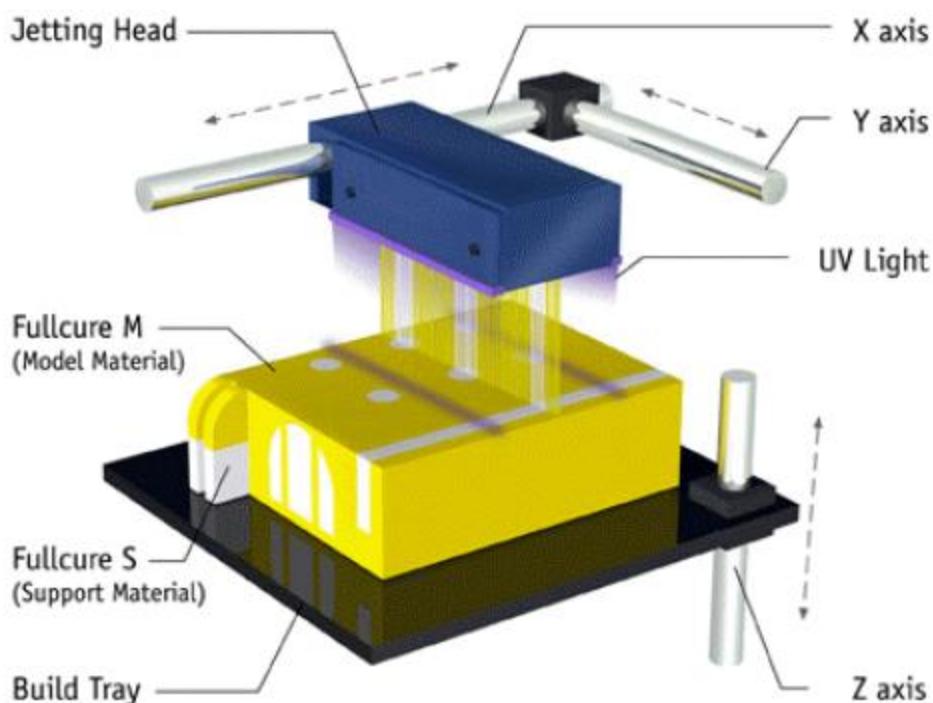


Figura 9: A tecnologia IJP Polyjet [1]



Figura 10: Impressão com diferentes materiais [1]

2.1.4.2 Processos baseados em material sólido

Estes processos têm o material no estado sólido antes de seu tratamento. A sua forma pode ser um filamento, lâminas ou pellets.

2.1.4.2.1 Modelagem por deposição de material fundido (FDM)

A empresa Stratasys [18] foi a primeira a utilizar essa tecnologia comercialmente produzindo peças e protótipos com materiais termoplásticos de alta-performance.

No FDM um filamento de material é extrudado através de um pequeno orifício e depositado sobre uma plataforma. As guias deste cabeçote extrusor movem-se no plano XY, formando uma fina camada 2D.

A plataforma se desloca então no sentido Z a uma distância idêntica ao da espessura de cada camada. Já que o filamento extrudado se encontra em um estado plastificado, este adere à camada anterior.

Paralelamente ao bocal do material base também é necessário ter um segundo bocal para extrudar o material de suporte, que pode ser solúvel ou retirado manualmente.

Seu princípio de funcionamento está ilustrado na Figura 11.

As principais características positivas são:

- Baixo custo
- Produtos robustos e fortes com até 85% de resistência do material base
- Pouco desperdício

- Manufatura direto do escritório (não tóxico)
- Mínimo pós-tratamento

As principais características negativas são:

- O processo é relativamente lento
- Produz peças com propriedades anisotrópicas
- Acabamento e resolução inferiores
- Peça final com poros
- Pouca diversidade de materiais

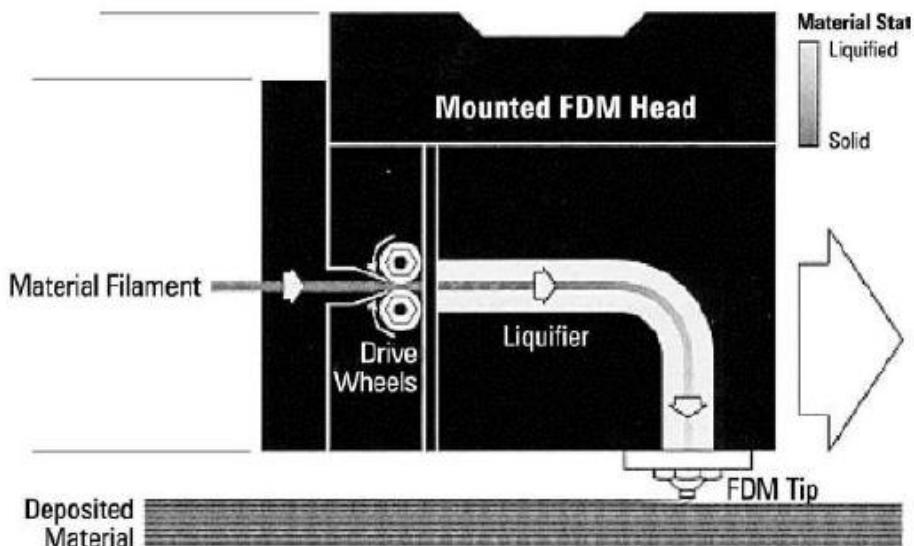


Figura 11: Tecnologia FDM [1]

2.1.4.2.2 Impressão a jato de tinta “Thermojet”

Esta tecnologia foi desenvolvida pela empresa 3D Systems e apresenta um princípio de funcionamento semelhante ao da impressão a jato de tinta Polyjet apresentada anteriormente.

Da mesma forma o material é aquecido e depositado em uma plataforma na forma de gotas. A solidificação desta gota sobre a plataforma ou sobre a camada anterior que resulta na formação da camada adjacente.

Este processo é acelerado com múltiplos jatos de tinta contidos no cabeçote de impressão, aumentando a potencialidade de velocidade, já que uma camada pode ser formada rapidamente caso o número de jatos seja grande o suficiente.

Atualmente os cabeçotes apresentam até 352 jatos alinhados em 200 mm de largura.

Inicialmente, o material base era a cera, porém, com o desenvolvimento da tecnologia, foram desenvolvidos termopolímeros com melhores propriedades.

Para o suporte, utiliza-se o mesmo tipo de material base, portanto, uma quantidade mínima de volume para os suportes deve ser reservada, e o processo requer uma fase de pós-processamento para a remoção dos suportes.

A Figura 12 ilustra o funcionamento da tecnologia Thermojet.

Suas vantagens são:

- Fácil utilização, inclusive em ambiente de trabalho
- Processo relativamente rápido
- Não requer o uso de laser

As suas desvantagens são:

- Pós-processamento para remoção dos suportes
- Pouca variedade de materiais para se trabalhar
- Fragilidade dos produtos finais
- Necessidade de suportes estruturais, além de serem do mesmo material do produto

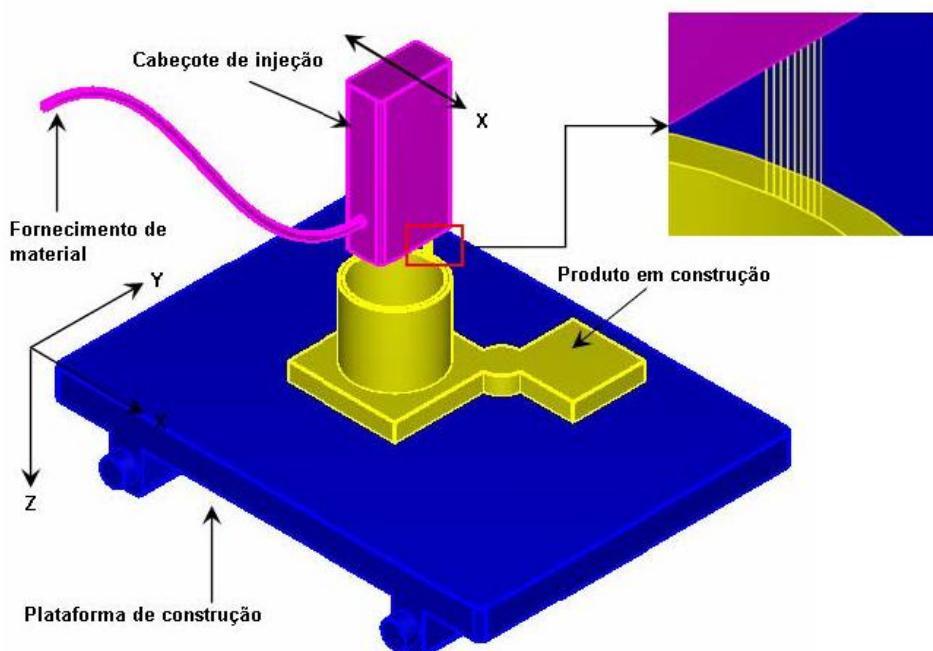


Figura 12: Funcionamento da impressora a jato de tinta Thermojet [1]

2.1.4.3 Processos baseados em material a base de pó

2.1.4.3.1 Sinterização seletiva a laser (SLS)

A Sinterização Seletiva a Laser (do inglês, *Selective Laser Sintering – SLS*) é um processo rápido e versátil que utiliza um laser de alta potência para fundir pequenas partículas de plástico, metal, cerâmica ou vidro, em pó, formando o objeto tridimensional.

O primeiro equipamento SLS foi comercializado em 1982 e atualmente a empresa 3D Systems detém os direitos desta tecnologia [11].

Na SLS o material de construção fica armazenado em um reservatório ao lado do recipiente de construção. Este recipiente se desloca no sentido vertical de acordo com a espessura da camada desejada, e então um rolo transfere o material base do reservatório para o recipiente, espalhando-o e nivelando-o.

Tanto o recipiente quanto o reservatório são mantidos em uma câmara com uma atmosfera inerte que evita a oxidação e o risco de explosão de partículas mais finas. Nesta câmara também ocorre o pré-aquecimento do material, elevando a sua temperatura a um patamar um pouco inferior ao da temperatura de fusão, diminuindo os efeitos de distorções térmicas e também diminuindo a necessidade de um laser mais potente.

O feixe de laser se desloca pela superfície do material fornecendo energia para fundir as partículas, formando assim uma camada 2D. As partículas de pó podem ser um material de uma fase, de duas fases ou um material revestido, desta forma o laser pode fundir o material base ou fundir um material secundário que será um aglomerante. Este aglomerante necessitará ser substituído pelo material base posteriormente em um pós-tratamento.

A SLS não necessita da construção de suportes, já que o próprio pó não fundido serve como suporte para a camada posterior, porém é necessário deixar espaços vazios para a retirada do pó aprisionado.

Os materiais utilizados para o SLS são os mais diversos. Teoricamente, virtualmente qualquer material poderia ser utilizado, contanto que estivesse na forma de pó. Dentre os materiais mais utilizados podem-se citar elastômeros, nylon, poliamida, poliamida com microesferas de vidro, cerâmica, metal revestido com polímero, aço e titânio.

O processo SLS pode ser melhor visualizado na Figura 13.

As principais vantagens do processo SLS são:

- Peças robustas e fortes
- Peças com até 100% de densidade (sem poros)
- Elevada diversidade de materiais
- Não utiliza estruturas de suporte
- Apenas um único equipamento admite os diversos materiais
- Possibilidade de empilhar vários produtos em uma única impressão
- O material não precisa de pós-cura

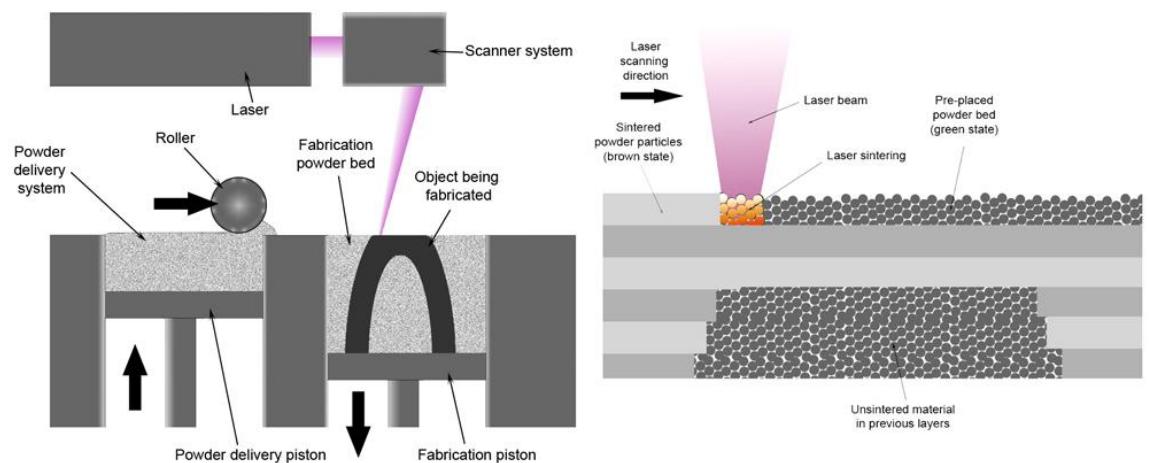


Figura 13: O processo SLS [1]

As principais desvantagens são:

- Alto custo do equipamento
- Alto consumo de energia para sinterizar o material
- Acabamento superficial inferior
- Baixa velocidade de produção
- Reciclagem limitada do pó não fundido

A Figura 14 demonstra a possibilidade da construção de geometrias de alta complexidade feitas em metal.



Figura 14: Dodecaedro feito de um compósito de aço e bronze pela SLS [1]

2.1.4.3.2 Impressão Tridimensional Indireta (3DP)

O fator que diferencia este método de prototipagem rápida do SLS, apresentado anteriormente, é que ao invés de utilizar um feixe de laser para fundir e agregar o material em pó o material é agregado por um aglutinante depositado por impressão do tipo jato de tinta [11].

Neste método o material é espalhado e nivelado por um rolo que percorre a superfície da câmara de trabalho. O aglutinante é depositado sobre o material através do cabeçote de impressão de acordo com a geometria da camada que está sendo construída.

O material não aglutinado ao redor do produto em construção serve de suporte natural, não havendo a necessidade da criação de suportes durante a separação do modelo 3D em camadas pelo sistema CAD. Devido a este suporte natural, várias peças podem ser fabricadas e empilhadas em uma única operação [1].

Todas as peças construídas por este processo necessitam de pós-tratamento, seja para aumentar a resistência mecânica ou para melhorar o aspecto da superfície. O pós-tratamento varia de acordo com o material utilizado e sua aplicação.

Teoricamente, qualquer material em pó pode ser utilizado neste processo, mas para cada tipo de material, um aglutinante específico deve ser desenvolvido. Os materiais comumente utilizados são as cerâmicas, os metais, os polímeros e materiais a base de amido.

A Figura 15 ilustra o funcionamento da Impressão Tridimensional Indireta (3DP).

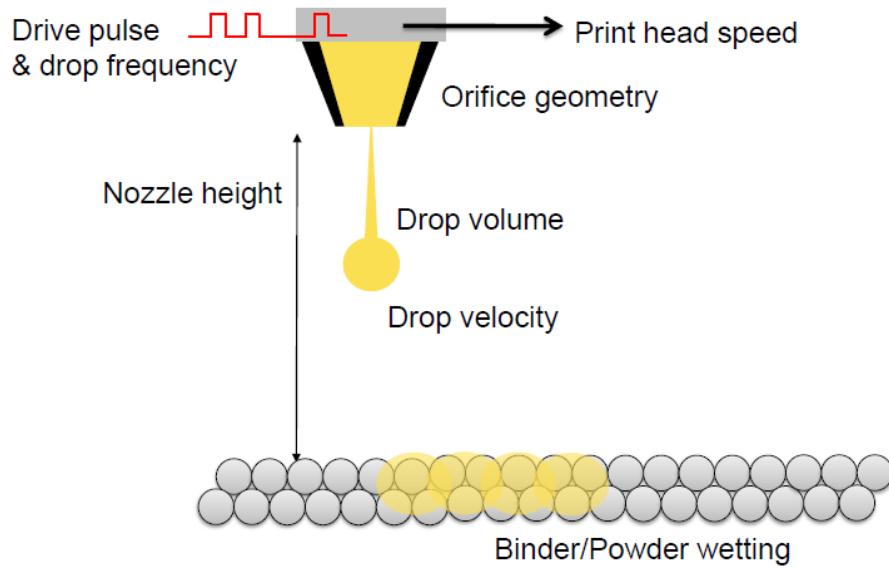


Figura 15: Princípio de funcionamento 3DP indireta [1]

As principais vantagens deste processo são:

- Não utilização de laser
- Alta velocidade
- Não necessita de suportes
- O material não aglutinado pode ser reutilizado
- Baixo custo
- Pode criar modelos coloridos

As principais desvantagens são:

- Baixa resistência mecânica
- Baixa qualidade superficial
- Poucos materiais disponíveis
- Necessita de infiltração no pós-processamento

2.2 Seleção da tecnologia para o projeto mecânico

Dentre todas as tecnologias apresentadas, será selecionada uma, e o seu projeto mecânico será desenvolvido.

Os principais objetivos definidos para este projeto são: baixo custo, matéria prima não-tóxica, baixa complexidade química e peças com boa resistência mecânica. Estas métricas foram selecionadas para permitirem a construção de um protótipo na

Universidade Federal do Rio de Janeiro (baixo custo e não toxicidade) que construa peças funcionais (resistência mecânica) e tenha o foco no projeto mecânico (baixa complexidade química).

Para selecionar a tecnologia mais adequada foi montada uma Matriz de Seleção [1,4], na qual foram comparadas estas tecnologias de acordo com as métricas apresentadas anteriormente. Foi considerado o mesmo peso para cada métrica e para cada uma foi dada uma nota qualitativa entre 1 e 5. A soma das notas de cada processo representa a sua maior adequação aos objetivos definidos. A Tabela 1 apresenta as notas dadas a cada processo.

Tabela 1:Matriz de Seleção

	SL	IJP Polyjet	FDM	IJP Thermojet	SLS	Indirect 3DP
Baixo custo	1	3	5	4	1	5
Matéria prima não-tóxica	2	3	5	5	4	5
Baixa complexidade química	2	2	4	4	4	3
Resistência mecânica	5	4	3	3	5	2
Total	10	12	17	16	14	15

Como se pode perceber a tecnologia que recebeu a maior pontuação foi o FDM, principalmente devido ao fato do baixo custo e não toxicidade. Portanto esta será a tecnologia na qual o protótipo será baseado.

3 O FDM

3.1 Introdução

Este capítulo se aprofunda na tecnologia central deste projeto, o FDM, que foi introduzido na seção 2.1.4.2.1. O princípio básico dessa tecnologia é a extrusão do material, onde o material armazenado em um reservatório é forçado através de um bocal quando uma pressão é aplicada. Se a pressão é mantida constante, então o material extrudado irá escoar a uma taxa constante e irá manter um diâmetro de seção transversal constante. Este diâmetro irá permanecer constante se a trajetória do bocal através da superfície da camada é mantida com velocidade constante e compatível com a vazão. O valor deste diâmetro é determinado de uma forma complexa, que envolve a temperatura do polímero, a vazão, a pressão, o diâmetro do bocal e outras propriedades reológicas [4].

Este material deve se manter em um estado semi-sólido, mantendo a sua forma, assim, durante a construção da camada, o material poderá se solidificar com uma forma pré-definida. Além disso, o material deve criar ligações com o material já extrudado, tanto da camada anterior quanto da camada em construção, para que uma estrutura resistente seja formada.

Devido à complexidade e ao grande número de fatores que influenciam o processo, este capítulo irá discutir os principais fatores chave para um sistema de prototipagem rápida baseado em extrusão. Estes fatores são:

- Carregamento do material
- Plastificação
- Extrusão
- Solidificação
- Controle de formação da camada
- Ligação do material com a peça já construída para formação de uma estrutura sólida
- Inclusão de estruturas de suporte
- Propriedades mecânicas

3.2 Carregamento do material

Já que a extrusão é a base deste sistema, deverá haver uma câmara na qual o material será armazenado para então, sob a aplicação de uma pressão, escoar pelo bocal. Este reservatório pode ser pré-carregado com o material, mais útil quando o material já se encontra em uma forma plastificada, porém trás a desvantagem de não ser um processo contínuo. A Figura 16 ilustra um sistema de seringa e atuador linear, no qual o atuador linear desloca um êmbolo que força a extrusão do material por um bocal. Já a Figura 17 também apresenta um sistema de seringa, porém a fonte de pressão é a inserção de ar comprimido sobre o material. Estes sistemas são mais utilizados em um âmbito experimental ou quando o material se encontra no estado plastificado próximo a temperatura ambiente, um exemplo de aplicação é a extrusão de produtos alimentícios, como o chocolate.

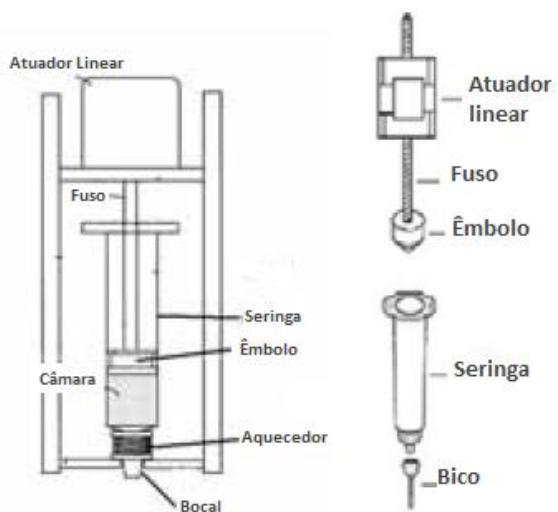


Figura 16: Carregamento por Seringa e Atuador Linear [18]



Figura 17: Carregamento por Seringa e Ar Comprimido [18]

Entretanto, o mais usual é a utilização de um suprimento contínuo de material na câmara. Se o material já se encontra na forma plastificada, este pode ser armazenado em um reservatório e bombeado para a câmara, porém a maioria dos materiais não se encontra na forma plastificada. A maioria do material utilizado se encontra no estado sólido, sendo mais comumente encontrados na forma de pellets, grânulos, em pó ou em filamento. No caso de pellets, grânulos ou pó o mais indicado é o uso de uma extrusora de rosca, a qual irá misturar o material, plastificá-lo e gerará a pressão necessária para a extrusão [19,20]. Uma rosca simples está ilustrada na Figura 18.

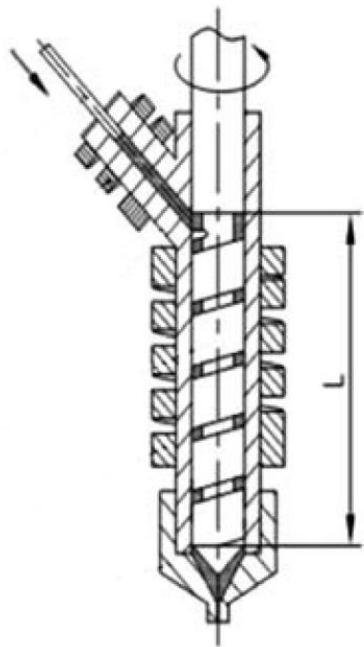


Figura 18: Rosca simples para extrusão [19]

Caso a alimentação seja por filamento, um atuador linear é utilizado para acionar roletes, ou outro mecanismo, os quais irão forçar o filamento para dentro da câmara, como mostrado na Figura 19.

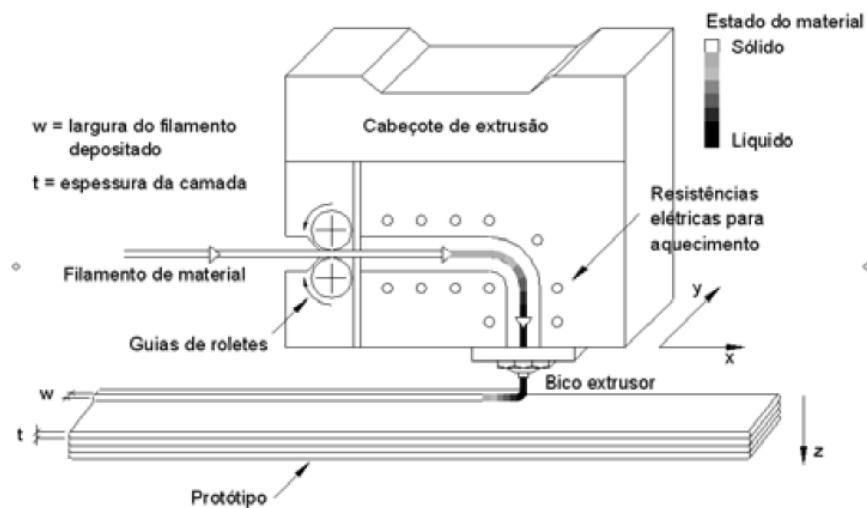


Figura 19: Carregamento para filamentos [18]

3.3 Plastificação

Como princípio da extrusão, o material contido na câmara necessita estar no estado plastificado para então ser expulso pelo bocal. Este material pode estar na forma de solução que irá se solidificar rapidamente após a sua extrusão, porém mais usualmente o material estará plastificado devido ao calor aplicado à câmara.

O calor pode vir de duas principais fontes de energia, pelo atrito ou pelo efeito Joule. Na extrusora de rosca, o atrito do material com as paredes do material e com ele mesmo gera calor, sendo este o principal agente plastificador nas extrusoras de grande porte, porém tem uma importância minoritária em extrusoras de pequeno porte. Já o efeito Joule gera calor a partir de uma corrente elétrica que passa por um condutor, o que facilita o controle da temperatura através de microcontroladores. Geralmente é utilizada uma resistência elétrica, seja na forma de cartucho ou de filamento, em conjunto com um sensor de temperatura para se ter um controle adequado da temperatura, mantendo-a constante na câmara e no bocal.

Quanto maior a câmara, maior a dificuldade de controle da temperatura por inúmeras razões como a transferência de calor no material fluido, correntes térmicas dentro do material, mudança das propriedades físicas do material, dentre outras.

O material dentro da câmara deve ser mantido em um estado plastificado, porém é necessário um ajuste adequado para manter a temperatura a mais baixa possível, mas que mesmo assim ainda possibilite uma extrusão adequada. Isto se deve ao fato de que a maioria dos polímeros se degrada rapidamente em altas temperaturas e pode até queimar, deixando resíduos dentro da câmara que poderão obstruir o bocal e contaminar o material. Além disso, maiores temperaturas requerem mais tempo de resfriamento e estão mais suscetíveis a erros de forma.

3.4 Extrusão

O bocal de extrusão determina a forma e o tamanho do filamento extrudado. Um bocal de diâmetro maior irá permitir o material fluir mais rapidamente com maior facilidade, porém irá resultar em um produto final com menor precisão, já que a precisão da peça está diretamente relacionada com o diâmetro do filamento extrudado.

É importante ressaltar que o filamento não possui exatamente a geometria do bocal. Devido, principalmente, aos efeitos de viscoelasticidade dos polímeros, ocorre um efeito chamado de Inchamento do Extrudado, no qual o polímero aumenta de tamanho devido às relaxações de tensões. Assim, o tamanho do filamento pode ser função da geometria do bocal, da vazão, da pressão, da temperatura de processamento, dentre outros fatores. Por exemplo, a Figura 20 apresenta o formato do orifício de extrusão (lado esquerdo) para que o extrudado tenha a forma desejada (lado direito).

Outros efeitos viscoelásticos comuns na extrusão são a fratura do fundido e a pele de tubarão [21].

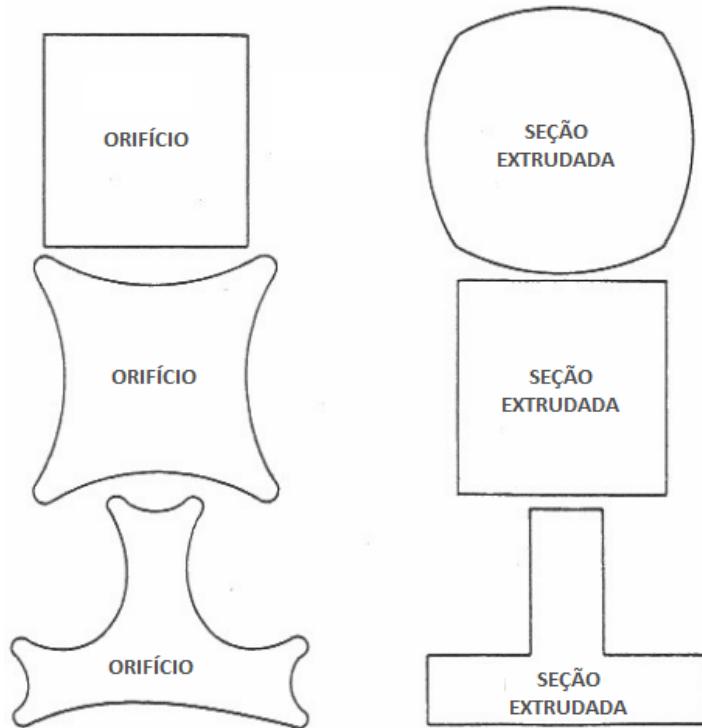


Figura 20: Efeito viscoelástico inchamento do extrudado [21]

A precisão da peça está diretamente relacionada com o diâmetro do filamento extrudado. O menor detalhe de uma peça não pode ser menor do que este diâmetro, senão ele não será construído com resistência satisfatória. Assim, o processo de extrusão é mais indicado para peças grandes, com paredes de no mínimo duas vezes o valor do diâmetro.

O fluxo de massa que sai pelo bocal está relacionado diretamente com a queda de pressão, a geometria do bocal e com a viscosidade do material, sendo a viscosidade uma função primária da temperatura. A física de maior importância que define o fluxo de massa é a correlação que existe entre o equilíbrio de forças devido à aplicação de um diferencial de pressão e a contrapressão gerada principalmente pelos esforços cisalhantes no material.

3.5 Solidificação

Como já foi mencionado anteriormente, o filamento extrudado sofre deformações viscoelásticas ao sair do bocal, gerando uma nova geometria. Porém, esta geometria ainda sofre outra deformação ao ser depositada sobre uma superfície. A

gravidade e a tensão superficial são os principais fenômenos atuantes na mudança de forma, enquanto que o tamanho varia com o resfriamento ou secagem.

Se o material for extrudado na forma de gel, ou seja, uma dispersão coloidal no qual o meio disperso apresenta-se no estado líquido e o meio dispersante no estado sólido, ele irá contrair durante a secagem devido à perda de massa, além de poder ocorrer a formação de poros. Caso o material seja extrudado no estado plastificado, haverá a contração térmica do mesmo. Dependendo do material a contração pode ser um fator importante ou não.

Já que o FDM trabalha em camadas, o efeito da contração é aumentado, já que a camada inferior solidifica primeiro, depois a próxima camada é depositada, ocorre a adesão e esta começa a contrair, gerando tensões entre as camadas. Conforme a peça vai sendo construída, esta tensão vai aumentando, se acumulando camada a camada, podendo causar grandes distorções na peça final. A Figura 21 exibe uma fotografia do material base (em branco) descolando do material de suporte (em preto) devido a tensões térmicas acumuladas pelas camadas durante a construção.

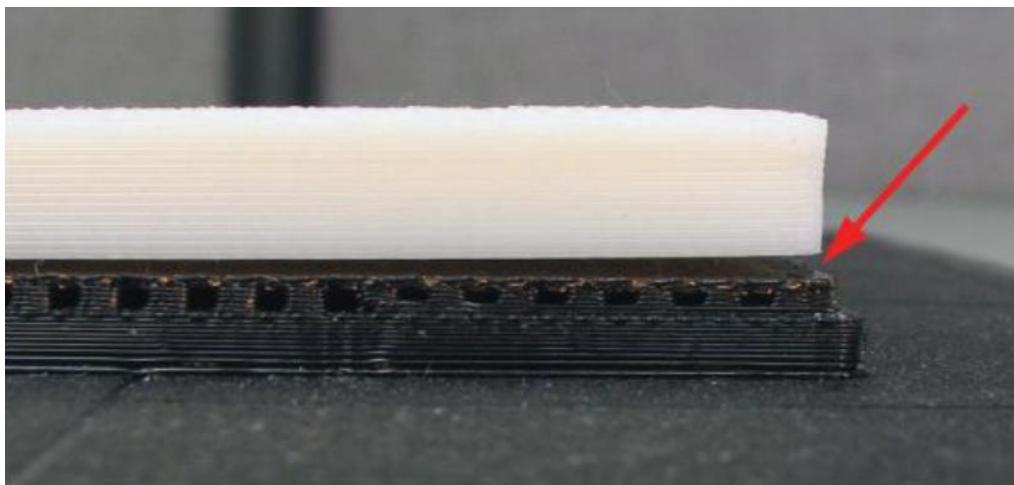


Figura 21: Distorção devido a tensões térmicas [1]

Este efeito pode ser minimizado assegurando que o diferencial de temperatura entre a câmara e o ambiente seja a menor possível, proporcionando um processo de resfriamento lento e gradual.

3.6 Controle de formação da camada

Como a maioria das tecnologias de prototipagem rápida, o FDM utiliza uma plataforma responsável pelo deslocamento vertical, permitindo a criação de camadas individuais. A cabeça de extrusão é montada em uma plataforma XY que permite o

movimento no plano horizontal. Estes movimentos na horizontal devem ser coordenados com a vazão para assegurar uma deposição consistente e regular.

Já que a cabeça de extrusão tem certa massa, qualquer mudança na direção ou na velocidade representa uma desaceleração seguida por uma aceleração. A vazão do material deve ser compatível com a mudança de velocidade, ou então haverá um excesso ou uma falta de material em uma região em particular. Por exemplo, se a cabeça de extrusão estiver se movimentando com uma velocidade v na direção x e devido à geometria ela tiver que fazer uma curva de 90° , resultando em uma velocidade v na direção y , em algum ponto a velocidade instantânea será zero. Se a vazão não for zero neste ponto, então um excesso de material será depositado no canto desta curva.

O método mais usual de se construir a mesa XY envolve usar dois mecanismos lineares de movimento ortogonais, como, por exemplo, correias (*belt drives*) e fusos (*lead-screws*). Estes mecanismos devem ser resistentes o suficiente para prover acelerações da ordem de 3.000 mm/s^2 para o cabeçote [22]. Estes controladores necessitam ser potentes o suficiente para gerar essas acelerações com a massa do cabeçote de extrusão, permitindo mudanças rápidas de direção e sem folgas. O sistema também deve ser confiável o suficiente para permitir movimentação constante durante várias horas sem a necessidade de calibração. Enquanto os sistemas mais baratos usualmente utilizam correias e motores de passo, os sistemas mais caros tipicamente utilizam fusos e servo-motores.

Como pode ser notado, existe um compromisso entre a velocidade máxima de construção, intimamente relacionada com a aceleração máxima, e a resistência do sistema de movimentação. Para garantir uma boa qualidade dimensional nas peças, utilizam-se velocidades diferentes no contorno da peça e no preenchimento da mesma. Esta estratégia permite a construção de um contorno com uma velocidade menor, assegurando que o material tenha que fluir a uma taxa mais constante, e do preenchimento com uma velocidade maior, diminuindo o tempo de construção. As velocidades comumente utilizadas são 40 mm/s no contorno e 60 mm/s no preenchimento [22].

A Figura 22 ilustra como a pressão varia durante a construção de uma linha reta. No início a pressão é nula, e não há extrusão de material, então a pressão no sistema é aumentada, porém devido à inércia e elasticidade do material extrudado, a extrusão é gradativa durante a distância de inicialização, portanto o aumento de velocidade deve ser igualmente gradativo de modo a não mudar a espessura do filamento depositado.

Quando se chega a uma condição permanente, a pressão e a velocidade são constantes, resultando em uma extrusão igualmente permanente. Durante a parada do sistema, a pressão se torna negativa com o intuito de parar a extrusão o mais rápido possível, porém, devido principalmente à elasticidade do polímero, remanesce uma contrapressão que força o material a continuar escoando.

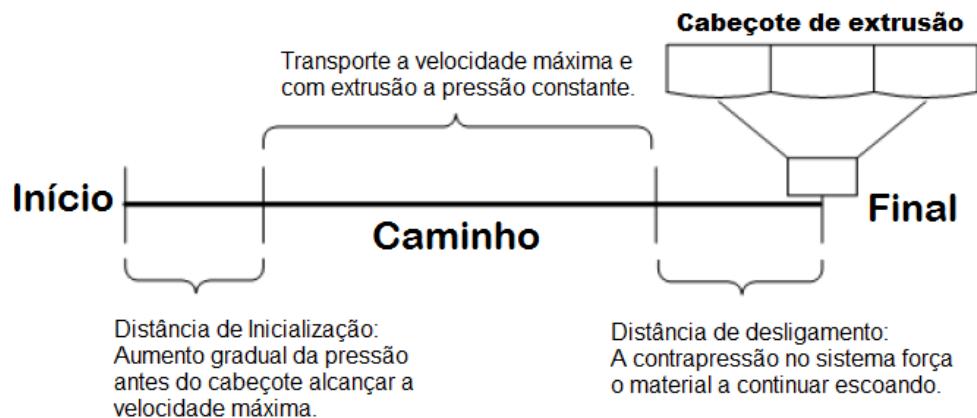


Figura 22: Variação da pressão com a velocidade de extrusão [1]

Além de variar as velocidades no contorno e no preenchimento, pode-se utilizar de padrões de preenchimento, com uma geometria já pré-definida, o que resulta em um caminho de extrusão já conhecido e calibrado, permitindo velocidades mais altas sem a perda de precisão.

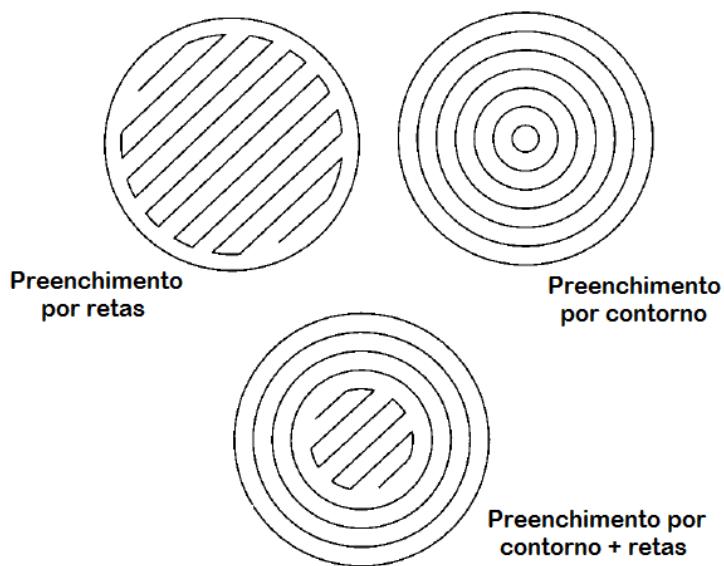


Figura 23: Padrões de preenchimento [6]

Tipicamente se usa o preenchimento por retas (*raster fill*), assim a geometria é composta apenas por linhas retas e curvas de 180°, mas também pode se usar o preenchimento por contorno, que repete o contorno inúmeras vezes. O preenchimento misto também é utilizado, formando algumas camadas por contorno e preenchendo o resto com retas. A Figura 23 ilustra esses preenchimentos para uma geometria circular.

3.7 Ligação entre camadas

É necessário existir uma energia térmica residual suficiente para ativar as superfícies nas regiões adjacentes, causando a ligação. Se não houver energia suficiente, a superfície poderá aderir, porém ainda assim haverá uma linha de solda distinguindo o contorno de cada superfície anterior. Isso pode levar a fratura superficial onde os materiais são facilmente separados.

Por outro lado, muita energia pode causar um fluxo no material depositado, o qual pode resultar em uma peça mal definida. Na Figura 24 estão representados os três casos, o primeiro, (a), no qual a temperatura está muito baixa e há pouca superfície em contato, o segundo, (b), onde a temperatura está adequada e há uma forma bem definida de cada camada e uma grande superfície de contato e o terceiro, (c), no qual a temperatura estava muito elevada o que levou a uma maior deformação das camadas exibindo uma geometria mal definida.

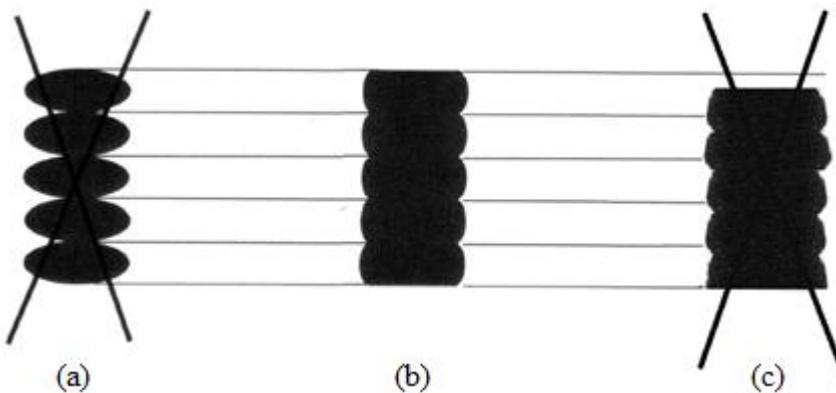


Figura 24: Influência da temperatura na geometria das camadas. Temperatura baixa (a), temperatura ideal (b) e temperatura elevada (c) [1]

Portanto existem duas fronteiras na magnitude da energia térmica, a fronteira superior é devido à alta dependência da viscosidade com a temperatura, causando problemas de instabilidade geométrica caso haja um excesso de absorção de energia e, por outro lado, a fronteira inferior, definida pela mínima quantidade de energia que necessita ser absorvida para garantir ligações adequadas entre camadas.

O nível ótimo de temperatura deve ser composto por um tempo mínimo de residência a altas temperaturas. O resfriamento prematuro irá diminuir a resistência geral da peça, causando a descolamento de camadas [23].

3.8 Inclusão de estruturas de suporte

Todas as tecnologias da Manufatura Aditiva devem ter um procedimento para gerar estruturas que suportem partes da peça construída que estão desconexas e para manter toda a peça fixada durante a fabricação [4].

No FDM existem dois principais sistemas:

- Suportes de material similar
- Suportes de material secundário.

Caso o sistema de extrusão seja o mais simples possível, ele terá apenas uma câmara de extrusão. Assim, necessariamente a estrutura de suporte de ser feita do mesmo material da peça a ser construída. Neste caso os suportes devem ser mais cuidadosamente projetados e posicionados de forma que eles possam ser retirados no final na construção. O ideal é fazer uma variação na temperatura de extrusão, diminuindo a ligação entre a estrutura de suporte e a peça em si, desta forma a fratura superficial irá separá-las, porém a simples variação na altura do bocal irá aumentar o tempo do filamento extrudado com o ar, diminuindo a sua temperatura, o que também irá causar um enfraquecimento das ligações.

Entretanto, o modo mais efetivo de se remover os suportes consiste em fabricá-los com um material diferente. A variação nas propriedades dos materiais irá ajudar na separação, seja visualmente, mecanicamente (e.g., utilizando um material mais frágil no suporte) ou quimicamente (e.g., utilizando um material solúvel como suporte). Para isso deve existir uma câmara de extrusão secundária, projetada para este novo material, que irá funcionar paralelamente com a câmara principal.

A Figura 25 ilustra a utilização de uma câmara secundária para geração da estrutura de suporte, em preto, para conseguir criar uma parte no formato de “S”.

Dependendo do ângulo θ da inclinação da parede do modelo a ser construído poderá existir ou não a necessidade da geração de uma estrutura de suporte. O ângulo máximo no qual a parede se auto-sustenta é θ_{cr} , e é função dos parâmetros de extrusão. A Figura 26 apresenta uma geometria com o ângulo de parede menor que o ângulo crítico, portanto não houve a necessidade da construção de suporte nesta região.

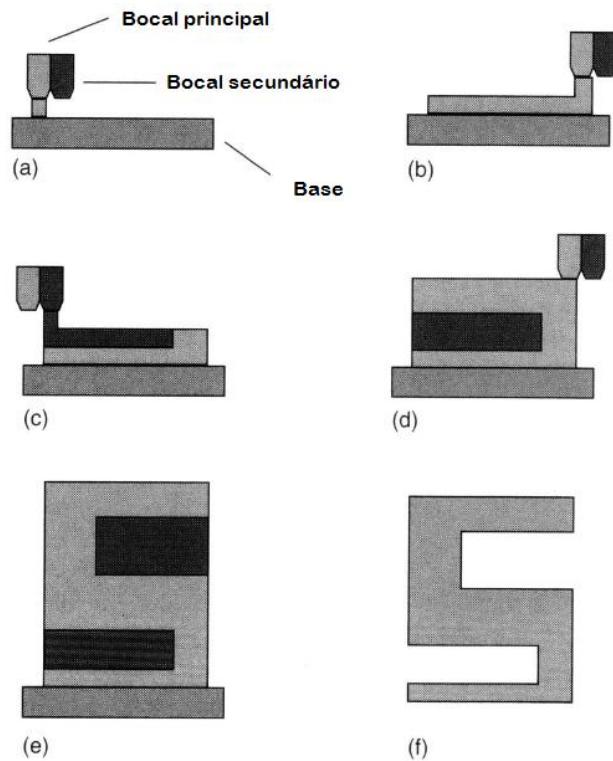


Figura 25: Geração de estrutura de suporte (em preto) com material secundário [4]

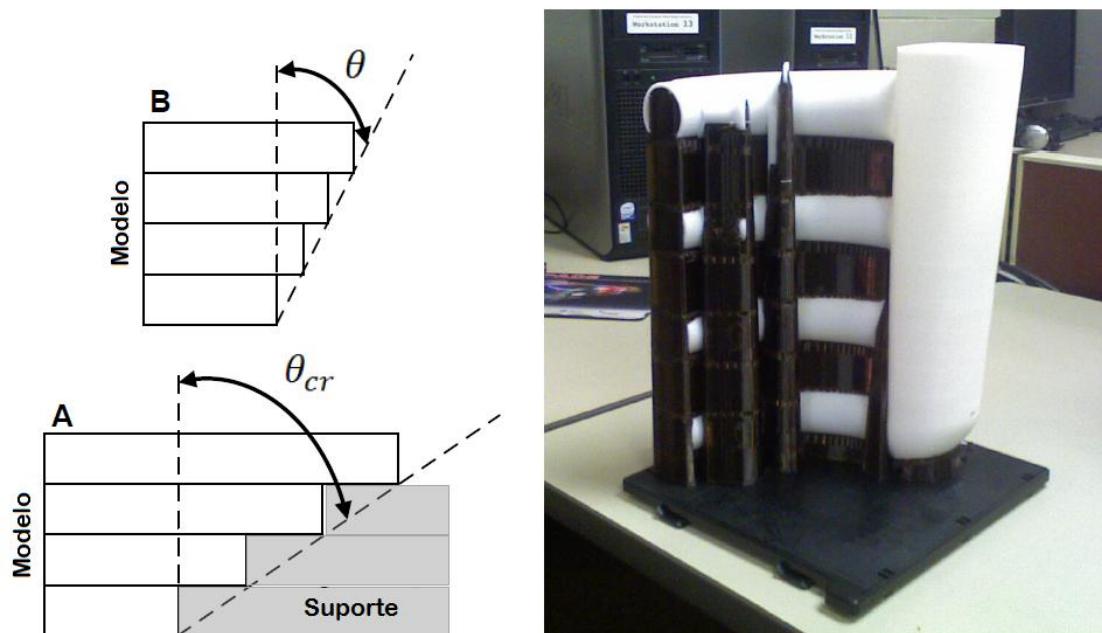


Figura 26: Ângulo crítico de parede para geração de suporte [1]

3.9 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas das peças fabricadas distinguem consideravelmente das propriedades do material base. Os dois principais fatores para estas mudanças são: a existência de vazios (*air gaps*) dentro da peça e as ligações entre filamentos extrudados.

Como consequência da existência de vazios há uma menor quantidade de material na peça e concentradores de tensão, portanto, quanto maior o número de vazios piores serão as propriedades finais. A Figura 27 é uma foto retirada por um microscópio de varredura eletrônica e exibe claramente a existência destes buracos entre os filamentos [24].

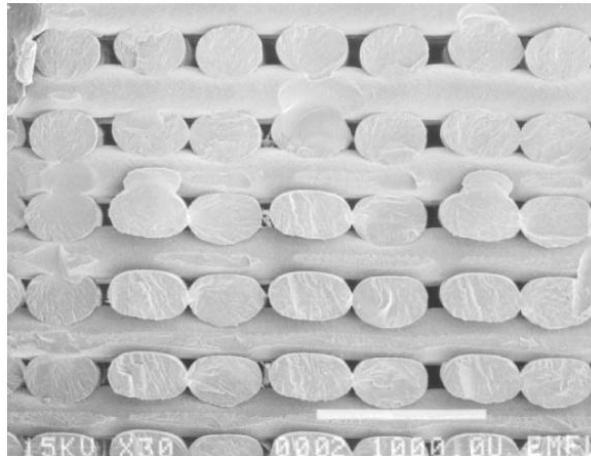


Figura 27: Vista de uma seção transversal de uma peça feita em ABS mostrando a existência de vazios [24]

Dependendo da aplicação a existência de uma separação entre os filamentos pode ser desejada ou não. Para protótipos sem uma funcionalidade mecânica, como, por exemplo, para ilustração de um produto, é desejável uma grande densidade de vazios no interior da peça, assim o tempo de construção cai consideravelmente e a custo de material também.

Porém, caso haja uma aplicação cuja resistência mecânica seja um fator crítico, deve-se ao máximo tentar minimizar o número de vazios. Para isto se aumenta a temperatura de extrusão, fazendo o material escoar mais e preencher os vazios, e deposita-se um filamento sobre o outro (Figura 28). Estas soluções aumentam a resistência mecânica, entretanto diminuem a precisão da peça final devido às distorções geradas.

Usualmente, o contorno de uma camada é extrudado e então o seu interior é preenchido com um padrão de varredura por linhas. A orientação destas linhas pode ser determinada e tem grande influência sobre as propriedades da peça. Na direção axial dos filamentos espera-se que a resistência a tração seja a mesma que a do material base, já que os filamentos estão sendo tracionados. Na direção transversal a resistência a tração será muito menor, pois o fator limitante para o rompimento é a ligação entre os filamentos.

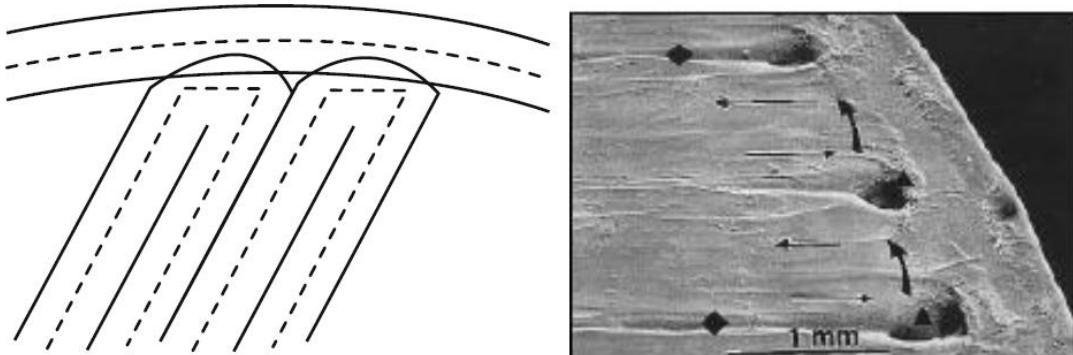


Figura 28: Sobreposição de filamentos para aumento da resistência mecânica [24]

Portanto, sempre haverá uma anisotropia nas peças fabricadas por FDM, sendo a direção Z a menos resistente a tração, já que a resistência dela é determinada pelas ligações entre as camadas adjacentes. Já nas direções X e Y pode-se ter certo controle sobre a anisotropia da peça.

Caso o produto final sofra apenas tração em X, é possível construir todas as camadas com os filamentos alinhados com o eixo X (0°), assim haverá maior resistência a tração nesta direção, porém haverá uma resistência menor na direção transversal Y (90°).

Comumente se utiliza como padrão o preenchimento com camadas ($45^\circ/-45^\circ$), assim cada camada está alinhada perpendicularmente à camada anterior, diminuindo a anisotropia da peça nas direções X e Y.

Ahn *et al.* [25] fez vários experimentos com o material ABS P400. Fazendo o ensaio de tração com o corpo de prova injetado, a sua resistência à tração foi de 26 MPa, enquanto que com o corpo de prova feito por FDM com todos os filamentos alinhados axialmente a resistência à tração foi reduzida a 22 MPa devido aos vazios. Com os filamentos alinhados transversalmente a resistência à tração diminuiu mais ainda, alcançando apenas 13 MPa. A Figura 29 exibe o resumo dos resultados obtidos com o preenchimento das camadas feitos em diversas direções. A Figura 30 ilustra as superfícies de fratura de alguns dos corpos de provas utilizados no trabalho.

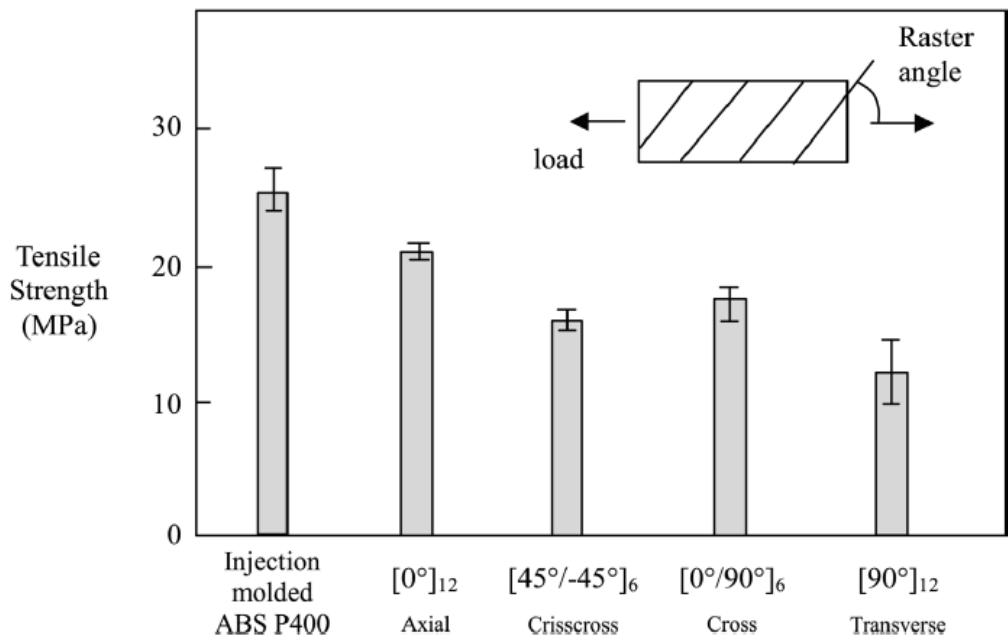


Figura 29: Resistência à tração do ABS P400 com diferentes padrões de preenchimento [25]

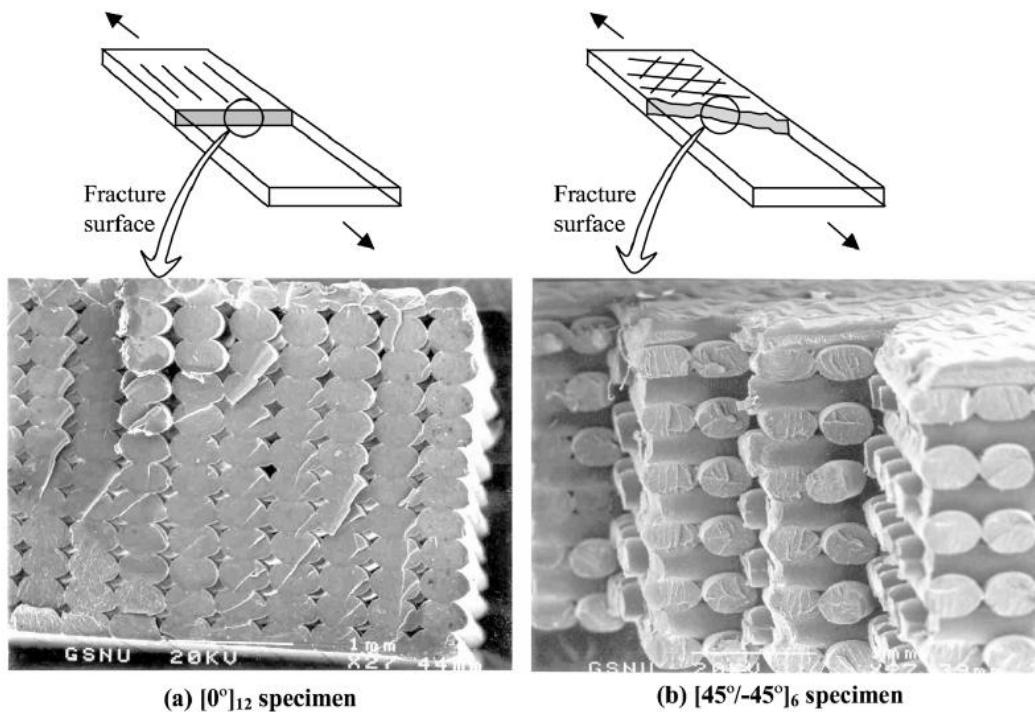


Figura 30: Fotografias das superfícies de fratura de (a) um corpo de prova orientado [0°] e (b) [45°/-45°] [25]

Através destes dados fica clara a importância da escolha adequada da orientação dos filamentos para um aproveitamento adequado da peça produzida por FDM. Para ajudar nesta escolha, Ahn *et al.* [25] construiu algumas regras básicas:

1. Construa as partes de modo que as cargas de tração estejam alinhadas com as fibras (filamentos).
2. Tenha um maior cuidado na concentração de tensões nos cantos arredondados. O FDM pode criar descontinuidades nestas regiões.
3. Use sobreposição de filamentos (*negative air gaps*) para aumentar a resistência e a rigidez.
4. Considere a variação na acuracidade da peça com a sua orientação de construção.
5. Áreas com tensões de tração geralmente falham antes do que áreas com tensões de compressão.

4 Revisão Bibliográfica de Polímeros

A reologia é a ciência que estuda o modo que os materiais deformam quando uma força é aplicada sobre eles. Este termo é mais usado para materiais que escoam, entretanto a reologia também estuda a deformação de sólidos como na conformação de metais e no estiramento de borrachas [26].

Determinar a correta relação entre força e deformação é de extrema importância para o processo de extrusão. As propriedades viscoelásticas dos polímeros fundidos dominam o comportamento do escoamento.

4.1 Introdução a Polímeros

De acordo com Manrich [21], “*Polímero é qualquer material orgânico ou inorgânico, sintético ou natural, que tenha um alto peso molecular e com variedades estruturais repetitivas, sendo que normalmente esta unidade que se repete é de baixo peso molecular.*”

A palavra polímero vem do grego *poli* + *mero*, que significam “muitos” e “unidade”, portanto são unidades que se repetem por muitas vezes. Cada unidade é nomeada mero, e para formar um polímero são necessárias diversas ligações primárias entre eles.

Caso o polímero tenha apenas um tipo de mero que se repete, este é chamado homopolímero; se dois meros diferentes aparecem na cadeia, é dada a classificação de copolímero; e se aparecerem três meros diferentes na mesma cadeia o polímero é chamado terpolímero. Existem ainda polímeros que são formados por uma mistura

física de materiais com características diferentes e meros distintos, estes são chamados de blandas, pois a mistura é física, entre as cadeias, e não químicas, nas cadeias.

4.1.1 Polímeros termoplásticos e termorrígidos

Existem diversas classificações de polímeros, sendo que cada classificação tem certo foco na área de aplicação. Em processamento de plásticos, do ponto de vista tecnológico, a principal divisão de polímeros é: termoplásticos e termorrígidos.

Os polímeros termoplásticos podem ser submetidos a ciclos de fundição e solidificação diversas vezes, com pouca ou nenhuma variação em suas propriedades básicas.

Os termorrígidos, ou termofixos, são polímeros que não podem ser mais fundidos ou dissolvidos sem que haja uma degradação em sua estrutura química após sofrerem o processo de cura (formação de ligações cruzadas).

4.1.2 Cristalinidade dos polímeros

Os polímeros podem ser amorfos, cristalinos ou apresentar uma porcentagem dos dois em sua composição (semicristalinos). Esta porcentagem depende de diversos fatores, como estrutura molecular, peso molecular, processamento mecânico, dentre outros.

Polímeros amorfos (do grego, *a*, sem, *morphous*, forma) não apresentam forma definida. Podem ser representados como longas cadeias flexíveis entrelaçadas, sem uma orientação específica.

Polímeros cristalinos são compostos por estruturas altamente organizadas e compactas, chamadas cristais. Um cristal pode ser formado por moléculas que se dobraram sobre si mesmas e se empilham sobre outras moléculas igualmente dobradas.

Dentre as principais propriedades que a cristalinidade influencia, pode-se citar: o módulo elástico, onde os cristais resistem à deformação gerando altos módulos, e o tempo de relaxação, que determina o tempo para as moléculas relaxarem e voltarem ao seu estado estável após uma solicitação.

4.1.3 Temperaturas de transição

Existem duas grandezas de vital importância para a caracterização dos polímeros: a temperatura de transição vítreia, T_g , e a temperatura de fusão cristalina, T_m .

A temperatura de transição vítreia (do inglês, *Glass Transition Temperature*) está associada à natureza amorfa dos polímeros. Nesta temperatura ocorre gradualmente uma

migração de um estado vítreo (sólido) para o estado fluido (plastificado), gradualmente. Portanto, abaixo de T_g , as moléculas apresentam-se quase que totalmente imóveis, sem movimentação, apenas vibração parcial; acima de T_g as moléculas apresentam um aumento expressivo na movimentação browniana, sendo mais facilmente deformáveis por cisalhamento.

A temperatura de fusão cristalina (do inglês, *Melting Temperature*) é a temperatura onde ocorre a mudança de estado, ou mudança de fase (cristalina para amorfa) do polímero. Nesta temperatura ocorre uma alta absorção de energia para a dissolução dos cristais. Depois de T_m todo o material se encontra em um estado amorfo, e caso o material seja totalmente amorfo ele não possui T_m , pois não existe fase cristalina para ser transformada.

4.1.4 Composição dos polímeros

Os polímeros são compostos basicamente por resinas e aditivos, sendo a resina o composto principal, que nomeia o polímero, e os aditivos são compostos adicionados para mudar certas propriedades do polímero, adequando-o a um uso específico. Segue abaixo as principais definições de aditivos e resinas [27].

- 1) **Nafta:** É um derivado do petróleo e é matéria prima dos monômeros mais importantes.
- 2) **Resina:** é o componente básico em forma granulada e que determina a classificação do plástico. As resinas que mais se destacam pela facilidade de processamento e preço baixo são o Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliestireno (OS) e Policloreto de Vinila (PVC). Já as principais resinas de alto desempenho são o Policarbonato (PC), Poliacetal (POM), Poliamida (PA) e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS).
- 3) **Plastificante:** São líquidos que entram em ebulição à temperaturas de 96°C a 202°C e tem a finalidade de melhorar a fluidez do material.
- 4) **Lubrificante:** tem a finalidade de impedir a adesão do plástico. Os mais usados são: óleo de rícino, óleo de linhaça, lanolina e parafina.
- 5) **Corante:** responsável pela coloração do material plástico.
- 6) **Catalisador:** controla o grau de polimerização da resina.
- 7) **Estabilizante ou Antioxidante:** é um aditivo que tem por objetivo evitar o ataque do plástico pelo oxigênio ou ozônio presentes no ar, impedindo também

- a deteriorização devido à ação da radiação ultravioleta, radioatividade, calor e intempéries.
- 8) **Termoestabilizante:** minimiza o efeito danoso de altas temperaturas sobre o plástico.
 - 9) **Massa ou carga inerte:** é um material inerte, fibroso e que além de dar maior resistência ao plástico, reduz o custo de fabricação. São utilizados como carga inerte o pó de madeira, papel, algodão, grafite, talco, pó de mica e pó de pedra.
 - 10) **Carga de reforço:** é um material que tem como objetivo aumentar a resistência mecânica do plástico. A mais utilizada é a fibra de vidro.
 - 11) **Retardadores de chama:** aditivo anti chama que torna o polímero auto extingüível.

4.2 Viscoelasticidade

De acordo com Manrich [21], “*Viscoelasticidade é um comportamento ou resposta à deformação, onde, ao mesmo tempo, observa-se comportamento viscoso (o corpo se deforma e não recupera nada da deformação depois de retirada a tensão de deformação) e comportamento elástico (ocorre total recuperação da deformação depois de retirada a tensão).*”.

Desta forma, quando aplicada uma tensão sobre o material viscoelástico, ele se deforma e se recupera a certa taxa. Ao contrário dos materiais elásticos, onde a deformação é quase instantânea com o carregamento, os viscoelásticos exibem um comportamento dependente do tempo. Enquanto a elasticidade está relacionada com as ligações covalentes nas cadeias, a viscosidade é o resultado da difusão dos átomos e moléculas no interior de um material amorfó.

As principais propriedades de um material viscoelástico são: Histerese, causada pela dependência do histórico de carregamento; Relaxação de Tensão, para uma dada deformação a tensão diminui com o passar do tempo; e Fluênciia, para uma dada tensão aplicada a deformação aumenta ao longo do tempo.

Existem alguns modelos lineares para a modelagem de materiais viscoelásticos que consideram a dependência temporal da tensão e deformação e sua interdependência. Os principais modelos constitutivos são o Modelo de Maxwell, o Modelo de Kelvin-Voigt e o Modelo Generalizado de Maxwell. Todos estes modelos utilizam apenas elementos lineares viscosos e elásticos, mudando apenas a sua organização [26].

O Modelo de Maxwell consiste no arranjo de um elemento elástico e um viscoso em série. Este modelo, quando submetido a uma deformação constante, apresenta um decréscimo da tensão com o tempo, ou seja, ele simula a física da relaxação de tensões, porém ele não consegue simular adequadamente a fluênciia. As principais aplicações deste modelo são para plásticos macios, principalmente termoplásticos na proximidade da temperatura de fusão.

O Modelo de Kelvin-Voigt arranja os mesmos elementos citados anteriormente, um elástico e um viscoso, em paralelo. Este modelo recupera sempre a posição inicial quando retirada a tensão e quando aplicada uma tensão a deformação aumenta com o tempo. Este modelo simula adequadamente o comportamento de fluênciia, porém não consegue simular a física da relaxação de tensões. Polímeros orgânicos, borracha e madeira são alguns exemplos de aplicabilidade deste modelo.

O Modelo Generalizado de Maxwell consiste da combinação de diversos Modelos de Maxwell e Modelos de Kelvin-Voigt. Este é o modelo mais geral da viscoelasticidade linear, pois consegue representar a fluênciia, a relaxação de tensões e a histerese, além de considerar que a relação não acontece de uma vez, mas sim através de uma distribuição de constantes de tempo. A Figura 31 ilustra os arranjos destes três modelos.

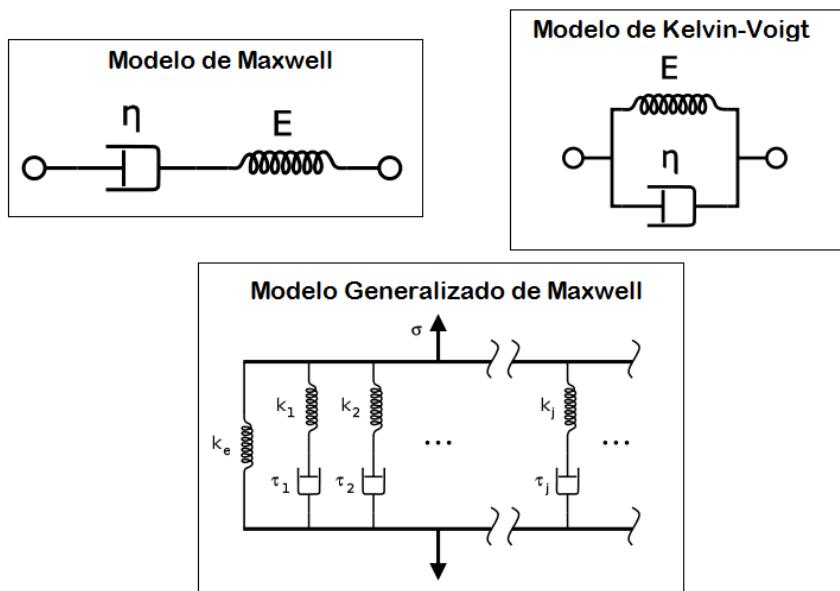


Figura 31: Modelos da viscoelasticidade linear [26]

4.3 Taxa de cisalhamento

É a “variação da velocidade das camadas em relação à distância entre essas camadas, (...) ou o quanto o fluido se deforma durante um tempo fixo” [21]. Esta medida é de extrema importância para o estudo do fluxo polimérico, já que esta está diretamente relacionada com a tensão de cisalhamento, como mostrado na equação 1, onde τ é a tensão de cisalhamento, η é a viscosidade e $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Como resposta às tensões aplicadas sobre os materiais os materiais respondem deformando-se. Estas deformações podem ser elongacionais (ε), geradas a partir de tensões normais (σ), cisalhantes (γ), geradas a partir de tensões de cisalhamento (τ), ou uma combinação qualquer das duas.

Para fluidos incompressíveis a principal tensão de interesse é a de cisalhamento, já que esta que causam a deformação do mesmo, por isto a maior importância dada a esta neste trabalho. Entretanto, na viscoelasticidade as tensões normais também são importantes para alguns fenômenos, porém estas apresentam um efeito secundário.

4.4 Viscosidade

A viscosidade é a propriedade do material que mensura a resistência a uma deformação contínua, e, ao contrário da elasticidade, a tensão não está relacionada com a quantidade de deformação, mas sim com a taxa de deformação, portanto esta é uma propriedade relacionada a materiais que fluem [26].

Se aplicada uma tensão de cisalhamento sobre o material e esta for linearmente proporcional a taxa de cisalhamento, então este material apresenta um comportamento Newtoniano, e a constante de proporcionalidade é chamada de viscosidade, sendo uma propriedade do material. Porém, usualmente os polímeros exibem uma relação não linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento, mais especificamente a viscosidade decresce monotonicamente com o aumento da taxa de cisalhamento. Este comportamento é chamado de pseudoplástico. A Figura 32 ilustra o comportamento linear (Newtoniano) e não linear (Pseudoplástico).

No caso dos polímeros, este comportamento pseudoplástico é oriundo da reorganização das longas cadeias moleculares, com a orientação das macromoléculas no sentido do fluxo existem menos barreiras ao movimento, portanto facilitando o fluxo.

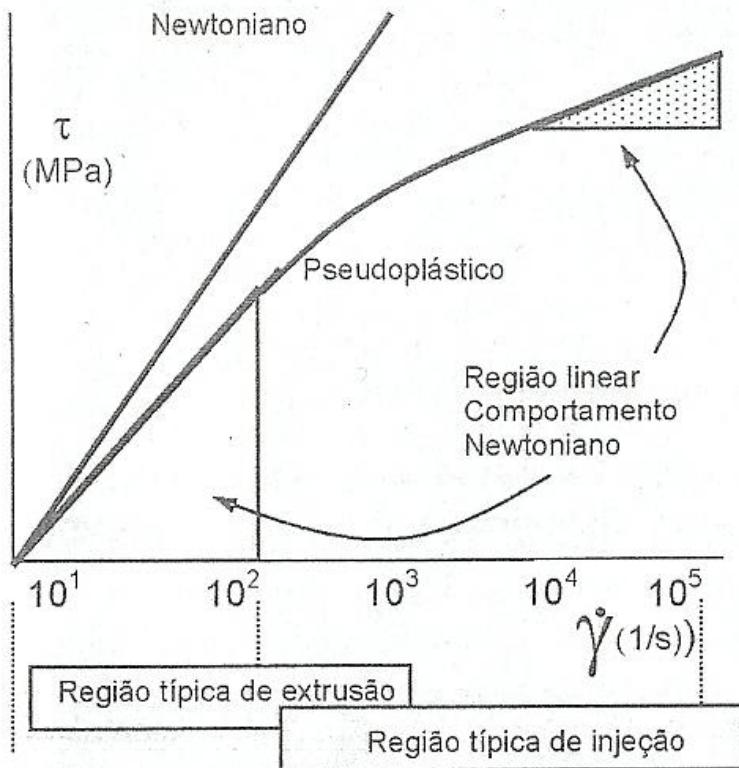


Figura 32: Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento [21]

Dependendo da estrutura física e química das moléculas, como as ramificações, grupos laterais, peso molecular, distribuição do peso molecular e dos aditivos, a viscosidade varia diferentemente. Em taxas de cisalhamento suficientemente baixas a viscosidade tende a um valor constante η_0 chamado de viscosidade de zero cisalhamento (*zero shear viscosity*). De acordo com Manrich [21], para um polímero fundido típico $\eta_0 \sim 10.000 \text{ Pa.s}$ e para $\dot{\gamma} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$, tem-se $\eta \sim 100 \text{ Pa.s}$.

Em processos no qual o polímero flui um canal ocorre variação da viscosidade de uma região para outra, devido principalmente à dependência entre a viscosidade e a taxa de cisalhamento, mas também devido às variações de temperatura. Para um dado polímero a sua viscosidade varia exponencialmente com a temperatura, de acordo com a equação 2, onde T é temperatura, η_{ref} é a viscosidade em uma determinada temperatura de referência e b é uma constante do polímero.

$$\eta_0 \propto \eta_{ref} \cdot e^{b \cdot \Delta T} \quad (2)$$

Portanto, para representar adequadamente o fluxo em um duto é necessário conhecer como a viscosidade varia com a taxa de cisalhamento e com temperatura. A Figura 33 ilustra curvas típicas de viscosidade versus taxa de cisalhamento, ela ainda ressalta a faixa mais comum de processamento da injeção, que varia de 10^2 a 10^5 s^{-1} , abaixo desse valor é a faixa de processamento da extrusão. Também são ressaltadas as

faixas dos reômetros, que determinam a viscosidade, de cone e placa, capilar e o teste de índice de fluidez (IF).

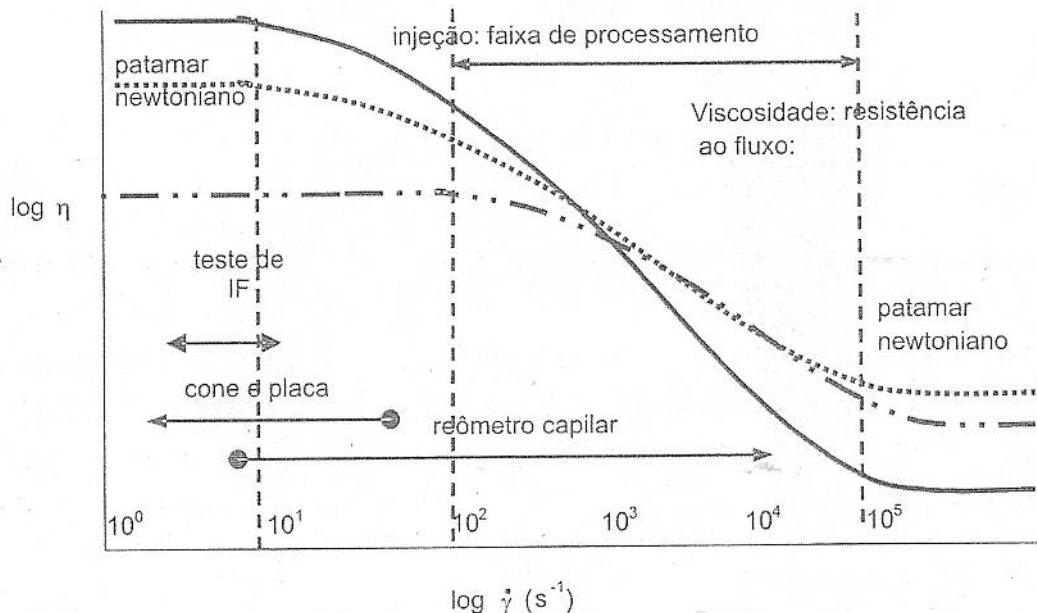


Figura 33: Variação da viscosidade para diferentes taxas de cisalhamento obtidas em reômetros e processos [21]

Geralmente, quando construído o gráfico da viscosidade versus taxa de cisalhamento dos polímeros, usa-se a escala logarítmica nos dois eixos, e o resultado é aproximadamente uma reta. Naturalmente a primeira aproximação é a mais comumente utilizada é a empírica “lei das potências” (*Power Law*), apresentada na equação 3.

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

Onde K é uma constante de proporcionalidade e n é o expoente que cria o comportamento exponencial. Pode-se observar que caso n seja igual a 1 o termo dependente da taxa de cisalhamento se torna unitário, sendo assim uma constante, o que representa o caso de um fluido Newtoniano. A equação 4 apresenta a tensão de cisalhamento para a lei das potências.

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (4)$$

Algumas observações são pertinentes a este modelo, tais como: a unidade de K depende diretamente do valor de n , a viscosidade de zero cisalhamento não aparece como parâmetro e esta equação só é válida para altas taxas de cisalhamento. Os dois primeiros problemas podem ser resolvidos utilizando outra forma da lei das potências apresentada na equação 5. Nesta nova forma a viscosidade tende a viscosidade de zero cisalhamento para baixas taxas de cisalhamento e a constante do material λ tem unidade de tempo.

$$\eta = \eta_0 \cdot |\lambda \cdot \dot{\gamma}|^{n-1} \quad (5)$$

Para a maioria dos polímeros, a lei das potências é suficientemente precisa para as faixas de processamento mais comuns e pode ser utilizada em análises do fluxo polimérico devido a sua simplicidade. Porém, existem outros modelos mais precisos que se tornam viáveis ao se utilizar a computação. Destes o modelo mais simples é o de Cross (*Cross Model*), apresentado nas equações 6 e 7, que consegue representar melhor a viscosidade tanto em baixas quanto em altas taxas de cisalhamento.

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + |\lambda \cdot \dot{\gamma}|^m)^{-1} \quad (6)$$

Onde:

$$m = 1 - n \quad (7)$$

Outros dois modelos generalizados de grande uso são o de Carreau, apresentado na equação 8, e o de Yasuda, apresentado na equação 9.

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + |\lambda \cdot \dot{\gamma}|^2)^{-p} \quad (8)$$

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + |\lambda \cdot \dot{\gamma}|^a)^{(n-1)/a} \quad (9)$$

5 Análise experimental de uma Máquina FDM

Uma das maiores e a primeira fabricante comercial de uma máquina FDM é a empresa Stratasys [17], portanto foi escolhido um modelo deste fabricante para determinar as principais características do cabeçote extrusor de modo que este esteja com condições de concorrer no mercado atual.

O modelo escolhido foi o Dimension Elite [28]. A escolha deste modelo foi principalmente ao fato do laboratório da UFRJ PROPME [29] possuir uma impressora deste modelo, o que possibilita experimentos com a mesma para uma futura comparação de desempenho. O Anexo I apresenta as especificações deste modelo.

Conforme pode ser visto nas especificações deste modelo a espessura da camada é variável, e pode ter o valor de 0,178 mm (0,007 in) ou 0,254 mm (0,010 in). Pode-se pensar inicialmente que o bocal tem 0,178 mm de diâmetro para formar esta camada, porém o diâmetro do bocal informado pelo fabricante é de 0,254 mm. Esta diferença de valores se deve ao fato de que cada filamento extrudado não tem um perfil circular, mas sim aproximadamente elíptico. Portanto o diâmetro do bocal deste projeto será de 0,254 mm, conforme a Dimension Elite.

Para saber qual a velocidade de impressão do polímero foi elaborado um experimento no PROPME. Este experimento consiste na impressão de uma placa de 150 mm de comprimento, 5 mm de largura e 0,356 mm de altura (Figura 34 (a)) utilizando o

material disponível, o ABS P430, e com a altura da camada configurada para 0,178 mm. A impressão foi alinhada de modo que as linhas de preenchimento interno sejam paralelas às laterais da placa (Figura 34 (b)), e desta forma foi feita uma filmagem de impressão para determinar o tempo para formação de uma linha, cujo comprimento é de aproximadamente 150 mm. A imagem da peça impressa esta apresentada na Figura 34 (c).

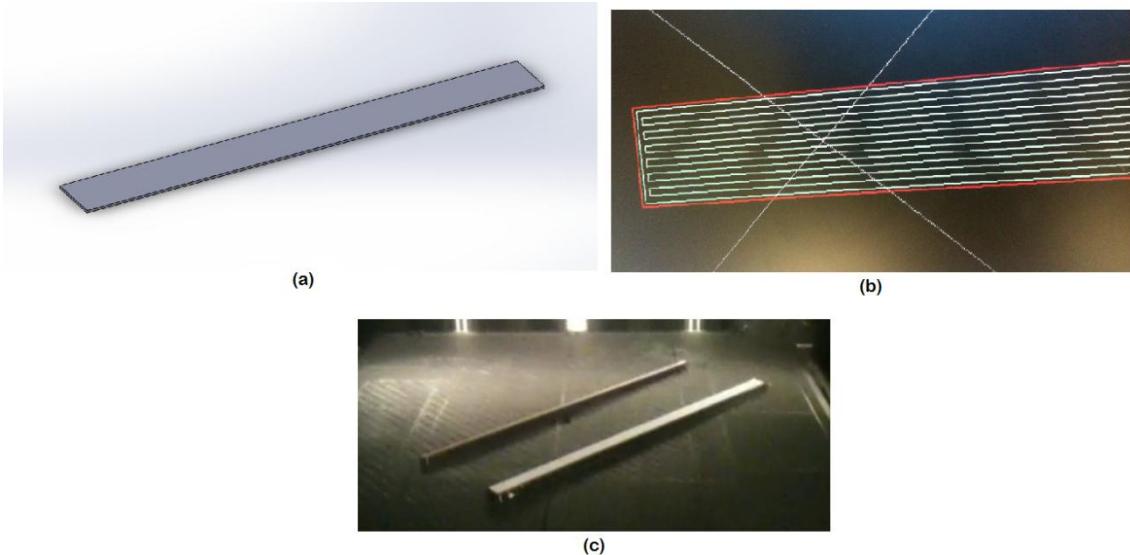


Figura 34: Experimento para determinação da velocidade de impressão. (a) modelo em CAD, (b) linhas de preenchimento e (c) modelo impresso.

Para a filmagem foi utilizada a câmera fotográfica Canon EOS Rebel T3 18-55mm [30], cujos vídeos são produzidos a uma taxa de 30 quadros por segundo. Após analisada a filmagem, foi estimado pela contagem manual de dez linhas de preenchimento extrudadas que o número de quadros médio para completar o trajeto reto de 150 mm foi de 120 quadros, portanto o tempo médio é obtido dividindo-o pela taxa de 30 quadros por segundo, resultando em um tempo de 4 segundos. Dividindo-se o comprimento pelo tempo se obtém a velocidade média de impressão de 37,5 mm/s.

Nesta estimativa, a velocidade foi considerada como constante, porém o cabeçote tem um tempo de aceleração até atingir a velocidade máxima de impressão, portanto esta velocidade calculada subestima a velocidade real. Como parâmetro deste projeto será determinado que a velocidade de impressão seja de 40 mm/s.

Para determinar a vazão volumétrica do ABS, foi realizado outro experimento no laboratório da UFRJ TERMIC [31]. Para este experimento a geometria impressa consistia de uma peça medindo 100 mm de comprimento, 10 mm de largura e 10 mm de altura. Também foi utilizado o material ABS P430, uma altura de camada de

0,178 mm e as linhas de preenchimento paralelas às arestas, porém a peça não foi totalmente preenchida, sendo o seu interior mais esparso, contendo filamentos que não entram em contato com outros ao longo do seu comprimento. Este tipo de preenchimento esparso é utilizado para criar um material oco, economizando, portanto, material e tornando a peça mais leve, além disto, esta impressão irá criar uma seção do filamento extrudado que não se deformou devido ao contato com outros filamentos.

Após a impressão deste corpo de prova no PROPME, o mesmo foi levado ao TERMIC 1, aonde foi cuidadosamente serrado com uma serra de fita manual e depois mergulhado na resina (especificação 8003 e endurecedor 24) para a posterior observação no microscópio Olympus BX60M utilizando lentes UMPlanFI 5x/0.15 BD. Após a cura da resina a superfície recebeu um polimento manual e foi observado no microscópio óptico. A Figura 35 ilustra o modelo impresso e o seu pedaço resinado no formato de um disco. Foram gravadas diversas fotografias da seção transversal da peça fotografias com a câmera Nikon Coolpix 4500 acoplada ao microscópio, e ao final foi gravada uma fotografia de uma escala com a mesma configuração óptica.

Estas imagens foram então tratadas pelo software Image-Pro Plus 6.0 [32] e então foram feitas medidas da área da seção transversal de cada filamento.

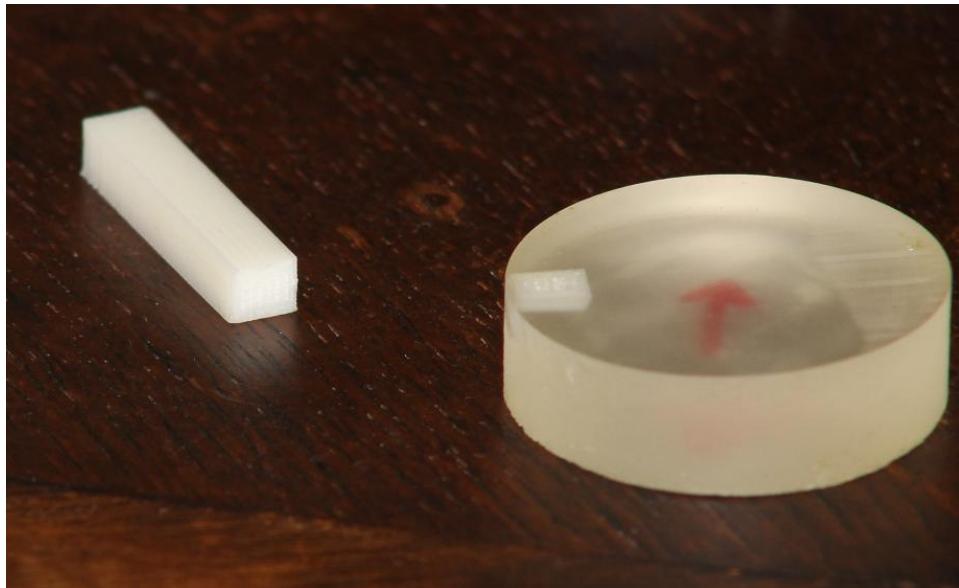


Figura 35: Modelo para o segundo experimento

A Figura 36 apresentada abaixo ilustra a mesma seção transversal, porém a primeira fotografia (ao lado esquerdo) está centralizada na peça, ressaltando assim o formato circular do filamento extrudado, já que ele não entrou em contato com nenhum outro filamento devido à impressão esparsa. A segunda fotografia (ao lado direito) está

centralizada com o canto inferior direito da peça, ressaltando o formato aproximadamente elíptico dos filamentos que foram deformados ao entrar em contato com outros corpos devido à força da gravidade. A Figura 37 caracteriza ainda melhor o formato elíptico e demonstra certa não uniformidade no formato do filamento. As medidas ainda indicam uma razão de aspecto de aproximadamente 1,6, ou seja, a largura é 60% maior que a altura.

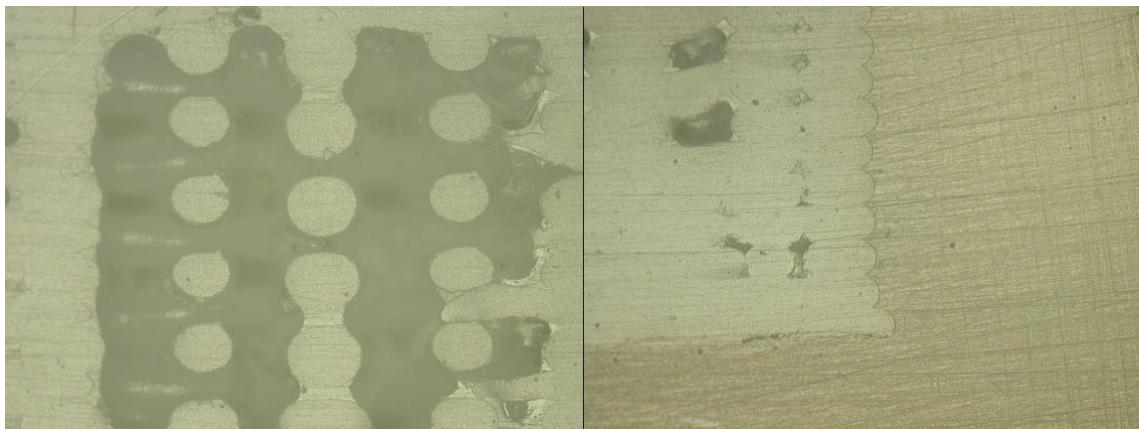


Figura 36: Fotografias da seção transversal ressaltando o formato circular do filamento (à esquerda) e o formato elíptico (à direita)

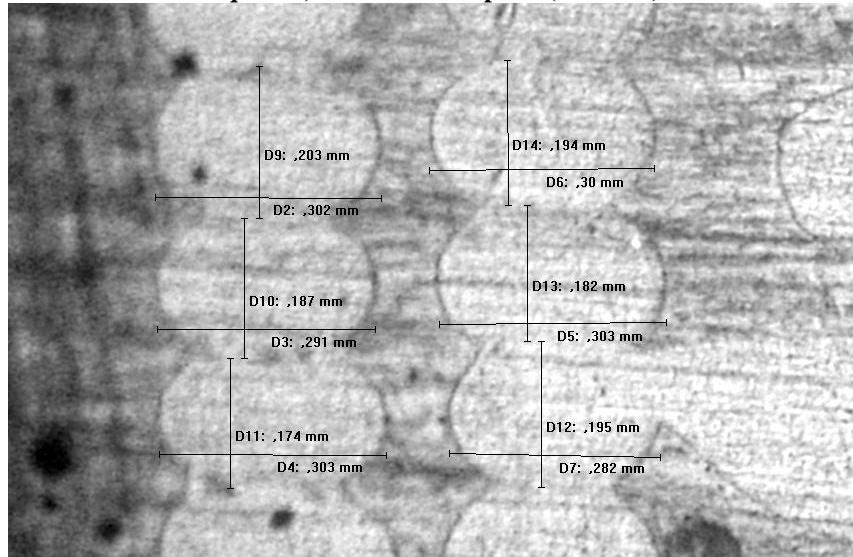


Figura 37: Medidas da altura e da largura do filete extrudado

O software Image Pro Plus foi utilizado para calcular as áreas da seção transversal de cada filamento. A imagem foi tratada pelo próprio software, inicialmente a imagem foi convertida para escala de cinza 8, então foi utilizado um filtro “Gauss” para suavizar os tons de cinza dentro da seção circular tornando-a mais homogênea, e depois um filtro “Sharpen” para diferenciar melhor o fundo mais escuro das seções transversais. O software reconhece então, automaticamente, a diferenciação de tonalidades e ressalta as áreas como mostra a Figura 38.

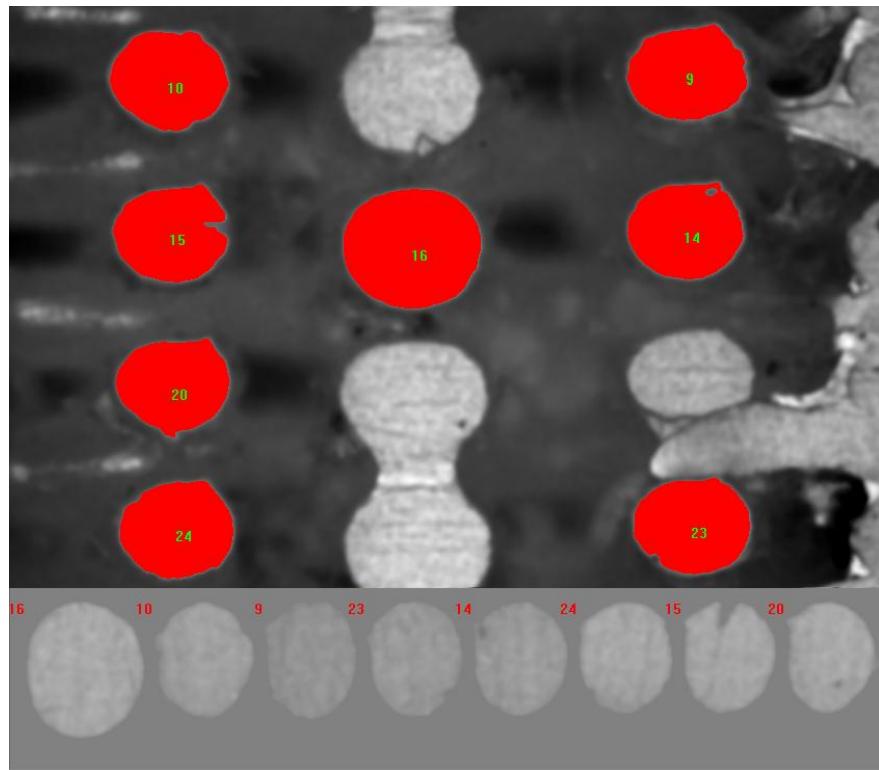


Figura 38: Seleção das áreas de cada filamento da seção transversal (acima) e organização por tamanho dos mesmos (abaixo)

Pode-se ver claramente pela parte inferior da Figura 38 que todas as seções têm aproximadamente o mesmo tamanho, excluindo a primeira (numeração 16). Já que esta diferença de tamanho pode ser devido a uma distorção durante o corte ou durante a fixação na resina, este objeto foi eliminado dos cálculos seguintes. A Tabela 2 resume os dados obtidos através da análise da Figura 38. A partir da fotografia da escala o software converteu os dados da imagem de pixels para milímetros, resultando nos valores apresentados.

Tabela 2: Área da seção transversal de cada filete

Objeto	Área (mm ²)	Diâmetro médio (mm)
9	0,0569	0,2692
10	0,0583	0,2724
14	0,0564	0,2679
15	0,0550	0,2645
20	0,0531	0,2601
23	0,0568	0,2689
24	0,0562	0,2676
Média	0,0561	0,2672

Inicialmente, é interessante notar que o diâmetro médio é de 0,2672 mm, o que condiz com um bocal de 0,254 mm citado anteriormente. Quanto à área média, o valor obtido foi de $0,0561 \text{ mm}^2$, e multiplicando-a pela velocidade de impressão determinada anteriormente como sendo 40 mm/s, é obtida a vazão volumétrica do material de $2,24 \text{ mm}^3/\text{s}$.

O material padrão da Dimension Elite é o termoplástico ABS P430. O copolímero Acrilonitrila Butadieno Estireno (do inglês, *Acrylonitrile Butadiene Styrene*, com a sigla ABS) é geralmente composto por uma composição que pode variar de 15% a 35% de acrilonitrila, 40% a 60% de estireno e 5% a 30% de butadieno. Juntamente com essa grande variação de composição, as propriedades do ABS podem variar enormemente dependendo de sua aplicação, que pode ser injeção, extrusão, sopro ou conformação a quente, ou até mesmo do seu fabricante.

De acordo com o projeto RepRap [22], que é um projeto comunitário de máquinas que se auto-replicam utilizando a tecnologia FDM, o ABS é o material mais utilizado no FDM por ter melhores propriedade mecânica que o HDPE, ser menos frágil que o PLA e ter o custo muito inferior ao PC, além da alta disponibilidade do produto no mercado na forma de filamento e de seu baixo coeficiente de fricção, necessitando de menos força para a extrusão e sendo mais adequado para peças pequenas. Portanto o ABS será o material base deste projeto.

O filamento de ABS comercializado pela empresa Stratasys possui o diâmetro de 3 mm e este mesmo diâmetro de filamento também é facilmente encontrado para venda. Na referência [33] está especificado o endereço eletrônico da RepRap que contém mais de cem fornecedores internacionais.

Escolhido o filamento de 3 mm, com área transversal de $28,27 \text{ mm}^2$, para gerar uma vazão volumétrica de $2,24 \text{ mm}^3/\text{s}$ a velocidade de alimentação deverá ser de aproximadamente 0,08 mm/s.

A temperatura de processamento também é muito dependente da exata composição do ABS, e de acordo com o livro Handbook of Thermoplastics [34] a faixa de processamento do ABS é de 220°C a 260°C na câmara de fusão. A comunidade RepRap restringe ainda mais esta faixa para o processamento entre 220°C e 250°C .

Como resultado dos experimentos realizados com a Dimension Elite, os principais parâmetros globais do cabeçote foram determinados e estão apresentados resumidamente na Tabela 3.

Tabela 3: Principais parâmetros globais

Parâmetro	Valor
Diâmetro do orifício	0,254 mm
Vazão volumétrica	2,24 mm ³ /s
Velocidade de extrusão	40 mm/s
Diâmetro filamento	3 mm
Velocidade de carregamento	0,08 mm/s
Temperatura de processamento	260°C

6 Estudo do cabeçote de extrusão

Neste capítulo serão inicialmente definidas as características desejadas do cabeçote projetado. Para atender a estas características, será feito o dimensionamento da câmara de modo a criar um escoamento compatível com os objetivos definidos. Após este dimensionamento, serão realizados também o dimensionamento térmico e mecânico do cabeçote de extrusão, finalizando assim o seu projeto.

6.1 Definição dos principais parâmetros do cabeçote extrusor

O cabeçote extrusor é o conjunto mecânico da máquina FDM responsável pelo carregamento, pela plastificação e pela extrusão do material. Portanto, antes de começar o projeto mecânico deste conjunto, é necessário determinar as principais características globais do sistema.

6.1.1 Definição do sistema de carregamento

Conforme já apresentado no capítulo 3.2, existem quatro principais tipos de sistema de carregamento: o de seringa e atuador linear, o de seringa e ar comprimido, o de rosca e o de filamento.

Os dois sistemas baseados em seringa são os mais simples e mais robustos, podendo extrudar um grande gama de materiais com poucas adaptações, porém, eles consistem em sistemas descontínuos, necessitando de um grande reservatório acoplado ao sistema, ou de pausas de recarregamento, para fabricar peças grandes. Portanto estes sistemas não estão de acordo com o objetivo deste projeto.

O sistema de extrusão por rosca também tem uma elevada versatilidade, pois pode receber diversos tipos de materiais contanto que estejam na forma de pellets. Entretanto a fabricação deste sistema possui um custo maior, pois a geometria é complexa demandando uma usinagem CNC.

Já o sistema de extrusão por filamento possui uma menor versatilidade, uma vez que o material deve ser previamente processado na forma de filamento, aumentando o custo da matéria prima. Por outro lado, o custo deste sistema de carregamento é menor, pois este é formado basicamente por um motor e por um guia. Além disso, este sistema já está consolidado no FDM. Portanto este sistema será o escolhido para o carregamento.

No carregamento por filamento os principais parâmetros a se determinar são: o diâmetro do filamento, a velocidade do filamento e a contrapressão que o filamento terá que contrapor, desta forma, é possível determinar os canais e o motor necessário.

6.1.2 Definição do sistema de plastificação

O sistema de plastificação, previamente apresentado na seção 3.3, tem como função mudar o estado do polímero de sólido para plastificado (fluido) em uma viscosidade adequada para o processamento.

Já que o efeito de aquecimento por atrito é muito pequeno, devido às baixas velocidades entre o fluido e as paredes, a principal fonte de aquecimento é o efeito Joule das resistências elétricas.

Portanto o principal parâmetro a ser determinado é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura do polímero até uma temperatura na qual a viscosidade seja adequada, e esta quantidade de calor é definida a partir do material a ser utilizado e da vazão volumétrica de material extrudado.

Quanto ao controle de temperatura será necessário determinar apenas a temperatura de processamento.

6.1.3 Definição do sistema de extrusão

A extrusão do polímero plastificado ocorre devido ao aumento de pressão gerado pelo filamento empurrado pelo motor de carregamento. Após o aumento de pressão e da plastificação o polímero é forçado contra um bocal com um pequeno orifício circular. O diâmetro deste orifício e o seu comprimento serão as principais variáveis que determinarão os outros parâmetros do projeto, e, além disso, é a geometria deste orifício que definirá a resolução da máquina, como citado na seção 3.4.

6.2 Estudo preliminar da câmara de plastificação

Conforme qualquer sistema mecânico complexo, existe uma elevada interdependência entre todos os subsistemas constituintes, portanto seria um erro projetar cada subsistema independentemente e esperar um resultado de alta qualidade.

Tendo em mente esta complexidade, neste capítulo serão feitas as hipóteses simplificadoras necessárias para esboçar a geometria base da câmara, explicando melhor o desenvolvimento do projeto como um todo. Após a determinação desta geometria, a mesma poderá ser corrigida e modificada ao longo do projeto.

Os principais objetivos no projeto da câmara de plastificação são:

- Permitir o aquecimento do polímero até a temperatura de operação em condições de extrusão
- Impedir o vazamento do polímero pelas junções
- Ter o menor volume possível de polímero no estado visco-elástico
- Causar a menor queda de pressão possível
- Obter acuracidade superior às máquinas comerciais de FDM

O primeiro objetivo é a principal função da câmara, aquecer o polímero até a temperatura na qual a viscosidade esteja adequada para a extrusão. O segundo objetivo é devido à possível existência de junções na câmara ou em seu entorno, portanto não poderá haver vazamento do polímero, tanto nas junções como na direção de carregamento do mesmo. O terceiro objetivo visa aumentar a qualidade da extrusão, já que no estado visco-elástico a parcela elástica acumula energia e depois a libera com um atraso no tempo, funcionando como uma mola, e, portanto, dificultando o controle preciso do volume extrudado. O quarto objetivo quantifica a eficiência do sistema, já que quanto maior a queda de pressão, maior energia será demandada do motor.

A câmara de extrusão mais simples que pode ser facilmente estudada analiticamente está representada na Figura 39. Ela consiste de um cilindro de diâmetro maior, onde ocorre a plastificação, e a seguir uma zona de convergência cônica até o diâmetro do bocal.

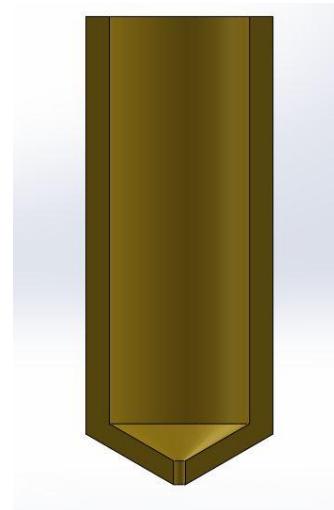


Figura 39: Câmara de plastificação simplificada

6.2.1 Escoamento em canais de seção circular

Considerando o escoamento em um canal de seção circular constante de raio R , sob as hipóteses de escoamento em regime permanente, incompressível, laminar e isotérmico, efeitos da gravidade desprezíveis e gradiente de pressão (dP/dz), o equilíbrio de forças em um elemento cilíndrico, como ilustrado na Figura 40 abaixo, resulta nas equações 10 a 15.

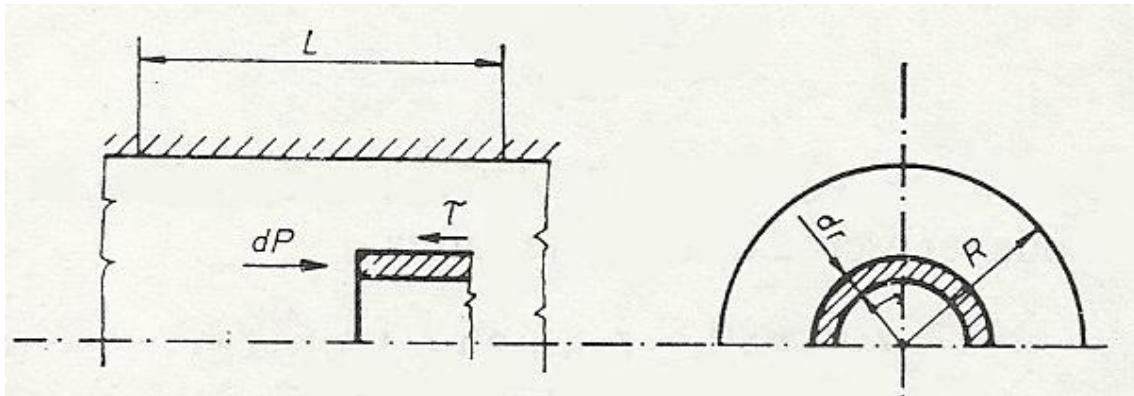


Figura 40: Equilíbrio de forças em um elemento cilíndrico [35]

Igualando à força gerada pela diferença de pressão à força gerada pelas tensões cisalhantes tem-se:

$$dP \cdot [(r + dr)^2 - r^2] \cdot \pi = 2[(r + dr) - r] \cdot \pi \cdot dz \cdot \tau \quad (10)$$

Simplificando esta equação:

$$dP \cdot (r \cdot dr) = (dr) \cdot dz \cdot \tau \quad (11)$$

Integrando a equação 11 em r , é obtida a equação da tensão cisalhante:

$$\tau(r) = \frac{r}{2} \left(\frac{dP}{dz} \right) \quad (12)$$

Como condição de contorno, na parede, onde $r = R$, a equação 12 se torna:

$$\tau(r) = \frac{r}{R} \cdot \tau(R) = \frac{r}{R} \cdot \tau_w \quad (13)$$

Onde τ_w é a tensão cisalhante na parede.

$$\text{Sob a hipótese de } \frac{dP}{dz} = \text{const.} \quad (14)$$

$$\text{a equação 12 é simplificada para } \tau(r) = \frac{r}{2} \left(\frac{P}{L} \right) \quad (15)$$

, onde L é o comprimento do cilindro.

Supondo que o polímero seja Newtoniano, e que a velocidade do mesmo em qualquer ponto seja v , a tensão cisalhante também é dada por:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} = \eta \cdot \frac{dv}{dr} \quad (16)$$

Combinando as equações 12 e 16:

$$\eta \cdot \frac{dv}{dr} = \frac{r}{2} \left(\frac{dP}{dz} \right) \quad (17)$$

Cuja integração gera o perfil parabólico de velocidade representado pela equação 18.

$$v(r) = \frac{1}{2 \cdot \eta} \left(\frac{dP}{dz} \right) \left(\frac{r^2}{2} - \frac{R^2}{2} \right) \quad (18)$$

Desta forma a vazão volumétrica Q é obtida a partir da seguinte equação:

$$Q = \int_0^R 2\pi r v(r) dr \quad (19)$$

Que resolvida resulta em:

$$Q = \frac{\pi R^4 P}{8 \eta L} \quad (20)$$

Portanto para um fluido Newtoniano e com o escoamento sem escorregamento na parede o perfil de velocidade é:

$$v_{\text{Newtoniano}} = \frac{2 Q}{\pi R^2} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (21)$$

Da mesma forma a taxa de cisalhamento na parede para um fluido Newtoniano é:

$$\dot{\gamma}_{\text{Newtoniano}}(R) = \frac{-4 Q}{\pi R^3} \quad (22)$$

As equações 16 a 21 não são válidas para fluidos não-Newtonianos. Entretanto elas servem como parâmetros para equações corrigidas, já que os experimentos reológicos normalmente calculam os parâmetros supondo um fluido Newtoniano. Desta forma, para fluidos Newtonianos, as variáveis serão chamadas de “aparentes”.

Mudando o sinal, por facilidade de interpretação, a taxa de cisalhamento aparente na parede é:

$$\dot{\gamma}_A = \frac{4 Q}{\pi R^3} \quad (23)$$

Da mesma forma a viscosidade aparente é:

$$\eta_A = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_A} = \frac{\left(\frac{dP}{dz}\right) \pi R^4}{8 Q} \quad (24)$$

Para os fluidos não-Newtonianos, a viscosidade é uma função da taxa de cisalhamento. O modelo mais básico para a viscosidade é dado pela Lei das Potências, apresentada nas equações 3 e 4. Utilizando o mesmo procedimento das equações 16 a 22, são calculados o perfil de velocidade, equação 25, a vazão volumétrica, equação 26, a taxa de cisalhamento máxima na parede, equação 27, e a tensão cisalhante máxima na parede, equação 28, para a Lei das Potências.

$$v = - \left(\frac{1}{2 K} \frac{dP}{dz} \right)^m \left(\frac{1}{m+1} \right) (R^{m+1} - r^{m+1}) \quad (25)$$

$$Q = \left(\frac{1}{2 K} \frac{dP}{dz} \right)^m \left(\frac{\pi}{m+3} \right) (R^{m+3}) \quad (26)$$

$$\dot{\gamma}_w = \left(\frac{3n+1}{4 n} \right) \frac{4 Q}{\pi R^3} = \left(\frac{3n+1}{4 n} \right) \dot{\gamma}_A \quad (27)$$

$$\tau_w = K \left(\frac{3n+1}{4 n} \right)^n (\dot{\gamma}_A)^n \quad (28)$$

A Figura 41 exibe a variação do comportamento do perfil de velocidade calculado e apresentado pela equação 25 normalizado pela velocidade média com a variação do expoente da Lei das Potências, n . Os valores de n foram escolhidos para representar o fluido Newtoniano, $n = 1$, valores típicos de polímeros, $n = 3, 1/3$, e valores limite $n = 0, \infty$.

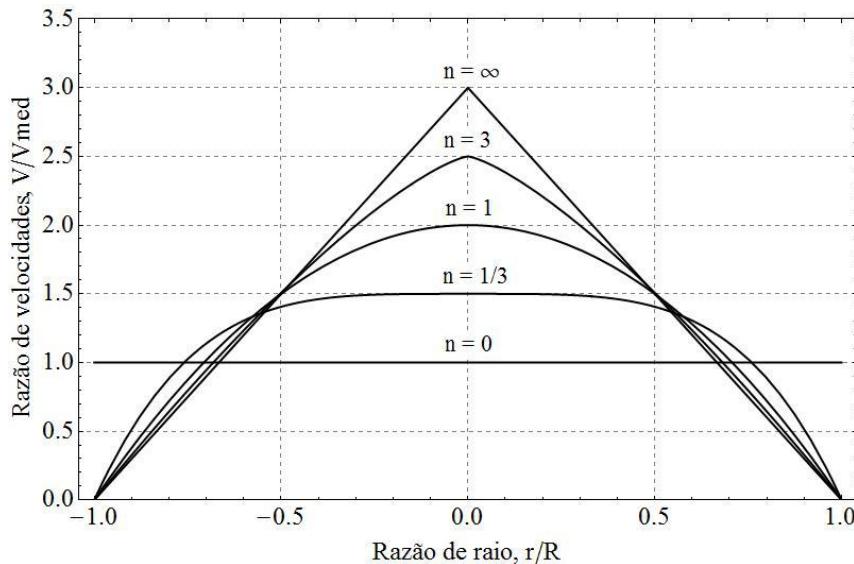


Figura 41: Perfil de velocidade para diversos valores de n

Para o fluido Newtoniano observa-se um perfil parabólico, já para um fluido pseudoplástico, $n < 1$, observa-se um platô na região central e uma maior variação da velocidade nas regiões próximas a parede, gerando uma maior taxa de cisalhamento. Esta não uniformidade ao longo do perfil causa tensões diferenciadas, gerando maiores tensões perto da parede, o que pode acarretar em distorções no extrudado.

Também foi ilustrado, na Figura 42, a tensão de cisalhamento, τ , normalizada pela constante da Lei das Potências, K , em função da taxa de cisalhamento, $\dot{\gamma}$. Como já era esperado quando $n = 1$ a relação é dada por uma reta, quando $n < 1$, o fluido tem o comportamento de um pseudoplástico, e quando $n > 1$ o comportamento é de um dilatante.

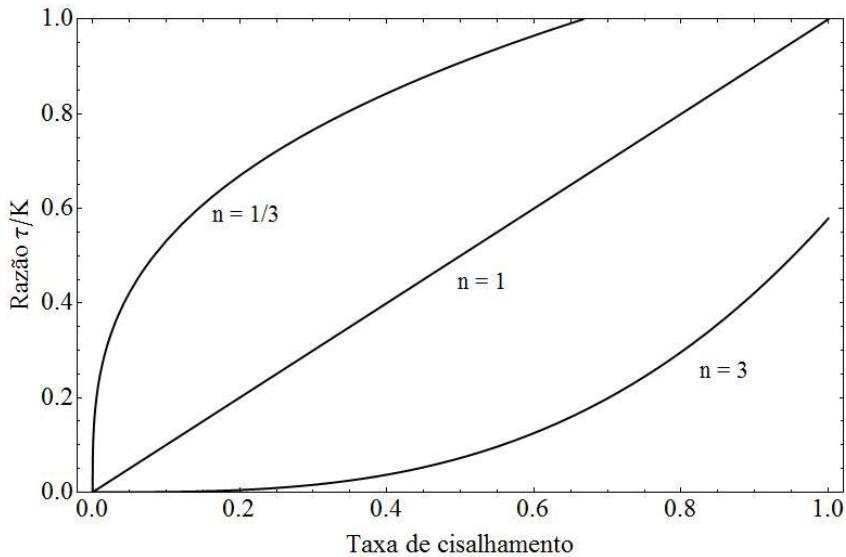


Figura 42: Gráfico da tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento ilustrando os diversos possíveis comportamento de um polímero

6.2.2 Estimativa analítica da queda de pressão

O cálculo da queda de pressão pode ser efetuado a partir da manipulação da equação 26. Isolando o termo da queda de pressão em função do comprimento do cilindro, tem-se:

$$\frac{dP}{dz} = \left[Q \left(\frac{m+3}{\pi} \right) \left(\frac{1}{R^{m+3}} \right) \right]^n (2 K) \quad (29)$$

Para este cálculo, a geometria será dividida em três partes, a primeira parte será a região cilíndrica onde ocorre a plastificação, a segunda parte será a região cônea e a terceira parte será a região cilíndrica do bocal.

Desta forma a queda de pressão total é dada por:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \quad (30)$$

Para as regiões cilíndricas, onde o raio é constante, a integral da equação 29 resulta simplesmente em:

$$\Delta P_{1,3} = \left[Q \left(\frac{m+3}{\pi} \right) \left(\frac{1}{R^{m+3}} \right) \right]^n (2 K L_{1,3}) \quad (31)$$

Porém, para a região cônica 2, o raio é função linear do comprimento. Desta forma, o raio pode ser escrito a partir do raio inicial, $R_{inicial}$, raio final, R_{final} , e ângulo do cone, β , resultando das equações 32 e 33. Substituindo a equação 32 na equação 29 e integrando, a equação 34 é obtida.

$$R[l] = R_{inicial} + \tan \left[\frac{\beta}{2} \right] \cdot l \quad (32)$$

$$L_2 = (R_{inicial} - R_{final}) / \tan \left[\frac{\beta}{2} \right] \quad (33)$$

$$\Delta P_2 = \left[Q \left(\frac{m+3}{\pi} \right) \right]^n (2 K) \left(\frac{1}{3 \tan \left[\frac{\beta}{2} \right] \cdot n} \right) \left(\frac{1}{R_{inicial}^{3n}} - \frac{1}{R_{final}^{3n}} \right) \quad (34)$$

Já que a equação da pressão está definida, é necessário determinar os valores dos parâmetros K e n do ABS. Estes valores possuem elevada variabilidade, mudando seus valores de fabricante para fabricante, ou até mesmo de lote para lote. O procedimento mais preciso que poderia se realizar seria a determinação da faixa de taxa de cisalhamento na qual o material é processado, assim como sua temperatura, e então realizar experimentos para determinar estes valores e até mesmo se o modelo proposto é adequado para o material processado. Porém este procedimento apresenta alto custo e demanda tempo, não se tornando viável, além disso, a máquina FDM também poderá trabalhar com outros polímeros, não sendo de extrema importância a determinação precisa destas constantes neste momento.

Portanto, para se fazer uma estimativa do valor de n , será feita uma média dos valores mais comuns de n para os polímeros termoplásticos usualmente processados em injeção e extrusão. A faixa de n se situa entre 1/3 e 1, com um valor médio de 0,67 [35]. Também, através de um experimento para baixas taxas de cisalhamento, Qaiser [36] encontrou os seguintes valores para o ABS P400, utilizado em prototipagem rápida: $n = 0,60$ para $T = 220^{\circ}C$ e $n = 0,74$ para $T = 260^{\circ}C$, gerando uma média de $n = 0,66$. Já que os dois valores das duas referências distintas são aproximadamente idênticos, o valor de $n = 0,66$ será adotado neste projeto.

Referências para valores de K são ainda mais complicadas de se encontrar e específicas. Porém, para $\dot{\gamma} = 1000 s^{-1}$, usualmente encontrada em processos de extrusão e injeção, $\eta = 200 Pa \cdot s$ para $T = 240^{\circ}C$ e $\eta = 135 Pa \cdot s$ para $T = 260^{\circ}C$

[37], gerando uma média de $\eta = 168 \text{ Pa s}$. Desta forma o valor de K pode ser calculado rearranjando a equação 3, resultando na equação 35. Assim, $K = 1759$.

$$K = \eta \cdot \dot{\gamma}^{1-n} \quad (35)$$

Para realizar o cálculo da queda de pressão ainda é necessário determinar os comprimentos L_1 e L_3 . O comprimento L_1 deve ser pelo menos o comprimento necessário para que, na vazão volumétrica de projeto, o calor seja conduzido da superfície do filamento até o centro do mesmo, alcançando uma temperatura mínima de processamento.

Portanto, para determinar L_1 , é necessário fazer um estudo de condução térmica no filamento. A Lei de Fourier, expressada na equação 36, rege o fenômeno de condução, onde \vec{q} é o fluxo de calor, k é a condutividade térmica, ρ é a densidade e c_p é o calor específico. O balanço de energia em um elemento diferencial de volume cilíndrico resulta na equação 37, onde r é a direção radial, ϕ é a direção circumferencial e z é a direção axial [38].

$$\vec{q} = -k \cdot \nabla T \quad (36)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (37)$$

A temperatura do polímero plastificado será considerada constante na direção axial e circumferencial, devido ao pequeno comprimento da câmara e da grande condutividade térmica de seu material. Será considerada apenas a variação de temperatura radial e desta com o tempo. Esta suposição resulta no modelo de um cilindro longo, com temperatura inicial do corpo constante. A solução analítica da distribuição de temperatura unidimensional transiente $T(r, t)$ normalmente envolve séries infinitas, porém para o número de Fourier, τ , maior que 0,2, uma aproximação com o primeiro termo é o suficiente, e as outras constantes são definidas através de valores tabelados a partir do número de Biot, Bi [39]. As definições dos dois adimensionais estão apresentadas nas equações 38 e 39, onde α é a difusividade térmica e h é o coeficiente de transferência de calor.

$$\tau = \frac{\alpha t}{R^2} \quad (38)$$

$$Bi = \frac{h R}{k} \quad (39)$$

Apesar de todo o perfil ser definido por esta solução, o interesse está sobre o centro do cilindro, cuja expressão é dada por [39]:

$$\frac{T(0,t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \frac{\alpha t}{R^2}} \quad (40)$$

Onde, T_i é a temperatura inicial, T_∞ a temperatura no contorno e A_1 e λ_1 são constantes tabeladas dependentes do número de Biot. No caso da condição de contorno de temperatura constante, $Bi = \infty$, assim, $A_1 = 2,4048$ e $\lambda_1 = 1,6021$ [39]. As propriedades térmicas foram obtidas a partir de um artigo que realizou um ensaio com o ABS P400, usado anteriormente como padrão da Stratasys. Os valores obtidos foram $k = 0,177 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, $c_p = 2080 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ e $\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$ [40]. Com esses dados a difusividade térmica foi calculada a partir da equação 41, resultando em $\alpha = 8,223 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

$$\alpha = \frac{k}{c_p \rho} \quad (41)$$

A temperatura inicial será a ambiente, com $T_i = 20^\circ\text{C}$, a temperatura no contorno será a de processamento, com $T_\infty = 260^\circ\text{C}$, com o raio do filamento $R = 1,5 \text{ mm}$. Os valores foram substituídos na equação 40 e esta foi implementada em uma rotina no software Mathematica, gerando o gráfico apresentado na Figura 43. No gráfico, o tempo começa em 10 segundos, pois antes disto não satisfaz ao critério de $\tau > 0,2$. Como era esperado, conforme o tempo tende ao infinito, a temperatura tende a temperatura no contorno de 260°C , portanto, foi necessária a seleção de uma temperatura menor como objetivo, está temperatura foi de 250°C , que é alcançada em 43 segundos.

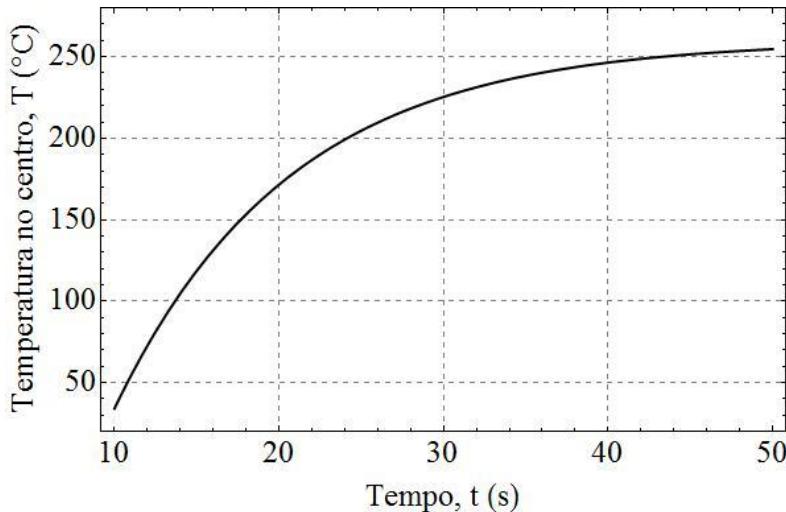


Figura 43: Temperatura no centro do filamento em função do tempo

Já que a vazão volumétrica é de $2,24 \text{ mm}^3/\text{s}$, a velocidade no polímero é de $0,32 \text{ mm/s}$ na região 1. Portanto, para esta velocidade e este tempo, a distância percorrida é de aproximadamente 14 mm . Considerando uma folga para o material aquecer, será definido que $L_1 = 20 \text{ mm}$.

Quanto ao comprimento L_3 , este tem uma grande dependência do comportamento viscoelástico do polímero. A principal função deste comprimento é prover tempo suficiente para que energia elástica acumulada no material e gerada pelo fluxo convergente se dissipe. Basicamente, se o canal for muito curto poderá haver distorções e o efeito de inchamento de extrudado será acentuado, entretanto se o canal for demasiadamente longo, haverá uma perda de carga desnecessária, prejudicando a eficiência da máquina.

As máquinas RepRap normalmente apresentam uma razão $L/D = 1$, porém elas são máquinas de baixa precisão, sendo referência como um limite inferior. Dependendo do material, o valor da razão pode chegar a 30 para um inchamento de extrudado quase nulo, mas em geral o valor é estabilizado em torno de 15 [21], entretanto, conforme visto na equação 31, a queda de pressão é diretamente proporcional ao comprimento do canal, inviabilizando grandes L/D para um sistema móvel, já que o motor aumentaria de tamanho para vencer a maior pressão.

Após a implementação de uma rotina em Mathematica com a função ΔP , foi criado um gráfico da queda de pressão total no sistema em função do ângulo β para $L/D = 1$, $L/D = 2$ e $L/D = 3$, ilustrado na Figura 44.

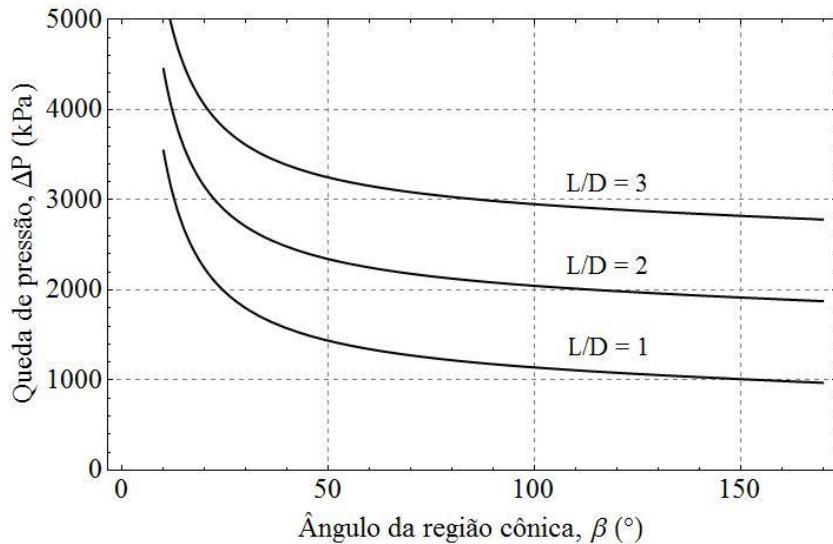


Figura 44: Queda de pressão para diversos L/D e ângulo da região cônica

Como pode ser visto na Figura 44, a diferença de pressão é aumentada de maneira acentuada quando L/D é aumentado. A Figura 45 explica melhor o motivo deste aumento. Nesta figura está apresentada a porcentagem de queda de pressão das regiões 1, 2 e 3 para $\beta = 120^\circ$, fica claro que o maior responsável pela queda de pressão é a região do bocal (região 3), representando mais de 80% da queda total.

Juntando ao fato que a queda de pressão no bocal é diretamente proporcional ao comprimento deste canal, é explicada a grande variação da queda de pressão total com o aumento da razão L/D .

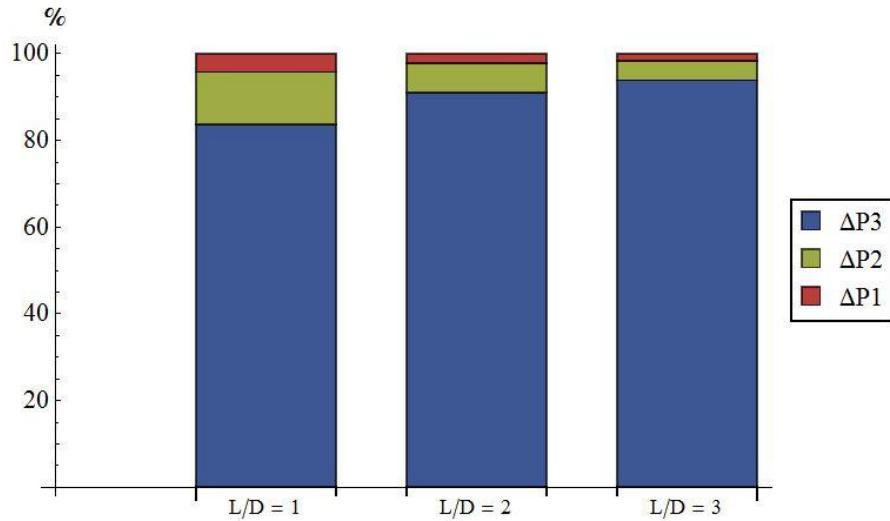


Figura 45: Participação de cada região na queda de pressão total para $\beta = 120^\circ$

Já que $L/D = 15$ se torna inviável, uma vez que a queda de pressão seria quinze vezes maior do que $L/D = 1$, razão que já se mostrou funcional na comunidade RepRap, uma razão menor deverá ser escolhida. Pela falta de dados reológicos do ABS, que permitiriam uma escolha mais adequada desta razão, será escolhido $L/D = 2$, o que resulta em $L_3 = 0,508\ mm$. Esta escolha proporciona uma maior precisão comparada ao usual na comunidade RepRap, e mesmo assim não eleva de maneira exorbitante a queda de pressão.

Quanto à escolha do ângulo β , observa-se claramente que, quanto maior for o seu valor, menor será a de pressão. Porém, há outro fator a se considerar, quanto maior for β , haverá maior probabilidade de recirculação nos cantos, o que causaria a estagnação do material e sua consequente degradação. Para estudar este fenômeno foi utilizada uma ferramenta numérica, o software *Flow Simulation*. Foram utilizadas as mesmas condições de contorno e propriedades do material definidas anteriormente. O resultado está apresentado na Figura 46.

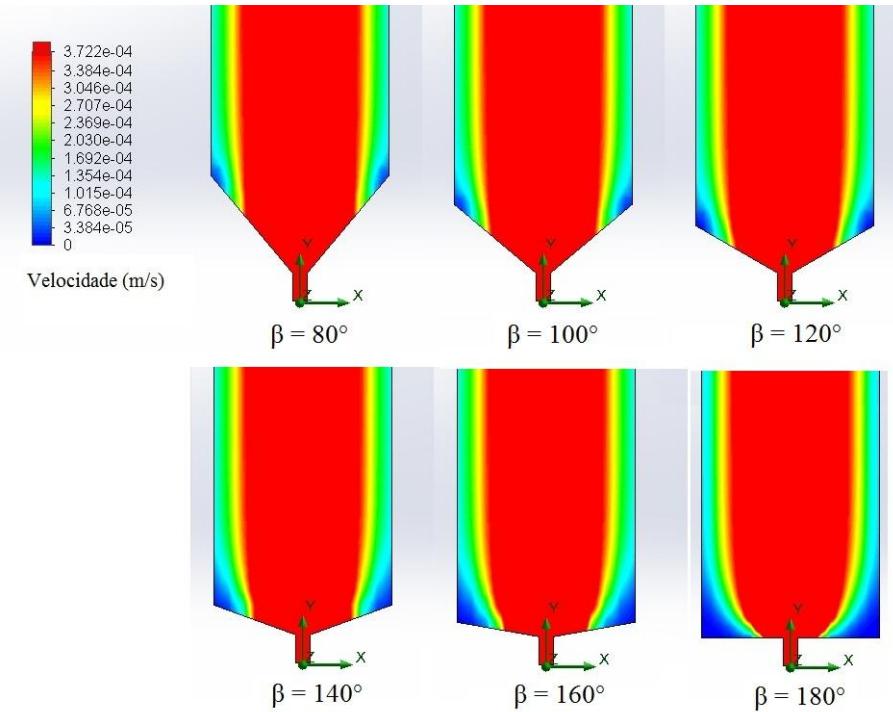


Figura 46: Observação da estagnação do material no canto da câmara para diversos valores do ângulo do cone β

Conforme pode ser observado, para qualquer ângulo ocorre uma diminuição elevada da velocidade do fluido nos cantos, porém, para $\beta = 180^\circ$ esta região de estagnação é consideravelmente maior que as demais. Para valores menores que $\beta = 80^\circ$, há um aumento significativo de queda de pressão sem proporcionar uma redução perceptível na área de estagnação, já que esta redução de $\beta = 100^\circ$ para $\beta = 80^\circ$ não é perceptível, conforme ilustrado na Figura 46. Entretanto, para $\beta > 120^\circ$ está diferença já se torna visível, não sendo uma região recomendada. Assim, o ângulo $\beta = 100^\circ$ será escolhido para este projeto, visto que não parece haver vantagens em diminuir este valor. Assim o comprimento pode ser determinado através da equação 33, com $L_2 = 1,15\text{ mm}$.

A substituição de todos os valores definidos neste capítulo resulta numa queda de pressão total de $\Delta P = 2049\text{ kPa}$ pelo método analítico desenvolvido. A simulação no *Flow Simulation*, citada anteriormente, resultou em uma pressão máxima na entrada de $2.185,6\text{ kPa}$ e uma pressão de saída igual à atmosférica no valor de $101,3\text{ kPa}$, resultando em uma queda de pressão de aproximadamente 2084 kPa . Uma diferença menor de 2% entre os dois métodos foi observada, o que confirma a validade do método analítico utilizado.

Um resumo dos resultados obtidos neste capítulo se encontra na Tabela 4, que apresenta os principais parâmetros da máquina definidos anteriormente, e na Tabela 5, que apresenta as propriedades supostas do ABS.

Tabela 4: Parâmetros da máquina após o estudo da Dimension Elite

Parâmetro	Valor
Diâmetro do orifício	0,254 mm
Vazão volumétrica	2,24 mm ³ /s
Velocidade de extrusão	40 mm/s
Diâmetro filamento	3 mm
Velocidade de carregamento	0,08 mm/s
Temperatura de processamento	260°C
Comprimento da câmara	20 mm
Comprimento do orifício	0,508 mm
Comprimento da região convergente	1,15 mm
Queda de pressão no sistema	2049 kPa

Tabela 5: Propriedades do ABS utilizadas

Propriedades ABS	Valor
n	0,66
K	1759
k	0,177 W/m·K
c _p	2080 J/kg·K
ρ	1050 kg/m ³

6.3 Aprimoramento da câmara de plastificação

O projeto básico da câmara de plastificação foi desenvolvido no capítulo anterior, porém algumas mudanças podem melhorar o desempenho da mesma. A geometria atual já se mostrou funcional, já que a geometria da RepRap [22] é bastante parecida, além de apresentar um baixo custo de usinagem, já que apenas dois furos, um passante e outro não, são suficientes para produzir a peça.

Apesar do diâmetro nominal do filamento de ABS ser 3,0 mm, há uma variação relativamente alta do diâmetro real do filamento. Isto se deve ao fato de haver tantos fabricantes de baixo custo, que o controle dimensional não é devidamente efetuado. Com o intuito de aumentar a quantidade de fabricantes que poderão fornecer o filamento, haverá um aumento do diâmetro na região do filamento de 3,0 mm para 3,5 mm. Este valor é baseado nos relatos de usuários que encontram variações de aproximadamente 10%, o que acarretaria em 3,3 mm, mas colocando uma margem de segurança, foi escolhido o valor 3,5 mm.

A conformação na zona de convergência de matrizes de extrusão pode ser melhorada controlando o perfil de velocidades ao longo do comprimento da câmara [35]. Devido à convergência desta região a área da seção transversal diminui ao longo do comprimento, o que acarreta em um aumento contínuo da velocidade média do fluido. Para um perfil cônico, o raio varia linearmente com o comprimento, portanto a área variará quadraticamente com o comprimento, o que acarretará em uma variação inversamente proporcional ao quadrado do comprimento na velocidade. A consequência deste comportamento inversamente quadrático é uma baixa variação de velocidade no início da convergência e uma elevada variação no final, gerando um elevado gradiente de velocidade, acarretando na geração de tensões no fluido, o que poderá causar distorções no extrudado.

Com o objetivo de diminuir estas tensões, a aceleração do fluido deve ser constante, para isto é necessário que a variação da velocidade com o comprimento seja constante, ou seja, a velocidade deve ser proporcional ao comprimento (equação 42). Após a aplicação da equação de conservação de massa, chega-se ao perfil desejado do raio em função do comprimento, como mostrado na equação 43 [35], onde D é o diâmetro na entrada, d o diâmetro na saída e L o comprimento total da zona de convergência. Este perfil é nomeado como corneta devido à sua semelhança com o instrumento musical.

$$v_z = v_0 + \frac{v_L - v_0}{L} z \quad (42)$$

$$r(z) = \frac{1}{2} \frac{D}{\sqrt{1+((D/d)^2-1)\cdot(z/L)}} \quad (43)$$

Substituindo os valores de $D = 3,5\text{ mm}$, $d = 0,254\text{ mm}$ e $L = 1,36\text{ mm}$ é definida a equação que determina a geometria da zona de convergência (equação 44). O valor de L foi atualizado para manter o mesmo ângulo de 100° equivalente apresentado anteriormente, porém com o diâmetro corrigido.

$$r(z) = \frac{1,75}{\sqrt{1+138,98\cdot z}} \quad (44)$$

Para analisar esta nova geometria foi realizada uma simulação numérica com as condições de operações. Após a simulação, foram comparados os comportamentos da velocidade ao longo do comprimento utilizando o perfil cônico, pré-definido anteriormente, e o perfil corneta, definido pela equação 44. A Figura 47 apresenta no eixo horizontal a distância entre a distância a partir do bocal de saída e o eixo vertical a velocidade do fluido na região central da zona de convergência. Observa-se a partir da

figura que a velocidade diminui de forma aproximadamente linear no perfil corneta, como desejado, em oposição ao perfil cônico que inicialmente gera pouca variação de velocidade e ao final acelera rapidamente o fluido.

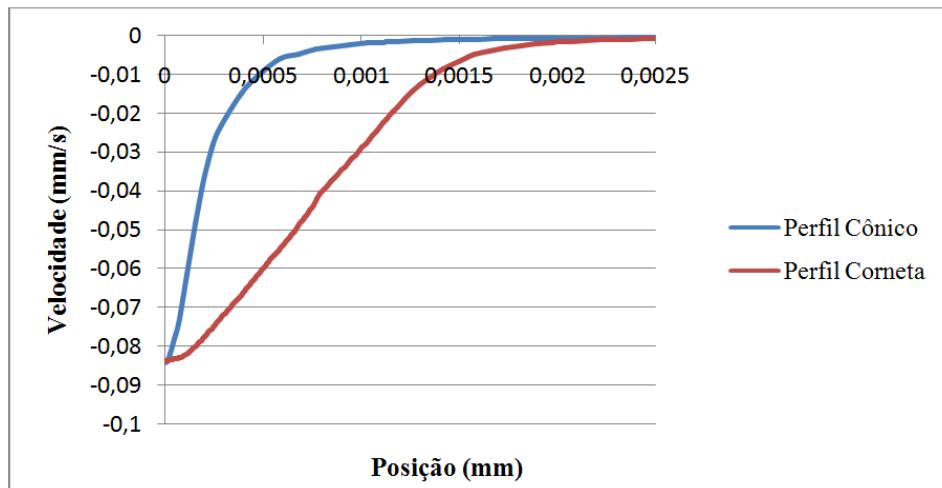


Figura 47: Comparação do perfil de velocidades para o perfil cônico e o perfil corneta

Utilizando a mesma simulação que gerou a Figura 47 foi analisado novamente o campo de velocidades para verificar novamente se haveria estagnação do fluido, visto que o perfil corneta aumenta a probabilidade de estagnação devido à diminuição mais rápida do diâmetro da câmara. Foi verificado que o perfil corneta realmente gerou uma grande zona de estagnação, como observado na Figura 48.

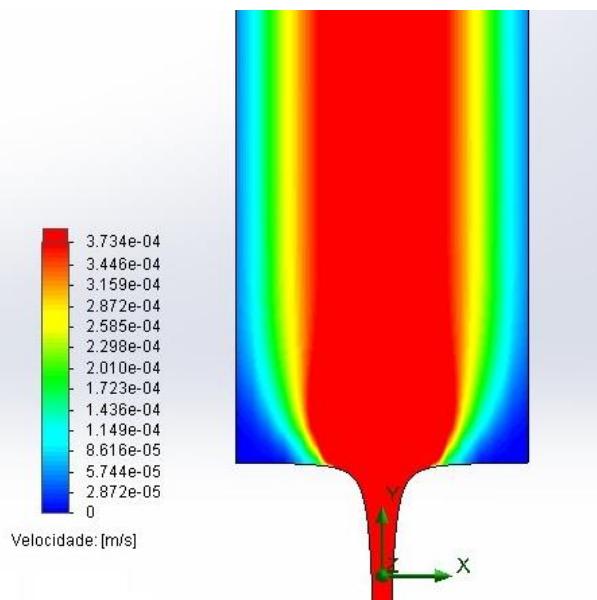


Figura 48: Zona de estagnação no perfil corneta

Para eliminar a estagnação foi realizado um procedimento de suavização na entrada da zona de convergência. Inicialmente foi escolhida aleatoriamente uma partícula do fluido que se localizava próxima à parede do cilindro na região de entrada da câmara. Esta partícula foi rastreada, gerando uma curva que indica, aproximadamente, onde a parede deveria estar localizada para que a partícula acompanhe a geometria da câmara.

A partir desta curva foram selecionados três pontos pertencentes a ela. Um ponto na interseção do rastro com a parede no início da zona de convergência, outro ponto na interseção do rastro com a parede no final da zona de convergência e um ponto na metade do comprimento do rastro entre os dois pontos definidos como inicial e final. Estes pontos foram interpolados por splines mantendo a condição de tangencia nas interseções com a parede. A Figura 49 ilustra o procedimento adotado.

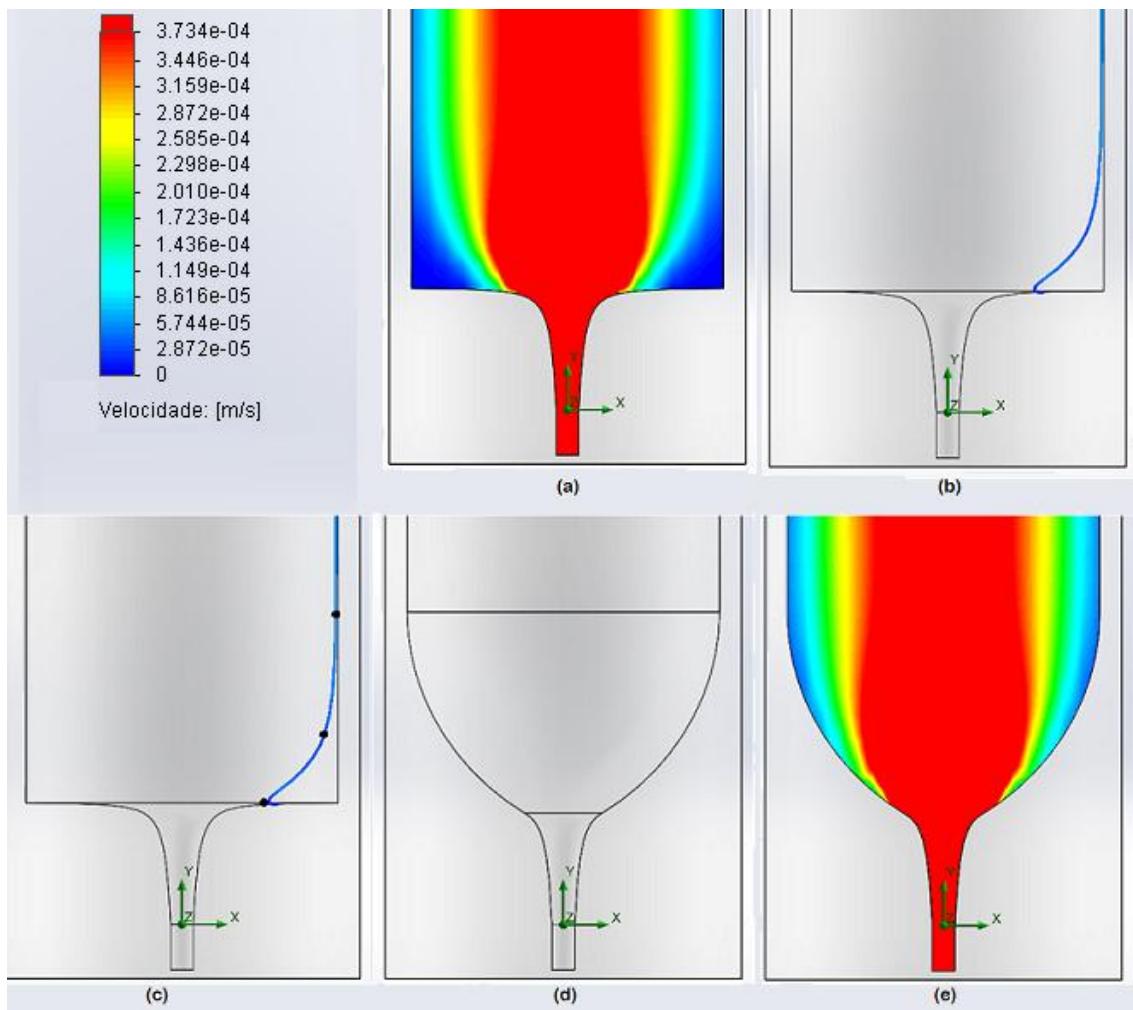


Figura 49: Procedimento para suavização do perfil corneta. Geometria inicial (a), rastreamento (b), definição dos pontos (c), interpolação por spline (d) e geometria final (e).

Ao final, a nova geometria não apresenta zona de estagnação, já que a zona de menor velocidade (área azul na Figura 49 – e), não aumenta conforme o escoamento é desenvolvido.

As coordenadas desta nova geometria estão apresentadas em uma tabela no Anexo II.

6.4 Seleção do material da câmara de plastificação

Para a determinação do material da câmara, foram consultados os principais fabricantes de moldes para processamento de polímeros, dentre eles a Böhler, Villares e Schmolz + Bickenbach.

Todos apresentavam aços com descrições equivalentes, principalmente para processamento geral, ou seja, sem tensões excessivas no material, atmosfera não oxidante, produto sem corrosão ou abrasão elevada, dureza superficial adequada para o desgaste, dentre outros. Porém, a Schmolz + Bickenbach possui um aço de fácil usinagem e com excelente resistência à corrosão, um aspecto importante, já que poderá ser utilizada refrigeração a água. Além disto, sua condutividade térmica também foi um fator diferencial.

Portanto, o aço que será utilizado será o Schmolz + Bickenbach Corroplast, cujas propriedades estão apresentadas no Anexo III.

6.5 Estudo térmico da câmara de plastificação

O aquecimento elétrico é o método utilizado com maior freqüência para o aquecimento da câmara de plastificação. Geralmente é possível assegurar a potência necessária e ainda garantir um adequado controle sobre a temperatura do molde utilizando o sensoriamento da temperatura e um controlador associado.

Entretanto a desvantagem de utilizar este aquecimento é que a diferença entre a temperatura da resistência de aquecimento (600° a 800°C) e a temperatura da câmara (200° a 300°C) é demasiadamente diferente, havendo uma preocupação sobre a distribuição da temperatura sobre a superfície.

O dimensionamento térmico que será apresentado consiste na determinação das perdas de calor da câmara, do calor demandado para o aquecimento do fluido, da seleção do elemento de aquecimento, sensor de temperatura e controlador de temperatura, dimensionamento do aquecedor e da refrigeração do sistema.

6.5.1 Perda de calor por radiação

De acordo com Çengel [39], “*Radiação é a energia emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) como um resultado das mudanças nas configurações eletrônicas de átomos ou moléculas.*”. Este fenômeno pode ser quantificado pela lei de Stefan-Boltzmann, válido para corpos negros. Entretanto, inserindo um termo de proporcionalidade, a emissividade ϵ do material, esta lei pode ser aplicada a corpos reais, também chamados de corpos cinza. A equação 45 rege o fenômeno para um corpo cinza completamente incluso em uma superfície negra muito maior preenchida com ar a uma temperatura ambiente T_{amb} [39], onde σ_{SB} é a constante de Stefan Boltzmann e A_s é a área superficial.

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \cdot \sigma_{SB} \cdot A_s \cdot (T^4 - T_{amb}^4) \quad (45)$$

De acordo com Sors [35], a emissividade de moldes de aço varia entre 0,85 e 0,95, portanto será escolhido o maior valor por segurança, assim $\epsilon = 0,95$. A temperatura ambiente será definida como 20°C, uma temperatura usual para salas climatizadas, sendo que a temperatura do ar dentro da máquina pode chegar a uma média de 80°C. A área será baseada em um cilindro de 20 mm de comprimento e 5,5 mm de diâmetro, resultado do diâmetro interno de 3,5 mm somado à espessura de parede de 1 mm. O valor resultante é $\dot{Q}_{rad} = 0,091 \text{ W}$.

6.5.2 Perda de calor por convecção natural

De acordo com Incropera [38], “[...] o termo convecção é usado para descrever a transferência de energia entre uma superfície e o fluido em movimento em torno da superfície. A convecção inclui a transferência de calor pelo movimento da massa fluida (advecção) e pelo movimento aleatório das moléculas do fluido (condução ou difusão.”. A convecção pode ser dividida em natural ou forçada, onde na natural o movimento do fluido ocorre devido à variação de temperatura do fluido e na forçada o movimento do fluido é imposto.

A convecção forçada pode ser usada como uma ferramenta para controlar a temperatura da câmara, aumentando a troca de calor com o ambiente e, portanto, diminuindo a temperatura da câmara. Geralmente é utilizado um ventilador para forçar o movimento do ar.

Entretanto, para o dimensionamento térmico dos aquecedores, a convecção natural é o fenômeno atuante, já que o ventilador não deve estar forçando o ar durante o

aquecimento. Devido a um desenvolvimento matemático complexo, soluções analíticas não serão utilizadas neste trabalho, já que foge do escopo do mesmo.

Portanto serão utilizadas correlações empíricas de Churchill e Chu, recomendadas por Incropera [38], para geometrias imersas no fluido (escoamento externo). Por simplicidade a geometria analisada será representada como um cilindro de raio 5,5 mm e comprimento 20 mm. As propriedades do ar serão avaliadas na temperatura de filme T_f , definida pela equação 46. As equações 47 e 48 apresentam o número de Nusselt e o número de Rayleigh, respectivamente, necessários para a correlação empírica.

A equação 49 reproduz a correlação apresentada pela referência para uma placa vertical, que será utilizada para calcular o coeficiente de transferência de calor. Já a equação 50 reproduz a correlação para uma placa horizontal com a superfície quente voltada para baixo.

$$T_f = \frac{(T_s + T_{amb})}{2} \quad (46)$$

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h} L}{k} \quad (47)$$

$$Ra_L = \frac{g \beta (T_s - T_{amb}) L^3}{\nu \alpha} \quad (48)$$

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,383 Ra_L^{1/6}}{(1 + (0,492/Pr)^{9/16})^{8/27}} \right\}^2 \quad (49)$$

$$\overline{Nu}_L = 0,27 Ra_L^{1/4} \quad (50)$$

$$\dot{Q}_{conv} = \bar{h} A_s \cdot (T - T_{amb}) \quad (51)$$

Utilizando as equações 47, 48, 49 e 50 para determinar o coeficiente de transferência de calor e depois substituindo na equação 51, foi determinado o fluxo de calor total de convecção $\dot{Q}_{conv} = 1,101 W$. Os demais dados utilizados no cálculo, assim como alguns resultados intermediários, estão apresentados resumidamente na Tabela 6.

Tabela 6: Resumo da análise de convecção

Variável	Valor
T_f	140 °C
β	0,00243 K ⁻¹
ν_{ar}	27,55·10 ⁻⁶ m/s ²
k_{ar}	0,0343 W/m·K
ρ_{ar}	0,854 kg/m ³
cp_{ar}	1013 J/kg·K

Pr_{ar}	0,695
$\bar{h}_{vertical}$	12,8 W/m ² ·K
$\dot{Q}_{vertical}$	1,063 W
$\bar{h}_{horizontal}$	6,6 W/m ² ·K
$\dot{Q}_{horizontal}$	0,038 W
\dot{Q}_{conv}	1,101 W

6.5.3 Calor demandado para o aquecimento do fluido

A principal função da câmara de plastificação é prover energia suficiente para o sistema, na forma de calor, de modo que o polímero extrudado esteja a uma temperatura compatível com a viscosidade desejada.

O ABS é extrudado a uma vazão máxima de 2,24 mm³/s, o que resulta em uma vazão mássica de $2,35 \cdot 10^{-6}$ kg/s. Esta massa deve ser aquecida durante o percurso do material na câmara desde a temperatura ambiente até a temperatura de processamento.

A forma mais simples de calcular a quantidade de calor para aquecer esta massa, \dot{Q}_{massa} , está apresentada na equação 52, onde \dot{m} é a vazão mássica e T_{proc} a temperatura de processamento.

$$\dot{Q}_{massa} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{proc} - T_{amb}) \quad (52)$$

Esta fórmula despreza o efeito da variação do c_p com a temperatura, que pode ser alta, principalmente abaixo da temperatura de transição vítreia, onde ocorre a maior variação. Porém o c_p tende a decrescer, portanto, esta a equação 52 preza pela segurança. Além disso, os dados da variação do c_p são de difícil acesso. Outro efeito também desprezado é o do ponto de fusão, onde ocorre a dissolução dos cristais e um aumento do c_p . Porém, devido ao baixo nível de cristalinidade do ABS, este também será desprezado.

Substituindo os valores previamente definidos, chega-se a quantidade de calor necessária para aquecer o fluido, cujo resultado está apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Resumo da análise do calor necessário para aquecer o fluido

Variáveis	Valor
\dot{m}	$2,35 \cdot 10^{-6}$ kg/s
c_p	2080 J/kg·K
T_{proc}	260 °C
T_{amb}	20 °C
\dot{Q}_{massa}	1,16 W

6.5.4 Seleção do elemento de aquecimento

Após a determinação das principais fontes de calor no sistema, o calor total é dado pela equação 53, resultando em $\dot{Q}_{tot} = 2,35 \text{ W}$.

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{massa} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (53)$$

Analizando percentualmente a parcela de calor de cada fonte, é evidente que a radiação é um efeito desprezível. Também se observa uma baixa eficiência do sistema, já que aproximadamente 50% da energia é desperdiçada aquecendo o ambiente.

Existem soluções para aumentar a eficiência, sendo a mais indicada nesta situação o uso de uma camada isolante. Porém, como será visto mais adiante, aquecedores industriais possuem potências mínimas muito maiores que esta e o ar dentro da câmara precisa ser aquecido, sendo assim esta troca de calor por convecção pode ser vista não como uma perda, mas sim como um complemento ao aquecimento ambiente. Haja vista estes fatores, não haverá nenhuma mudança no projeto para diminuir a perda por convecção.

Como discutido na seção 3.3, os principais tipos de aquecedores são o de cartucho e de filamento. Os dois tipos de elemento serão estudados e comparados, sendo selecionado o que possuir características que melhor se adeqüem ao objetivo deste projeto.

6.5.4.1 Aquecedor de filamento NiCr

Os aquecedores de filamento NiCr são formados por uma liga metálica não magnética, que contém níquel, cromo e ferro. Existem diversas ligas para diferentes aplicações, entretanto a mais comum é formada por 80% de níquel e 20% de cromo em massa. Devido à sua alta resistência elétrica, em combinação com um alto ponto de fusão e alta resistência à corrosão em altas temperaturas, esta liga é amplamente utilizada elementos de aquecimentos elétricos (e.g. ferro de soldar, chuveiro elétrico, tostadeira, secador de cabelo, etc). Usualmente o filamento de NiCr, ou *Nichrome*, é utilizado no formato de espiral, gerando a resistência necessária para que quando submetido à uma diferença de potencial a corrente passe gerando calor.

Utilizando os dados fornecidos pela empresa Alloywire [41], uma fabricante de fios de resistência, foi selecionada a liga RW 80, cuja principal aplicação é de aquecimento industrial. Para gerar uma potência compatível com a deste projeto o comprimento do fio deveria ser de 100 mm e o diâmetro do fio 1 mm. Desta forma, um

guia deveria ser usinado ao redor do bocal para posicionar o fio, como ilustrado na Figura 50.



Figura 50: Renderização do bocal com aquecimento NiCr

Esta geometria possui uma massa inferior a 5 gramas e é extremamente compacta, sendo excelente o seu uso. Porém, o fio *Nichrome* necessita ser isolado do metal da base para que não haja uma fuga de corrente, e para isso a melhor solução é um revestimento cerâmico, que aumentaria consideravelmente o custo da peça. Além disso, ainda seria necessário fazer o acabamento nas extremidades do fio para evitar desgaste e corrosão e permitir um fácil acoplamento com a fonte elétrica.

Portanto, o uso do filamento de resistência *Nichrome* possui um excelente desempenho, combinando baixa massa, pouco espaço ocupado e elevada potência. Porém, uma aplicação prática direta do filamento necessita de um projeto elétrico adequado do aquecedor e seu cabeamento, além do alto custo de isolamento elétrico.

6.5.4.2 Aquecedor tipo cartucho

O aquecedor tipo cartucho é elemento de aquecimento industrial no formato de tubo, projetado para aplicação direta na indústria de processamento térmico. Estes cartuchos podem ser usados para aquecer qualquer tipo de material, tendo características específicas para cada substância.

A estrutura do cartucho permite alta compactação do isolante sobre o elemento de aquecimento, eliminando efeitos de vibração e choque mecânico, aumentando a expectativa de vida útil sobre outros tipos de resistência. Suas principais aplicações estão concentradas nas indústrias de equipamentos analíticos e médicos, aquecimento de líquidos e gases, extrusoras de plástico e moldes de câmara quente.

A Figura 51 exibe as principais partes do cartucho. O fio de aquecimento, ou fio da resistência, é o filamento de NiCr, ou *Nichrome*, apresentado na seção anterior, que é posicionado em forma de espiral ao longo do interior do cartucho, sendo o passo da espiral o fator determinante para a densidade superficial de potência do elemento. A isolação em Óxido de Magnésio (MgO) é um revestimento cerâmico que impede o fio da resistência de entrar em contato com o corpo em aço, gerando um curto-circuito. O corpo em aço é a parte do cartucho que entra em contato com o material que será aquecido. Seu objetivo é proteger o fio da resistência do ambiente, principalmente quando forem ácidos ou corrosivos. Os principais tipos de aço utilizados no corpo são os aços inox AiSi (304) e (316) e a superliga Incoloy 800. Por último, os cabos de ligação são responsáveis pela conexão com a fonte elétrica e devem ser devidamente recobertos (e.g. fibra de vidro, silicone, teflon e kevlar) para proteção do ambiente.

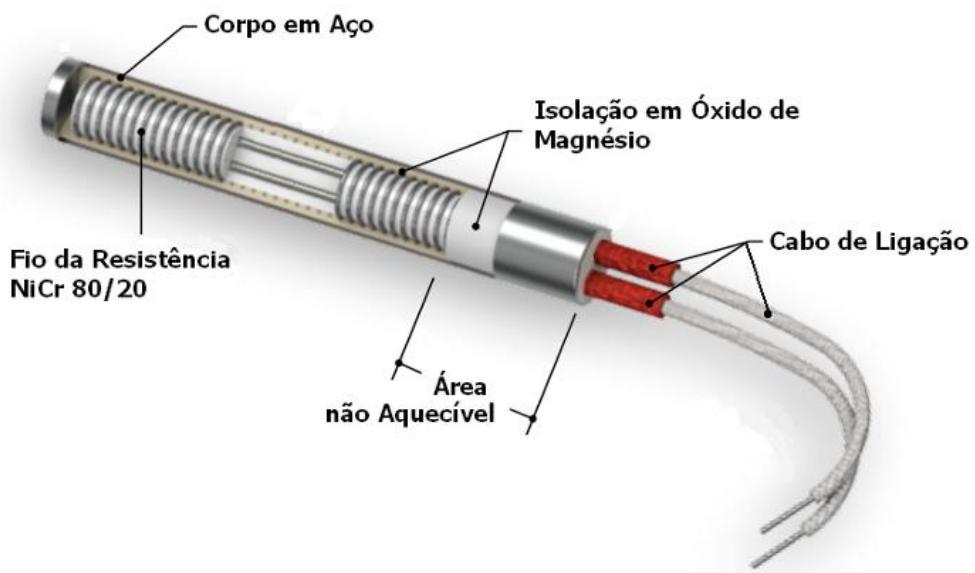


Figura 51: Estrutura do aquecedor tipo cartucho

Para selecionar o cartucho mais adequado a este projeto, foram comparados diversos fornecedores nacionais e internacionais. A maior dificuldade encontrada foi o tamanho do cartucho, com o tamanho mínimo mais comum de 6 mm de diâmetro e 40 mm de comprimento, sendo consideravelmente maior que o bocal e a câmara

plastificadora juntos. Foi encontrado apenas uma fabricante que produz o cartucho com dimensões menores, possuindo 6 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento, a Technoheat [42]. Este cartucho possui o corpo em aço inox AiSi 304 e uma potência nominal de 30 W a uma tensão de 220 V.

A geometria básica para utilizar esta resistência de cartucho está apresentada na Figura 52. Ela possui uma massa de 35 gramas, sete vezes maior que a de *Nichrome* apresentada anteriormente, porém sua massa ainda pode ser reduzida durante a otimização da geometria. Apesar da maior massa, o posicionamento do cartucho, assim como a sua manutenção, é extremamente simples, já que o cartucho é roscado no corpo, além de ser fácil a instalação de um sensor de temperatura comercial, que demanda maior espaço.

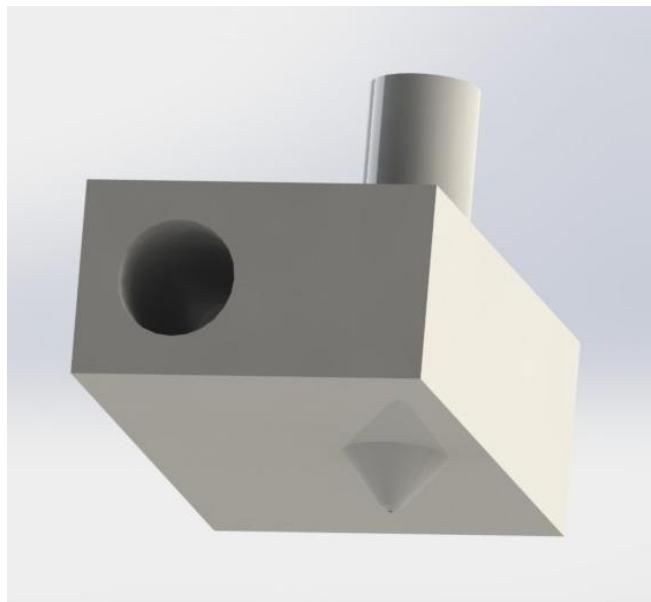


Figura 52: Renderização do bocal com aquecimento por cartucho

Desta forma, o aquecimento por cartucho proporciona uma maior confiabilidade no sistema e uma manutenção mais fácil e barata, apesar da sua maior massa. Por estes motivos a resistência de cartucho será utilizada neste projeto. No Anexo IV encontra-se um boletim da série HD de resistências de cartucho da Technoheat [42].

6.5.5 Seleção do sensor de temperatura

Para o sensor de temperatura será usado um termopar, devido ao seu extenso uso no processamento de termoplásticos por ser robusto, ser simples e possuir baixo custo. O termopar consiste na junção de dois materiais diferentes, geralmente metais, que produzem uma diferença de potencial elétrico no entorno do contato. Esta voltagem é

dependente da temperatura, assim é possível determinar a temperatura do corpo monitorado.

Existem diversos tipos de combinações dos pares de material, a cada um dá-se uma sigla (K, E, J, N, B, R, S, T, C, M). O tipo K, que possui o termoelemento positivo Cromel e termoelemento negativo Alumel, é o principal termopar de uso genérico, devido ao seu baixo custo e ampla cobertura de temperaturas (de -200°C até 1200°C), por isto será o tipo de termopar utilizado no sensor.

Consultando diversos fabricantes, a empresa Alatal [43] se destacou por possuir um produto específico para processamento de plásticos de pequena dimensão e menor custo. Este produto é o termopar flexível, utilizado em injetoras e extrusoras, de fácil montagem e desmontagem e baixo custo. A descrição exata do termopar selecionado é TFX12/P200-50/Mol-1/B-01/ FL-500/CE032-P00/DIN/U:7. Este possui uma ponteira de 7 mm de comprimento e 5 mm de diâmetro feita de latão, mola, baioneta com 14,5 mm de diâmetro interno, cabo com isolamento em fibra de vidro e 500 mm de comprimento. Uma ilustração do produto está na Figura 53 e as especificações encontram-se no Anexo V.

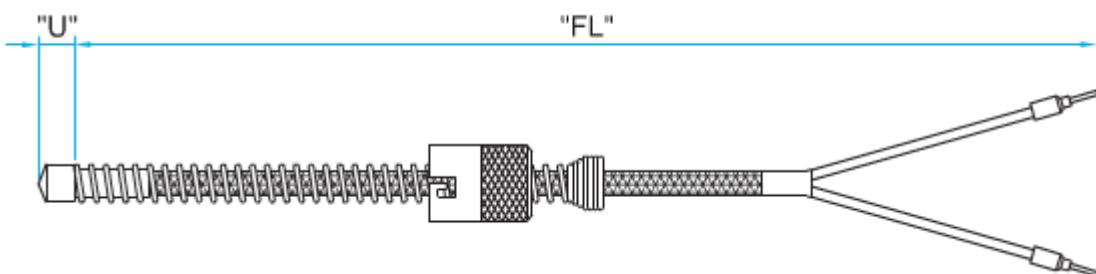


Figura 53: Termopar flexível Alatal TFX12 com ponteira, mola e baioneta

6.5.6 Seleção do controlador de temperatura

O controlador de temperatura é um instrumento para a monitoração e controle da temperatura de um determinado processo. Na entrada do controlador encontra-se um sensor de temperatura, o qual irá prover a temperatura real do ponto monitorado, e na saída encontra-se um elemento de controle, o aquecedor, que irá variar a temperatura deste ponto.

O controlador é a parte central de um sistema de controle, e deve ser selecionado de modo a se comunicar adequadamente com todas as outras partes do sistema de controle. Os seguintes itens são os principais na seleção de um controlador.

1. Tipo de sensor de temperatura e sua faixa de operação.
2. Tipo de saída para alimentação do elemento de controle.

3. Algoritmo de controle requerido.
4. Número e tipos de saída.

O tipo de sensor já foi determinado como tipo K. Sua faixa de operação varia de 0°C até 300°C, já que a câmara pode estar desde a temperatura ambiente, 20°C até a máxima de processamento, 280°C. Já a saída é analógica para alimentar o elemento de aquecimento tipo resistência de cartucho.

Existem três principais tipos de algoritmo de controle, o liga/desliga (*on/off*), o proporcional e o PID (proporcional, integral e derivativo). O liga/desliga simplesmente liga e desliga a alimentação do aquecedor dependendo da comparação entre a temperatura determinada pelo sensor de temperatura e a temperatura desejada no processo. Neste algoritmo de controle sempre há uma oscilação contínua da temperatura e um maior desgaste do aquecedor devido ao constante ligar e desligar do mesmo.

O algoritmo proporcional é utilizado para eliminar a oscilação do liga/desliga. O controlador diminui a potência de saída proporcionalmente à diferença de temperatura monitorada e desejada.

O algoritmo PID combina o algoritmo proporcional com mais outros dois, o integral e o derivativo, que consegue compensar automaticamente variações nas condições do processo (e.g. variação na temperatura ambiente, ou na vazão de polímero), diminuindo erros estacionários e aumentando a estabilidade do sistema. Este algoritmo é especialmente recomendado para sistemas com baixa massa, já que estes respondem mais rapidamente a variações de potência no aquecedor. Os controladores mais atuais possuem um auto-ajuste (sintonia automática), que se adequa ao sistema controlado.

Já que a vazão mássica é muito pequena deste sistema, claramente é indicado o uso de um controlador com algoritmo PID.

O número de saídas é referente à quantidade de aquecedores que um sistema pode ter para cada sensor, que no caso deste projeto é apenas uma saída. Também se podem utilizar saídas para limites de temperatura, alarmes, ou controladores secundários, porém este não é o objetivo deste projeto.

A empresa Contemp [44] é uma empresa brasileira que fabrica controladores de temperatura. Ela possui uma linha econômica, de baixo custo, de controladores de temperatura para termopares do tipo K, com alimentação compatível com o aquecedor selecionado, algoritmo PID auto-ajustável e 4 saídas, adequando-se à este projeto. O

modelo selecionado para este projeto é o C404, por apresentar todos os requisitos e ser o de menor tamanho. Uma ilustração do produto está na Figura 54, e o seu folheto com as especificações técnicas está disponível no Anexo VI.



Figura 54: Controlador de temperatura Contemp C404

6.5.7 Dimensionamento do aquecedor

O aquecedor deve ser capaz de alojar a resistência de aquecimento, distribuir o calor ao redor da câmara de plastificação uniformemente e alojar o sensor de temperatura de modo que a leitura seja idêntica a da temperatura de extrusão.

A resistência será posicionada transversalmente à câmara de plastificação, de modo que o fluxo de calor se mantenha o mais próximo da saída do bocal. Sua fixação pode ser feita através de flange ou rosca, porém o flange demanda mais espaço e mais peças, portanto a fixação será feita através de rosca. A menor rosca métrica que contém o diâmetro interno maior que o diâmetro externo da resistência é a M8, portanto está será a utilizada. A usinagem da rosca é um serviço prestado pelo fabricante e já está incluso no projeto.

Por conter uma geometria grande comparada à câmara, e por não haver simetria axial, se colocada no torno esta peça causará um grande desbalanceamento. Por isto esta peça será separada da câmara e sua montagem será através de uma rosca interna. Novamente, para manter a espessura da câmara, a rosca de ser no mínimo uma M7.

O aquecedor não tem contato direto com o polímero, portanto este poderia ser de outro material. Como sua principal função é conduzir calor, o material economicamente mais viável e com excelente condutibilidade térmica é o latão, sendo o mais indicado. Porém, conforme pode ser visto nas seções seguintes, o aço inoxidável apresenta propriedades suficientes para uma boa distribuição de temperatura, e já que este será adquirido em quantidade para a fabricação da câmara de plastificação, o mesmo será mantido como material do aquecedor.

O posicionamento do sensor deve ser o mais próximo possível da saída do bocal e do lado oposto à resistência, visando monitorar a temperatura real da câmara. Sua fixação será feita externamente através da baioneta e da mola, portanto é necessário apenas um furo com o diâmetro da ponteira do termopar, ou seja, de 5 mm. A Figura 55 ilustra esta peça dimensionada.

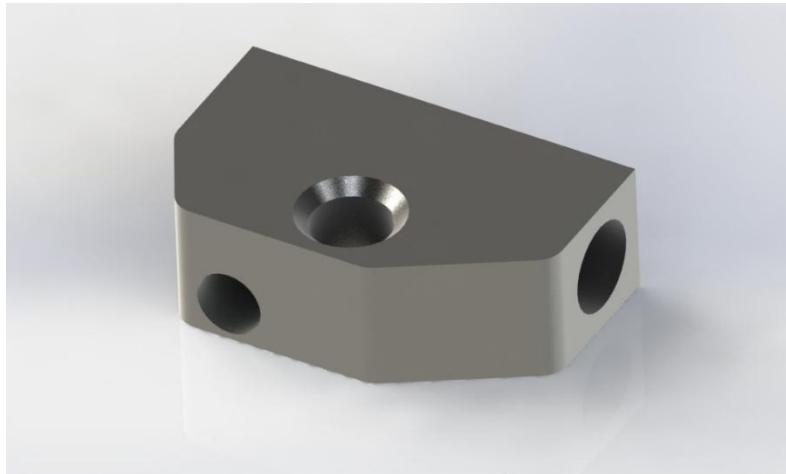


Figura 55: Aquecedor

6.5.8 Estudo do resfriamento da câmara

A principal função da câmara é plastificar o polímero e mantê-lo na temperatura adequada de processamento. Entretanto, o volume de polímero plastificado não deve ser maior que o necessário, pois o maior volume pode acarretar em variações na vazão de polímero devido ao comportamento viscoelástico do mesmo.

Para diminuir este volume, é necessária a criação de um gradiente de temperatura na câmara, que deve ser feito por um elemento de resfriamento. O metal da câmara não consegue criar este gradiente somente com a convecção natural, por isto o elemento é indispensável.

Além disto, com a diminuição da temperatura na região superior da câmara, o sistema de carregamento trabalhará com uma temperatura menor, o que é recomendado, e será possível a colocação de guias de PTFE no interior da câmara para o filamento ainda não plastificado, que possui excelentes propriedades de atrito, porém a temperatura máxima de trabalho é de 260°C.

As duas principais soluções para o elemento de resfriamento é o uso de um ventilador, que atua aumentando a troca de calor devido à convecção forçada, ou o uso de um sistema arrefecido por água.

Em alguns sistemas, não é utilizada essa refrigeração, entretanto são necessários isolantes térmicos entre a câmara e o suporte, porém a câmara precisa de uma pré-montagem, o volume de material plastificado é maior, não é possível o uso de guias PTFE e podem ocorrer problemas de vazamentos. Os vazamentos ocorrem quando a máquina fica ligada, mas sem extrudar material, desta forma o próprio filamento conduz calor até a região do carregamento, podendo ocorrer vazamento nesta região e um volume plastificado excessivo.

O uso do ventilador é bastante difundido, sendo o mais utilizado, tanto nas máquinas comerciais, quanto nas não comerciais (e.g. RepRap). Seu funcionamento consiste na instalação de um dissipador de calor aletado na região superior da câmara de plastificação e de uma ventoinha, similar à de usadas na refrigeração de fontes e computadores pessoais, que força o ar através do dissipador, aumentando o coeficiente de troca de calor, diminuindo a temperatura nesta região.

Porém, seu uso requer a instalação da ventoinha na parte móvel, o que é indesejado devido à sua elevada massa e seu elevado volume. Além disto, o gradiente de temperatura não é tão acentuado quando no sistema arrefecido por água.

Na refrigeração por água é criado um canal ao redor da câmara por onde a água irá passar e retirar o calor. Para movimentar a água também é necessária uma bomba hidráulica, e para o resfriamento da água aquecida utiliza-se um evaporador na região externa à máquina. A parte móvel do sistema de refrigeração é mínima, e a troca de calor elevada, porém a complexidade é muito maior.

Como a refrigeração por água proporciona um melhor desempenho, este sistema será utilizado neste projeto.

6.5.8.1 Dimensionamento do condensador

A principal função do condensador é transferir o calor da câmara para água, de forma que a temperatura no topo da câmara seja um valor pré-determinado. Este também deve prover as conexões adequadas para a linha de transporte do fluido refrigerante.

Para estimar a quantidade de calor que deve ser retirada da câmara, um circuito de refrigeração básico foi desenhado, como ilustrado na Figura 56, e simulado considerando o fluxo de polímero, o aquecedor e as perdas por convecção. Nesta simulação, os coeficientes de transferência de calor utilizados foram os encontrados anteriormente neste projeto. Como condições de contorno foram impostas as

temperaturas de 260°C na superfície do aquecedor e 20°C na superfície em contato com o fluido refrigerante.

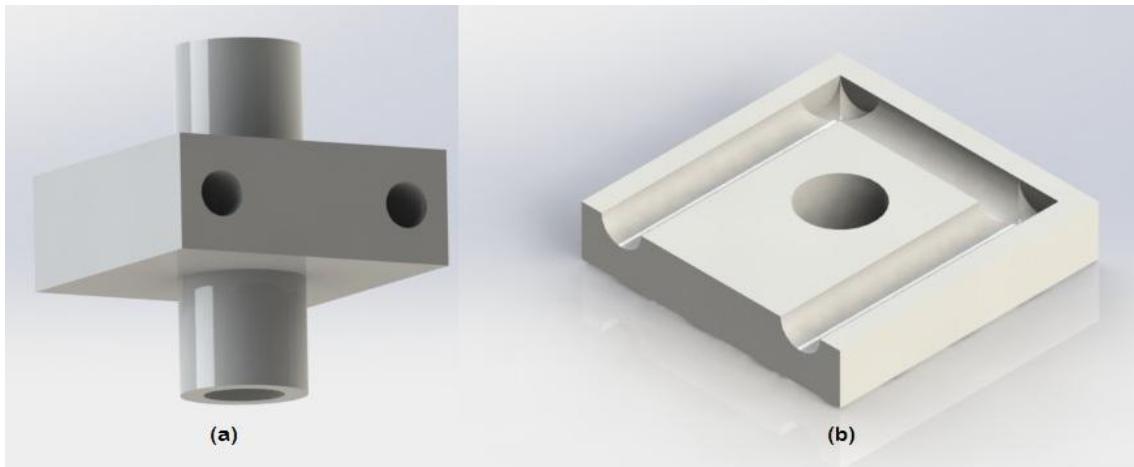


Figura 56: Desenho do condensador (a) e dos canais de refrigeração (b)

Foram realizadas quatro simulações variando a posição do condensador e calculados os fluxos de calor em cada situação. Os quatro posicionamentos foram: 10mm, 15 mm, 20 mm e 25 mm de distância entre o inicio da região de convergência do bocal e a superfície inferior do condensador. Os resultados, quanto à distribuição de temperatura, indicaram que 10 mm é um comprimento muito curto, criando gradientes de temperatura no aquecedor, o que produziria uma diferença de temperatura entre a leitura do termopar e do polímero, e diminuindo a temperatura de extrusão do polímero em 20°C, portanto esta distância foi descartada. Para os valores de 15 mm, 20 mm e 25 mm a temperatura de saída era aproximadamente constante e 5°C abaixo da temperatura do aquecedor.

Quanto ao fluxo de calor no condensador necessário para manter a temperatura em 20°C, não foram notadas diferenças expressivas entre 20 mm e 25 mm, e já que a distância de 25 mm apresenta maior volume plastificado, esta foi descartada. O condensador com a distância de 15 mm demandou 6,5 W de potência, enquanto o de 20 mm demandou 3,5 W de potência. Apesar de a potência ser quase o dobro, são apenas 3 W de diferença. Em compensação o volume de fluido plastificado reduz em 25%.

Também se deve considerar que a temperatura utilizada no condensador foi de 20°C, algo praticamente inviável sem o uso de um sistema avançado de refrigeração. A forma mais simples seria o uso apenas de um evaporador estático, o que acarretaria em uma temperatura do condensador necessariamente acima da temperatura ambiente. A temperatura do condensador poderá variar até 60 °C sem importantes consequências, já

que a temperatura interna da câmara se encontra em torno deste valor e seria a mínima possível utilizando um sistema de ventilador. Com isto a potência diminuirá ainda mais.

Visando o melhor desempenho do sistema, será utilizada a distância de 15 mm. A Tabela 8 apresenta o resumo das simulações, contendo a temperatura de extrusão do polímero na saída do bocal, o fluxo de calor no condensador e o fluxo de calor no aquecedor. A Figura 57 exibe a distribuição de temperaturas no sistema para a simulação com a distância de 15 mm.

Tabela 8: Resumo da simulação inicial do condensador

Distância	T _{saída polímero}	Q _{condensador}	Q _{aquecedor}
10 mm	242 °C	14,4 W	19,5 W
15 mm	252 °C	6,5 W	10,7 W
20 mm	254 °C	3,5 W	7,5 W
25 mm	255 °C	2,2 W	6,2 W

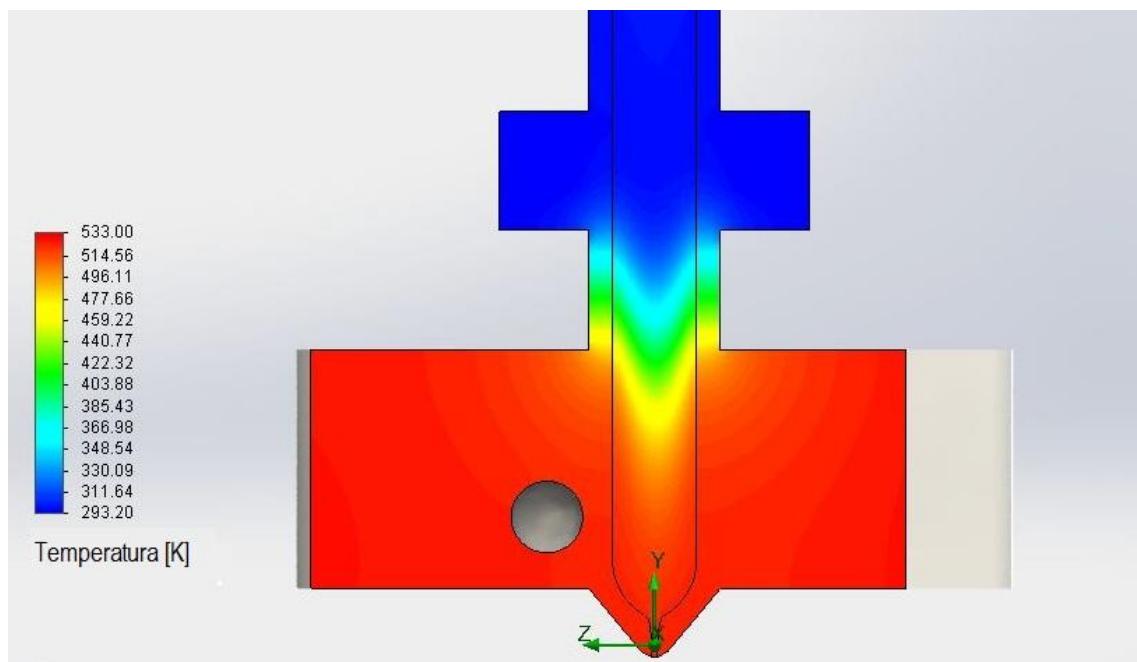


Figura 57: Distribuição de temperatura no sistema

É importante ressaltar que o sistema de refrigeração deve ser capaz de manter este gradiente de temperatura mesmo que seja interrompido o fluxo polimérico, de modo que a temperatura do polímero na parte superior não ultrapasse a temperatura de plastificação.

6.5.8.2 Indicações para o sistema de resfriamento

Deve ser realizado um estudo de engenharia adequado para determinar o evaporador, a tubulação e a bomba, assim como as condições de operação. Porém este cálculo foge do escopo deste trabalho no momento, portanto não será realizado.

Baseando-se em um protótipo da RepRap [22], o sistema pode ser constituído de uma bomba de engrenagens de pequeno porte, tubulação de silicone, e um reservatório de dois litros. Já que a potência necessária é muito baixa, devido ao baixo fluxo polimérico, uma bomba de baixa potência e um reservatório exposto à temperatura ambiente é suficiente para manter a temperatura abaixo de 40°C.

Uma indicação de bomba é a Pacific Hidrostar modelo 94639 de 12V, ou até mesmo uma bomba de aquário com uma vazão de aproximadamente 1000 l/hr. A tubulação pode ser de silicone com diâmetro interno de 2 mm.

Ressalta-se, mais uma vez, que estas são apenas indicações, e servem como configuração inicial para um cálculo térmico mais aprofundado que poderá determinar se esta será suficiente ou não para os requisitos do projeto.

6.6 Estudo mecânico do cabeçote

Nesta seção serão discutidos tópicos com uma ênfase mecânica, sendo os dois primeiros dimensionamentos mecânicos e o último uma breve discussão sobre a fabricação.

6.6.1 Dimensionamento da parede da câmara

A parede da câmara de plastificação é responsável por manter o polímero contido dentro da câmara sobre pressão e por transmitir calor ao mesmo, aquecendo-o. Além disto, a parede deve ser uma espessura mínima para que garanta, além da integridade estrutural da câmara, um mínimo deslocamento do bocal quanto submetido às acelerações.

Conforme já discutido anteriormente, na região superior ao condensador, a câmara deve estar a uma temperatura baixa, e, portanto, o polímero encontra-se no estado sólido. Apesar de existir uma folga entre a parede e o filamento, existe atrito entre eles. Para diminuir esta perda será utilizado um tubo de PTFE (Teflon), que apresenta baixo atrito. Este tubo deverá ter 3,5 mm de diâmetro interno, desta forma, o tubo de maior disponibilidade comercial é o de 3,5 mm de diâmetro interno e 4,3 mm de diâmetro externo. Este tubo irá ser alojado a partir do plano que contém a face superior do condensador, de forma a sempre estar na região resfriada.

De acordo com a comunidade RepRap [22], a aceleração máxima do cabeçote é de 3.000 mm²/s. Como critério de falha, foi imposto que o deslocamento do bocal deve ser menor do que o raio do bocal, mantendo uma precisão do equipamento em grandes acelerações. Devido à complexidade da geometria, foi realizada uma simulação numérica no Solidworks Simulation do cabeçote completo submetido à aceleração máxima. Após um processo iterativo, uma espessura de parede de 2 mm chegou a um deslocamento de 0,118 mm, menor do que o raio do bocal de 0,128 mm.

Observa-se também que os valores calculados de tensão são muito inferiores aos do limite de escoamento, situando-se em torno de 0,06 MPa nas áreas críticas, portanto a parede terá 2 mm de espessura.

6.6.2 Dimensionamento da fixação da câmara

A câmara deverá ser fixada em um guia que irá movê-la nas direções desejadas, seja na vertical ou no plano horizontal, ou em uma base fixa, caso a mesa de suporte do material contenha os 3 graus de liberdade necessários. Esta fixação não pode ser definitiva, para caso seja necessária manutenção, a câmara possa ser retirada.

Portanto, será utilizada uma fixação através de flange. Como já comentado no capítulo anterior, os esforços envolvidos são muito baixos, portanto não é um critério adequado de dimensionamento. Para facilitar a construção, será utilizada uma parede de 1 mm, que pode ser facilmente produzida no torno. Serão utilizados dois parafusos para fixação e um ressalto central para alinhar o canal da câmara.

6.6.3 Fabricação

Durante o projeto do cabeçote, cada peça do cabeçote foi dimensionada de modo a facilitar a fabricação e montagem. Com operações simples de usinagem, como fresamento, furação, torneamento e plainamento, as peças podem ser fabricadas, excluindo a câmara de plastificação.

Por conter uma geometria complexa e de pequenas dimensões, e ao mesmo tempo demandando uma alta acuracidade, a geometria interna do bocal não pode ser fabricada pelos métodos citados anteriormente. O método mais indicado nesta situação é a utilização de eletroerosão por penetração. A eletroerosão permite uma acuracidade da ordem de 0,005 mm e usina furos de até 0,20 mm de diâmetro, desta forma, após a usinagem em CNC do eletrodo com o formato interno do bocal, o cabeçote pode ser fabricado fielmente à geometria proposta.

No Anexo II, segue uma tabela com as coordenadas dos pontos para a usinagem em CNC do bocal. Os pontos desta tabela formam uma curva desde a saída do bocal até a região de plastificação, onde a coordenada axial é constante. Ressaltasse que há uma simetria de revolução na superfície.

7 Ensaio experimental do ABS P430

Apesar de que as propriedades do ABS já foram estimadas anteriormente, existe uma grande variação de sua composição, e, por conseguinte, de suas propriedades, como já discutido. Em busca de tornar a análise numérica seguinte mais precisa, decidiu-se coletar experimentalmente os dados do ABS P430.

O ABS P430, é o material padrão da Dimension Elite, máquina da Stratasys. Este termoplástico é o mais indicado para uso geral pelo fabricante e possui boas propriedades mecânicas.

A partir de uma amostra obtida deste material, foi realizado um experimento de reometria capilar, que consiste forçar o material em um capilar com uma vazão constante e medir a variação de pressão no capilar. Através de cálculos reológicos para escoamento em um capilar é possível determinar a viscosidade em função da taxa de cisalhamento e da temperatura.



Figura 58: Reômetro capilar Rheograph 25

O reômetro capilar utilizado foi o Göttefert Rheograph 25, Figura 58, de acordo com a DIN 54811, que foi cedido pelo laboratório LAPTEC [45], do Instituto de Macromoléculas, IMA, da UFRJ. Aproximadamente 100 gramas do filamento de ABS P430 foram cortados manualmente para formar os pellets que seriam colocados no reômetro, conforme ilustrado na Figura 59.



Figura 59: ABS P430 cortado para ensaio no reômetro capilar

Após a preparação dos pellets de ABS, foram feitos dois ensaios, o primeiro com a temperatura de 200°C e o segundo com a temperatura de 240°C, que estão perto dos limites da faixa de processamento. Para cada ensaio a velocidade de descida do pistão que exerce pressão sobre o polímero variou entre os seis valores: 0,1 mm/s, 0,2 mm/s, 0,5 mm/s, 1,0 mm/s, 2,0 mm/s e 3,0 mm/s, gerando diferentes taxas de cisalhamento, e, portanto, diferentes pressões no capilar. O diâmetro do pistão utilizado foi de 12 mm, portanto as vazões volumétricas impostas foram 11,3 mm³/s, 22,6 mm³/s, 56,5 mm³/s, 113 mm³/s, 226 mm³/s e 339 mm³/s. O capilar utilizado possuía 30 mm de comprimento e 1 mm de diâmetro.

A partir dos dados impostos e da pressão obtida no resultado, é possível obter a taxa de cisalhamento aparente e a tensão de cisalhamento, sendo que a taxa de cisalhamento aparente é calculada supondo um fluido Newtoniano. Para o fluido não Newtoniano, é recomendado aplicar a correção de Rabinowitsch, que corrige a taxa de cisalhamento aparente para a taxa de cisalhamento real. Desta forma a viscosidade é obtida pela razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento.

Na Tabela 9 e na Tabela 10, estão apresentados os resultados dos ensaios reológicos, contendo a taxa de cisalhamento e a viscosidade, tanto aparente quanto corrigida pelo Rabinowitch, além da velocidade, tensão de cisalhamento e pressão medida.

Tabela 9: Resumo do ensaio reológico para T = 200 °C

Vel	ΔP	$\dot{\gamma}_A$	τ	η_A	$\dot{\gamma}$	η
[mm/s]	[bar]	[1/s]	[Pa]	[Pa*s]	[1/s]	[Pa*s]
0,1	78,2	115,2	185.228,3	1.607,9	186,1	995,6
0,2	117,1	230,4	239.455,8	1.039,3	372,1	643,5
0,5	179,9	576,0	318.483,3	552,9	930,3	342,4
1,0	231,1	1.152,0	385.329,2	334,5	1.860,5	207,1
2,0	285,4	2.304,0	454.288,3	197,2	3.721,1	122,1
3,0	319,7	3.456,0	500.179,2	144,7	5.581,6	89,6

Tabela 10: Resumo do ensaio reológico para T = 240°C

Vel	ΔP	$\dot{\gamma}_A$	τ	η_A	$\dot{\gamma}$	η
[mm/s]	[bar]	[1/s]	[Pa]	[Pa*s]	[1/s]	[Pa*s]
0,1	78,2	115,2	65.152,2	565,6	157,0	415,0
0,2	117,1	230,4	97.556,7	423,4	314,0	310,7
0,5	179,9	576,0	149.887,5	260,2	784,9	191,0
1,0	231,1	1.152,0	192.623,3	167,2	1.569,9	122,7
2,0	285,4	2.304,0	237.845,0	103,2	3.139,8	75,8
3,0	319,7	3.456,0	266.382,5	77,1	4.709,6	56,6

Supondo que a lei das potências seja apropriada para este polímero, os valores de K e n podem ser determinados fazendo uma interpolação linear entre o Log(τ) e Log($\dot{\gamma}$). Assim, a partir da equação 54, determina-se que Log(K) é o termo constante e n é o coeficiente angular da equação linear.

$$\text{Log}(\tau) = \text{Log}(K) + n \text{Log}(\dot{\gamma}) \quad (54)$$

Realizando este procedimento, foi encontrado que para 200 °C $n = 0,289$ e $K = 42.462$, e para 240 °C $n = 0,408$ e $K = 8.995$. Observa-se que os valores de n , não estão condizentes com o valor utilizado anteriormente neste trabalho, de $n = 0,66$ e $K = 1.759$. E para 200 °C, n é menor que $1/3$, o que novamente é discrepante com a literatura. Entretanto, a faixa de valores da viscosidade encontra-se dentro da esperada, e, além disso, esta discrepância nos valores das constantes pode ser devido a uma não concordância entre o modelo de lei das potências e o comportamento real do fluido [36].

Estes resultados indicam que o material deve ser estudado mais profundamente, realizando vários ensaios para determinar a repetibilidade, e qual modelo de viscosidade seria mais adequado ao ABS P430. Entretanto este estudo reológico mais aprofundado foge do escopo deste trabalho, e, portanto, os dados obtidos nos ensaios realizados serão

utilizados posteriormente. A Figura 60 e a Figura 61 mostram a comparação entre os dados obtidos experimentalmente e os dados gerados pela lei das potências.

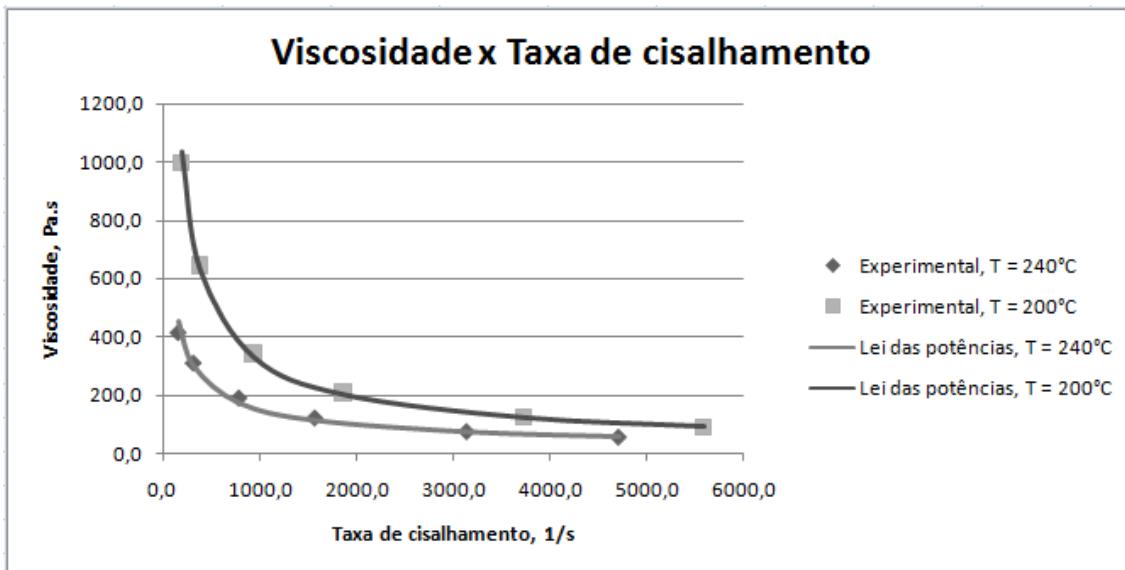


Figura 60: Gráfico da viscosidade em função da taxa de cisalhamento

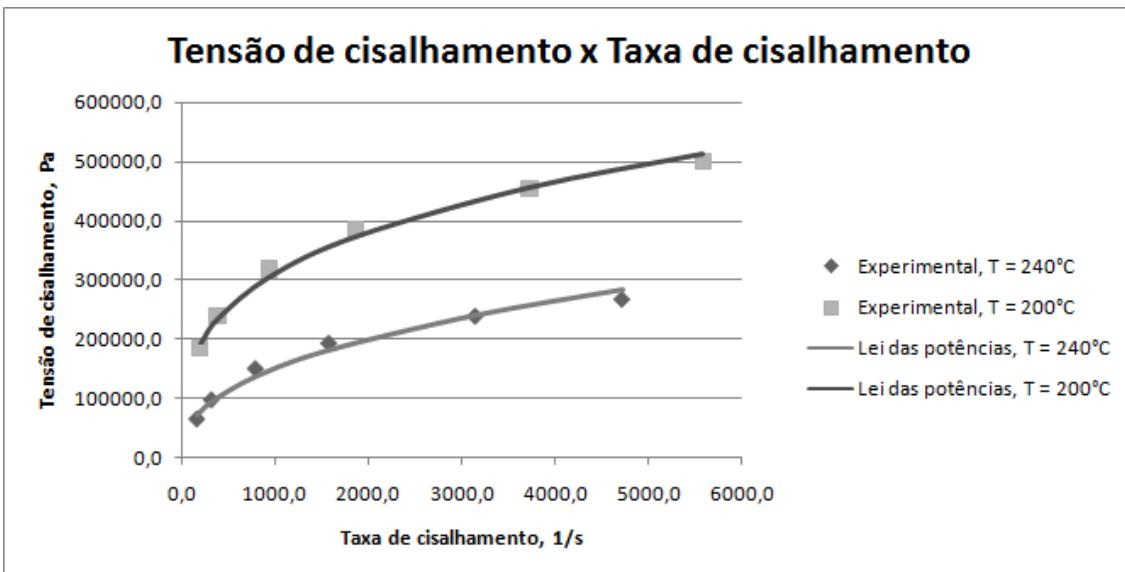


Figura 61: Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento

8 Simulação numérica do cabeçote de extrusão

Durante todo este projeto, foram realizadas hipóteses simplificadoras, e em alguns momentos, não houveram interações entre todos os fenômenos físicos presentes no real funcionamento da máquina.

Com o objetivo de ser mais fiel à realidade, nesta seção será realizada uma análise mais completa do sistema, estimando seu comportamento em determinadas situações.

A simulação realizada utiliza três materiais, a água, como fluido de refrigeração, o ABS P430, cujas algumas propriedades foram obtidas experimentalmente, e o aço inoxidável Corroplast, material de construção do sistema. Como condições de contorno térmicas, as paredes externas estão sob convecção, cujos coeficientes de transferência de calor foram calculados anteriormente neste trabalho, e a parede do aquecedor se mantém a uma temperatura constante de 260 °C (~ 533 K). Também foi suposto contato térmico ideal entre a rosca do aquecedor e da câmara.

A temperatura do ABS na entrada do sistema é de 20 °C (~ 293 K), e a sua vazão volumétrica é de 2,24 mm³/s. Sua saída está a pressão atmosférica. Para a entrada do fluido refrigerante, a água, foi suposta uma vazão de 0,000278 kg/s (~ 1 kg/hr) à 40 °C (~ 313K), e para a saída, a pressão atmosférica.

Na primeira subseção, são apresentados os resultados quanto à queda de pressão, importante para o dimensionamento do motor de alimentação. Na segunda, são discutidos os resultados dos perfis de velocidade, enquanto na terceira os resultados térmicos são apresentados e, finalmente, na quarta, uma breve discussão sobre a viscosidade.

8.1 Estimativa da queda de pressão

A queda de pressão total no sistema é uma variável de extrema importância para o projeto da máquina FDM como um todo, pois o motor que irá controlar o fluxo de polímero terá que ser capaz de suportar esta perda. Caso o motor não tenha a potência necessária, podem ocorrer oscilações no fluxo polimérico, o que causará imperfeições na peça produzida.

Através dos dados coletados experimentalmente sobre o comportamento da viscosidade em relação à taxa de cisalhamento e à temperatura, foi realizada uma simulação para determinar a queda de pressão no sistema.

O valor encontrado para perda de carga através de todo o sistema foi de 3,8 MPa, Figura 62. Entretanto, em termos de seleção de motores, este valor não é muito significativo sozinho. Sabe-se que o diâmetro do filamento pode chegar a 3,5 mm, ou seja, ele apresenta uma área transversal de 12,25 mm². Desta forma, a força necessária para criar 3,8 MPa de pressão é o produto da pressão e área, cujo valor é 46,6 N.

A potência necessária do motor é simplesmente a velocidade de alimentação do fio multiplicada pela força. Para a vazão de projeto, a velocidade de alimentação é de 0,183 mm/s, assim, tem-se que a potência necessária é de $8,5 \cdot 10^{-3}$ W. Apesar desta potência ser extremamente baixa, não sendo o fator de seleção mais adequado, existem outros fatores decisivos na escolha do motor, como peso e precisão no deslocamento angular, além do sistema de redução necessário que deverá ser acoplado no motor.

Na Figura 62 está apresentada a distribuição de pressão resultante da simulação. Como se pode notar, a queda de pressão é dada basicamente pelo bocal, sendo praticamente constante acima do mesmo.

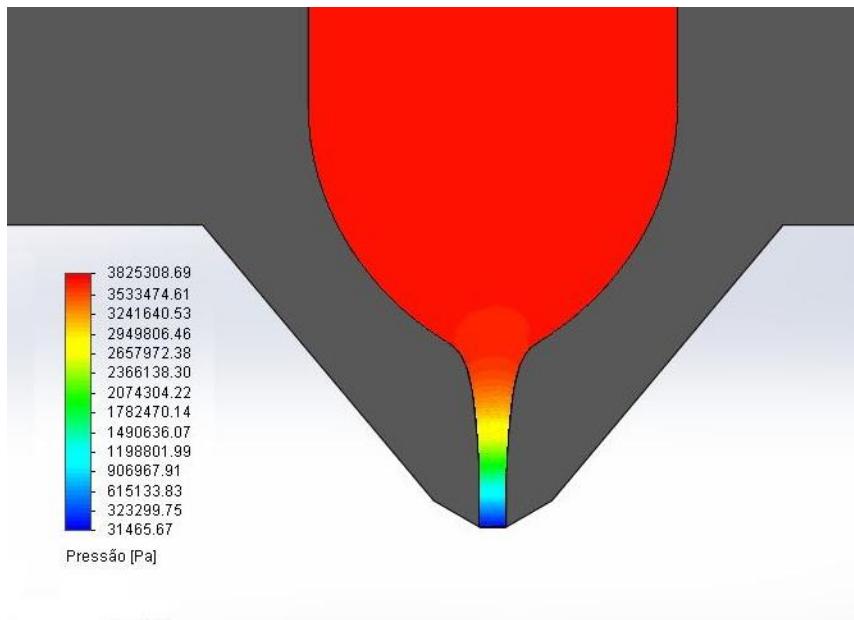


Figura 62: Distribuição de pressão na câmara

8.2 Distribuição de velocidade no polímero

A Figura 63 e a Figura 64 ilustram o campo de velocidades do polímero no sistema. Na Figura 63 está detalhada a zona do bocal, onde se observa que o comprimento do bocal foi suficiente para criar um perfil de velocidade totalmente desenvolvido, diminuindo as acelerações e, portanto, as tensões atuantes no material.

Na Figura 64 a escala de velocidades foi ajustada de modo a ilustrar melhor o comportamento do polímero na entrada da zona de convergência, região crítica para a estagnação de material. Observa-se que a região de menor velocidade, em azul, se estende desde o topo da câmara até a zona de convergência de maneira quase uniforme, não havendo nenhuma zona com uma grande região de baixa velocidade. Esta zona de baixa velocidade é devida a condição de contorno de não escorregamento na parede e

não deve ser interpretada como uma zona de estagnação. Portanto, conclui-se que não foi observada estagnação na simulação.

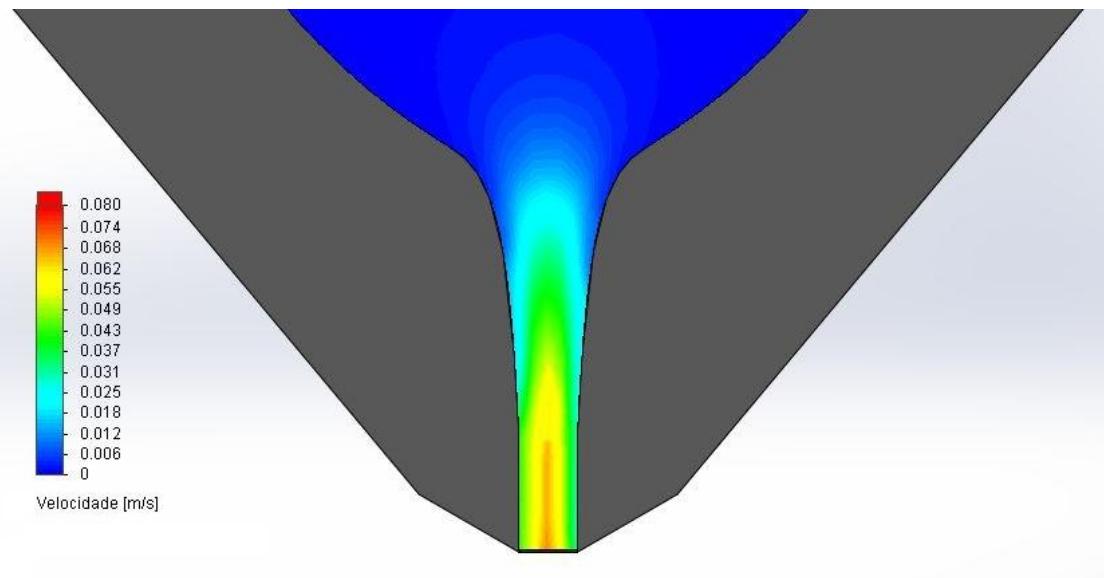


Figura 63: Perfil de velocidade no bocal

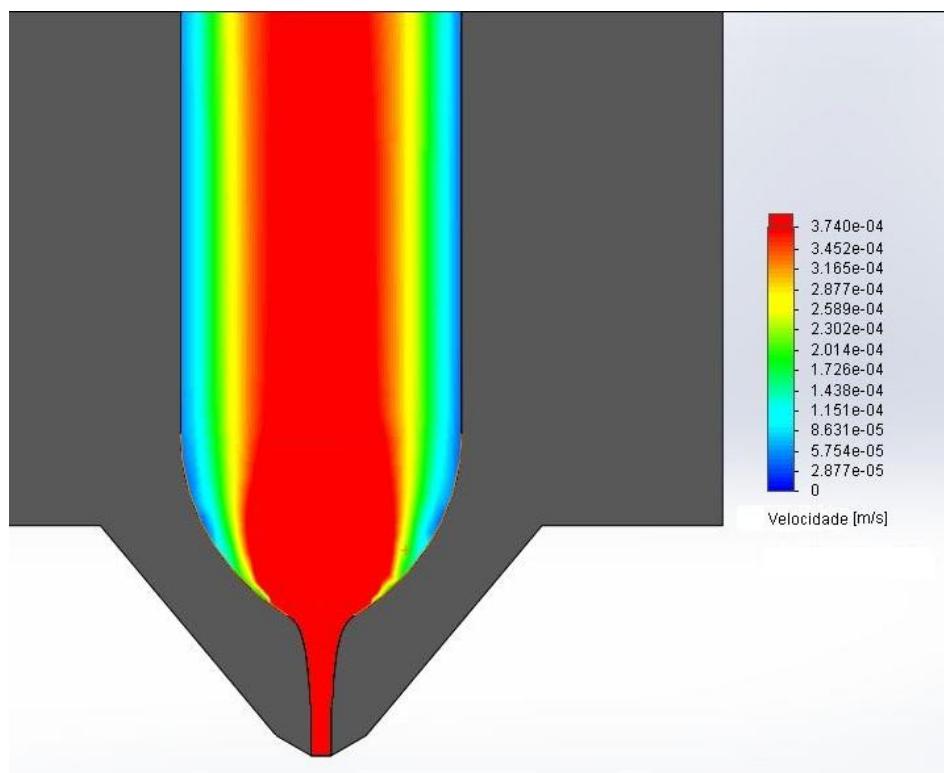


Figura 64: Perfil de velocidade na câmara

8.3 Distribuição de temperatura no sistema

A temperatura é uma das variáveis mais importantes neste projeto, visto que só há o processamento do polímero controlado se a temperatura for devidamente controlada.

A Figura 65 apresenta de forma generalizada a distribuição de temperatura no sistema em regime permanente. Observa-se uma variação de temperatura pequena entre o aquecedor e o polímero. Na região do apoio do tubo guia de PTFE a temperatura máxima é de 59 °C (~ 332 K), muito abaixo da temperatura de plastificação do ABS (~ 160 °C) e da temperatura mínima de uso do PTFE (~ 260°C). Somente na região de transição entre as cores verde e amarela ocorre a plastificação. Também nota-se uma distribuição de temperatura aproximadamente uniforme no polímero.

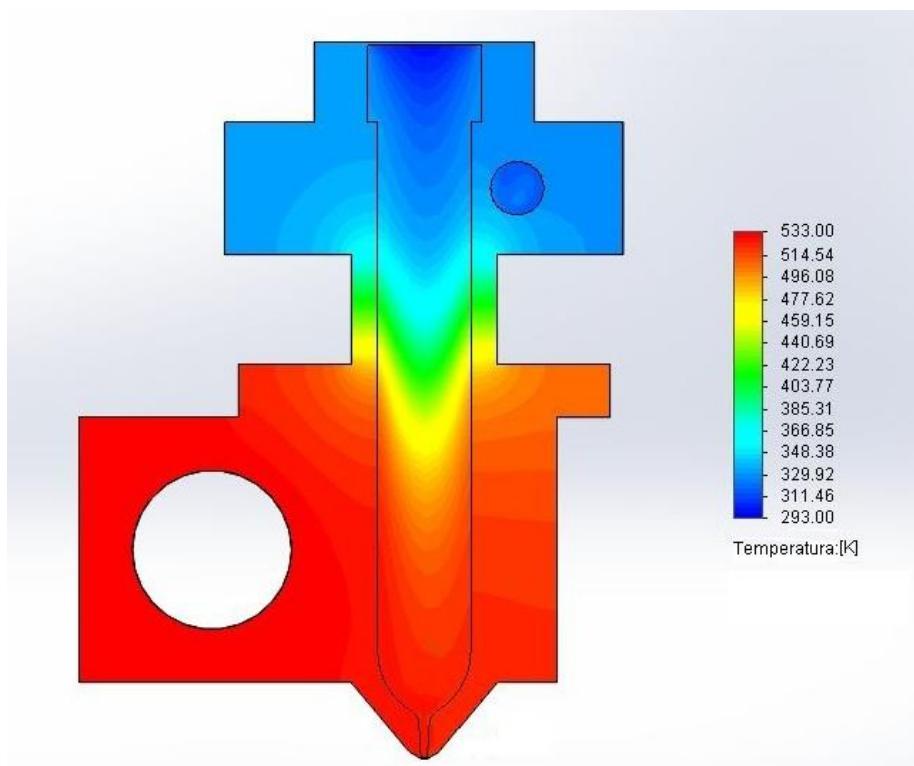


Figura 65: Distribuição de temperatura no sistema

Apesar de na Figura 65 a saída do bocal parecer estar a uma temperatura constante, a faixa de temperatura da legenda está muito grande, desta forma, por mais que tudo esteja com a cor vermelha, a temperatura ainda pode variar entre 515 K e 533 K. A Figura 66 mostra a distribuição de temperatura na seção transversal do bocal imediatamente antes do final do mesmo, portanto mostra o perfil de temperatura do perfil extrudado.

A temperatura média na seção é de 252 °C (~ 525 K), 8 °C abaixo da temperatura do aquecedor, e a variação é de apenas 1°C, entre 251°C e 252°C, indicando uma excelente distribuição. Pode-se ressaltar que a área mais aquecida é resultante da maior proximidade com a resistência de aquecimento.

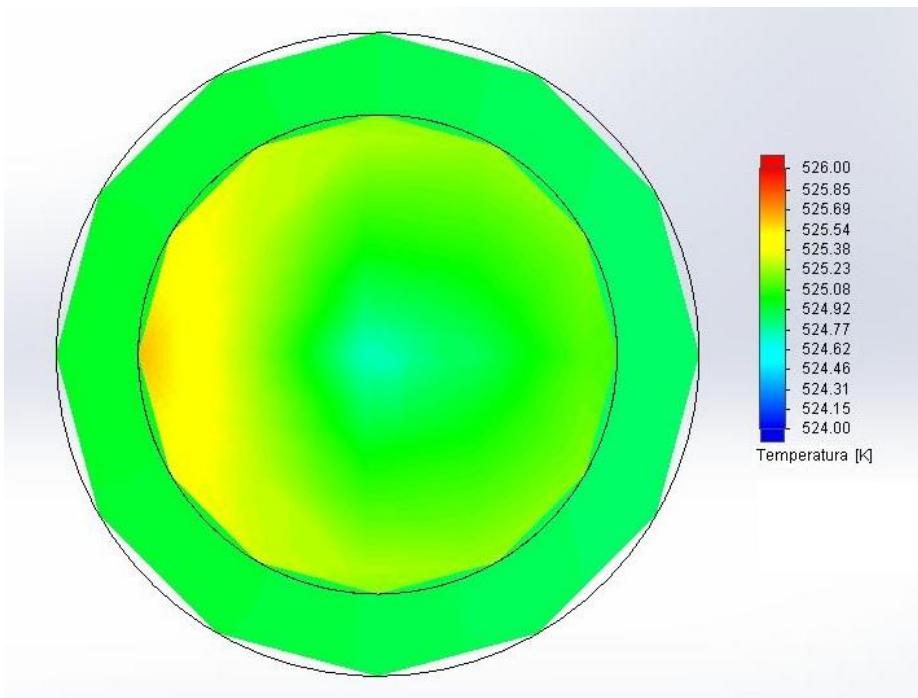


Figura 66: Distribuição de temperatura na saída do bocal

É importante relacionar a temperatura no sensor de temperatura com a temperatura de extrusão do polímero, portanto, um corte na seção do sensor de temperatura está ilustrado na Figura 67. Observa-se uma variação de 4°C ao redor do sensor, com uma temperatura média de 252 °C (~ 525 K), idêntica a de saída do polímero. Porém, uma variação de 4 °C é aceitável, mas não ideal. Esta variação pode ser diminuída utilizando um melhor condutor, como o latão. Além disso, espera-se que a temperatura ao longo de todo o aquecedor seja ligeiramente maior e com menor variação, pois a rosca apresenta uma resistência à condução, diminuindo a temperatura do polímero e mantendo maior quantidade de calor no aquecedor.

Na Figura 68 estão ilustrados os perfis de velocidade e de temperatura do fluido refrigerante. Observa-se um aumento de temperatura de 10 °C na água, e ao mesmo tempo uma distribuição de temperatura razoavelmente uniforme no polímero e na estrutura.

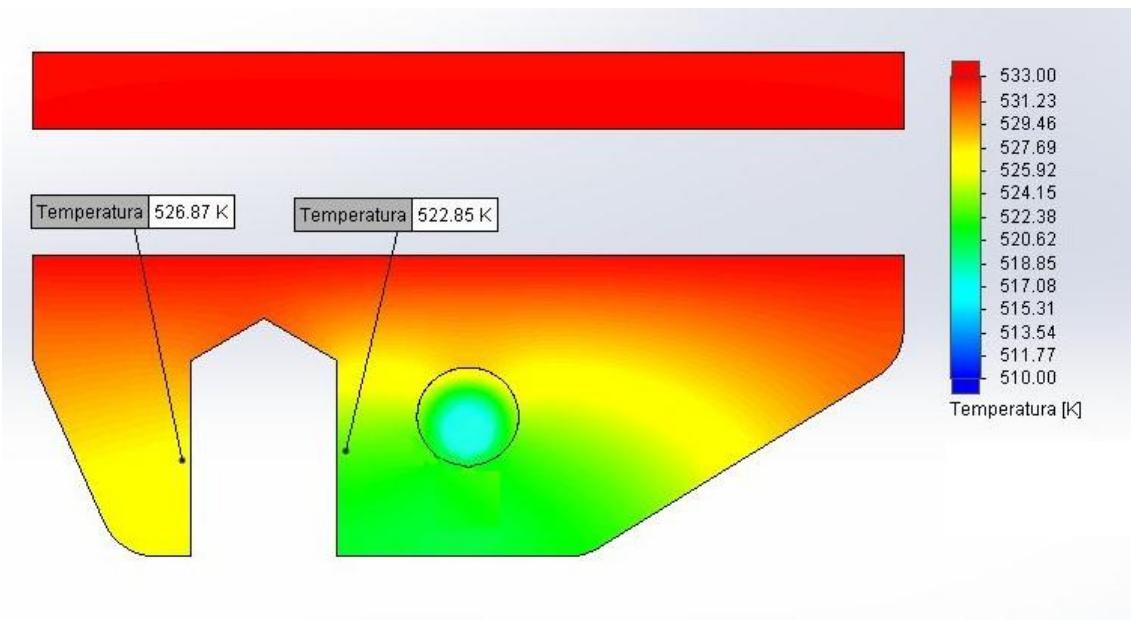


Figura 67: Distribuição de temperatura no sensor de temperatura

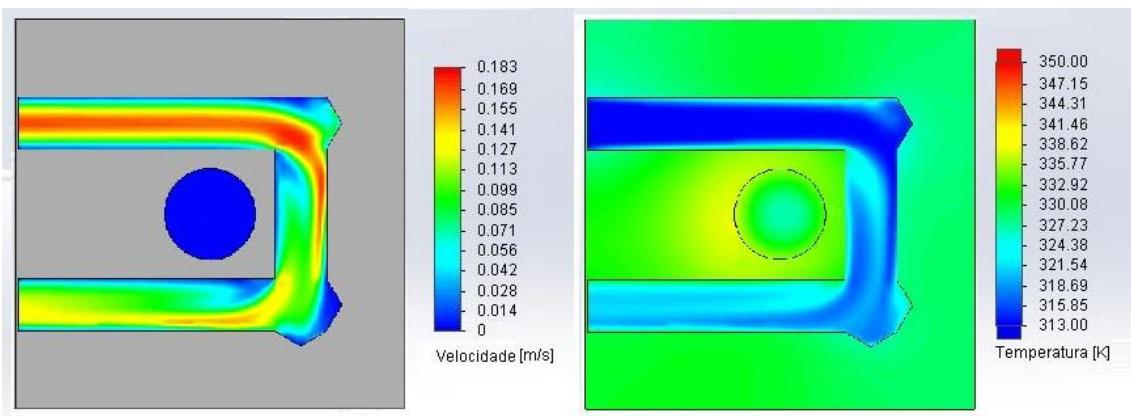


Figura 68: Distribuição de velocidade e de temperatura do fluido refrigerante

8.4 Distribuição da viscosidade e da taxa de cisalhamento

Conforme Figura 69, a viscosidade varia de 76 Pa.s até 996 Pa.s. Ao lado esquerdo, ilustrando o sistema total, percebe-se uma grande queda na viscosidade logo na entrada do aquecedor, esta queda de viscosidade está relacionada à plastificação do material. Já no lado direito, o detalhe mostra outra queda, mas desta vez devido ao aumento da taxa de cisalhamento no polímero. A distribuição da taxa de cisalhamento está apresentada na Figura 70, cujo valor máximo é de aproximadamente 1700 1/s.

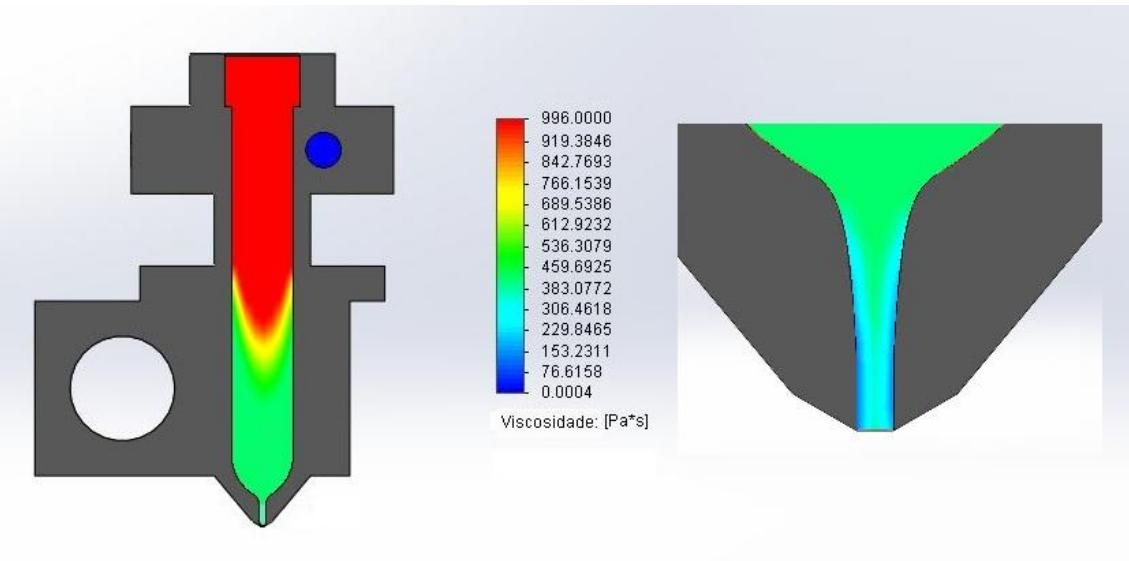


Figura 69: Distribuição da viscosidade

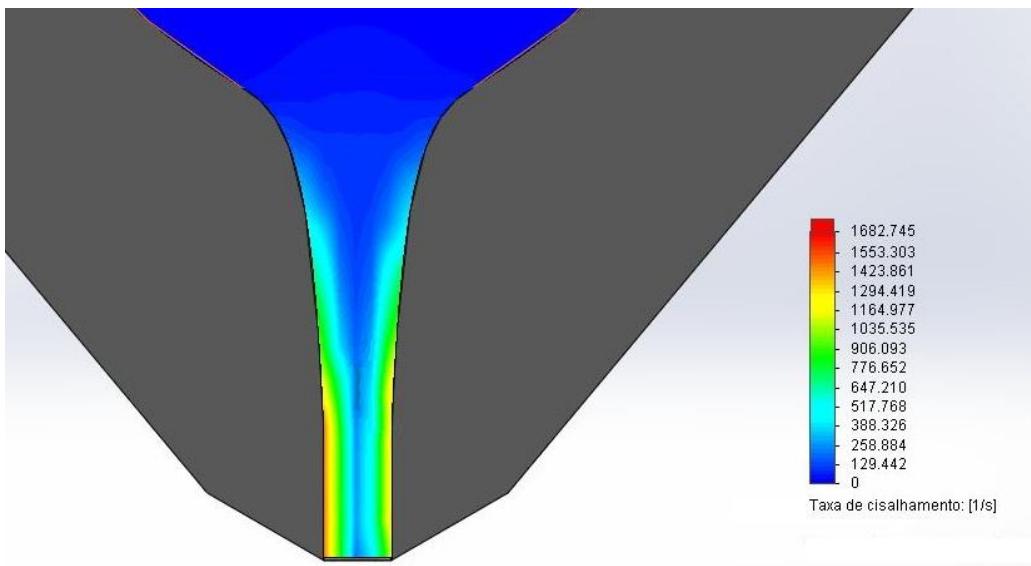


Figura 70: Distribuição da taxa de cisalhamento

9 Conclusões, comentários e sugestões

Devido à demanda crescente de processos mais versáteis e eficientes para atender às novas necessidades da indústria e da sociedade, o desenvolvimento deste projeto é importante como precursor de processos de manufatura aditiva, visto que a literatura técnica destes processos é escassa.

Foi reservado um espaço neste trabalho para discussão sobre as tecnologias de prototipagem rápida, introduzindo-as e comparando-as, servindo como base para trabalhos futuros nessa área.

A tecnologia focada neste projeto, a FDM, foi largamente discutida, não somente em torno do cabeçote extrusor, mas em todos os seus aspectos, facilitando assim a continuidade deste trabalho para o desenvolvimento de uma máquina FDM completa.

Quanto ao cabeçote extrusor, o projeto mecânica realizado, este foi profundamente estudado, levando diversos aspectos em consideração, como estudos térmicos, mecânicos, da fabricação e do escoamento não-newtoniano, resultando em um trabalho completo. Desta forma, o projeto aqui desenvolvido deverá ser fabricado seguindo as especificações definidas, e depois testado para a posterior integração com o resto do sistema.

Apesar dos cuidados tomados durante o projeto, existem diversas incertezas tanto sobre os materiais utilizados, quanto à validade das hipóteses realizadas. Portanto, recomenda-se que em trabalhos futuros sejam feitos experimentos para validar os resultados aqui obtidos e para que possam ser feitos os ajustes necessários para o pleno funcionamento da máquina.

Além do aprimoramento deste trabalho, a maior sugestão deste autor é, após o pleno entendimento das características básicas da tecnologia, a pesquisa sobre as futuras aplicações dela, como, por exemplo:

- Utilização de um bocal com diâmetro variável, permitindo uma melhor qualidade externa da peça, e ao mesmo tempo um rápido preenchimento da mesma.
- Inserção de fibras na extrusão para o aumento da resistência mecânica da peça.
- Fabricação de peças metálicas com o FDM.
- Extrusão de diferentes materiais pelo mesmo bocal.

10 Referências

- [1] WILLIANS, C. *Additive Manufacturing Course Manual*. Departamento de Engenharia Mecânica, Virginia Tech, Virginia. 2011.
- [2] RELVAS, C.A.M. *Processos de prototipagem rápida no fabrico de modelos de geometria complexa: estudo realizado sobre o modelo anatômico da mão*. 2002. 121 f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2002.
- [3] LAFRATTA, F. H. *Uso de fluido refrigerante, temporariamente confinado, em ferramental rápido para a injeção de termoplásticos*. 2004. 180 f. Tese de Doutorado – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- [4] GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. 1ed. New York. Springer. 2010.
- [5] SOUZA, T. R.; VOLPATO, N.; MENEZES, R. M. *Um Aplicativo para o Processamento de Geometria de Prototipagem Rápida*. XIX Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – CRICTE. Curitiba-PR. 2004.
- [6] HOPKINSON, N.; HAGUE, R.J.M.; DICKENS P.M. *Rapid manufacturing : an industrial revolution for the digital age*. 1ed. Chichester. Jons Wiley & Sons Ltd. 2006.
- [7] KAI, C. C.; JACOB, G. K.; MEI, T. *Interface between CAD and Rapid Prototyping systems*. Part1: a study of existing interfaces. Advanced Manufacturing Technology, v.13, p.566-570, 1997.
- [8] PHAM, D. T.; GAULT, R. S. *A Comparison of Rapid Prototyping technologies*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.38, p.1257-1287, 1998.
- [9] KAMINSKI, P. C. *Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade*. Rio de Janeiro. LTC Editora. 2000.

- [10] UPCRAFT, S.; FLETCHER, R. *The Rapid Prototyping technologies*. Rapid Prototyping Journal, v.23, n. 4, p.318-330., 2003.
- [11] VOLPATO, N.; AHRENS, C. H.; FERREIRA, C. V.; PETRUSH, G.; CARVALHO, J.; SANTOS, J. R. L.; SILVA, J. V. L. *Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações*. São Paulo. Edgard Blücher. 2007.
- [12] BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. *Product Design for Manufacture and Assembly*. New York. Marcel Dekker Inc. 1994.
- [13] ARUP. Disponível em: <www.arup.com>. Acesso em: 12 set. 2012.
- [14] DELPHI. Disponível em: <<http://delphi.com/>>. Acesso em: 13 set. 2012.
- [15] WILLIANS, C.B.; MISTREE, F.; ROSEN, D.W. *A Functional Classification Framework for the Conceptual Design of Additive Manufacturing Technologies*. Journal of Mechanical Design, Vol. 133 Iss: 12 p.121002(11). 2011.
- [16] SILVA, G.C. *Prototipagem rápida e ferramental rápido aplicados às peças utilizadas em ensaios estáticos de embalagens para acondicionamento e transporte de peças automotivas*. 2008. 154 f. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- [17] STRATASYS. Disponível em: <<http://www.stratasys.com>>. Acesso em: 24 out. 2012.
- [18] CUNICO, M.W.M. Estudo da viabilidade de tecnologia de prototipagem rápida baseada em materiais fotopoliméricos extrudados. 2008. 176 f. Dissertação de Mestrado – Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2008.
- [19] BRAANKER, G.B.; DUWEL, J.E.P.; FLOHIL, J.J.; TOKAYA, G.E. *Developing a plastics recycling add-on for the RepRap 3D Printer*. Prototyping Lab Report IO3028. Delft University of Technology. Delft, Holanda. 2011.

- [20] RepRap Granule Extruder. Disponível em:
<<http://reprap.org/wiki/GranuleExtruder>>. Acesso em: 24 out. 2012
- [21] MANRICH, S. *Processamento de Termoplásticos: Rosca Única, Extrusão e Matrizes, Injeção e Moldes*. 1ed. São Paulo. Artliber Editora Ltda. 2005.
- [22] REPRAP COMMUNITY. Disponível em <<http://reprap.org>>. Acesso em: 24 out. 2012
- [23] YARDIMCI, M.A.; GUÇERİ, S. *Conceptual framework for the thermal process modelling of fused deposition*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 2 Iss: 2 pp. 26 – 31. 1996.
- [24] BELLINI, A.; GUÇERİ, S. *Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 9 Iss: 4 pp. 252 – 264. 2003.
- [25] AHN, S.H.; MONTERO, M.; ODELL, D.; ROUNDY, S.; WRIGHT, P.K. *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*. Rapid Prototyping Journal, Vol. 8 Iss: 4 pp. 248 – 257. 2002.
- [26] DEALY, J.M.; WISSBRUN, K.F. *Melt Rheology and its role in plastics processing: theory and applications*. 1 ed. New York. Van Nostrand Reinhold. 1990.
- [27] MORALES, G. *Projeto de Moldes para Termoplásticos*. Escola Protec. São Paulo. 2009.
- [28] Dimension Printing. Disponível em: <<http://www.dimensionprinting.com>>. Acesso em: 20 set. 2012.
- [29] Laboratório PROPME. Disponível em: <<http://www.propme.pep.ufrj.br>>. Acesso em: 17 nov. 2012.

[30] Câmera EOS REBEL T3. Disponível em <http://www.usa.canon.com/cusa/consumer/products/cameras/slr_cameras/eos_rebel_t3_18_55mm_is_ii_kit#Features>. Acesso em: 23 nov. 2012.

[31] Laboratório de Processamento Termomecânico – TERMIC. Disponível em: <<http://www.metalmat.ufrj.br/laboratorios/laboratorio-de-processamento-termomecanico-bio-materiais-termic-1/>>. Acesso em: 25 nov. 2012.

[32] Software Image Pro Plus 6.0. Disponível em: <<http://www.mediacy.com/index.aspx?page=IPP>>. Acesso em: 03 dez. 2012.

[33] Fornecedores de filamentos de ABS. Disponível em: <http://www.reprap.org/wiki/Printing_Material_Suppliers>. Acesso em: 9 jan. 2013.

[34] OLABISI, O. *Handbook of Thermoplastics*. 1ed. New York. Marcel Dekker. 1997.

[35] SORS, L.; BASDÓCZ, L.; RADNÓTI,I. *Plásticos: moldes & matrizes*. 1 ed. São Paulo. Hemus Editora Ltda. 1981.

[36] QAISER, A.A.; QAYYUM, Y.; RAFIQ, R. *Rheological Properties of ABS at Low Shear Rates: Effects of Phase Heterogeneity*. Polymer Journal, Vol. 4, No.2, p29 -36. 2009.

[37] CRACKNELL,P.S., DYSON, R.W., *Handbook of thermoplastics injection mould design*, 1 ed. Universidade de Michigan. Editora Blackie Academic & Professional. 1993.

[38] INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6 ed. Universidade de Michigan. Wiley. 2008.

[39] ÇENGEL, Y.A. *Heat transfer: a practical approach*. 2 ed. Ohio. McGraw-Hill. 2003.

[40] BELLEHUMEUR, C.; LI, L.; SUN, Q.; GU, P. *Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process*. Journal of Manufacturing Processes, Vol. 6, No.2, p170-178. 2004.

[41] Alloywire. Disponível em: <<http://www.alloywire.com/portuguese/index.html>>. Acesso em: 26 jan. 2013.

[42] Technoheat. Disponível em: <<http://www.tecnoheat.com.br>>. Acesso em: 23 jan. 2013.

[43] Alutal. Disponível em: <<http://www.alutal.com.br>>. Acesso em: 28 jan. 2013.

[44] Contemp. Disponível em: <<http://www.contemp.com.br>>. Acesso em: 30 jan. 2013.

[45] LAPTEC. Disponível em: <<http://www.ima.ufrj.br/laptec>>. Acesso em: 28 fev. 2013.

ANEXO I

Especificação da impressora 3D Dimension Elite

Whatever you imagine, there's a Dimension 3D Printer to build it.



Print 3D models that hold up under pressure.

All Dimension 3D Printers use ABSplus, a production-grade thermoplastic that gives your models the ability to perform just like production parts.

The core of every model: FDM® Technology.

Our proven technology has made Dimension the number one selling 3D Printer family for more than ten years. Stratasys FDM (Fused Deposition Modeling) Technology is the foundation for all Dimension 3D Printers. Two materials — one for models, one for support — are heated in an extrusion head and deposited in thin layers on a modeling base. The model is precisely built layer upon layer. When the model is complete, the support material is removed leaving an accurate, durable functional 3D model.

For more information about Dimension 3D Printers, contact a reseller at **+1 866 721 9244** or visit www.dimensionprinting.com

	Dimension 1200es 3D Print Pack	Dimension Elite 3D Print Pack	Dimension 1200es BST
Build Envelope	254 x 254 x 305 mm (10 x 10 x 12 in)	203 x 203 x 305 mm (8 x 8 x 12 in)	254 x 254 x 305 mm (10 x 10 x 12 in)
Size and Weight	838 x 737 x 1143 mm (33 x 29 x 45 in) 148 kg (326 lbs)	686 x 914 x 1041 mm (27 x 36 x 41 in) 136 kg (300 lbs)	838 x 737 x 1143 mm (33 x 29 x 45 in) 148 kg (326 lbs)
Layer Thickness	.254 mm (.010 in) or .330 mm (.013 in)	.178 mm (.007 in) or .254 mm (.010 in)	.254 mm (.010 in) or .330 mm (.013 in)
Modeling Material	ABSplus in ivory, blue, fluorescent yellow, black, red, nectarine, olive green, gray or white. 	ABSplus in ivory, blue, fluorescent yellow, black, red, nectarine, olive green, gray or white. 	ABSplus in ivory, blue, fluorescent yellow, black, red, nectarine, olive green, gray or white. 
Support Material	Soluble or breakaway.	Soluble only.	Breakaway only.
Price	1200es SST: \$32,900 (€24.370)* 1200es SST Print Pack \$34,900 (€25.900)*	Elite: \$29,900 (€22.150)* Elite Print Pack: \$31,900 (€23.700)*	1200es BST: \$24,900 (€18.500)*

*Manufacturer's worldwide list price. Additional options, shipping and applicable taxes/VAT/duties not included.

Dimension 3D Printers
Stratasys Inc.
7665 Commerce Way
Eden Prairie, MN 55344-2020 U.S.A.
+1 866 721 9244 (US Toll Free)
+1 952 937 3000
+1 952 937 0070 (Fax)
www.dimensionprinting.com
info@dimensionprinting.com
ISO 9001:2008 Certified

Dimension 3D Printers
Stratasys GmbH
Weismüllerstrasse 27
60314 Frankfurt am Main
Germany
+49 69 420 9943 0 (Tel)
+49 69 420 9943 33 (Fax)
www.stratasys.com
europe@stratasys.com

©2012 Stratasys Inc. All rights reserved.
Stratasys, Dimension, Catalyst and FDM are registered trademarks and Fused Deposition Modeling, FDM Technology and ABSplus are trademarks of Stratasys Inc., registered in the United States and other countries. Product specifications subject to change without notice.
Printed in the USA. DFB0412

 STRATASYS®

ANEXO II

Tabela com as coordenadas internas do bocal

Ponto	X (mm)	Y (mm)
1	1,750	4,508
2	1,750	4,408
3	1,750	4,308
4	1,750	4,208
5	1,750	4,108
6	1,750	4,008
7	1,748	3,908
8	1,742	3,808
9	1,732	3,708
10	1,718	3,608
11	1,699	3,508
12	1,677	3,410
13	1,651	3,314
14	1,621	3,218
15	1,588	3,124
16	1,550	3,032
17	1,509	2,940
18	1,465	2,851
19	1,417	2,763
20	1,366	2,677
21	1,312	2,593
22	1,255	2,511
23	1,195	2,431
24	1,132	2,353
25	1,066	2,278
26	0,997	2,205
27	0,926	2,135
28	0,853	2,067
29	0,777	2,002
30	0,699	1,939
31	0,618	1,880
32	0,536	1,823
33	0,434	1,758
34	0,375	1,718
35	0,326	1,668

Ponto	X (mm)	Y (mm)
36	0,293	1,618
37	0,268	1,568
38	0,248	1,518
39	0,233	1,468
40	0,220	1,418
41	0,209	1,368
42	0,199	1,318
43	0,191	1,268
44	0,183	1,218
45	0,177	1,168
46	0,171	1,118
47	0,165	1,068
48	0,160	1,018
49	0,156	0,968
50	0,152	0,918
51	0,148	0,868
52	0,144	0,818
53	0,141	0,768
54	0,138	0,718
55	0,135	0,668
56	0,132	0,618
57	0,130	0,568
58	0,127	0,518
59	0,127	0,508
60	0,127	0,457
61	0,127	0,406
62	0,127	0,355
63	0,127	0,304
64	0,127	0,253
65	0,127	0,202
66	0,127	0,151
67	0,127	0,100
68	0,127	0,049
69	0,127	0,000

ANEXO III

Especificação do aço inoxidável Corroplast

Corroplast

Aço Endurecido por Precipitação Resistente à Corrosão de Usinagem Fácil para Moldes de Plásticos

O novo aço CORROPLAST é endurecido por precipitação (fornecido na dureza de aproximadamente 320 HB), possui excelente resistência à corrosão aliada a uma excelente usinabilidade. Devido aos baixos teores de carbono também tem excelente soldabilidade sendo indicado para bases de moldes, moldes com baixa exigência de polibilidade e em operações onde a resistência à condensação e à água de refrigeração (tais como bases para câmaras quentes) são requisitados.

Propriedades Físicas

Coefficiente de Expansão Térmica (10^{-6} m/(m.K))	Endurecido por Precipitação
20-100 °C	10,3
20-200 °C	10,9
20-300 °C	11,2
20-400 °C	11,6
20-500 °C	12,0

Condutividade Térmica (°C)	(W/(m.K))
23 °C	24,6
150 °C	25,7
350 °C	25,7

Densidade (g/cm³)	
20 °C	7,7

Temperatura em	Módulo de Elasticidade (MPa)
20 °C	21,8
150 °C	22,5
350 °C	23,8

SCHMOLZ + BICKENBACH

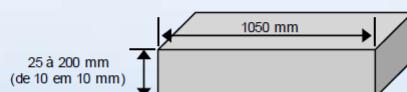
Providing special steel solutions



Composição Química

C%	Mn%	S%	Cr%
0,05%	1,30%	0,15%	12,50%

Dimensões*



* Para dimensões diferentes, consulte o Depto. de Vendas da Schmolz+Bickenbach

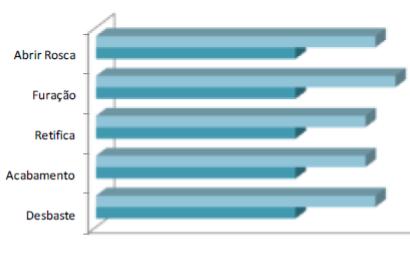
Tratamento Térmico

CORROPLAST é endurecido por precipitação, com dureza aproximada de 32 HRC. Nenhum tratamento térmico adicional é necessário.

Propriedades mecânicas

Barra Tratada (170 mm de diâmetro)	Endurecido por Precipitação
Límite de Escoamento (MPa)	890
Límite de Resistência (MPa)	1100
Alongamento (%)	13
Redução de Área (%)	42

Usinabilidade do CorroPlast x AISI 420 + S



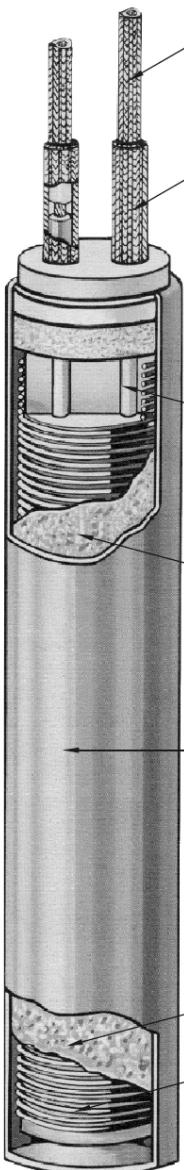
ANEXO IV

Resistência de cartucho

Resistência Cartucho Alta Densidade Série HD



Boletim de Especificações Série HD
Documento N. 8909000.1



Características de Construção

- A - Terminação Standard tipo rabicho flexível de Níquel Puro isolado em fiberglass com verniz anti-alérgico para alta temperatura até 250°C;
- B - Luvas de isolação de fiberglass de alta temperatura com espessura de parede dupla proporciona isolação máxima na saída dos terminais;
- C - Para capacidade máxima de condução de corrente, pinos condutores de Níquel sólido reforçado, são utilizados para assegurar um boa conexão elétrica entre o elemento de aquecimento e o rabicho de ligação;
- D - Isolação em Óxido de Magnésio (MgO) com alto grau de pureza e granulação especialmente selecionada é utilizada para assegurar ótima isolamento elétrica e máxima transferência de calor;
- E - Tubo de blindagem em Aço Cromo Níquel é utilizado para prover boa condutibilidade térmica, resistência à alta temperatura, à corrosão e escamação;
- F - Elemento de aquecimento em fio espiral em NiCr 80/20 classe A é precisamente enrolado sobre o núcleo isolador cerâmico com alto grau de pureza, posicionando o elemento de aquecimento muito próximo da parede interna do tubo de blindagem, e ao mesmo tempo, mantendo a rigidez dielétrica. Esta característica possibilita excelente transferência térmica e resulta em densidades de watts altamente possível e longa vida;
- G - O disco de fundo soldado com TIG provém de ótima vedação contra umidade e outros contaminantes.

Vantagens da Série HD

- ✓ Forma construtiva permite altas densidades de watts em dimensões reduzidas.
- ✓ Alta compactação do isolante sobre o elemento de aquecimento, elimina os efeitos de vibração e choque mecânico.
- ✓ Eficiência máxima de transferência de calor permite aumento de expectativa de vida útil sobre outros tipos de resistências.
- ✓ Vários estilos de terminações e características especiais permite adequação para qualquer aplicação.
- ✓ Densidades de watts até 40 W/cm².

Aplicações Típicas:

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| → Moldes de Câmaras Quentes | → Moldes e Dies de Extrusão |
| → Máquina de Hot Stamping | → Extrusoras de Plásticos |
| → Equipamentos de Empacotamento | → Máquinas para Calçados |
| → Máq. Fabricação de Móveis | → Aquec de Líquidos e Gases |
| → Processamento de Alimentos | → Equipamentos Médicos |

TECHNOHEAT Technologies

Av. Benedito de Lima, nº 346 - Rio Pequeno - 05376-020 - São Paulo - SP.
E-mail:technoheat@technoheat.com.br - www.technoheat.com.br

Tel.: (011) 3714-6644
Fax.: (011) 3714-9622

Atenção: As resistências Cartuchos de Alta Densidade série HD são confeccionadas e testadas de acordo com as rigorosas normas internacionais.

Para melhorar ou maximizar a utilização das Resistências HD, sugerimos contatar nosso Depto de

ANEXO V

Especificação do termopar



Termopares

TERMOPAR FLEXÍVEL - Série TFX



Ideais para a utilização na indústria de transformação de plástico ou em aplicações onde são necessários: facilidade de instalação, fácil remoção e rápido tempo de resposta.

São sensores de baixo custo e podem ser fornecidos com conexões tipo baioneta de fácil e rápida instalação e com a opção rosqueada sobre a mola, permite ajuste no comprimento de inserção.

Principais aplicações em máquinas de injetoras de plástico, extrusoras, Shell molding, máquinas de embalagens, etc.

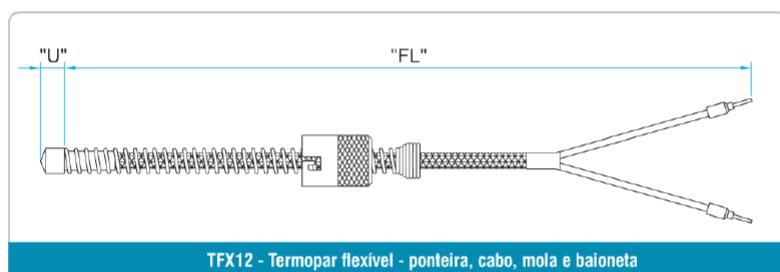


Tabela 1 - Serie TFX

Termopar flexível

Especificar conforme número

Tabela 2 - Ponteira

P304-30 (Ponteira inox 304, Ø3,0mm)

P304-47 (Ponteira inox 304 Ø4,7mm)

P304-60 (Ponteira inox 304 Ø6,0mm)

P304-80 (Ponteira inox 304 Ø8,0mm)

P200-50 (Ponteira latão, Ø5,0mm)

P200-60 (Ponteira latão, Ø6,0mm)

P200-80 (Ponteira latão, Ø8,0mm)

Tabela 3 - Mola

MOL-0 (Sem mola para TFX10)

MOL-1 (Com mola para TFX11 e TFX12)

Tabela 4 - Somente para TFX12

B-01 (Baioneta pequena Ø interno 12,5)

B-02 (Baioneta média Ø interno 14,5)

B-03 (Baioneta grande Ø interno 16,5)

Tabela 5 - Comprimento Rabicho

FL (Especificar em mm)

Tabela 6 - Opções

JTA (Junta de medida alterada)

ADP (Adaptador 1/4" BSP - para TFX12)

Tabela 7 - Cabo extensão

CE001 (Cabo flexivel, tipo J, 24 AWG, isolacão PVC/PVC)

CE002 (Cabo flexivel, tipo J, 24 AWG, isolacão Silicone/Silicone)

CE003 (Cabo flexivel, tipo J, 24 AWG, isolacão Fibra vidro/Fibra vidro)

CE004 (Cabo flexivel, tipo J, 24 AWG, isolacão Teflon/Teflon)

CE005 (Cabo flexivel, tipo J, 24 AWG, isolacão Kapton/Kapton)

CE030 (Cabo flexivel, tipo K, 24 AWG, isolacão PVC/PVC)

CE031 (Cabo flexivel, tipo K, 24 AWG, isolacão Silicone/Silicone)

CE032 (Cabo flexivel, tipo K, 24 AWG, isolacão Fibra vidro/Fibra vidro)

CE033 (Cabo flexivel, tipo K, 24 AWG, isolacão Teflon/Teflon)

CE034 (Cabo flexivel, tipo K, 24 AWG, isolacão Kapton/Kapton)

Tabela 8 - Trança metálica

P00 (Sem trança)

P02 (Trança de cobre estanhado)

P04 (Trança de aço inox)

Tabela 9 - Norma do cabo

ANSI

DIN

Tabela 10 - Comprimento "U"

Especificar em mm*

* comprimento "U" padrão = 7mm



TFX12/P200-80/MOL-1/B-03/FL-1500/CE003-P02/DIN/U:7

Termopar flexível, ponteira em latão Ø8mm com mola, baioneta grande rosqueada sobre a mola, cabo de extensão tipo J (DIN), fibra/fibra com trança de cobre estanhado, comprimento FL=1500mm e U de 7mm.

ANEXO VI

Especificação do controlador de temperatura



Controladores de Temperatura

Os controladores de temperatura C304, C404, C407 e C409 são controladores da série ECONÔMICA. Possuem entrada analógica configurável para termopar J, K e termorresistência Pt-100. Os algoritmos de controle PID + Sintonia Automática são integrados para obtenção de alta precisão no controle. Possuem display de dígitos grandes e de alto brilho, o que facilita a leitura e interpretação das sinalizações, além de proteção dos contatos de acordo com a norma NR10. São utilizados para processos de temperatura menos complexos, mas que também exigem um alto grau de precisão.

Como especificar no pedido

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
C	0			-			S	-		

2 - Display

3	Simples
4	Duplo

4 - Tamanho

4	48x48x116mm
7	72x72x83mm
9	96x96x83mm

6 - Alimentação

4	85 a 265Vca - 47 a 63Hz ou 85 a 265Vcc
5	10 a 30Vca - 47 a 63Hz ou 10 a 30Vcc

7 - Controle

P	Pulso (PWM)
R	Relé

8 - Alarme

P	Pulso (PWM)
R	Relé

9 - Versão de Firmware

S	Standard
---	----------

11 - Certificado de Calibração

0	Nenhum
1	Calibração RBC
2	Calibração Rastreada

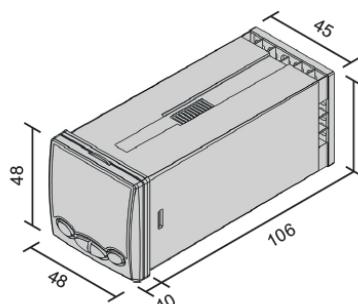
Obs: Tamanho = 7 ou 9, apenas com display duplo.

Características Técnicas

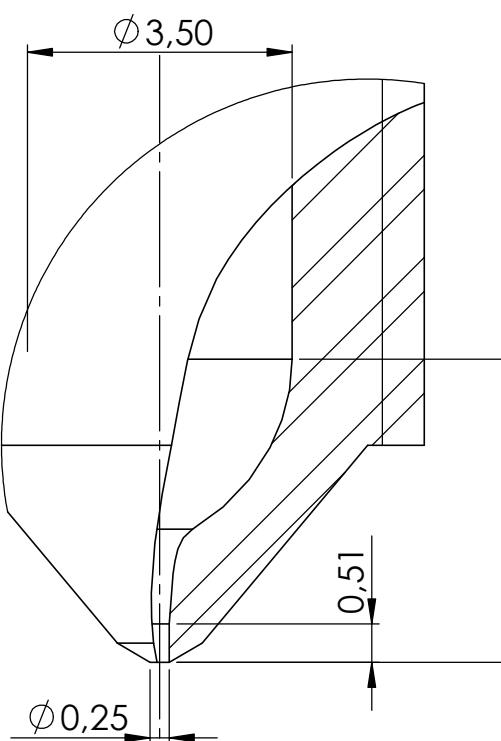
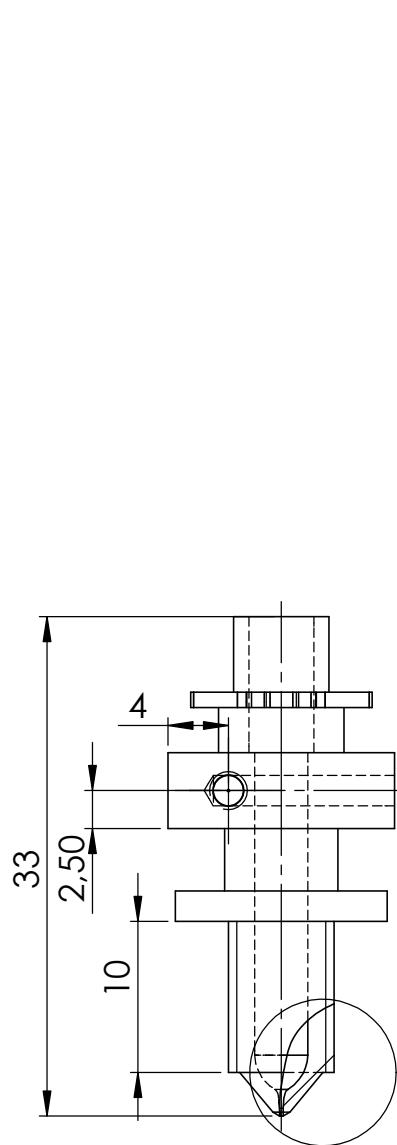
- >Entrada Configurável:
Termopares: J, K
Termorresistência: Pt-100
- >Exatidão da Leitura: ±0,3% fundo de escala, ±1 dígito a 25°C
- >Impedância de Entrada: 10M ohms
- >Conversor A/D: 16 bits de resolução
- >Saída de Controle (Especificar no Pedido):
Relé: SPST - NA 250Vca/3A ou
Pulso: (PWM) 0/24Vcc
- >Ação do Controle: Direta ou reversa
- >Amostragem: 5 medidas por segundo
- >Filtro Digital: off, 1 a 200 segundos
- >Auto-Sintonia dos Parâmetros: P, I e D: manual e automática
- >Proteção do Teclado: 4 níveis de acesso
- >Alarme: 1 relé SPST, 250Vca/3A
- >Alimentação Universal:
85 a 265Vca - 47 a 63Hz ou 85 a 265Vcc - Standard
10 a 30Vca - 47 a 63Hz ou 10 a 30Vcc - Opcional
- >Consumo: 5VA
- >Temperatura de Operação: -10 a 55°C
- >Umidade Relativa: 5 a 95% sem condensação
- >Material da Caixa: Plástico ABS
- >Grau de Proteção: IP65 (no frontal)
- >Proteção dos contatos: Sim (tampa traseira - NR10)
- >Peso Aproximado: 140g (C304 e C404), 170g (C407), 260g (C409)

Dimensões (mm)

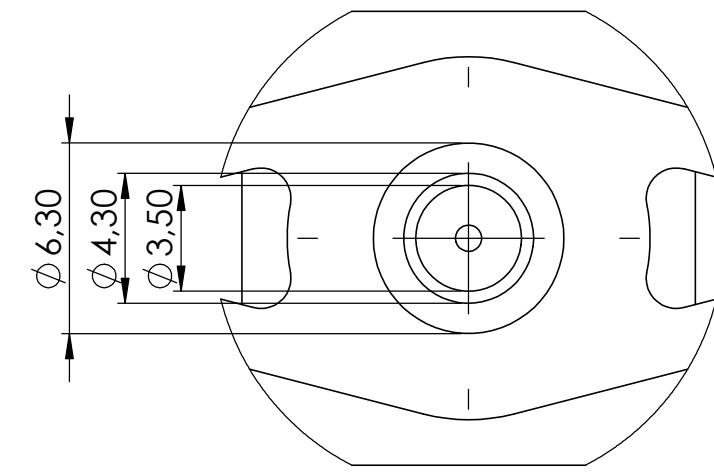
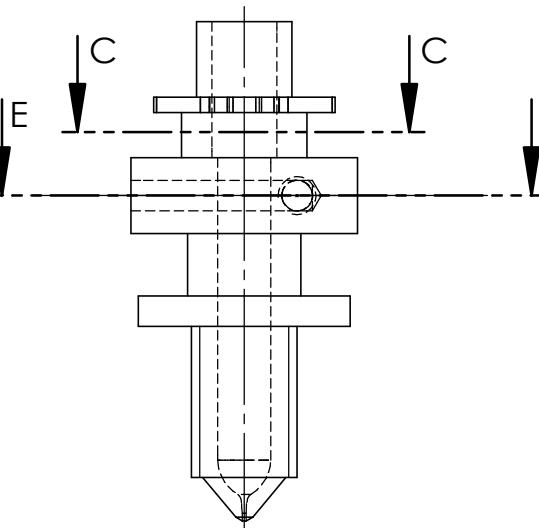
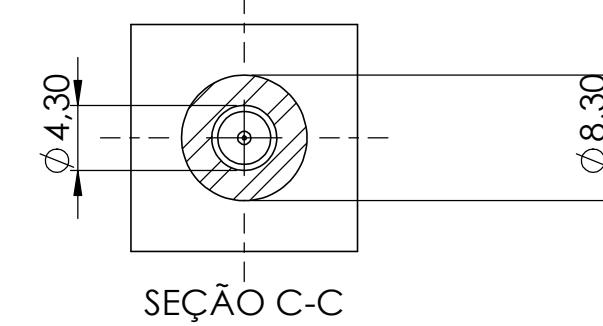
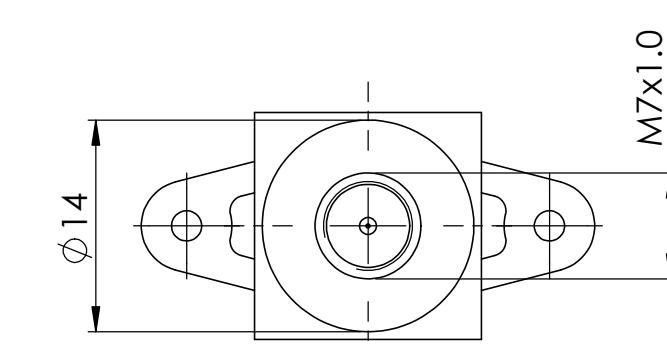
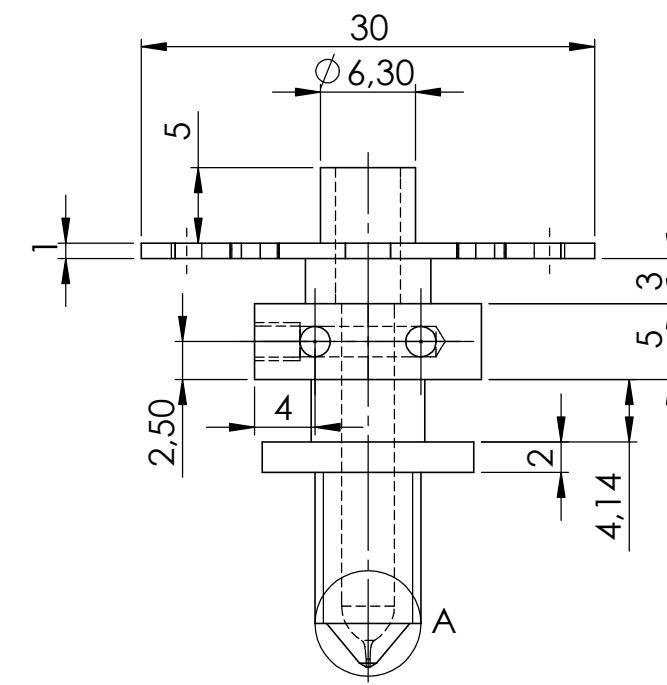
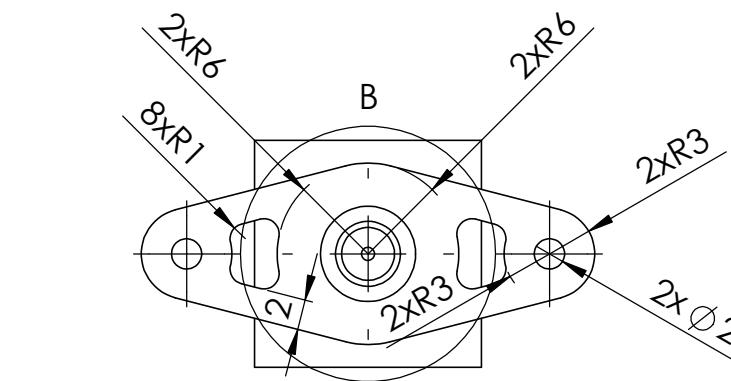
C304 e C404



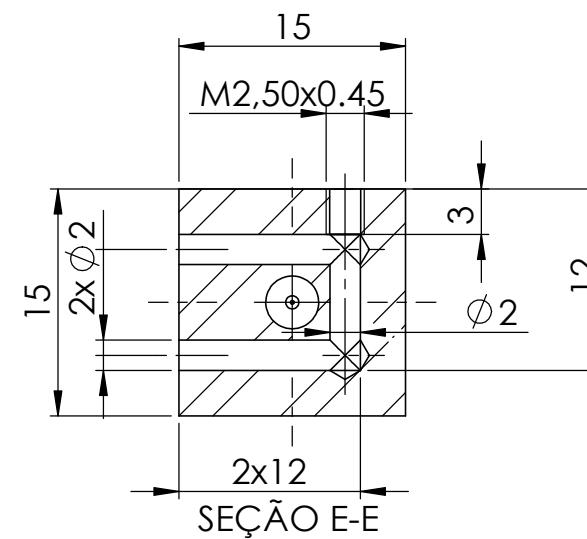
1 2 3 4 5 6 7 8



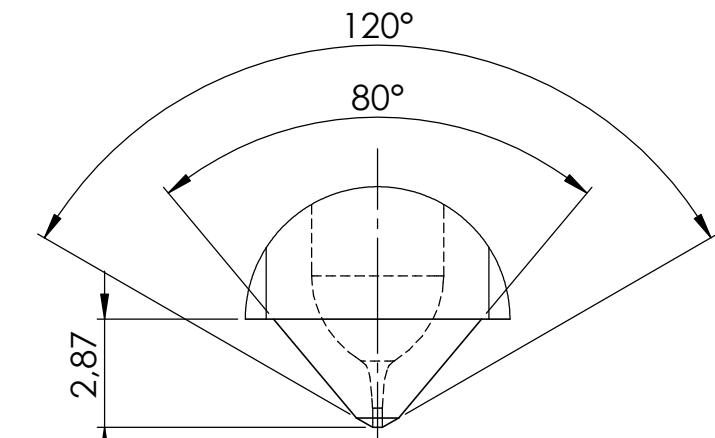
DETALHE F
ESCALA 10 : 1



DETALHE B
ESCALA 4 : 1



SEÇÃO E-E



DETALHE A
ESCALA 5 : 1

SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE: N8
TOLERÂNCIAS: IT8

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

DESENHISTA: Marcus Vinicius Sena Casagrande

NOME: DATA: UFRJ: 3º DIEDRO:

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO | REVISÃO

Sistema: Cabeçote Extrusor

TÍTULO: Cabeçote

DES. Nº

1

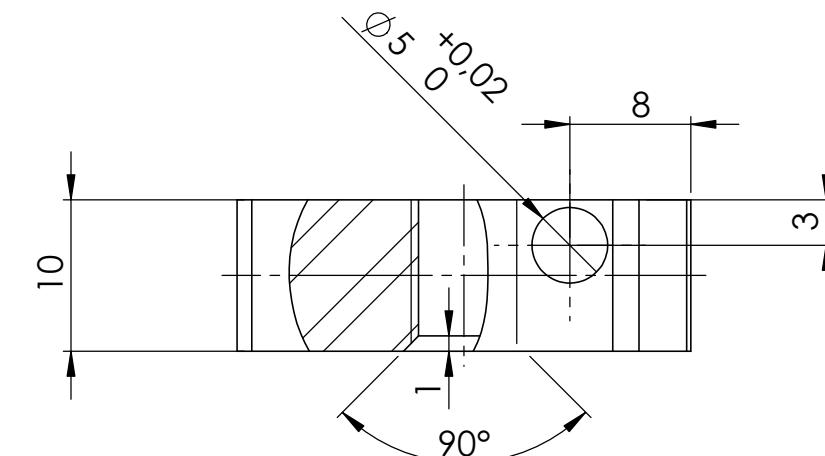
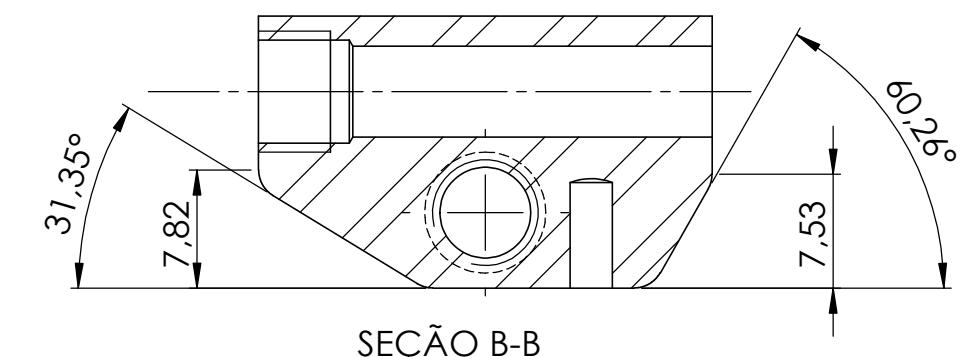
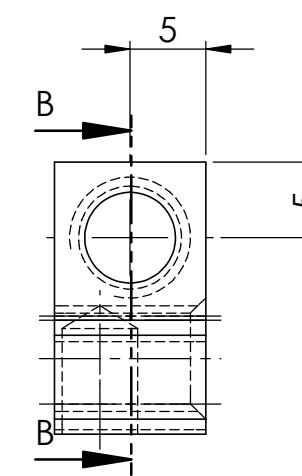
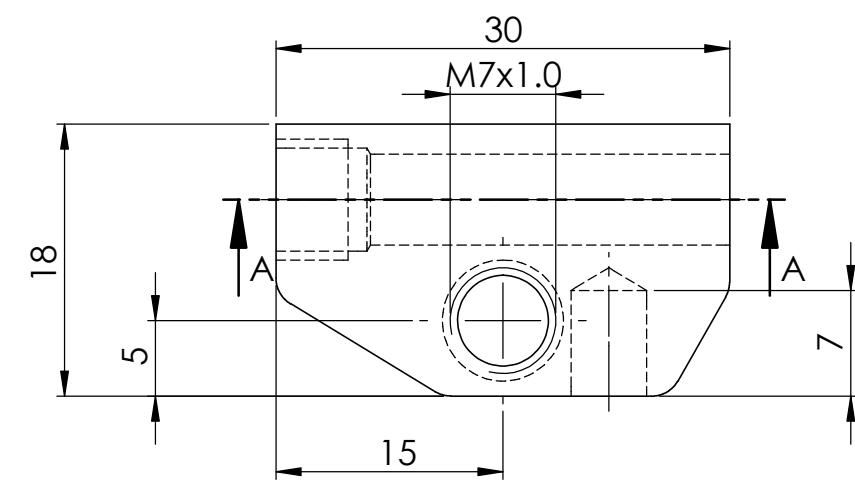
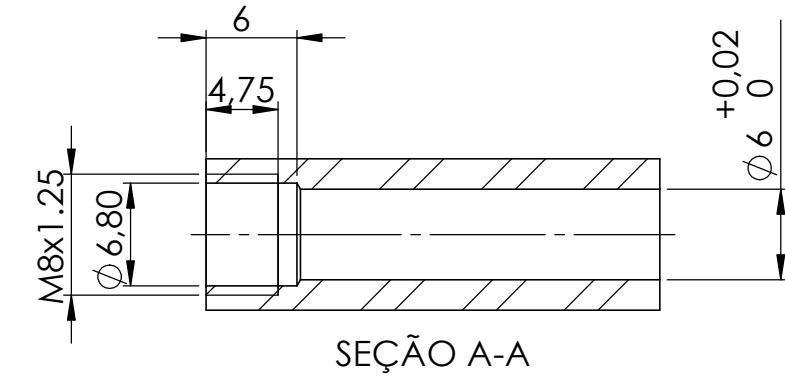
A3

ESCALA 2:1

FOLHA 1 DE 1

PESO: 16,3 gr ESCALA 2:1 FOLHA 1 DE 1

1 2 3 4 5 6 7 8



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE: N8
TOLERÂNCIAS: IT8

DESENHISTA: Marcus Vinicius Sena Casagrande

	NOME	DATA	UFRJ	3º DIEDRO

MATERIAL: Aço Coroplast

DES. Nº

2

A3

FOLHA 1 DE 1

1 2 3 4 5 6 7 8

PESO: 27,3 gr

ESCALA 2:1

FOLHA 1 DE 1

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO | REVISÃO

Sistema: Cabeçote Extrusor

TÍTULO: Aquecedor