

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA
MECATRÔNICA

LUCAS GAIO

CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS
DE USINAGEM CNC PARA PEÇAS DE
ESPUMAS DE POLIURETANO

Florianópolis, 2019

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS DEPARTAMENTO ACADEMICO DE
METAL MECÂNICA CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA
MECATRÔNICA**

LUCAS GAIO

**CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE USINAGEM CNC PARA
PEÇAS DE ESPUMAS DE POLIURETANO**

Trabalho de conclusão de curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Professor orientador: Raimundo Ricardo
Matos da Cunha, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2019.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Gaio, Lucas

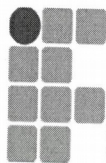
CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE USINAGEM CNC PARA
PEÇAS DE ESPUMAS DE POLIURETANO / Lucas Gaio ; orientação de
Raimundo Ricardo Matos da Cunha. - Florianópolis,
SC, 2019.

55 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.

Inclui Referências.

1. Parâmetros de usinagem. 2. Espumas de poliuretano.
3. Usinagem CNC. 4. Fresamento. I. Matos da Cunha,
Raimundo Ricardo . II. Instituto Federal de Santa Catarina.
Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. III.
Título.



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o estudante **Lucas Gaio**, matrícula nº 1610062787, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado ***Caracterização de Parâmetros para Usinagem CNC de Peças e Espuma de Poliuretano***, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 10 de Fevereiro de 2020.

Raimundo Ricardo Matos da Cunha.

Prof. Orientador do TCC: Raimundo Ricardo Matos da Cunha

CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE USINAGEM CNC PARA PEÇAS DE ESPUMAS DE POLIURETANO

LUCAS GAIO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis 12 de dezembro, 2019

Banca Examinadora:

Raimundo Ricardo Matos da Cunha, Dr. Eng. (Orientador)

Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr. Eng.

Francisco Rafael Moreira Mota, Dr. Eng.

Eduardo Yuji Sakurada, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder os dias e a força para a busca de minhas realizações.

Aos meus pais, Eliane e Jaime, por todo apoio, amor e carinho dados durante essa jornada.

À Stefanny Richard Krieger; por todo o carinho, paciência e incentivo para a realização dessa conquista, e de muitas outras que virão.

Aos professores do Instituto Federal de Santa Catarina, por todo o conhecimento e orientações repassados; em especial ao meu orientador Dr. Raimundo Ricardo Matos da Cunha, por toda a paciência e ensinamento transmitido nesse período de orientação.

Aos meus amigos; pelo apoio, compreensão e paciência nos momentos de ausência.

E a todos que de alguma maneira contribuíram para a conclusão deste trabalho.

MUITO OBRIGADO!

*“A própria luta em direção às alturas é
suficiente para preencher o coração de um
homem.”*

Albert Camus

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o estudo de parâmetros ótimos para a realização de usinagem em espumas de poliuretano de densidades D33 e D45, como sendo as mais indicadas na fabricação de assentos adaptáveis às cadeiras de rodas comerciais. A metodologia de trabalho consistiu na variação individual dos parâmetros de usinagem, a saber: velocidade de avanço (V_f), profundidade de corte (a_p), velocidade de rotação da ferramenta (n) e estratégias de usinagem. Inicialmente, após a realização dos primeiros ensaios, foram testados e avaliados os resultados das usinagens das peças, quanto ao acabamento superficial e à forma geométrica das peças. O comportamento da usinagem de espumas também foi observado, e algumas conclusões estão comentadas nesse trabalho. Na sequência, foram realizados novos ensaios combinando-se os parâmetros de usinagem que apresentaram os melhores resultados. O objetivo era obter uma combinação ótima de parâmetros de usinagem, levando-se em consideração o acabamento superficial, uma maior taxa de retirada de material e redução no tempo de usinagem das peças. Todos os resultados estão descritos e comentados no trabalho.

Palavras-chave: Parâmetros de usinagem. Espumas de poliuretano. Fresamento. Usinagem CNC.

ABSTRACT

This final report presents the study of optimal parameters for machining of D33 and D45 density polyurethane foams, as being the most suitable for the manufacture of commercial wheelchair adaptable seats. The work methodology consisted individual variation of the machining parameters, as follows: feed rate (V_f), cutting depth (a_p), tool rotation speed (n) and machining strategies. Initially, after performing the first tests, the results of the machining parts were tested and evaluated for surface finish and geometric shape. The behavior of foam machining was also observed, and some conclusions are commented in this work. After that, new tests were performed combining the machining parameters that presented the best results. The goal was to achieve an optimal combination of machining parameters, taking into account surface finish, a higher material removal rate and a reduction in part machining time. All results are described and commented.

Keywords: Machining parameters. Polyurethane foams. Milling. Machining CNC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Assento fabricado pela FCEE.....	14
Figura 2 - Distribuição de pressão para diferentes tipos de assento.....	18
Figura 3 - Fresamento frontal.....	19
Figura 4 - Tipos de Fresamento: Tangencial (a), Frontal (b).....	20
Figura 5 - Tipo de fresamento.....	21
Figura 6 - Usinagem concordante (a) e discordante (b) da espuma D50 e seus respectivos cavacos (c) e (d).....	22
Figura 7- Profundidade de corte (ap), penetração de trabalho (ae) e penetração de avanço (af) no fresamento frontal.....	24
Figura 8 - Diâmetro efetivo de corte em uma superfície plana.....	25
Figura 9 - Mapa de seleção de rotações e avanços para espumas de poliuretano...	27
Figura 10 - Máquina Jaraguá CNC – J/A-CNC12081-CP.....	30
Figura 11 - Aparato para o corte da espuma, por meio de fio aquecido.....	31
Figura 12 - Blocos de espumas após o corte a fio.....	31
Figura 13 - Preparação das espumas para ensaios.....	32
Figura 14- Fresa utilizada para os primeiros ensaios.....	33
Figura 15 - Código G utilizado nos primeiros ensaios utilizado.....	33
Figura 16 - Resultado dos ensaios de velocidade de avanço (Vf).....	34
Figura 17 - Cavacos gerados no ensaio do parâmetro de avanço (Vf).....	34
Figura 18- Resultado do ensaio velocidade de rotação da ferramenta (n).....	36
Figura 19 - Resultados do ensaio de profundidade de corte (ap).....	37
Figura 20 - Modelos de superfície com protuberância esférica cavidade desenvolvidos para os ensaios.....	38
Figura 21 - Preparação do software para a programação das trajetórias.....	39

Figura 22 - Estratégias de usinagem Paralela (a), Equidistante (b).....	40
Figura 23 - Trajetórias de desbastes geradas para o ensaio.....	41
Figura 24 - Simulação de usinagem operação de acabamento plano.....	42
Figura 25 - Trajetórias da ferramenta em operação de acabamentos.....	43
Figura 26 - Ensaio de acabamento com trajetória plana e ferramenta de topo reto. .	43
Figura 27- Trajetórias com estratégia helicoidal.....	45
Figura 28- Modelo do assento utilizado para execução do protótipo.....	46
Figura 29- Passos para obtenção da peça de espuma usinada.....	47
Figura 30- Detalhe do acabamento para as duas espumas D33 e D45.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAD – Computer-Aided Design

CAM – Computer-Aided Manufacturing

CNC – Comando Numérico Computadorizado

FCEE – Fundação Catarinense de Educação Especial

GDMAES – Grupo de Desenvolvimento de Máquinas Automáticas Especiais

PCD – Pessoa com Deficiência

PU – Poliuretano

INER - Instituto Nacional de Estudo do Repouso

NBR – Norma Brasileira Registrada

TA – Tecnologia Assistiva

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo principal.....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
3.1 Tecnologia assistiva (TA).....	17
3.2 Usinagem.....	18
3.3 Ferramentas.....	19
3.4 Fresamento.....	20
3.5 Usinagem CNC.....	25
3.6 Usinagem de espumas de poliuretano	26
3.7 Sistemas CAD e CAM.....	28
4 METODOLOGIA.....	29
4.1 Ensaios de parâmetros.....	29
4.1.1. Ensaio de desbaste.....	39
4.1.2. Ensaio dos acabamentos.....	42
4.2 Execução de protótipos.....	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
REFERÊNCIAS.....	51

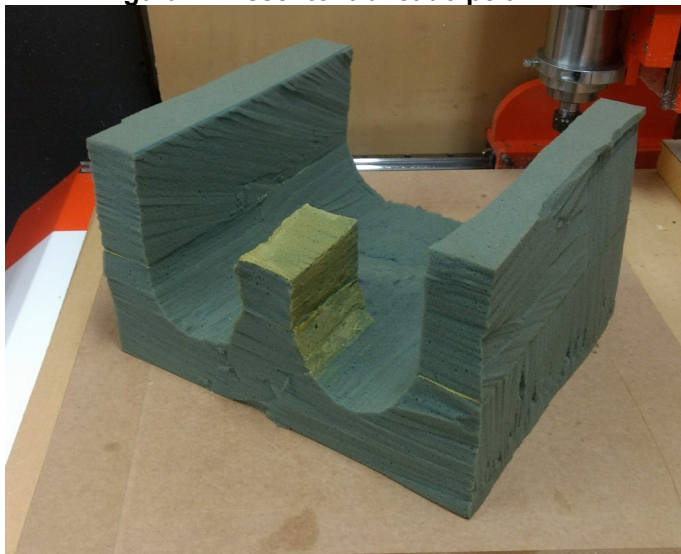
1 INTRODUÇÃO

Junto com os avanços do conhecimento e acesso à informação, muitas áreas beneficiam-se das facilidades que a tecnologia proporciona, uma dessas áreas é conhecida por Tecnologia assistiva (TA).

Essa área apropria-se de avanços recentes nas áreas de Engenharia, Computação e *Design*, desenvolvendo equipamentos, sistemas e serviços, que proporcionam, conforto, qualidade de vida e inserção na sociedade para pessoas com deficiência (PCD).

Na Fundação Catarinense de Educação Especial (FCEE), hoje são feitas peças adaptadas a cadeira de rodas convencionais, de maneira totalmente artesanal, sendo essas encostos e assentos de espuma de poliuretano (PU), similar ao modelo da Figura 1.

Figura 1 - Assento fabricado pela FCEE



Fonte: Próprio autor

Então com o intuito de automatizar o processo de fabricação destes assentos, desenvolveu-se um estudo para a definição de parâmetros que possam ser úteis, não somente a FCEE, mas possíveis trabalhos que venham a ter, a necessidade ou interesse na fabricação de peças personalizadas em espuma de poliuretano, com máquina CNC e ferramentas convencionais.

O presente trabalho consiste de embasamento teórico e testes práticos para a obtenção de parâmetros de usinagem em peças de espuma. Esses

parâmetros selecionados e combinados de maneira correta, venham oferecer acabamento e formas satisfatórias para peças executadas nos diferentes tipos de espumas utilizadas para o estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

Definir processos e parâmetros para a usinagem de peças, fabricadas em espumas comerciais de poliuretano, adaptáveis a cadeiras de rodas.

2.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo principal foram desdobrados os objetivos específicos, a seguir:

- a) caracterizar cenário da aplicação de peças adaptáveis para cadeiras de rodas convencionais;
- b) definir ensaios para os parâmetros de usinagem;
- c) desenvolver processo usado para gerar trajetórias no sistema CAM e bem como a usinagem;
- d) testar e validar todo o processo de usinagem das peças avaliando o acabamento da usinagem e geometria da peça, tendo como comparativo os assentos produzidos na FCEE.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Tecnologia assistiva (TA)

Estamos rodeados por itens tecnológicos nos dias de hoje, muitos desses, são resultados de descobertas e invenções que ao decorrer do tempo foram desenvolvidos e aperfeiçoados com a intenção de obter maior disponibilidade de recursos, conforto e facilidades.

Segundo Bersch (2009) quando sistemas ou serviços tecnológicos são empregados para corrigir ou aliviar alguma deficiência, permitindo à essas pessoas exercerem atividades comuns, a todo esse conjunto de técnicas que dão apoio à pessoa com deficiência é dado o nome de tecnologia assistiva.

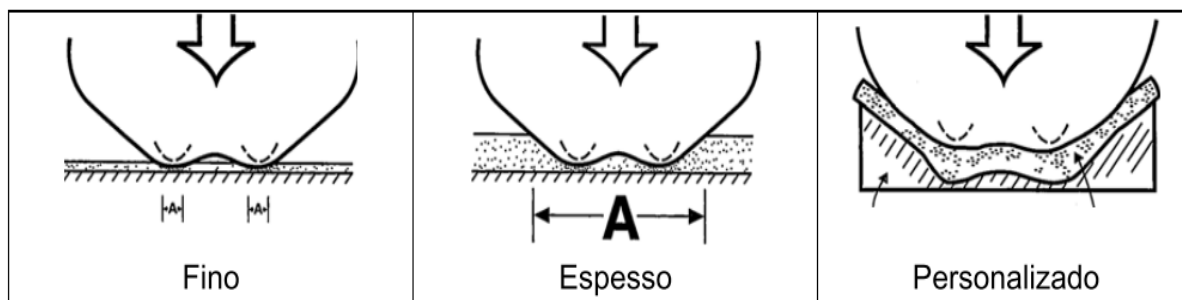
Uma área muito ampla para ser trabalhada com o olhar da tecnologia assistiva é a manufatura de assentos personalizados, tanto para adequação postural mas também voltada ao conforto (MORAES, 2009).

Como o desenvolvimento e execução de projetos de peças voltadas à pessoas com deficiência tem caráter individual, os processos comumente usados para produção em larga escala para reduzir os custos de produção não podem ser aplicados, visto que cada indivíduo apresenta condição e necessidades únicas, colocando como necessidade o uso de métodos particulares para cada usuário (DONG, 2007).

Segundo Bashir (2006), sentar-se em uma posição anatômica não é necessário, mas passar várias horas sentado pode vir a gerar tensões sobre a coluna podendo levar a dores e deformidades crônicas.

Casos onde o indivíduo não tem mobilidade e passa diversas horas na mesma posição, assentos anatômicos propiciam melhor sustentação e transferência de pressão para pontos menos sensíveis e garantir mais sustentação do corpo. (CARLSON *et al.* 1995), conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Distribuição de pressão para diferentes tipos de assento



Fonte: CARLSON *et al.* (1995)

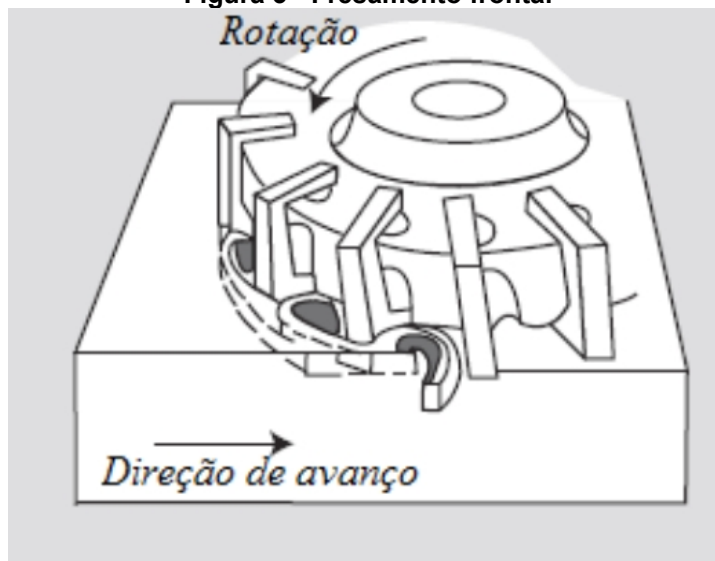
3.2 Usinagem

Usinagem é o conjunto de operações que tem por objetivo gerar dimensão, forma ou acabamento por meio da remoção de material, através de outro material mais resistente e duro, produzindo a remoção em forma de cavaco (FERRARESI,1995).

Dentre a miríade de processos de usinagem existentes o utilizado para o desenvolvimento do trabalho é o fresamento, que de acordo com Ferraresi (1995) é o processo mecânico que tem como objetivo obter superfícies, por meio de ferramenta multicortante.

Diniz *et al.* (2001), definem o processo de fresamento, como sendo aquele que utiliza uma ferramenta de arestas cortantes fixa a um eixo. E também define dois tipos de fresamentos básicos o fresamento tangencial e o fresamento frontal ou de topo.

A Figura 3 mostra o tipo de fresamento utilizado nos ensaios, devido ao tipo construtivo da máquina utilizada, no qual a ferramenta é acoplada ao eixo Z da mesma.

Figura 3 - Fresamento frontal

Fonte: MACHADO *et al.* (2009)

Operações de usinagem normalmente são realizadas em etapas de desbaste e acabamento. A operação de desbaste, busca obter dimensões próximas às da peça final, realizando um trabalho mais grosseiro com finalidade de facilitar a etapa de acabamento, que visa obter as dimensões finais e um acabamento específico na peça (FERRARESI, 1995).

3.3 Ferramentas

A ferramenta de corte é a responsável pela usinagem.

Este processo ocorre quando ferramenta girando em seu próprio eixo, devido ao atrito com a peça, promove a retirada de material, na forma de cavaco, com a finalidade de se obter uma geometria específica.

A formação do cavaco durante o processo ocorre na direção do gume da ferramenta, o que destaca ainda mais a importância da ferramenta. (MACHADO *et al.* 2009)

Segundo Diniz *et al.* (2001), além dos parâmetros de corte, existem propriedades da ferramenta relativas a cada tipo de usinagem, que devem ser consideradas na execução das operações de usinagem, tais propriedades são:

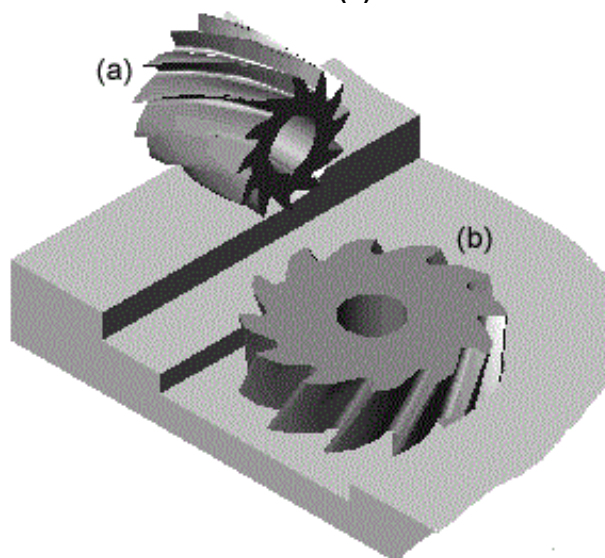
resistência ao desgaste, resistência ao cisalhamento, resistência mecânica ao esforço térmico resistência à compressão e resistência a choques térmicos.

3.4 Fresamento

Ferraresi (1995) descreve diferentes tipos de operação de fresamento básico, que podem ser classificados de acordo com posição do eixo árvore da máquina ferramenta em relação superfície usinada.

A NBR 6175 lista apenas três tipos de fresamento, e são classificados conforme a disposição das arestas cortantes da fresa, o frontal, o tangencial e o composto, que nada mais é que a junção dos dois primeiros tipos, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Tipos de Fresamento: Tangencial (a), Frontal (b)



Fonte: Adaptado de CIMM (2019).

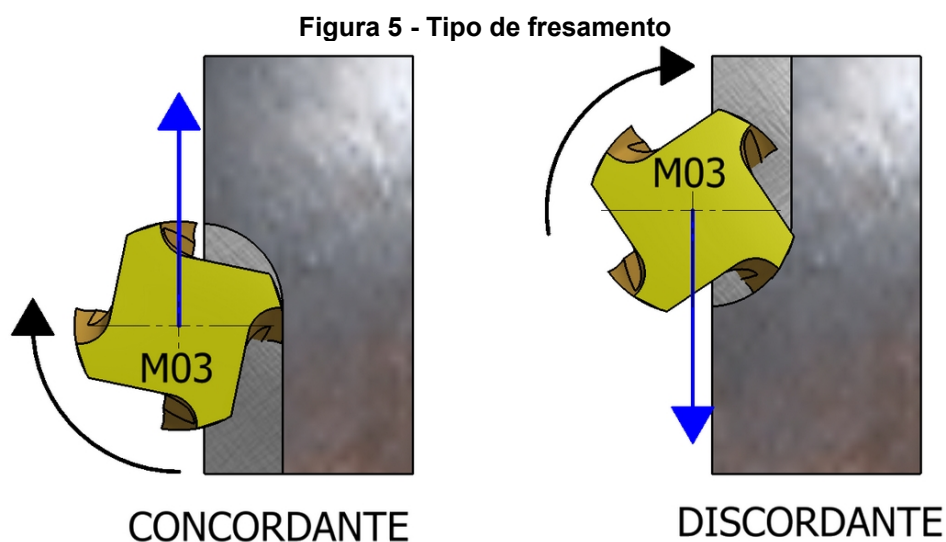
Diniz *et al.* (2001), comenta que a posição da ferramenta e a direção de avanço sobre a peça se relacionam, determinando assim o tipo de fresamento como concordante ou discordante, tendo como característica o tipo de formação de cavaco em uma operação de usinagem convencional.

O processo de fresamento concordante conforme descrito por Diniz *et al.* (2001), é quando o sentido do movimento de avanço e o movimento de giro da

ferramenta são equivalentes, o material usinado é empurrado em direção à mesa, o corte se inicia com um ângulo máximo e ao fim do corte de uma aresta decresce até o valor zero.

O movimento discordante para uma usinagem convencional de metais, conforme descrito por Diniz *et al.* (2001), Ferraresi (1995), gera grande atrito desde a entrada da ferramenta que inicia em um ângulo zero e vai decrescendo, tendo como outro fator de influência a tensão de ruptura do material, o que causa desgastes e vibrações excessivas da ferramenta.

Pode-se facilmente identificar o tipo de fresamento, ao traçar uma linha imaginária paralela a face da peça, e então pegando um ponto fora da mesma, que tangencia o gume da ferramenta. Como ilustrado na Figura 5, se o sentido de giro (seta preta), e o sentido de avanço da ferramenta (seta azul), estiverem apontando na mesma direção, o tipo de usinagem é concordante, caso o sentido de uma das setas discorde, o tipo de fresamento será discordante.



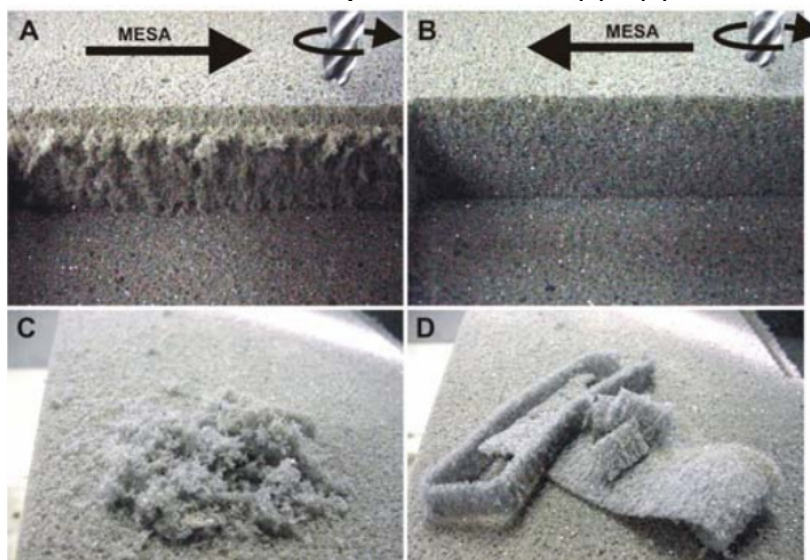
Fonte: adaptado de domingosdeazevedo.com (2019).

O movimento discordante para uma usinagem convencional de metais, conforme descrito por Diniz *et al.* (2001), Ferraresi (1995), gera grande atrito desde a entrada da ferramenta na peça até sua saída.

No entanto, como apresentado por Batista *et al.* (2009, apud Silva *et al.* 2011), o sentido de corte do fresamento de espumas poliméricas, tem influência

profunda no acabamento das peças submetidas a operação, foi observado e comentado nos seus estudos, o comportamento diferenciado na usinagem de espumas, devido à flexibilidade do material, gerando acabamentos e cavacos característicos, muito diferentes da usinagem convencional. A Figura 6 apresenta este comportamento relatado.

Figura 6 - Usinagem concordante (a) e discordante (b) da espuma D50 e seus respectivos cavacos (c) e (d)



Fonte: BATISTA *et al.* (2009).

Parâmetros de usinagem são propriedades e grandezas numéricas que representam características e valores respectivos do deslocamento da ferramenta ou da peça, adequados à operação, material da ferramenta e material a ser usinado.

Segundo Machado *et al.* (2009) e Ferraresi (1995) é denominada velocidade de corte a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte. A velocidade de corte é calculada através da seguinte Equação 1:

$$V_c = \pi \cdot d \cdot n \text{ (m/min)} \quad (1)$$

Onde:

V_c = velocidade de corte (m/min)

d = diâmetro da peça (mm)

n = números de rotações por minuto (rpm)

A velocidade de corte (V_c) influencia na forma do cavaco obtido pois é relacionada à velocidade de cisalhamento do material e na saída do mesmo em forma de cavaco. Machado *et al.* (2009) também comenta que o parâmetro de velocidade de corte é o principal responsável pela temperatura da ferramenta durante o processo de usinagem.

Segundo norma (ABNT NBR ISO 3002-1, 2013), a velocidade de avanço é o movimento adicional entre a peça e a aresta de corte da ferramenta, combinados com o movimento de corte, e assim possibilitando a obtenção de superfície usinada.

Conforme Diniz *et al.* (2001); Machado *et al.* (2009) a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de corte é denominada velocidade de avanço (V_f), e associam duas grandezas ao movimento, o avanço por dente (f_z), que é o deslocamento realizado de cada dente da ferramenta na direção de avanço, e a velocidade de corte (V_c), que é a velocidade instantânea de um ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de corte, é calculada pela Equação 2:

$$V_f = n \cdot f_z \cdot Z \quad (2)$$

Onde:

V_f = velocidade de avanço (mm/min)

f_z = avanço por dente (mm)

Z = número de dentes

n = números de rotações por minuto (rpm)

Conforme exposto por Machado *et al.* (2009) e Diniz *et al.* (2001), a posição, direção e sentido de corte integrados com o movimento da ferramenta quando associados para a remoção de material em forma de cavaco definem a taxa de remoção de material (Q), é calculada pela Equação 3:

$$Q = v_f \cdot a_p \cdot a_e$$

(3)

Onde:

Q = taxa de remoção de material (mm^3/min)

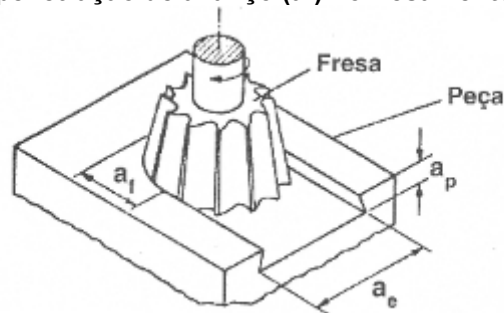
V_f = velocidade de avanço (mm/min)

a_p = profundidade de corte (mm)

a_e = penetração de trabalho (mm)

A Figura 7 ilustra os parâmetros utilizados para o cálculo da taxa de remoção de material (Q).

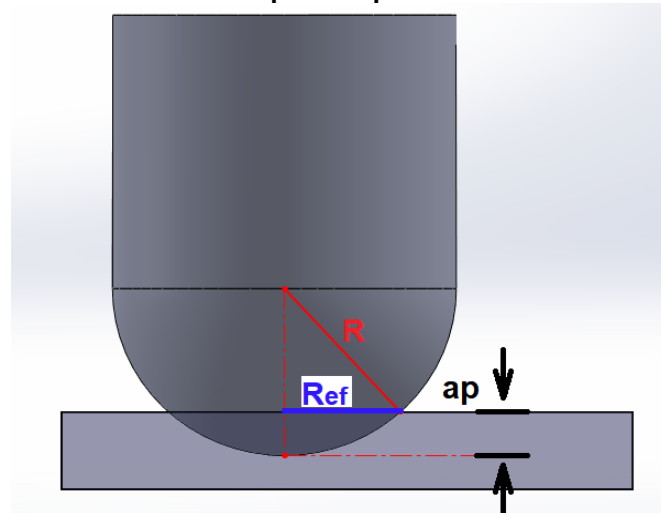
Figura 7- Profundidade de corte (a_p), penetração de trabalho (a_e) e penetração de avanço (a_f) no fresamento frontal



Fonte: DINIZ *et al.* (2001).

Conforme Chiang *et al.* (1995 apud Souza *et al.* 2004) no fresamento de superfícies complexas, a ferramenta de ponta esférica em raras vezes, tem seu diâmetro nominal realizando o corte, tendo uma região entre a peça e seu centro (diâmetro zero) um valor que dependerá da profundidade de corte (a_p) conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Diâmetro efetivo de corte em uma superfície plana



Fonte: Adaptado de SOUZA et al. (2004)

Onde:

Ref = Raio efetivo de corte [mm]

ap = profundidade de corte [mm]

r = Raio da ferramenta [mm]

3.5 Usinagem CNC

Através do desenvolvimento constante na tecnologia dos processos de usinagem, hoje temos a possibilidade de ganho em acabamento e usinabilidade de materiais antes considerados difíceis.

Celani (2007), descreve as máquinas CNC como equipamentos que permitem a usinagem de diferentes peças, por meio de controle simultâneo dos seus eixos, este controle é feito através de código de máquina, programando seus movimentos. A partir de modelagem geométrica em programas CAD/CAM essas máquinas permitem a produção de peças complexas com grande precisão.

O desenvolvimento de um projeto de usinagem CNC requer atenção à fixação, ferramentas ao modelo ou desenho do projeto, e também como comentado por Lima *et al.* (2013), a seleção adequada dos parâmetros envolvidos na

programação CNC, que influenciam não só na qualidade da usinagem como produtividade e vida da ferramenta.

3.6 Usinagem de espumas de poliuretano

A habilidade de usinar materiais flexíveis oferece vantagens para produzir produtos personalizados, por exemplo, solas de sapatos ortopédicos, usando estratégias de usinagem direta sem a necessidade da tecnologia de molde que é de alto custo. No entanto, há muito pouco conhecimento em termos de parâmetros de usinagem para polímeros, em especial para os flexíveis (DHOKIA *et al.* 2008).

A usinagem em CNC tem sua relevância não só na produção de itens com geometria complexa, mas também na parte de produção de itens personalizados, tendo um processo mais dinâmico e de menor custo, por não ter a necessidade do uso de moldes, conforme descreve Shih, *et al.* (2004 apud Silva *et al.* 2011). Outro ponto discutido por Silva *et al.* (2011), é o pouco conhecimento da usinagem de materiais poliméricos flexíveis, tanto pela diversidade do material, que pode ter diferentes composições e densidades.

A espuma de poliuretano tem como principal característica sua densidade, e é dessa forma que é disponibilizada no mercado, o Instituto Nacional do Repouso (INER), testa e fornece aos fabricantes um selo que avalia estas e outras propriedades. O INER também estabelece uma relação de peso e a altura, e indicando uma densidade para cada biotipo, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Espumas recomendadas por biotipo

Altura (m) Peso (Kg)	Até 1,50	1,51 a 1,60	1,61 a 1,70	1,71 a 1,80	1,81 a 1,90	Acima de 1,91
Até 50	D23	D23*/20	D23/20*	D20	-	-
51 a 60	D26	D26*/23	D26/23	D23	-	-
61 a 70	D28	D26/28*	D26/28*	D26/28*	D26	-
71 a 80	-	D33	D28/33*	D28/33*	D28	-
81 a 90	-	-	D33	D33*/28	D33*/28	D28
91 a 100	-	-	D40	D40/33*	D33	D33
101 a 120	-	-	D45	D40	D40	D40/33*
121 a 150	-	-	-	D45	D45/40*	D40

Fonte: INER (2009).

Poucos estudos têm sido reportados na literatura sobre usinagem de espumas flexíveis de poliuretano. Um dos primeiros que citam a usinagem do material são Wright e Cumming (1969). Eles apresentam diretrizes para parâmetros, como altas rotações e pequenos avanços. No entanto, eles apontam a dificuldade de se definir parâmetros conclusivos devido à ampla gama de densidades disponíveis.

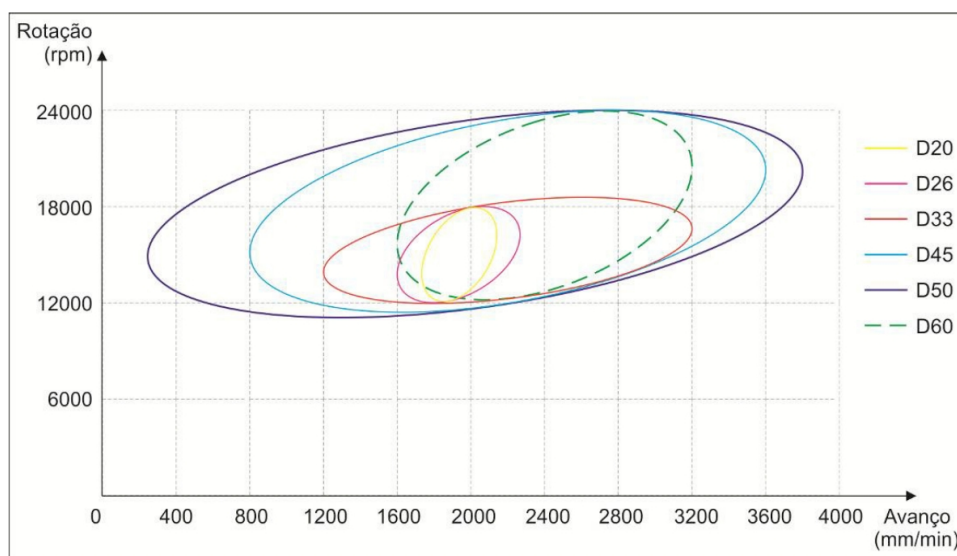
Um trabalho voltado para a fabricação de assentos personalizados foi desenvolvido por Brienza *et al.* (1992), contando com ferramentas e dispositivos especializados para o corte da espuma. O trabalho apresenta também diretrizes, parâmetros e alguns cuidados no momento da produção das peças visto que a forma de fixação, o cavaco e a dureza do material tem que ser tratados de maneira diferenciada do modo convencional de usinagem.

Brienza *et al.* (1992) discute o desenvolvimento de um sistema específico para fabricação de assentos com contorno personalizado, mas utilizando ferramentas e máquina especial para tal finalidade.

Silva *et al.* (2011) apresenta a possibilidade de usinagem de espumas de poliuretano e também, levanta um mapa de seleção de rotações e avanços para algumas densidades de espumas flexíveis de poliuretano conforme Figura 9.

Estes valores foram obtidos utilizando fresas de metal duro com duas arestas cortantes e diâmetro de 6 mm.

Figura 9 - Mapa de seleção de rotações e avanços para espumas de poliuretano



Fonte: SILVA *et al.* (2011).

3.7 Sistemas CAD e CAM

Os sistemas CAD (*Computer Aided Design*) têm grande papel no desenvolvimento de projetos e produtos, acelerando a produção e diminuindo custos, Souza (2004).

Souza (2004), ainda comenta que a aplicação de sistemas CAD torna-se cada dia mais decisivo na indústria, pois o mercado atual, exige uma velocidade de manufatura, criação e/ou modificação de produtos, cada vez maior. O conceito destes sistemas propiciam o desenvolvimento e confecção de produtos de maneira muito rápida e com superfícies geometricamente complexas e elevado grau de precisão.

O SprutCAM é um sistema CAM, este sendo utilizado para, programação e simulação de máquinas CNC, possui várias configurações e tipos de máquinas como fresadoras, tornos, centros de usinagem, robôs e máquinas especiais. Permite calcular trajetórias para movimentação da máquina, simular o processo de usinagem e gerar os códigos NC (Controle Numérico). Contando com várias ferramentas e operações para planejamento de usinagem (COMAC, 2019).

4 METODOLOGIA

4.1 Ensaaios de parâmetros

Os ensaios de usinagem para os parâmetros de velocidade de avanço, velocidade de rotação e profundidade de trabalho foi baseado na metodologia utilizada por Silva *et al.* (2011), na qual canais foram fresados no bloco de espuma, variando individualmente cada parâmetro. Em sua tese, Silva *et al.* (2011) propõe parâmetros de usinagem para o fresamento das espumas de poliuretano, sendo esses: o sentido de corte ideal, tipo de ferramenta utilizada, velocidades de avanço e rotação e também a profundidade de trabalho da ferramenta no eixo Z.

Os ensaios foram divididos em três etapas. A primeira etapa teve como base a tese de Silva *et al.* (2011). Ensaiaando parâmetros, de velocidade de avanço, velocidade de rotação e profundidade de trabalho, na qual canais foram fresados no bloco de espuma, variando individualmente cada parâmetro e avaliou-se os resultados obtidos.

Na segunda etapa foram feitos ensaios para definição de estratégia de usinagem, onde com auxílio do sistema CAM, SprutCAM foram desenvolvidas trajetórias com as estratégias para desbaste e acabamento.

E a terceira e última parte dos ensaios, consistiu em selecionar os melhores parâmetros ensaiados, e aplicá-los para a execução de uma peça, no caso um assento adaptado para cadeiras de roda comerciais.

Para os testes utilizou-se as espumas flexíveis de poliuretano D33 e D45 (33 kg/m^3 e 45 kg/m^3 de densidade nominal, respectivamente).

Todos os ensaios foram feitos em máquina router CNC de 3 eixos, da marca Jaraguá CNC, modelo J/A-CNC12081-CP com espaço útil de trabalho nos eixos X de 800 mm, eixo Y de 1200 mm e curso do eixo Z de 120 mm, tendo velocidade de avanço máximo de 7000 mm/min. e spindle no eixo Z com rotação máxima de 24000 rpm e suporta ferramentas com haste de diâmetros de 1 mm a 10 mm, esta ilustrada na Figura 10.

Figura 10 - Máquina Jaraguá CNC – J/A-CNC12081-CP



Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros testados no primeiro ensaio foram: velocidade de avanço (V_f), velocidade de rotação (n) e profundidade de trabalho (a_p). Neste primeiro momento, replicou-se os ensaios e comparou com os resultados de acabamento descritos por Silva *et al.* (2011).

Com o intuito de usinar modelos, utilizou-se o sistema SprutCAM para criar trajetórias baseadas em estratégias de usinagem e avaliar as superfícies quanto ao seu acabamento e forma.

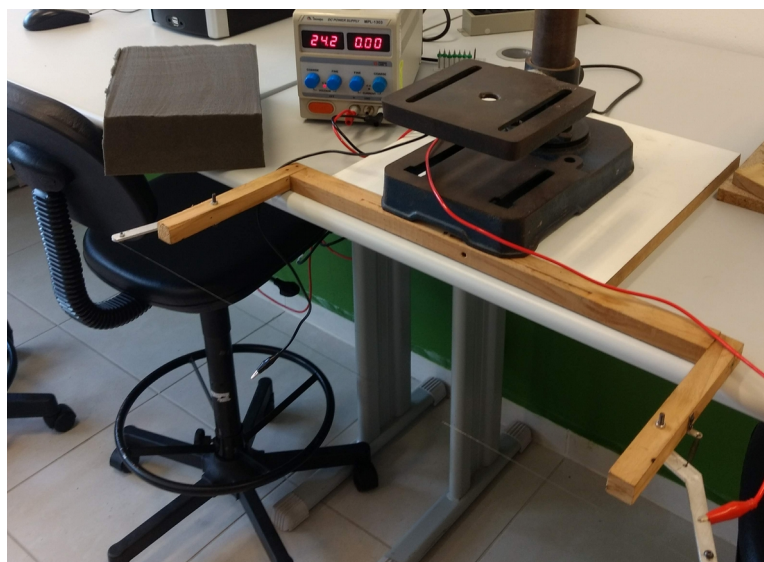
Para a realização dos ensaios houve inicialmente uma etapa de preparação, descrita a seguir.

Os blocos de espuma por meio de corte com arco a fio aquecido como mostrado na Figura 11 teve o intuito de obter uma superfície plana e regular e assim garantir a boa fixação à mesa da máquina.

Com blocos de espuma com dimensão padrão, estas sendo ilustradas na Figura 12, com dimensões de A e B tem 200 mm e a C 55 mm para a realização do segundo ensaio.

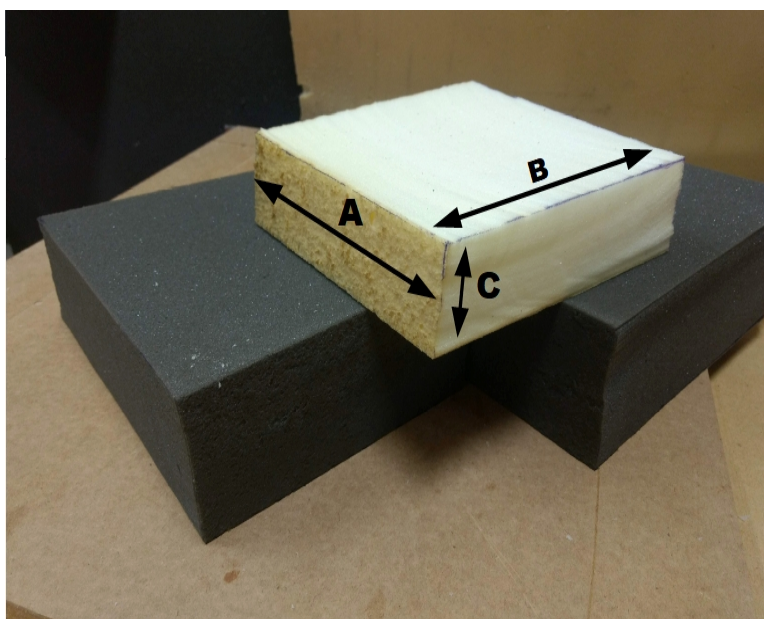
A espuma então é fixada à mesa da máquina por meio de fita dupla face visto que dispositivos de fixação convencionais, como grampos e morsas, utilizam como princípio para a fixação a compressão da peça. A superfície plana garante maior aderência, permitindo assim passes da ferramenta com profundidades de corte (a_p) com profundidade considerável.

Figura 11 - Aparato para o corte da espuma, por meio de fio aquecido.



Fonte: Próprio autor.

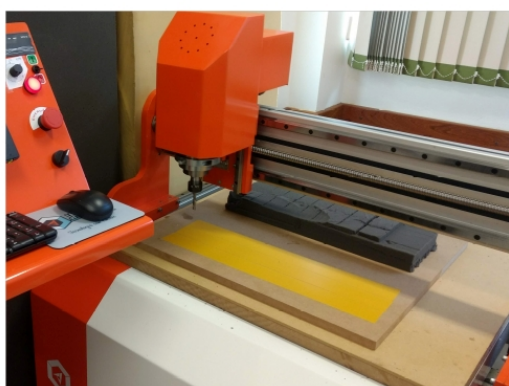
Figura 12 - Blocos de espumas após o corte a fio



Para garantir uniformidade dimensional da peça durante a usinagem, e o alinhamento da mesma com os eixos da máquina, a peça bruta foi esquadrejada, lembrando que na operação de corte da espuma para a obtenção dos blocos, foi considerado material a mais para ser retirado nesta etapa. A Figura 13 mostra o processo de preparação das espumas para o primeiro ensaio. Onde a (1º) imagem

mostra a fixação da espuma na mesa da máquina, a imagem (2°) mostra o esquadrejamento da espuma.

Figura 13 - Preparação das espumas para ensaios



(1°)



(2°)

Fonte: Próprio autor

Para os primeiros ensaios de usinagem foi adaptado a programação do código G utilizado por Silva *et al.* (2011), onde manteve-se a metodologia utilizada, que consistiu em, após o zeramento da ferramenta, recuar a mesma 10 mm do bloco no eixo Y, ajustar a rotação em 24000 rpm e movimentar a ferramenta -5 mm no eixo Z, e assim executou-se uma entrada lateral no bloco no sentido positivo do eixo Y e avançando 100 mm com velocidade de avanço (V_f) constante a qual foi ajustada previamente no programa, ao final do movimento, a máquina realiza um movimento lateral de 5 mm, no sentido positivo no eixo X e retorna 110 mm em Y até sair completamente do bloco.

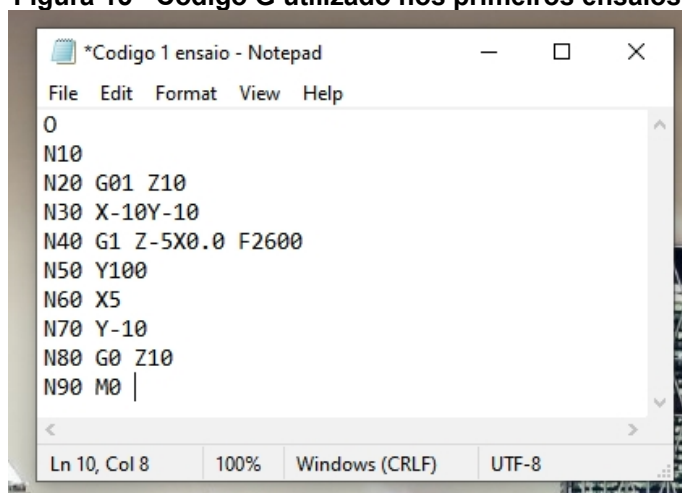
A fresa utilizada nesse primeiro momento foi a apresentada na Figura 14, e os parâmetros ensaiados foram: velocidade de avanço (V_f), velocidade de rotação da ferramenta (v_r) e profundidade de corte (a_p), utilizando o código apresentado na Figura 15.

Figura 14- Fresa utilizada para os primeiros ensaios



Fonte: Próprio autor.

Figura 15 - Código G utilizado nos primeiros ensaios



Fonte: Próprio autor.

No primeiro ensaio foi mantida a velocidade de rotação em 24000 rpm e profundidade de corte em 5 mm, variou-se a velocidade de avanço segundo Tabela 2.

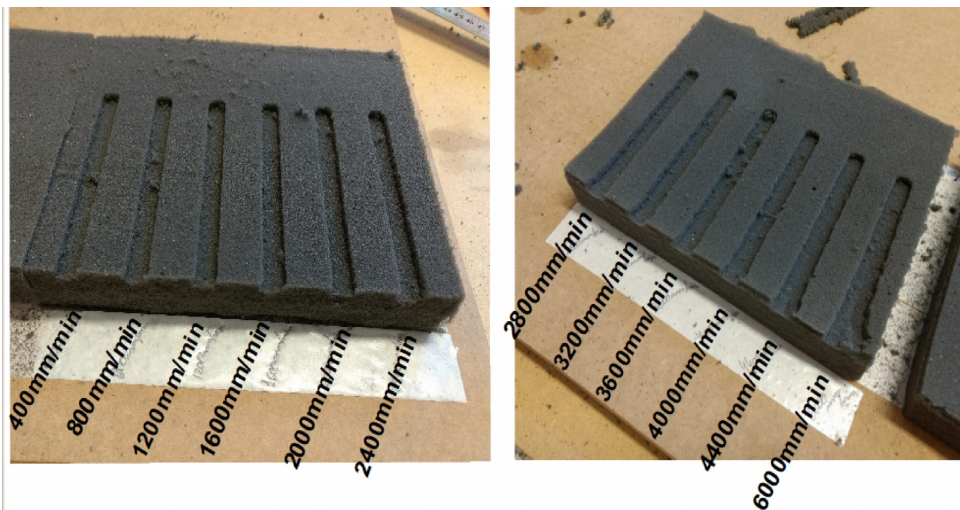
Tabela 2 - Velocidades de avanço (Vf)

Velocidades de avanços (Vf)									
400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	3600	4000

Fonte: Próprio autor.

Conforme mostrado na Figura 16 os resultados obtidos foram melhores na faixa de velocidade entre 1200 a 3200 mm/min.

Figura 16 - Resultado dos ensaios de velocidade de avanço (Vf)



Fonte: Próprio autor.

Após os ensaios observou-se que apesar da variação dos parâmetros de usinagem os cavacos obtidos, não apresentaram variação na sua forma, como apresentado na Figura 17, sempre de forma contínua. Na espuma D45 (cinza) de maior densidade observou-se que na faixa de avanço de 2000 a 3200 mm/min o corte ficava limpo e o cavaco saía com facilidade.

Figura 17 - Cavacos gerados no ensaio do parâmetro de avanço (Vf)



Fonte: Próprio autor.

Já na espuma D33 (branca) de menor densidade foi observado que a espuma se deformava mais fazendo o cavaco ficar preso ao canal, independente da velocidade de avanço, e para avaliar os resultados de acabamento foi preciso fazer a retirada do cavaco manualmente. Apesar das diferenças de densidades das espumas, os melhores acabamentos desse primeiro ensaio ficaram na faixa de 2000 a 3200 mm/min, deixando o rasgo sem qualquer marca de rebarba.

O ensaio para o parâmetro de velocidade de rotação (n) onde utilizou-se o mesmo código G do ensaio anterior, exibido na Figura 15. Nesta etapa foi fixada a velocidade de avanço (V_f) em 2400 mm/min e profundidade de corte (a_p) em 5 mm. Os valores de rotação da ferramenta (n), foram variados segundo a Tabela 3.

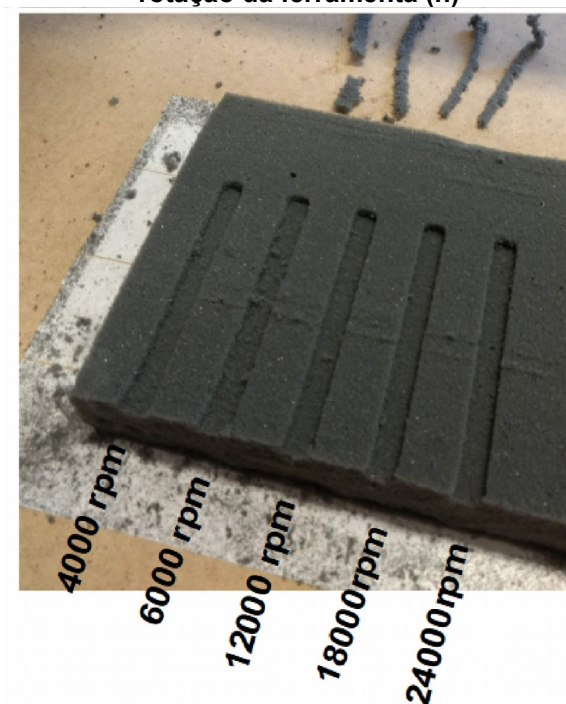
Tabela 3 - Velocidade de rotação da ferramenta (n)

Valores para velocidade de rotação da ferramenta (n)				
4000	6000	12000	18000	24000

Fonte: Próprio autor.

Com o ensaio do parâmetro de velocidade de rotação da ferramenta, pôde-se observar mais uma vez o comentado acima sobre a geração de cavaco, que apresentou comportamento contínuo, independente da variação da rotação, pode-se avaliar também neste ensaio, que apesar do rasgo feito com velocidade de 4000 rpm, ter acabamento aceitável, dentre os cinco ensaios feitos este é o que tem pior acabamento nas paredes do rasgo, como mostrado na Figura 18. A faixa que obteve-se um acabamento melhor tanto para as espumas D33 e D45 foram as com velocidade de 18000 rpm e 24000 rpm, respectivamente. Para essas velocidades obtemos taxas satisfatórias de remoção de material para um mesmo avanço, segundo Equação 3. Com isso obteve-se uma boa taxa de remoção de material (Q), como consequência, o tempo das operações é minimizado.

Figura 18- Resultado do ensaio velocidade de rotação da ferramenta (n)



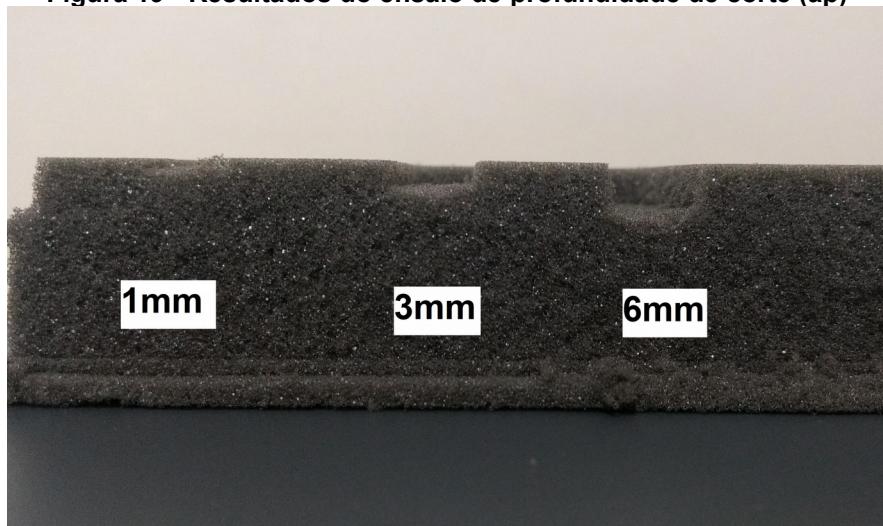
Fonte: Próprio autor.

O ensaio de profundidade de corte, realizou-se fixando a velocidade de rotação do ferramenta (n) e a velocidade de avanço (V_f), em 24000 rpm e 2600 mm/min respectivamente, e escolhendo três valores para a profundidade de corte, sendo um igual ao diâmetro, um igual ao raio e outro menor que estes dois; assim foram escolhidos os valores 6, 3 e 1 mm respectivamente.

O observado nesse ensaio de profundidade de corte (ap) é que quanto mais densa a espuma, melhor o acabamento do corte. Em profundidades pequenas na espuma D33 (branca) o primeiro corte com profundidade de 1 mm apresentou acabamento muito ruim, a medida que o valor da profundidade Z aumenta o acabamento melhora.

Na espuma D45 (cinza), mais densa que a primeira, apesar do corte com profundidade mínima apresentar um bom acabamento, em relação a espuma D33. Para com os cortes feitos em maior profundidade na espuma D45 esse primeiro corte tem acabamento com qualidade inferior, como observado na Figura 19.

Figura 19 - Resultados do ensaio de profundidade de corte (a_p)



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 4 apresenta os valores dos três parâmetros ensaiados na primeira etapa.

Tabela 4 - Tabela com os valores dos três parâmetros ensaiados na primeira etapa

Ensaio	V_f (mm/min)	a_p (mm)	n (rpm)
1	400	6	24000
	800	6	24000
	1200	6	24000
	1600	6	24000
	2000	6	24000
	2400	6	24000
	2800	6	24000
	3200	6	24000
	3600	6	24000
	4000	6	24000
	4400	6	24000
	6000	6	24000
2	2400	6	4000
	2400	6	6000
	2400	6	12000
	2400	6	18000
	2400	6	24000
3	2400	1	24000
	2400	3	24000
	2400	6	24000

Fonte: Próprio autor.

Para o primeiro parâmetro, velocidade de avanço (V_f) encontrou-se bom acabamento na faixa de 2000 a 2400 mm/min.

O segundo parâmetro, a velocidade de rotação (n), obteve-se bons resultados quando a velocidade da ferramenta se encontrava na faixa de 18000 a 24000 rpm.

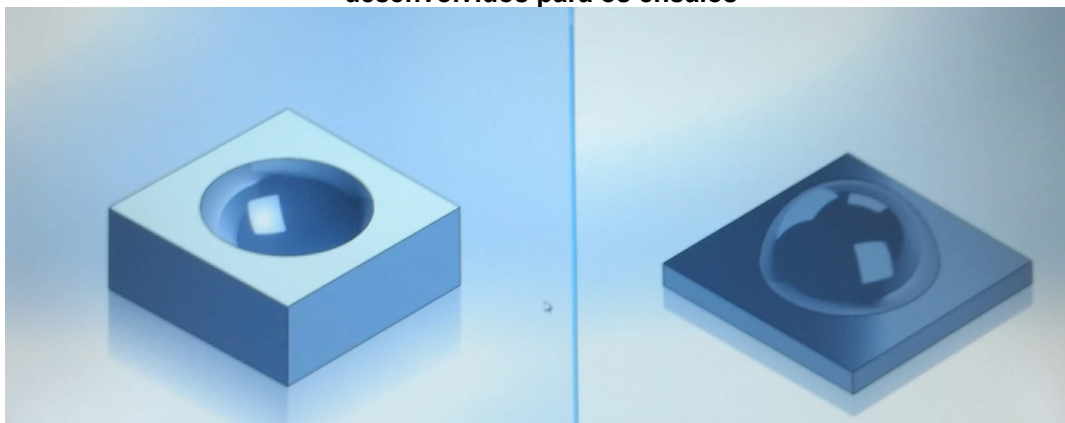
O terceiro e último parâmetro ensaiado na primeira etapa, foi a profundidade de corte (a_p), onde verificou-se que usinagens com maior profundidade, obtém-se um acabamento melhor, deve-se considerar que profundidades muito grandes podem provocar o desprendimento da peça da mesa.

Na segunda etapa de ensaios, onde ensaiou-se estratégias de trajetória de usinagem selecionou-se os parâmetros com as melhores características encontradas durante a primeira etapa de ensaios relatados acima, com esses ensaios validou-se os parâmetros recomendados por Silva *et al.* (2011) para as operações na router CNC utilizada.

Na realização dos ensaios de trajetória, como já dito antes, foi utilizado o sistema SprutCAM.

Foi definido para os ensaios de trajetória duas operações, sendo elas, desbaste e acabamento. E posteriormente programou-se essas operações para os dois modelos, apresentados na Figura 20, variando as estratégias entre equidistante, paralelo e helicoidal.

Figura 20 - Modelos de superfície com protuberância esférica cavidade desenvolvidos para os ensaios



Fonte: Próprio autor.

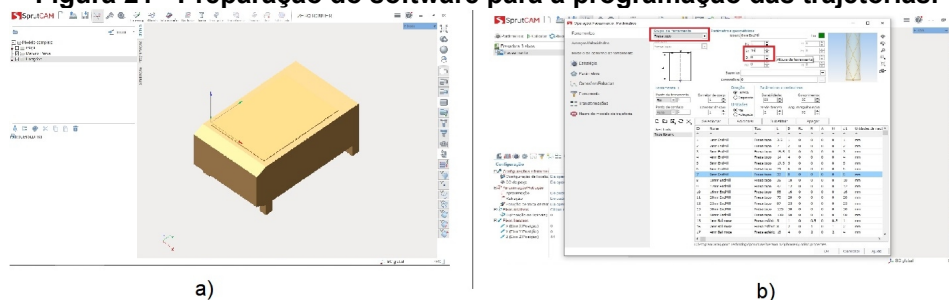
Conforme os ensaios anteriores, houve uma etapa de preparação, de matéria-prima, fixação, além disso, nesta etapa houve a necessidade de desenvolvimento de alguns modelos de superfícies, para se ensaio e avaliação das estratégias utilizadas e assim gerar as trajetórias no SprutCAM.

Através dos modelos de superfície esférica, pode-se avaliar os dois tipos de operação já comentados acima, além de entender melhor o comportamento da espuma para as operações de desbaste e acabamento.

Antes da segunda etapa dos ensaios, houve uma preparação para utilização do sistema, onde a programação e obtenção do código será executado como mostrado na Figura 21.

No SprutCAM é colocado o modelo da máquina (a), para servir de fixação e melhor visualizar o sentido das trajetórias. Foi também acrescentado a lista de ferramentas (b) disponíveis no GDMAES.

Figura 21 - Preparação do software para a programação das trajetórias.



Fonte: Próprio autor.

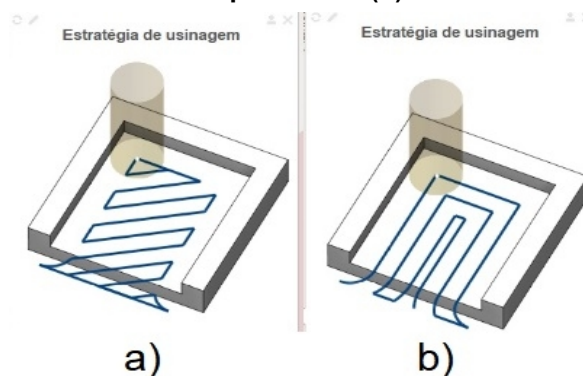
4.1.1. Ensaio de desbaste

Para os ensaios de desbaste selecionamos os seguintes parâmetros, fresa de topo reto de Ø8 mm com duas arestas de corte a profundidade de corte (ap), velocidade de avanço (Vf), velocidade de rotação (n) e tipo de movimento de corte, conforme Tabela 5.

Após seleção dos parâmetros citados acima, no SprutCAM utilizou-se os modelos com cavidade e protuberância, para em cima destes calcular as trajetórias, nas operações de desbaste. Sendo essas operações, desbaste em linha d'água e desbaste plano, onde a operação em linha d'água oferece algumas estratégias de

usinagem a mais, dentre elas, escolhemos duas, paralela e equidistante, conforme representado na Figura 22.

Figura 22 - Estratégias de usinagem Paralela (a), Equidistante (b)



Fonte: Próprio autor.

Com os modelos já no SprutCAM e localizado o zero peça, foi necessário ajustar os parâmetros comentados no início dessa seção, para o sistema assim gerar as trajetórias de desbaste.

Foram geradas trajetórias, com a finalidade de avaliar o acabamento do desbaste e as melhores estratégias para o processo na espuma.

Os valores dos parâmetros foram ajustados segundo a Tabela 5, respeitando o tipo de espuma que seria usinada. Para as operações utilizou-se de fresa de topo reto, com diâmetro 8 mm e duas arestas de corte.

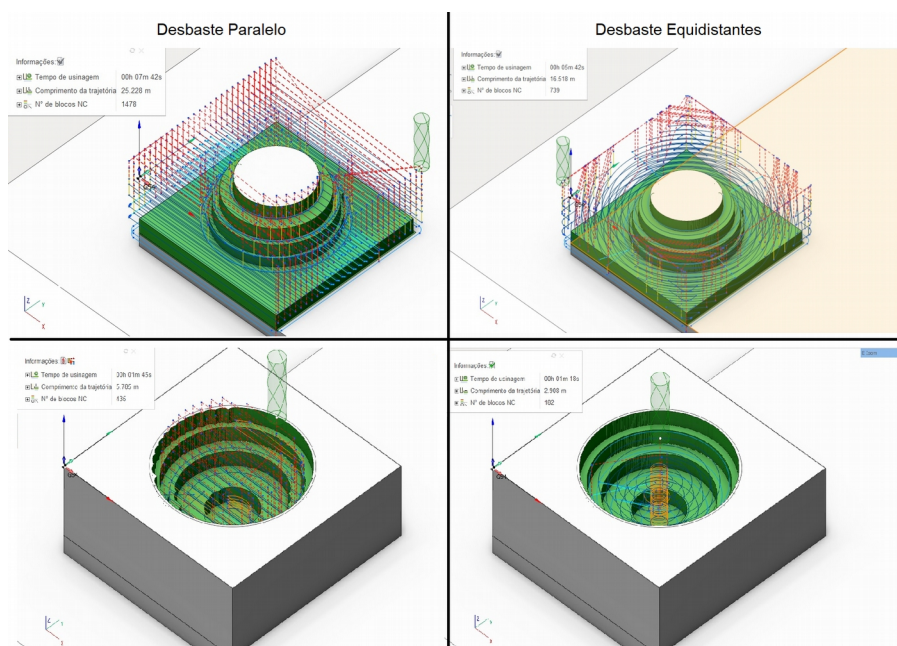
Tabela 5 - Valores dos parâmetros para ensaios

Parâmetros dos ensaios		
Espuma/ Parâmetros	D33	D45
vf(mm/min)	2000	2400
ap(mm)	8	8
n (rpm)	18000	24000
Tipo de rotação	Discordante	Discordante

Fonte: Próprio autor.

Após ajustar os parâmetros e executar os cálculos no SprutCAM, obteve-se as trajetórias das ferramentas e em sequência foi possível simular as operações como na Figura 23, onde é simulado as trajetórias de desbaste paralelo e equidistante.

Figura 23 - Trajetórias de desbastes geradas para o ensaio



Fonte: Próprio autor.

Com a execução das trajetórias em máquina, obteve-se bons resultados nos desbastes das peças, apresentando pouca diferença com relação aos tempos e acabamentos, as superfícies ficaram limpas com acabamento próximo de um corte feito com fio quente.

Com relação ao cavaco, como já comentado antes ele é gerado em tiras contínuas. Uma ação possível para reduzir o tamanho do cavaco é escolher trajetórias onde o corte não seja contínuo, visto que nos ensaios, cavacos longos podem enrolar na ferramenta e puxar a peça acarretando na destruição da mesma.

A operação de desbaste em linha d'água com estratégia paralela e a operação de desbaste plano, apresentaram características de trajetória semelhante, executando muitos movimentos fora da peça, assim elevando o tempo de usinagem.

4.1.2. Ensaio dos acabamentos

Para o ensaio da operação de acabamento, inicialmente foi utilizada fresa esférica de 4 mm de diâmetro, 2 cortes com cobertura de nitreto de titânio e parâmetros conforme Tabela 5. Seguindo os parâmetros encontrados nos ensaios anteriores, que apresentaram melhor acabamento.

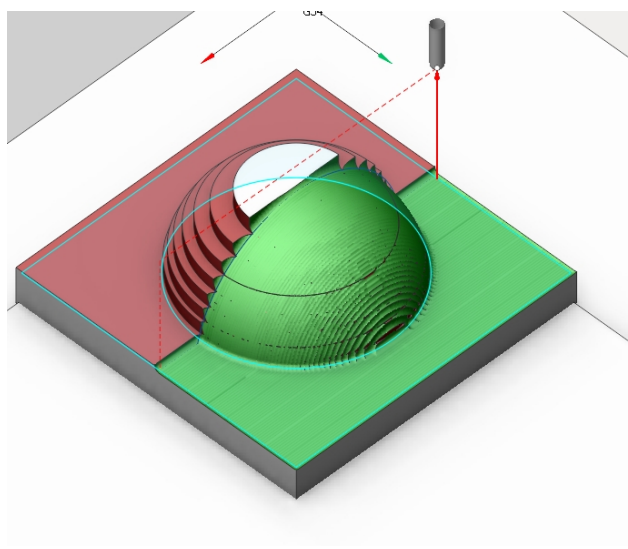
Foram seguidos os mesmos passos de preparação dos ensaios anteriores e aproveitados os modelos já utilizados no ensaio de desbaste, pois como o próprio nome da operação sugere, é uma operação para dar acabamento a superfície.

Silva *et al.* (2011), em seus ensaios, comenta que obteve bom acabamento, mas em certos pontos constatou algumas rebarbas, observando que essas ocorreram onde a ferramenta corta a espuma no sentido ascendente, assim recomendou a utilização de estratégias que tenham trajetórias de corte em sentido descendente, e direcionadas para o interior da peça.

Com base nessas informações, foram geradas trajetórias de acabamento para três tipos de operação no SprutCAM, sendo essas: acabamento em linha d'água, acabamento plano e helicoidal.

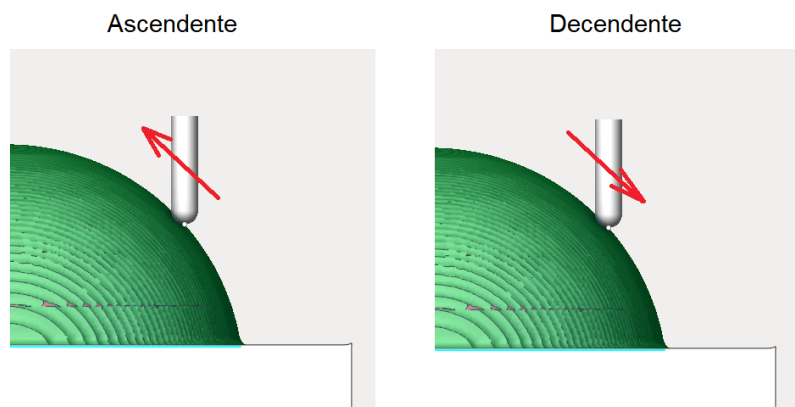
A trajetória de acabamento gerada com a operação plana, Figura 24, teve o intuito de replicar as trajetórias descendente e ascendente de maneira simples e verificar os acabamentos descritos por Silva *et al.* (2011), como na Figura 25.

Figura 24 - Simulação de usinagem operação de acabamento plano.



Fonte: Próprio autor.

Figura 25 - Trajetórias da ferramenta em operação de acabamento

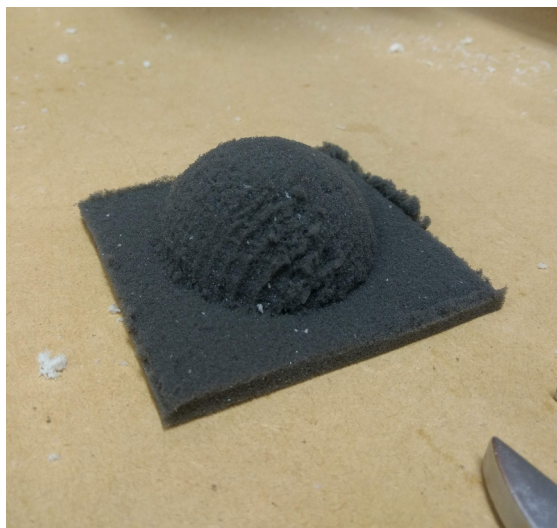


Fonte: Adaptado de SOUZA. (2004)

Conforme as etapas dos ensaios anteriores, foram ajustados os parâmetros, calculadas as trajetórias, essas simuladas, gerado o código NC e executadas na router CNC.

Executadas as usinagens de trajetória plana com fresa de ponta esférica constatou-se que o acabamento não foi satisfatório, apesar de ter atingido a forma desejada, mas deixando rebarbas e com isso gerando um acabamento muito grosseiro. Este acabamento foi observado para os dois tipos de espuma, Figura 26.

Figura 26 - Ensaio de acabamento com trajetória plana e ferramenta de topo reto



Fonte: Próprio autor.

Silva *et al.* (2011), comenta a respeito das características mecânicas da espuma, por serem particulares e pelo material ser flexível, com o aumento da penetração de trabalho, aumenta-se a deformação, e como consequência da carga aplicada, a área de contato entre a peça e a ferramenta também aumenta e assim, maior volume de material pode ser removido.

Chiang *et al.* (1995 *apud* Souza, 2004), conforme seção 3.4 por meio de relações trigonométricas determina o diâmetro máximo de corte em uma superfície plana, assim, usinagens de superfícies curvas, com ferramentas de ponta esférica, tendem a ter variações na área de contato entre a ferramenta e a peça, como consequência, aplica-se pouca carga no material, resultando em pouca ou nenhuma retirada do mesmo.

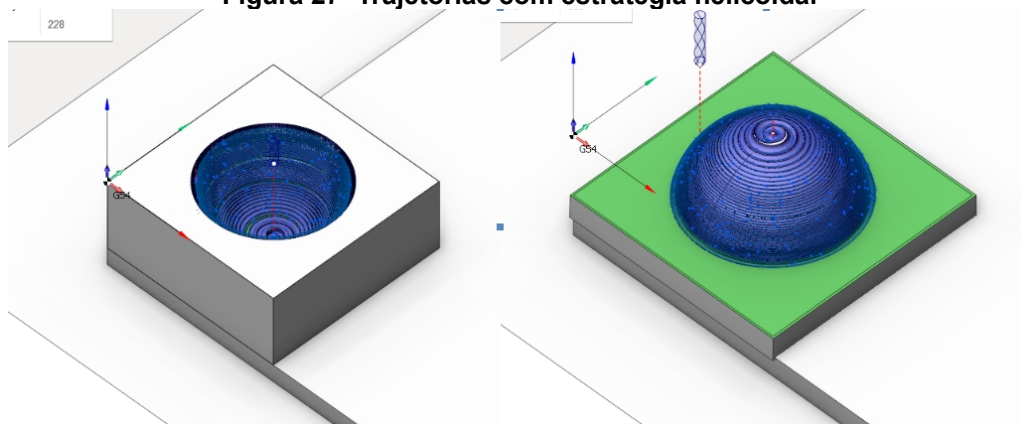
Assim propomos um ensaio para avaliar a possibilidade de acabamento com fresa de topo reto, visto que essa ferramenta apresenta uma área de contato maior que a esférica. Para isso geramos mais duas estratégias para estes ensaios com fresa de topo reto, diâmetro de 4 mm e duas arestas de corte.

No ensaio com fresa de topo reto obteve-se melhor resultado nas trajetórias ascendentes, deixando acabamento na espuma próximos aos cortes feitos com lâmina ou a fio quente, as trajetórias descendentes não tiveram muita alteração dos resultados da usinagem com fresa esférica como é mostrado na Figura 26. Esse comportamento demonstrou-se igual para os dois tipos de espumas, respeitando os parâmetros definidos para cada uma das espumas.

O último ensaio foi realizado utilizando uma estratégia helicoidal, mostrado na Figura 27 já incorporando os fatos observados anteriormente para as trajetórias e então executamos este ensaio com fresa de topo reto de diâmetro de 4 mm, utilizou-se dos mesmos parâmetros usados nos outros ensaios, velocidade de avanço (V_f), profundidade de corte (a_p), velocidade de rotação (n), tipo de corte discordante conforme descrito na Tabela 5. Além disso tomamos o cuidado para a trajetória ter sentido ascendente e também partir das bordas com direção ao interior da mesma.

Assim foram geradas as trajetórias no SprutCAM com estratégia helicoidal, para a avaliação do ensaio.

Figura 27- Trajetórias com estratégia helicoidal



Fonte: Próprio autor.

Como esperado os ensaios de desbastes não tiveram muitos problemas, pois essa operação é feita com o intuito de facilitar a obtenção da forma desejada. O único empecilho para a usinagem de desbastes é o tamanho do cavaco gerado, pois se a ferramenta não for retirada da peça, temos uma formação de cavacos contínuos que ao decorrer da usinagem podem enrolar na fresa causando danos ao material, ou até mesmo desafixando-o da mesa. Os acabamentos de desbastes apresentaram superfície de acabamento muito boa, respeitando os parâmetros encontrados e aplicados a cada tipo de espuma. Um dos pontos que ajudam no acabamento de desbaste é a grande profundidade de corte, que propicia uma maior taxa de retirada de material.

A operação de acabamento, com fresa de topo esférico, apresentou um acabamento muito ruim nos primeiros ensaios, gerando muitas rebarbas, uma das causas é a variação no volume de retirada do material, que em fresas esféricas não tende a ser uma constante, variando dependendo da posição do relevo da peça, em máquinas router CNC, a densidade e flexibilidade do material fazem com que seja difícil conseguir um acabamento bom e uniforme.

Em relação a operação de acabamento com fresa de topo reto, as espumas apresentaram melhor acabamento no sentido ascendente da trajetória plana, independe da densidade da espuma ensaiada.

Com todos esses ensaios, encontrou-se parâmetros ideais e a certeza da possibilidade de usinar espumas de poliuretano, obtendo acabamento superficial, para as duas espumas ensaiadas.

Foram observados diferenças entre uma usinagem convencional e a de espumas. Essas sendo o tipo do cavaco gerado, a profundidade de corte (ap), e assim gerando deformação e garantindo um acabamento satisfatório do material.

4.2 Execução de protótipos

Para a execução do protótipo foram ajustados os parâmetros levando em consideração as densidades das espumas. Foram utilizadas duas operações de usinagem: uma de desbaste e outra de acabamento.

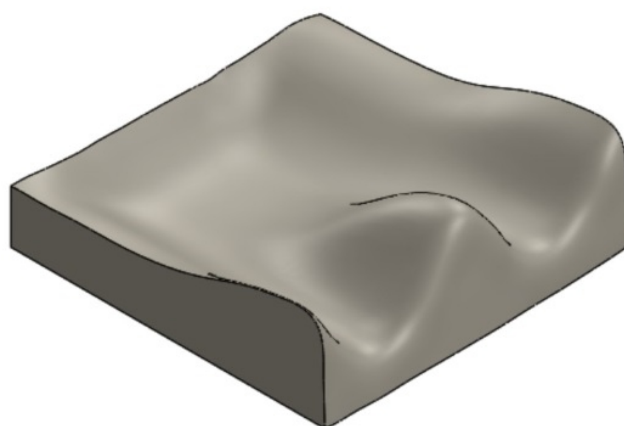
A operação de desbaste foi realizada em linha d'água, com estratégia equidistante e fresa de topo reto de diâmetro de 8 mm e duas arestas de corte.

E a operação de acabamento, como observado nos ensaios, foi realizada em linha d'água, com estratégia de usinagem equidistante e fresa de topo reto de diâmetro de 4 mm e duas arestas de corte.

Quanto aos avanços, velocidades de rotação e ferramentas ambas as operações de usinagem foram utilizando os parâmetros encontrados nos ensaios descritos a cima, sendo feito para os dois tipos de espumas.

A execução teve etapas já descritas nos ensaios anteriores, contando com preparação do modelo CAD no SprutCAM, esse apresentado na Figura 28, inicialmente foi obtido por meio de digitalização 3D, de modelo em espuma feito por molde de injeção.

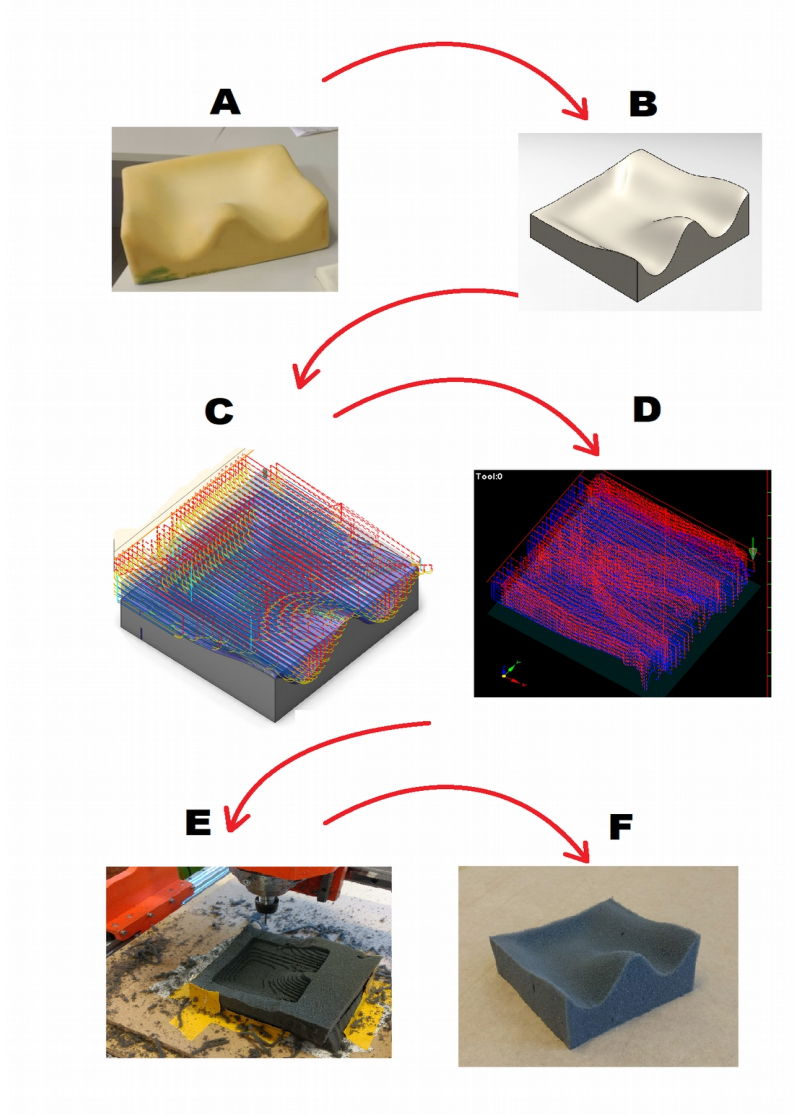
Figura 28- Modelo do assento utilizado para execução do protótipo



Fonte: SCHEIBLER, (2019)

A Figura 29 apresenta todos os passos desenvolvidos nesta última etapa.

Figura 29- Passos para obtenção da peça de espuma usinada



Fonte: Próprio autor.

Sendo essas:

A etapa A e B mostram a obtenção do molde 3D por meio de escaneamento, com braço robótico ROMER Absolute Arm e seu sistema de aquisição de pontos PolyWorks 2014.

Após obter a nuvem de pontos, no SolidWorks com a ferramenta de superfície os pontos obtidos foram tratados e geraram um sólido, com a superfície de interesse tratada pode-se fazer a importação do arquivo da peça para o SprutCAM.

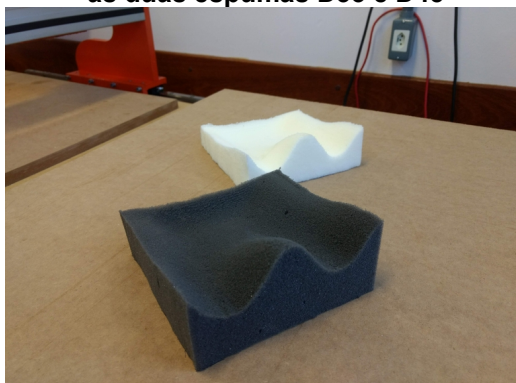
A etapa C mostra as estratégias de usinagem já sendo aplicadas ao modelo e criando as trajetórias da ferramenta. Após programar as trajetórias e simular a usinagem no sistema CAM, e não observando nenhum equívoco no caminho feito pela ferramenta, no próprio SprutCAM gera-se o código numérico que depois será executado no controlador da máquina, como exibido no passo D.

No controlador da máquina o código será executado, após ele ser inserido é possível ver uma prévia das trajetórias, e mais uma vez conferir se não há erros para a execução da peça.

Após a preparação prévia do bloco de matéria-prima, fixação do mesmo e da ferramenta na máquina. E também seu zeramento.

As etapas seguintes E e F mostram a execução do molde e o resultado ao final da execução, alcançando modelos com superfície idêntica à do modelo CAD, como mostra a Figura 30, apresentando o resultado e o acabamento das superfícies. Consideramos esses resultados satisfatórios para ambas as espumas D45 e D33.

Figura 30- Detalhe do acabamento para as duas espumas D33 e D45



Fonte: Próprio autor.

Apesar da espuma D33 apresentar algumas rebarbas, isso não comprometeu a forma final do molde, em vista que se houvesse a necessidade da fabricação para uso, o molde seria revestido, assim não deixando a espuma à mostra.

É interessante ressaltar que as espumas de poliuretano ensaiadas, apesar das diferenças de parâmetros e estratégias de usinagem utilizados para usinar materiais convencionais.

As espumas apresentaram acabamento satisfatório, e bom comportamento na usinagem, para a obtenção de formas complexas.

Mostrando assim uma possibilidade de fabricação de assentos e outras peças em espuma.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos ensaios mostraram a viabilidade de usinagens em espumas de poliuretano, com máquina router CNC e ferramentas convencionais. Levantou-se parâmetros que se considerados resultarão em superfícies, com acabamento próximo do feito pelo corte a fio quente. Foram observadas características particulares para as espumas na usinagem, as superfícies obtidas nas usinagens apresentam forma similar ao molde, mostrando-se assim o cumprimento do objetivo em encontrar meios no processo de usinagem capazes de entregar a qualquer pessoa que venha a executar alguma usinagem deste material, valores de referência para início do trabalho.

Além das estratégias comentadas para a obtenção da superfície, vale destacar o uso de fresa de topo reto para a operação de acabamento, este resultando em acabamento muito satisfatório, e assim demonstrado mais uma vez as características particulares na usinagem das espumas. A router apesar de ter controlador e construção simples mostrou-se eficiente, alcançando resultados de forma e acabamentos muito além do esperado, visto que pouco se conhecia a respeito do comportamento das espumas quando usinadas.

Para projetos futuros fica a ideia de implantação de sensores de fim de curso, implantação de sistema de controle capaz de acionar a rotação do spindle via programa CNC e barreira eletrônica, visando a segurança do operador. Há algumas sugestões também quanto ao modo de fixação das espumas. Apesar de ter garantido boa fixação, ainda pode-se melhorar, dando mais sustentação próximo às bordas da peça, e consequentemente, poder usinar com maior profundidade de corte (ap), sem comprometer o acabamento na usinagem.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 6175**: Definição e classificação dos processos mecânicos de usinagem. 07/07/2015.
- ABNT (Associação Brasileira de Norma Técnica). **NBR ISO 3002-1**: Grandezas básicas em usinagem e retificação. 07/01/2013.
- BASHIR, W. *et al.*. **Alterations of Lumbosacral Curvature and Intervertebral Disc Morphology in Normal Subjects in Variable Sitting Positions Using Whole-body Positional MRI**. Anais, Illinois Annual Meeting of the Radiological Society of North America (RSNA), 2006, p. 1.
- BATISTA, V. J. *et al.*. **Fabricação de assentos personalizados via modelagem em gesso, digitalização 3D e usinagem CNC**. In Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Anais [recurso eletrônico], Rio de Janeiro, RJ: ABCM, 2009.
- BERSCH, R.. **Introdução à Tecnologia Assistiva**. Disponível em: https://www.assistiva.com.br/Introducao_Tecnologia_Assistiva.pdf. Acesso em: 24 de agosto de 2019.
- BRIENZA, D. M. *et al.*. **A manufacturing system for contoured fo cushions**. In: **Journal of Rehabilitation Research and Development**, vol. 29, n. 4, 1992.
- CARLSON, J. M. *et al.*. **Seating orthosis design for prevention of decubitus ulcers**, *Journal of Prosthetics and Orthotics*, vol. 7, no. 2, pp. 51-60, 1995.
- CELANI, G.. **A Importância da Pesquisa na Formação de Docentes: O Caso da “Informática Aplicada à Arquitetura e Urbanismo”**, 2007. 10 f. Notas de Aula. Digitalizada.
- CIM. **Fresas: Para realizar rebaixos em superfícies**, Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/>. Acesso em 09 de Novembro de 2019.
- DINIZ, A. E. *et al.*. **Tecnologia da usinagem dos materiais**, Editora Artliber, 3ª. Edição, São Paulo, 2001.
- DONG, H.. **Shifting paradigms in Universal Design**. In: **Universal Access in HCI**, p. 66-74, Springer Berlin, 2007.
- FERRARESI, D.. **Fundamento da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1995. 751p.
- INER. **Tabela de biotipo**. Disponível em: http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/milling_updown.html. Acesso em: 09 de Novembro de 2019.

LIMA, A. *et al.*. **Influência da profundidade de corte e do avanço na força do corte no fresamento de faceamento**. CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. São Luís-MA, 2013.

MACHADO, A. R. *et al.*. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2a. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

MITSUBISHI. **Movimentos para fresamento**. Disponível em: http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/milling_updown.html. Acesso em: 09 de Novembro de 2019.

MORAES, H. S.. **Projeto conceitual de sistemas de assento para cadeira de rodas: uma abordagem sistemática**. Dissertação (mestrado) - UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Design. Porto Alegre-RS, 2009.

SCHEIBLER, D. K.. **Método de digitalização de um corpo sólido**. Bolsa de pesquisa (GDMAES) - IFSC. Engenharia Mecatrônica. Florianópolis-SC, 2019.

SILVA, F. P.; BERETTA, E. M.; KINDLEIN JUNIOR, W.. **Avaliação da usinabilidade de espumas de poliuretano flexível**. Anais do VI Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, ABCM, Caxias do Sul-RS, 2011.

SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L.. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/ CNC – Princípios e aplicações**. Artliber Editora, 336 p., São Paulo-SP, 2009.