UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VIVIAN THAIS LEITE COSTA

Caracterização mecânica de peças impressas em 3D com e sem tratamento superficial para uso em próteses de membro superior.

São Paulo 2022

### VIVIAN THAIS LEITE COSTA

Caracterização mecânica de peças impressas em 3D com e sem tratamento superficial para uso em próteses de membro superior.

Versão corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Horikawa

São Paulo 2022 Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.	
Assinatura do autor: Assinatura do orientado	Virion 32 Casta

Catalogação-na-publicação

Costa, Vivian Thais Leite Caracterização mecânica de peças impressas em 3D com e sem tratamento superficial para uso em próteses de membro superior. / V. T. L. Costa, O. Horikawa -- versão corr. -- São Paulo, 2022. 141 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. 1.Impressão 3D 2.Tratamento superficial 3.Próteses 4.Ensaios Mecânicos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t. III.Horikawa, Oswaldo

### AGRADECIMENTOS

À minha família e amigos, por todo o apoio durante esses anos.

A todos os colegas de laboratório, pelas discussões e opiniões que auxiliaram no desenvolvimento desse projeto.

Ao prof. Dr. Newton Maruyama, por todas as reuniões carregadas de ensinamentos valiosos na construção desse trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7	
LISTA DE TABELAS	. 14	
RESUMO	. 15	
ABSTRACT	. 16	
1. INTRODUÇÃO	. 17	
1.1. OBJETIVOS	. 24	
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	. 25	
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	. 27	
2.1. MANUFATURA ADITIVA	. 27	
2.2. TRATAMENTO SUPERFICIAL PARA PEÇAS IMPRESSAS	. 31	
2.3. ENSAIOS MECÂNICOS COM CORPOS DE PROVA EM A	BS,	
FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA	. 34	
3. MATERIAIS E MÉTODOS	. 42	
3.1. TRATAMENTO SUPERFICIAL COM VAPOR DE ACETONA	. 42	
3.1.1. Análise dos efeitos de tempo de tratamento e orientação de impressão	em	
corpos de prova de pequenas dimensões	. 42	
3.1.1.1. Impressão dos corpos de prova de pequenas dimensões	. 42	
3.1.1.2. Tratamento com vapor de acetona nos corpos de prova de peque	nas	
dimensões	. 45	
3.1.2. Tratamento superficial de corpos de prova para ensaio de tração	. 45	
3.1.2.1. Impressão dos corpos de prova	. 46	
3.1.2.2. Tratamento com vapor de acetona para os corpos de prova de ens	saio	
de tração	. 47	
3.1.3 Tratamento superficial de corpos de prova para ensaio de flexão	. 50	
3.1.3.1 Impressão dos corpos de prova para ensaio de flexão	. 50	
3.1.3.2. Tratamento com vapor de acetona para os corpos de prova de ens	saio	
de flexão	. 51	
3.1.4 Corpos de prova para ensaio de compressão	. 51	
3.1.4.1 Impressão dos corpos de prova	. 51	
3.1.4.2 Tratamento superficial com vapor de acetona	. 52	
3.2. INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO NAS PROPRIEDADES SUPERFICIAIS		
(NANOINDENTAÇÃO)	. 53	

3.3. INFLUÊNCIA DO TEMPO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL NA
TOPOGRAFIA E NA RUGOSIDADE53
3.4. ALTERAÇÃO DE RUGOSIDADE APÓS TRATAMENTO SUPERFICIAL
DOS CORPOS DE PROVA DE TRAÇÃO E FLEXÃO
3.5. ENSAIO DE TRAÇÃO
3.6. ENSAIO DE COMPRESSÃO 57
3.7. ENSAIO DE FLEXÃO57
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 60
4.1. TRATAMENTO SUPERFICIAL COM VAPOR DE ACETONA 60
4.1.1. Análise dos efeitos do tempo de tratamento e orientação de impressão 60
4.1.2. Corpos de prova alongados para ensaio de tração
4.1.2.1. Arranjo para tratamento superficial de corpos de prova de ensaio de
tração com recipiente plástico de 2 litros de volume
4.1.2.2. Arranjo experimental com recipiente plástico de 3,75 litros
4.2. INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO NAS PROPRIEDADES SUPERFICIAIS
(NANOINDENTAÇÃO)
4.3. INFLUÊNCIA DO TEMPO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL NA
TOPOGRAFIA E NA RUGOSIDADE
4.4. ALTERAÇÃO DE RUGOSIDADE APÓS TRATAMENTO SUPERFICIAL
DOS CORPOS DE PROVA DE TRAÇÃO E FLEXÃO
4.5. ENSAIOS DE TRAÇÃO
4.6. ENSAIO DE COMPRESSÃO
4.7. ENSAIO DE FLEXÃO
4.8. INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO SUPERFICIAL COM VAPOR DE
ACETONA NAS PROPRIEDADES DOS CORPOS DE PROVA 125
4.9. VIABILIDADE PARA APLICAÇÃO EM PRÓTESES DE MEMBRO
SUPERIOR
5. CONCLUSÕES
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 136

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Níveis de amputação de membro superior 19
Figura 2 - Perda muscular decorrente de amputação de membro superior 19
Figura 3 - Exemplo de prótese mioelétrica20
Figura 4 - Próteses desenvolvidas pela (a) Washington University, (b) University
of Colorado, e (c) Escola Politécnica da USP21
Figura 5 - Diferentes pegadas analisadas no projeto da Touch-hand II 23
Figura 6 - Projetos de próteses Mioelétricas de baixo custo
Figura 7 - Processo de impressão FDM28
Figura 8 - Processo de fabricação da manufatura aditiva
Figura 9 - Estrutura de preenchimento de impressão 3D usada em estudos de
propriedades mecânicas
Figura 10 - Estrutura de preenchimento de impressão 3D similar à utilizada pela
impressora UP BOX
Figura 11 - Efeito escada causado pelo processo de FDM
Figura 12 - Defeitos comuns em peças impressas em 3D que podem ser
melhorados após tratamento33
Figura 13 - Direções e ângulos de impressão analisados no estudo de Cantrell
et. al (2017)
Figura 14 – Ângulos de impressão analisados no estudo de Rankhouhi et. al.
(2016)
Figura 15 – Padrão de impressão utilizado no estudo de Rankhouhi et. al. (2016).
Figura 16 – Direções de impressão dos corpos de prova utilizados no estudo de
Cole; Zander (2016)
Figura 17 – Exemplos de picos de camadas impressas e de zonas intersticiais.
Figura 18 – Direções de impressão ensaiadas por Lee et. al. (2017)
Figura 19 - Direções de impressão analisadas em Stolasek et. al. (2018) 40
Figura 20 - Direções de impressão propostas nos ensaios de Hernandez et. al.
(2016)
Figura 21 - Esquema dos corpos de prova 44
Figura 22 - Corpo de prova para ensaio de tração segundo ASTM D638 46

Figura 23 - Corpo de prova para ensaio de tração segundo ASTM D3039 47
Figura 24 - Resumo das abordagens utilizadas nos arranjos para tratamento
superficial dos corpos de prova48
Figura 25- Corpos de prova para ensaio de flexão de três pontos
Figura 26 - Corpo de prova para ensaio de compressão segundo ASTM D695.
Figura 27 - Esquema do ensaio de flexão de três pontos
Figura 28 - Corpo de prova impresso verticalmente (A) e horizontalmente (B).61
Figura 29 - Peças impressas verticalmente com diferentes tempos de tratamento.
Figura 30 - Peças impressas horizontalmente com diferentes tempos de
tratamento62
Figura 31 - Corpo de prova impresso horizontalmente após 60 minutos de
tratamento, camada externa cedeu adquirindo o formato da estrutura de
preenchimento da peça63
Figura 32 - Resultados do tratamento com vapor de acetona para várias
condições diferentes
Figura 33 - Resultado do tratamento com vapor de acetona para corpo de prova
posicionado mais ao fundo do recipiente67
Figura 34 - Esquema de arranjo para tratamento superficial com rotação da peça.
Baixa rotação, em torno do eixo da própria peça, apoiada em uma extremidade
e recebendo o torque na outra. Motor fixado na parede do recipiente, com
vedação em silicone
Figura 35 - Motor de passo utilizado para rotacionar o corpo de prova69
Figura 36 - Peças tratadas por 30 minutos, usando 4 ml de acetona por litro de
recipiente. Destaque para as áreas supertratadas69
Figura 37 - Vistas lateral e superior de esquema de arranjo para tratamento
superficial com encaixe de anteparo plástico para proteção do corpo de prova.
Figura 38 - Foto do esquema com encaixe de folha plástica, mostrando acúmulo
de acetona líquida entre a tampa e a folha plástica
Figura 39 - Peça tratada por 30 min, com 20 ml de acetona, no esquema com
encaixe de folha plástica para arredondamento da tampa do recipiente71

Figura 40 - Vistas superior e lateral do esquema de arranjo para tratamento
superficial com hastes para arredondar a tampa
Figura 41 - Foto do esquema com uso de hastes para arredondar a tampa 72
Figura 42 - Peça tratada por 30 min, com 20 ml de acetona, no esquema com
arredondamento da tampa do recipiente através de hastes
Figura 43 - Esquema com a posição da fonte de calor (secador de cabelo) no
arranjo para tratamento superficial73
Figura 44 - Resultados de tratamentos com o arranjo com aquecimento na tampa
do recipiente74
Figura 45 - Esquema com aquecimento na tampa do recipiente e coolers no
arranjo para tratamento superficial75
Figura 46 - Resultados de tratamentos com o arranjo com aquecimento na tampa e coolers
Figura 47 - Resultados de tratamentos com o arranjo com aquecimento na tampa
e coolers, tempo mais longo de tratamento (55 minutos)
Figura 48 - Exemplos de picos de camadas impressas e de zonas intersticiais.
Figura 49 - Peça impressa na horizontal, sem tratamento, aumento de 10x 79
Figura 50 - Peças impressas na horizontal, diversos tempos de tratamento,
aumento de 10x
Figura 51 - Peça impressa na vertical, sem tratamento, aumento de 10x 80
Figura 52 - Peças impressas na vertical, diversos tempos de tratamento,
aumento de 10x
Figura 53 - Mapa topográfico para peça impressa na horizontal, sem tratamento
superficial
Figura 54 - Mapa topográfico para peça impressa na horizontal, com 15 minutos
de tratamento superficial82
Figura 55 - Mapa topográfico para peça impressa na horizontal, com 30 minutos
de tratamento superficial83
Figura 56 - Mapa topográfico para peça impressa na horizontal, com 45 minutos
de tratamento superficial83
Figura 57 - Mapa topográfico para peça impressa na horizontal, com 60 minutos
de tratamento superficial84

Figura 58 - Mapa topográfico para peça impressa verticalmente, sem tratamento
superficial
Figura 59 - Mapa topográfico para peça impressa verticalmente, com 15 minutos
de tratamento superficial85
Figura 60 - Mapa topográfico para peça impressa verticalmente, com 30 minutos
de tratamento superficial85
Figura 61 - Mapa topográfico para peça impressa verticalmente, com 45 minutos
de tratamento superficial86
Figura 62 - Mapa topográfico para peça impressa verticalmente, com 60 minutos
de tratamento superficial86
Figura 63 - Perfil médio de rugosidade para peça impressa horizontalmente, não
tratada
Figura 64 - Perfil médio de rugosidade para peça impressa verticalmente, não
tratada
Figura 65 - Perfil médio de rugosidade para peças impressas horizontalmente,
com diferentes tempos de tratamento superficial
Figura 66 - Perfil médio de rugosidade para peças impressas verticalmente, com
diferentes tempos de tratamento superficial87
Figura 67 - Configuração do ensaio de tração91
Figura 68 - Gráficos para ABNT D638, sem tratamento em temperatura
ambiente
Figura 69 - Gráficos para ABNT D638, com tratamento em temperatura
ambiente
Figura 70 - Gráficos para ABNT D638, sem tratamento em temperatura 40ºC.
Figura 71 - Gráficos para ABNT D638, com tratamento em temperatura 40ºC.
Figura 72 - Gráficos para ABNT D638, sem tratamento em temperatura 80ºC.
Figura 73 - Gráficos para ABNT D638, com tratamento em temperatura 80ºC.
Figura 74 - Gráficos para ABNT D3039, sem tratamento em temperatura
ambiente

Figura 75 - Gráficos para ABNT D3039, com tratamento em temperatura Figura 76 - Gráficos para ABNT D3039, sem tratamento em temperatura 40°C. Figura 77 - Gráficos para ABNT D3039, com tratamento em temperatura 40°C. Figura 78 - Gráficos para ABNT D3039, sem tratamento em temperatura 80°C. Figura 79 - Gráficos para ABNT D3039, com tratamento em temperatura 80°C. Figura 80 - Alteração do módulo de elasticidade de acordo com a temperatura; Ensaio de tração (ASTM D638).....100 Figura 81 - Alteração do módulo de elasticidade de acordo com a temperatura; Ensaio de tração (ASTM D3039).....101 Figura 82 - Alteração da resistência à tração de acordo com a temperatura Figura 83 - Alteração da resistência à tração de acordo com a temperatura Figura 84 - Alteração da tensão de escoamento na tração de acordo com a temperatura (ASTM D638). ..... 102 Figura 85 - Alteração da tensão de escoamento na tração de acordo com a temperatura (ASTM D3039). ..... 103 Figura 86 - Comparação entre os valores de Módulo de elasticidade encontrados em ensaios de tração em diferentes condições. .....104 Figura 87 - Comparação entre os valores de Resistência máxima encontrados em ensaios de tração em diferentes condições. .....104 Figura 88 - Comparação entre os valores de tensão de escoamento encontrados em ensaios de tração em diferentes condições. .....105 Figura 89 - Configurações para ensaio de compressão, buscando reduzir a inclinação causada pelos prolongadores. .....108 Figura 90 - Gráficos para ABNT D695, sem tratamento em temperatura Figura 91 - Gráficos para ABNT D695, com tratamento em temperatura 

Figura 92 - Gráficos para ABNT D695, sem tratamento em temperatura 40°C. Figura 93 - Gráficos para ABNT D695, com tratamento em temperatura 40°C. Figura 94 - Gráficos para ABNT D695, sem tratamento em temperatura 80°C. Figura 95 - Gráficos para ABNT D695, com tratamento em temperatura 80°C. Figura 96 – Alteração no módulo de elasticidade na compressão de acordo com Figura 97 - Alteração na resistência à compressão de acordo com a temperatura. Figura 98 - Alteração na tensão de escoamento na compressão de acordo com a temperatura......114 Figura 99 - Padrão de preenchimento dos corpos de prova utilizados em Shimano et. al. (2017). ..... 115 Figura 100 - Configuração ensaio de flexão.....117 Figura 101 - Gráficos para ABNT D790, sem tratamento em temperatura Figura 102 - Gráficos para ABNT D790, com tratamento em temperatura Figura 103 - Gráficos para ABNT D790, sem tratamento em temperatura 40°C. Figura 104 - Gráficos para ABNT D790, com tratamento em temperatura 40°C. Figura 105 - Gráficos para ABNT D790, sem tratamento em temperatura 80°C. Figura 106 - Gráficos para ABNT D790, com tratamento em temperatura 80°C. Figura 107 - Alteração no módulo de elasticidade na flexão de acordo com a Figura 108 - Alteração na resistência à flexão de acordo com a temperatura. 

Figura 109 - Alteração na tensão de escoamento na flexão de acordo com a
temperatura123
Figura 110- Padrão de preenchimento da impressora 3D uPrint SE Plus 124
Figura 111 - Alteração percentual das propriedades mecânicas após tratamento
superficial em ensaio de tração (ASTM D638)126
Figura 112 - Alteração percentual das propriedades mecânicas após tratamento
superficial em ensaio de tração (ASTM D3039)126
Figura 113 - Alteração percentual das propriedades mecânicas após tratamento
superficial em ensaio de compressão (ASTM D695) 126
Figura 114 - Alteração percentual das propriedades mecânicas após tratamento
superficial em ensaio de flexão (ASTM D790) 127
Figura 115 - Comparação dos coeficientes de variação entre os corpos de prova
em cada ensaio mecânico realizado 128
Figura 116 - Análise das tensões na palma da Touch-Hand II 129
Figura 117 - Estado de tensão da prótese de mão sob carga de tração de 0,1
Мра130
Figura 118 - Estado de tensão da prótese de mão sob carga de flexão de 0,1
Мра131
Figura 119 - Análise de cargas na palma da prótese

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Procedimentos de amputação realizados pelo SUS em 2011 18
Tabela 2 - Classificação das próteses conforme função
Tabela 3 - Diferença de temperatura entre o fundo e a tampa do recipiente74
Tabela 4 - Resultados da Nanoindentação. 78
Tabela 5 - Rugosidade média (Ra) para todos os corpos de prova
Tabela 6 - Rugosidade média para corpos de prova não tratados
Tabela 7 - Rugosidade média para corpos de prova tratados
Tabela 8 - Resultados médios dos ensaios de tração seguindo a ABNT D63896
Tabela 9 - Resultados médios dos ensaios de tração seguindo a ABNT D3039
Tabela 10 - Variações nas propriedades mecânicas obtidas em ensaios de tração
seguindo normas diferentes (ASTM D638 e ASTM D3039) 105
Tabela 11 - Comparação entre propriedades de tração 107
Tabela 12 - Resultados médios dos ensaios de compressão seguindo a ABNT
D695
Tabela 13 - Comparação entre propriedades compressivas 117
Tabela 14 - Resultados médios dos ensaios de flexão seguindo a ABNT D790
Tabela 15 - Comparação entre propriedades de flexão 126
Tabela 16 – Variações médias em módulo das propriedades mecânicas pré e
pós tratamento superficial128
Tabela 17 - Valores de solicitações mecânicas encontradas em projetos de
próteses e resultados experimentais ensaiados nesse estudo 133

#### RESUMO

COSTA, V. T. L. Caracterização mecânica de peças impressas em 3D pré e pós tratamento superficial para uso em próteses de membro superior. 2022. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2022.

Próteses são importantes aliados no aumento da autonomia e bem-estar dos pacientes amputados. Fabricação das peças por impressão 3D é uma alternativa para reduzir o custo e aumentar a possibilidade de customização das próteses, e tratamentos superficiais podem melhorar o acabamento das peças impressas. No presente trabalho, o objetivo principal é avaliar a aplicação de peças impressas em 3D, usando ABS com tratamento superficial por vapor de acetona. em próteses de membro superior, analisando as propriedades superficiais e mecânicas. O tratamento superficial foi feito com vapor de acetona a quente, em ciclos de 30 minutos. A rugosidade das peças reduziu pelo menos 75% nos casos analisados. Ensaios de tração, compressão e flexão foram feitos para encontrar os módulos de elasticidade (E), tensões de escoamento ( $\sigma_E$ ) e resistências máximas ( $\sigma_{máx}$ ) dos corpos de prova, com e sem tratamento, em três temperaturas diferentes (T<sub>amb</sub>, 40°C e 80°C), sendo as propriedades mecânicas maiores à temperatura ambiente; o tratamento superficial levou a um aumento na variância dos resultados, mas os valores médios permaneceram próximos. As propriedades mecânicas encontradas foram comparadas com três trabalhos que descrevem próteses eletromecânicas de membro superior fabricadas através de impressão 3D; levando à conclusão de que o uso da técnica com os parâmetros de impressão aqui descritos é viável, mas para projetos que exigem solicitações mecânicas mais elevadas, é necessário avaliar o nível de preenchimento das peças, já que as propriedades mecânicas aumentam com esse parâmetro de impressão.

Palavras-chave: Impressão 3D, tratamento superficial, prótese, propriedades mecânicas.

### ABSTRACT

COSTA, V. T. L. Mechanical characterization of 3D printed parts pre and post surface treatment for use in upper limb prostheses. 2022. Dissertation (Master's) – USP Polytechnic School, University of São Paulo, 2022.

Prostheses are important allies in increasing the autonomy and well-being of amputees. Fabrication by 3D printing is an alternative to improve customization and reduce the cost of prostheses, and surface treatments can improve the finishing of printed parts. In the present work, the main objective is to evaluate the application of ABS 3D printed parts, with surface treatment by acetone vapor bath, in upper limb prostheses, analyzing the superficial and mechanical properties. The surface treatment was done using hot acetone vapour bath, in cycles of 30 minutes. There was at least 75% roughness reduction of parts in the analyzed cases. Tensile, compression and bending tests were carried out to find the modulus of elasticity (E), yield stress ( $\sigma_v$ ) and maximum strength ( $\sigma_{max}$ ) of the specimens, with and without treatment, at three different temperatures (Troom, 40°C and 80°C), the mechanical properties were higher at room temperature, surface treatment increased results' variance of the results, but mean values remained close. Found mechanical properties were compared with three studies that described electromechanical upper limb prostheses manufactured through 3D printing, leading to the conclusion that the use of the technique with the printing parameters described here is viable, however for projects that require higher mechanical demands, it is necessary to reevaluate the level of filling of the parts, since the mechanical properties increase with this printing parameter.

Keywords: 3D printing, surface treatment, prosthesis, mechanical properties.

#### 1. INTRODUÇÃO

Salvar um membro doente é sempre a melhor opção, mas isso nem sempre é possível. Tentativas prolongadas de salvar um membro que deveria ser amputado podem levar à morbidade excessiva e até à morte. Assim, quando necessário, a medicina recorre à amputação, que é o nome dado ao processo que retira, cirurgicamente, parcial ou totalmente, um membro ou parte do corpo. (SMITH; SKINNER, 2003)

Amputações são realizadas para remover extremidades que estão gravemente doentes, feridas ou não funcionais, quando o uso de tratamentos menos traumáticos não for suficiente para tratar o problema; e apesar dos avanços médicos em antibióticos, cuidados de trauma, cirurgia vascular e tratamento de neoplasias terem melhorado as perspectivas de recuperação de membros, em muitos casos, amputação é ainda uma opção necessária (SMITH; SKINNER, 2003) (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2013).

Os dados estatísticos sobre amputações no Brasil são pobres. Porém, dados do SIHSUS (Sistema de Informações Hospitalares do SUS) revelam que, no ano de 2011, no Sistema Único de Saúde (SUS) foram feitas pouco menos de 50.000 amputações, conforme mostra a Tabela 1. Desse total, aproximadamente 33% ocorreram por causas externas (como trauma, por exemplo), e indivíduos com amputações por causas externas são fortes candidatos a uso de próteses (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2013).

Apesar de poder ser considerada uma cirurgia reconstrutora, a amputação traz uma enorme perda física e psicológica para o paciente, e mitigar os efeitos dessa perda é sempre um desafio para as equipes de saúde. As perdas causadas para o indivíduo decorrentes de amputações nos membros superiores são ainda mais severas que aquelas causadas por amputações nos membros inferiores (MONTIEL; VARGAS; LEAL, 2012).

Causas	Frequência	%
Causas externas	16.294	33,1
Algumas doenças infecciosas e parasitárias	8.808	17,9
Doenças do aparelho circulatório	7.905	16,1
Diabetes	6.672	13,6
Gangrena (não classificada em outra parte)	5.136	10,4
Doenças do sistema osteomuscular e do tecido conjuntivo	2.961	6,0
Neoplasias	957	1,9
Doenças da pele e do tecido subcutâneo	230	0,5
Malformações congênitas, deformidades e	202	0.4
anomalias cromossômicas	202	0,7
Total	49.165	100

Tabela 1 - Procedimentos de amputação realizados pelo SUS em 2011.

Fonte: Ministério da Saúde (2013).

A mão, em especial, desempenha um importantíssimo papel em atividades cotidianas e em situações de interação social, o que faz com que sua ausência diminua significativamente a autonomia do indivíduo (CORDELLA et al., 2016). Os desafios para adaptação à prótese e recolocação no mercado de trabalho são ainda maiores. O uso de próteses estéticas ou funcionais podem reduzir os níveis dessas perdas para o paciente (GAINE; SMART; BRANSBY-ZACHARY, 1997).

Os níveis de amputação dos membros superiores podem ser classificados em: transcarpal, desarticulação do pulso, transradial, desarticulação do cotovelo, transumeral e desarticulação do ombro. A figura 1 mostra os níveis de amputação, e a figura 2 exemplifica a perda muscular em alguns dos níveis de amputação (CORDELLA et al., 2016).



Figura 1 - Níveis de amputação de membro superior.

Fonte: Cordella et al. (2016).

Figura 2 - Perda muscular decorrente de amputação de membro superior.



Fonte: Adaptado de Li (2008).

Prótese é definida como um dispositivo acoplado ao corpo que supre a falta de um órgão. As próteses de membros superiores podem ser classificadas em dois grandes grupos: próteses passivas (aquelas que não realizam movimentos) e próteses ativas (passíveis de movimentação em um número variável de graus de liberdade); conforme mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Classificação das próteses conforme função.

	Cosméticas		
	usadas para a substituição estética do membro		
Passivas	Funcionais		
	visam a realização de alguma tarefa específica (geralmente relacionada ao trabalho ou à um esporte)		
	Movidas pelo corpo		
	usam o membro saudável do paciente, que tem a prótese acoplada por		
	meio de cabos e correias que, através da sua movimentação, controlam a		
	saudável, sendo essa uma grande desvantagem.		
Ativas	Movidas por fonte externa	Elétricas	
	usa-se uma outra fonte de energia,	controladas por meio de	
	como por exemplo, uma bateria.	botões	
	usam motores ou atuadores elétricos para a movimentação de partes da prótese	Mioelétricas (figura 3)	
		usam sinais de eletromiografia	
		para funcionar	

Fonte: Adaptado de Cordella et al. (2016).



Fonte: Casa ortopédica RJ (2013).

Entretanto, as próteses de mão funcionais são caras, custando mais de R\$ 30.000,00, e pouco acessíveis, em especial no Brasil (GARCIA, 2009). Para tentar diminuir o custo delas, diversos grupos no mundo têm pesquisado a fabricação de próteses funcionais utilizando manufatura aditiva (GRETSCH et al., 2016) (KRAUSZ et al., 2015).

Figura 4 mostra alguns dos projetos em desenvolvimento nesta linha. O grupo de Washington University desenvolveu uma prótese com cinco servomotores para movimentação dos cinco dedos da mão através de cabos, como mostrada na Figura 4a (GRETSCH et al., 2016). Figura 4b mostra a prótese desenvolvida pelo grupo da University os Colorado. Ela possui 6 graus de liberdade, gerado por seis motores DC (KRAUSZ et al., 2015).

Figura 4 - Próteses desenvolvidas pela (a) Washington University, (b) University of Colorado, e (c) Escola Politécnica da USP.



(a) (b) Fonte: (a) Gretsch et al. (2016), (b) Krausz et al. (2015), (c) do autor.

Em nosso laboratório, também há um projeto para desenvolvimento de próteses de baixo custo, em parceria com a empresa Exiii, do Japão. A prótese, mostrada na Figura 4c, utiliza três servomotores para movimentação dos dedos da mão, um para o polegar, um para movimentação do indicador e um para movimentação dos três dedos restantes. Todos os três projetos citados utilizam a manufatura aditiva com material polimérico como meio de fabricação dos protótipos para diminuir o custo.

Porém, o acabamento superficial de peças impressas não apresenta boa qualidade, o processo de impressão 3D fabrica peças com alta rugosidade. Para melhorar o acabamento, é possível tratar a superfície das peças, usando abordagens mecânicas ou químicas. O tratamento químico é vantajoso para peças com geometria complexa; o polímero é posto em contato com um solvente, que reage com a superfície da peça e inicia a solubilização do polímero.

(c)

Então, o polímero é exposto ao ar para que o solvente evapore, sem alterar as características químicas do material. Para peças impressas em ABS, pode-se utilizar acetona, um dos solventes do polímero. (LALEHPOUR; JANETEAS; BARARI, 2017) (GAO et al., 2017) (CANEVAROLO JR., 2006).

Além do acabamento superficial, as características mecânicas das peças impressas em 3D não correspondem àquelas das peças produzidas por outros meios de fabricação. Assim, é necessário garantir que próteses fabricadas por impressão 3D usando ABS, com ou sem tratamento superficial, atendam aos requisitos mecânicos de uma prótese funcional.

Para que uma prótese seja bem aceita pelos pacientes, é importante considerar algumas características no projeto; estética e funcionalidade devem ser similares à da mão humana. Segundo Jones e Stopforth (2016), um projeto de prótese adequado deve atender necessidades de destreza (habilidade de mover os dedos para posições que podem alcançar diferentes pegadas - figura 5) e complacência (habilidade de envolver os dedos em torno de objetos de diferentes formatos). Também é primordial levar em consideração a força dos dedos e de preensão, o tempo de fechamento, a massa e o consumo de energia. (JONES; STOPFORTH, 2016).

Um aspecto importante a se considerar durante o projeto da prótese é o número de graus de liberdade. A mão humana é uma estrutura complexa que possui 23 graus de liberdade, porém, segundo Dalley et. al (2009), próteses de mão humana conseguem alcançar entre 8 e 16 graus de liberdade, o que permite ampla variedade de movimentos e pegadas. Assim, para unir funcionalidade e estética, muitas das próteses tem o formato aproximado da anatomia da mão (figura 6), sendo compostas por 5 dedos articulados e pela palma da mão (que em diversos casos abriga os atuadores e controladores da prótese). (DALLEY et al., 2009) (JONES; STOPFORTH, 2016) (WAHIT et al., 2020) (VAN DER RIET et al., 2015) (BASTARRECHEA et al., 2021) (SHANMUGASUNDAR et al., 2020)



Figura 5 - Diferentes pegadas analisadas no projeto da Touch-hand II.



Lateral Pinch



Thumb-3 Finger



Thumb-2 Finger



Fonte: Jones; Stopforth (2016).



Medium Wrap



Power Sphere



Light Tool



Index Finger Extension





Figura 6 - Projetos de próteses Mioelétricas de baixo custo.

Fonte: adaptado de: (a) Wahit et al., (2020); (b) Bastarrechea et al., (2021); (c) Shanmugasundar et al., (2020); (d) Van Der Riet et al., (2015).

Há projetos de próteses eletromiográficas na literatura (figura 6) que trazem uma análise estrutural das peças, mostrando os pontos de concentração de tensões, e os maiores esforços solicitados. A partir desses projetos, é possível analisar o uso de peças impressas em 3D de acordo com certos parâmetros de impressão na fabricação destes modelos de prótese.

O nível de preenchimento das peças impressas em 3D, influi na resistência mecânica das mesmas; um nível menor de preenchimento ocasiona menor resistência mecânica, porém, produz peças mais leves, com maior velocidade de impressão, e mais baratas, já que consomem menos, material.

#### **1.1. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é: avaliar a aplicação de peças impressas em 3D, usando ABS com e sem tratamento superficial por vapor de acetona, em próteses de membro superior.

Para tanto, foram realizadas as seguintes atividades:

 Análise dos efeitos do tempo de tratamento superficial com vapor de acetona nas propriedades superficiais dos corpos de prova, através de ensaios de topografia, rugosidade, e nanodureza;

 Determinação de um método de tratamento superficial replicável para cada tipo de corpo de prova;

 Avaliação da redução de rugosidade em corpos de prova pós tratamento superficial;

- Ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão em diferentes temperaturas, comparando os resultados dos corpos de prova tratados e não tratados, para estudar a influência do tratamento nas propriedades mecânicas.

#### 1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação será dividida em cinco capítulos; o primeiro traz a introdução, contextualizando e justificando o projeto, além de explicitar os objetivos do projeto, e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, traz-se a revisão bibliográfica, que apresentará os conceitos de manufatura aditiva, tratamento superficial para peças impressas, e ensaios mecânicos com corpos de prova em ABS, fabricados através de manufatura aditiva.

Os materiais e métodos aparecem no terceiro capítulo, toda a metodologia do projeto é nele descrita, organizada em seis subcapítulos. O item 3.1 aborda o tratamento superficial com vapor de acetona, e explica a metodologia usada para a análise dos efeitos do tempo de tratamento em corpos de prova de pequenas dimensões, incluindo projeto e impressão dos corpos de prova; e em sequência descreve as metodologias e impressão e tratamento dos corpos de prova para ensaios de tração, flexão e compressão, respectivamente. Os outros subcapítulos descrevem a metodologia dos ensaios mecânicos de nanoindentação, rugosidade, tração, compressão e flexão.

O quarto capítulo apresenta e discute os resultados. Dividido em nove subcapítulos, inicia com o tratamento superficial com vapor de acetona, fazendo uma análise dos efeitos do tempo de tratamento e orientação de impressão em corpos de prova de pequenas dimensões, e em sequência traz a determinação das metodologias de tratamento superficial dos corpos de prova para ensaios de tração, compressão e flexão, respectivamente.

A seguir aparecem os resultados da análise superficial dos corpos de prova, e dos ensaios mecânicos. Os últimos subcapítulos discutem a influência do tratamento superficial nas propriedades mecânicas, e a viabilidade da aplicação da técnica para fabricação de próteses de membro superior.

O último capítulo da dissertação é a conclusão, que ressalta os principais resultados e contribuições científicas do projeto, além de propor trabalhos futuros.

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. MANUFATURA ADITIVA

Nesse capítulo, será descrito o processo de impressão 3D, um processo de manufatura aditiva, destacando suas vantagens e limitações.

A ASTM (American Society for Testing and Materials) define Manufatura Aditiva como o "processo de junção de materiais para fazer objetos a partir de dados de modelos tridimensionais (3D), geralmente camada sobre camada, em oposição a metodologias de fabricação subtrativas" (ASTM, 2013).

A técnica mais comum de manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, é o FDM (Fused Deposition Modeling). Um filamento de polímero aquecido é forçado através de um bico e colocado na posição desejada, camada sobre camada, até que a peça esteja completa, o filamento extrudado solidifica rapidamente, ligando-se ao material anterior (figura 7). A espessura de cada camada é igual, e é dada pelo deslocamento da mesa para baixo, ou do bico extrusor para cima (dependendo do equipamento utilizado), sempre com um valor constante até atingir a altura final da peça. (Cole &Zander, 2016) (AHN et al., 2009a)



Fonte: Ahn et al., (2009b).

Para que seja possível imprimir a peça usando FDM, os dados são fornecidos ao sistema por um modelo descrito em CAD, que é convertido em um modelo no formato estereolitográfico (stl), que fornece uma representação do modelo através de uma tesselação triangular. Posteriormente, o modelo é dividido em camadas por software, para que a impressora produza a peça. A figura 8 mostra esse processo (WENDT et al., 2016) (LIU; SHAPIRO, 2016).



A Manufatura Aditiva se mostra uma opção rápida e de baixo custo para confecção das peças de próteses de membro superior. Porém, devido aos diferentes métodos de fabricação, as propriedades mecânicas de peças produzidas por manufatura aditiva são diferentes das produzidas por injeção; elas apresentam menor resistência mecânica e isso pode comprometer o uso da prótese (WENDT et al., 2016) (RANKOUHI et al., 2016) (LIU; SHAPIRO, 2016) (COLE; ZANDER, 2016).

As pesquisas concluem que é necessário a previsibilidade e a possibilidade de estimativa prévia de valores das propriedades em peças produzidas por FDM para que a técnica seja mais amplamente aceita como um processo produtivo de componentes que sofrem ação de cargas e/ou carregamentos, em cenários onde é necessário garantir o comportamento da peça e sua resistência. Os ensaios mecânicos com variações de formato, espessura de camadas de impressão, orientação e direção de impressão, área da peça e até simulações buscam trazer essa padronização e previsibilidade das propriedades mecânicas (WENDT et al., 2016) (RANKOUHI et al., 2016) (LIU; SHAPIRO, 2016) (COLE; ZANDER, 2016) (CROCCOLO; DE AGOSTINIS; OLMI, 2013) (CANTRELL et al., 2017).

Segundo Liu e Shapiro (2016), o tipo e nível de preenchimento da peça alteram resultados de propriedades mecânicas finais. Os estudos nessa área costumam trazer padrões de impressão formados por linhas paralelas e 100%

de preenchimento, com estruturas similares a da figura 9, e demonstram que as propriedades mecânicas variam com a direção de aplicação da força de tração e com a orientação de impressão (WENDT et al., 2016) (RANKOUHI et al., 2016) (LIU; SHAPIRO, 2016) (COLE; ZANDER, 2016).

Porém, a impressora 3D usada nesse estudo (UP BOX, Tiertime, China), assim como diversos outros modelos comerciais trabalha com estruturas de preenchimento em grade, gerando estruturas similares a da figura 10, o que mitiga o efeito da direção de impressão nas propriedades mecânicas, já que não há mais uma única direção de deposição do filamento, assim, a possibilidade de aplicar uma força que seja majoritariamente perpendicular ao sentido de intersecção entre filamento é muito menor. Além disso, esse padrão de impressão reduz a quantidade de material necessária, e pode produzir peças mais leves, com menores custos, e com tempos menores de produção. Apesar das vantagens produtivas, o padrão de preenchimento pode levar a valores de propriedades mecânicas diferentes das determinadas por outros estudos, necessitando investigação das propriedades (LIU; SHAPIRO, 2016).





Fonte: Cole; Zander, (2016).



Figura 10 - Estrutura de preenchimento de impressão 3D similar à utilizada pela impressora UP BOX.

Fonte: Liu; Shapiro, (2016).

E sabido que os polímeros respondem de forma diferentes a cada tipo de solicitação mecânica, de acordo com as condições do ensaio realizado. A direção da solicitação aplicada (tração ou compressão, por exemplo), a velocidade do ensaio, e temperatura de operação geralmente trazem valores de propriedades mecânicas diferentes, sendo necessária a realização de mais de um tipo de ensaio para caracterizar o polímero. Considerando corpos de prova fabricação usando impressão 3D e FDM, os parâmetros de impressão como orientação, espessura da camada, preenchimento, direção e velocidade de impressão, etc. também influem na resposta às solicitações mecânicas. (CANEVAROLO JR., 2006) (HERNANDEZ et al., 2016). (BRISCHETTO et al., 2017) (CROCCOLO; DE AGOSTINIS; OLMI, 2013) (DAWOUD; TAHA; EBEID, 2016) (MARTINEZ et al., 2019) (TYMRAK; KREIGER; PEARCE, 2014).

Além disso, devido ao processo de construção de camada por camada, o acabamento superficial é medíocre. A rugosidade da superfície é maior do que a de peças fabricadas por meios tradicionais, como injeção, por exemplo. Outro ponto negativo é o efeito escada (figura 11), que pode ser observado nas superfícies inclinadas da peça, causado pela interação de cada camada individual (GAO et. al., 2017) (LALEHPOUR; BARARI, 2016).





Fonte: Lim et al., (2016).

O principal parâmetro de impressão a afetar a rugosidade da peça é a espessura da camada; quanto maior a espessura de camada, mais alta a rugosidade da peça. Escolher espessuras de camada menores promove uma rugosidade mais baixa, mas aumenta o tempo de impressão e o consumo de material. Além disso, a técnica do FDM na maioria das vezes exige o uso de material de suporte para impressão, e a retirada desse material também deixa uma superfície rugosa nas peças impressas (LALEHPOUR; BARARI, 2016).

#### 2.2. TRATAMENTO SUPERFICIAL PARA PEÇAS IMPRESSAS

Esse capítulo trata das possibilidades de tratamento para melhora do acabamento superficial, especialmente dos procedimentos que podem ser aplicados em peças impressas em 3D, usando ABS como material de fabricação.

É possível melhorar a qualidade da superfície de peças impressas em 3D usando técnicas de pós-processamento. Abordagens mecânicas podem ser usadas (desbaste, lixamento, etc.), porém apresentam limitações, causadas por pequenas dimensões, detalhes e alta complexidade das peças. Essas dificuldades podem ser superadas por abordagens químicas, que usam um solvente para tratar a superfície do material (LALEHPOUR; BARARI, 2016) (GAO et al., 2017).

Para peças feitas de acrilonitrilabutadieno estireno (ABS), acetona é uma escolha adequada para tratamento. A acetona atua como solvente, reage com as camadas mais superficiais da peça de ABS, mas não altera suas propriedades químicas, já que a solubilização de polímeros é um processo físico e reversível (LALEHPOUR; BARARI, 2016) (CANEVAROLO JR., 2006).

As camadas mais externas das peças entram em contato com o solvente e alcançam o primeiro estágio de solubilização, onde as ligações cruzadas entre as macromoléculas relaxam, permitindo que moléculas do solvente se difundam para dentro do polímero, formando uma pasta de ABS com acetona, o que permite que as macromoléculas de ABS se reorganizem em uma posição mais estável (menos energética), já que, apesar de precisar manter constantes o comprimento da cadeia e o ângulo de ligação, cadeias poliméricas podem exibir diversas formas diferentes (GAO et al., 2017) (LALEHPOUR; BARARI, 2016) (CANEVAROLO JR., 2006).

A acetona evapora naturalmente e, uma vez que a acetona deixa a superfície do material, o mesmo reendurece com uma superfície mais lisa e polida. Isso reduz os desníveis nas intersecções de camada e melhora a rugosidade da superfície (GAO et al., 2017) (LALEHPOUR; BARARI, 2016) (CANEVAROLO JR., 2006).

Gao et al., 2017 descreve três tipos de tratamento com acetona: imersão da peça em solução de acetona em água, banho de vapor a quente (o recipiente é aquecido para promover a evaporação do solvente), e banho de vapor a frio (não é aplicado calor ao recipiente de tratamento) (GAO et al., 2017).

Apesar de pesquisas sobre tratamento superficial do ABS com acetona já terem sido realizadas, ainda não há consenso sobre um método padronizado que possa ser aplicado a qualquer peça, sem a necessidade de experimentação inicial. Os estudos comparam propriedades de peças tratadas e não tratadas, como rugosidade, módulo de elasticidade, resistência à tração e flexão, mas não descrevem um método de tratamento químico que possa ser aplicado em qualquer tipo de peça. (GALANTUCCI; LAVECCHIA; PERCOCO, 2010) (GAO et al., 2017) (LALEHPOUR; BARARI, 2016).

Em Lalehpour & Barari (2016), é feito o tratamento com vapor de acetona a quente e apenas o tempo de tratamento é descrito; em Gao et. al. (2017) o tratamento é feito com vapor a frio, e é descrito apenas o arranjo experimental; o trabalho de Galantucci, Lavecchia e Percoro (2009) é o único que fornece um método bem detalhado, indicando a concentração da solução usada e o tempo de tratamento, para a técnica de imersão em solução de acetona. (GALANTUCCI; LAVECCHIA; PERCOCO, 2010) (GAO et al., 2017) (LALEHPOUR; BARARI, 2016).

Segundo Borges (2015) mesmo as soluções comerciais oferecidas não apresentam um padrão de tratamento. São descritas nesse trabalho a Stratasys Finishing Touch, e a Magic Box (da fabricante Sky Tech); os dois casos utilizam câmaras herméticas onde é introduzido vapor de acetona para tratar a peça. Os equipamentos mencionados são dependentes do usuário, que deve fazer controle visual das peças para determinar quando o tratamento está suficientemente bom. A Magic Box tem paredes transparentes, o que facilita esse controle, a Stratasys Finishing Touch é opaca, fazendo com o que o usuário precise abrir o equipamento periodicamente para observar a peça (BORGES, 2015).

Não apenas o aspecto estético das peças manufaturadas por FDM justificam o tratamento superficial, Wendt et al (2016) descrevem possíveis defeitos na interação entre as camadas impressas, o que gera a preocupação com descontinuidades, que podem permitir a entrada de líquidos no interior das estruturas, o que dificultaria a limpeza e higienização das peças. Figura 12 mostra os principais defeitos encontrados, que podem comprometer a estrutura superficial, dependendo da magnitude; são eles ligações insuficientes, e bolhas de gás. Ao permitir que o polímero se rearranje, o tratamento superficial com acetona pode corrigir esse tipo de defeito. (WENDT et. al., 2016)

Figura 12 - Defeitos comuns em peças impressas em 3D que podem ser melhorados após tratamento.



Fonte: adaptado de Wendt et al., (2016).

Contudo, segundo Lalehpour e Barari (2016) e Lalehpour, Janeteas e Barari (2017), as inclinações e a área superficial da peça, influem no tempo de tratamento necessário, e nos resultados alcançados pelo processo. Assim sendo, faz-se necessário projetar um método de tratamento adequado à novas peças, buscando uma quantidade adequada de solvente, de tempo de tratamento, e, principalmente, repetibilidade do processo. (LALEHPOUR; BARARI, 2016) (LALEHPOUR; JANETAS; BARARI, 2017)

# 2.3. ENSAIOS MECÂNICOS COM CORPOS DE PROVA EM ABS, FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA.

Nessa sessão, serão discutidos estudos de propriedades mecânicas, através de ensaios de tração, compressão e flexão, de peças impressas em 3D, usando ABS como material. Os principais fatores da manufatura aditiva que interferem nas propriedades mecânicas serão descritos aqui.

Ensaios mecânicos permitem a determinação das propriedades de um dado material, em determinadas condições de ensaio; essas propriedades são úteis em projetos de engenharia, design, seleção de materiais para determinadas aplicações, entre outros. As propriedades dependem do tipo de ensaio, nesse estudo falaremos de ensaios de tração, compressão e flexão, e as propriedades analisadas serão: módulo de elasticidade, resistência máxima e tensão de escoamento. (ASTM, 2002, 2008, 2015a, 2015b)

Especialmente do caso de polímeros, é importante atentar às condições de ensaio para comparação, já que suas propriedades mecânicas variam muito com a temperatura, velocidade de ensaio, umidade, entre outras. Quando uma norma de ensaio mecânico é utilizada, as propriedades são compatíveis apenas em condições semelhantes. (ASTM, 2002, 2008, 2015a, 2015b)

Com as técnicas de manufatura aditiva, especialmente impressão 3D (FDM) ganhando espaço entre os meios de fabricação, cresce a necessidade de conhecer as características mecânicas de componentes e peças fabricadas usando esse método. As características dos produtos fabricados por manufatura aditiva divergem das fabricadas por métodos tradicionais, porém ainda não há normas específicas para ensaios com corpos de prova fabricados usando impressão 3D. Assim, diversos autores vêm ensaiando corpos de prova impressos em diversas condições, adotando as normas para polímeros já existentes, as mesmas que seriam utilizadas para corpos de prova em ABS fabricados por métodos tradicionais. Nessa seção, serão descritos de alguns desses estudos.

As configurações de impressão escolhidas têm efeito direto nas propriedades mecânicas. Cantrell et. al. (2017) estudou os efeitos da orientação e do ângulo (direção) de impressão nas propriedades do ensaio de tração, conforme mostra a figura 13. Foram impressos corpos de prova em Policarbonato (PC) e ABS, e

os ensaios foram feitos de acordo com a norma ASTM D638, visando determinar se os corpos de prova impressos em 3D eram anisotrópicos por natureza. (CANTRELL et al., 2017)



Figura 13 - Direções e ângulos de impressão analisados no estudo de Cantrell et. al (2017).

Fonte: Cantrell et al., (2017)

Após ensaiar os corpos de prova, Cantrell et. al. (2017) concluiu que algumas propriedades apresentam anisotropia e outras não. O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson apresentaram comportamento isotrópico, porém, a força máxima, a tensão na ruptura e a densidade de energia de deformação variaram com a orientação de impressão, principalmente entre as peças impressas na horizontal (Printed flat) e na vertical (printed up-right); o ângulo de impressão, por sua vez, não teve efeito nas propriedades mecânicas. Resultados similares foram obtidos por Khuong et. al. (2014), onde corpos de prova impressos verticalmente apresentaram menores propriedades mecânicas em ensaios de tração. (CANTRELL et al., 2017) (KHUONG et al., 2014).

O efeito da espessura de camada foi revisitado em Rankouhi et. al. (2016); a literatura anterior apresentava dados divergentes, já que alguns estudos encontravam variação das propriedades mecânicas com a espessura de camada, e alguns não. Além da espessura de camada, esse estudo avaliou a influência do ângulo de impressão na tensão máxima e no módulo de

elasticidade através de ensaios de tração. (AHN; KIM; LEE, 2007) (RANKOUHI et al., 2016) (TYMRAK; KREIGER; PEARCE, 2014).

Duas e espessuras de camada, 0,2 e 0,4 mm, e três ângulos de impressão (0°, 45° e 90°) foram analisados, conforme figura 14. Vale destacar que nesse estudo, o ângulo de impressão interferiu nas propriedades mecânicas, sendo que as peças impressas a 0° apresentaram os maiores valores de módulo de elasticidade e resistência à tração, enquanto as peças impressas a 90° apresentaram os menores valores de propriedades mecânicas. (RANKOUHI et al., 2016)

A diferença entre os resultados encontrados em Rankhouhi et. al. (2016) e Cantrell et. al. (2017) deve-se ao padrão de preenchimento utilizado na impressora 3D. No estudo de Cantrell et al. (2017) a peça foi fabricada por um preenchimento em grade, usando linhas diagonais em sentidos opostos, enquanto no estudo de Rankhouhi et. al. (2016) a peça foi fabricada por um preenchimento em linhas paralelas (figura 15) o que leva o ângulo de impressão a ser responsável pelo tipo de interação com a força de tração, em peças a 0º, a força é aplicada paralela às camadas, enquanto a 90º, a força é perpendicular, e faz com que a ruptura da peça aconteça pela separação entre camadas. (RANKOUHI et al., 2016)

Quanto ao efeito da espessura de camada, após extensa análise estatística dos dados, o estudo concluiu que as peças com espessura de camada de 0,2 mm eram mais resistentes que as peças com 0,4 mm, demonstrando que a espessura de camada também influi nos valores de propriedades mecânicas.(RANKOUHI et al., 2016)


Figura 14 – Ângulos de impressão analisados no estudo de Rankhouhi et. al. (2016).

Fonte: Rankouhi et al. (2016)

Figura 15 – Padrão de impressão utilizado no estudo de Rankhouhi et. al. (2016).



Fonte: Rankouhi et al. (2016)

Cole, Zander (2016) também analisou o efeito das direções de impressão nas propriedades de tração, usando o mesmo padrão de preenchimento utilizado em Rankhouhi et. al. (2016) (figura 16). Os resultados encontrados mostram que quanto mais alinhadas a direção de impressão e a aplicação da força, maiores as propriedades mecânicas; comprovando que a tensão necessária para o rompimento entre as camadas é menor. (COLE; ZANDER, 2016).



Figura 16 – Direções de impressão dos corpos de prova utilizados no estudo de Cole; Zander (2016).

Fonte: Cole; Zander (2016)

As propriedades superficiais também foram analisadas em Cole; Zander (2016). Corpos de prova foram impressos em diversas direções diferentes, e alguns deles foram submetidos a nanoindentação para determinar o módulo de elasticidade (E) e a dureza (H) da superfície. Devido ao processo de fabricação, as peças impressas em 3D Possuem duas áreas diferentes em sua superfície, as intersticiais (de conexão entre as camadas), e as áreas onde há o pico da camada, como mostra a figura 17. (COLE; ZANDER, 2016)

Assim, foram feitos quatro ensaios de nanoindentação em cada corpo de prova, sendo duas medidas em área de picos, e duas medidas em área intersticial, nos corpos de prova impressos nas direções mostradas na figura 16. O módulo de elasticidade não mostrou variação significativa entre as diferentes regiões da impressão, porém, no caso da dureza, as regiões interfaciais apresentaram maior rigidez quando comparadas com as regiões de picos na impressão, chegando a casos de valores até 40% mais altos em certas orientações de impressão; comprovando que as propriedades locais nas superfícies de peças impressas variam entre regiões. (COLE; ZANDER, 2016)



Figura 17 – Exemplos de picos de camadas impressas e de zonas intersticiais.

Fonte: (Cole; Zander (2016)

Os parâmetros de impressão também interferem nas propriedades compressivas de corpos de prova fabricados através de impressão 3D. Lee et. al. (2007) comprovou a anisotropia de corpos de prova impressos em 3D através de ensaios de compressão; ensaiando peças impressas em diferentes orientações (figura 18). Os corpos de prova impressos em orientação axial, apresentaram maior resistência à compressão, evidenciando mais uma vez que a ligação entre as camadas é menos resistente que os filamentos de ABS usados na impressão. O estudo de Brischetto et. al. (2017) realizou extensa análise estatística da compressão de corpos de prova impressos em 3D, e corroborou esse resultado. Shimano et. al. (2018) ensaiou corpos de prova com diferentes preenchimentos (15% e 30%) e, conforme esperado, demonstrou que corpos de prova com maior nível de preenchimento são mais resistentes à compressão. (LEE et al., 2007) (BRISCHETTO et al., 2017) (SHIMANO; BARINI; MELO, 2018).

Figura 18 - Direções de impressão ensaiadas por Lee et. al. (2017).





direction



Transverse



Raster angle

Fonte: Lee et al. (2007).

Khuong et. al. (2014) também realizou ensaios de flexão com corpos de prova impressos em diferentes direções, e, do mesmo modo que os ensaios de tração e compressão, os corpos de prova impressos verticalmente apresentam propriedades mecânicas menores que aqueles impressos horizontalmente. (KHUONG et al., 2014).

Além das direções de impressão, o estudo de Stoklasek et. al. (2018) analisou o efeito da espessura de camada nas propriedades flexivas de corpos de prova impressos em ABS, três direções de impressão diferentes (figura 19) e três espessuras de camada (0,17; 0,25 e 0,33 mm) foram estudados. A orientação de impressão teve grande impacto nas medidas de resistência à compressão e deflexão máxima, sendo os menores valores encontrados na orientação XZ-V (quando a força flexiva é aplicada na direção que separa as camadas). O aumento da espessura de camada, por sua vez, levou a um aumento na deflexão máxima dos corpos de prova. (STOKLASEK et al., 2018).



Figura 19 - Direções de impressão analisadas em Stolasek et. al. (2018).

Fonte: Stoklasek et al. (2018).

Os três tipos de ensaio (tração, compressão e flexão) foram feitos em Hernandez et. al. (2016), mais uma vez analisando os efeitos da orientação e da direção de impressão (figura 20). O estudo seguiu as normas ASTM D638, ASTM D695 e ASTM D790, mas utilizou apenas três amostras para cada tipo de ensaio, em oposição ao mínimo de cinco amostras descritas na norma. Nesse cenário, a resistência à tração foi muito próxima em todas as orientações, mas as resistências à compressão e à flexão apresentam valores mais altos para os corpos de prova impressos no plano XY. Esse estudo mostra que os parâmetros de impressão podem impactar diferentemente as propriedades mecânicas em diversos tipos de ensaios mecânicos. (HERNANDEZ et al., 2016).



Figura 20 - Direções de impressão propostas nos ensaios de Hernandez et. al. (2016).

Fonte: Hernandez et al. (2016).

## **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Esse capítulo irá tratar dos processos experimentais usados nas diferentes etapas do estudo. Primeiro, descreverá os métodos de tratamento superficial usados em diferentes corpos de prova, buscando determinar um método de tratamento para os diferentes corpos de prova que serão utilizados nos ensaios mecânicos; a seguir trará a metodologia dos ensaios de nanoindentação; análise de topografia e rugosidade; e, por fim, ensaios de tração, compressão e flexão.

## 3.1. TRATAMENTO SUPERFICIAL COM VAPOR DE ACETONA

O método escolhido para o tratamento com acetona foi vapor a quente, onde o recipiente é aquecido para gerar o vapor de acetona. Esse método foi escolhido por ser mais rápido que o tratamento com vapor a frio, e mais econômico que o tratamento com imersão em solução de acetona, já que consome menor quantidade de reagente.

Inicialmente, corpos de prova de pequenas dimensões serão usados para analisar os efeitos do tempo de tratamento superficial no acabamento e nas propriedades superficiais do corpo de prova. A partir desse ponto, o método de tratamento será adaptado para os corpos de prova que serão utilizados nos ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão.

# 3.1.1. Análise dos efeitos de tempo de tratamento e orientação de impressão em corpos de prova de pequenas dimensões.

Nessa seção, serão analisados diferentes tempos de tratamento, em corpos de prova com diferentes direções de impressão, para que seja possível determinar como alcançar a melhor qualidade de acabamento superficial.

### 3.1.1.1. Impressão dos corpos de prova de pequenas dimensões

Para análise dos diferentes resultados no acabamento superficial para corpos de prova expostos ao banho de vapor de acetona por diferentes intervalos

de tempo e em diferentes direções de impressão serão utilizados corpos de prova de pequenas dimensões, evitando assim o consumo excessivo de material nesse primeiro momento.

O desenho escolhido foi um bloco retangular (10x15x20mm) com uma alça, como mostra a figura 21. A alça é usada como ponto de fixação da peça, já que a região pela qual a peça é fixada não apresentará os mesmos resultados quando tratada, já que recebe cargas diferentes ou entra em contato com outras superfícies durante o banho de vapor e, assim, essa região pode sofrer deformações.

Pinos na base do corpo de prova foram usados para diferenciar o tempo de tratamento em cada peça, como descrito a seguir. Cinco peças foram impressas em cada orientação; vertical e horizontalmente (cada uma com um número diferente de pinos, como mostra a figura 21). A espessura de camada utilizada foi de 0,20 mm, um valor intermediário de camada, o que faz com que a impressão seja mais rápida sem grande perda de acabamento superficial; e o preenchimento de 75%, o que forneceria uma estrutura densa de sustentação interna, sem gasto excessivo de material.

As dimensões dos corpos de prova foram escolhidas de maneira a facilitar o manuseio e a visualização da superfície, mas com baixo consumo de material. As dimensões das alças foram projetadas para não ceder com o tratamento químico, e aguentar sustentar a peça durante o processo; e os pinos distribuídos de maneira uniforme na superfície inferior, para servir de indicativo do tempo de tratamento (cada pino representa 15 minutos a mais de tratamento).



15 min. tratamento 30 min. tratamento 45 min. tratamento 60 min. tratamento Fonte: o autor.

Figura 21 - Esquema dos corpos de prova.

## 3.1.1.2. Tratamento com vapor de acetona nos corpos de prova de pequenas dimensões

O método escolhido para o tratamento com acetona foi vapor a quente, onde um recipiente vedado é aquecido para gerar o vapor de acetona, e mantém o vapor em contato com a peça. No caso desse experimento, usou-se um Becker e uma placa de Petri como tampa; a peça ficou suspensa por um fio de nylon preso à tampa. A vedação do arranjo foi feita com massa de modelar; os materiais foram selecionados para não reagir com a acetona, de maneira que apenas o ABS na superfície do corpo de prova sofresse reação química.

No Becker de 500 ml (diâmetro da base 70 mm e altura do Becker 132 mm) foram colocados 10 ml de acetona (concentração de 20 ml de acetona por litro do recipiente), e o fundo desse Becker foi colocado em água aquecida, para que a acetona entrasse em ebulição e preenchesse o Becker com vapor, atingindo assim a superfície da peça. A água foi aquecida com um mergulhão, e sua temperatura, controlada por um termômetro, foi mantida entre 50 e 60°C, já que o ponto de ebulição da acetona é cerca de 56°C.

Para comparar o efeito de diferentes tempos de tratamento, quatro corpos de prova foram mantidos no vapor por diferentes períodos, 15 minutos, 30 minutos, 45 minutos, e 60 minutos, respectivamente. Quando o tempo de tratamento era completo, os recipientes eram abertos, as peças retiradas do vapor, e deixadas em repouso por 24 horas, para somente então serem manuseadas, garantindo que toda a acetona evaporou do corpo de prova.

### 3.1.2. Tratamento superficial de corpos de prova para ensaio de tração

Os corpos de prova dessa seção diferem dos da anterior em tamanho e formato. Uma das dimensões é muito maior que as outras, fazendo com que o corpo de prova tenha um formato alongado. Assim, os corpos de prova são maiores em volume e em área superficial que os descritos na seção anterior, além de diferir em formato, o que pode alterar seu comportamento quando submetido à tratamento superficial.

O método de tratamento superficial foi determinado partindo dos dados da seção anterior, e diversos experimentos foram feitos até encontrar um método

de tratamento adequado para esse formato de corpo de prova, conforme seção 3.1.2.2.

### 3.1.2.1. Impressão dos corpos de prova

Os corpos de prova em questão serão posteriormente usados em ensaios de tração, portanto, foram projetados segundo duas normas para esse tipo de ensaio mecânico: ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (figura 22) e ASTM D3039 - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (figura 23); a seção 3.5 discute o motivo da adoção de duas normas diferentes. A espessura de camada utilizada foi de 0,2 mm, conforme feito nos testes iniciais com corpos de prova de pequenas dimensões; a espessura média de camada agiliza a impressão sem grandes perdas de qualidade superficial. O preenchimento adotado foi de 65%, buscando peças mais leves e com menos consumo de material (consequentemente, mais baratas) (ASTM, 2002) (ASTM, 2015a).







Figura 23 - Corpo de prova para ensaio de tração segundo ASTM D3039.

Fonte: o autor.

# 3.1.2.2. Tratamento com vapor de acetona para os corpos de prova de ensaio de tração

Segundo Lalehpour e Barari (2016), a área superficial da peça terá influência na duração necessária do banho de vapor de acetona para um tratamento superficial adequado. Assim, foi necessário determinar um novo arranjo de tratamento que seja adequado aos corpos de prova.

Esse processo foi feito através de diversos testes variando concentração de acetona, posição da peça, duração do banho de vapor, divisão do banho de vapor em ciclos, e mudanças no recipiente utilizado; até que o arranjo de tratamento trouxesse bons resultados, e que fosse possível replicar os resultados diversas vezes consecutivas, para diversos corpos de prova. Esse processo será descrito resumidamente nessa sessão, e detalhado na sessão de resultados. Uma representação visual da sequência de experimentos para definir o método de tratamento superficial, pode ser vista na Figura 24.





Fonte: o autor.

Para tratar os corpos de prova maiores, adotou-se num primeiro momento um recipiente plástico (polipropileno) de dois litros com tampa. Inicialmente, concentração de acetona (20ml/l) foi mantida, adicionando 40 ml de acetona ao recipiente. Para auxiliar na distribuição do vapor, um cooler foi colocado dentro do recipiente. O tempo de tratamento escolhido foi de 30 minutos, por ter mostrado os melhores resultados nos testes com corpos de prova menores; e a vedação do recipiente continuou sendo feita com massa de modelar, como no método anterior. Os corpos de prova foram pendurados pelas alças laterais em posição vertical (face mais estreita virada para baixo).

Buscando melhores resultados no tratamento, variou-se o volume de acetona (40, 10 e 5 ml) o uso do cooler (ligado ou desligado) e a posição de suspensão da peça (vertical ou horizontal, com a face mais larga virada para baixo).

Em um segundo momento, o arranjo para o tratamento foi trocado, para permitir a rotação da peça. Um servomotor foi fixado em uma das extremidades de um recipiente plástico (polipropileno) de 3,75 l, para forçar a rotação de um dos pontos de fixação do corpo de prova. A outra extremidade gira livremente em um suporte. Nesse cenário, ocorreu condensação de acetona na tampa do recipiente. Variações no formato da tampa, ou barreiras para proteger o corpo de prova da precipitação de acetona não foram eficazes, então, uma nova fonte de calor foi adicionada na tampa.

O aquecimento do novo arranjo também foi feito através de água quente, mantendo a acetona no interior do recipiente na forma de vapor. Na busca por melhores resultados, foram variadas a temperatura do arranjo, a concentração de acetona, a velocidade de rotação da peça, e o uso ou não de fonte de calor na tampa do recipiente.

Tentando atingir resultados mais consistentes, o recipiente plástico foi trocado por um metálico, com capacidade de 3 litros, que distribuiria o calor mais uniformemente dentro do recipiente, e consequentemente reduziria a condensação de acetona. Nesse novo cenário, o aquecimento foi feito da mesma maneira, e a vedação foi feita com massa de modelar. As peças foram tratadas usando uma concentração de 5ml/l de acetona, em 2 ciclos de 30 minutos, para manter os melhores resultados observados nos recipientes plásticos.

Para atender as normas dos ensaios de tração que serão realizados, serão tratados 15 corpos de prova que seguem a norma ASTM D638, e mais 15 corpos de prova que seguem a norma ASTM D3039. As condições avaliadas nos ensaios de tração serão descritas na seção 2.4.

### 3.1.3 Tratamento superficial de corpos de prova para ensaio de flexão

Essa seção trará as características de impressão e tratamento dos corpos de prova que serão posteriormente utilizados no ensaio de flexão. Serão discutidos os parâmetros de impressão, e a escolha do método de tratamento superficial dos mesmos.

### 3.1.3.1 Impressão dos corpos de prova para ensaio de flexão

Os ensaios de flexão serão feitos seguindo a norma ASTM D790 – "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials"; assim, os corpos de prova foram projetados de acordo com essa norma (figura 25); comprimento e largura do corpo de prova foram projetados seguindo as especificações da norma, porém, a altura precisou ser adaptada, já que a sugerida pela norma era insuficiente para garantir que não haveria deformações ou quebra do corpo de prova durante a retirada da camada de suporte utilizada no processo de impressão 3D. Os corpos de prova foram impressos na orientação horizontal, conforme mostra a figura 25; a espessura de camada de 0,2 mm foi mantida, assim como o preenchimento de 65%.



Figura 25- Corpos de prova para ensaio de flexão de três pontos.

Fonte: o autor.

## 3.1.3.2. Tratamento com vapor de acetona para os corpos de prova de ensaio de flexão

Os corpos de prova aqui utilizados diferem dos corpos de prova de tração apenas em comprimento, mantendo a área superficial próxima da analisada nos corpos de prova para ensaio de tração. Assim, o mesmo arranjo experimental será utilizado para o tratamento dos corpos de prova para ensaio de flexão; ou seja, peça em rotação em um recipiente metálico de 3 litros, concentração de 5ml/l de acetona, dois pequenos coolers para ajudar na circulação do vapor, e dois ciclos de 30 minutos com intervalo mínimo de 45 minutos entre eles.

### 3.1.4 Corpos de prova para ensaio de compressão

Essa seção trará as características de impressão e tratamento dos corpos de prova que serão posteriormente utilizados no ensaio de compressão. Como esses corpos de prova também diferem dos anteriores em tamanho e formato, precisarão do seu próprio arranjo para tratamento superficial.

### 3.1.4.1 Impressão dos corpos de prova

Os ensaios de compressão serão feitos seguindo a norma ASTM D695 – "Compressive Properties of Rigid Plastics", assim, os corpos de prova foram projetados de acordo com essa norma (Figura 26). Os corpos de prova foram impressos na orientação horizontal, de forma que a força no ensaio de compressão seja aplicada perpendicularmente à direção de intersecção das camadas; a espessura de camada de 0,2 mm foi mantida, assim como o preenchimento de 65%.



Fonte: o autor.

### 3.1.4.2 Tratamento superficial com vapor de acetona

Para o tratamento dos corpos de prova de compressão, o tempo do ciclo de 30 minutos foi mantido, assim como a concentração de 5 ml de acetona por litro de recipiente. Usou-se um recipiente metálico de 1,8 litros com um visor de vidro na tampa; um par de motores de passo foi usado para rotacionar (120 rpm) simultaneamente dois corpos de prova presos pelas alças no recipiente. A vedação foi feita usando massa de modelar.

Dois corpos de prova são colocados no recipiente por vez, com 9 ml de acetona (concentração de 5ml de acetona por litro do recipiente). A base do recipiente é colocada em água e sua temperatura é mantida entre 50 e 60°C; como os corpos de prova tem menor área superficial, apenas um ciclo de 30 minutos foi suficiente para tratar as peças. Após o ciclo, as peças foram mantidas em rotação com a caixa aberta, por pelo menos 40 minutos antes de serem manuseadas.

# 3.2. INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO NAS PROPRIEDADES SUPERFICIAIS (NANOINDENTAÇÃO)

Os corpos de prova descritos na seção 2.1.1.1, com diferentes tempos de tratamento superficial (0 min., 15 min., 30 min., 45 min. e 60 min.), passaram por ensaio em um nanoindentador (Hysitron Triboindenter 950, Brucker, EUA) usando carga de 1mN, e um tempo de carregamento 5x2x5 (a carga aumenta linearmente por 5 segundos, se mantém estável por 2 segundos, e diminui linearmente em 5 segundos). Três indentações foram feitas em cada corpo de prova, na face maior da peça que mostrou o melhor resultado visual do tratamento, para obter uma média das propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, dureza e profundidade da indentação).

Foram feitos corpos de prova em duas orientações de impressão, horizontal e vertical, conforme descrito na seção 2.1.1.1., que foram os mesmos corpos de prova submetidos à tratamento superficial. O estudo de Cole e Zander (2016b) demonstrou que as propriedades mecânicas sofrem alterações na região de intersecção de camadas, assim, as três endentações foram feitas em áreas sem intersecção de camada, e foram feitos ensaios nas duas orientações de impressão, para verificar se há alterações nas propriedades nesse cenário também.

# 3.3. INFLUÊNCIA DO TEMPO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL NA TOPOGRAFIA E NA RUGOSIDADE

Os mesmos corpos de prova usados no ensaio de nanoindentação foram usados para análise de topografia e rugosidade, que foram feitas em uma das faces maiores do corpo de prova, já que a outra foi danificada devido à fixação no nanoindentador (a peça é colada em uma placa para que a face oposta seja submetida ao teste). No caso das peças impressas horizontalmente, onde uma das faces maiores fica acoplada ao material de suporte, tomou-se o cuidado de analisar a face que estava livre no momento da impressão, já que a retirada do material de suporte gera alterações na superfície da peça.

A análise topográfica e o perfil de rugosidade foram feitos usando um perfilômetro ótico (CCI-HD, Taylor Hobson, Inglaterra) uma abordagem sem

contato que fornece mapas topográficos 3D e perfis de rugosidade. para cada corpo de prova em diferente estágio de tratamento, foram feitos um mapa topográfico e um perfil de rugosidade.

A análise topográfica feita pelo CCI-HD é capaz de captar perfis de ondulação e de rugosidade. O perfil de rugosidade diz respeito à aspereza do material, enquanto o de ondulação diz respeito à forma do objeto. No caso da peça impressa, por exemplo, o perfil de ondulação seria gerado pela interação entre camadas, enquanto o de rugosidade seria gerado pela aspereza do polímero; o CCI-HD permite que esses perfis sejam analisados separadamente e a soma dos dois perfis gera o perfil médio.

O perfil utilizado não desconsiderou o perfil de ondulação, já que a análise tinha interesse na redução da rugosidade gerada pela intersecção entre camadas que ocorre na impressão 3D, e não apenas na rugosidade superficial do ABS.

# 3.4. ALTERAÇÃO DE RUGOSIDADE APÓS TRATAMENTO SUPERFICIAL DOS CORPOS DE PROVA DE TRAÇÃO E FLEXÃO.

Após o tratamento superficial, os corpos de prova dos ensaios de tração e flexão tiveram sua rugosidade aferida por um rugosímetro portátil (Surtronic 3+, Taylor-Hoson, UK). Cada corpo de prova passou por 6 medidas de rugosidade (3 em cada extremidade do CP), e a média foi calculada para obter a rugosidade do CP. Todas as medidas foram feitas em uma bancada sem vibrações, conforme manda o equipamento, e as peças foram fixadas na bancada com fita adesiva.

Os corpos de prova para ensaio de flexão que não foram tratados, também tiveram a rugosidade medida pelo rugosímetro, seguindo o mesmo processo. Porém, em diversas áreas do corpo de prova sem tratamento, a rugosidade era maior do que a capacidade de medição do rugosímetro (12 µm). Assim, foi feita uma média de todos os valores de rugosidade obtidos, que para efeito de comparação será utilizada como rugosidade média das peças impressas em 3D.

## 3.5. ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi feito buscando o módulo de elasticidade, a carga de escoamento e a carga de ruptura. Três temperaturas diferentes foram usadas nos testes: temperatura ambiente (cerca de 22°C) para observar o comportamento do material na maioria dos dias comuns; 40°C, para observar o comportamento do material perto das máximas temperaturas ambientes mostrada em regiões do Brasil; e 80°C, para considerar o comportamento do corpo de prova quando próximo da temperatura de transição vítrea do ABS (aproximadamente 86° C).

Não existem normas específicas para ensaios com corpos de provas impressos em 3D, assim, os ensaios serão feitos usando normas para corpos de prova poliméricos fabricados por métodos tradicionais. Duas normas serão aqui consideradas: ASTM D638 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) e ASTM D3039 (Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials). A norma ASTM D638 é direcionada a testes de tração de plásticos reforçados ou não, usando corpo de prova em forma de haltere, enquanto a norma ASTM D 3039 é indicada para ensaios de tração usando materiais compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras de alto módulo, e usa corpos de prova em forma de paralelepípedo. Os corpos de prova podem ser vistos nas Figuras 22 e 23. Além das diferenças no formato do corpo de prova, as normas também diferem nas velocidades de ensaio, 5 mm/min e 2 mm/min, respectivamente (ASTM, 2015a) (ASTM, 2002).

O material em questão nesse estudo é um polímero, e não um compósito; assim, a norma ASTM D638 é a escolha mais adequada para o ensaio de tração e, por essa razão, foi utilizada nos ensaios. Porém, foram feitos ensaios usando a norma ASTM D3039 para permitir comparação com outro estudo na área. Em (RANKOUHI et al., 2016b) utilizou-se a norma ASTM D3039, porque o padrão de preenchimento da impressão do estudo gerou pontos de acúmulo de tensão em corpos de prova com forma de haltere. Apesar de o padrão de impressão aqui utilizado não apresentar pontos de acúmulo de tensão, para que fosse possível comparar os resultados, fez-se ensaios seguindo a norma ASTM D3039 também. As duas normas exigem que no mínimo cinco ensaios sejam feitos para validade estatística, assim, foram feitos 5 ensaios para cada temperatura com cada norma.

Conforme a seção 2.1.2.1., os corpos de prova de tração foram impressos na posição horizontal, com a menor dimensão no eixo z, uma das faces de maior área voltada para baixo. Dois motivos levaram a escolha dessa orientação: ela representa a otimização do tempo de impressão (o número de camadas é o parâmetro que mais impacta no tempo do processo, ou seja, quanto menor o valor de z, mais rápida a impressão), e a força de tração seria aplicada paralelamente à direção das camadas. Por ser a que otimiza o tempo de impressão, as peças de próteses fabricadas utilizando manufatura aditiva serão impressas nessa mesma orientação.

Apesar disso, o quesito chave na escolha da orientação foi a direção de aplicação da força de tração. (COLE; ZANDER, 2016), (WENDT et al., 2016), (CROCCOLO; DE AGOSTINIS; OLMI, 2013) demonstram que as propriedades mecânicas de peças impressas variam de acordo com a orientação de aplicação da força, sendo que orientações perpendiculares às camadas de impressão (onde a força tende à separar as camadas de impressão) apresentam valores de resistência menores; portanto, optou-se por usar uma orientação de impressão na qual a força de tração fosse aplicada paralelamente às camadas, para observar a resistência da peça como um todo, e não apenas no caso de separação de camadas.

Os ensaios foram feitos em um sistema universal de testes (até 50kN) (3369, Instron, EUA) com a câmara aquecida do próprio equipamento. Para garantir que o interior da peça estivesse aquecido adequadamente, todas as peças foram colocadas no interior da câmara desde o primeiro teste. Para o primeiro teste, esperou-se 45 minutos, e cerca de 10 minutos para cada um dos subsequentes, já com as peças presas às pinças. A velocidade de cada ensaio foi escolhida de acordo com a norma em uso. Os corpos de prova foram tracionados até a ruptura.

### 3.6. ENSAIO DE COMPRESSÃO

O ensaio de compressão foi feito buscando o módulo de elasticidade, a tensão compressiva de escoamento e a tensão de resistência à compressão. Não existem normas específicas para ensaios com corpos de provas impressos em 3D, assim, os ensaios serão feitos usando normas para corpos de prova poliméricos fabricados por métodos tradicionais. A norma seguida foi a ASTM D695 (Compressive Properties of Rigid Plastics), e o corpo de prova foi impresso seguindo as medidas da norma. Como no ensaio de tração, foram usadas três temperaturas para o ensaio: temperatura ambiente, 40° C e 80° C. O corpo de prova também foi impresso na horizontal, para que a força compressiva fosse aplicada perpendicularmente à intersecção das camadas.

Os ensaios foram feitos no mesmo sistema universal de testes (até 50kN) (3369, Instron, EUA) com a câmara aquecida do próprio equipamento. Para garantir que o interior da peça estivesse aquecido adequadamente, todas as peças foram colocadas no interior da câmara desde o primeiro teste. Para o primeiro teste, esperou-se 45 minutos, e cerca de 10 minutos para cada um dos subsequentes, já com as peças posicionadas no equipamento. A velocidade do ensaio foi de mm/minuto.

## 3.7. ENSAIO DE FLEXÃO

Não existem normas específicas para ensaios com corpos de provas impressos em 3D, assim, os ensaios serão feitos usando normas para corpos de prova poliméricos fabricados por métodos tradicionais. Foram feitos ensaios de flexão de três pontos, seguindo a ASTM D790 (Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials). Nesse ensaio, um corpo de prova é apoiado por dois pontos de suporte, e uma carga crescente é aplicada no centro do corpo de prova, como mostra a figura 27. Para a distância entre os apoios (L), a norma recomenda que se use 16 vezes a altura (d) da peça (nesse caso, L =  $16 \times 7 = 112 \text{ mm}$ ).



Figura 27 - Esquema do ensaio de flexão de três pontos.

Fonte: ASTM D790.

Os corpos de prova foram adaptados dessa norma, já que a altura sugerida pela mesma é muito pequena para o processo de fabricação por impressão 3D, optou-se por uma altura maior que a sugerida na norma, evitando a deformação da peça no momento de retirada da camada suporte de impressão, largura e comprimento da peça foram feitos de acordo com a norma. Além disso, foram projetados dois prolongamentos nas extremidades dos corpos de prova, por onde esses corpos de prova seriam suspensos para tratamento superficial com vapor de acetona, esses prolongamentos serão desconsiderados nos cálculos envolvendo o comprimento do corpo de prova.

O aumento da carga aplicada no corpo de prova, se dá pelo deslocamento do sistema, ou seja, a velocidade de ensaio. Essa é calculada de acordo com a altura da peça, seguindo a equação dada pela ASTM D790:

$$R = \frac{ZL^2}{6d}$$

Onde:

R = velocidade do ensaio, mm/min,

L = distância entre os apoios, mm,

d = altura do corpo de prova, mm

Z = taxa de deformação da fibra exterior, mm/mm/min. O valor de Z deve ser igual a 0,01

Nesse caso, temos:

$$R = \frac{0.01 \times 112^2}{6 \times 7} \cong 2.987 \, mm/min$$

Assim, os ensaios de flexão foram feitos a velocidade de 2,987 mm/min. Como nos ensaios de tração e compressão, foram consideradas três temperaturas: temperatura ambiente (cerca de 22°C), 40°C e 80°C, e dois tipos de corpo de prova: tratados e não tratados. Cinco corpos de prova foram testados em cada uma das condições analisadas. Os ensaios foram feitos em um sistema universal de testes (até 50kN) (3369, Instron, EUA) com a câmara aquecida do próprio equipamento (3119-610, Instron, EUA).

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo, inicialmente serão descritos os resultados do tratamento superficial com vapor de acetona, até determinar um protocolo de tratamento adequado para cada tipo de corpo de prova.

A seguir, os corpos de prova de pequenas dimensões serão usados para determinar a interferência do tempo de tratamento nas propriedades superficiais, através de ensaios de nanoindentação e análise topográfica. Alguns corpos de prova para ensaios de tração e de flexão serão utilizados para medidas de rugosidade linear, buscando avaliar a rugosidade macro dos corpos de prova.

Na sequência, discutem-se os resultados dos ensaios de tração, compressão e flexão, analisando as influências do tratamento superficial e da temperatura nas propriedades mecânicas dos corpos de prova.

## 4.1. TRATAMENTO SUPERFICIAL COM VAPOR DE ACETONA

Nessa seção, serão descritos os resultados das diferentes condições de tratamento superficial com vapor de acetona em diferentes corpos de prova. Inicialmente, discute-se o efeito do tempo de tratamento em corpos de prova impressos vertical e horizontalmente.

A seguir, serão detalhados os experimentos realizados para alcançar uma metodologia de tratamento adequada e replicável para os corpos de prova de tração. Por fim, o tratamento determinado para corpos de prova de compressão e flexão será descrito.

# 4.1.1. Análise dos efeitos do tempo de tratamento e orientação de impressão

A orientação de impressão dos corpos de prova gera acabamentos superficiais diferentes. A Figura 28 mostra um comparativo entre as faces maiores das duas orientações de impressão.



Figura 28 - Corpo de prova impresso verticalmente (A) e horizontalmente (B).

Fonte: o autor.

A mudança na superfície dos corpos de prova após o tratamento químico pôde ser observada rapidamente. Mesmo peças que passaram menos tempo em banho de vapor (foram tratadas por 15 minutos), tiveram uma mudança significativa em seu exterior, ficando mais brilhantes, visivelmente menos rugosas, e com cantos mais arredondados.

No entanto, ainda é possível ver as camadas formarem o processo de impressão, e o corpo de prova não ficou homogêneo, deixando algumas partes da superfície sem tratamento. Os resultados foram muito semelhantes para peças impressas horizontalmente e verticalmente. Uma comparação macro entre as peças aparece nas figuras 29 e 30.



Figura 29 - Peças impressas verticalmente com diferentes tempos de tratamento.

Fonte: o autor.





Fonte: o autor.

No corpo de prova tratado por 30 minutos, ainda é possível ver poucos limites de camada, mas os corpos de prova ficaram significativamente mais lisos, mais brilhantes e com bordas mais arredondadas. Poucas e pequenas áreas não tratadas podem ser vistas.

Com um banho de vapor de 45 minutos, as áreas não tratadas na superfície da peça não podem mais ser vistas, nem os limites das camadas; a peça é mais homogênea, lisa, com cantos e bordas redondos e brilhante; o mesmo aspecto geral ocorre em peças tratadas por 60 minutos. Porém, os contornos do corpo de prova sofreram grandes alterações, adquirindo um aspecto "escorrido".

O tratamento solubiliza as camadas externas, causando uma espécie de efeito de derretimento que as faz escorrer. Em alguns casos, esse efeito pode alterar consideravelmente a forma da peça, como foi o caso, principalmente, das peças tratadas por 60 minutos, onde os cantos arredondaram demais; na peça impressa horizontalmente é possível visualizar, inclusive, deformações na lateral da peça.

Devido às características de preenchimento, as peças impressas horizontalmente não resistiram tão bem a tempos de tratamento mais longos, o que fica evidente observando-se a lateral da peça impressa na horizontal tratada por 60 minutos, onde é possível perceber que a peça está tomando o formato da estrutura de preenchimento, ou seja, a camada externa sofreu uma solubilização mais profunda, tornando-se muito mais mole, e o padrão de estrutura de preenchimento não ajudou a manter a posição da camada externa. A Figura 31 mostra que, em alguns casos, as camadas externas amolecem demais e cedem, adquirindo o formato da estrutura de preenchimento. Este fenômeno não aconteceu com peças impressas verticalmente, devido à posição da estrutura de preenchimento, que é feita seguindo a orientação da impressão, e fica em posição paralela à gravidade, perpendicular à mostrada na figura 31, das peças impressas horizontalmente.

Figura 31 - Corpo de prova impresso horizontalmente após 60 minutos de tratamento, camada externa cedeu adquirindo o formato da estrutura de preenchimento da peça.



Fonte: o autor.

Por mostrar grande melhora no aspecto visual da superfície, grande redução de rugosidade e baixa alteração na morfologia da peça, a melhor opção seria um tratamento de 30 minutos com banho de vapor, com peças impressas verticalmente (camadas perpendiculares à força gravitacional).

### 4.1.2. Corpos de prova alongados para ensaio de tração

Para determinar as condições de tratamento dos corpos de prova que seriam usados nos ensaios de tração, diversos testes em diferentes arranjos experimentais foram feitos. Conforme dito na metodologia, foram usados dois arranjos com recipientes plásticos e um arranjo com recipiente metálico; além de variar diversos parâmetros do tratamento nos arranjos até alcançar um resultado adequado e replicável. As seções a seguir detalham os procedimentos feitos em cada um dos arranjos de tratamento, e os resultados no tratamento dos corpos de prova

## 4.1.2.1. Arranjo para tratamento superficial de corpos de prova de ensaio de tração com recipiente plástico de 2 litros de volume.

Nesse cenário, utilizou-se um recipiente retangular, com um cooler de área superficial posicionado no centro do recipiente. A peça foi colocada na diagonal do recipiente, paralela a tampa, e foi suspensa pelas alças laterais, com sua face mais estreita voltada para baixo, de maneira que apenas as alças da peça tivessem contato com qualquer outra superfície. Variam-se parâmetro como a concentração de acetona, a posição da peça, e o uso do cooler. A temperatura do arranjo foi mantida entre 50 e 60°C.

Os arranjos inicialmente utilizados foram: 40 ml de acetona, posição vertical, cooler ligado; 10 ml de acetona, posição vertical, cooler ligado; 10 ml de acetona, posição vertical, cooler desligado; 5 ml de acetona, posição vertical, cooler ligado; 5 ml de acetona, posição vertical, cooler ligado; 10 ml de acetona, posição horizontal, cooler desligado. Os resultados desses testes serão detalhados a seguir, e ilustrados nas figuras 32 e 33.

Em uma primeira abordagem, a opção foi manter os parâmetros que levaram aos melhores resultados com corpos de prova menores, ou seja, 30 minutos de tratamento, com concentração de 20 ml de acetona por litro de volume do recipiente (totalizando 40 ml para um recipiente de dois litros). Usando o cooler para homogeneizar a distribuição do vapor, dado o maior volume do recipiente. O resultado dessa primeira abordagem não foi satisfatório. A região central do corpo de prova foi supertratada, a peça rompeu, e apresentou um aspecto de derretimento (figura 32).

Numa tentativa inicial de solucionar o problema, reduziu-se o volume de acetona, voltando para o volume do tratamento dos corpos de prova menores, de 10 ml, ainda com uso do cooler. A figura 32 mostra que, nessa condição, o tratamento foi mais acentuado na região central da peça, que inclusive cedeu, perdendo o formato original.

Pensando na hipótese de que o cooler fosse o responsável por esse tratamento acentuado no centro da peça, não homogêneo, repetiu-se o volume de acetona (10ml), desligando o cooler. Resultados similares foram obtidos, com o centro da peça sendo tratado mais intensamente do que as laterais, porém, a peça manteve seu formato e não cedeu na região central.

Ainda foram feitas mais duas tentativas, reduzindo o volume de acetona, usando 5 ml. Na situação em que o cooler foi ligado, percebe-se, novamente, acentuação do tratamento na região central da peça. Já quando o cooler foi desligado, é possível observar que a peça foi tratada mais homogeneamente, porém o tratamento foi insuficiente para reduzir significativamente a rugosidade da peça.

Visando evitar o tratamento acentuado na região central da peça, a posição na qual elas eram suspensas foi alterada. Ao invés de deixá-las com a face mais estreita para baixo (posição vertical), uma das faces mais largas foi colocada para baixo (posição horizontal), para eliminar a possibilidade de escorrimento de acetona ou da pasta de polímero com acetona para o centro devido ao formato do corpo de prova (formato de haltere), supondo que essa poderia ser uma das causas do tratamento mais intenso no centro da peça. Esse procedimento foi feito nos corpos de prova verdes. O objetivo era virar a peça após 15 minutos de tratamento, fazendo dois ciclos, usando 10ml de acetona. Porém, quando o recipiente foi aberto ao fim dos primeiros 15 minutos, já foi possível observar o centro da peça com uma concentração maior de acetona, e o segundo ciclo de tratamento não foi feito.

Os corpos de prova verdes da figura 32 mostram o centro da peça supertratado quando comparado às extremidades. Para a peça que teve o cooler ligado, houve, inclusive, alterações de formato pelo excesso de acetona na região central. Nas duas peças, a diferença é significativa entre o centro e as extremidades.

Pensando que acetona poderia estar condensando na tampa do recipiente e gotejando na peça, devido a diferenças de temperatura em regiões mais distantes do aquecimento (fundo do recipiente), esse processo foi repetido colocando a peça mais próxima da região aquecida do recipiente. Mais uma vez, a face mais larga foi deixada virada para baixo, e o tratamento foi feito em duas etapas de 15 minutos. Foram usados 10 ml de acetona nos primeiros 15 minutos e, para suprir o consumo de solvente usado no tratamento da primeira face, e perdas no momento da abertura da tampa, 5 ml foram adicionados quando a

peça foi virada. Nesse caso, o resultado foi homogêneo e a peça ficou tratada por igual, conforme figura 33.

Apesar de ter alcançado um bom resultado em uma das tentativas de tratamento, os resultados nesse arranjo são instáveis e difíceis de controlar (o recipiente é opaco e impede a visualização durante o tratamento), e o resultado não foi replicado numa segunda tentativa. Assim, foi proposto um novo arranjo, buscando resultados melhores.



Figura 32 - Resultados do tratamento com vapor de acetona para várias condições

Fonte: o autor.

Figura 33 - Resultado do tratamento com vapor de acetona para corpo de prova posicionado mais ao fundo do recipiente.



Fonte: o autor.

#### 4.1.2.2. Arranjo experimental com recipiente plástico de 3,75 litros

Nesse arranjo, foi adotado um recipiente plástico (polipropileno – PP) resistente à acetona, com tampa transparente para permitir que a qualidade da superfície da peça fosse vista durante o tratamento. Um sistema de rotação foi adotado buscando minimizar o efeito do escorrimento da pasta de acetona e ABS, gerada durante o tratamento superficial, sempre no mesmo sentido, visando um tratamento mais homogêneo. O arranjo está esqematizado na figura 34. O motor de passo utilizado no arranjo é da empresa Kiatronics, e suas características estão ilustradas na figura 35.



Fonte: o autor.

Figura 35 - Motor de passo utilizado para rotacionar o corpo de prova.



#### 28BYJ-48 - 5V Stepper Motor

The 28BYJ-48 is a small stepper motor suitable for a large range of applications.



Fonte: adaptado de http://robocraft.ru/files/datasheet/28BYJ-48.pdf

No primeiro ensaio, foram usados 15 ml de acetona (concentração de 4 ml por litro de recipiente), e a rotação do motor de 30 rpm. A peça foi tratada por 30 minutos. Nesse cenário, houve condensação da acetona na tampa do recipiente, isso fez com que gotas de acetona atingissem regiões da peça, que ficaram supertratadas em relação ao restante da superfície (figura 36).



Figura 36 - Peças tratadas por 30 minutos, usando 4 ml de acetona por litro de recipiente. Destaque para as áreas supertratadas.

Fonte: o autor.

A primeira estratégia para solucionar esse problema foi aumentar a concentração de acetona (20 ml foram usados, alcançando a concentração de 5,3 ml de acetona por litro de recipiente) e colocar um anteparo entre a tampa e a peça, para permitir que o vapor atingisse o corpo de prova, mas prevenir o gotejamento no corpo de prova. Esse anteparo foi feito encaixando uma folha plástica no recipiente (figuras 37 e 38). Essa primeira abordagem não foi eficiente, já que a acetona condensou na tampa, e ficou presa entre a tampa e o anteparo, reduzindo a quantidade de vapor de acetona, e levando a um tratamento insuficiente do corpo de prova (figura 39).

Figura 37 - Vistas lateral e superior de esquema de arranjo para tratamento superficial com encaixe de anteparo plástico para proteção do corpo de prova.



Fonte: o autor

Figura 38 - Foto do esquema com encaixe de folha plástica, mostrando acúmulo de acetona líquida entre a tampa e a folha plástica.







Figura 39 - Peça tratada por 30 min, com 20 ml de acetona, no esquema com encaixe de folha plástica para arredondamento da tampa do recipiente.

Em uma segunda tentativa, suportes foram colocados para arredondar a tampa e assim evitar o gotejamento de acetona na peça sem a necessidade do anteparo (figuras 40 e 41). Porém, houve novamente condensação de acetona na tampa, e a concentração de acetona no vapor diminui. Mais uma vez, o tratamento obtido foi insuficiente, por ser menos pronunciado nos contornos do corpo de prova (figura 42).







Fonte: o autor.

Fonte: o autor



Figura 41 - Foto do esquema com uso de hastes para arredondar a tampa.

Fonte: o autor

Figura 42 - Peça tratada por 30 min, com 20 ml de acetona, no esquema com arredondamento da tampa do recipiente através de hastes.



Fonte: o autor.

Outra solução possível para evitar a condensação seria aumentar a temperatura da água, para que a temperatura na tampa fosse mais alta, evitando a condensação. Para tanto, a temperatura no fundo e na tampa do arranjo foram medidas simultaneamente, durante o aquecimento, conforme tabela 3. A diferença de valor entre as duas temperaturas indica que, para que a tampa do recipiente alcance o valor da temperatura de ebulição da acetona (cerca de 56°C), a temperatura do fundo precisaria ser muito mais alta, e o polímero poderia atingir a temperatura de transição vítrea (entre 80 e 125°C), o que impede a abordagem de aumentar a temperatura do aquecimento.
Temperatura na tampa (ºC)	Temperatura no fundo (°C)
49	70
47	65
46	60
45	55
44	50

Tabela 3 - Diferença de temperatura entre o fundo e a tampa do recipiente.

Assim, a solução proposta foi adicionar uma fonte de calor na tampa do recipiente. Um secador de cabelos foi posicionado para soprar ar quente na tampa do recipiente, fazendo com que a mesma atingisse a temperatura adequada, e evitasse a condensação da acetona (figura 43)

Figura 43 - Esquema com a posição da fonte de calor (secador de cabelo) no arranjo para tratamento superficial.





Fonte: o Autor.

Diversas tentativas foram feitas nesse arranjo. O tempo de 30 minutos definido anteriormente foi mantido, mas a quantidade de acetona, a posição dos pesos (dentro ou fora do recipiente) e a temperatura do aquecimento do arranjo foram variados, buscando melhores resultados. Ainda assim, todas as peças foram subtratadas (figura 44).

	Qtde. de Acetona	Temperatura
E *	20. ml	50~60°
	20. ml	50~60°
	30. ml	50~60°
	20. ml	60~70°
	30. ml	60~70°
	40. ml	60~70°

Figura 44 - Resultados de tratamentos com o arranjo com aquecimento na tampa do recipiente.

\* Esse CP foi tratado com os pesos dentro do recipiente, os demais com os pesos fora. Fonte: o autor.

Tentando melhorar o resultado do tratamento superficial, dois pequenos coolers foram colocados dentro do recipiente (figura 45), a fim de aumentar o contato do vapor de acetona com o corpo de prova, através da circulação forçada. Nesse cenário foram variadas a quantidade de acetona, a temperatura de aquecimento do arranjo, e a posição dos coolers (em um dos casos, foram colocados no fundo do recipiente ao invés de na tampa); o tempo de 30 minutos foi mantido. Ainda assim, todas as peças foram subtratadas, conforme figura 46.

Figura 45 - Esquema com aquecimento na tampa do recipiente e coolers no arranjo para tratamento superficial.





Fonte: o autor.

	Qtde. de Acetona	Temperatura
Re la	20 ml	50~60°
	30 ml	50~60°
·*	30 ml	50~60°
	30 ml	60~70°

Figura 46 - Resultados de tratamentos com o arranjo com aquecimento na tampa e coolers.

\* Esse CP foi tratado com os coolers posicionados no fundo do recipiente, ao invés de na tampa. Fonte: o autor.

Segundo (LALEHPOUR; BARARI; BARARI, 2016a), a área superficial da peça está diretamente relacionada com o tempo de tratamento. Assim, é provável que, para o corpo de prova maior, 30 minutos de tratamento sejam insuficientes. Portanto, adotou-se a abordagem de manter a peça em tratamento pelo tempo necessário para alcança um bom acabamento superficial, mantendo os 30 ml de acetona no arranjo, os coolers ligados, e a temperatura do banho maria entre 60 e 70°C; nessas condições, em 55 minutos de tratamento o corpo de prova atingiu o acabamento superficial desejado (figura 47).

Figura 47 - Resultados de tratamentos com o arranjo com aquecimento na tampa e coolers, tempo mais longo de tratamento (55 minutos).



Fonte: o autor

Apesar desse bom resultado com o tempo mais longo de tratamento, ele não foi replicável. As próximas peças feitas com a nova metodologia de tratamento foram supertratadas, perderam a resistência, e o centro da peça cedeu, deixando o corpo de prova curvado.

Para que o tratamento seja mais superficial, mantendo a integridade das camadas mais internas do polímero, é necessário reduzir a duração do ciclo de tratamento. Assim, a nova proposta adotada foi dividir o tempo longo de tratamento em dois ciclos de meia hora, usando 30 ml de acetona em cada ciclo, para manter a concentração. Mesmo nesse cenário, os resultados não foram satisfatórios, e variaram de uma peça para a outra.

Na tentativa de um arranjo com menos variáveis, fez-se um estudo de diferenças de temperatura entre a base e o topo do recipiente plástico, comparado a um recipiente metálico. Os recipientes foram postos em contato com a água aquecida, analisados após um período de 10 minutos. Diferente do que foi observado no recipiente plástico, o metálico mantém a temperatura da tampa acima de 50°C mesmo quando a temperatura da água está abaixo de 60°C, o que mostra que nesse novo arranjo o solvente não condensará na tampa do recipiente, evitando as áreas supertratadas causadas por gotas de solvente. Assim, a mudança para um recipiente metálico foi justificada.

Adotou-se um recipiente metálico em formato de paralelepípedo de 3 litros conforme. Um visor foi feito na tampa, usando uma placa de vidro, para

acompanhar visualmente o processo de tratamento. Continuou-se usando o motor de passo para rotacionar o corpo de prova, e os dois coolers para auxiliar na distribuição do vapor.

A primeira tentativa de tratamento foi feita com dois ciclos de 30 minutos, e concentração de acetona de 5ml/l. O resultado foi satisfatório e replicável, e todos os corpos de prova de tração foram tratados usando essas mesmas condições.

### 4.2. INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO NAS PROPRIEDADES SUPERFICIAIS (NANOINDENTAÇÃO)

A tabela 4 resume os resultados da nanoindentação para cada corpo de prova, profundidade da indentação, módulo de elasticidade (E) e dureza (H). Os valores foram obtidos através da média de três indentações em cada corpo de prova.

Orientação de impressão	Tempo de Tratamento (min)	Profundidade da indentação (nm)	E (GPa)	H (GPa)
	0	404.59±2.18	4.04±0.14	0.2207±0.0026
	15	533.56±10.53	2.92±0.06	0.1306±0.0048
Vertical	30	500.99±6.41	3.01±0.06	0.1470±0.0037
	45	508.06±2.25	2.98±0.02	0.1430±0.0011
	60	492.01 ±8.36	3.03±0.08	0.1519±0.0046
	0	412.94±10.30	3.79±0.01	0.2122±0.0095
	15	535.15±13.22	2.92±0.07	0.1299±0.0060
Horizontal	30	518.06±6.63	2.93±0.04	0.1381±0.0034
	45	482.77±29.68	3.14±0.16	0.1588±0.0190
	60	506.20±10.23	2.99±0.10	0.1443±0.0057

Tabela 4 - Resultados da Nanoindentação.

Fonte: o autor

Devido ao processo de fabricação, as peças impressas são altamente anisotrópicas e apresentam um alto acúmulo de tensões residuais. O tratamento com vapor permite realocar as moléculas poliméricas, o que pode reduzir a anisotropia e alivia o estresse residual; isso causa uma redução na dureza e no módulo elástico, como pode ser visto nos valores da tabela 4.

Durante os primeiros minutos de tratamento, a dureza e o módulo de elasticidade caem drasticamente, reduzindo em torno de 40% e 30%, respectivamente. Depois disso, as alterações nas propriedades são pequenas. Isso mostra que as tensões residuais são aliviadas assim que as forças entre as moléculas são reduzidas.

O que muda com o tempo de tratamento é a profundidade da peça que é solubilizada em acetona, é por isso que na delimitação das primeiras camadas ainda são visíveis e, após tempos de tratamento mais longos, não é mais possível identificar as camadas. A diminuição dessas propriedades mecânicas é significativa. Além disso, (COLE; ZANDER, 2016b) mostrou que o tratamento com acetona também tem um efeito nas propriedades macroscópicas, reduzindo a força e aumentando o alongamento na falha.

Ainda em (COLE; ZANDER, 2016a), é possível perceber uma diferença no módulo de elasticidade entre os picos das camadas de impressão (chamados no artigo de "build") e as zonas intersticiais (encontros entre camadas). A figura 48 ilustra essas diferentes áreas na peça. A variação do módulo de elasticidade entre as duas áreas, na maioria das vezes, foi de pouco mais de 10%, sendo o módulo de elasticidade mais alto na região de intersecção. A variação na dureza é insignificante.

O tratamento superficial com vapor de acetona homogeneíza a superfície, deixam de existir duas zonas diferentes, passando pra uma única superfície mais lisa e tratada. Estudos futuros podem analisar a influência do tratamento superficial nesse fenômeno, e estudar a possibilidade de uma superfície com propriedades mecânicas homogêneas pós tratamento.



Figura 48 - Exemplos de picos de camadas impressas e de zonas intersticiais.

Fonte: (COLE; ZANDER, 2016a)

# 4.3. INFLUÊNCIA DO TEMPO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL NA TOPOGRAFIA E NA RUGOSIDADE

A superfície das peças foi registrada em um aumento de 10x no microscópio do nanoindentador. As figuras 49 a 52 mostram a superfície das peças em todas as condições de impressão e tratamento. Somente nas imagens sem tratamento (figuras 50 e 52), é possível observar as camadas de impressão, a partir dos 15 minutos de tratamento, elas já não são mais visíveis na maior parte da superfície da peça, o que comprova a redução do desnível entre as camadas gerado pelo processo de impressão.



Figura 49 - Peça impressa na horizontal, sem tratamento, aumento de 10x.



Figura 50 - Peças impressas na horizontal, diversos tempos de tratamento, aumento de 10x.



Figura 51 - Peça impressa na vertical, sem tratamento, aumento de 10x.

Fonte: o autor



Figura 52 - Peças impressas na vertical, diversos tempos de tratamento, aumento de 10x.

Fonte: o autor

As análises de topografia e rugosidade foram realizadas no perfilômetro ótico (CCI-HD, Taylor Hobson, Inglaterra). Para cada peça, existe um mapa topográfico (figuras 53 a 62), um gráfico de rugosidade média do perfil (figuras 63 a 66) e um valor médio de rugosidade (tabela 5).

A partir desses mapas topográficos, é possível observar que, mesmo com tratamento de apenas 15 minutos, as camadas e o efeito escada não são mais captados pelo equipamento. Isso acontece porque as partes mais externas do ABS já foram afetadas, mostrando uma superfície mais lisa.

O tratamento superficial de banho de vapor de acetona não é totalmente homogêneo, tempos menores deixam algumas falhas, como buracos na superfície lisa. Apesar disso, as figuras 53 a 62 mostram que quanto maior o tempo de tratamento, menor a diferença entre picos e vales. Isso também pode ser observado nas figuras 65 e 66, que mostram a variação média de altos na superfície, o que significa que essas falhas diminuem com tempos de tratamento mais longos. É possível dizer que a rugosidade do material reduziu, não apenas as camadas não podem mais ser vistas, mas a aspereza do polímero também diminui significativamente.



Figura 53 - Mapa topográfico para peça impressa na horizontal, sem tratamento superficial.

Figura 54 - Mapa topográfico para peça impressa na horizontal, com 15 minutos de tratamento superficial.



Fonte: o autor.



Figura 55 - Mapa topográfico para peça impressa na horizontal, com 30 minutos de tratamento superficial.

Figura 56 - Mapa topográfico para peça impressa na horizontal, com 45 minutos de tratamento superficial.



Fonte: o autor.



Figura 57 - Mapa topográfico para peça impressa na horizontal, com 60 minutos de tratamento superficial.



Figura 57 - Mapa topográfico para peça impressa verticalmente, sem tratamento superficial.



Figura 59 - Mapa topográfico para peça impressa verticalmente, com 15 minutos de tratamento superficial.

Figura 60 - Mapa topográfico para peça impressa verticalmente, com 30 minutos de tratamento superficial.





Figura 61 - Mapa topográfico para peça impressa verticalmente, com 45 minutos de tratamento superficial.

Figura 62 - Mapa topográfico para peça impressa verticalmente, com 60 minutos de tratamento superficial.





Figura 63 - Perfil médio de rugosidade para peça impressa horizontalmente, não tratada.





Fonte: o autor.









As figuras 65 e 66 mostram perfis de rugosidade similares para as peças tratadas por diferentes tempos, e, de maneira geral, os valores para as peças verticalmente impressas são menores do que os das peças horizontalmente impressas, reforçando que o desnível entre as camadas é mitigado logo no início do tratamento. A rugosidade média (Ra) reduz drasticamente com o tratamento com banho de vapor de acetona. Para as peças impressas horizontalmente, observa-se um decréscimo de 98,4% em Ra, enquanto para as peças impressas verticais esse número é ainda maior, chegando a 99,6%. como dito anteriormente, as peças impressas verticalmente respondem melhor ao tratamento com banho de vapor, devido à posição da estrutura de enchimento, que proporciona melhor suporte; e as camadas são perpendiculares à gravidade, o que facilita o movimento do polímero.

Orientação de Impressão:	Tempo de tratamento (min)	Ra (µm)
	0	2.657
	15	0.7138
Horizontal	30	0.09692
	45	0.05046
	60	0.0420
	0	6.124
	15	0.04114
Vertical	30	0.03955
	45	0.02829
	60	0.02343

Tabela 5 - Rugosidade média (Ra) para todos os corpos de prova.

Fonte: o autor

# 4.4. ALTERAÇÃO DE RUGOSIDADE APÓS TRATAMENTO SUPERFICIAL DOS CORPOS DE PROVA DE TRAÇÃO E FLEXÃO.

Os corpos de prova tratados usados nos ensaios de tração e flexão passaram antes por aferição de rugosidade usando um rugosímetro portátil (marca, modelo). Os corpos de prova de ensaio de flexão não tratados passaram pelo mesmo processo. A tabela 6 mostra o valor médio de rugosidade encontrado em cada peça. Segundo o manual do rugosímetro, a rugosidade máxima que ele é capaz de medir é de 12µm; valor menor do que o encontrado em certas áreas de peças não tratadas. Sendo assim, nos corpos de prova não tratados, foram feitas as seis medidas sempre que possível, mas em alguns casos, o equipamento não conseguiu medir o valor. Foram consideradas apenas as medições que o equipamento foi capaz de realizar para serem usadas nas comparações, porém o valor real médio de rugosidade das peças não tratadas é mais alto que o aqui descrito.

Valores de rugosidade para corpos de prova não tratados (um)						
7,62	6,39	7,39	6,09	8,22	5,58	
7,06	4,73	6,06	5,77	4,95	5,80	
6,84	5,33	7,23	7,21	7,80	7,69	

Tabela 6 - Rugosidade média para corpos de prova não tratados.

Fonte: o autor.

	Valores o	de rugosida	de para cor	pos de prov	a não trata	dos (um)	
Tração	1,49	1,14	1,65	1,37	0,85	Média	Desvio
(ASTM	1,08	2,18	1,29	0,45	1,73	1,43	Padrão 0.51
D638)	2,37	1,26	0,77	1,36	1,80		0,01
	1,36	2,14					
Tração	0,94	2,10	0,65	2,41	0,98	Média	Desvio
(ASTM D3039)	1,54	1,27	1,43	1,41	1,45	1,58	Padrao
	1,56	1,61	3,17				0,00
Flexão	1,94	0,66	1,34	1,91	2,32	Média	Desvio
	1,04	2,62	2,22	1,06	1,03	1,96	Padrao
	2,27	3,08	2,74	2,22	2,92		0,11
	1,15	2,82					

Tabela 7 - Rugosidade média para corpos de prova tratados.

Fonte: o autor

Os valores aqui calculados são significativamente maiores do que os encontrados usando análise topográfica na seção 3.3. A análise topográfica, ainda que mais precisa, é feita em uma área muito pequena do corpo de prova, acaba por não considerar falhas no tratamento e as características macro da

peça. As medidas aqui apresentadas são mais representativas para uma análise macro da superfície do corpo de prova.

Ainda assim, a rugosidade média dos corpos de prova apresentou mais de 75% de redução; valor experimental que na realidade seria ainda maior, considerando os valores de rugosidade que não puderam ser medidos devido à limites do rugosímetro. O tratamento proposto se mostra eficaz, já que reduziu a rugosidade sem alterar significativamente a morfologia do corpo de prova.

#### 4.5. ENSAIOS DE TRAÇÃO

Cinco corpos de prova foram ensaiados em cada condição, usando a câmara aquecida do próprio equipamento, como mostra a figura 67, seguindo recomendações das normas. Para cada tipo de corpo de prova, e para cada temperatura, foram traçados gráficos a partir dos dados dos ensaios (figuras 68 a 79) e calculados valores médios de módulo de elasticidade, tensão máxima e tensão de escoamento (usou-se o valor convencionado de 0,2% de deformação). Os resultados dessas propriedades mecânicas estão dispostos nas tabelas 8 e 9, para as normas ASTM D638 e ASTM D3039, respectivamente.

Os gráficos de tensão por deformação mostraram variações nas curvas de cada ensaio, o que era esperado devido à anisotropia característica dos polímeros, ressaltada pelo processo de fabricação usando impressão 3D. Para conjuntos de corpos de prova sem tratamento testados em uma mesma condição (mesma norma e temperatura), o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento demonstraram variações menores, com menores desvios padrão, por serem propriedades intrínsecas do material; já o alongamento máximo, divergiu significativamente entre os corpos de prova.



Figura 67 - Configuração do ensaio de tração.

Analisando os corpos de prova que passaram por tratamento superficial, os coeficientes de variação das propriedades, na maioria dos casos, principalmente do módulo de elasticidade, são muito maiores. O que indica que o tratamento superficial com vapor de acetona pode gerar diferentes níveis de impacto no arranjo das macromoléculas do polímero, e, consequentemente, na anisotropia de cada corpo de prova. Esse comportamento foi mais expressivo nos ensaios seguindo a norma ASTM D638.



Figura 68 - Gráficos para ABNT D638, sem tratamento em temperatura ambiente.

Fonte: o autor.



Figura 69 - Gráficos para ABNT D638, com tratamento em temperatura ambiente.



Figura 70 - Gráficos para ABNT D638, sem tratamento em temperatura 40ºC.

Fonte: o autor.



Figura 71 - Gráficos para ABNT D638, com tratamento em temperatura 40ºC.



Figura 72 - Gráficos para ABNT D638, sem tratamento em temperatura 80ºC.



Figura 73 - Gráficos para ABNT D638, com tratamento em temperatura 80ºC.

Propriedade	Temp.		Sem tratamento	Com tratamento	Δ
		Média	867,677	806,54	-61,137
	Amb.	Desvio Padrão	30,908	248,576	217,668
		Coef. De Variação (%)	3,56	30,82	27,26
Módulo de		Média	586,960	668,241	81,281
elasticidade	40º C	Desvio Padrão	15,242	186,917	171,675
(MPa)		Coef. De Variação (%)	2,60	27,97	25,37
		Média	559,3833	851,590	292,2067
	80º C	Desvio Padrão	50,932	115,460	64,528
		Coef. De Variação (%)	9,10	13,56	4,46
	-	Média	10,639	13,510	2,871
	Amb.	Desvio Padrão	0,452	1,177	0,725
		Coef. De Variação (%)	4,25	8,72	4,47
Resistência		Média	9,033	12,732	3,699
à Tração	40º C	Desvio Padrão	0,381	0,730	0,349
(MPa)		Coef. De Variação (%)	4,22	5,74	1,52
		Média	6,680	9,081	2,401
	80º C	Desvio Padrão	0,464	1,180	0,716
		Coef. De Variação (%)	6,95	13,00	-6,82
		Média	7,122	9,91	2,788
	Amb.	Desvio Padrão	0,367	1,181	0,814
		Coef. De Variação (%)	5,16	11,92	6,76
Tensão de		Média	6,864	9,118	2,254
Escoamento	40° C	Desvio Padrão	0,350	1,173	0,823
(MPa)		Coef. De Variação (%)	5,09	12,87	7,78
		Média	5,000	6,232	1,232
	80º C	Desvio Padrão	0,363	0,891	0,528
		Coef. De Variação (%)	7,26	14,30	7,04

Tabela 8 - Resultados médios dos ensaios de tração seguindo a ABNT D638.



Figura 74 - Gráficos para ABNT D3039, sem tratamento em temperatura ambiente.







Figura 76 - Gráficos para ABNT D3039, sem tratamento em temperatura 40ºC.

Fonte: o autor.



Figura 77 - Gráficos para ABNT D3039, com tratamento em temperatura 40ºC.



Figura 78 - Gráficos para ABNT D3039, sem tratamento em temperatura 80ºC.





Fonte: o autor.

	Tração - ASTM D3039				
Propriedade	Temp.		Sem tratamento	Com tratamento	Δ
		Média	841,275	870,983	29,708
	Amb.	Desvio Padrão	26,905	17,561	-9,344
		Coef. De Variação (%)	3,20	2,02	-1,18
Módulo de		Média	611,241	746,741	135,5
elasticidade	40º C	Desvio Padrão	77,596	26,109	-51,487
(MPa)		Coef. De Variação (%)	12,69	3,50	-9,19
		Média	489,048	287,360	-201,688
	80º C	Desvio Padrão	42,458	54,945	12,487
		Coef. De Variação (%)	8,68	19,12	10,44
	-	Média	10,463	10,723	0,26
	Amb.	Desvio Padrão	0,595	0,313	-0,282
		Coef. De Variação (%)	5,69	2,92	-2,77
Resistência		Média	9,538	9,046	-0,492
à Tração	40° C	Desvio Padrão	0,465	0,549	0,084
(MPa)		Coef. De Variação (%)	4,88	6,07	1,19
		Média	6,360	2,866	-3,494
	80º C	Desvio Padrão	0,467	0,436	-0,031
		Coef. De Variação (%)	7,34	15,23	7,89
		Média	6,386	7,182	0,796
	Amb.	Desvio Padrão	0,282	0,763	0,481
		Coef. De Variação (%)	4,41	10,62	6,21
Tensão de		Média	7,574	5,704	-1,87
Escoamento	40º C	Desvio Padrão	0,385	0,421	0,036
(MPa)		Coef. De Variação (%)	5,08	7,38	2,3
		Média	5,002	1,608	-3,394
	80º C	Desvio Padrão	0,256	0,437	0,181
		Coef. De Variação (%)	5,11	27,16	22,05

Tabela 9 - Resultados médios dos ensaios de tração seguindo a ABNT D3039.

Fonte: o autor.

Conforme esperado, com o aumento da temperatura houve redução do módulo de elasticidade e da tensão máxima de resistência à tração, com exceção das peças tratadas ensaiadas a 80°C, valor próximo à temperatura de transição vítrea do ABS. A resistência à tração e a tensão de escoamento também tendem a reduzir com a temperatura. O comportamento dessas

propriedades é mostrado nos gráficos das figuras 80 a 85. O alongamento máximo por sua vez, aumenta com a temperatura, na maioria dos casos, já que a energia térmica disponível facilita o movimento das cadeias poliméricas, permitindo deformações maiores antes do rompimento. (CANEVAROLO JR., 2006)

Na maioria dos casos, o desvio padrão encontrado entre os corpos de prova tratados, é maior que o obtido para ensaios sem tratamento. Isso indica que o tratamento superficial com acetona pode aumentar a anisotropia dos corpos de prova.



Figura 80 - Alteração do módulo de elasticidade de acordo com a temperatura; Ensaio de tração (ASTM D638).

Fonte: o autor



Figura 81 - Alteração do módulo de elasticidade de acordo com a temperatura; Ensaio de tração (ASTM D3039).

Fonte: o autor

Figura 82 - Alteração da resistência à tração de acordo com a temperatura (ASTM D638).



Fonte: o autor





Figura 84 - Alteração da tensão de escoamento na tração de acordo com a temperatura (ASTM D638).



Fonte: o autor



Figura 85 - Alteração da tensão de escoamento na tração de acordo com a temperatura (ASTM D3039).

A velocidade do ensaio também pode afetar as propriedades dos polímeros. Apesar da velocidade de ensaio da ASTM D3039 ser 60% menor que a utilizada na ASTM D638 (2mm/min e 5mm/min, respectivamente), o impacto nas propriedades para temperaturas mais baixas não foi significativo com a alteração da norma, mantendo valores de módulo de elasticidade com uma variação pequena entre uma norma e outra para peças não tratadas; para peças que passaram por tratamento superficial, a variação foi próxima de 10%. Quando comparados os resultados a uma temperatura de 80°C, próxima da Tg do ABS, a velocidade de ensaio trouxe um impacto maior no módulo de elasticidade, principalmente para os corpos de prova tratados, que apresentaram um valor duas vezes menor quando ensaiados seguindo a ASTM D3039. Gráficos comparativos entre as propriedades aparecem nas figuras 86 a 88, e a tabela 10 mostra a porcentagem de variação comparando os ensaios em cada norma.

			Módulo de	Resistência à	Tensão de
			elasticidade (%)	Tração (%)	Escoamento (%)
	b.	Sem tratamento	-3,14	-1,68	-11,53
ıra	Am	Com tratamento	7,40	-25,99	-37,98
ratı	°,	Sem tratamento	3,97	5,29	9,37
npe	40	Com tratamento	10,51	-40,75	-59,85
Ter	°,	Sem tratamento	-14,38	-216,85	0,04
	800	Com tratamento	-196,35	-216,85	-287,56

Tabela 10 - Variações nas propriedades mecânicas obtidas em ensaios de tração seguindo normas diferentes (ASTM D638 e ASTM D3039).

Figura 86 - Comparação entre os valores de Módulo de elasticidade encontrados em ensaios de tração em diferentes condições.



Figura 87 - Comparação entre os valores de Resistência máxima encontrados em ensaios de tração em diferentes condições.



Fonte: o autor.





Os valores encontrados para o módulo de elasticidade antes do tratamento superficial no ensaio de nanoindentação (4,04 e 3,79 GPa; média de 3,915 GPa) são mais que 400% os encontrados no ensaio de tração, o que evidencia a diferença que o padrão de preenchimento das peças impressas causa em propriedades locais e globais do corpo de prova, que não é totalmente preenchido com material.

No estudo de Cole e Zander (2016) também foi feita uma comparação entre os módulos de elasticidade obtidos através dos dois métodos, e os valores obtidos através de nanoindentação (média de 2,193 GPa) são cerca de 17% menores que os encontrado no ensaio de tração (média de 2,640 GPa). Os valores próximos para módulo de elasticidade encontrados nesse estudo reforçam a interferência do padrão de preenchimento das peças impressas, já que no caso desse estudo, foram utilizados corpos de prova com 100% de preenchimento. (COLE; ZANDER, 2016a)

Em Rankouhi et. al (2016) também são feitos ensaios de tração, comparando o efeito da espessura de camada e da orientação de impressão. Os corpos de prova desse estudo foram feitos com base na norma ASTM D3039, já que o método de impressão gerava acúmulos de tensão nas partes curvas dos corpos de prova da ASTM D638. (RANKOUHI et al., 2016b)

Comparando os valores encontrados por Rankouhi et. al (2016), considerando um corpo de prova de espessura similar (espessura e número de camadas parecido) a média dos valores de módulo de elasticidade foi de 2,152 GPa, os aqui obtidos são mais de 50% menores, evidenciando mais uma vez a influência que o nível de preenchimento exerce na rigidez do corpo de prova, já que o estudo de Rankouhi et. al (2016) trabalhou com 100% de preenchimento, enquanto nesse caso o preenchimento foi de 65%.

No trabalho de Tymark et. al (2014), também foram feitos ensaios de tração seguindo a norma ASTM D638. Os corpos de prova foram impressos por uma impressora 3D Open Source de baixo custo, chamada de RepRap que pode ser construída pelos próprios usuários. O padrão de preenchimento do sistema é em grade, similar ao da UPBOX, e o preenchimento usado no estudo foi de 100%. (TYMRAK; KREIGER; PEARCE, 2014)

Os valores de módulo de elasticidade foram mais de 50% maiores, o que é consistente com a comparação feita com Rankouhi et. al (2016), e mostra que o nível de preenchimento influi mais na rigidez do material que o padrão de impressão. Ainda que o nível de performance da impressora foi citado por (RANKOUHI et al., 2016b) como um dos parâmetros que influência nas propriedades mecânicas, e é provável que a RepRap não tenha o mesmo nível de performance que uma impressora 3D de uso industrial. Um resumo das propriedades comparadas entre os resultados aqui obtidos, e outros estudos publicados na área podem ser vistos na tabela 11.

Estudo	Norma utilizada	E (GPa)	σ <sub>max</sub> (Mpa)	Diferenças de condição
Este trabalho	ASTM D638	0,867	10,639	
Este trabalho	ASTM D3039	0,841	10,463	
Cole, Zander (2016)	ASTM D638	2,640		Nível de preenchimento (100% versus 65%.)
Rankouhi et. al (2016)	ASTM D3039	2,152		Nível de preenchimento (100% versus 65%.)
Tymrak et. al (2014)	ASTM D638	1,807	28,5	Nível de preenchimento
Fonte: o autor.				

Tabela 11 - Comparação entre propriedades de tração.

#### 4.6. ENSAIO DE COMPRESSÃO

Segundo a norma ASTM D695, para cada caso do ensaio de compressão foram testados cinco corpos de prova. Os ensaios foram feitos no sistema universal de testes, usando a câmara aquecida do próprio equipamento para controlar a temperatura. Para cada caso (temperatura e tratamento) foram ensaiados no mínimo 5 corpos de prova, os gráficos de resultados são vistos nas figuras 90 a 95, e os valores calculados para as propriedades aparecem na tabela 12.

As peças sem tratamento foram impressas diretamente no formato cilíndrico, na orientação horizontal, e submetidas ao ensaio. Já as peças tratadas, que foram impressas em formato cilíndrico com duas alças de sustentação, tiveram as alças cortadas com alicate e a superfície lixada antes de passarem pelo ensaio. Apesar do esforço, a lixação não gerou uma superfície totalmente plana, o que interferiu na qualidade do ensaio. Além disso, o prolongador utilizado na remessa de ensaios das peças tratadas, para alcançar o corpo de prova através da câmara aquecida, não se manteve tão estável quanto necessário, sofrendo uma inclinação quando a tensão era aplicada (figura 89). Numa tentativa de reduzir o deslocamento, para uma aplicação mais adequada da força, inicialmente tentou-se usar as pinças que seguram corpos de prova de tração, para segurar os corpos de prova tratados pelas alças (figura 89), porém, a força de compressão acabou rasgando os corpos de prova. A melhor abordagem encontrada foi fechar ao máximo as pinças, e adotá-las como superfície plana, substituindo as mesas (figura 89).

A inclinação foi reduzida, mas não eliminada. Por esses motivos, os resultados das peças tratadas são menos consistentes do que aqueles encontrados para peças sem tratamento, e ensaiou-se mais de cinco corpos de prova quando possível.



Figura 89 - Configurações para ensaio de compressão, buscando reduzir a inclinação causada pelos prolongadores.

Fonte: o autor.


Figura 90 Gráficos para ABNT D695, sem tratamento em temperatura ambiente.

Fonte: o autor.



Figura 91 - Gráficos para ABNT D695, com tratamento em temperatura ambiente.









Fonte: o autor.



Figura 94 - Gráficos para ABNT D695, sem tratamento em temperatura 80ºC.

Fonte: o autor.



Figura 95 - Gráficos para ABNT D695, com tratamento em temperatura 80ºC.

Propriedade	Temp.		Sem	Com	Δ
			tratamento	tratamento	
		Média	664,352	601,566	-62,786
	Amb.	Desvio Padrão	86,021	49,660	-36,361
		Coef. De Variação (%)	12,95	8,25	-4,7
Módulo de		Média	669,098	429,225	-239,873
elasticidade	40º C	Desvio Padrão	69,388	99,469	30,081
(MPa)		Coef. De Variação (%)	10,37	23,174	12,804
		Média	377,713	294,251	-83,462
	80º C	Desvio Padrão	73,571	65,964	-7,607
		Coef. De Variação (%)	19,48	22,42	2,94
	-	Média	20,897	15,144	-5,753
	Amb.	Desvio Padrão	1,402	2,358	0,956
Posistôncia		Coef. De Variação (%)	6,71	15,57	8,86
à		Média	12,949	11,680	-1,269
a	40º C	Desvio Padrão	1,918	1,855	-0,063
(MPa)		Coef. De Variação (%)	14,81	15,88	1,07
(init a)		Média	6,072	6,027	-0,045
	80º C	Desvio Padrão	0,885	2,099	1,214
		Coef. De Variação (%)	14,582	34,83	20,248
		Média	12,944	10,110	-2,834
	Amb.	Desvio Padrão	1,747	1,965	0,218
		Coef. De Variação (%)	13,50	19,44	5,94
Tensão de		Média	7,874	8,152	0,278
Escoamento	40º C	Desvio Padrão	1,649	1,947	0,298
(MPa)		Coef. De Variação (%)	20,94	23,89	2,95
		Média	3,862	4,258	0,396
	80º C	Desvio Padrão	0,751	1,623	0,872
		Coef. De Variação (%)	19,46	38,13	18,67

Tabela 12 - Resultados médios dos ensaios de compressão seguindo a ABNT D695.

Fonte: o autor.

Do mesmo modo que ocorre no ensaio de tração, a temperatura do ensaio tem influência nos resultados dos ensaios de compressão e, em todos os casos, o aumento da temperatura ocasionou redução do valor da propriedade mecânica analisada, sendo que a interferência da temperatura foi mais expressiva nos ensaios com corpos de prova tratados (figuras 96 a 98).



Figura 96 – Alteração no módulo de elasticidade na compressão de acordo com a temperatura.

Fonte: o autor.





Fonte: o autor.



Figura 98 - Alteração na tensão de escoamento na compressão de acordo com a temperatura.

O estudo de Lee et. al (2007) incluiu ensaios de compressão em corpos de prova fabricados em ABS através de manufatura aditiva. Esses ensaios foram feitos seguindo a norma ABNT D695, com corpos de prova cilíndricos de 12,7 mm de diâmetro, porém com 25,4 mm de altura; a orientação de impressão dos corpos de prova foi um dos parâmetros de comparação dos resultados, e foram analisados corpos de prova impressos vertical e horizontalmente. Para os corpos de prova impressos horizontalmente (assim como os deste trabalho) a tensão de resistência à compressão encontrada foi de 41,26 MPa, valor maior que o dobro do obtido nestes ensaios. Porém, não há no artigo o valor do preenchimento utilizado na fabricação dos corpos de prova, o que, combinado ao menor valor da altura do cilindro, pode justificar a diferença nos resultados. (LEE et al., 2007)

Brischetto et. Al. (2017) também analisa dados de ensaios de compressão feitos em corpos de prova de ABS impressos em 3D, seguindo a norma ASTM D695. O formato do corpo de prova foi adotado como um sendo um prisma de base quadrada, com 12,7 mm de lado da base e 44mm de altura. O preenchimento escolhido foi de 100%, e a espessura da camada de impressão de 0,2 mm.

Nesse caso, o módulo de elasticidade médio foi de 805,1 Mpa (17,5% maior do que o encontrado neste estudo para corpos de prova não tratados, ensaiados a temperatura ambiente); e a resistência à compressão obtida foi de 37,51 Mpa (44% maior que a tensão encontrada nesse estudo, para corpos de prova não tratados ensaiados a temperatura ambiente); a diferença nesses valores é ocasionada pelo menor preenchimento adotado, e os valores indicam que a quantidade de preenchimento tem maior influência na resistência à compressão que no módulo de elasticidade. (BRISCHETTO et al., 2017)



Figura 99 - Padrão de preenchimento dos corpos de prova utilizados em Shimano et. al. (2017).

Fonte: (SHIMANO; BARINI; MELO, 2018)

Uma abordagem diferente foi proposta por Shimano et. al. (2017), onde os corpos de prova para ensaio de compressão foram definidos como cubos de 12mm, cortados de um prisma mais longo, excluindo as camadas com 100% de preenchimento que fecham as extremidades das peças, como mostra a figura 99; o preenchimento adotado variou entre 15 e 30%, e a força compressiva foi aplicada perpendicularmente à direção da intersecção entre as camadas de impressão. A tensão de resistência à compressão calculada para corpos de prova com 30% de preenchimento foi de 10,176 Mpa, aproximadamente a metade da calculada nesse estudo para corpos de prova sem tratamento ensaiados à temperatura ambiente, o que condiz com o diferente nível de preenchimento e com a ausência das laterais do corpo de prova. O módulo de elasticidade de 273,58 Mpa encontrado em Shimano et. al. (2018) também segue

o mesmo padrão de comportamento, sendo mais de 50% menor do que o aqui calculado. (SHIMANO; BARINI; MELO, 2018)

A tabela 13 mostra um resumo das comparações entre os resultados desse trabalho e os estudos anteriores que foram discutidos.

Estudo	Norma	Е	$\sigma_{max}$	Diferenças de condição
	utilizada	(MPa)	(Mpa)	
Este trabalho	ASTM D695	664,352	20,897	
Lee et. al (2007)	ASTM D695		41,26	Altura dos corpos de prova, nível de preenchimento não descrito.
Brischetto et. Al. (2017)	ASTM D695	805,1	37,51	Formato do corpo de prova e nível de preenchimento (100% versus 65%)
Shimano et. al. (2018)	ASTM D695	273,58	10,176	Formato do corpo de prova e nível de preenchimento (30% versus 65%)

Tabela 13 - Comparação entre propriedades compressivas.

Fonte: o autor.

### 4.7. ENSAIO DE FLEXÃO

Os ensaios de flexão foram feitos segundo a norma ASTM D790. Assim, foram ensaiados cinco corpos de prova para cada cenário, variando temperatura e condição de tratamento. Os ensaios foram feitos no sistema universal de testes (3369, Instron, EUA), usando a câmara aquecida do próprio equipamento (figura 100). A partir desses ensaios, foram obtidos gráficos Tensão x Deformação (figuras 101 a 106) e calculadas as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, resistência à flexão e tensão de escoamento), a média dos valores encontrados pode ser vista na tabela 14.



Figura 100 - Configuração ensaio de flexão.

Fonte: o autor.



Figura 101 - Gráficos para ABNT D790, sem tratamento em temperatura ambiente.



Figura 102 - Gráficos para ABNT D790, com tratamento em temperatura ambiente.



Figura 103 - Gráficos para ABNT D790, sem tratamento em temperatura 40ºC.







Figura 105 - Gráficos para ABNT D790, sem tratamento em temperatura 80ºC.

Fonte: o autor.





	Flexão - ASTM D790					
Propriedade	Temp.		Sem tratamento	Com tratamento	Δ	
		Média	88,523	100,855	12,332	
	Amb.	Desvio Padrão	3,892	6,812	2,92	
		Coef. De Variação (%)	4,40	6,75	2,35	
Módulo de		Média	86,285	87,895	1,61	
elasticidade	40º C	Desvio Padrão	9,128	4,357	-4,771	
(GPa)		Coef. De Variação (%)	10,58	4,95	-5,63	
		Média	70,649	41,233	-29,416	
	80º C	Desvio Padrão	5,790	12,204	6,414	
		Coef. De Variação (%)	8,19	29,60	21,41	
		Média	25,073	26,702	1,629	
	Amb.	Desvio Padrão	0,926	1,865	0,939	
		Coef. De Variação (%)	3,69	6,985	3,295	
Resistência		Média	21,082	21,270	0,188	
à flexão	40º C	Desvio Padrão	2,591	1,923	-0,668	
(MPa)		Coef. De Variação (%)	12,29	9,040	-3,25	
		Média	14,608	9,248	-5,36	
	80º C	Desvio Padrão	1,872	2,960	1,088	
		Coef. De Variação (%)	12,82	32,00	19,18	
		Média	15,558	14,652	-0,906	
	Amb.	Desvio Padrão	0,667	3,428	2,761	
		Coef. De Variação (%)	4,29	23,40	19,11	
Tensão de		Média	13,788	12,120	-1,668	
Escoamento	40º C	Desvio Padrão	1,558	2,331	0,773	
(MPa)		Coef. De Variação (%)	11,30	19,23	7,93	
		Média	10,975	6,662	-4,313	
	80º C	Desvio Padrão	1,268	1,949	0,681	
		Coef. De Variação (%)	11,56	29,25	17,69	

Tabela 14 - Resultados médios dos ensaios de flexão seguindo a ABNT D790.

Fonte: o autor.

Mais uma vez, o efeito do aumento da temperatura na redução dos valores das propriedades mecânicas pôde ser observado em todos os casos, porém, o efeito foi mais exacerbado nos corpos de prova que foram submetidos à tratamento superficial (figuras 107 a 109). O coeficiente de variação entre os resultados aumentou com o aumento da temperatura na maioria dos casos e,

conforme previsto, apresentou os maiores valores a 80º C (temperatura próxima da Tg do ABS).



Fonte: o autor.



Figura 108 Alteração na resistência à flexão de acordo com a temperatura.

Fonte: o autor.



Figura 109 - Alteração na tensão de escoamento na flexão de acordo com a temperatura.

Em (KHUONG et al., 2014), foram feitos ensaios de flexão seguindo a ISSO-178, com corpos de prova impressos em dimensões menores que as ensaiadas aqui (80x10x4 mm). Os corpos de prova foram impressos em uma UP2!, usando o software UG-NX 8.0, com espessura de camada de 0,15mm e preenchimento máximo. Corpos de prova foram impressos em diferentes orientações, considerando o conjunto de corpos de prova que seguiu a mesma orientação de impressão dste trabalho, a tensão de resistência à flexão média foi de aproximadamente 35,884 Mpa, valor 43,12% maior que o aqui encontrado em temperatura ambiente e sem tratamento (25,073 Mpa). Apesar da diferença, os valores estão na mesma ordem de grandeza, e estudos anteriores já demonstraram que a espessura de camada e a quantidade de preenchimento da peça interferem nos valores de resistência máxima. (KHUONG et al., 2014)

Ensaios de flexão seguindo a ASTM D790 também foram feitos em (HERNANDEZ et al., 2016), analisando diferentes direções de impressão. A impressora utilizada (uPrint SE Plus) trabalha com um padrão de preenchimento diferente da UP Box (figura 110), que preenche ao máximo o interior dos corpos de prova, e a espessura de camada utilizada foi de 0,254 mm. As orientações de impressão similares as aqui adotadas, apresentaram uma resistência a flexão média de 94,17 Mpa e módulo de elasticidade na flexão de 3330 Mpa, valores expressivamente diferentes dos 25,073 Mpa e 88,523 GPa encontrados nesse estudo. Conforme esperado, o aumento no preenchimento de 65% para 100%

traz aumento na tensão de resistência a tração, e redução no módulo de elasticidade; comparando os dos cenários, o estudo de (HERNANDEZ et al., 2016) apresenta um aumento de 375% no valor da resistência à tração, e uma redução de aproximadamente 95% no valor do módulo de elasticidade.



Figura 110 - Padrão de preenchimento da impressora 3D uPrint SE Plus.

Fonte: (HERNANDEZ et al., 2016)

Valores próximos ao de Hernandez et. Al., 2016 são vistos em (STOKLASEK et al., 2018), onde ensaios de flexão foram feitos em diferentes orientações de impressão, mas também com preenchimento máximo. A resistência à tração encontrada ficou entre 60 e 70 Mpa, enquanto o módulo de elasticidade à tração ficou um pouco acima de 2000 MPa. Um resumo dos valores encontrados nesse trabalho e dos valores de estudos anteriores que foram comparados, pode ser visto na tabela 15.

Estudo	Norma	Е	$\sigma_{max}$	Diferenças de condição
	utilizada	(MPa)	(Mpa)	
Este trabalho	ASTM D790	88523	25,073	
(KHUONG et al.,	ISSO-178		35,884	Tamanho dos corpos de
2014)				prova, nível de
				preenchimento (100% versus
				65%)
HERNANDEZ et al.,	ASTM D790	3330	94,17	Padrão e nível de
2016				preenchimento (100% versus
				65%)
(STOKLASEK et al.,		2000	entre 60 e	Diversas direções de
2018			70	impressão, nível de
				preenchimento (100% versus
				65%)

Tabela 15 – Comparação entre propriedades de flexão.

Fonte: o autor.

# 4.8. INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO SUPERFICIAL COM VAPOR DE ACETONA NAS PROPRIEDADES DOS CORPOS DE PROVA.

Analisando os valores médios de propriedades pré e pós tratamento superficial, nota-se que a porcentagem de variação é menor à temperatura ambiente, e mais pronunciada à 80° C na maioria dos casos. Não foi possível perceber um padrão de aumento ou redução nos valores das propriedades, porém os ensaios de tração apresentaram as variações mais significativas entre a média das propriedades antes e depois do tratamento superficial. Gráficos mostrando as variações percentuais para cada tipo de ensaio, propriedade mecânica e temperatura de ensaio, podem ser vistos nas figuras 111 a 114.



Figura 111 - Alteração percentual das propriedades mecânicas após tratamento superficial em ensaio de tração (ASTM D638).

Figura 112 - Alteração percentual das propriedades mecânicas após tratamento superficial em ensaio de tração (ASTM D3039).



Fonte: o autor.

Figura 113 - Alteração percentual das propriedades mecânicas após tratamento superficial em ensaio de compressão (ASTM D695).



Fonte: o autor.



Figura 114 - Alteração percentual das propriedades mecânicas após tratamento superficial em ensaio de flexão (ASTM D790).

A tabela 16 resume a média da variação percentual em módulo entre propriedades de peças e não tratadas, considerando todos os tipos de ensaios. Até 40°C, as variações são menores que 20%, isso indica que o efeito do tratamento nas propriedades é mínimo, já que uma variação de 20% em um cenário com diversas variações e incertezas causadas pelo próprio processo de fabricação e tratamento, trabalhando com normas adaptadas ao cenário que exigem uma quantidade relativamente baixa de corpos de prova por ensaio, e sem tendência clara entre os resultados (já que em alguns cenários o valor das propriedades aumenta e em outros diminui) não deve ser considerada muito significativa.

	superficial.					
	Variações médias das Propriedades mecânicas (%)					
	T. Amb	40°C	80°C			
Módulo de elasticidade	9,55	18,57	36,83			
Resistência máxima	15,30	11,25	27,58			
Tensão de escoamento	17,83	14,83	31,95			

Tabela 16 - Variações médias em módulo das propriedades mecânicas pré e pós tratamento superficial.



Figura 115 - Comparação dos coeficientes de variação entre os corpos de prova em cada ensaio mecânico realizado.

Observando a variação entre os dados obtidos em cada ensaio, nota-se que o coeficiente de variação aumenta com o tratamento superficial, salvo algumas exceções. Esse fato indica que o tratamento superficial com vapor de

acetona pode ser uma nova fonte de aumento de anisotropia para o corpo de prova. Como dito anteriormente, o processo de fabricação por impressão 3D já causa aumento na anisotropia do objeto, e o tratamento superficial pode acarretar num aumento ainda maior. A comparação entre todos os coeficientes de variação para todos os cenários ensaiados é mostrada na figura 115.

## 4.9. VIABILIDADE PARA APLICAÇÃO EM PRÓTESES DE MEMBRO SUPERIOR.

Jones e Stopforth (2016) descreve o projeto da "*Touch Hand II*", uma prótese eletromiográfica de mão, fabricada em ABS, usando a tecnologia de impressão 3D. Um dos aspectos discutidos no projeto é a análise estrutural através do método dos elementos finitos; onde considerou-se uma carga estática de 112,8 N igualmente distribuída nas juntas metacarpo-falanges. Nesse cenário, a tensão máxima foi encontrada na parte inferior da palma, com valor de 17,5 Mpa (figura 116). (JONES; STOPFORTH, 2016)



Figura 116 - Análise das tensões na palma da Touch-Hand II.

Fonte: Jones; Stopforth, (2016).

Bastarrechea et al. (2021) também propõe uma análise das tensões mecânicas de uma prótese de baixo custo fabricada em ABS utilizando impressão 3D. Nesse estudo, a simulação considerou cargas de tração e flexão separadamente; uma primeira simulação foi feita usando carga de 0,1 Mpa, gerando uma resposta máxima de tensão de 10 Mpa na junção da palma com a porção proximal dos dedos (figura 117). Na análise da carga de flexão, a mesma carga de 0,1 Mpa foi aplicada, gerando uma tensão máxima de 13 Mpa na parte central das falanges proximal e medial (figura 118). (BASTARRECHEA et al., 2021)





Fonte: Bastarrechea et al., (2021).



Figura 118 - Estado de tensão da prótese de mão sob carga de flexão de 0,1 Mpa.

Fonte: Bastarrechea et al., (2021).

A prótese mioelétrica impressa em 3D utilizando ABS descrita em Van Der Riet et. al. (2015) também foi submetida à análise computacional de tensão através de elementos finitos. Nesse caso, adotou-se um cenário onde a prótese carregaria um peso de 3kg, o que resultou em uma tensão máxima de 35,98 Mpa na junção da mão com o pulso, como mostra a figura 119. (VAN DER RIET et al., 2015)



Fonte: Van Der Riet et al., (2015).

Para discutir a viabilidade do uso de peças impressas em 3D com 65% de preenchimento, 0,2 mm de espessura de camada e padrão de preenchimento

em grade, como as estudadas nesse trabalho, será feita uma comparação entre as propriedades mecânicas médias aqui encontradas e os requisitos trabalhados nos projetos de próteses obtidos na literatura. A tabela 17 mostra um resumo de todos esses valores.

Solicitações máximas descritas em estudos								
35,98 Mpa Van Der Riet et.			17,5 Mpa Jones e Stopforth			10 Mpa (tração) e 13 MPa		
al. (2015)			(2016)			(flexão) Bastarrechea et al.		
					(2021)			
Resultados experimentais								
	Tração ASTM D638		Tração ASTM D 3039		Compressão		Flexão	
	Não	Tratado	Não	Tratado	Não	Tratado	Não	Tratado
	tratado		tratado		tratado		tratado	
T amb.	10,639	13,510	10,463	10,723	20,897	15,144	25,073	26,702
T 40ºC	9,033	12,732	9,538	9,046	12,949	11,680	21,082	21,270
T 80º C	6,680	9,081	6,360	2,866	6,072	6,027	14,608	9,248

Tabela 17 - Valores de solicitações mecânicas encontradas em projetos de próteses e resultados experimentais ensaiados nesse estudo.

Fonte: o autor, com dados de (BASTARRECHEA et al., 2021; JONES; STOPFORTH, 2016; VAN DER RIET et al., 2015)

Observando os dados, nota-se que, em temperatura ambiente, todos os ensaios suportariam a simulação feita em Bastarrechea et al. (2021); ainda que o aumento da temperatura possa levar à uma condição em que a resistência à tração seja menor que a solicitação calculada, os valores são próximos, assim, é possível que a estrutura resista. O caso descrito em Van Der Riet et. al. (2015) traz esse valor de tensão máxima em pontos de junções com parafusos, que poderiam ser reforçadas para suportar a tensão, ainda assim, tanto nesse caso quanto no projeto de Jones e Stopforth (2016) seriam necessárias algumas adaptações para suportar esse cenário; seria possível, por exemplo, ensaiar peças com 100% de preenchimento para analisar a possibilidade de uso.

#### 5. CONCLUSÕES

O uso da manufatura aditiva, especialmente da impressão 3D, vem crescendo significativamente nas mais diversas aplicações, inclusive na área da saúde. Os estudos analisando propriedades mecânicas tem avançado a um ritmo mais lento, e os estudos que consideram efeitos do tratamento superficial a base de acetona em ABS especialmente, ainda estão em fases bem iniciais, com literatura escassa sobre o tema. Esse trabalho propõe uma análise dos possíveis efeitos que o tratamento superficial pode causar nas propriedades mecânicas, e, como encontra resultados que não mostram interferência intensa nas propriedades mecânicas, é, assim, um passo na direção da aplicação em maior escala desse tipo de tratamento superficial, que pode reduzir as limitações no uso da impressão 3D em diversas aplicações que exigem melhor acabamento superficial.

Considerando que o uso de peças impressas em 3D em próteses de membro superior já ocorre em alguns cenários no Brasil, é válido dizer que a técnica pode ser aplicada na produção das próteses. A análise estrutural feita nesse trabalho, mostra que as peças impressas de acordo com esses parâmetros podem ser aplicadas a depender dos requisitos.

Para que a impressão 3D seja largamente aplicada na fabricação de próteses, é importante ensaiar mecanicamente peças impressas usando outros parâmetros de impressão (como maior preenchimento, por exemplo) para uso em projetos que exigem maior resistência mecânica. Além disso, conhecer propriedades mecânicas em diferentes configurações de fabricação permitiria a otimização do processo de acordo com cada projeto de prótese.

O tratamento superficial com vapor de acetona a quente mostrou-se uma maneira rápida e eficaz para redução da rugosidade, e consequente melhora na qualidade superficial. Desconsiderando a dificuldade de aquisição de acetona, que pode ser um fator limitante para o uso do método, o tratamento é de simples execução. Dado que a baixa qualidade do acabamento superficial é um dos fatores limitantes para uso de impressão 3D na produção de diversas peças, o uso do tratamento pode colaborar significativamente na disseminação do uso da manufatura aditiva.

O tempo de tratamento também influi na qualidade da superfície das peças. A redução da rugosidade acontece rapidamente, já com 15 minutos de tratamento, mas a qualidade visual da superfície leva um intervalo um pouco maior. Com o método aqui adotado, usando a concentração de acetona de 5ml por litro do recipiente, os melhores resultados foram obtidos com 30 minutos de tratamento.

O estudo também evidenciou que é mais vantajoso o uso de mais de um ciclo que o uso de um ciclo com maior tempo, para evitar danificar a estrutura da peça, conforme resultados anteriores da literatura (LALEHPOUR; JANETEAS; BARARI, 2017). O tempo de tratamento depende da área superficial da peça, e quanto maior a peça, mais ciclos serão necessários.

Em trabalhos futuros, vale investigar o efeito do tratamento na homogeneização das propriedades superficiais das peças impressas, e a possibilidade de correção de alguns defeitos de impressão através do tratamento superficial, como baixa adesão entre as camadas ou bolhas.

As propriedades mecânicas sofrem alterações após o tratamento superficial. Propriedades locais, medidas com nanoindentação, já sofrem grande redução com um intervalo de tratamento curto, e se mantém mais estáveis com o aumento do tempo de tratamento, esse fato indica que o tratamento superficial alivia as tensões residuais geradas pelo processo de fabricação.

Os testes com corpos de prova impressos em diferentes orientações, mostraram que, como visto em estudos anteriores, o tratamento traz resultados que dependem da orientação de impressão e do formato da peça; para mitigar essa influência, usou-se do motor de passo para manter as peças em rotação durante o tratamento, fazendo com que as faces dos corpos de prova alcançassem resultados similares.

As curvas "tensão x deformação" variaram entre os corpos de prova em todos os cenários de ensaios mecânicos, sendo que a variação no módulo de elasticidade é menor que no alongamento máximo. Esse resultado evidencia a anisotropia do polímero, que é elevada pelo processo de fabricação. Além disso, na maioria dos casos, os ensaios em corpos de prova que passaram por tratamento superficial apresentam maior coeficiente de variação entre os resultados, o que indica que essa pode ser mais uma fonte no aumento da anisotropia. Por fim, o baixo custo, a facilidade de operação e o alto nível de customização possíveis na impressão 3D favorecem a aplicação desse processo de fabricação na produção de próteses. Porém, o nível de solicitação mecânica ao qual a prótese será exposta deve ser levado em conta no momento da escolha dos parâmetros de impressão, para evitar uma possível falha.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AHN, D. *et al.* Representation of surface roughness in fused deposition modeling. **Journal of Materials Proc essing Technology**, v. 209, p. 5593-5600, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.05.016.

AHN, D.; KIM, H.; LEE, S. Fabrication direction optimization to minimize postmachining in layered manufacturing. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** v. 47, p. 593–606, 2007. Disponível em: http://doi:10.1016/j.ijmachtools.2006.05.00

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D695**: Compressive Properties of Rigid Plastics. Pennsylvania. ASTM, 2008. 8 p.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D638**: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Pennsylvania. ASTM, 2015. 17 p.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D790-03**: Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulation Materials. Pennsylvania. ASTM, 2003. 11 p.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D3039**: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Pennsylvania. ASTM, 2002. 13 p.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies**. Pennsylvania. ASTM, 2013. 3 p.

BASTARRECHEA, A. *et al.* Mechanical design of a low-cost ABS hand prosthesis using the finite element method. **Journal of Physics:** Conference Series, v. 1736, n. 1, 2021. Disponível em: http://doi:10.1088/1742-6596/1736/1/012039

BORGES, F. **Tratamento Superficial de Peças Fabricadas por Prototipagem Rápida**. 2015. 64 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2015. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/21529/1/2015\_FelipeBorgesFeliciano deLima.pdf

BRISCHETTO, S. *et al.* Compression Tests of ABS Specimens for UAV Components Produced via the FDM Technique. **MDPI Technologies Journal**, v. 5, p. 20, 2017. Disponível em: http://doi:10.3390/technologies5020020

CANEVAROLO JR., S. V. Ciência dos Polímeros - Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: editora ArtLiber. 2006. 280 p.

CANTRELL, J. *et al.* Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts. **Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series** p. 89–105, 2017. Disponível em: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-41600-7\_11

COLE, D et. al. Interfacial mechanical behavior of 3D printed ABS. **Journal of Applied Polymer Science**, n. April, p. 43671, 2016. Disponível em: http://DOI:101002/app.43671

CORDELLA, F. *et al.* Literature review on needs of upper limb prosthesis users. **Frontiers in Neuroscience**, v. 10, p. 1–14, 2016. Disponível em: http://doi:10.3389/fnins.2016.00209

CROCCOLO, D.; DE AGOSTINIS, M.; OLMI, G. Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30. **Computational Materials Science**, v. 79, p. 506–518, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.06.041

DALLEY, S. A. *et al.* Design of a multifunctional anthropomorphic prosthetic hand with extrinsic actuation. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 14, n. 6, p. 699–706, 2009. Disponível em: http://doi:10.1109/TMECH.2009.2033113

DAWOUD, M.; TAHA, I.; EBEID, S. J. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 21, p. 39–45, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.11.002

GAINE, W. J.; SMART, C.; BRANSBY-ZACHARY, M. Upper limb traumatic amputees. Review of prosthetic use. **Journal of Hand Surgery**, v. 22 B, n. 1, p. 73–76, 1997.

GALANTUCCI, L. M.; LAVECCHIA, F.; PERCOCO, G. Quantitative analysis of a chemical treatment to reduce roughness of parts fabricated using fused deposition modeling. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 59, n. 1, p. 247–250, 2010. Disponível em: http://doi:10.1016/j.cirp.2010.03.074

GAO, H. *et al.* Investigating the Impact of Acetone Vapor Smoothing on the Strength and Elongation of Printed ABS Parts. **JOM** v. 69, n. 3, p. 580–585, 2017. Disponível em: http://DOI:10.1007/s11837-016-2214-5

GARCIA, V. Próteses no Brasil são para poucos. **Deficiente Ciente**, São Paulo, 16 ago. 2009. Disponível em: https://www.deficienteciente.com.br/ proteses-no-brasil-sao-para-poucos.html Acesso em: 25 jul. 2016

GRETSCH, K. F. *et al.* Development of novel 3D-printed robotic prosthetic for transradial amputees. **Prosthetics and Orthotics International Journal**, v.40, p. 40-43, 2016. Disponível em: http://DOI:10.1177/0309364615579317

HERNANDEZ, R. *et al.* Analyzing the tensile, compressive, and flexural properties of 3D printed ABS P430 plastic based on printing orientation using fused deposition modeling. Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, p. 939-950, 2016. Disponível em: http://utw10945.utweb.utexas.edu/sites/default/files/2016/076-Hernandez.pdf

JONES, G. K.; STOPFORTH, R. Mechanical Design and Development of the Touch Hand II Prosthetic Hand. **R&D Journal of the South African Institution of Mechanical Engineering**, v. 32, n. November 2015, p. 23–34, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/304778169\_Mechanical\_Design\_and\_Development\_of\_the\_Touch\_Hand\_II\_Prosthetic\_Hand

KHUONG, T. L. *et al.* Tensile strength and flexural strength testing of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) materials for biomimetic robotic applications. **Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering**, v. 20, p. 11–21, 2014. Disponível em: http://doi:10.4028/www.scientific.net/JBBBE.20.11

KRAUSZ, N. E. et al. Design and Fabrication of a Six Degree - of - Freedom Open Source Hand. **IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering** n. April, 2015. Disponível em: http://DOI:10.1109/TNSRE.2015.2440177

LALEHPOUR, A.; BARARI, A. Post processing for Parts Modeling Parts with with Acetone Post processing processing for for Fused Modeling Parts. **IFAC PapersOnLine**, v. 49, n. 31, p. 42–48, 2016. Disponível em: http://doi:10.1016/j.ifacol.2016.12.159

LALEHPOUR, A.; JANETEAS, C.; BARARI, A. Surface roughness of FDM parts after post-processing with acetone vapor bath smoothing process. **International Journal of Addictive Manufacturing Technology**, p. 1505–1520, 2017. Disponível em: http://DOI:10.1007/s00170-017-1165-5

LEE, C. S. *et al.* Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 187–188, p. 627–630, 2007. Disponível em: http://doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.11.095

LI, G. Electromyography Pattern-Recognitiom-Based Control of Powered Multifunctional Upper-Limb Prostheses. Advances in Applied Electromyography, 99-116. 2008. Disponível em: р. http://www.intechopen.com/books/advances-in-appliedelectromyography/electromyography-pattern-recognition-based-control-ofpowered-multifunctional-upper-limb-prostheses

LIM, S. *et al.* Modelling curved-layered printing paths for fabricating largescale construction components. **Additive Manufacturing,** v. 12, p. 216–230 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.addma.2016.06.004

LIU, X.; SHAPIRO, V. Homogenization of material properties in additively manufactured. **Computer-Aided Design**, v. 78, p. 71–82, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2016.05.017

MARTINEZ, A. C. P. *et al.* Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural.

**Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 14, n. 1, p. 125–141, 2019. Disponível em: http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148289

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Diretrizes de Atenção à Pessoa Amputada Diretrizes de Atenção à Pessoa Amputada**, 2013. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/diretrizes\_atencao\_pessoa\_amputa da.pdf

MONTIEL, A.; VARGAS;, M. A. D. O.; LEAL;, S. M. C. Caracterização de pessoas submetidas à amputação. **Enfermagem em Foco**, v. 3, n. 4, p. 169–173, 2012. Disponível http://revista.cofen.gov.br/index.php/enfermagem/article/view/377/168

RANKOUHI, B. et al. Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 16, n. 3, p. 467–481, 2016. Disponível em: http://DOI:10.1007/s11668-016-0113-2

SHANMUGASUNDAR, G. et al. Design and Finite Element Analysis of Prosthetic Hand Controlled by Wireless Gestures for Differently-abled People. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 923, n. 1, p. 0–6, 2020. Disponível em: http://doi:10.1088/1757-899X/923/1/012019

SHIMANO, M. M. *et. al.* Influência do percentual de preenchimento no comportamento mecânico de peças em PLA e ABS obtidas por Impressão 3D por extrusão. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**. v. 3, n. 2, p. 178–190, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.18554/rbcti.v3i2.3298

SMITH, D. G.; SKINNER, H. **Current Diagnosis & Treatment in Orthopedics**. 3. ed. Orange, California: Appleton & Lange, 2003.

STOKLASEK, P. *et al.* Flexural behaviour of ABS 3D printed parts on professional printer Stratasys Fortus 900mc. **MATEC Web of Conferences**. v. 5, p. 1-12, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1051/matecconf/201821004048

TYMRAK, B. M.; KREIGER, M.; PEARCE, J. M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. **Materials and Design**, v. 58, p. 242–246, 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038

VAN DER RIET, D. *et al.* **The low cost design of a 3D printed multi-fingered myoelectric prosthetic hand**. *In:* VAN DER RIET, D. *et al.* **Mechatronics: Principles, Technologies and Applications.** ed. Nova Science Publishers, 2015, cap. 4, p. 85-117.

WAHIT, M. A. A. *et al.* 3D Printed Robot Hand Structure Using Four-Bar Linkage Mechanism for Prosthetic Application. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 15, p. 1–22, 2020. Disponível em: http://doi:10.3390/s20154174

WENDT, C. *et al.* Processing and Quality Evaluation of Additive Manufacturing Monolayer Specimens. **Advances in Materials Science and Engineering**. v. 2016, p. 1-82016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1155/2016/5780693