



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARANÁ**

SETOR DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
(DEMEC)

MATEUS MOLINA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A MANUFATURA ADITIVA E A
TERMOFORMAGEM NA FABRICAÇÃO DE ÓRTESES PARA
CRIANÇAS COM PTC**

**CURITIBA
2019**

MATEUS MOLINA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A MANUFATURA ADITIVA E A
TERMOFORMAGEM NA FABRICAÇÃO DE ÓRTESES PARA
CRIANÇAS COM PTC**

Monografia apresentada como resultado parcial
à obtenção do grau de engenheiro mecânico,
Curso de Engenharia Mecânica, Setor de
Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Sérgio Fernando Lajarin

**CURITIBA
2019**

RESUMO

O pé torto congênito é uma deformidade congênita com incidência de um caso a cada mil nascimentos, a qual é tratada, comumente, de modo não cirúrgico pela utilização de órteses. Ainda não há uma órtese acessível e de qualidade no mercado, o que cria uma oportunidade de estudo para um produto de baixo custo e que, ainda assim, mantenha-se durável e de boa qualidade ao longo da sua vida-útil. Este trabalho busca elucidar as diferenças em custo e parâmetros de qualidade entre órteses fabricadas por meio de dois processos de manufatura, manufatura aditiva e termoformagem com moldes impressos. Produziu-se, para tanto, amostras representativas para cada um dos processos, as quais, posteriormente, foram submetidas a um processo padronizado de teste e obtenção de resultados. Em consideração aos resultados, a termoformagem utilizando PS como material, apresentou melhores resultados em custo de fabricação para o período e estrutura de fabricação definidos, sem deixar de lado os parâmetros de qualidade.

Palavras-chave: Órtese, PTC, Tecnologia Assistiva, Manufatura Aditiva, Termoformagem

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - ÓRTESE DE DENIS-BROWNE.....	12
FIGURA 2 - ÓRTESE PARA PTC EM CÓDIGO ABERTO FEITA EM PLA POR IMPRESSÃO 3D.....	13
FIGURA 3 - ÓRTESE PRODUZIDA POR AM PARA PACIENTES COM PTC RESIDUAL	14
FIGURA 4 – EVOLUÇÃO DO TRATAMENTO DE PTC NA FASE DE CORREÇÃO COM OS VÁRIOS MOLDES DE GESSOS UTILIZADOS	16
FIGURA 5 – MOLDE NEGATIVO E O PROCESSO DE REMOÇÃO	18
FIGURA 6 – MOLDE POSITIVO EM PROCESSO DE CURA.....	19
FIGURA 7 - ÓRTESE RECÉM-MOLDADA.....	20
FIGURA 8 - ÓRTESE FINALIZADA.....	21
FIGURA 9 – ÓRTESE DE DENIS-BROWNE	22
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA ÚNICA CADEIA POLIMÉRICA	23
FIGURA 11 - PROTÓTIPO PRODUZIDO COM PLA	24
FIGURA 12 - GRÁFICO DO VOLUME ESPECÍFICO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA TRÊS POLÍMEROS: A (CRISTALINO); B (SEMICRISTALINO); E C (AMORFO)	25
FIGURA 13 - APLICAÇÕES POPULARES DO POLIETILENO	26
FIGURA 14 - APLICAÇÕES POPULARES DO POLIESTIRENO	27
FIGURA 15 - APLICAÇÕES POPULARES DO POLIPROPILENO.....	29
FIGURA 16 – APLICAÇÕES POPULARES DO ABS.....	32
FIGURA 17 - MECANISMO DE EXTRUSÃO GENÉRICO DE UMA IMPRESSORA 3D	34
FIGURA 18 - ESQUEMÁTICO DE UMA PEÇA SENDO IMPRESSA EM 3D CAMADA POR CAMADA	35
FIGURA 19 - IMPORTÂNCIA DA ORIENTAÇÃO NA RESISTÊNCIA DA PEÇA IMPRESSA	36
FIGURA 20 - INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO NO ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	37
FIGURA 21 - ETAPAS DO PLANEJAMENTO DE PROCESSO PARA AM.....	38
FIGURA 22 - EXEMPLO DE PEÇA COM ESTRUTURA DE SUPORTE.....	39

FIGURA 23 - PEÇA DE ABS DEPOIS DE SER TRATADA COM ACETONA (À ESQUERDA)	40
FIGURA 24 - ESQUEMÁTICO DE UM PROCESSO DE TERMOFORMAGEM	41
FIGURA 25 - PASSOS TÍPICOS PARA A TERMOFORMAGEM A VÁCUO	42
FIGURA 26 - MOLDE COM RESPIROS PARA FACILITAR O FLUXO DE AR	45
FIGURA 27 - FLUXOGRAMA DE PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DOS TESTES	47
FIGURA 28 - DIAGRAMA DOS COMPONENTES DA ÓRTESE	48
FIGURA 29 -- REQUISITOS DE ENGENHARIA E VALORES ALVO	50
FIGURA 30 - QFD DO PROJETO	51
FIGURA 31 - MATERIAIS E PROCESSOS TESTADOS NO PROJETO	52
FIGURA 32 – COMPONENTES DA ÓRTESE	54
FIGURA 33 - ROTEIRO DE TESTE PARA TERMOFORMAGEM	55
FIGURA 34 - IMPRESSORA 3D UTILIZADA PARA O TRABALHO	56
FIGURA 35 - BASE DA ÓRTESE IMPRESSA NA ORIENTAÇÃO VERTICAL	57
FIGURA 36 - BASE DA ÓRTESE NA ORIENTAÇÃO HORIZONTAL	58
FIGURA 37 - CAIXA DE DIÁLOGO PARA EXPORTAÇÃO DO ARQUIVO PARA STL	59
FIGURA 38 – BASES EM PLA NA ORIENTAÇÃO VERTICAL E HORIZONTAL (À DIREITA)	61
FIGURA 39 – EQUIPAMENTOS PARA ALISAMENTO SUPERFICIAL COM VAPOR DE ACETONA	62
FIGURA 40 – BASE ORIENTAÇÃO VERTICAL EM ABS DEPOIS DO ACABAMENTO	62
FIGURA 41 - ROTEIRO DE TESTE PARA TERMOFORMAGEM	63
FIGURA 42 - MÁQUINA TERMOFORMADORA UTILIZADA PARA A FABRICAÇÃO DA ÓRTESE	65
FIGURA 43 – MOLDE UTILIZADO PRODUZIDO EM PLA	66
FIGURA 44 - PLACA E MOLDE POSICIONADOS NA MÁQUINA TERMOFORMADORA	67
FIGURA 45 - ETAPAS DA TERMOFORMAGEM DO PP E PE	68
FIGURA 46 - BASE DA ÓRTESE EM PS RECÉM-RETIRADA DA MÁQUINA TERMOFORMADORA	69

FIGURA 47 - BASE DA ÓRTESE FABRICADA COM EXCESSO DE EMBARRIGAMENTO.	69
FIGURA 48 – MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIO E POSICIONAMENTO DA ÓRTESE (À DIREITA)	70
FIGURA 49 – IMAGEM DA FRATURA DOS DIFERENTES CONJUNTOS	71
FIGURA 50 – PROCESSO DE MONTAGEM DA ÓRTESE	73
FIGURA 51 - PARÂMETROS DE TESTE	74
FIGURA 52 – CURVA FORÇA-DESCOLAMENTO DAS BASES TERMOFORMADAS	77
FIGURA 53 - CURVA FORÇA-DESCOLAMENTO DAS BASES IMPRESSAS.....	78
FIGURA 54 – DETALHE DAS MARCAS DE IMPRESSÃO DE UMA BASE IMPRESSA COM PLA	80
FIGURA 55 – GRÁFICO COMPARATIVO DO CUSTO TOTAL.....	86
FIGURA 56 - GRÁFICO COMPARATIVO DO TEMPO TOTAL EM MINUTOS	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO PEAD	26
TABELA 2 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO PS	28
TABELA 3 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO PP	29
TABELA 4 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO PLA	31
TABELA 5 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO ABS	32
TABELA 6 - FATOR DE AUMENTO RECOMENDADO DO MOLDE PARA DIFERENTES MATERIAIS	45
TABELA 7 – REQUISITOS DO CLIENTE	49
TABELA 8 - MATERIAIS UTILIZADOS PARA IMPRESSÃO 3D	55
TABELA 9 - DADOS TÉCNICOS DA IMPRESSORA 3D	56
TABELA 10 - MATERIAIS UTILIZADOS PARA IMPRESSÃO 3D	57
TABELA 11 - PARÂMETROS DE IMPRESSÃO	60
TABELA 12 - RESUMO DOS MATERIAIS UTILIZADOS PARA TERMOFORMAGEM	64
TABELA 13 - DADOS TÉCNICOS DA TERMOFORMADORA	64
TABELA 14 - RESUMO DAS BASES DAS ÓRTESES TESTADAS	75
TABELA 15 - LISTA DE MATERIAIS DAS BASES TERMOFORMADAS	75
TABELA 16 - LISTA DE MATERIAIS DAS BASES IMPRESSAS	76
TABELA 17 – CUSTO DE MATERIAL DE UMA BASE DE ÓRTESE	76
TABELA 18 – RESULTADO TESTE MECÂNICO	79
TABELA 19 – RESULTADO DA QUALIDADE DA BASE	80
TABELA 20 – MAQUINÁRIO UTILIZADO	81
TABELA 21 – INVESTIMENTO INICIAL POR PROCESSO	81
TABELA 22 - LISTA DE PROCESSOS PARA TERMOFORMAGEM	82
TABELA 23 – LISTA DE PROCESSOS PARA AS BASES IMPRESSAS EM ABS	82
TABELA 24 – LISTA DE PROCESSOS PARA AS BASES IMPRESSAS EM PLA	83
TABELA 25 – TEMPO TOTAL DE PROCESSAMENTO E CUSTO DE ENERGIA	83

TABELA 26 – CUSTO DE MATERIAL DOS DEMAIS COMPONENTES	84
TABELA 27 – TEMPO E CUSTO DE ENERGIA DOS DEMAIS COMPONENTES	85
TABELA 28 – MATRIZ DE DECISÃO	87

CONTEÚDO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	11
1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	12
1.3. JUSTIFICATIVA.....	12
1.4. HIPÓTESE.....	13
1.5. OBJETIVO.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. PÉ TORTO CONGÊNITO	15
2.1.1. O MÉTODO DE PONSETI	15
2.2. ÓRTESES.....	17
2.2.1. ÓRTESES SUROPODÁLICAS	17
2.2.2. A ÓRTESE DE DENIS-BROWNE.....	21
2.3. POLÍMEROS.....	22
2.3.1. TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA.....	24
2.3.2. PLÁSTICOS DE INTERESSE	25
2.3.2.1. POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD).....	26
2.3.2.2. POLIESTIRENO (PS)	27
2.3.2.3. POLIPROPILENO (PP).....	28
2.3.2.4. POLIÁCIDO LÁCTICO (PLA)	29
2.3.2.5. ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO (ABS)	31
2.4. MANUFATURA ADITIVA	33
2.4.1. PRINCÍPIO DE EXTRUSÃO DE MATERIAL.....	34
2.4.2. ORIENTAÇÃO DA PEÇA NA PLATAFORMA DE IMPRESSÃO.....	36
2.4.3. PLANEJAMENTO DE PROCESSO PARA MANUFATURA ADITIVA.....	37
2.5. TERMOFORMAGEM	40
2.5.1. TERMOFORMAGEM A VÁCUO	42
2.5.2. FABRICAÇÃO DE MOLDES PARA TERMOFORMAGEM.....	44
3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	47
3.1. PREPARAÇÃO	48
3.1.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E A METODOLOGIA	48
3.1.2. DEFINIÇÃO DE REQUISITOS DE CLIENTE E ENGENHARIA	48
3.1.3. COMPONENTES E MODELO DA ÓRTESE	52
3.2. FABRICAÇÃO DA BASE DA ÓRTESE	54
3.2.1. MANUFATURA ADITIVA.....	54

3.2.1.1. PLANEJAMENTO DO PROCESSO.....	54
3.2.1.2. ROTEIRO DE FABRICAÇÃO DA BASE DA ÓRTESE.....	58
3.2.1.3. ACABAMENTO.....	61
3.2.2. TERMOFORMAGEM.....	63
3.2.2.1. PLANEJAMENTO DO PROCESSO.....	63
3.2.2.2. MODELAGEM E FABRICAÇÃO DO MOLDE.....	65
3.2.2.3. ROTEIRO DE FABRICAÇÃO DA BASE DA ÓRTESE.....	66
3.2.3. TESTE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	70
3.3. FABRICAÇÃO DOS DEMAIS COMPONENTES.....	71
3.4. MONTAGEM DA ÓRTESE	72
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1. PARÂMETROS DE TESTE DA BASE DA ÓRTESE	74
4.1.1. PARÂMETROS DE PRODUTO	75
4.1.1.1. CUSTO DE MATERIAL	75
4.1.1.2. RESULTADO DO TESTE MECÂNICO	76
4.1.1.3. QUALIDADE DA BASE.....	79
4.1.2. PARÂMETROS DE PROCESSO.....	81
4.1.2.1. INVESTIMENTO INICIAL	81
4.1.2.2. TEMPO DE FABRICAÇÃO E CUSTO DE ENERGIA.....	81
4.2. DEMAIS COMPONENTES	83
4.2.1. CUSTO DE MATERIAL	83
4.2.2. TEMPO DE FABRICAÇÃO, MONTAGEM E CUSTO DE ENERGIA.....	84
4.3. CUSTO E TEMPO DE FABRICAÇÃO DE UMA ÓRTESE	85
4.4. MATRIZ DE DECISÃO.....	86
5. CONCLUSÕES	89
5.1. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Defeitos e deformidades congênitas são termos usados para descrever os múltiplos defeitos ósseos e musculares que podem ocorrer durante a gestação. São geralmente de origem complexa e, em alguns casos, de difícil detecção.

Estima-se que cerca de 2% a 3% dos recém-nascidos são portadores de alguma deformidade congênita, sendo isso responsável por 20% da mortalidade neonatal e 30% a 50% da mortalidade perinatal em países desenvolvidos. (CASTRO et al., 2006)

Dentre as deformidades, o pé torto congênito é uma deformidade congênita complexa causada pelo desenvolvimento anormal dos ossos, ligamentos e músculos do bebê enquanto no útero. Essa condição afeta entre 150 a 200 mil recém-nascidos anualmente em todo mundo. Aproximadamente 80% dessas crianças nascem em países com baixa renda média. (Global Clubfoot Initiative, 2019)

Essa deformidade é caracterizada por tendões dos pés curtos e tensos, o que gera a torção do pé para dentro. Se não tratada logo na infância, é muito difícil que a deformidade se resolva com o tempo. Todavia, a maioria dos casos são tratados com sucesso por métodos não cirúrgicos, como alongamento, gesso e a utilização de órteses. Utilizando-se apenas da correção com gessos, os pés tendem voltar à deformidade. Por isso, é recomendado a utilização das órteses para garantir que os pés permaneçam na posição correta. Assim, transcorrido um período dependente do paciente, exige-se a troca da órtese. Esse ciclo repete-se várias vezes ao longo do tratamento, com duração de uma média 3 anos, utilizando-a de forma integral (23 horas) e reduzindo-a gradualmente para à noite ou durante o sono do dia.

O método supracitado, formulado pelo médico espanhol Ignacio V. Ponseti (1914-2019), é o mais empregado no tratamento do PTC atualmente, mostrando-se eficaz quando adotado bem cedo e com o acompanhamento dos pais para que a órtese seja usada de forma correta (NORDQVIST, 2018). A órtese consiste em dois sapatos, corretamente angulados, separados por uma barra fixa, assim bloqueando o movimento entre um pé e outro, como também obstruindo o eixo individual de cada tornozelo.

FIGURA 1 - ÓRTESE DE DENIS-BROWNE



FONTE: WIKIMEDIA, 2008

1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Com um preço de em média quinhentos reais, a órtese para crianças com pé torto congênito é de difícil acesso para as muitas famílias que sofrem pela falta de uma alternativa alcançável. Desse modo, sem o dinheiro necessário para a compra de órteses, o tratamento acaba sendo retardado ou, até mesmo, não iniciado.

1.3. JUSTIFICATIVA

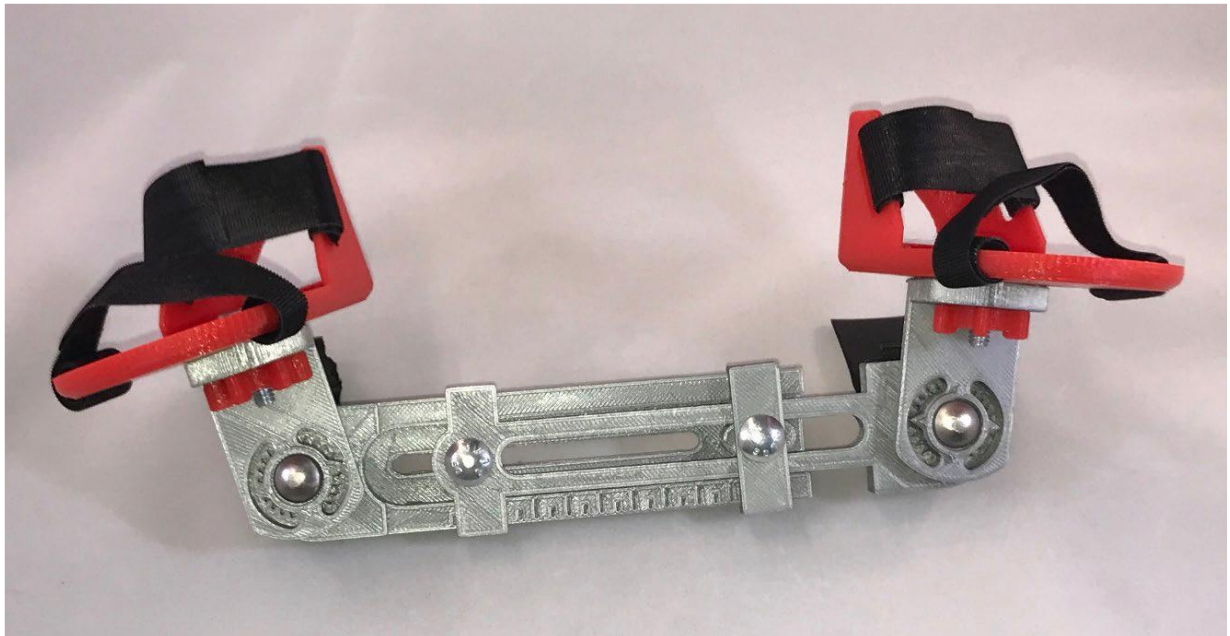
Por existir uma forte demanda por um produto de baixo custo e que consiga manter boa qualidade, torna-se então fundamental um método de produção satisfatório para a produção de órteses de forma replicável, eficaz e acessível. Uma opção facilmente replicável e que possa ser feita em baixa escala, até mesmo localmente, parte do movimento “faça você mesmo”, contribuiria muito para a acessibilidade do tratamento.

1.4. HIPÓTESE

Tomou-se como hipótese fundamental para o trabalho a possibilidade de manufatura uma órtese de baixo custo através processos de fabricação acessíveis ao público comum. Alguns autores já mostraram que é possível, através do uso da manufatura aditiva, fabricar órteses com custo significativamente menor que o convencional.

Savone *et al.* (2019) desenvolveram uma órtese (Figura 2) com código fonte livre para o tratamento do Pé Torto Congênito (doravante PTC) por meio de manufatura aditiva, um polímero a baixo custo e acessível como matéria prima. Os resultados obtidos foram satisfatórios e ultrapassam ou igualam as órteses fabricadas de modo convencional. O uso de impressão 3D reduziu o custo significativamente e mostrou-se aplicável em países em desenvolvimento. Neste modelo ainda há certa dificuldade para a fabricação da barra metálica, devido a geometria e material do mecanismo, o que mostra que não existe ainda uma solução definitiva para o problema.

FIGURA 2 - ÓRTESE PARA PTC EM CÓDIGO ABERTO FEITA EM PLA POR IMPRESSÃO 3D



FONTE: SAVONEN *ET AL.*, 2019

Outrossim, Liu *et al.* (2014) desenvolveram uma órtese (Figura 3) por manufatura aditiva por meio de sinterização a laser seletiva para o tratamento de pacientes com PTC residual. Utilizou-se da tomografia computadorizada e um novo

método envolvendo medições de pressões em oito regiões dos pés, enquanto o paciente andava, para a geração da geometria. Após o uso da órtese, os pacientes passaram pelo mesmo método de medição a pressões, mostrando uma significativa melhora na deformidade residual.

FIGURA 3 - ÓRTESE PRODUZIDA POR MANUFATURA ADITIVA PARA PACIENTES COM PTC RESIDUAL



FONTE: LIU ET AL. 2014

1.5. OBJETIVO

Projetar e manufaturar órteses para o tratamento de pé torto congênito através de dois processos de fabricação diferentes, manufatura aditiva e termoformagem, assim como avaliar seu custo-benefício.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, primeiramente, são apresentados detalhes do Pé Torto Congênito e o método de Ponseti, comumente utilizado para o tratamento da condição. Em seguida, serão discutidas as características dos materiais e dos processos de fabricação para confecção de órteses.

2.1. PÉ TORTO CONGÊNITO

O Pé Torto é uma das deformidades físicas mais comuns, com incidência de pelo menos um caso a cada 1000 nascimentos. A condição é caracterizada pelo nascimento de crianças com deformidades na equino no pé, varo do retro pé, cavo do ante pé e adução do médio e ante pé. (LARA et al., 2013)

Fatores como, predisposição genética, alterações gestacionais e anomalias histológicas diversas, parecem estar relacionadas ao desenvolvimento da condição. Entretanto, a sua verdadeira causa permanece desconhecida. (LARA et al., 2013)

Em países desenvolvidos, consegue-se detectar a condição antes ou no momento do nascimento, assim começa-se o tratamento já no início da infância por meio de métodos não cirúrgicos. (SAVONEN et al., 2019)

2.1.1. O MÉTODO DE PONSETI

A condição pode ser idiopática e tratada efetivamente por meio do uso do método de Ponseti logo no início da infância (SAVONEN et al., 2019). O método desenvolvido por Ponseti, na Universidade de Hospitais e Clínicas de Iowa em 1963, consistindo em um procedimento de tratamento padronizado e não intrusivo de PTC. Baseia-se, principalmente, na premissa de que as articulações do tarso não se movem de forma individual, mas giram em torno de eixos móveis de forma simultânea (DOBBS et al., 2000). A adequada aplicação do método pode ser dividida em duas fases: a primeira fase é a correção, envolvendo a utilização de moldes de gessos de forma seriada; a segunda, a manutenção da correção, utilizando-se usualmente de uma órtese de abdução – comumente a de Denis-Browne.

Quando corretamente utilizado logo após o nascimento, uma boa condição clínica pode ser obtida na maioria dos casos. Para a realização dessas condições um molde de gesso é aplicado semanalmente a fim de reter o grau de correção e amolecer os ligamentos, como mostrado na Figura 4 (DOBBS et al., 2000). A manipulação e adequação é usualmente feita pelo uso de uma órtese de abdução do pé. Assim, a criança deve usar a órtese inicialmente por grande parte do dia (em média 95% desse), retirando apenas durante o banho pelos primeiros três meses. Nos próximos passos, o uso segue apenas na hora de dormir ou cochilar, até aos seus quatro anos de idade. (SAVONEN et al., 2019). Nos dias de hoje, a maior parte dos tratamentos dessa patologia são iniciados com o emprego desse procedimento pela sua simplicidade, efetividade e redução drástica das cirurgias extensas. (LARA et al., 2013)

FIGURA 4 – EVOLUÇÃO DO TRATAMENTO DE PTC NA FASE DE CORREÇÃO COM OS VÁRIOS MOLDES DE GESSOS UTILIZADOS



FONTE: ASSOCIAÇÃO PRIMEIRO PASSO, 2018

Após o tratamento com gesso, que deve ser feito nos primeiros meses de vida, é indicado o uso da órtese fixa de Denis Browne que tem objetivo de ajudar na correção dos pés. Para crianças acima de um ano, o uso da órtese de Denis Browne é dificultado pois traz desconforto e o tratamento continua com o uso de órteses personalizadas

suropodálicas (sem a barra metálica entre os pés). Mais detalhes dessas órteses serão apresentados na sequência.

2.2. ÓRTESES

As órteses são dispositivos aplicados externamente para modificar as características estruturais e funcionais dos sistemas neuromuscular e esquelético. (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2013). Elas atuam de forma complementar ao tratamento de deformidades não devendo substituí-lo completamente. Além de contribuírem a reorganização funcional, elas são fundamentais para uma recuperação segura, rápida e eficaz.

Podem ser confeccionadas com diversos materiais, variando de órteses metálicas a órteses plásticas e, agora em desuso, madeira. A escolha do material depende, principalmente, de fatores como o tempo de utilização, a densidade do material, durabilidade, porte físico e condições financeiras do paciente. (VASCONCELOS, 2014)

Dividem-se em duas categorias quanto à funcionalidade: órtese estática e dinâmica. A última proporciona mobilidade articular do paciente associado à atividade e repouso da articulação. Por outro lado, a órtese estática estabiliza o segmento deixando em repouso e em posição anatômica funcional, além de favorecer a proteção do segmento e a prevenção de deformidades. Além disso, as órteses podem ser confeccionadas sob medida ou pré-fabricada ajustável, o que atenua as limitações como a espera de confecção e o alto custo. (VASCONCELOS, 2014)

2.2.1. ÓRTESES SUROPODÁLICAS

Segundo o Ministério da Saúde (2013) a fabricação de órteses suropodálicas ou tornozelo-pé (AFO, do inglês *Ankle Foot Orthesis*) pode ser feita através do uso de um molde negativo, molde positivo e, por último, a órtese obtida por termoformagem, processo esse descrito resumidamente abaixo.

O molde negativo é responsável por extrair as características do membro do paciente. Normalmente, é feito atando-se com atadura gessada a área na qual deseja-se construir uma órtese. É fundamental a utilização de uma interface entre o paciente

e o molde negativo, de modo que possibilite a sua extração futuramente, como é visto na FIGURA 5.

FIGURA 5 – MOLDE NEGATIVO E O PROCESSO DE REMOÇÃO



FONTE: MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2013

O molde positivo é a cópia anatômica do membro com as correções e alívios necessários. Enche-se o molde negativo de gesso e espera-se a cura por 30 minutos até que o molde já tenha consistência para ser trabalhado como é visto na FIGURA 6. Em seguida, é ideal aparar e alisar a superfície do molde com telas extremamente finas para o adequado acabamento superficial. Ademais, é de boa prática a conferência das dimensões do molde relativos ao membro do paciente.

FIGURA 6 – MOLDE POSITIVO EM PROCESSO DE CURA



FONTE: MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2013

A próxima etapa do processo, é a moldagem com polipropileno quente. Esse é aquecido até atingir um estado “borrachoso” que permite a conformação sobre o molde positivo. Em geral, utilizam-se placas de polipropileno de 3 a 6mm, dependendo do porte do paciente.

Nesta etapa, o molde positivo é posicionado em uma linha de sucção de alta vazão com a placa polimérica colocada sobre ele. Com cerca de 165°C, o polímero amolece e se torna adequado ao processamento. Por fim, a órtese é retirada do molde com ajuda de uma serra e está pronta para ajustes de acabamento e remoção de excesso de material (FIGURA 7).

FIGURA 7 - ÓRTESE RECÉM-MOLDADA



FONTE: MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2013

Após o processo de fabricação da órtese, faz-se necessária à sua devida validação junto ao paciente. Com o auxílio de ferramental mecânico, os cantos vivos são aparados e os pontos de pressão e desconforto são explicitados pelo paciente após a colocação da órtese. Esses pontos são, então, devidamente corrigidos. Esse processo ocorre iterativamente, até que o paciente sinta-se confortável com a órtese.

Em seguida, prossegue-se para o acabamento da órtese, etapa na qual ocorre, se necessário, ajustes finais de acabamento, a montagem de correias e outros dispositivos de acessórios para o correto funcionamento e conforto ao usuário. Um exemplo de órtese para manter o posicionamento tornozelo-pé a 90°, pode ser visto na FIGURA 8.

FIGURA 8 - ÓRTESE FINALIZADA



FONTE: MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2013

A órtese suropodálica é amplamente utilizado para tratamento de deformidades nos membros inferiores, porém em crianças acima de 1 ano de idade. Antes dessa idade a criança inicia o tratamento com uso do modelo de órtese fixo de Denis Browne.

2.2.2. A ÓRTESE DE DENIS-BROWNE

O modelo de órtese de Denis-Browne que permite manter os membros inferiores em posições ajustáveis. São feitas geralmente de couro ou polímero, unidas pelo solado por uma barra metálica que serve para manter os pés na posição desejada (ver Figura 9).

Segundo Ponseti e Lara et al, após a fase de correção, para a devida manutenção, é recomendável o uso de uma órtese que trave o movimento dos pés em torno do eixo do tornozelo em relação um com o outro.

FIGURA 9 – ÓRTESE DE DENIS-BROWNE



FONTE: ASSOCIAÇÃO PRIMEIRO PASSO, 2016

Assim, a órtese deve ser utilizada de forma intensa nos primeiros meses de vida e gradativamente ter seu uso reduzido para o uso noturno.

Nos primeiros 3 meses o bebê vai usar a órtese em período integral (23 horas por dia). O médico reduz gradualmente para apenas à noite e durante o sono do dia (12 a 14 horas por dia). A maioria das crianças deverá usar a órtese por 3 anos. (PELLEGRINO, 2016)

2.3. POLÍMEROS

Os materiais polímeros são componentes integrais da vida cotidiana, e aparecem desde os artigos domésticos, até em sofisticados aparatos científicos e instrumentos médicos. Eles oferecem combinações de propriedades físicas e mecânicas não disponíveis em outros materiais. Vantagens tais como, baixo peso, resiliência, resistência a corrosão, aderência a cor, transparência e facilidade de processamento podem ser obtidas com a seleção de um material polimérico. (CRAWFORD, 1998)

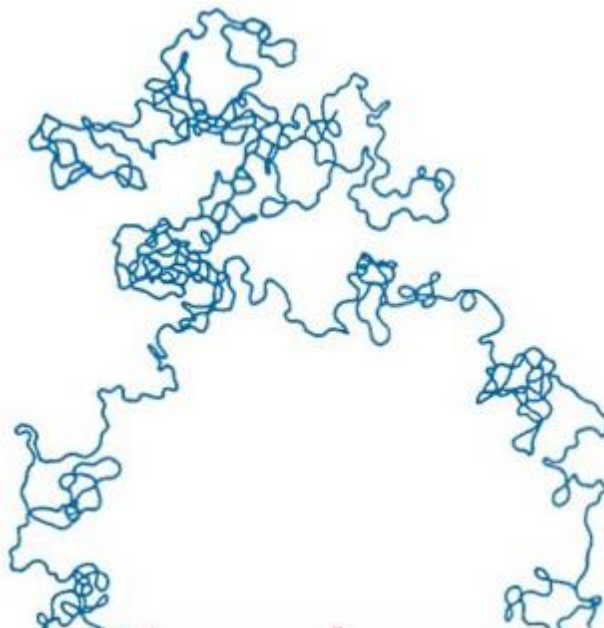
Esses materiais fazem parte do grupo de polímeros que consistem em arranjos de longas cadeias moleculares. Pertencentes a este grupo estão, também, materiais naturais como seda, borracha e celulose. No entanto, para chegar a esse resultado, no século XIX, houve tentativas de sínteses dos materiais poliméricos artificiais, o que culminou no primeiro sucesso baseado na celulose: o parkesine, criado por Alexander

Parkes, em 1855. Logo percebeu-se a aplicabilidade desse material na indústria, sendo utilizado, como exemplo, para substituir o marfim na fabricação de bolas de bilhar. (CRAWFORD, 1998)

Os polímeros consistem em grandes números de cadeias moleculares, cada uma das quais capaz de dobrar, enrolar e contorcer (Figura 10). Como consequência, tem-se um emaranhamento das moléculas, o que dá aos polímeros características singulares e importantes. Esses diferem-se quanto à composição química, tamanho, forma e estrutura. Quanto à estrutura, os polímeros podem ser amorfos e cristalinos; possuindo estruturas ordenadas; usualmente opacos; ponto de fusão bem definidos e pontuais; dotados de alta resistência química, à fadiga e ao desgaste. Aqueles são, de modo oposto, normalmente transparentes, têm uma faixa de fusão na qual o amolecimento ocorre gradativamente, e não possuem boa resistência química ou à fadiga e desgaste. (CALLISTER e RETHWISCH, 2012)

De acordo com a estrutura química da cadeia polimérica, isto é, conforme os grupos funcionais presentes, os polímeros podem ser agrupados em polihidrocarbonetos, poliamidas, poliésteres, poliéteres, poliacetais, poliuretanos, etc. (MANO e MENDES, 1999)

FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA ÚNICA CADEIA POLIMÉRICA



FONTE: CALLISTER e RETHWISCH, 2012, p. 465

Além disso, é interessante classificá-los quanto à resposta estrutural frente a uma elevação de temperatura. Nessa classificação, duas categorias são possíveis: termofixos e termoplásticos. Os termoplásticos amolecem e, eventualmente, liquefazem com o aumento da temperatura. Os termofixos tornam-se permanentes e rígidos durante sua formação e não amolecem sob aquecimento. Esses são, em geral, mais duros e resistentes que os termoplásticos e possuem melhor estabilidade dimensional. (CALLISTER e RETHWISCH, 2012)

Nota-se que essas aplicações requerem certa resistência mecânica (bolas de bilhar) e resistência a temperatura (cabo de panela).

Métodos de fabricação como a manufatura aditiva por extrusão utilizam, comumente, de polímeros termoplásticos como o PLA e o ABS para a produção de peças de prototipagem rápida com boa estabilidade dimensional e acabamento superficial. Na Figura 11, vê-se um exemplo de protótipo produzido com uma impressora 3D utilizando o princípio de extrusão de filamento. O PLA utilizado produziu um dispositivo com as características desejadas para o projeto: resistência mecânica, vedação, acabamento superficial e precisão dimensional.

FIGURA 11 - PROTÓTIPO PRODUZIDO COM PLA



FONTE: DO AUTOR

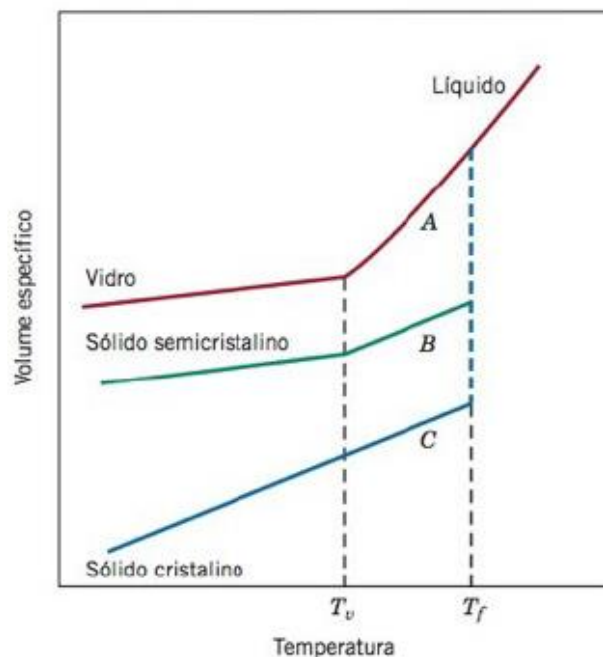
2.3.1. TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA

Polímeros cristalinos apresentam apenas temperatura de fusão, ponto acima no qual o sólido torna-se líquido. Adicionalmente, polímeros amorfos e semicristalinos apresentam uma transformação gradual de líquido em um material borrachoso e,

finalmente, em um sólido rígido durante o resfriamento. A temperatura acima, em que o material se torna borrachoso, e abaixo, em que o é sólido rígido, é chamada temperatura de transição vítrea. (CALLISTER e RETHWISCH, 2012)

Durante essa transformação, várias propriedades do polímero são bruscamente alteradas, tais como rigidez, capacidade calorífica e de expansão térmica. Essa propriedade está intimamente ligada à definição do processamento dos polímeros, além de restringir a aplicação por meio de um limite inferior e/ou superior de temperatura de trabalho. Na Figura 12, pode-se ver um comparativo do impacto no volume específico de três amostras do material polimérico sob aquecimento. Nota-se uma visível descontinuidade no comportamento dessa propriedade para o material A, amorfo, que passa pela transformação vítrea. Esse comportamento não é visto no polímero C e observado com menor intensidade no polímero semicristalino B. (CALLISTER e RETHWISCH, 2012)

FIGURA 12 - GRÁFICO DO VOLUME ESPECÍFICO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA TRÊS POLÍMEROS: A (CRISTALINO); B (SEMICRISTALINO); E C (AMORFO)



FONTE: (CALLISTER E RETHWISCH, 2012)

2.3.2. PLÁSTICOS DE INTERESSE

Nos capítulos abaixo serão listadas uma breve descrição das principais propriedades físicas e mecânicas de aplicações dos plásticos considerados na execução desse trabalho.

2.3.2.1. POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD)

O polietileno de alta densidade é um material termoplástico e semicristalino muito utilizado na indústria por apresentar propriedades físicas e mecânicas interessantes e pelo seu baixo custo. Esse plástico apresenta boa resistência à propagação de trincas e performance em alta temperatura e pressão. Como também, é facilmente adquirido em casas de construção e fornecedores de plástico de engenharia. (WYPYCH, 2012)

O PEAD é tipicamente processado por injeção, extrusão, moldagem por sopro e termoformagem. Para este último, deve-se levar em conta sua flexibilidade e, consequente, “embarrigamento” ao aquecer. As suas principais aplicações na indústria são a fabricação de tubulações industriais para mineração, distribuição de gás e produção de gás e óleo. Por outro lado, pode ser encontrado na fabricação de garrafas de água, embalagens em geral, sacolas próprias para congelador e partes veiculares. (FORMECH INTERNATIONAL LTD, 2019; WYPYCH, 2012). Na Figura 13, são vistos exemplos de aplicações do material e, na Tabela 1, encontram-se compiladas propriedades mecânicas e físicas de interesse desse polímero.

FIGURA 13 - APLICAÇÕES POPULARES DO POLIETILENO



FONTE: (OMNEXUS, 2019)

TABELA 1 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO PEAD

PROPRIEDADE	VALOR
Módulo de Young	800 Mpa
Limite de Escoamento	21,4 a 31,0 MPa
Deformação no Escoamento	8,7 a 15 %

Módulo de Resiliência	42 KJ m ⁻³
Densidade (20°C)	0,940 a 0,965 g cm ⁻³
Temperatura de Fusão	125 a 135 °C
Condutividade Térmica	0,52 a 0,55 W m ⁻¹ K ⁻¹
Calor Específico	1250 J Kg ⁻¹ K ⁻¹
Temperatura de Transição Vítrea	-118 a -133 °C
Taxa de Encolhimento	3 a 3,5%
Temperatura de Orientação	132 °C

FONTE: ADAPTADO DE WYPYCH, 2012; FORMECH INTERNATIONAL LTD, 2019; (ENGINEERING TOOLBOX, 2003)

2.3.2.2. POLIESTIRENO (PS)

O poliestireno é um polímero termoplástico amorfo com abundância de sua utilização na indústria, principalmente devido a sua boa resistência ao impacto e boa maleabilidade. Possui custo baixo e médio comparado a outros plásticos da engenharia. (OMNEXUS, 2019)

O PS é tipicamente processado por injeção, extrusão, moldagem por sopro e termoformagem. É principalmente aplicado em componentes eletrotécnicos, itens domésticos, filme isolante, embalagens e brinquedos (WYPYCH, 2012). Na Figura 14 podem ser vistos exemplos de aplicações do material e, na Tabela 2, tem-se um compilado das principais propriedades físicas e mecânicas desse polímero.

FIGURA 14 - APLICAÇÕES POPULARES DO POLIESTIRENO



FONTE: OCEAN LEGACY FOUNDATION, 2019

TABELA 2 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO PS

PROPRIEDADE	VALOR
Módulo de Young	3000 a 3500 Mpa
Limite de Escoamento	23 a 27 MPa
Deformação no Escoamento	1,6 a 1,8 %
Módulo de Resiliência	9,6 KJ m ⁻³
Densidade (20°C)	1,04 a 1,06 g cm ⁻³
Temperatura de Fusão	275 °C
Temperatura de Amolecimento	74 °C
Condutividade Térmica	0,105 a 0,128 W m ⁻¹ K ⁻¹
Calor Específico	1300 J Kg ⁻¹ K ⁻¹
Temperatura de Transição Vítea	85 a 102 °C
Taxa de Encolhimento	0,3 a 0,5%
Temperatura de Orientação	135 °C

FONTE: ADAPTADO DE WYPYCH, 2012 E FORMECH INTERNATIONAL LTD, 2019

2.3.2.3. POLIPROPILENO (PP)

O polipropileno é um polímero termoplástico semicristalino flexível, com baixa absorção de umidade e quimicamente inerte. Possui propriedades mecânicas interessantes como boas resistências ao impacto, todavia com formalidade limitada devido a sua alta flexibilidade. Possui custo baixo se comparado a outros plásticos da engenharia. (OMNEXUS, 2019)

O PP é tipicamente processado por injeção, extrusão, moldagem por sopro e termoformagem. Esse material é muito aplicado pela indústria automotiva, em componentes elétricos, em fibras, móveis, embalagens, fitas e, até mesmo, bandagens ortopédicas (WYPYCH, 2012). Na Figura 15, podem ser vistos exemplos de aplicações do material e, na Tabela 3, tem-se um compilado das principais propriedades físicas e mecânicas desse polímero.

FIGURA 15 - APLICAÇÕES POPULARES DO POLIPROPILENO



FONTE: OCEAN LEGACY FOUNDATION, 2019

TABELA 3 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO PP

PROPRIEDADE	VALOR
Módulo de Young	1200 a 2000 Mpa
Limite de Escoamento	31 a 35,2 MPa
Deformação no Escoamento	7 a 12 %
Módulo de Resiliência	34 KJ m ⁻³
Densidade (20°C)	0,84 a 0,91 g cm ⁻³
Temperatura de Fusão	160 a 176 °C
Condutividade Térmica	0,17 a 0,22 W m ⁻¹ K ⁻¹
Calor Específico	1920 J Kg ⁻¹ K ⁻¹
Temperatura de Transição Vítre	-8 °C
Taxa de Encolhimento	1,5 a 2,2%
Temperatura de Orientação	138 °C

FONTE: ADAPTADO DE WYPYCH, 2012; FORMECH INTERNATIONAL LTD, 2019; ENGINEERING TOOLBOX, 2003

2.3.2.4. POLIÁCIDO LÁCTICO (PLA)

O PLA é um bioplástico termoplástico biodegradável semicristalino, muito utilizado em impressoras 3D para produção de protótipos com bom nível de detalhamento. Esse plástico é diferente de outros polímeros por ser derivado de

recursos renováveis como a cana de açúcar e amido de milho. Além disso, possui características físicas e mecânicas similares a materiais como PP e PE (Rogers, 2015).

FIGURA 17 - APLICAÇÕES DO PLA: PARAFUSO MÉDICO



FONTE: ROGERS, 2015

Devido à natureza do processo, pode ocorrer divergências de propriedades na impressão 3D, culminando em peças com comportamento tipicamente anisotrópico. A tabela 4 apresenta um compilado das principais propriedades físicas e mecânicas deste polímero

TABELA 4 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO PLA

PROPRIEDADE	VALOR
Módulo de Young	3700 a 4100 Mpa
Limite de Escoamento	65,6 a 77 MPa
Deformação no Escoamento	2,4 a 10 %
Módulo de Resiliência	65 KJ m ⁻³
Densidade (20°C)	1,21 a 1,29 g cm ⁻³
Calor Específico	540 a 600 J K ⁻¹ Kg ⁻¹
Temperatura de Fusão	164 a 178 °C
Temperatura de Transição Vítrea	55 a 75 °C

FONTE: ADAPTADO DE WYPYCH, 2012

O PLA é tipicamente processado por injeção, extrusão e impressão 3D. Esse material aplicado com frequência pela indústria na fabricação de filamentos. Há comunidades de impressão 3D online, nelas designers de vários países disponibilizam seus trabalhos, possibilitando a impressão de peças à qualquer pessoa que possua impressora 3D (WYPYCH, 2012)

TABELA 4 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO PLA

PROPRIEDADE	VALOR
Módulo de Young	3700 a 4100 Mpa
Limite de Escoamento	65,6 a 77 MPa
Deformação no Escoamento	2,4 a 10 %
Módulo de Resiliência	65 KJ m ⁻³
Densidade (20°C)	1,21 a 1,29 g cm ⁻³
Calor Específico	540 a 600 J K ⁻¹ Kg ⁻¹
Temperatura de Fusão	164 a 178 °C
Temperatura de Transição Vítea	55 a 75 °C

FONTE: ADAPTADO DE WYPYCH, 2012

2.3.2.5. ACRILONITRILA BUTADIENO ESTIRENO (ABS)

O ABS é um polímero termoplástico e amorfo muito utilizado em conjunto com processos de injeção e impressoras 3D para produção de protótipos funcionais. Apresenta propriedades interessantes para indústria, como boa resistência mecânica e tenacidade e resistência à corrosão. (Rogers, 2015)

Esse plástico é tipicamente processado e fundido, por injeção, moldagem rotacional, extrusão e impressão 3D. O material é muito aplicado pela indústria na fabricação de filamentos para impressoras 3D, utensílios domésticos, painéis automotivos, partes de portas, partes de computador, mobília, equipamento de jardinagem, brinquedos e embalagens. Na Figura 16, podem ser vistos exemplos de aplicações do material e, na Tabela 5, tem-se um compilado das principais propriedades físicas e mecânicas deste polímero.

FIGURA 16 – APLICAÇÕES POPULARES DO ABS



FONTE: ROGERS, 2015

TABELA 5 – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO ABS

PROPRIEDADE	VALOR
Módulo de Young	1208 a 1939 Mpa
Limite de Escoamento	35 a 58 MPa
Deformação no Escoamento	2,4 a 4 %
Módulo de Resiliência	69 KJ m ⁻³
Densidade (20°C)	1,03 a 1,09 g cm ⁻³
Temperatura de Fusão	220 a 260 °C
Condutividade Térmica	0,16 W m ⁻¹ K ⁻¹
Calor Específico	1780 a 2030 J K ⁻¹ Kg ⁻¹
Temperatura de Transição Vítre	102 a 107 °C
Temperatura de Orientação	138 °C

FONTE: ADAPTADO DE WYPYCH, 2012; FORMECH INTERNATIONAL LTD, 2019

2.4. MANUFATURA ADITIVA

Manufatura aditiva é um processo de fabricação que tem como característica a deposição sucessiva de material na forma de camadas. Ela possui diversas tecnologias diferentes que são aplicadas nas mais diversas áreas, tais como engenharia, medicina, educação, arquitetura, cartografia, brinquedos e entretenimento (ISO/ASTM, 2015)

Esse método de fabricação é conhecido por produzir representações de sistemas e partes de forma rápida antes do lançamento e comercialização do produto. Logo, tem-se um protótipo ou modelo base como resultado nos quais futuros modelos e, possivelmente, o sistema final, serão derivados. (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015)

De acordo com a norma ISO/ASTM 52900:2015, esse processo de fabricação é dividido em sete princípios distintos:

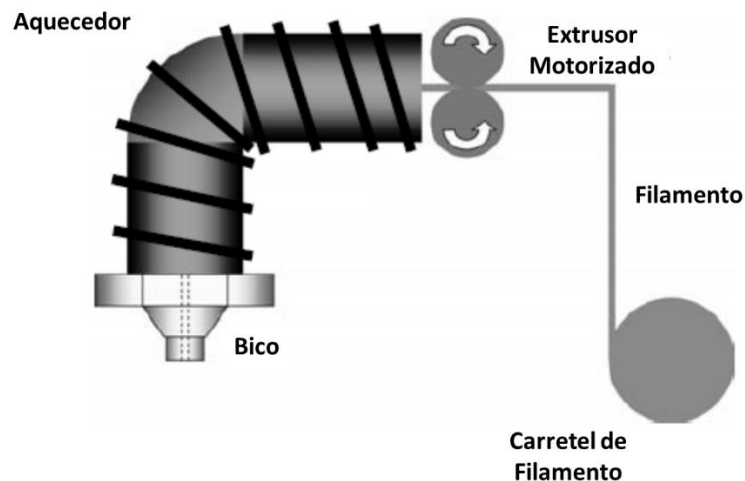
1. *Binder jetting*: princípio no qual um agente ligante líquido é depositado seletivamente para ligar pó material;
2. *Directed energy deposition*: princípio no qual energia térmica focalizada é usada para unir materiais por fusão no momento da deposição;
3. *Material extrusion*: princípio no qual material é seletivamente depositado por meio de um bico ou orifício;
4. *Material jetting*: princípio no qual gotículas de material são depositadas seletivamente
5. *Powder bed fusion*: princípio no qual a energia térmica é seletivamente aplicada para unir regiões de uma camada de pó material;
6. *Sheet lamination*: princípio no qual camadas de material são unidas com solda ultrassônica ou por meio de papel adesivo;
7. *Vat photopolymerization*: princípio no qual líquido foto-polimerizante é utilizado em conjunto com luz ultravioleta, aplicada seletivamente para construir um objeto físico.

Devido ao baixo custo, simplicidade e disponibilidade das tecnologias de extrusão de material esse é o princípio amplamente utilizado e por essa razão será mais amplamente revisado na seção seguinte.

2.4.1. PRINCÍPIO DE EXTRUSÃO DE MATERIAL

Atualmente, o método mais comum de prototipagem rápida é a impressão 3D baseada na extrusão de material. Ele utiliza de modelos CAD para a produção de objetos físicos de forma ágil e que não necessitam de elevada resistência mecânica. O mecanismo de funcionamento é o de extrusão do material polimérico termoplástico em camadas finas, orientadas por um arquivo SML, que define as coordenadas de extrusão para a impressora. Na FIGURA 17, encontra-se um esquemático do funcionamento de uma impressora 3D genérica. Primeiramente, o material polimérico é desenrolado por meio de motores elétricos em direção ao bico ao qual é aquecido um pouco acima de sua temperatura de fusão. Assim, o material é depositado no lugar correto com um conjunto de servo motores capazes de mover o conjunto extrusor nas três dimensões necessárias. (LIOU, 2008)

FIGURA 17 - MECANISMO DE EXTRUSÃO GENÉRICO DE UMA IMPRESSORA 3D

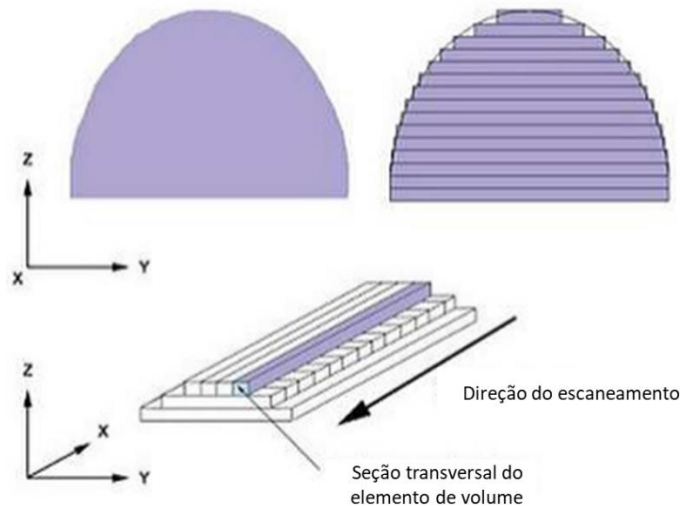


FONTE: ADAPTADO DE LIOU, 2008

A impressão é realizada camada por camada, com o bico extrusor movendo-se nas direções horizontais e transversais, adequando-se à altura para a impressão da próxima camada, como se vê na figura 21. Esse método de impressão apresenta algumas limitações nas geometrias complexas, as quais não se tem apoio entre uma camada e outra em ângulos mais agudos. Desse modo, faz-se necessário a utilização de geometria de suporte para fornecer o devido apoio entre camadas. Essa geometria

adicional vem com o ônus de aumento de gasto com material e perda de acabamento superficial.

FIGURA 18 - ESQUEMÁTICO DE UMA PEÇA SENDO IMPRESSA EM 3D CAMADA POR CAMADA



FONTE: CANESSA, FONDA E ZENNARO (2013)

Essa ferramenta é utilizada em praticamente todas as indústrias: automotivas, aeroespaciais, negócios, máquinas comerciais, médica etc. A agilidade ganhada na fabricação, a utilização de materiais não tóxicos, capacidade de operar em um ambiente de escritório e o não desperdício de matéria prima, fazem desse processo um recurso valioso de prototipagem e teste.

A técnica da modelagem tridimensional permite a realização de projetos personalizados de produtos, o que facilita no atendimento das necessidades de cada cliente individualmente, tanto no que diz respeito às especificações, quanto a design inovador e utilização de uma variedade de materiais para a fabricação. (HAUSMAN e HORNE, 2014) (MIETTI e VENDRAMETO, 2000)

Ainda de acordo com Horne e Hausman (2014), uma vantagem muito significativa é a produção de estruturas complexas, rígidas e leves, que seriam impossíveis de serem fabricadas por processos de moldagem e fundição. Assim, as impressões 3D podem produzir objetos leves, o que reduz custos, como por exemplo, economia de combustível, utilização de menos material para deposição e aplicação de materiais alternativos e mais baratos, como os de origem vegetal para o molde das peças.

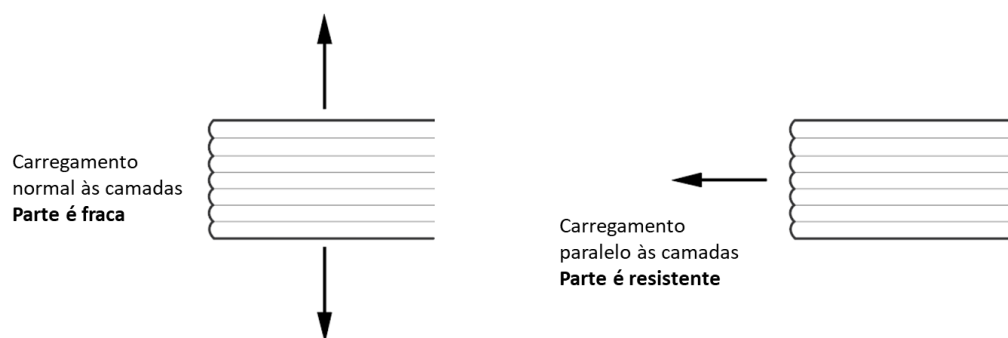
A prototipagem rápida permite a reciclagem das peças, pois o protótipo não é enviado ao cliente final, podendo voltar a sua condição original para possíveis alterações, o que, além de reduzir os custos, diminui o impacto ambiental, pois evita descarte de peças e permite o aproveitamento de materiais usados para a fabricação de novos protótipos (MIETTI e VENDRAMETO, 2000). No que diz respeito ao processo de produção, permite a produção em pequenas escalas, em menor tempo, utilizando menos material e mão-de-obra do que a produção em massa tradicional. (MIETTI e VENDRAMETO, 2000).

2.4.2. ORIENTAÇÃO DA PEÇA NA PLATAFORMA DE IMPRESSÃO

Variando-se a orientação da peça, ou seja, como ela é a impressa, tem-se uma grande mudança no tempo de impressão, na precisão e na resistência geral da peça. Isso deve-se à característica anisotrópica do processo de impressão 3D por extrusão, visto que a ligação do material depositado consecutivamente em uma mesma camada e entre camadas são de naturezas diferentes, essa apresentando vãos entre camadas, até mesmo, a completa não adesão entre partes de uma camada e outra. (REDWOOD, 2019)

Na Figura 19 é ilustrada a importância de definir corretamente a orientação da peça antes de realizar a impressão. Uma peça sujeita a tensão horizontal, impressa também de maneira horizontal, tenderá a romper por cisalhamento entre as camadas. Deste modo, recomenda-se a impressão de modo que a tensão esteja paralela às camadas, resultando em uma peça muito mais resistente.

FIGURA 19 - IMPORTÂNCIA DA ORIENTAÇÃO NA RESISTÊNCIA DA PEÇA IMPRESSA



FONTE: ADAPTADO DE REDWOOD, 2019

A fim de se obter um ótimo acabamento, recomenda-se imprimir a peça de modo que contornos complexos estejam dentro de uma só camada. Isso é atingido quando se orienta, por exemplo, na construção de um cilindro, a peça no sentido axial. Caso o cilindro seja impresso deitado, há uma aproximação da superfície da peça em retângulos, gerando uma peça com pior acabamento, como pode ser visto Figura 20.

FIGURA 20 - INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO NO ACABAMENTO SUPERFICIAL

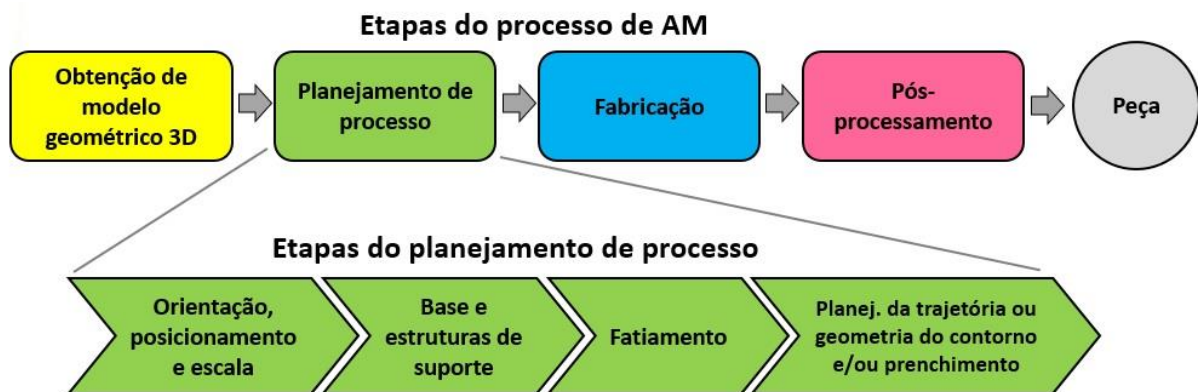


FONTE: REDWOOD, 2019

2.4.3. PLANEJAMENTO DE PROCESSO PARA MANUFATURA ADITIVA

Segundo Volpato (2017), recomenda-se que o processo de desenvolvimento de produto envolvendo uma máquina de manufatura aditiva passe por etapas como ilustradas na FIGURA 21.

FIGURA 21 - ETAPAS DO PLANEJAMENTO DE PROCESSO PARA AM.



FONTE: ADAPTADO DE VOLPATO, 2017

A primeira etapa consiste na obtenção de modelo geométrico 3D do produto a ser fabricado. Esse, comumente, é obtido por meio de softwares CAD que permitem o desenho tridimensional de partes e montagens. Outro meio eficaz, é a utilização de scanners 3D que possibilitam a leitura, interpretação e conversão para um objeto virtual 3D de objetos físicos. (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015)

Em sequência, o modelo deve ser convertido a um formato STL (acrônimo para *STereoLithography*). Com o uso desse formato, tem-se uma maneira simplificada de se representar a geometria singularmente. Para tanto, a geometria é convertida em uma série de triângulos superficiais que, em geral, dever ser menor que a resolução da impressora 3D utilizada. (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015)

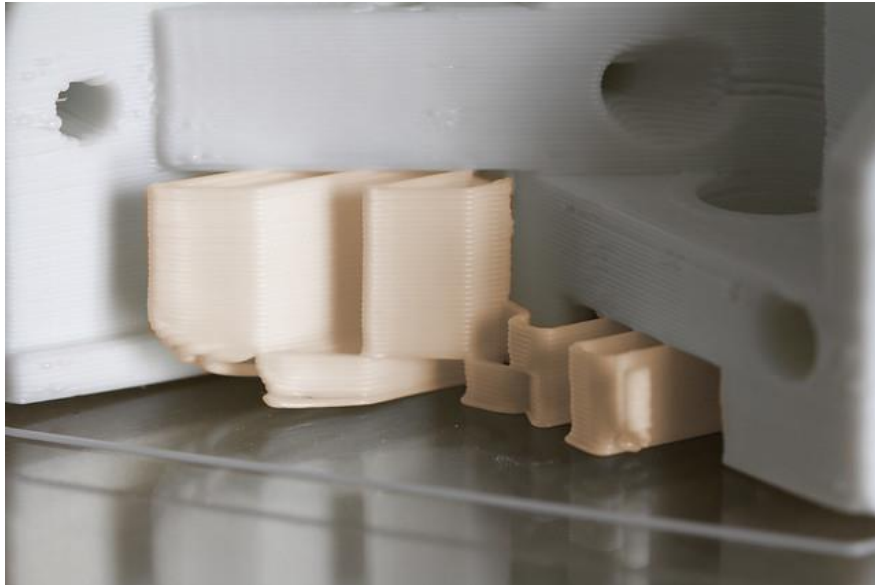
Desse modo, o STL é importado no software que faz a interface entre o modelo virtual e a impressora 3D. Essa ferramenta, em geral, é responsável por fatiar o modelo de acordo com os parâmetros especificados, isto é, cortar a peça em camadas assimiláveis pela máquina, e, quando necessário, adicionar estruturas de suporte à peça.

No evento pode possuir áreas sem apoio e características desconectadas uma das outras, assim, faz-se necessário a utilização de estruturas de suporte. Essas são divididas quanto ao material utilizado, podendo ser do mesmo tipo do material que será manipulado na impressão da peça ou de um material secundário. Assim, terá como vantagem a possibilidade de ter um outro material com características secundárias desejáveis para materiais de suporte. Um exemplo comum é a utilização de materiais

solúveis em água, os quais podem ser, após a impressão, facilmente removidos. Em decorrência disso, ter-se-á um melhor acabamento superficial na peça.

Na Figura 22, vê-se um caso típico, o qual é necessário o uso de estrutura de suporte. Essa surge para corrigir a falta de apoio presente quando o ângulo entre camadas é muito acentuado.

FIGURA 22 - EXEMPLO DE PEÇA COM ESTRUTURA DE SUPORTE



FONTE: ANDREW CRAIGIE, 2012

Com a peça e os suportes fatiados, o modelo então é parametrizado e obtém o contorno a ser seguido pelo extrusor em cada camada. O software de controle deve também determinar como melhor preencher o material entre os contornos. Essa etapa é crucial, pois o extrusor deposita fisicamente o material que preenche um espaço outrora vazio. Para evitar que não haja adesão entre o material e a mesa, ou material previamente depositado, deve-se assegurar que seja depositado suficientemente próximo à camada adjacente. (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015) Assim que essas etapas estejam concluídas, o processo muda para a fase de construção controlada por computador. Nesse, a sequência de comandos originada do software anterior é repassada à máquina de impressão, a qual se encarregará de converter código em movimento de translado do extrusor e, efetivamente, de extrusão e retração de material polimérico. Assim, o processo será repetido camada por camada até que a peça seja concluída.

Após a remoção das estruturas do suporte, a fim de se obter melhores resultados de acabamento superficial, recomenda-se a aplicação de técnicas de pós-processamento de plásticos, podendo envolver desde o lixamento da superfície do material, polimento até tratamentos químicos, como a utilização de vapor de acetona em polímeros do tipo ABS (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015). Na Figura 23, vê-se um exemplo de aplicação estética desse tipo de pós processamento

FIGURA 23 - PEÇA DE ABS DEPOIS DE SER TRATADA COM ACETONA (À ESQUERDA)

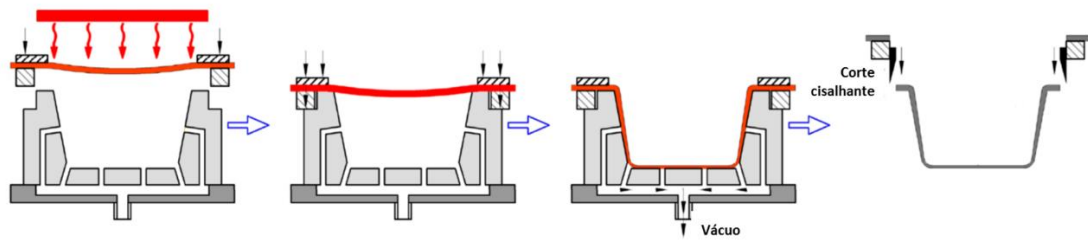


FONTE: SINKHACKS, 2019

2.5. TERMOFORMAGEM

O processo de termoformagem consiste no aquecimento de uma chapa termoplástica até a sua temperatura vítrea de amolecimento. Posteriormente ocorre a conformação por meios mecânicos, pressão de ar comprimido, vácuo ou simultaneamente mais de um destes processos (Figura 24). Esse método apresentava restrições. Por exemplo, a distribuição irregular de plástico na parede da peça e gasto excessivo de material nas periferias. Este aspecto limita a aplicação em embalagens simples. Com avanços tecnológicos, em meados da década de 1950 ocorreram melhorias que ampliaram a aplicação em bacias para geladeira, para-choque de carros e painéis de interruptor. (CRAWFORD, 1998).

FIGURA 24 - ESQUEMÁTICO DE UM PROCESSO DE TERMOFORMAGEM



FONTE: ADAPTADO DE LEITE, RUBIO, ET AL., 2018

As principais categorias da termoformagem, segundo Crawford são a moldagem a vácuo e moldagem à pressão. Chanda e Roy (2007) incluem uma terceira categoria, que utiliza de moldes macho e fêmea pressionados um contra o outro com a lâmina plástica entre eles, a moldagem mecânica. A moldagem a vácuo consiste no aquecimento de um polímero termoplástico e na sua moldagem pela redução da pressão de ar entre ele e o molde. Chamado de moldagem negativa, esse consiste no uso de uma lâmina de plástico de espessura entre 0,025 e 6,5 mm fixa sobre o molde aberto. Um sistema de aquecimento, então, amolece a lâmina até um ponto definido e, em seguida, aplica-se o vácuo. A diferença de pressão entre o ar atmosférico e o vácuo gerado garante a moldagem do plástico. De modo semelhante, tem-se o método da moldagem positiva, no qual um molde positivo (macho) é empurrado contra a lâmina de plástico. Esse último garante melhor distribuição de material e é capaz de produzir formas mais profundas. (CRAWFORD, 1998)

A moldagem à pressão utiliza, de modo semelhante à modelagem a vácuo, um aquecedor para amolecer o plástico e a lâmina plástica sobre o molde. Todavia, nesse processo utiliza-se de ar comprimido para moldar a lâmina plástica, o qual é aplicado na parte superior da lâmina. Se comparado com a moldagem a vácuo, essa técnica permite ciclos mais rápidos de produção, melhor qualidade superficial e controle dimensional da peça. (CHANDA e ROY, 2007)

Uma gama de materiais pode ser utilizada com esse método de fabricação. Polímeros como Poliestireno, ABS, PVC, acrílico, policarbonato, polipropileno e polietileno de baixa e alta densidade são aplicados com frequência e produzem resultados satisfatórios quanto a propriedades mecânicas. (CRAWFORD, 1998)

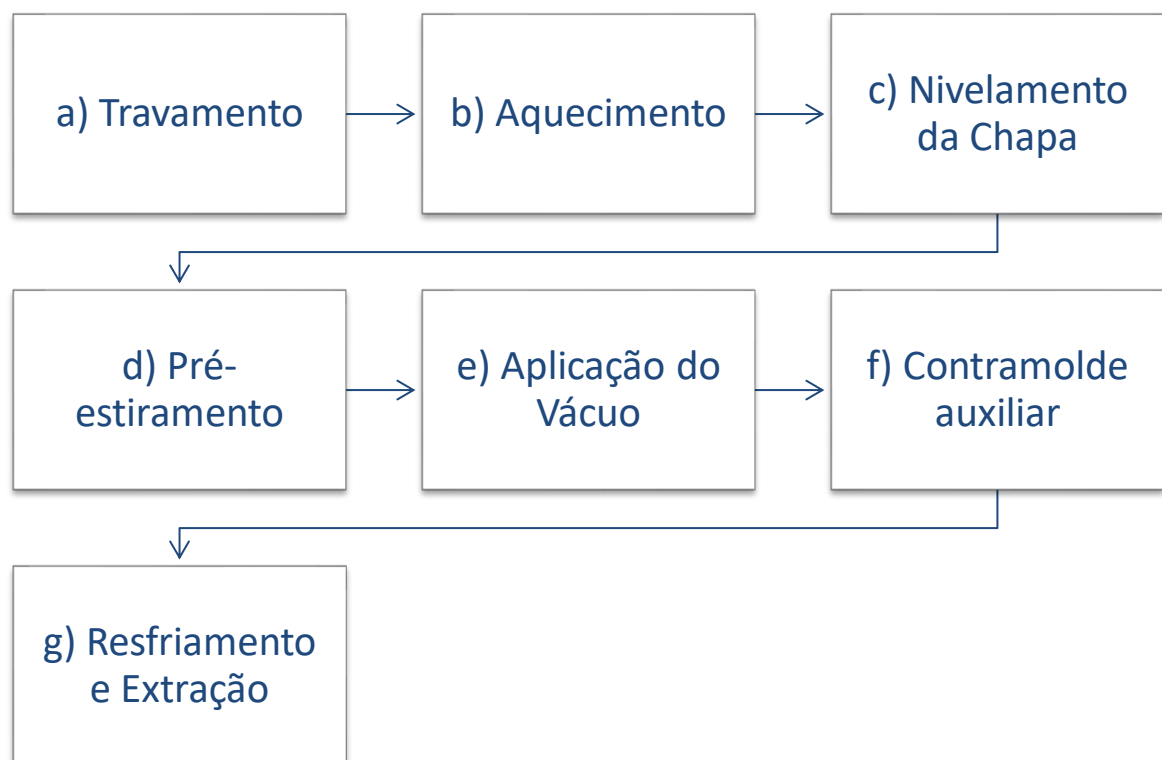
2.5.1. TERMOFORMAGEM A VÁCUO

Como introduzido no subcapítulo 1.1, esse processo envolve o aquecimento de uma chapa plástica que é comprimida contra um molde, enquanto o vácuo é aplicado. Em seguida, por meio de um sistema de ar com direção revertida ou manualmente, a peça finalizada é extraída do equipamento.

O processo apresenta vantagens como as condições baixas pressões de te moldagem, a possibilidade de uso de moldes de baixo custo e fabricados com materiais não custosos. Em contrapartida, há perda de material ao redor do molde, já que se faz necessária uma chapa com área maior que a área efetiva moldada. (FORMECH INTERNATIONAL LTD, 2019)

Na Figura 25, são resumidas as etapas típicas para a correta execução do processo de termoformagem a vácuo. Adicionalmente, abaixo dessa é feita uma breve explicação de cada etapa baseada nos dados divulgado por Formtech International LTD (2019).

FIGURA 25 - PASSOS TÍPICOS PARA A TERMOFORMAGEM A VÁCUO



FONTE: ADAPATADO DE FORMTECH INTERNATIONAL LTD, 2019

- a) Travamento: o mecanismo de travamento deve ser suficientemente poderoso para travar a chapa mais espessa a ser utilizada na máquina.
- b) Aquecimento: os aquecedores são geralmente elementos infravermelho montados em uma placa refletora de alumínio. É essencial para a correta execução do processo um aquecimento uniforme de toda a placa do material polimérico. Pirômetros são geralmente utilizadas para a verificação e controle da temperatura do processo de termoformagem.
- c) Nivelamento da Chapa: opcionalmente, a fim de aumentar o controle do processo, procura-se evitar que a chapa de plástico sofra o efeito de embarrigamento ao ser aquecida. Para este fim, utiliza-se um pequeno fluxo de ar injetada na cavidade de baixo da máquina contra a placa, logo levantamento a chapa.
- d) Pré-estiramento: assim que o plástico atinge a temperatura correta de moldagem, este pode ser pré-estirado para assegurar uniformidade de espessura de parede. Esta etapa é essencial para a moldagem de peças com alta profundidade com ângulos mínimos e alto nível de detalhamento superficial do molde.
- e) Aplicação do Vácuo: após toda a sequência de etapas, uma bomba de palheta é usada para se extrair o ar preso entre a chapa e o molde.
- f) Contramolde auxiliar: a fim de se obter ainda melhores resultados de uniformidade de espessura de parede e maleabilidade de peças profundas, além de minimizar defeitos comuns na termoformagem, pode-se utilizar um contramolde acima da área de moldagem. Atuado por um cilindro hidráulico ou pneumático, o contramolde é pressionado contra a chapa polimérica, assim melhorando a precisão dimensional e qualidade do processo.

- g) Resfriamento e Extração: depois da peça ser termoformada, deve-se aguardar seu devido resfriamento antes de ser extraída. Pode-se, em adição, utilizar de ventiladores e sprays de névoa para diminuir o tempo de espera.

2.5.2. FABRICAÇÃO DE MOLDES PARA TERMOFORMAGEM

Os moldes possuem várias funções dentro do processo de termoformagem. A mais importante é que é ele que define a geometria da peça, além disso é que, a partir dele, pode-se variar a textura da peça, adicionar logos e outros detalhes. O molde, ainda, age como um trocador de calor, removendo calor da peça e facilitando o processo de resfriamento.

Eles devem ser robustos o suficiente para produzir o número de peças para o qual foram projetados. Ademais, precisam ter adequado fluxo de ar para evacuar o espaço entre a chapa aquecida e a superfície do molde durante o processo de termoformagem. (KLEIN, 2009)

Segundo Klein (2009) o projeto de moldes deve seguir as seguintes considerações: escolha do material do molde, geometria do molde, ventilação

Materiais podem ser categorizados e adequados para produção de peças de baixo ou alto volume. Moldes para baixo volume são vantajosos quando é necessário personalização, rapidez e baixo custo de produção. Exemplos de moldes nessa categoria são os moldes feitos a partir de madeira, espuma sintética, gesso, plástico. A principal desvantagem desses materiais é a baixa condutividade térmica, o que dificulta o resfriamento adequado da peça. O material mais utilizado para altos volumes de produção é o Alumínio, que apresenta alta resistência e altíssima condutividade térmica.

A geometria do molde também é um fator importante para a correta execução do processo de termoformagem. Ela deve seguir recomendações de valores de raio de canto, ângulo de saída, além de permitir a contração característica, oriunda do aquecimento e resfriamento de materiais. Uma prática comum é aumentar o tamanho do molde por um fator, com base no material escolhido para termoformagem. Na Tabela 6, encontram-se valores típicos do fator de aumento do molde para diferentes materiais.

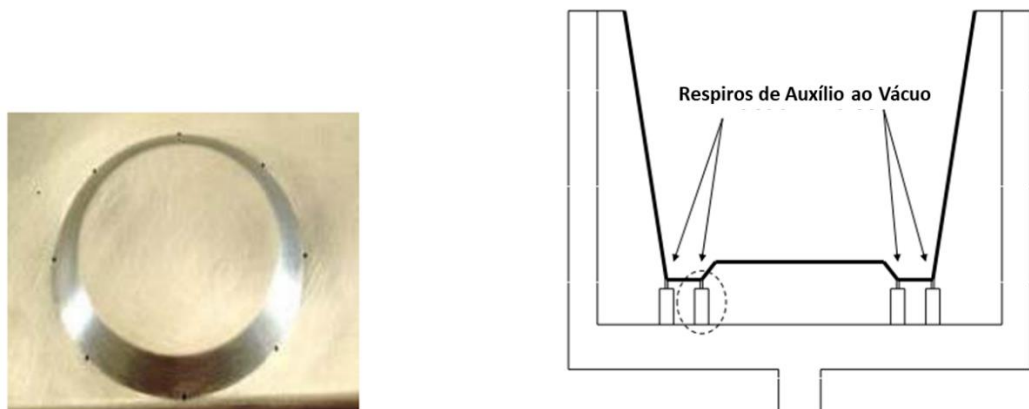
TABELA 6 - FATOR DE AUMENTO RECOMENDADO DO MOLDE PARA DIFERENTES MATERIAIS

Material plástico	Fator de Aumento do Molde
PEAD	0,017 – 0,022
PET	0,007
PP	0,017
PS	0,005
PVC	0,004

FONTE: KLEIN, 2009

Todos os moldes devem apresentar maneiras de permitir a passagem do ar entre a chapa aquecida e o molde. Desse modo, é prática comum adicionar respiros no molde, cuja função é facilitar a moldagem da chapa e a acelerar o contato desta com a superfície do molde. O tamanho desses respiros deve ser suficiente pequeno para que o material não seja puxado para dentro dos furos, mas grande o suficiente para permitir a exaustão do ar rapidamente. O diâmetro dos respiros recomendável é altamente dependente do material a ser termoformado e de sua espessura, podendo variar de 0,076 a 1mm. Um exemplo de molde que utiliza respiros para facilitar o fluxo de ar é visto na Figura 26.

FIGURA 26 - MOLDE COM RESPIROS PARA FACILITAR O FLUXO DE AR



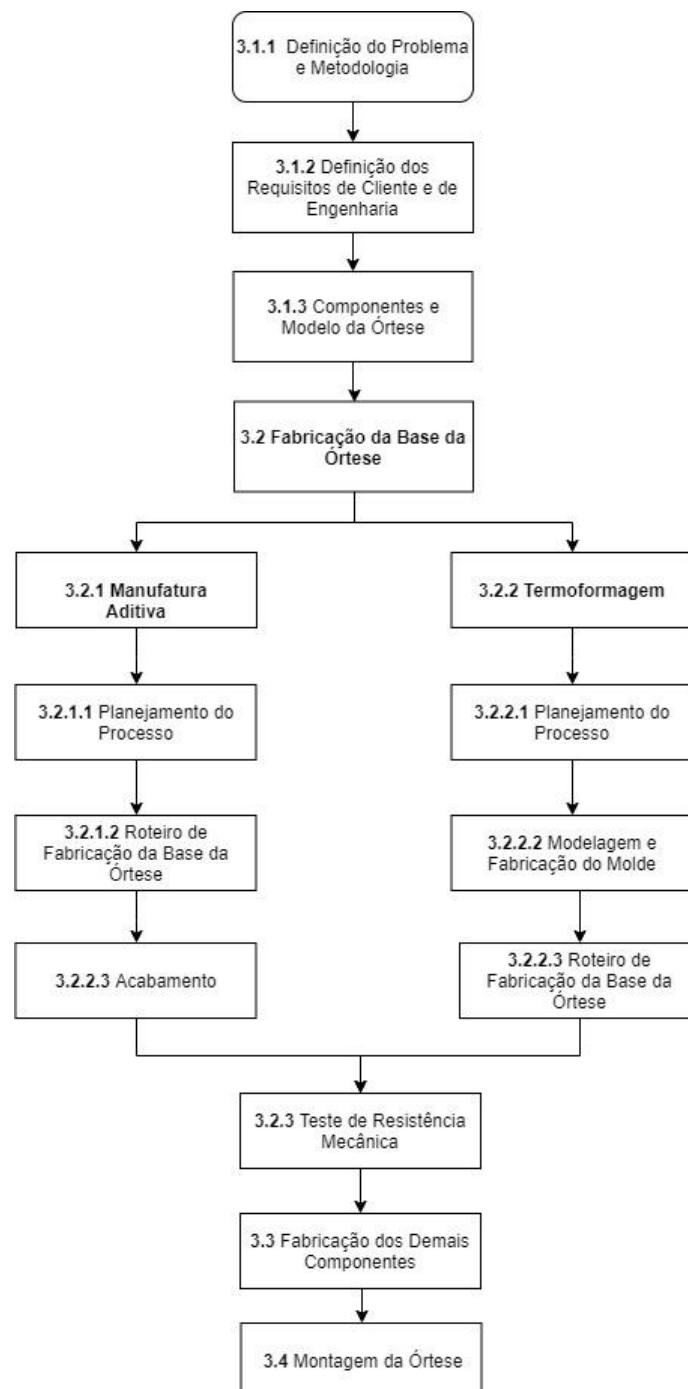
FONTE: ADAPTADO DE KLEIN, 2009

Assim como os moldes para injeção de polímeros, para altos volumes de peças é recomendável adequado controle de temperatura do molde. Esse pode ser feito por meio de fluxo de água interno ao molde que passa primeiro por um controle de temperatura, logo aquecendo ou resfriando o molde como desejado.

3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Com objetivo fabricar e analisar o custo benefício de órteses fabricadas por diferentes processos de fabricação foi estabelecido um fluxograma de trabalho, como ilustrado na Figura 27. O trabalho foi estruturado com a sequência planejamento, execução para cada processo de fabricação e compilação de resultados.

FIGURA 27 - FLUXOGRAMA DE PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DOS TESTES



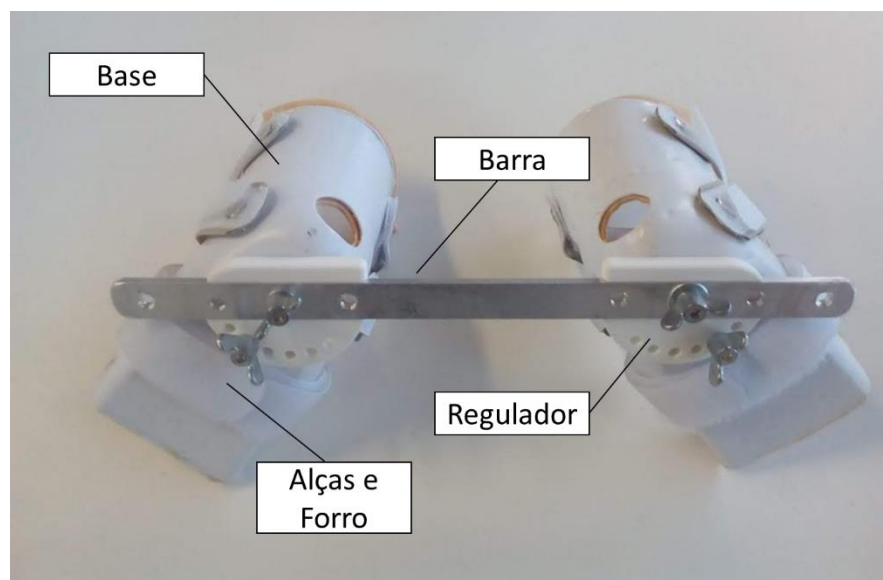
FONTE: DO AUTOR

3.1. PREPARAÇÃO

3.1.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E A METODOLOGIA

Neste trabalho será estudado a fabricação de um modelo de órtese fixa de Denis-Browne, com projeto adaptado com objetivo de reduzir custo. Para facilitar o entendimento da órtese, ela foi dividida em quatro componentes, como ilustrado na figura 33:

FIGURA 28 - DIAGRAMA DOS COMPONENTES DA ÓRTESE



FONTE: DO AUTOR

3.1.2. DEFINIÇÃO DE REQUISITOS DE CLIENTE E ENGENHARIA

A fim de nortear a avaliação dos diferentes materiais e processos de fabricação, elaborou-se, com base em entrevistas com os clientes secundários e terciários, uma lista de requisitos de cliente para uma órtese para PTC. As entrevistas foram, então, resumidas na tabela 7 – tabela 7 com um grau de importância de 1 a 9, respectivamente. Gradativamente, um requisito de grau 1 é pouco relevante, enquanto que o grau 9 apresenta altíssima relevância.

TABELA 7 – REQUISITOS DO CLIENTE

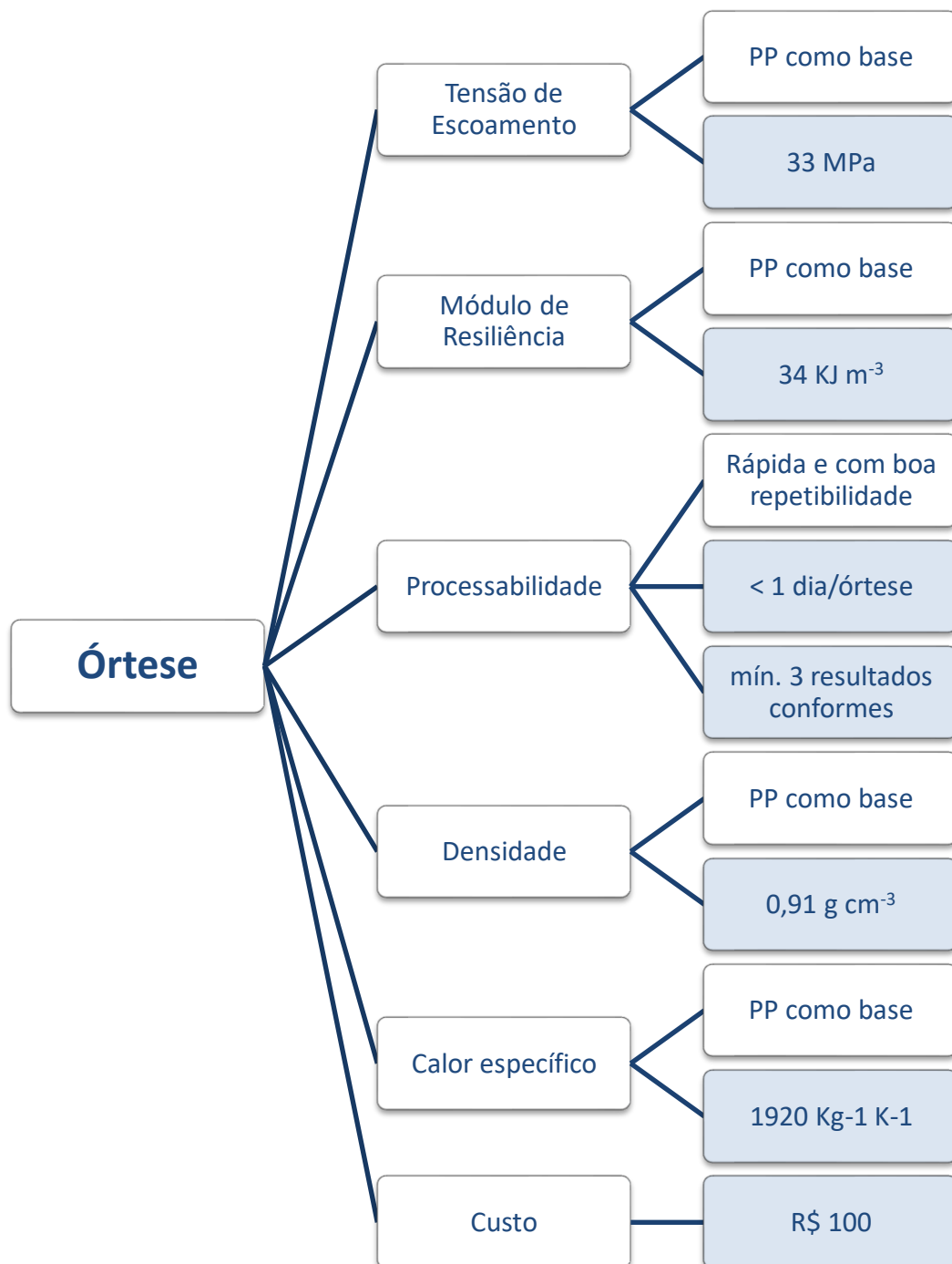
REQUISITO DO CLIENTE	IMPORTÂNCIA (1-9)
Órtese confortável e que permita uso prolongado	9
Órtese Resistente	9
Preço baixo	9
Produto leve	6
Não aqueça muito em meio a clima quente	3
Produto customizável	3
Rápida entrega	6

FONTE: DO AUTOR

Em sequência, na Figura 29, foram definidos quais requisitos de engenharia eram de consideração necessária para a fabricação da órtese. Para cada requisito buscou-se definir um valor alvo, com base na pesquisa feita em Referências Bibliográficas. Os modelos mais comuns de Denis Browne têm o calçado de couro e amarras de cadarços. Com objetivo de propor um projeto alternativo, ele foi baseado nas talas suropodálicas personalizadas feitas em PP. Para esse modelo, o Ministério da Saúde (2013) recomenda a utilização de polipropileno termoformado. Juntando-se a isso, atualmente, segundo Ministério da Saúde (2013), o método convencional de fabricação de órteses para membros inferiores recomenda a utilização de polipropileno termoformado. Logo, foi adotado os valores das propriedades físicas e mecânicas desse polímero como valor alvo para os requisitos de projeto. Os blocos em azul destacam esses valores para cada requisito.

Com o propósito de assegurar a robustez do produto, utilizou-se como premissa fundamental, a resposta mecânica somente na região linear do diagrama tensão-deformação, ou seja, sem que ocorra escoamento. Nesse sentido, a métrica para resistência mecânica foi a tensão de escoamento, e, pelo mesmo princípio, para métrica para tenacidade, o módulo de resiliência.

FIGURA 29 -- REQUISITOS DE ENGENHARIA E VALORES ALVO EM AZUL



FONTE: DO AUTOR

Com o intuito de verificar o impacto de cada um dos requisitos funcionais na qualidade final do produto, utilizou-se da matriz QFD (*Quality Function Deployment*) para relacionar e ponderar requisitos funcionais e de cliente (Figura 30). A ferramenta é importante, pois traduz as vontades dos clientes, normalmente genéricas, em características mensuráveis. Dela, obtém-se uma lista priorizada de requisitos

funcionais que devem ser levados em conta na seleção do material e do processo do projeto. (ROZENFELD et al., 2006)

FIGURA 30 - QFD DO PROJETO

Importância	Requisitos do Cliente Requisitos Funcionais	Direção de Melhoria					
		↑	↑	↑	↓	↑	↓
		Limite de Escoamento	Módulo de Resiliência	Processabilidade	Densidade	Calor específico	Custo
9	Órtese confortável e que permita uso prolongado	▲	◆		▲	◆	
9	Órtese Robusta	◆	◆		●	●	
9	Preço baixo	▲	▲	▲	●		◆
6	Produto leve				◆		
3	Não aqueça muito em meio a clima quente					◆	
3	Produto customizável			▲			▲
6	Rápida entrega			◆			▲
Pontuação de Importância		162	189	90	126	117	135
Importância relativa		20%	23%	11%	15%	14%	16%
Prioridade		2	1	6	4	5	3

Correlação:	Forte	Média	Fraca	Nenhuma
	◆	▲	●	

FONTE: DO AUTOR

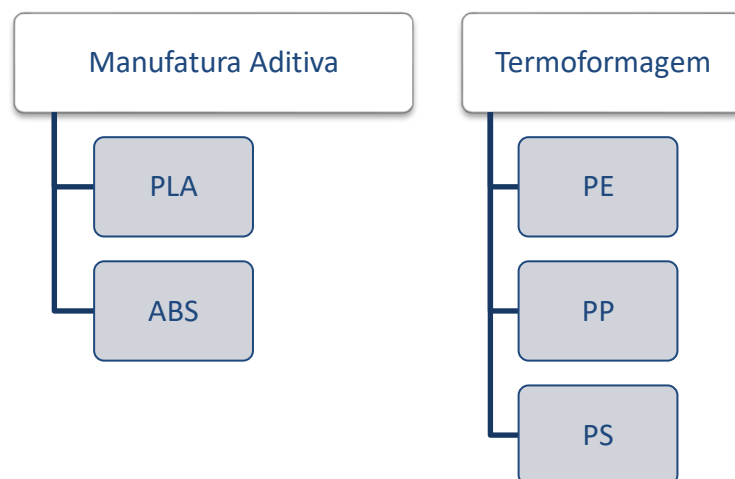
A matriz deixa claro a importância na correta seleção do material da órtese para atender as expectativas do paciente. Propriedades como, resistência mecânica, tenacidade e densidade, devem ser analisadas de cada material cogitado, pois interferem diretamente na robustez e no conforto geral da órtese.

Além disso, dois fatores de alta importância para os clientes aparecem em destaque nos requisitos do projeto, o custo da fabricação e a densidade. Estes fatores são determinantes para o projeto, pois definem o conforto e a acessibilidade do produto.

Assim, levando em conta as características supracitadas e a facilidade de fabricação, recomenda-se um material da família dos plásticos, os quais têm bom histórico de aplicação na fabricação de órteses. Em sequência, com base em Wypych (2012), foi elaborada e disponibilizada nas Referências Bibliográficas do trabalho em

2.3.2 uma compilação de informações importantes de plásticos que possam atender as especificações do projeto. De modo que, a seleção foi feita a partir do ferramental e maquinário disponível na universidade para a fabricação do projeto, além de critérios como disponibilidade, processabilidade e custo do material, definiu-se, na Figura 31, os plásticos a serem estudados e com qual(is) processo(s) de manufatura ocorreria o teste.

FIGURA 31 - MATERIAIS E PROCESSOS TESTADOS NO PROJETO



FONTE: DO AUTOR

3.1.3. COMPONENTES E MODELO DA ÓRTESE

Foi adotada uma geometria padrão para a órtese, para que a comparação entre os materiais e processos sejam simplificados e confiáveis. Esta geometria baseia-se em modelos de órteses de Denis-Browne, disponíveis para pacientes de até 5 meses do mercado, servindo como base para possíveis melhorias futuras.

Por conseguinte, a órtese foi modelada em um projeto do professor doutor Sérgio Fernando Lajarin, do departamento de Engenharia Mecânica da UFPR, o qual simplifica a fabricação de órteses para pé torto congênito. Para a realização da modelagem, foi utilizado o software CAD Autodesk Fusion 360 (AUTODESK, 2019) com licença para estudante.

Como descrito em 3.1.1 a órtese foi dividida em 4 partes, base, barra, alças e forro e regulador. A base da órtese é o componente responsável por restringir o movimento do pé como parte do método de Ponseti para tratamento de PTC. Como este componente apresenta geometria complexa e está diretamente em contato com o paciente, é essencial a utilização de um processo de fabricação capaz de aliar precisão

dimensional e resistência mecânica. Para isso, o modelo utilizado, como visto na (figura 32, a), tem apoio para a sola do pé e tornozelo e, portanto, deve ser utilizado junto com alças para manter um bom suporte ao pé do paciente. Para tal, existem furos para rebites nas laterais da geometria.

Ademais, os dois furos na sola têm função de fixação da base no regulador e, com isso, permitir o travamento em relação à barra. Por outro lado, o furo de diâmetro maior presente no tornozelo é relevante para o médico acompanhar a posição do calcanhar relativo à base da órtese.

A barra, como visto na 8 (figura 32, b), serve como travamento do movimento de um pé em relação ao outro. Ela deve permanecer rígida, ser leve e possibilitar o ajuste conforme o paciente. Assim sendo, o material escolhido foi o alumínio e optou-se por ajustes por meio de furos, os quais o conjunto base da órtese e regulador é fixado.

A alça (figura 32, c) deve permitir o ajuste da órtese em cada paciente. Dessa forma, optou-se por um conjunto costurado de tecido e velcro, o primeiro realizando a função do componente e o segundo atuando como interface entre o paciente e o velcro, gerando conforto ao usuário.

Esse componente é, em seguida, montado na órtese por meio de uma argola impressa em PLA (figura 32, d) que, por sua vez, é fixada em um pedaço de velcro rebitado direto nos furos laterais da base da órtese.

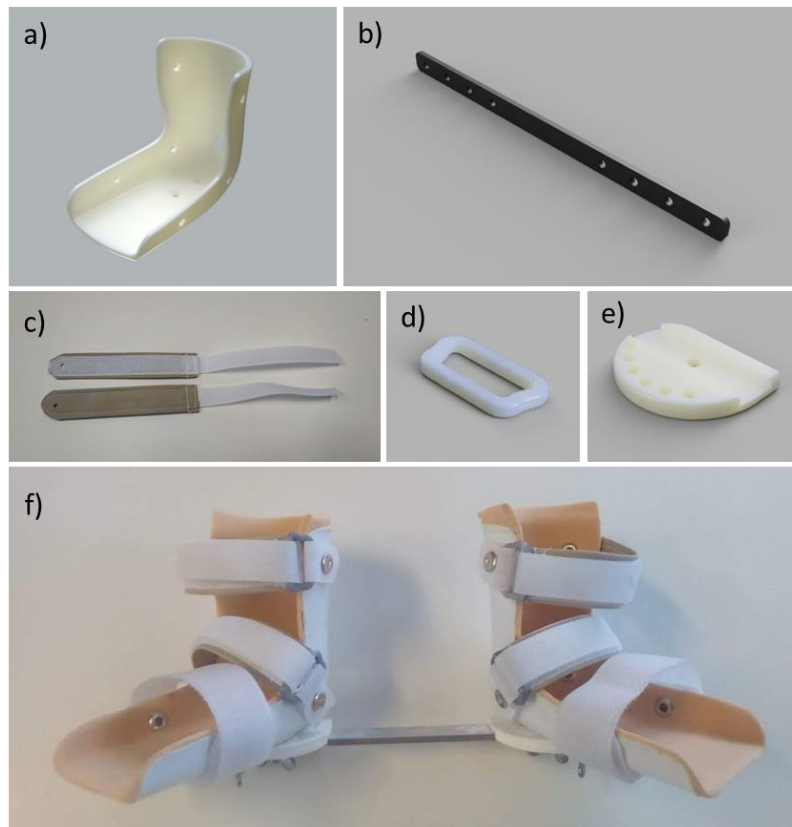
A interface entre o usuário e a base da órtese é dada pelo forro, o qual é colocado diretamente na sua superfície interna. Para isso, o material escolhido foi o EVA pela disponibilidade e pelo fato de ser vastamente utilizado pela indústria como material de palmilha de tênis.

O regulador, visto na figura 32 (e), tem como função ajustar o ângulo entre o eixo horizontal da barra e do tornozelo. Assim, o componente é fixado entre a barra e a base da órtese por meio de parafusos. Por conseguinte, a peça apresentou boa resistência e função quando fabricada por manufatura aditiva com PLA.

A órtese completa pode ser vista na figura 32 (f). A órtese da foto foi construída, com exceção dos fixadores, alça, barra e forro, por meio de manufatura aditiva.

A órtese e o roteiro de fabricação estão disponibilizados no formato livre pela licença GNU *General Public License* v3 (FREE SOFTWARE FOUNDATION, 2007) e pode ser utilizada e melhorada gratuitamente por qualquer pessoa que queira fabricar sua própria órtese de Denis-Browne desde que mantenha o código livre.

FIGURA 32 – COMPONENTES DA ÓRTESE



FONTE: DO AUTOR

3.2. FABRICAÇÃO DA BASE DA ÓRTESE

3.2.1. MANUFATURA ADITIVA

Para este processo serão abordados o processo construtivo de órteses por impressão 3D via extrusão de filamento. Primeiramente, tem-se uma visão geral de como o procedimento experimental foi planejado, seguido pelo processo construtivo e o pós-processamento das bases impressas.

3.2.1.1. PLANEJAMENTO DO PROCESSO

O processo foi adaptado de Volpato (2017), e consistiu em 4 etapas principais: planejamento, calibração e parâmetros de impressão, fabricação e acabamento.

FIGURA 33 - ROTEIRO DE TESTE PARA TERMOFORMAGEM



FONTE: DO AUTOR

O intuito da etapa do planejamento é listar os testes realizados e selecionar quais materiais e ferramentas foram utilizados. Além disso, buscou-se verificar qual orientação de impressão resulta na maior resistência mecânica à peça final, como a necessidade de suporte em cada caso de impressão.

Na etapa de calibração, buscou-se definir ótimos parâmetros de impressão para obter uma peça que não tenha defeitos de manufatura, com bom acabamento e boa resistência.

Para a fabricação, buscou-se mostrar o processo de fabricação da base da órtese, tanto para PLA, como ABS nas orientações consideradas. Este envolveu a conversão da geometria ao formato STL, definição de parâmetros de suporte e estruturais, seguido pela conversão desse para um GCODE e, efetivamente, a impressão da peça. Após a fabricação, adotou-se, de acordo com o material de processamento, métodos diferentes de acabamento.

Na Tabela 8, são encontrados os materiais utilizados, bem como as especificações dos rolos de filamento.

TABELA 8 - MATERIAIS UTILIZADOS PARA IMPRESSÃO 3D

Material	Marca	Especificação
PLA	Material3D	Espessura 1,75mm/1kg
ABS	Material3D	Espessura 1,75mm/1kg

FONTE: DO AUTOR

A impressora 3D utilizada para o trabalho foi da Creality modelo Ender-3, cujo dados técnicos encontram-se compilados na Tabela 9.

TABELA 9 - DADOS TÉCNICOS DA IMPRESSORA 3D

Parâmetro	Valor
Marca/Modelo	Creality Ender-3
Área útil de impressão	220x220x250 mm
Potência Máxima	360 W
Potência na Impressão	120 W
Diâmetro do Filamento	1,75 mm
Resolução	0,05 mm
Diâmetro do Bico	0,4 mm

FONTE: CREALITY, 2019

FIGURA 34 - IMPRESSORA 3D UTILIZADA PARA O TRABALHO



FONTE: DO AUTOR

A fim de se verificar a influência do material e orientação na resistência da peça, optou-se por comparar quatro bases diferentes em material e/ou orientação, como visto na Tabela 10.

TABELA 10 - MATERIAIS UTILIZADOS PARA IMPRESSÃO 3D

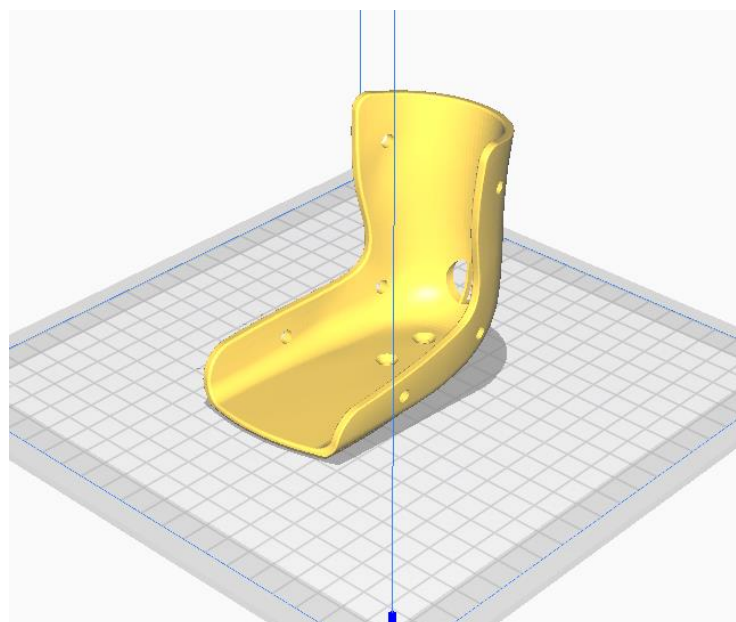
Material	Orientação
PLA	Vertical
PLA	Horizontal
ABS	Vertical
ABS	Horizontal

FONTE: DO AUTOR

Como também, optou-se por duas orientações diferentes com base no descrito por Redwood (2019). A orientação é de suma importância para a garantia de resistência mecânica da peça. Peças impressas com a direção de impressão das camadas, coincidindo com a direção do carregamento em uso, apresentando bem menos resistências que as impressas em direção perpendicular.

Chama-se de peças com orientação vertical, as bases impressas em uma peça só, com a base fixa na mesa impressão, como visto na Figura 35. Pela natureza do processo, nesta orientação há menor resistência mecânica no apoio do calcanhar. Todavia, a impressão é mais rápida e não é necessária nenhuma etapa extra de colagem.

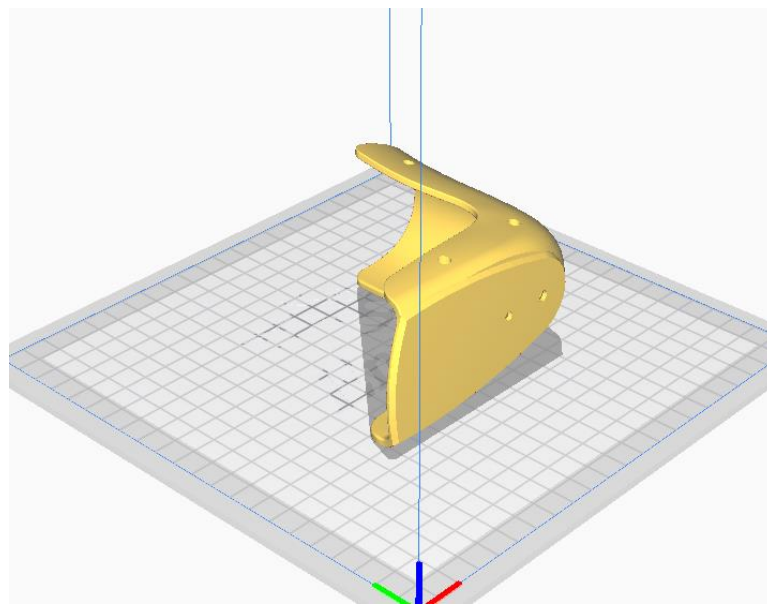
FIGURA 35 - BASE DA ÓRTESE IMPRESSA NA ORIENTAÇÃO VERTICAL



FONTE: DO AUTOR

Para testar a influência, optou-se pela impressão também na orientação horizontal (Figura 36), isto é, com a premissa que a tensão não atuaria com cisalhamento entre camadas no apoio do calcanhar, embora comprometendo a resistência na mesma direção da impressão. Essa orientação, teoricamente, aumenta a resistência mecânica nos locais tipicamente frágeis da órtese, a custo de maior consumo de material, tempo de impressão e para retirada de suporte.

FIGURA 36 - BASE DA ÓRTESE NA ORIENTAÇÃO HORIZONTAL



FONTE: DO AUTOR

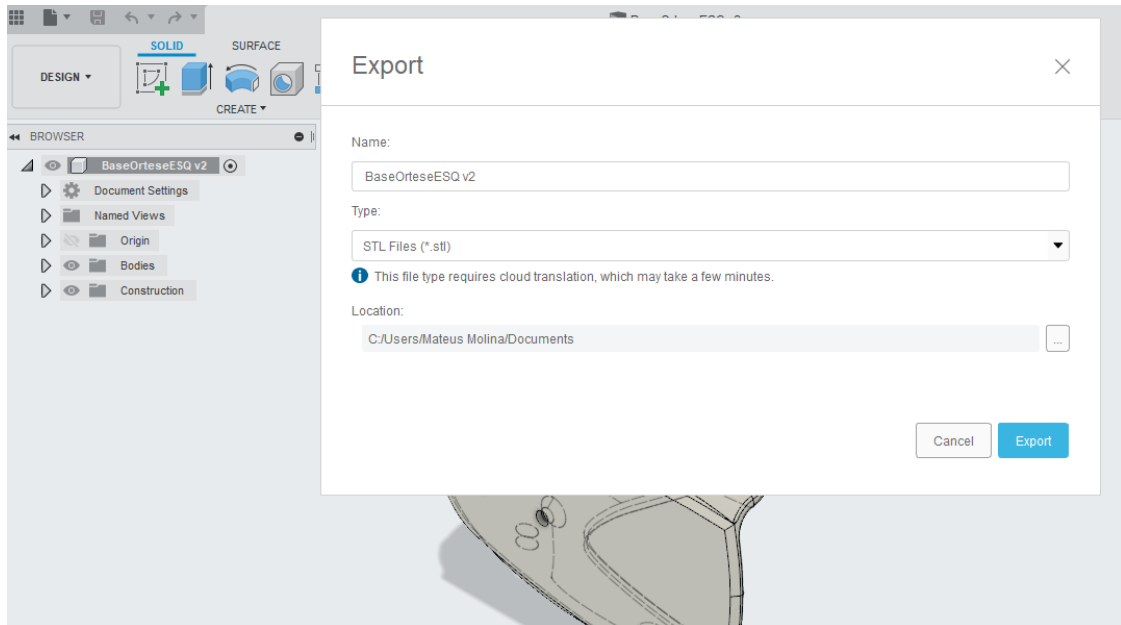
3.2.1.2. ROTEIRO DE FABRICAÇÃO DA BASE DA ÓRTESE

As impressoras 3D trabalham com um arquivo no formato GCODE, o qual armazena informações de coordenadas e parâmetros de impressão ao longo do processo de impressão. A obtenção desse arquivo se dá, comumente, por meio de um *software Slicer*, o qual é capaz de converter um arquivo STL (do inglês *stereolithography*) em um formato interpretável pela impressora.

O arquivo STL pode ser gerado por um modelo e software CAD dotado de função de exportação para STL. Como esclarecido no capítulo 3.1.3, a geometria da base da órtese foi modelada com o software Autodesk Fusion 360 e o mesmo software

foi utilizado para exportar o arquivo para STL, por meio da operação “Export...”, disponível dentro do menu “File”, como mostrado na Figura 37.

FIGURA 37 - CAIXA DE DIÁLOGO PARA EXPORTAÇÃO DO ARQUIVO PARA STL



FONTE: DO AUTOR

Com o arquivo gerado, utilizou-se do *software* Ultimaker Cura 4.3 (ULTIMAKER, 2019), um *Slicer open-source* amplamente utilizado. O *software* trabalha com diferentes parâmetros de impressão, os quais devem ser ajustados de acordo com o modelo, necessidade e impressora do usuário para obtenção de um resultado ótimo.

Para cada conjunto material e orientação, utilizou-se um conjunto diferente de parâmetros, como listados na Tabela 11. Estes parâmetros foram obtidos por meio de testes anteriores e foram considerados ótimos para a continuação do trabalho. A orientação é expressa por “V” como vertical e “H”, horizontal.

TABELA 11 - PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Cat.	Parâmetro	PLA		ABS		Uni.
		V	H	V	H	
Geral	Velocidade de Impressão	50	50	50	50	mm/s
	Temperatura do bico	200	200	235	235	°C
	Temperatura da mesa	55	55	110	110	°C
	Velocidade de Retração	50	50	50	50	mm/s
	Distância de Retração	2,0	2,0	2,0	2,0	mm
	Espessura da camada	0,20	0,20	0,20	0,20	mm
	Camadas na base	3	3	3	3	-
	Camadas no topo	3	3	3	3	-
	Camadas na parede	3	3	3	3	-
Infill	Preenchimento	20	20	20	20	%
	Geometria do Preenchimento	Cross				-
	Ângulo de <i>Overhang</i>	45	45	45	45	°
Suporte	Densidade do Suporte	-	15	-	15	%
	Distância z da interface	-	0,2	-	0,2	mm
	Densidade da Interface	-	85	-	85	%

FONTE: DO AUTOR

Com o sistema CAM devidamente configurado, a funcionalidade “*Slice*” foi utilizada, a qual converte o modelo 3D em uma série de comandos no formato GCODE. Os arquivos foram então salvos em um cartão MicroSD. O cartão foi, então, inserido na impressora para realizar a impressão.

O processo de impressão foi bem-sucedido para cada um dos arquivos, o que resultou em peças, quando necessário, com suporte de fácil remoção e bom acabamento superficial, desconsiderando a distinção entre camadas da impressão 3D por extrusão de filamento. Na Figura 38, são mostradas as bases impressas em PLA na orientação vertical e horizontal (à direita) recém retiradas da plataforma.

FIGURA 38 – BASES EM PLA NA ORIENTAÇÃO VERTICAL E HORIZONTAL (À DIREITA)



FONTE: DO AUTOR

As bases impressas horizontalmente demoraram e consumiram mais que o dobro relativo às bases impressas verticalmente, isso devido ao uso de suportes para a correta impressão.

3.2.1.3. ACABAMENTO

Após a impressão e remoção dos suportes das peças impressas, obtém-se, em geral, uma superfície com camadas visíveis e com baixa qualidade nos locais onde foi necessário suporte, efeito esse mais aparente nas bases impressas na orientação horizontal. Desse modo, o acabamento é uma etapa importante para melhorar a qualidade da superfície e diminuir a anisotropia, melhorando a resistência da peça. (ARMSTRONG, 2019)

Segundo Armstrong (2019), pode-se melhorar a superfície de uma peça impressa com PLA por meio de um sucessivo lixamento da superfície, com lixas de granulometria cada vez maior. As bases impressas em PLA horizontal foram lixadas com lixas de granulometria 220, 400, 600, 1000 e 2000, tomando-se cuidado para lixar em movimentos circulares e sem rapidez para não se gerar muito calor e danificar a superfície.

Para as peças impressas em ABS, optou-se pelo tratamento da superfície com vapor de acetona, à qual o plástico é, de fato, solúvel. O vapor de acetona é muito eficaz em retirar as marcas de camada de peças produzidas com ABS, deixando a peça com um aspecto liso e brilhante.

Para o processo de acabamento, foi utilizado acetona, papel toalha e um recipiente plástico não solúvel em acetona, como visto na Figura 39. Primeiro foram

fixadas folhas de papel toalha nas laterais internas do recipiente plástico, as quais foram, em seguida, embebidas com acetona. A peça, então, foi colocada dentro do recipiente, o qual foi tampado a fim de impedir a saída do vapor de acetona. Foram tomados os devidos cuidados no manejo de instalações com vapor de acetona, sendo usado luva e máscara para a não contaminação do organismo do manuseador.

FIGURA 39 – EQUIPAMENTOS PARA ALISAMENTO SUPERFICIAL COM VAPOR DE ACETONA



FONTE: DO AUTOR

Após, aproximadamente, 15 minutos, verificou-se que a peça estava com bom acabamento, através de inspeção visual. O resultado pode ser visto na Figura 40.

FIGURA 40 – BASE ORIENTAÇÃO VERTICAL EM ABS DEPOIS DO ACABAMENTO



FONTE: DO AUTOR

Comparativamente, o PLA apresentou pior acabamento superficial justamente pela falta de um método fácil e não perigoso de processamento da superfície. O ABS revelou-se de fácil e rápido acabamento, produzindo peças com superfície lisa e com pouca distinção entre camadas.

3.2.2. TERMOFORMAGEM

Para este processo, serão abordados o método construtivo de órteses por termoformagem com a utilização de impressão 3D para a fabricação do molde. Primeiramente, tem-se uma visão geral de como o procedimento experimental foi planejado, seguido pelo processo construtivo do molde impresso e a fabricação da órtese.

3.2.2.1. PLANEJAMENTO DO PROCESSO

O experimento foi dividido em quatro etapas, como visto no diagrama abaixo.

FIGURA 41 - ROTEIRO DE TESTE PARA TERMOFORMAGEM



FONTE: DO AUTOR

Para a etapa de fabricação da base da órtese, utilizou-se, como guia, a apostila prática de termoformagem de Formech International LTD (2019) e dados técnicos do fabricante da termoformadora.

Como especificado na seção 3.1, foram testados os seguintes materiais para confecção das órteses: PP, PE, PS. Dados relativos ao material, espessura e preço, encontram-se resumidos na Tabela 12. Os materiais foram comprados em Curitiba, em lojas de plásticos para engenharia.

TABELA 12 - RESUMO DOS MATERIAIS UTILIZADOS PARA TERMOFORMAGEM

Material	Espessura
PS	2.0 mm
PP	2.0 mm
PE	2.0 mm

FONTE: DO AUTOR

Durante o processo, foram cronometrados o tempo de processamento de cada teste realizado e procurou-se definir padrões de teste para melhorar a repetibilidade do processo.

Para a fabricação, utilizou-se uma termoformadora e uma impressora 3D para a fabricação das órteses e do molde, respectivamente.

O molde foi modelado por meio do *software* CAD (*computer aided design*) e fabricado em uma impressora 3D com o filamento PLA.

Para o processamento da base da órtese, utilizou-se uma termoformadora à vácuo da marca FlockColor, cujo dados técnicos encontram-se compilados na Tabela 13 e sua imagem, na Figura 42.

TABELA 13 - DADOS TÉCNICOS DA TERMOFORMADORA

Parâmetro	Valor
Marca	FlockColor
Modelo	Compacta Média
Área útil de processamento	410x410mm
Altura máxima de moldagem	140mm
Espessura Máxima do Material	2mm
Potência	3000W

FONTE: FLOCKCOLOR, 2019

FIGURA 42 - MÁQUINA TERMOFORMADORA UTILIZADA PARA A FABRICAÇÃO DA ÓRTESE



FONTE: DO AUTOR

A impressora 3D utilizada foi a Creality Ender-3, especificada com maiores detalhes na seção de fabricação na base da órtese via Manufatura Aditiva deste trabalho.

Por fim, foi detalhado o processo de acabamento na base da órtese recém-saída da termoformadora até a peça aparada e em condição final.

3.2.2.2. MODELAGEM E FABRICAÇÃO DO MOLDE

De acordo com Klein (2009), o molde serve como definidor da geometria da peça a ser termoformada e é diretamente responsável por definir o tempo de resfriamento, textura e nível de detalhamento da peça final.

Adotou-se como premissa para o trabalho, a fabricação de um baixo volume de órteses customizáveis e de baixo custo. Sendo assim, optou-se por um material capaz de facilitar o teste de diferentes moldes e permitir a rápida produção deles. O material escolhido foi o PLA, que pode ser facilmente impresso pela maioria das impressoras 3D disponíveis no mercado.

Como pode ser visto na Figura 43, o molde utilizou de respiros para facilitar o fluxo de ar e melhorar a qualidade da moldagem. Além disso, o molde seguiu os valores recomendáveis de ângulo de saída e raio de canto conforme especificado por Klein, 2009.

FIGURA 43 – MOLDE UTILIZADO PRODUZIDO EM PLA



FONTE: DO AUTOR

O molde foi utilizado com materiais como o PE, PP e PS com grande sucesso, sem deformação após o fim do processo e produzindo peças com bom acabamento superficial e nível de detalhes. No entanto, devido à baixa condutividade térmica do material e ausência de controle de temperatura, constatou-se alto tempo de resfriamento, por volta de 10 minutos, para em seguida retirar a peça e produzir uma nova base.

Assim como a órtese, o molde encontra-se disponível de forma livre sob licença GNU v3, sendo assim, permitido acesso livre e modificações à peça original.

3.2.2.3. ROTEIRO DE FABRICAÇÃO DA BASE DA ÓRTESE

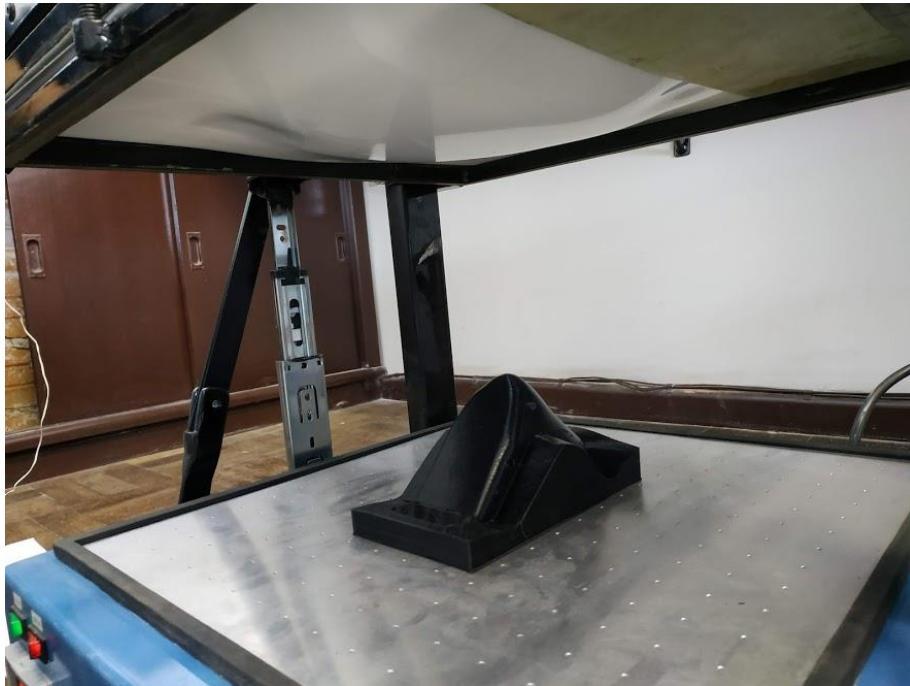
O procedimento experimental de termoformagem foi executado conforme descrito em Formech International LTD (2019).

A chapa de material polimérico foi, primeiramente, comprada em Curitiba e cortada de acordo com a especificação do maquinário. Em testes preliminares, constatou-se que uma espessura mínima de 2,0 mm é necessária para a correta

aplicação. Em testes com PS, de espessura 1,5 mm, verificou-se deformação excessiva, o que é inadequado para uso prolongado.

Em seguida, ajustou-se corretamente a placa na parte de cima da máquina termoformadora e foi colocado o molde na parte de baixo como ilustrado na Figura 44.

FIGURA 44 - PLACA E MOLDE POSICIONADOS NA MÁQUINA TERMOFORMADORA



FONTE: DO AUTOR

A fim de definir uma boa repetibilidade do processo, foi utilizado, inicialmente, um pirômetro para medir a temperatura da chapa plástica ao longo do processamento. Todavia, devido à sensibilidade do dispositivo frente à emissividade do objeto a ser medido e a não conformidade deste para chapas de PP, PE e PS, não se obteve os resultados fiéis à realidade. Dessarte, optou-se pela inspeção visual como método de verificar se a chapa está pronta para ser termoformada. Este método é, muitas vezes, recomendado pela literatura para pequenas escalas. (FORMECH INTERNATIONAL LTD, 2019).

O PP e o PE apresentaram, no aquecimento, um comportamento similar, provando-se facilmente inspecionado o ponto de termoformagem do material. Ao longo do aquecimento, são criadas nervuras ao longo da superfície da chapa, além de começar a “embarrigar”, isto é, deformar em sentido à gravidade. Em seguida, o plástico de cor branca utilizado começa a tornar-se transparente e, quando toda a

superfície em contato com o aquecedor torna transparente e novamente lisa, tem-se o ponto ideal de processamento com base nos experimentos. O processo é ilustrado na Figura 45.

FIGURA 45 - ETAPAS DA TERMOFORMAGEM DO PP E PE



FONTE: DO AUTOR

Esses materiais, em especial o PE, ainda apresentaram alta contração, o que explicita a necessidade de ajustar-se o molde de acordo com a necessidade. Para além disso, o PP mostrou-se pior em aderir o formato do molde, produzindo, relativo aos outros materiais testados, uma base com pior definição de geometria. Com o PS observou-se um comportamento diferente. Apesar deste apresentar, também, “embarrigamento”, não é percebido alteração de cor ou transparência na superfície polimérica. Um bom indicador do ponto correto de termoformagem, foi o comprimento da deformação da chapa medida sentido gravidade da base da chapa até o ponto de maior deformação. Para uma espessura de 2,0 mm da chapa, foi constatado que, quando esse comprimento alcança aproximadamente 30 mm, há boa aderência de

forma no molde e não há defeitos superficiais perceptíveis, como é possível ver o resultado na Figura 46.

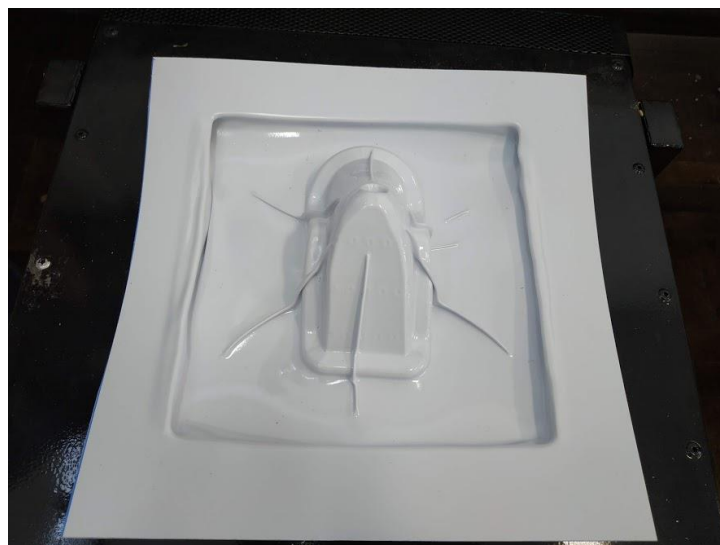
FIGURA 46 - BASE DA ÓRTESE EM PS RECÉM-RETIRADA DA MÁQUINA TERMOFORMADORA



FONTE: DO AUTOR

Ao se termoformar antes do ponto ótimo, ou seja, com pouco “embarrigamento”, não há aderência da chapa à forma do molde. Ao passo que, um comprimento muito superior, é relacionado com pior qualidade superficial e o aparecimento de nervuras ao longo da chapa termoformada, como é possível ver na Figura 47.

FIGURA 47 - BASE DA ÓRTESE FABRICADA COM EXCESSO DE EMBARRIGAMENTO



FONTE: DO AUTOR

Em suma, o PS foi o material que apresentou melhores resultados nos experimentos conduzidos. Foi de fácil percepção o ponto certo de termoformagem e, com isso, apresentou-se boa repetitividade. Assim sendo, o resultado foi uma peça resistente, tenaz e com boa qualidade superficial.

A base da órtese foi extraída da chapa termoformada por meio de um estilete aquecido. Foi feito, em seguida, o acabamento da peça com o uso de uma lima fina, aparando cantos vivos e ajustando as bordas do recorte.

3.2.3. TESTE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

O teste de resistência mecânica teve o propósito de mensurar a máxima força que cada conjunto material-processo é capaz de resistir. Para tanto, utilizou-se de uma máquina universal de ensaio da EMIC, de capacidade de 10tf, disponível no laboratório de materiais da UFPR. As bases das órteses foram posicionadas com o efetuador diretamente acima do calcanhar e apoiada em cima de um tubo quadrado, a fim de padronizar o teste, como visto na Figura 48.

FIGURA 48 – MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIO E POSICIONAMENTO DA ÓRTESE (À DIREITA)



FONTE: DO AUTOR

Foi dado o comando à máquina para que comprimisse a uma velocidade de 20mm/min à base da órtese e gerasse um gráfico de força-deformação de cada teste realizado.

O processo foi repetido, pelo menos, duas vezes para cada combinação processo-material a fim de se assegurar consistência. Para caso de divergência, foi repetido o teste mais uma vez.

Na Figura 49 são vistos os resultados dos testes de resistência para diferentes bases, da esquerda para a direita, ABS impresso na orientação vertical, PLA na orientação horizontal e PS. Nota-se a diferença na fratura entre as orientações nas bases impressas.

FIGURA 49 – IMAGEM DA FRATURA DOS DIFERENTES CONJUNTOS



FONTE: DO AUTOR

3.3. FABRICAÇÃO DOS DEMAIS COMPONENTES

Os demais componentes foram fabricados por meio do uso de impressão 3D e processos convencionais de fabricação como furação e corte.

Para a barra da órtese, foi comprada uma barra de alumínio de 1/8" de espessura, 1/2" de largura e 6m de comprimento. A barra então foi cortada em seções de 220mm de comprimento com uma serra manual. As seções foram, então, furadas de acordo com o desenho técnico por meio de uma furadeira de bancada.

Tanto a argola como o regulador foram impressos em PLA através de uma impressora 3D por extrusão. Através desse processo, foi possível fazer um grande número desses componentes em pouco tempo. A alça foi fabricada utilizando uma máquina de costura, velcro e um pedaço de tecido – para melhorar o conforto do usuário.

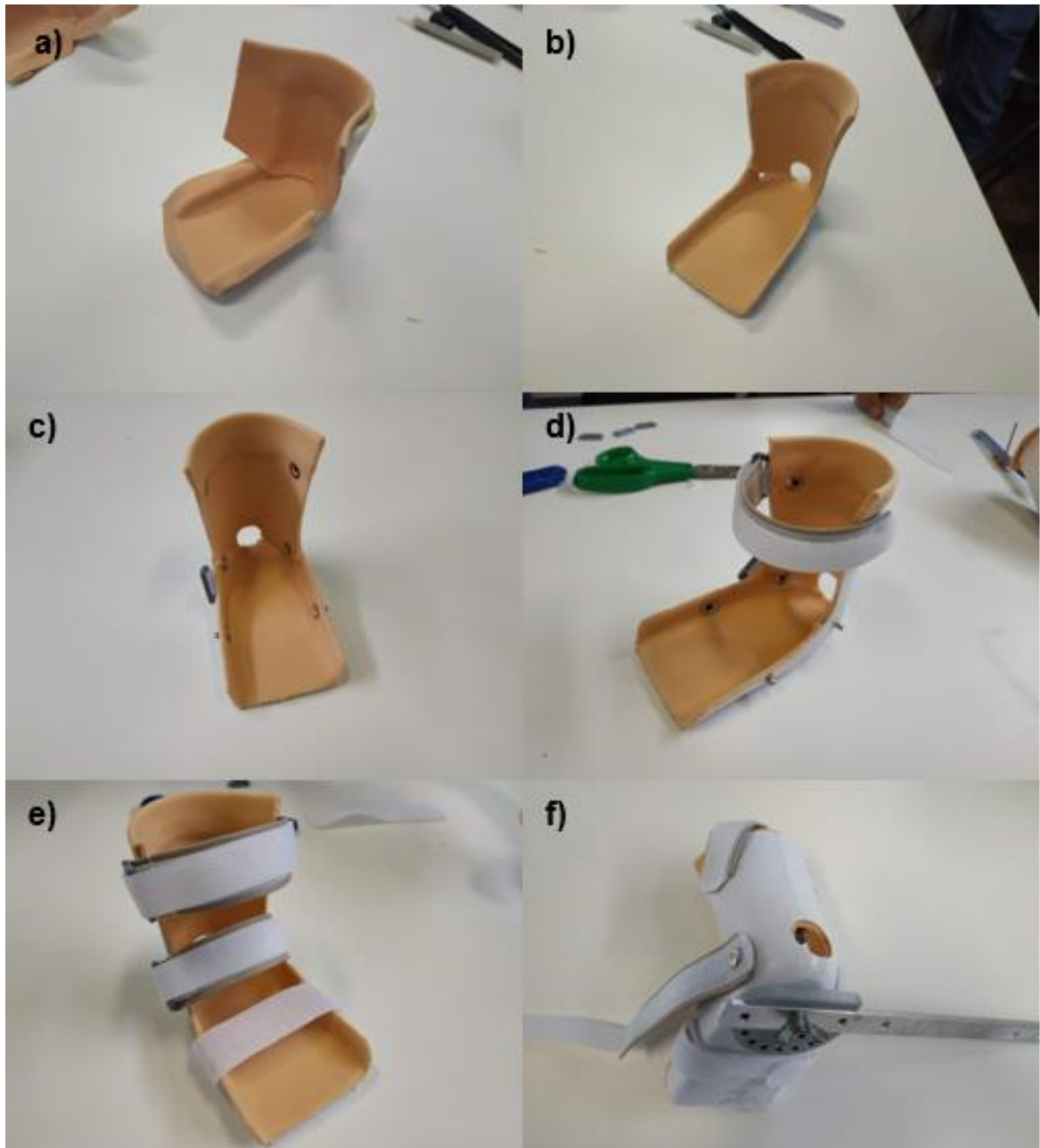
3.4. MONTAGEM DA ÓRTESE

A montagem da órtese é feita rapidamente e requer poucas ferramentas e etapas. Na Figura 50, é visto o processo de montagem da órtese dividido em seis principais etapas.

Na etapa a), o forro recortado de uma placa de EVA é colado com cola de sapateiro na base da órtese. Com a ajuda de um estilete e uma lima fina, são feitos os ajustes e acabamento do conjunto (b). Em seguida são inseridos rebites para fixação das alças (c). Colocam-se os rebites nos buracos já demarcados na geometria da base da órtese, além disso colocam-se as argolas nas alças (d). Com o auxílio de um rebitador manual as alças são afixadas à base da órtese (e).

Na etapa f), são instalados tanto o regulador como a barra através de um parafuso borboleta para fácil regulação posterior.

FIGURA 50 – PROCESSO DE MONTAGEM DA ÓRTESE



FONTE: DO AUTOR

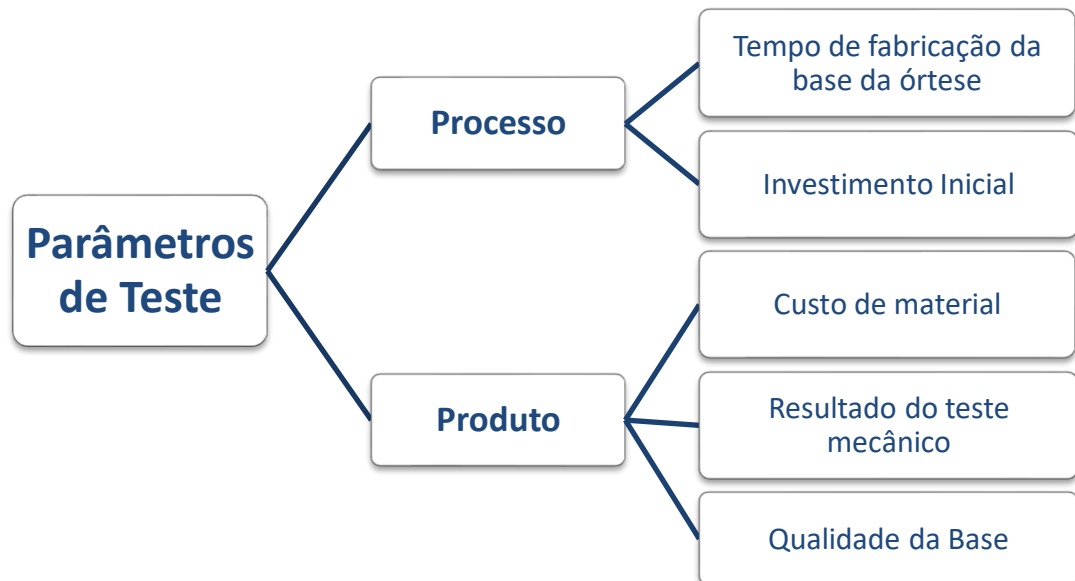
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O objetivo deste capítulo é estabelecer uma comparação numérica entre as combinações processo-material fabricadas em três, de forma a comparar parâmetros de produto e processo em uma matriz de decisão. Serão estabelecidos, separadamente, uma análise do componente 'base da órtese' em 4.1, seguido por uma análise dos resultados dos demais componentes (4.2), custo total de fabricação de uma órtese (4.3) e, por fim, a matriz de decisão em 4.4.

4.1. PARÂMETROS DE TESTE DA BASE DA ÓRTESE

Como delineado no capítulo 3.1.1, as bases das órteses foram avaliadas de acordo com seis parâmetros de testes subdivididos entre parâmetros de processo e de produto, como visto na Figura 51.

FIGURA 51 - PARÂMETROS DE TESTE



FONTE: DO AUTOR

Para facilitar a comparação, a Tabela 14 compila todas as bases das órteses fabricadas e identifica cada uma com um nome curto de fácil menção na coluna "Identificação".

TABELA 14 - RESUMO DAS BASES DAS ÓRTESES TESTADAS

Processo	Material	Especificação	Identificação
Termoformagem	PE	2,0 mm de espessura	TF/PE/2,0
	PP	2,0 mm de espessura	TF/PP/2,0
	PS	2,0 mm de espessura	TF/PS/2,0
Manufatura Aditiva	PLA	Orientação Vertical	3D/PLA/VER
		Orientação Horizontal	3D/PLA/HOR
	ABS	Orientação Vertical	3D/ABS/VER
		Orientação Horizontal	3D/ABS/HOR

FONTE: DO AUTOR

4.1.1. PARÂMETROS DE PRODUTO

4.1.1.1. CUSTO DE MATERIAL

Para as bases termoformadas, na Tabela 15 se vê a lista de materiais necessários para a fabricação, bem como fabricante e custo em R\$ (Reais Brasileiros). Foi adicionada uma coluna, Consumo/base, que diz respeito ao consumo de material por base fabricada.

TABELA 15 - LISTA DE MATERIAIS DAS BASES TERMOFORMADAS

Produto	Especificação	Fabricante	Custo [R\$/m²]	Consumo por base
PS 2,0mm	<ul style="list-style-type: none"> • 2x1m² • 2,0mm de espessura 	ACTOS	55,00	0,11 m²
PE 2,0mm	<ul style="list-style-type: none"> • 2x1m² • 2,0mm de espessura 	PEAGE	41,80	0,11 m²
PP 2,0mm	<ul style="list-style-type: none"> • 2x1m² • 2,0mm de espessura 	PEAGE	46,00	0,11 m²

FONTE: DO AUTOR

Na Tabela 16 se vê, semelhantemente, a lista de materiais para as bases fabricadas por manufatura aditiva

TABELA 16 - LISTA DE MATERIAIS DAS BASES IMPRESSAS

Produto	Especificação	Fabricante	Custo [R\$]	Consumo por base
PLA	Rolo de filamento de 1 kg e diâmetro 1,75mm	BoaImpressão 3D	115	Vertical: 46g Horizontal: 97g
ABS	Rolo de filamento de 1 kg e diâmetro 1,75mm	Slim3D	120	Vertical: 46g Horizontal: 97g

FONTE: DO AUTOR

Com informações de consumo por base e custo do material, o custo do material por base fabricada pode ser computado para cada uma das peças produzidas, como visto na Tabela 17.

TABELA 17 – CUSTO DE MATERIAL DE UMA BASE DE ÓRTESE

Identificação	Custo/base [R\$]
TF/PE/2,0	2,30
TF/PP/2,0	2,53
TF/PS/2,0	3,03
3D/PLA/VER	5,29
3D/PLA/HOR	11,16
3D/ABS/VER	5,52
3D/ABS/HOR	11,64

FONTE: DO AUTOR

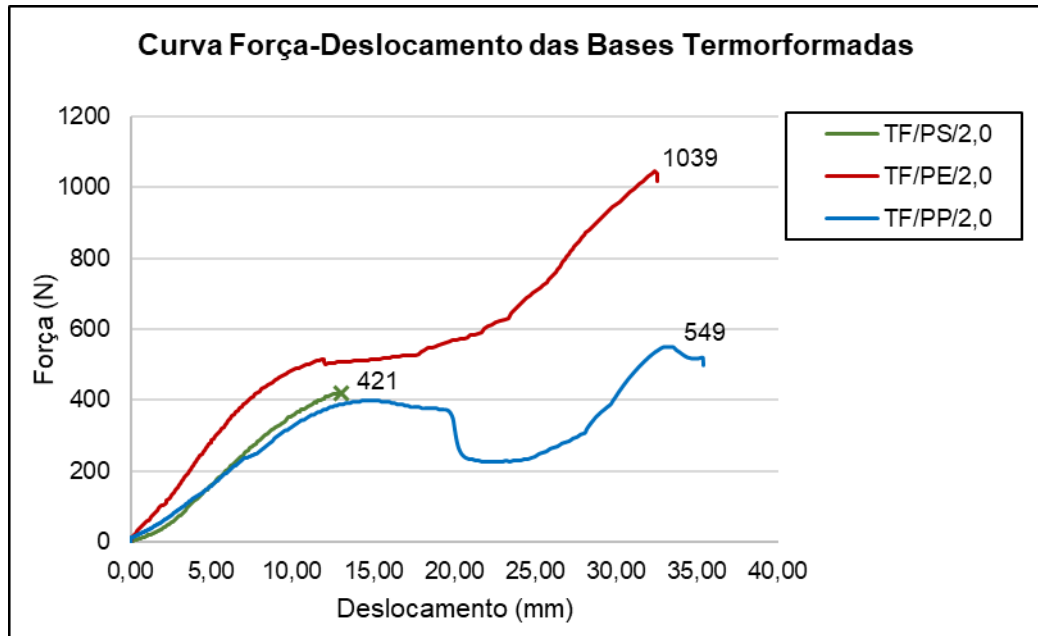
4.1.1.2. RESULTADO DO TESTE MECÂNICO

Nesta seção serão analisados o comportamento quanto à resistência mecânica das bases testadas, sendo avaliada numericamente por meio do limite de ruptura das peças que romperam ou a máxima força aplicada para as peças não rompidas.

As bases termoformadas apresentaram boa tenacidade e conseguiram resistir melhor à força aplicada, dissipando parte da energia na zona de resiliência. Dos materiais testados, apenas o PS rompeu de forma frágil, enquanto as bases de PE e

PP não romperam até o fim de curso programado, como mostrado no gráfico sobre a força aplicada-deslocamento disposta na .

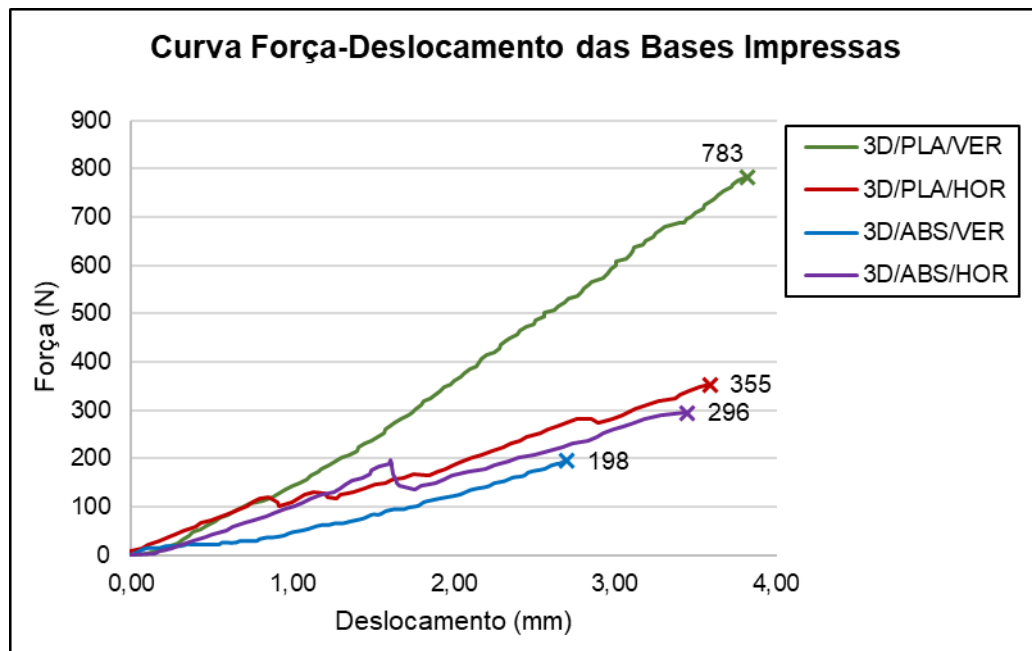
FIGURA 52 – CURVA FORÇA-DESCOLAMENTO DAS BASES TERMOFORMADAS



FONTE: DO AUTOR

Em contrapartida, todas as bases impressas romperam fragilmente com pouca deformação, como observado no gráfico da Figura 54. De maneira não esperada, a base impressa verticalmente com o material PLA resistiu muito melhor ao esforço aplicado, em torno de 783 kg de força aplicada. As outras combinações de orientação e material resistiram menos, se comparadas a todos os outros corpos de prova.

FIGURA 53 - CURVA FORÇA-DESCOLAMENTO DAS BASES IMPRESSAS



FONTE: DO AUTOR

Pode-se perceber a influência da qualidade da impressão no resultado, visto que as bases impressas se mostraram com melhor acabamento e aparente melhor resistência se comparadas com as produzidas com ABS. Isso se deve ao fato de o ABS requerer condições especiais de impressão, tais como maior controle de temperatura, da adesão e do resfriamento do processo. (SIMPLIFY3D, 2019)

As peças impressas apresentaram locais de fratura diferentes, sendo que as impressas verticalmente romperam, como esperado, próximo ao furo de verificação do calcanhar, um claro concentrador de tensão. Já as horizontalmente impressas falharam na sola da base, indicando, possivelmente, real fragilidade na região e/ou uma interferência do aparato e estrutura do teste no resultado. É de interesse notar que, independente da orientação, todas as bases falharam por meio do cisalhamento de uma camada e outra que, como mencionado por Redwood (2019), é o maior ponto fraco de uma peça impressa via extrusão.

Pode-se estabelecer, então, um comparativo entre os corpos de prova como visto na Tabela 18.

TABELA 18 – RESULTADO TESTE MECÂNICO

Identificação	Força Máx. [N]
TF/PE/2,0	1039
TF/PP/2,0	549
TF/PS/2,0	421
3D/PLA/VER	783
3D/PLA/HOR	355
3D/ABS/VER	296
3D/ABS/HOR	198

FONTE: DO AUTOR

4.1.1.3. QUALIDADE DA BASE

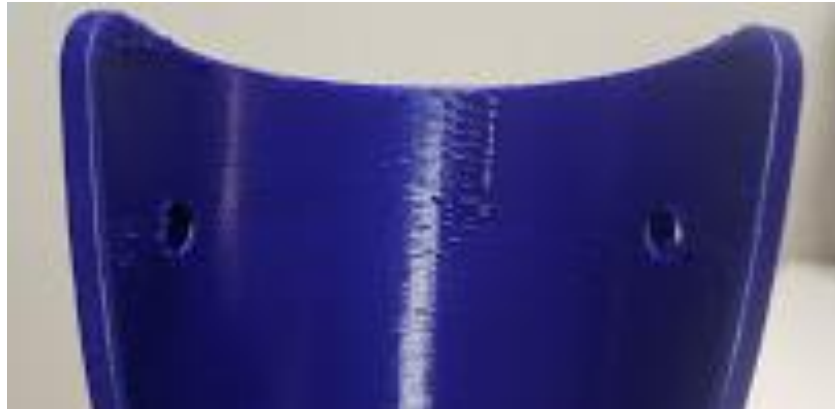
A comparação da qualidade da base dentre as bases fabricadas se dará de forma qualitativa e de forma a determinar se o processo/material produziu uma peça satisfatória. Serão analisadas características como, estabilidade dimensional e qualidade superficial em três níveis: satisfatório, não recomendável e não satisfatório.

O processo de termoformagem resultou em peças com superfície lisa e de boa qualidade. Todavia, a necessidade de acabamento para retirada de rebarbas, muitas vezes, criou uma variável aleatória quanto à qualidade superficial e, até mesmo, resistência à fratura. Além disso, a presença de respiros de auxílio para o vácuo da termoformadora geraram marcas na superfície, indicando necessidade de melhor dimensionamento do molde.

Devido a diferença no coeficiente de retração entre os três materiais termoformados, esses diferiram em estabilidade dimensional: o PS apresentou boa estabilidade, mantendo-se fiel ao molde projetado; O PP apresentou pior definição para o recorte e, ainda, baixa aderência ao molde, abrindo levemente na parte de cima; o PE apresentou o pior desempenho se comparado com os três, apresentando alta contração e sendo necessário ajuste do molde para compensar a retração, o que dificultou o trabalho com o material.

As peças impressas apresentaram qualidade superficial inferior devido às marcas de impressão características do processo (Figura 54), necessitando assim de processos adicionais de acabamento.

FIGURA 54 – DETALHE DAS MARCAS DE IMPRESSÃO DE UMA BASE IMPRESSA COM PLA



FONTE: DO AUTOR

A base ABS impressa verticalmente apresentou, quando utilizado o vapor da acetona, melhorou a qualidade superficial dentre as peças impressas. Quanto à orientação, as peças impressas verticalmente, devido à ausência de suporte, apresentaram melhor qualidade superficial.

Quando corretamente acabadas, geraram, dentre as bases analisadas, peças termofomadas com os melhores resultados de acabamento superficial.

Na Tabela 19 há o resultado de qualidade da base, tomado como o mínimo valor entre qualidade superficial e estabilidade dimensional. As três categorias, SAT, NRE e NSA, são abreviações para a categoria satisfatória, não recomendável e não satisfatória, respectivamente.

TABELA 19 – RESULTADO DA QUALIDADE DA BASE

Identificação	Qualidade Superficial	Estabilidade Dimensional	Qualidade da Base
TF/PE/2,0	SAT	NRE	NRE
TF/PP/2,0	SAT	NRE	NRE
TF/PS/2,0	SAT	SAT	SAT
3D/PLA/VER	SAT	SAT	SAT
3D/PLA/HOR	NRE	SAT	NRE
3D/ABS/VER	SAT	SAT	SAT
3D/ABS/HOR	SAT	SAT	SAT

FONTE: DO AUTOR

4.1.2. PARÂMETROS DE PROCESSO

4.1.2.1. INVESTIMENTO INICIAL

Esta seção será restrita ao maquinário utilizado na confecção das bases e na computação do valor aproximado na compra desses. Ambos os métodos de processamento, manufatura aditiva e termoformagem, utilizaram da impressora 3D para a produção da base. A termoformagem, no entanto, utilizou-a para a produção do molde e, adicionalmente, uma termoformadora para confecção da órtese efetivamente. O custo do maquinário utilizado pode ser visto na Tabela 20. O investimento foi independente do material e dependente apenas do processo de fabricação.

TABELA 20 – MAQUINÁRIO UTILIZADO

Produto	Modelo	Custo
Impressora 3D	Ender 3	R\$ 2200
Termoformadora	FlockColor 410x410	R\$ 5000

FONTE: DO AUTOR

A termoformagem necessitou ainda do molde impresso, o qual demorou em torno de 20 horas para ser produzido e 220 g de filamento PLA, totalizando um custo total de energia e filamento de R\$ 25,70 para confecção. Desse modo, pode-se computar o custo do investimento inicial para cada processo, o qual foi exibido na Tabela 21.

TABELA 21 – INVESTIMENTO INICIAL POR PROCESSO

Identificação	Custo [R\$]
Termoformagem	7226
Impressão 3D	2200

FONTE: DO AUTOR

4.1.2.2. TEMPO DE FABRICAÇÃO E CUSTO DE ENERGIA

Nesta seção serão comparados o tempo de fabricação e o custo de energia para a fabricação de uma base de órtese. Será feito uma lista de processo contendo tempo, ferramenta utilizada e custo de energia para cada método de fabricação.

O custo de energia foi computado com base na potência da máquina utilizada e o preço médio do KWh em Curitiba de R\$ 0,16.

Para as bases termoformadas, constatou-se processo e tempo semelhantes entre todos os materiais. Foi então gerada uma tabela, Tabela 22, que sumariza os processos, ferramentas, tempo e custo de energia do processo.

TABELA 22 - LISTA DE PROCESSOS PARA TERMOFORMAGEM

Processo	Ferramenta	Tempo Total [min]	Custo de Energia [R\$]
Preparar a termoformadora	Termoformadora	6	-
Termoformar a base da órtese	Termoformadora	10	0,08
Retirar a base da órtese e esperar resfriar		10	-
Recortar a base da órtese no formato correto	Estilete aquecido	5	-
Definir furos	Ferro de Solda	5	-
Aparar bordas e cantos vivos	Lima fina	5	-

FONTE: DO AUTOR

Para as bases impressas, parte-se do princípio da impressão da peça com uma impressora já calibrada. Foi dividido em duas tabelas, Tabela 23 e Tabela 24, os processos em específicos para ABS e PLA.

TABELA 23 – LISTA DE PROCESSOS PARA AS BASES IMPRESSAS EM ABS

Processo	Ferramenta	Orientação	Tempo Total [min]	Custo de Energia [R\$]
Impressão da base	Impressora 3D	Vertical	230	0,07
		Horizontal	460	0,14
Acabamento da peça	Vapor de Acetona	Vertical	20	-
		Horizontal	20	-

FONTE: DO AUTOR

TABELA 24 – LISTA DE PROCESSOS PARA AS BASES IMPRESSAS EM PLA

Processo	Ferramenta	Orientação	Tempo Total [min]	Custo de Energia [R\$]
Impressão da base	Impressora 3D	Vertical	230	0,07
		Horizontal	460	0,14
Acabamento da peça	Lixa	Vertical	5	-
		Horizontal	15	-

FONTE: DO AUTOR

Tem-se os valores de tempo de processamento e custo de energia sumarizados para todas as combinações de material e processo na Tabela 25.

TABELA 25 – TEMPO TOTAL DE PROCESSAMENTO E CUSTO DE ENERGIA

Identificação	Tempo Total [min]	Custo de Energia [R\$]
TF/PE/2,0	41	0,08
TF/PP/2,0	41	0,08
TF/PS/2,0	41	0,08
3D/PLA/VER	235	0,07
3D/PLA/HOR	475	0,14
3D/ABS/VER	250	0,07
3D/ABS/HOR	480	0,14

FONTE: DO AUTOR

4.2. DEMAIS COMPONENTES

4.2.1. CUSTO DE MATERIAL

Cada material utilizado na confecção dos demais componentes, foi especificado e cotado de forma a incluir o custo do material não processo e, na última coluna, uma estimativa do custo por órtese manufatura, como visto na Tabela 26.

TABELA 26 – CUSTO DE MATERIAL DOS DEMAIS COMPONENTES

Material	Especificação material não processado	Custo [R\$]	Custo Estimado por Órtese [R\$]
Rebite	100 Unidades de 2,5mm	7	1,20
Tala de Feltro	100x150 mm	11	4,40
Tecido	1 m ²	10	0,20
Barra de Alumínio	<ul style="list-style-type: none"> • 1/8" espessura • 1/2" largura • 6m de comprimento 	18	1,50
EVA	1 m ² , 2mm de espessura	50	0,30
Parafusos Borboleta	Por unidade	0,50	2,00
		Total:	9,60

FONTE: DO AUTOR

4.2.2. TEMPO DE FABRICAÇÃO, MONTAGEM E CUSTO DE ENERGIA

De modo semelhante, definiu-se um roteiro de processamento dos demais componentes, o qual cada etapa foi avaliada em termos de tempo e custo de energia, como visto na Tabela 27. O tempo e o custo total foram computados ao final da tabela.

TABELA 27 – TEMPO E CUSTO DE ENERGIA DOS DEMAIS COMPONENTES

Processo	Ferramenta	Tempo [min]	Custo de Energia [R\$]
Cortar a barra de alumínio no tamanho correto	Serra manual	5	-
Furar a barra de alumínio	Furadeira de bancada 1/2HP	20	0,02
Fabricar o Regulador	Impressora 3D	30	0,01
Cortar Velcros	Tesoura	20	-
Cortar e costurar tecido no velcro	Fio e agulha	30	-
Colar EVA na base da órtese e aparar excesso	Cola de sapateiro	20	-
Rebitar velcros na base da órtese	Rebitador Manual	28	-
Parafusar Regulador na base da órtese	Chave Philips	6	-
Parafusar barra no Regulador	Chave Philips	6	-
		165 min	0,03

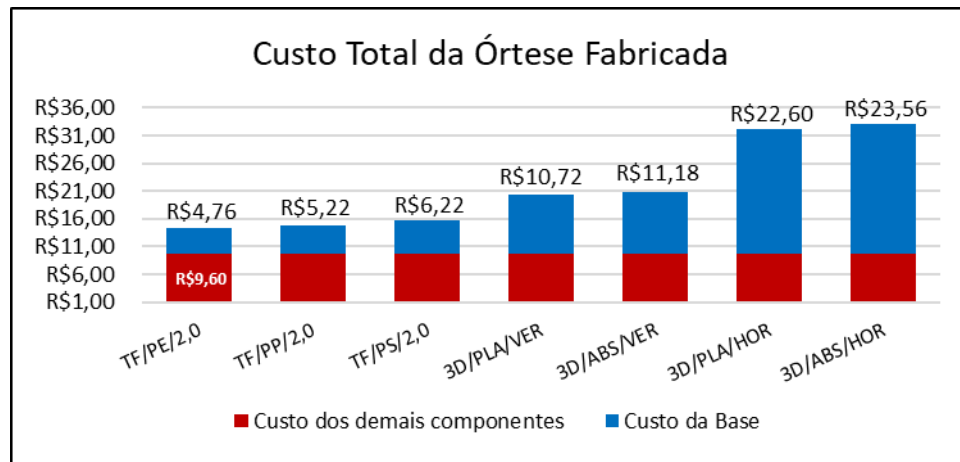
FONTE: DO AUTOR

4.3. CUSTO E TEMPO DE FABRICAÇÃO DE UMA ÓRTESE

Para este trabalho, o tempo e o custo serão considerados separados e serão elementos individuais na matriz de decisão. Faz sentido, logo, computar os totais de custo e tempo de fabricação de uma órtese completa, a qual envolvem a fabricação de duas bases e os demais componentes.

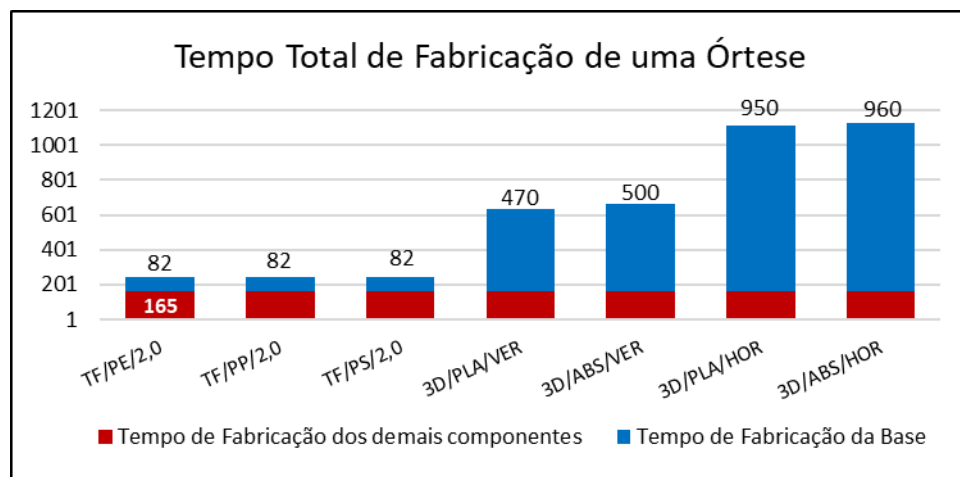
O custo total é calculado por meio da soma do custo de material, Tabela 17 e Tabela 26, e de processamento, Tabela 25 e Tabela 27. Já o tempo total, é calculado com a soma do tempo de processamento dos demais componentes, Tabela 27, com os da base, Tabela 25. Por fim, pode-se gerar um gráfico com os resultados obtidos, como visto na Figura 55 e Figura 56.

FIGURA 55 – GRÁFICO COMPARATIVO DO CUSTO TOTAL



FONTE: DO AUTOR

FIGURA 56 - GRÁFICO COMPARATIVO DO TEMPO TOTAL EM MINUTOS



FONTE: DO AUTOR

4.4. MATRIZ DE DECISÃO

Os resultados obtidos nas seções 4.1, 4.2 e 4.3 foram utilizados para elaboração de uma matriz de decisão (Tabela 28) com base nos parâmetros levantados na Figura 51. Para cada critério, foi dado um peso de 0 a 1, com base na relevância do critério à escolha da combinação processo-material. Além disso, buscou-se avaliar cada ponto numericamente e de forma padronizada, sendo a pontuação 9 arbitrada aos valores mais altos dentro do rol de dados; 6, aos valores intermediários, mas ainda

satisfatórios; 3, aos valores não recomendáveis; e, por fim, 1, aos valores não satisfatórios.

TABELA 28 – MATRIZ DE DECISÃO

	Produto			Processo		
	Custo de Material	Resistência Mecânica	Qualidade	Tempo de Fabricação	Investimento Inicial	
Ident. / Peso	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	Pontos
TF/PS/2,0	9	6	9	9	6	7,8
TF/PE/2,0	9	9	3	9	6	7,2
3D/PLA/VER	6	6	9	6	9	7,2
TF/PP/2,0	9	6	3	9	6	6,6
3D/ABS/VER	6	3	9	6	9	6,6
3D/ABS/HOR	3	1	9	3	9	5,0
3D/PLA/HOR	3	3	3	3	9	4,2

FONTE: DO AUTOR

As combinações processo-material foram colocadas em ordem da pontuação, obtida de forma ponderada. O PS termoformado mostrou-se eficaz em todos os quesitos, enquanto o PE aparece na sequência, em função da dificuldade de obter uma geometria com boa precisão dimensional – dificuldade de processamento. O PLA impresso verticalmente também é uma opção adequada quando não há limitações de tempo de produção, quesito que coloca-o atrás das órteses obtidas por termoformagem.

Da tabela, conclui-se que as bases menos vantajosas foram as fabricadas via impressão 3D na orientação horizontal, condição cuja peça ficou mais resistente no local de fratura comum (próximo ao furo de inspeção de calcanhar) e mais frágil na sola. O compromisso não se mostrou de bom custo-benefício, tanto em termos de consumo de material, como de qualidade e resistência final, necessitando de mais pós-processamento e tempo de fabricação.

Fato é que, para uma análise mais profunda dos materiais em questão, faz-se necessário a otimização da geometria do molde para as bases das órteses termoformadas, bem como a geometria da órtese em si para as bases impressas, já que é o fator decisivo para obtenção de um bom resultado.

Outrossim, para o caso das órteses impressas em ABS, é necessário ajuste fino para impressões bem-sucedidas. Esse fator, com certeza, dificultou a impressão de uma peça que utilizou totalmente o potencial do material e, por fim, contribuiu para a baixa posição deste relativo aos outros materiais.

5. CONCLUSÕES

O trabalho colocou em discussão as vantagens e desvantagens de se manufaturar órteses tanto através da termoformagem, como da manufatura aditiva. Ambos mostraram-se eficazes na produção tanto em termos de custo, como de resistência.

Como escolha de um processo e material para geometria em questão, e nas condições de avaliação utilizadas, o PS fabricado termoformado, com molde impresso em 3D, mostrou-se vantajoso em termos de custo e tempo de fabricação, como também na qualidade e resistência do produto. Assim como o PE e o PP mostraram-se viáveis quando é requerido maior tenacidade e resistência da órtese, como é o caso de órteses para crianças com mais 1 ano. No entanto, deve-se observar a alta retração e fabricação mais complicada para o projeto do molde, como também a seleção da placa do polímero.

Além disso, o processo de manufatura aditiva pode ser aplicado com sucesso na produção de moldes personalizados para termoformagem, como também, em baixa escala, na produção da órtese em si. Dentre as bases impressas, o PLA manifestou-se vantajoso para a geometria em questão, quando impresso de forma vertical. Recomenda-se seu uso quando se produz lote pequeno ou quando for necessário um protótipo de uma peça a ser feita em larga escala. O material nessa orientação, produziu uma peça de boa qualidade, requisitando pouco pós-processamento e demonstrando boa resistência.

A premissa de que a peça romperia de forma rápida ao cisalhar uma camada a outra foi validada tanto na orientação vertical como na horizontal. Como foi definida uma geometria padrão para todas as bases produzidas, é difícil que a peça esteja otimizada para todas as orientações e materiais testados. Ademais, é esperado que existam variações nas características das peças produzidas de acordo com a impressora, filamento utilizado, geometria e parâmetros de impressão.

5.1. Sugestões de trabalhos futuros

Durante a análise e discussão dos resultados, surgiram alguns questionamentos que não puderam ser resolvidos neste trabalho, mas que serviram para apontar sugestões na continuidade dos estudos. Estas sugestões são listadas na sequência:

- Projeto e simulação de uma geometria escalável para o tratamento de PTC;
- Definição de parâmetros otimizados de impressão em PLA, ABS e PETg, de geometrias com suporte e com requisitos de resistência mecânica;
- Projeto e simulação de um molde para termoformagem no tratamento de PTC;
- Projeto de uma bancada de testes para órteses de PTC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARMSTRONG, C. Post processing for FDM printed parts. **3DHubs**, 2019. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts>>. Acesso em: 7 Novembro 2019.

ASSOCIAÇÃO PRIMEIRO PASSO. Início. **SOBRE O TRATAMENTO:** Aos pais de crianças nascidas com pé torto, 2017. Disponível em: <<https://associacaoprimeiropasso.wordpress.com/>>. Acesso em: 5 Outubro 2019.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais, Uma Introdução**. 8a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CASTRO, M. L. S. D. et al. Frequência das malformações múltiplas em recém-nascidos na Cidade de Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil, e fatores sócio-demográficos associados. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, Maio 2006.

CHANDA, M.; ROY, S. K. **Plastics Fabrication and Recycling**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007.

CRAWFORD, R. J. **Plastics Engineering**. 3rd. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.

CREALITY. Creality Ender-3 PRO. **Creality**, 2019. Disponível em: <<https://creality.com/creality-ender-3-pro-3d-printer-p00251p1.html>>. Acesso em: 2 nov. 2019.

DOBBS, M. et al. TREATMENT OF IDIOPATHIC CLUBFOOT: AN HISTORICAL REVIEW. **The Iowa Orthopaedic Journal**, Iowa City, v. 20.

ENGINEERING TOOLBOX. Heat Capacity of common Substances. **Engineering ToolBox**, 2003. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html>. Acesso em: 18 Setembro 2019.

FLOCKCOLOR. Vacuum Forming 41x41. **FlockColor**, 2019. Disponível em: <<http://www.flockcolor.com.br/vacuum-forming-40x40>>. Acesso em: 24 out. 2019.

FORMECH INTERNATIONAL LTD. **A Vacuum Forming Guide**. Harpenden, UK: [s.n.], 2019. Disponível em: <<http://formech.com>>.

FREE SOFTWARE FOUNDATION. GNU GENERAL PUBLIC LICENSE. **GNU**, 2007. Disponível em: <<https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0-standalone.html>>.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. 2ª. ed. Nova Iorque: Springer, 2015.

GLOBAL Clubfoot Initiative, 2019. Disponível em: <<https://globalclubfoot.com/clubfoot/>>. Acesso em: 18 Junho 2019.

HAUSMAN, K. K.; HORNE, R. **3D printing for dummies**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.

HENSEN, J. C. D. D. S. F. **DESENVOLVIMENTO DE UM PROCEDIMENTO PARA A FABRICAÇÃO DE ÓRTESES NÃO ARTICULADAS DE TORNOZELO E PÉ POR MANUFATURA ADITIVA**. Curitiba: UTFPR, 2019.

ISO/ASTM. **ISO/ASTM 52900**: 2015: Additive manufacturing - General principles - Terminology. 1ª. ed. Vernier: ISO/ASTM International, 2015.

KLEIN, P. W. **Fundamentals of Plastics Thermoforming**. Williston, EUA: Morgan & Claypool Publishers, 2009.

LARA, L. C. R. et al. Tratamento do pé torto congênito idiopático pelo método de Ponseti: 10 anos de experiência. **Revista Brasileira de Ortopedia**, São Paulo - SP, Janeiro 2013.

LEITE, W. D. O. et al. Vacuum Thermoforming Process: An Approach to Modeling and Optimization Using Artificial Neural Networks. **MDPI**, Belo Horizonte, v. 10, n. 2, Fevereiro 2018.

LIU, F. W. **Rapid Prototyping and Engineering Applications: a Toolbox for Prototype Development**. Boca Raton - FL: CRC Press, 2008.

LIU, X.-C. et al. Newly Designed Foot Orthosis for Children with Residual Clubfoot After Ponseti Casting. **JPO - Journal of Prosthetics and Orthotics**, Janeiro 2014.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros**. 2ª. ed. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda., 1999.

MIETTI, M. A.; VENDRAMETO, O. Uso de Prototipagem Rápida como Fator de Competitividade. **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 2000.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Confecção e manutenção de órteses, próteses e meios auxiliares de locomoção. 1. ed. Brasília - DF: [s.n.], 2013.

MUNDO EDUCAÇÃO. Polímero Baquelite. **Mundo Educação**, 2019. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/polimero-baquelite.htm>>. Acesso em: 7 Agosto 2019.

NORDQVIST, C. Everything you need to know about clubfoot. **MedicalNewsToday**, 22 Janeiro 2018. Disponível em: <<https://www.medicalnewstoday.com/articles/183991.php>>. Acesso em: 2 Agosto 2019.

OCEAN LEGACY FOUNDATION. FAQ - PLASTIC TO FUEL CONVERSION. **Ocean Legacy Foundation**, 2019. Disponível em: <<https://oceanlegacy.ca/faq-plastic-to-fuel/>>. Acesso em: 03 set. 2019.

OMNEXUS. Polyethylene - Plastic. **Omnexus - The Material Selection Platform**, 2019. Disponível em: <<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-plastic>>. Acesso em: 02 set. 2019.

PELLEGRINO, L. Pé Torto Congênito. **Dr. Luiz Pellegrino**, 2016. Disponível em: <<https://drluizpellegrino.com.br/2016/11/07/pe-torto-congenito/>>. Acesso em: 8 Outubro 2019.

REDWOOD, B. How does part orientation affect a 3D Print? **3DHubs**, 2019. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-does-part-orientation-affect-3d-print/>>. Acesso em: 24 out. 2019.

ROGERS, T. Everything You Need to Know About ABS Plastic. **Creative Mechanisms**, 2015. Disponível em: <<https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-abs-plastic>>. Acesso em: 5 Setembro 2019.

ROGERS, T. Everything You Need To Know About Polylactic Acid (PLA). **Creative Mechanisms**, 2015. Disponível em: <<https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-poly-lactic-acid-pla-prototypes>>. Acesso em: 5 Setembro 2019.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma Referência para a Melhoria do Processo**. 1ª. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2006.

SAVONEN, B. et al. Open-source 3-D Printable Infant Clubfoot Brace. **Journal of Prosthetics and Orthotics**, 2019.

SIMPLIFY3D. ABS. **Simplify3D**, 2019. Disponível em: <<https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/abs/>>. Acesso em: 2 nov. 2019.

SINKHACKS. Building Acetone Vapor Bath Smoothing 3D Printed Parts. **Sinkhacks**, 2019. Disponível em: <<http://sinkhacks.com/building-acetone-vapor-bath-smoothing-3d-printed-parts/>>. Acesso em: 6 ago. 2019.

ULTIMAKER. Ultimaker Cura. **Ultimaker**, 2019. Disponível em: <<https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>>. Acesso em: 10 Outubro 2019.

VASCONCELOS, E. **Órtese – Histórico e Introdução**. Sobral - CE: Instituto Superior de Teologia Aplicada, 2014.

VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva: Tecnologia e aplicações da impressão 3D**. 1ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2017.

WYPYCH, G. **Handbook of Polymers**. Toronto, Canada: ChemTec Publishing, 2012.

ZHAO, D. et al. **Relapse of Clubfoot after Treatment with the Ponseti Method and the Function of the Foot Abduction Orthosis**. Department of Pediatric Orthopaedics, Xin-Hua Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine. Shanghai, China. 2014.