

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ESTUDO DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA O  
MICROFRESAMENTO DE MOLDES PARA DISPOSITIVOS  
MICROFLUÍDICOS**

**Eng. Marcelo Octavio Tamborlin**

Santa Bárbara d'Oeste  
Abril 2018

**ESTUDO DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA O  
MICROFRESAMENTO DE MOLDES PARA DISPOSITIVOS  
MICROFLUÍDICOS**

**Área de Concentração:** Engenharia do Produto e do Processo

**Linha de Pesquisa:** Engenharia do Processo

**Eng. Marcelo Octavio Tamborlin**

**Orientador: Prof. Dr.-Ing. Klaus Schützer**

**Co-orientadora: Dra. Luciana Wasnievski S. L. Ramos**

Dissertação apresentada à banca para o exame de defesa no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Metodista de Piracicaba.

Santa Bárbara d'Oeste  
Abril 2018

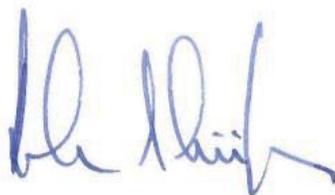
Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIMEP  
Bibliotecária: Marjory Harumi Barbosa Hito - CRB-8/9128.

T155e	<p>Tamborlin, Marcelo Octavio</p> <p>Estudo dos parâmetros de corte para o microfresamento de moldes para dispositivos microfluídicos / Marcelo Octavio Tamborlin. – 2018.</p> <p>81 f. : il. ; 30 cm.</p> <p>Orientador: Prof. Dr.-Ing. Klaus Schützer. Coorientadora: Profa. Dra. Luciana Wasnievski da Silva de Luca Ramos.</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Metodista de Piracicaba, Engenharia de Produção, Santa Bárbara d'Oeste, 2018. Inclui Bibliografia.</p> <p>1. Gabaritos e Moldes. 2. Fresagem. I. Schützer, Klaus. II. Ramos, Luciana Wasnievski da Silva de Luca. III. Título.</p> <p>CDU – 658.5</p>
-------	---

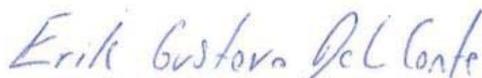
# ESTUDO DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA O MICROFRESAMENTO DE MOLDES

**MARCELO OCTÁVIO TAMBORLIN**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 27 de março de 2018, pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:



Prof. Dr. -Ing. Klaus Schützer - UNIMEP  
Presidente e Orientador



Prof. Dr. Erik Gustavo Del Conte  
UFABC



Profa. Dra. Maria Rita Pontes Assumpção  
UNIMEP

## **Agradecimentos**

Ao Professor Dr.-Ing. Klaus Schützer, e a Dra. Luciana Wasnievski da Silva de Luca Ramos pela orientação e incentivo para a conclusão deste trabalho.

À equipe do Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura (SCPM), Bruno Henrique Claus, Carolina Sallati, Felipe Alves de Oliveira Perroni, Julia de Andrade Bertazzi, Letícia Francischini Rodrigues, Marcela Santana da Silva Romão, Matheus Franco Soares e Quinhones Santana, pelo apoio, incentivo e orientação.

À equipe do IPT, Antonio Militao de Azevedo Lima, Danae Lopes Francisco e Renato Spacini de Castro pelo suporte para execução dos experimentos.

Aos parceiros do projeto Micro-O Christian Raffaello Baldo, Erik Gustavo Del Conte, Jan Mewis e Simon Thom, que me auxiliaram no trabalho e no intercambio.

À minha família, por todo o suporte e incentivo, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado, e todos os outros que direta ou indiretamente fizeram parte da conclusão desse trabalho.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa de estudos.

## Resumo

Processos de fresamento têm evoluído e alcançaram exatidão na faixa de micrômetros, permitindo novas aplicações em uma nova escala de tamanho. Com isso, surgiram problemas não encontrados no fresamento convencional. Tais problemas podem ser minimizados com estudos dos parâmetros de corte, possibilitando a fabricação de moldes para dispositivos microfluídicos. Os parâmetros de corte profundidade de corte, largura de corte, velocidade de avanço e rotação da ferramenta foram sistematicamente variados em experimentos de microfresamento, para avaliar sua influência na rugosidade superficial, por meio de análises de correlação. Após os experimentos, foram escolhidos os valores mais adequados para a aplicação, e usinado um molde teste para validação do estudo. As superfícies obtidas nos experimentos estão entre as classes N1 e N3, que são as classificações com menor valor de rugosidade superficial da norma NBR 8404/1984. Os parâmetros profundidade de corte e velocidade de avanço possuem maior influência na rugosidade superficial, apresentando valores limites para evitar efeitos negativos na superfície. Os parâmetros largura de corte e rotação apresentam menor influência na rugosidade superficial, permitindo maior liberdade para otimizações do processo quando combinados aos outros parâmetros. A rugosidade superficial do molde gerada no fresamento está na classe N1 da norma, que é comparável a processos como superacabamento, lapidação e polimento. Com os experimentos, foram identificados valores de parâmetros de corte que produzem rugosidade superficial adequada para a aplicação do molde, dispensando processos posteriores de acabamento, viabilizando o microfresamento de moldes para dispositivos microfluídicos.

**Palavras-chave:** Microfresamento, Parâmetros de corte, Moldes para dispositivos microfluídicos.

## Abstract

Milling processes evolved and achieved accuracy in the micrometer range, permitting new applications in a new size scale. This led to problems not encountered in conventional milling. Such problems can be minimized with studies of the cutting parameters, allowing the production of molds for microfluidic devices. The cutting parameters: cutting depth, cutting width, feed and spindle speed were systematically varied in micro milling experiments, using correlation analysis to evaluate their influence on the obtained surface roughness. The most appropriate values for the application were chosen and a test mold was machined to validate the study. The obtained surfaces are between classes N1 and N3, the lower value surface roughness classes of the standard NBR 8404/1984. The parameters cutting depth and feed have greater influence on surface roughness, showing clear limits to avoid negative effects on the surface. The parameters cutting width and spindle speed have less influence on surface roughness, allowing freedom for process optimizations when combined with other parameters. The mold surface roughness generated in milling is in the standard's N1 class, which is comparable to processes such as superfinishing, lapping and polishing. In the study, values of cutting parameters that produce a surface roughness suitable for the mold application were identified, eliminating the need for later finishing processes, making viable the micro milling of molds for microfluidic devices.

**Keywords:** Micro milling, Cutting parameters, Molds for microfluidic devices.

## Sumário

1	Introdução .....	1
1.1	Cenário atual na indústria .....	1
1.2	Foco do trabalho.....	2
1.3	Estrutura do trabalho .....	3
2	Revisão bibliográfica.....	5
2.1	Processos para fabricação de microcomponentes.....	5
2.2	Microfresamento.....	8
2.3	Parâmetros de corte no microfresamento .....	9
2.4	Redução de escala: do macrofresamento ao microfresamento .....	11
2.5	Vibração na interação entre ferramenta e peça .....	14
2.6	Ferramentas de microfresamento .....	20
2.7	Máquina ferramenta para processos de Microfresamento .....	22
2.8	Moldes para dispositivos microfluídicos .....	23
3	Objetivo e método do trabalho .....	25
3.1	Projeto Micro-O .....	25
3.2	Método de trabalho.....	26
3.3	Materiais utilizados no trabalho .....	29
3.3.1	Material .....	29
3.3.2	Máquina ferramenta .....	30
3.3.3	Ferramentas .....	31
3.3.4	Equipamentos de medição .....	33
3.3.5	Softwares .....	34

4	Desenvolvimento do trabalho .....	35
4.1	Treinamento .....	35
4.2	Planejamento dos experimentos.....	35
4.3	Experimentos de parâmetros de corte .....	39
4.4	Análise dos resultados dos experimentos.....	42
4.5	Planejamento da fabricação do molde.....	46
4.6	Fabricação, medição e análise do molde.....	50
5	Resultados e discussão.....	52
5.1	Resultados da primeira rodada de experimentos.....	54
5.2	Resultados da segunda rodada de experimentos .....	57
5.3	Resumo dos resultados dos experimentos de parâmetros de corte.....	60
5.4	Resultados da usinagem do molde.....	61
6	Conclusões.....	63
7	Bibliografia.....	65

## Lista de figuras

Figura 1: Processos de micromanufatura. Traduzida de Piljek [13].	6
Figura 2: Exemplos de componentes obtidos com microusinagem [14].	7
Figura 3: Principais parâmetros de corte no fresamento.	9
Figura 4: Geometria do processo de fresamento. Adaptado de Altintas [21].	10
Figura 5: Espessura mínima de cavaco. Traduzido de Chae et al. [17].	12
Figura 6: Vibrações auto excitadas - Adaptado de Altintas [21].	15
Figura 7: Efeito do chatter na superfície da peça e sua simulação [32].	16
Figura 8: Formação do SLD a partir da TF de um sistema [36].	18
Figura 9: SLD previsto e dados experimentais de avaliação [37].	19
Figura 10: microfresas comparadas a outros objetos [41].	21
Figura 11: Demonstração de um processo de microinjeção [45].	24
Figura 12: Método de trabalho.	27
Figura 13: Microestrutura do aço ABNT H13. Foto após Ataque com nital 2%.	30
Figura 14: Centro de usinagem de ultraprecisão KERN Evo.	31
Figura 15: Fresa de topo AFH50526-004A da ARNO werkzeuge.	32
Figura 16: Bruker DektakXT® na sala limpa do IPT.	33
Figura 17: Modelo para os experimentos de parâmetros e corte.	36
Figura 18: Representação da trajetória do ponto central da ferramenta.	37
Figura 19: Montagem experimental.	40
Figura 20: degraus 19 a 28 da primeira rodada de experimentos.	41
Figura 21: Peça utilizada na primeira rodada de experimentos.	42
Figura 22: Modelo do dispositivo microfluídico.	46
Figura 23: Modelo do molde.	47
Figura 24: Operações de acabamento do molde.	48
Figura 25: Molde concluído na KERN Evo.	50
Figura 26: Imagens de superfícies do molde.	50

Figura 27: Degraus 1 a 18: Ra comparado com os parâmetros de corte. ....	54
Figura 28: Degraus 19 a 36: Ra comparado com os parâmetros de corte. ....	55
Figura 29: Degraus 1 a 36: Ra comparado aos parâmetros de corte. ....	56
Figura 30: Fotos dos degraus 19 a 36 no microscópio ótico digital. ....	57
Figura 31: Degraus 19 a 36: Ra comparado aos parâmetros de corte. ....	58
Figura 32: Segunda rodada: Ra comparado aos parâmetros de corte. ....	60

### **Lista de tabelas**

Tabela 1: Composição química do aço ABNT H13. ....	30
Tabela 2: Parâmetros de corte utilizados na primeira rodada de experimentos. ....	37
Tabela 3: Parâmetros de corte utilizados na segunda rodada de experimentos. ....	45
Tabela 4: Dados do processo de fabricação do molde. ....	47
Tabela 5: Resultados dos experimentos de parâmetros de corte. ....	52
Tabela 6: Norma NBR 8404/1984 classes de rugosidade [50]. ....	53
Tabela 7: Ra do molde nas diferentes regiões medidas. ....	62

## Lista de siglas

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
EDM	Electrical Discharge Machining
EMA	Experimental Modal Analysis
FEA	Finite Element Analysis
FFT	Fast Fourier Transform
FRF	Frequency Response Function
HSM	High Speed Machining
LBM	Laser Beam Machining
LIGA	Lithographie, Galvanoformung, Abformung
MEMS	Micro Electromechanical Systems
MQL	Minimum Quantity Lubrication
NC	Numeric Control
SLD	Stability Lobe Diagram
TF	Transfer Function

## Simbologia utilizada

$a_p$  = profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]

$a_e$  = largura de corte [ $\mu\text{m}$ ]

$d$  = diâmetro da ferramenta [mm]

$f_z$  = avanço por dente [ $\mu\text{m}/\text{dente}$ ]

$h$  = espessura de cavaco [ $\mu\text{m}$ ]

$h_m$  = espessura mínima de cavaco [ $\mu\text{m}$ ]

$n$  = velocidade de rotação da ferramenta [rpm]

$R_e$  = raio da aresta de corte da ferramenta [ $\mu\text{m}$ ]

$v_c$  = velocidade de corte [m/min]

$v_f$  = velocidade de avanço [mm/min]

# 1 Introdução

Há décadas processos de usinagem têm produzido componentes para todo tipo de produto nas mais variadas aplicações. Devido às demandas de mercado, como menores custos, maior qualidade e maior produtividade, processos de usinagem têm demonstrado grande evolução, principalmente no que diz respeito à exatidão das operações. Como exemplo, atualmente existem máquinas ferramenta com exatidão de posicionamento na faixa de sub micrômetros, com equipamentos comerciais chegando a 50 nanômetros [1].

## 1.1 Cenário atual na indústria

A manufatura contemporânea tem apresentado uma crescente demanda por microprodutos e microcomponentes, proveniente de diversos setores industriais. Algumas dessas aplicações são os *micro electromechanical systems* (MEMS), implantes médicos, dispositivos microfluídicos, sistemas de diagnósticos, micromotores, interruptores, sensores, entre outros [2].

Diversas tecnologias já existentes, como os processos LBM (*Laser Beam Machining*, ou Usinagem por Feixe de Laser), EDM (*Electrical Discharge Machining*, ou Usinagem por Descarga Elétrica) e LIGA (*Lithographie, Galvanoformung, Abformung*, ou Litografia, Galvanoplastia e Moldagem), apresentam certas limitações em relação à produção em massa, materiais que podem ser trabalhados e às geometrias que se podem obter [3].

A microusinagem permite a produção de peças miniaturizadas, bem como a usinagem de alta precisão de superfícies funcionais. As técnicas de microusinagem são baseadas em ferramentas de corte sólidas e também em ferramentas que utilizam feixes de energia (laser, elétrons e íons) para remoção de materiais. O uso de feixes de energia, no entanto, apresenta limitações, como, por exemplo, a baixa

taxa de remoção de material e o baixo controle da estrutura tridimensional, além da necessidade de ambientes especiais para o uso dessas técnicas [4].

A utilização de ferramentas sólidas de corte pode superar algumas das limitações apresentadas pelas ferramentas com feixes de energia utilizando máquinas ferramenta de alta precisão para executar as operações de torneamento, fresamento, retificação, entre outros [4].

## 1.2 Foco do trabalho

O microfresamento baseado em operações convencionais de remoção de material possui vantagens no que se refere, principalmente, à maior variedade de materiais usináveis e à maior complexidade das estruturas tridimensionais [4]. Os campos de aplicação típicos do microfresamento são componentes para indústria óptica e moldes com microestruturas [5]. Porém, o comportamento do processo de microfresamento difere do comportamento do processo de fresamento convencional. A espessura do cavaco, o avanço por dente e o tamanho do grão do material estão na mesma grandeza do raio da aresta de corte, levando a comportamentos como o *ploughing*, não comumente observados nos processos de fresamento convencional. Com isso, as abordagens tradicionais usadas para descrever os fenômenos envolvidos no fresamento convencional (ou macro) não se aplicam neste caso [6].

O microfresamento vem ganhando visibilidade na área de pesquisa como um método potencial para substituição dos processos de EDM [7]. As principais vantagens são a maior taxa de remoção de material (até cinco vezes) e a exatidão dimensional. Entretanto, a aplicação industrial do microfresamento ainda depende de mais conhecimentos e do melhor entendimento de vários aspectos do processo, tais como o desgaste da ferramenta e a qualidade da superfície usinada. Na usinagem de materiais com baixa usinabilidade, a vida da ferramenta e as falhas prematuras

da ferramenta podem se tornar um grande problema por elevarem os custos e reduzirem a qualidade do produto usinado [8].

Para melhorar a eficiência do processo, o estudo dos parâmetros de corte é fundamental. Parâmetros como profundidade e largura de corte, velocidade de avanço por dente e rotação possuem grande influência na qualidade final das geometrias usinadas. No entanto, processos de microfresamento ainda não são amplamente compreendidos ou tão eficientes quanto os processos de fresamento convencional, e ainda existe grande necessidade de estudos e melhorias. O processo é necessário na indústria e sua viabilidade deve ser o foco de estudo em várias pesquisas [6]. Portanto, o seguinte trabalho tem como objetivo, estudar os parâmetros de corte para o acabamento de moldes em aço-ferramenta utilizados na fabricação de dispositivos microfluídicos. Como resultados do trabalho, são esperados conjuntos de parâmetros de corte apropriados para a aplicação, que possibilitem uma qualidade superficial compatível com a aplicação e com outros processos concorrentes, possibilitando a fabricação eficiente de moldes para dispositivos microfluídicos.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

Este trabalho é estruturado em sete capítulos, apresentados a seguir, com uma breve descrição do respectivo conteúdo.

**Capítulo 2 - Revisão bibliográfica:** Nesta seção serão apresentados o cenário atual da indústria e da pesquisa no que diz respeito ao microfresamento, e os conceitos relevantes para o entendimento do trabalho.

**Capítulo 3 - Objetivo:** Este capítulo descreve o objetivo do trabalho e o Projeto Micro-O.

**Capítulo 4 - Materiais e métodos:** Capítulo onde serão apresentados os materiais e equipamentos disponíveis para o trabalho e o método utilizado para realização do trabalho.

**Capítulo 5 - Desenvolvimento:** Seção onde estão descritos o desenvolvimento dos experimentos e as análises realizadas para o trabalho.

**Capítulo 6 - Resultados:** Contém a descrição e discussão dos resultados obtidos a partir dos experimentos e análises.

**Capítulo 7 - Conclusões:** Neste capítulo, são apresentadas as conclusões, dificuldades e sugestões para trabalhos futuros.

**Capítulo 8 - Referências:** Seção contendo a lista de referências utilizadas neste trabalho.

## 2 Revisão bibliográfica

Nesta seção serão apresentados o cenário atual da indústria e da pesquisa no que diz respeito ao microfresamento, assim como outros processos de micromanufatura, suas vantagens e desvantagens. Logo após, serão apresentados conceitos relevantes para o processo de microfresamento, e sua diferença em relação ao fresamento convencional, conduzindo para a descrição dos parâmetros de corte do processo e questões relativas ao *Chatter* (trepidação ou vibração na usinagem). Em seguida serão apresentadas considerações sobre as ferramentas e máquinas utilizadas para o microfresamento, finalizando com tópicos sobre moldes para dispositivos microfluídicos.

### 2.1 Processos para fabricação de microcomponentes

A demanda por componentes e produtos miniaturizados na indústria mundial tem crescido com o passar do tempo. A fabricação de peças cada vez menores tem sido motivada pela busca por novas aplicações, melhor desempenho, menor custo e maior qualidade [9]. No passado, as peças dos relógios de pulso eram basicamente as únicas peças miniaturizadas produzidas por processos de manufatura em escala industrial. No entanto, as mudanças sociais e a evolução da tecnologia demandaram uma produção cada vez maior de produtos miniaturizados em diferentes áreas da indústria [10].

Um componente pode ser definido como microdispositivo quando possuir pelo menos duas dimensões críticas na faixa do sub-milímetro [11]. Outra definição sugere que um microdispositivo se caracteriza como um componente que apresenta características funcionais ou, ao menos, uma dimensão crítica significativamente menor do que 0,1 mm na ordem de micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), enquanto todo o dispositivo pode ter dimensões maiores [12].

Nas últimas três décadas, foram desenvolvidas novas técnicas de microfabricação, não baseadas em litografia, que incluem: micro EDM, microprocessos com corte/deformação/furação a laser, microcorte mecânico, microcorte mecânico, microextrusão, microestampagem e microinjeção, mencionadas na Figura 1. A microfabricação não baseada em litografia pode produzir produtos tridimensionais de alta exatidão, utilizando uma variedade de materiais e possuindo recursos que permitem dimensões variando de dezenas de micrômetros a alguns milímetros [13].

Processos baseados em técnicas de litografia já estão consolidados na indústria, principalmente na área eletrônica, sendo capazes de produzir componentes em escalas inferiores a um micrômetro [13]. Porém, processos baseados em litografia apresentam limitações, como menor número de materiais de trabalho e geometrias de componentes planos ou 2.5D. Já processos não baseados em litografia podem gerar geometrias 3D mais complexas e trabalham com mais tipos de materiais [13].

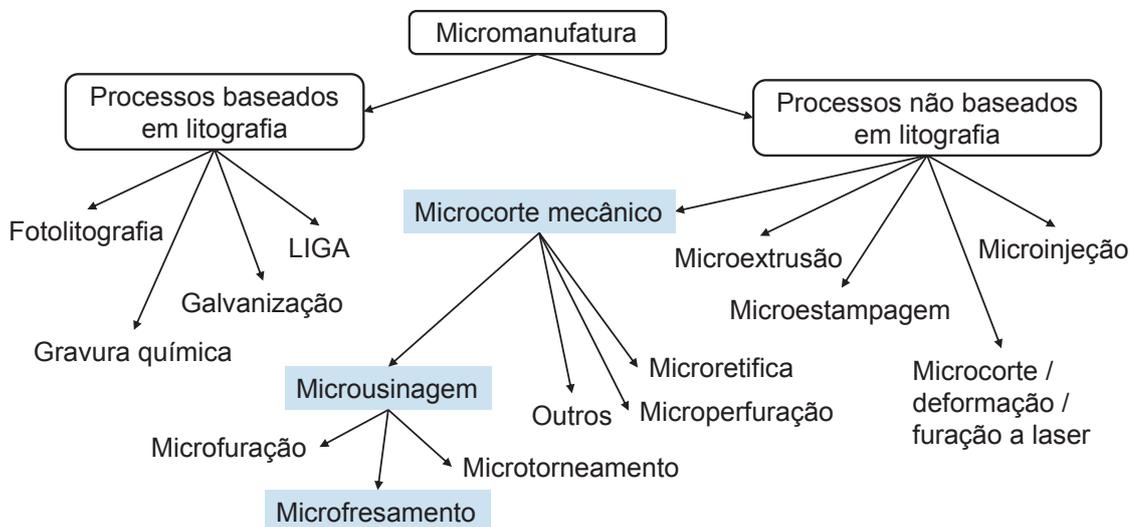


Figura 1: Processos de micromanufatura. Traduzida de Piljek [13].

Processos de remoção mecânica de material, como microtorneamento, microfresamento e microfuração, que são baseados em processos convencionais,

são utilizados para criação de ferramentas complexas para outros processos como microextrusão, microestampagem e microinjeção, citados na Figura 1.

Segundo Takács, Verö e Mészáros [3], a adaptação dos processos convencionais de remoção de material para escalas micrométricas é uma alternativa viável de produção. Processos de microusinagem possuem grande versatilidade em relação às geometrias possíveis, o que permite a fabricação de uma ampla gama de microprodutos. Tais processos apresentam grandes vantagens econômicas e também flexibilidade dos lotes que podem ser produzidos, sendo necessário apenas o desenvolvimento de ferramentas adequadas para os materiais que se deseja usinar.

O microfresamento é uma das técnicas de microusinagem mais flexíveis, em relação as geometrias obtidas, com isso se tornou uma das técnicas mais utilizadas. A Figura 2 ilustra exemplos de microcomponentes comparados em tamanho a um alfinete com 6 mm de comprimento de haste. Estes componentes foram desenvolvidos a partir de processos de microusinagem e são utilizados para a geração e manipulação de implantes médicos.



*Figura 2: Exemplos de componentes obtidos com microusinagem [14].*

A definição de microusinagem se aplica a um processo que lida com o desenvolvimento de produtos que apresentam características funcionais ou, ao menos, uma dimensão na ordem de micrômetros ( $\mu\text{m}$ ) [12]. Outro autor, cita que a expressão micro, em microusinagem, representa o trabalho com dimensões entre 1 e 999  $\mu\text{m}$  [10].

Outros autores acreditam que o corte em microescala pode ser definido como a remoção de material com a dimensão da espessura de cavaco não deformado variando entre nanômetros e alguns micrômetros [15]. Assim sendo, alguns processos de retificação podem ser considerados microusinagem [10].

Alguns autores definem microusinagem do ponto de vista da ferramenta utilizada. Assim, a microusinagem pode ser definida como a usinagem mecânica com ferramentas de corte menores que 1 mm e com aresta de corte com geometria definida [9]. Diferentes autores definem microusinagem de diferentes formas, mas todas as definições levam a uma em comum: processo de usinagem em que as dimensões da ferramenta, peça ou parâmetros de corte se encontram na faixa de micrômetros [16].

## 2.2 Microfresamento

O microfresamento e o fresamento convencional tem o mesmo princípio básico, com o corte e remoção do material por uma ferramenta giratória. Por essa razão, a transferência de toda a experiência e conhecimento desenvolvido para as operações de fresamento na escala macro é crucial, tanto para o desenvolvimento eficiente do microfresamento, quanto para a compreensão das limitações de sua aplicação [17].

Parâmetros como velocidade de corte  $v_c$ , velocidade de avanço  $v_f$ , profundidade de corte  $a_p$ , largura de corte  $a_e$  e avanço por dente  $f_z$  e velocidade de rotação da ferramenta  $n$ , ilustrados na Figura 3, podem ser transpostos para o

microfresamento, porém, com a devida atenção às grandezas utilizadas e aos efeitos de escala [6].

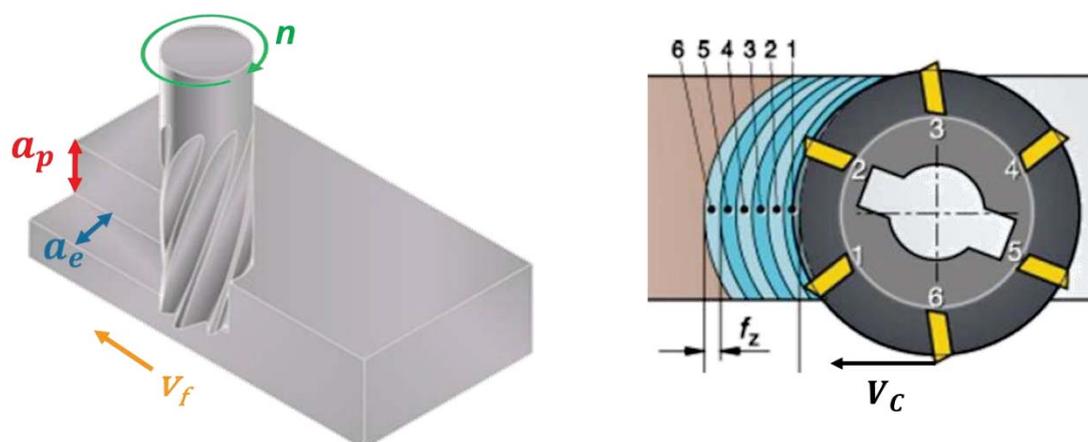


Figura 3: Principais parâmetros de corte no fresamento.

### 2.3 Parâmetros de corte no microfresamento

A determinação dos parâmetros de corte não pode basear-se totalmente nos conhecimentos do fresamento convencional, devido aos efeitos de escala e à menor resistência das microfresas [18].

Um parâmetro importante na usinagem é a velocidade de corte  $v_c$ . Para cada material da peça existem valores recomendados, previamente estudados, para melhores resultados. Este parâmetro representa a velocidade instantânea do ponto selecionado na aresta de corte em relação à peça, e depende do diâmetro da ferramenta  $d$  e da sua rotação  $n$ , como apresentado na equação (1), utilizada para o cálculo da velocidade de corte.

$$v_c = \frac{\pi \times d \times n}{1000} \quad (1)$$

Como as ferramentas possuem pequenos diâmetros o processo requer grandes rotações para se atingir as  $v_c$  recomendadas para cada material. Por exemplo para atingir uma  $v_c = 25,1$  m/min com uma ferramenta de diâmetro  $d = 0,2$  mm, é necessária uma rotação  $n = 40.000$  rpm. Tal  $v_c$  pode ser considerada baixa para uma boa formação de cavacos na maioria dos aços [19]. No microfresamento, para alcançar  $v_c$  adequadas aos materiais, são usuais rotações entre 30.000 e 100.000 rpm. No entanto, existem trabalhos com *spindles* (eixo-árvore) não convencionais com rotações de até 1.000.000 rpm [20].

Outro parâmetro importante é a velocidade de avanço  $v_f$ , que é definida como a velocidade relativa em que a ferramenta avança sobre a peça. O avanço por dente  $f_z$ , deriva do  $v_f$ , e é o avanço individual de cada dente da ferramenta na superfície da peça. O  $f_z$  determina a espessura de cavaco  $h$ , que varia entre o valor mínimo  $h = 0$  e máximo  $h = f_z$  durante o percurso da ferramenta, como ilustrado na Figura 4.

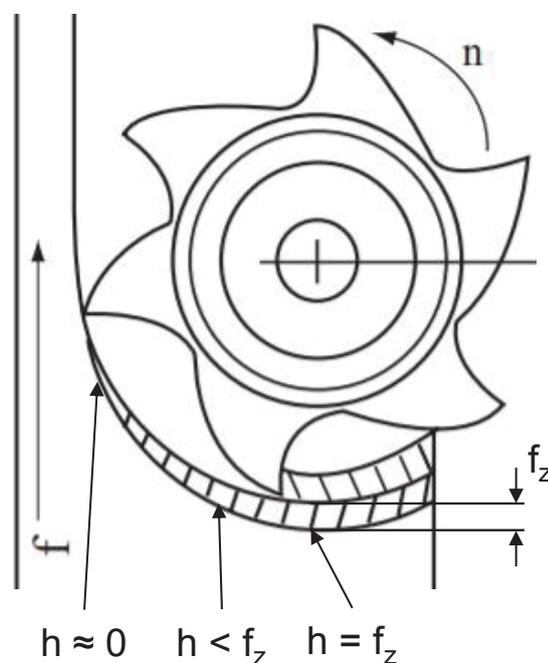


Figura 4: Geometria do processo de fresamento. Adaptado de Altintas [21].

No microfresamento,  $v_f$  e  $f_z$  têm ordem de grandeza consideravelmente menor. Os avanços podem ser cerca de 1000 vezes menores que os avanços normalmente utilizados na macrousinagem [20]. Para que seja melhorado o desempenho do microfresamento, deve-se aumentar a razão entre a espessura do cavaco  $h$  e o raio da aresta de corte  $R_e$ . Devido à dificuldade em se diminuir o raio da aresta de corte de ferramentas com diâmetros tão pequenos, uma alternativa é o aumento do  $f_z$  [18]. Embora isso diminua a formação de rebarbas, ocorre um aumento nas forças de corte durante a usinagem, causando a flexão da ferramenta. Apesar do aumento das forças totais, contudo, o aumento da razão do  $h$  e do  $R_e$  pode promover um ângulo de saída mais favorável, melhorando a geometria do material removido e reduzindo as forças de corte específicas [18].

Outro parâmetro determinante é a profundidade de corte  $a_p$ . O valor desse parâmetro pode chegar a valores 30 vezes menores que em processos de fresamento convencional [20]. A largura de corte  $a_e$  também tem papel importante, este parâmetro representa a largura de material removido por corte e, combinado com os outros parâmetros, determina o volume de material removido. Pesquisas mostram que quanto menor o volume de material removido, melhor o acabamento e menores as forças de corte. Porém, esta alternativa aumenta os tempos de usinagem. Autores citam que por limitações das ferramentas e máquinas, as operações de microfresamento dificilmente são otimizadas em termos de remoção de material. O balanço entre acabamento superficial e tempo de processo é fundamental para a utilização do microfresamento em larga escala [6].

## **2.4 Redução de escala: do macrofresamento ao microfresamento**

Apesar de diversas semelhanças com o processo convencional de fresamento, algumas características específicas surgem com a redução das dimensões envolvidas nas operações. O *size effect*, ou efeito de escala, está certamente entre

os principais problemas, se não for o aspecto mais relevante, para ser tratado no processo de microfresamento.

O efeito de escala pode ser definido como o aumento substancial das forças de cisalhamento do material causado pela diminuição da espessura de cavaco  $h$  [22]. Com a redução tanto na espessura quanto na profundidade de corte, impurezas, defeitos e o próprio formato e orientação dos grãos do material afetam o processo de cisalhamento durante a deformação plástica [6]. O tamanho e a orientação dos grãos do material usinado, por exemplo, têm influência direta no processo de corte. Muitas vezes o tamanho do grão tem a mesma ordem de grandeza da aresta de corte da fresa, podendo ocasionar o desgaste prematuro da ferramenta, além da degradação da qualidade da superfície usinada e o aparecimento de rebarbas [2].

Com a redução do tamanho das ferramentas e de alguns parâmetros de corte, como o avanço por dente, a espessura de cavaco  $h$  pode chegar a um valor crítico, próximo a espessura mínima de cavaco  $h_m$ , onde pode não ocorrer a formação do cavaco durante o processo, deformando o material elasticamente sem a remoção total do material. Esse fenômeno é chamado de *ploughing* [23]. A Figura 5 mostra o conceito de espessura mínima de cavaco.

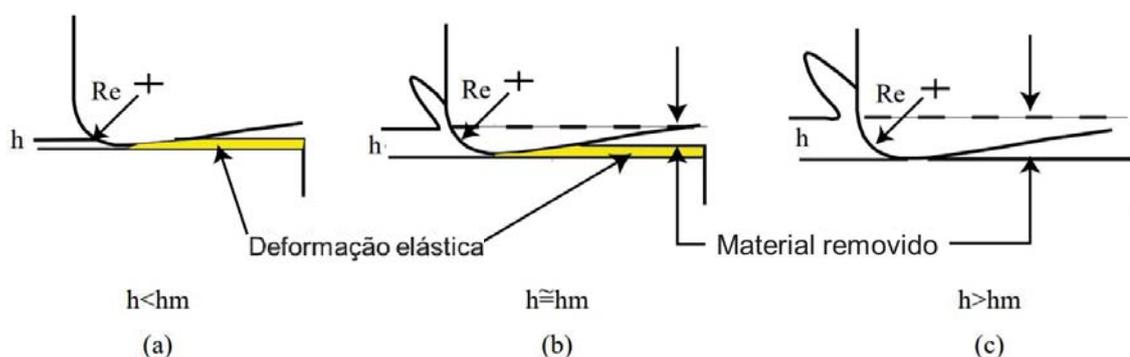


Figura 5: Espessura mínima de cavaco. Traduzido de Chae et al. [17].

O valor de  $h_m$  depende de variáveis do material e do raio da aresta de corte da ferramenta  $R_e$  como citado por Weule et al. [24]. Quando o valor de  $h$  é menor que o valor de  $h_m$ , não haverá remoção de cavaco, apenas deformação elástica do material, como ilustrado na Figura 5 (a). Quando o valor de  $h$  é aproximadamente o valor de  $h_m$ , existe a tendência de formação do cavaco, embora uma porção do material deformado ainda continue presente na superfície da peça como ilustrado na Figura 5 (b). Apenas com valores de  $h$  maiores que  $h_m$  grande parte do material é removida como cavaco, persistindo pouco material deformado elasticamente na superfície, como ilustrado na Figura 5 (c) [17]. No fresamento convencional, raramente os valores de  $h$  chegam próximos ao valor de  $h_m$ .

Alguns autores desenvolveram pesquisas sobre  $h_m$  e chegaram a conclusões próximas. Yuan et al. [25] concluíram que  $h_m$  varia de 25 a 30% da  $R_e$  com experimentos em alumínio utilizando medições de força de usinagem. Son et al. [26] usinando cobre, latão e alumínio chegaram a um  $h_m$  entre 20 e 25% da  $R_e$ . Já Ducobu et al. [27] utilizaram simulações de elementos finitos com liga de titânio e encontrou um valor médio de  $h_m$  de 25% da  $R_e$ . No trabalho atual, do raio da aresta de corte da ferramenta foi estimado em  $R_e = 2 \mu\text{m}$ . Com isso foi adotado o valor de espessura mínima de cavaco como sendo 30% do valor de  $R_e$ , portanto  $h_m = 0,6 \mu\text{m}$ .

Devido à redução de escala das operações, os sistemas de monitoramento e medição aplicados ao fresamento convencional não são, na maioria dos casos, adequados para identificar condições de corte ótimas para os processos de microfresamento. Por esta razão, modelos analíticos e mecânicos foram desenvolvidos nos últimos anos para explicar os fatores de impacto que dominam o microfresamento. Vários pesquisadores [28,29,30,31,32], desenvolveram ferramentas de usinagem virtual que utilizam a modelagem das forças de corte, a espessura e formação do cavaco, o raio da aresta de corte, a estabilidade do processo e a rigidez da ferramenta. Atualmente, os sistemas de usinagem virtual são

ferramentas adequadas para estimar a estabilidade do processo, a precisão da usinagem e a qualidade da peça [33]. A melhoria eficiente dos processos de microfresamento necessita da aplicação de técnicas avançadas de análise e modelagem para otimização do processo antes da manufatura, de forma a alcançar redução de custos e melhoria da qualidade.

## **2.5 Vibração na interação entre ferramenta e peça**

*Machining vibrations* ou *Chatter* (vibrações regenerativas ou vibrações na usinagem) é a vibração auto-excitada entre uma ferramenta de corte e uma peça de trabalho em processos de usinagem macro ou micro. O fenômeno é causado e mantido por variações nas forças de corte durante o processo e interfere na qualidade da superfície e causa desgaste rápido da ferramenta. Essas vibrações resultam em ondas e imperfeições na superfície usinada. Esse fenômeno afeta processos de usinagem como torneamento, fresamento, furação e até retificação [34].

O sistema ferramenta, *toolholder* (suporte de ferramenta) e *spindle* (eixo-árvore), possuem múltiplos graus de liberdade, com isso, apresentam a tendência de vibrar em frequências naturais, como explicado por Altintas [21]. De fato, é provável que o sistema vibre em mais de uma dessas frequências naturais ao mesmo tempo. Como consequência, essa vibração desloca a ponta da ferramenta durante o processo, deixando ondas na superfície usinada. A ondulação pode fazer com que o próximo corte apresente uma espessura de cavaco diferente da anterior, como ilustrado na Figura 6, causando variações nas forças de corte. Quando isso acontece, essas variações alimentam a vibração que já existe, aumentando sua intensidade [35].

Os efeitos negativos causados pela vibração incentivaram pesquisadores nas últimas seis décadas a desenvolverem diferentes teorias e modelos para prever e evitar tal fenômeno. A maioria das teorias e modelos desenvolvidos são aplicados ao

fresamento convencional. As recentes demandas industriais de componentes miniaturizados demandaram o desenvolvimento de novos modelos e técnicas de modelagem de vibração em processos de microfresamento. Os modelos matemáticos atuais permitem simular o *chatter* com bastante precisão [34].

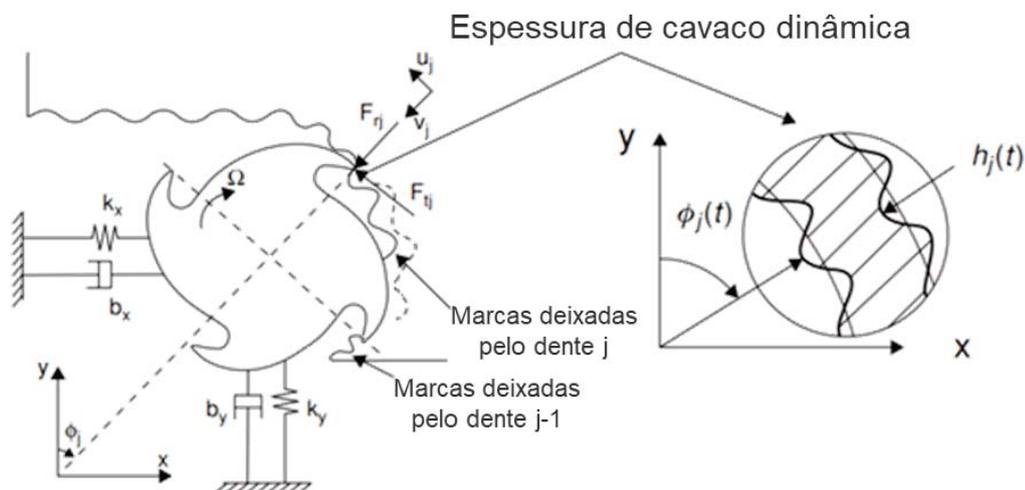


Figura 6: Vibrações auto excitadas - Adaptado de Altintas [21].

O trabalho de Uhlmann e Mahr [32] é um exemplo. Nele, foi modelado o fresamento de canais onde são consideradas a dinâmica da máquina ferramenta e da ferramenta, as forças de corte e a espessura de cavaco variável. Com esse modelo, instabilidades como o *chatter* podem ser simuladas em processos de microfresamento. Entre os resultados deste trabalho está a Figura 7, que ilustra o efeito do *chatter* na superfície da peça (a) e uma simulação da trajetória da aresta de corte induzida por esse fenômeno (b).

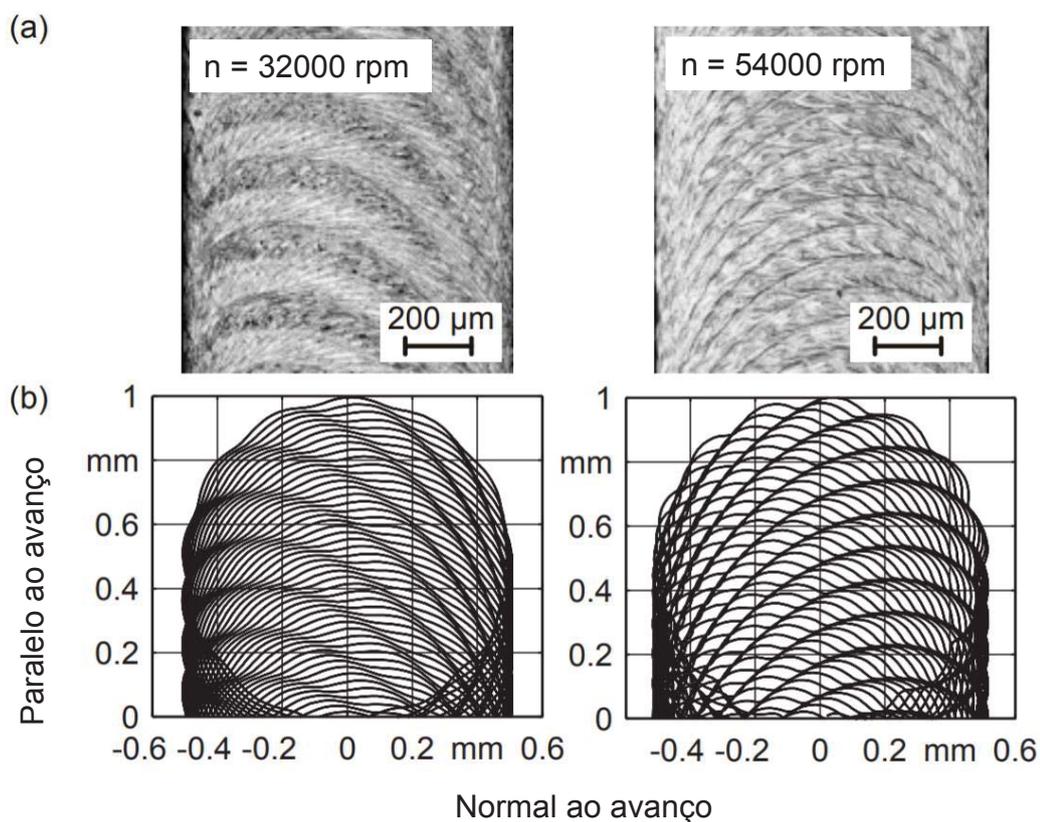


Figura 7: Efeito do chatter na superfície da peça e sua simulação [32].

Na prática, é sempre difícil evitar vibrações, embora algumas ações possam ser realizadas para reduzir o *chatter*. Aumentar a rigidez do sistema máquina-*spindle*-ferramenta é uma opção. A utilização de ferramentas ou suportes de ferramenta mais curtos, ou que suportem a ferramenta de forma mais rígida são outras alternativas [35]. Em alguns casos o suporte da peça pode ser melhorado também. Estes são exemplos de mudanças que podem tornar o processo menos propício para vibrar.

No fresamento com altas velocidades de rotação, como necessário para o microfresamento, existe uma opção de utilizar a *Stability lobes theory* (Teoria dos lóbulos de estabilidade). Quando utilizados valores de rotação baixos, os intervalos onde o processo apresenta estabilidade são reduzidos, dificultando sua utilização.

Na teoria dos lóbulos de estabilidade, certos valores específicos de rotação podem ser zonas estáveis. Dentro desses intervalos, a frequência de corte da

ferramenta (impacto da aresta de corte), é diferente das frequências naturais do sistema. Com isso, as forças de corte não estimulam a vibração da ferramenta nessas frequências, resultando em menor variação da espessura de cavaco  $h$  à cada rotação da ferramenta, de modo que o corte se torna mais estável. Nessas zonas estáveis, as forças de corte apresentam menos variações, reduzindo a auto-excitação de vibrações. Com isso a profundidade de corte pode ser aumentada, às vezes dramaticamente, aumentando a taxa de material removido, sem causar prejuízos à qualidade superficial do componente [35].

Existem alguns métodos para encontrar tais intervalos de rotação e gerar um diagrama de estabilidade (SLD ou *Stability lobes diagram*). O diagrama pode ser construído experimentalmente, variando sistematicamente rotação e profundidade de corte, encontrando conjuntos de parâmetros que apresentam menor efeito do *chatter* no processo, como ondas na superfície usinada e ruído de alta frequência durante o processo.

Os intervalos de rotação também podem ser encontrados através da análise modal do sistema, onde a estrutura da máquina é excitada por uma força externa e a resposta do sistema é medida. No fresamento convencional é utilizado o teste de impacto. Este teste envolve tocar a ferramenta com um martelo de impacto ou outro dispositivo que excite o sistema, e medir a função de resposta em frequência (FRF, ou *Frequency Response Function*) com equipamentos eletrônicos [35]. Às vezes, o FRF é mencionado como uma função de transferência (TF ou *Transfer function*) entre a entrada e saída de um sistema. O gráfico resultante pode ser utilizado para determinar os intervalos de rpm estáveis do sistema.

A Figura 8 apresenta uma TF e a formação de um lóbulo de estabilidade de um SLD. A região do gráfico acima da linha do lóbulo de estabilidade e próxima da frequência natural do sistema apresenta valores de parâmetros que resultam em um

processo instável, ou seja, as frequências de vibração originadas pelas forças de corte dos dentes da ferramenta estão próximas as frequências naturais do sistema, causando um aumento na amplitude da vibração e provocando o *chatter*. Já a região do gráfico abaixo da linha dos lóbulos de estabilidade apresenta parâmetros mais estáveis, onde a vibração causada pelas forças de corte não aumentam de intensidade por causa das frequências naturais. O diagrama normalmente relaciona a profundidade de corte com a rotação, permitindo a escolha de um conjunto de parâmetros que apresentem a melhor taxa de material removido possível.

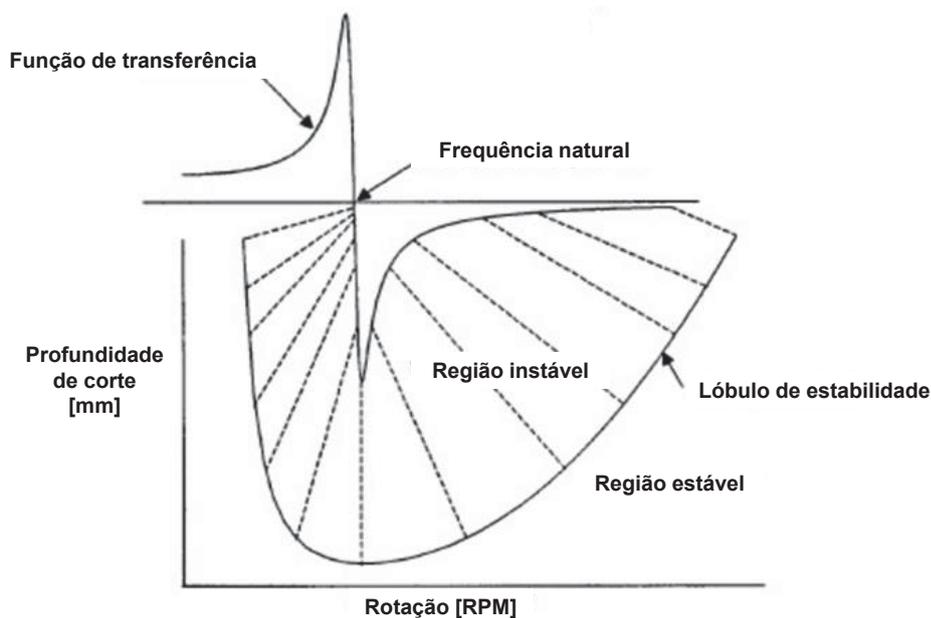


Figura 8: Formação do SLD a partir da TF de um sistema [36].

Como exemplo pode ser utilizado o trabalho de Jin e Altintas [37], onde a partir do FRF de microfresas gerou-se um SLD que, em seguida, foi avaliado experimentalmente. O SLD foi previsto para uma faixa de rotação de 10.000 a 120.000 rpm, considerando os quatro modos de vibração e amortecimento do processo. O SLD é comparado aos dados experimentais na Figura 9. Os símbolos no gráfico representam a usinagem de canais com diferentes profundidade de corte e rotações utilizando uma ferramenta com  $d = 0,6$  mm em aço AISI 1045. Os símbolos

pretos representam processos avaliados como estáveis e os vermelhos como instáveis. O símbolo nomeado como A possui os parâmetros: rotação  $n = 54.600$  rpm e profundidade de corte  $a_p = 40$   $\mu\text{m}$ . Já o símbolo B possui:  $n = 45.450$  rpm e  $a_p = 40$   $\mu\text{m}$  [37]. Este exemplo demonstra a aplicação real de um SLD, onde se pode manter uma profundidade de corte mais alta apenas aumentando a rotação e obtendo um processo estável.

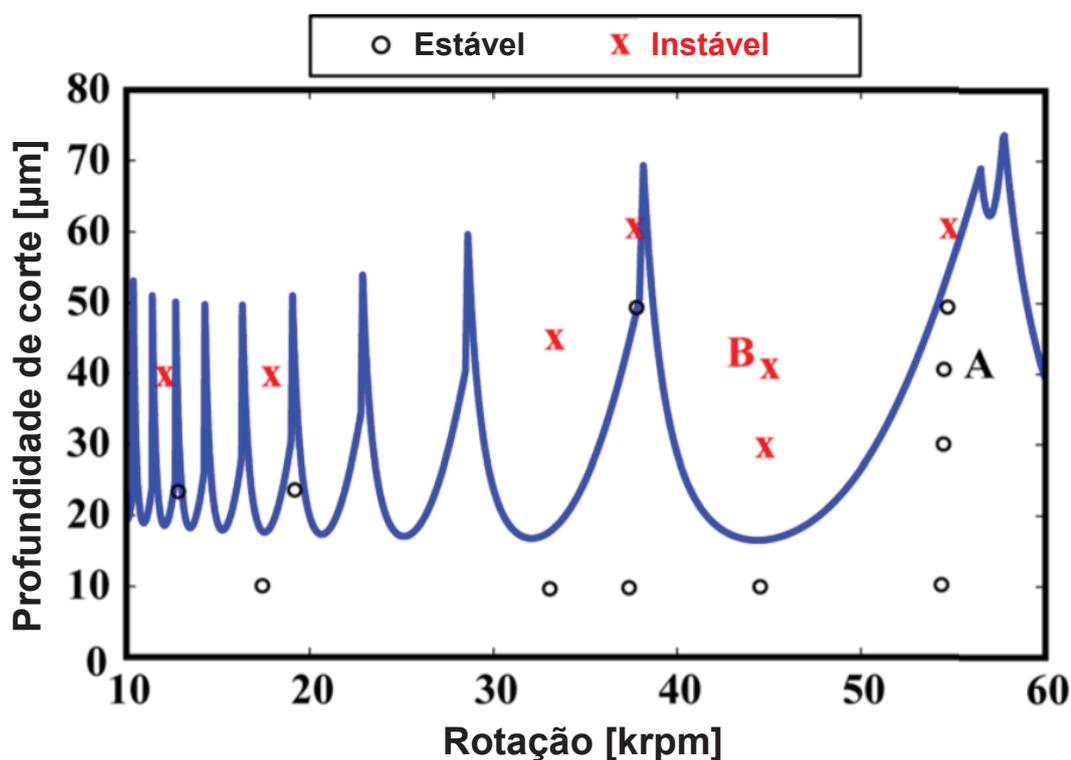


Figura 9: SLD previsto e dados experimentais de avaliação [37].

A previsão de vibração ou geração do SLD requer a identificação da FRF na ponta da ferramenta e o amortecimento do processo. O FRF na ponta da ferramenta é medido diretamente através de *experimental modal analysis* (EMA, ou análise modal experimental) utilizando um martelo de impacto e um sensor de captação de vibração no fresamento convencional [38]. É desejado medir o FRF diretamente na ponta da ferramenta com métodos não destrutivos, no entanto, nem sempre isso é possível para microferramentas, uma vez que os diâmetros da ferramenta são muito

pequenos, resultando em deformação plástica ou até quebra da ferramenta. Além disso, os testes de impacto normalmente são aplicados em uma faixa de frequência de excitação abaixo de 10 kHz, o que é menor que a frequência natural típica das microferramentas, que podem ultrapassar 100 kHz [37].

Na literatura foi encontrado um método para medir a dinâmica da ponta da ferramenta, sem danificá-la. O FRF foi adquirido através de um método de acoplamento de subestruturas chamado *receptance coupling* (acoplamento de receptores). Este método combina matematicamente a dinâmica do sistema máquina-ferramenta, eixo-árvore e suporte de ferramenta com a dinâmica da ferramenta para obter a dinâmica geral na ponta da ferramenta [39].

No trabalho de Park et al. a dinâmica do sistema máquina-suporte foi obtida pelo método EMA, com o impacto em um cilindro de mesmo diâmetro e composição que a haste ferramenta, com a medição utilizando um sensor de capacitância sem contato. A análise de elementos finitos (FEA) foi utilizada para obter a dinâmica da ferramenta. O procedimento analítico e experimental detalhado pode ser encontrado em [39,40].

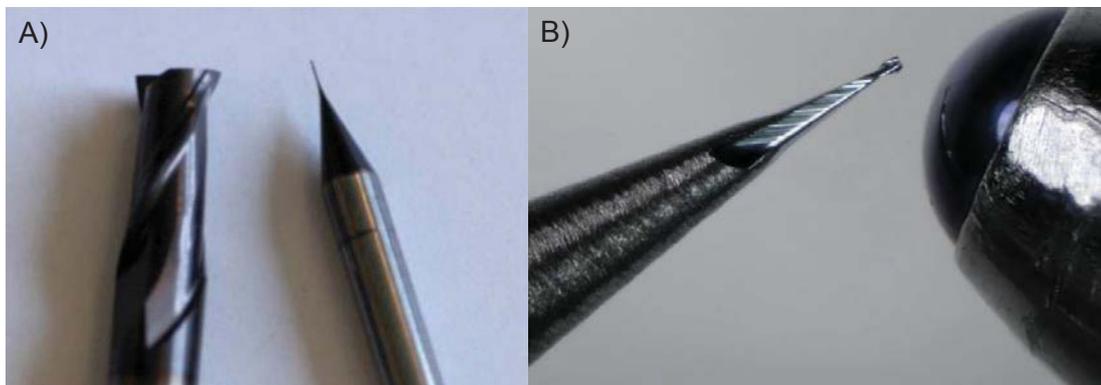
## **2.6 Ferramentas de microfresamento**

Um dos grandes desafios dos processos de microfresamento se encontra no desempenho da ferramenta. Em comparação com as ferramentas de fresamento convencionais, as microferramentas estão sujeitas a grandes deflexões e altas tensões durante a usinagem, devido ao tamanho, rigidez reduzida e efeitos de escala [17].

Para usinagem de geometrias inferiores a 1 mm, em alguns casos, são necessárias ferramentas de corte específicas com dimensões muito reduzidas. O diâmetro das microferramentas está na faixa de 25  $\mu\text{m}$  a 1.000  $\mu\text{m}$  com o raio da aresta de corte de 1 a 20  $\mu\text{m}$ . Devido ao tamanho reduzido, as microferramentas são

frágeis e podem quebrar facilmente se as forças de corte e as vibrações se tornarem excessivas [37].

A Figura 10 (A) demonstra a diferença de tamanho entre uma fresa de topo reto de tamanho convencional com 6 mm de diâmetro e uma ferramenta para microfresamento com 200  $\mu\text{m}$  de diâmetro. A Figura 10 (B) mostra a comparação entre uma ferramenta de 50  $\mu\text{m}$  de diâmetro e a ponta de uma caneta esferográfica convencional.



*Figura 10: microfresas comparadas a outros objetos [41].*

A diminuição da resistência da ferramenta devido ao diâmetro reduzido, exige um menor avanço por dente para evitar a deflexão ou até mesmo a quebra da ferramenta. As ferramentas miniaturizadas normalmente utilizadas são sujeitas a vibrações maiores do que as observáveis nas ferramentas convencionais, especialmente devido ao tamanho, reduzida rigidez e os efeitos de escala [42].

A vibração pode afetar a vida da ferramenta e as tolerâncias conseguidas na peça usinada. Devido ao seu tamanho reduzido, é mais difícil detectar o desgaste da aresta de corte, o que pode influenciar na quebra da ferramenta, nas tolerâncias e na qualidade das superfícies, ocasionando não conformidades na peça [43].

## 2.7 Máquina ferramenta para processos de Microfresamento

Quando se trabalha com componentes ou geometrias com dimensões em décimos de milímetros, imperfeições na faixa de um micrômetro podem ser o suficiente para inviabilizar a utilização desses componentes. Assim sendo, o microfresamento requer máquinas e ferramentas com maior exatidão e menor erro de forma [20]. Como exemplo, atualmente existem máquinas ferramenta com exatidão de posicionamento na faixa de sub micrômetros, com equipamentos comerciais chegando a 50 nanômetros [1].

Para o microfresamento, são necessárias as seguintes características para a máquina ferramenta, segundo Câmara et al. [6]:

- Alta rigidez estática e dinâmica;
- Alta estabilidade térmica dos materiais da estrutura;
- Eixos lineares, eixos rotacionais e sistemas de controle com alta precisão e curto tempo de resposta;
- Baixo erro para interpolação multieixos;
- Minimização e ou compensação de efeitos térmicos;
- Minimização e compensação de erros de posicionamento tanto estáticos quanto dinâmicos.

Para atingir as velocidades de corte necessárias utilizando fresas com diâmetros inferiores a 1 mm, são necessárias altas velocidades de rotação (turbinas de ar e motores elétricos sem escova são utilizados para esse fim) [6].

Como mencionado anteriormente, a profundidade de corte pode chegar a valores 30 vezes menores que em processos de fresamento convencional. Para atingir esses valores, as máquinas ferramenta tem que apresentar menor resolução nos eixos, boa repetibilidade e rigidez mecânica. Assim, normalmente não é possível realizar processos de microfresamento em máquinas convencionais [20].

## 2.8 Moldes para dispositivos microfluídicos

O futuro uso de dispositivos microfluídicos no mercado depende da busca de métodos que permitirão sua fabricação em grandes volumes e com baixo custo. Isto é especialmente importante para aplicações médicas onde, por questões de segurança e contaminação, os dispositivos devem ser descartáveis. Além disso, de um ponto de vista econômico, um dispositivo descartável não exigiria manutenção ou recalibração [44].

Para tais aplicações de mercado, os polímeros possuem diversas vantagens em relação a outros materiais, como o vidro e o silício, que já foram utilizados na construção de dispositivos microfluídicos. Tais materiais são obtidos a um custo relativamente baixo, requerem técnicas de processamento relativamente simples e podem exibir repetibilidade precisa na produção em massa [44].

Várias técnicas de micromoldagem estão disponíveis para a fabricação de dispositivos microfluídicos a partir de polímeros. Destas, a moldagem por microinjeção é uma técnica que oferece capacidades de produção em massa com custos relativamente baixos. Suas outras vantagens incluem tempos de ciclo curto, o potencial de automação total, replicação precisa e controle dimensional, bem como a existência de um *know-how* considerável, originada nos processos de moldagem por injeção convencional [44].

A moldagem por microinjeção é um processo que apresenta as seguintes etapas: a transferência de um material termoplástico na forma de grânulos é feita de um reservatório para dentro de uma câmara aquecida, de modo que se torne fundido. O material é então forçado, sob alta pressão, dentro de uma cavidade de molde, onde é submetido à pressão de retenção por um tempo específico para compensar a contração do material. O material se solidifica na forma do molde à medida que a temperatura do molde diminui para a temperatura de vitrificação do polímero. Após a

solidificação, o componente é ejetado, e o ciclo repetido. Um ciclo típico dura entre alguns segundos e poucos minutos [44]. A Figura 11 ilustra o processo de Microinjeção.

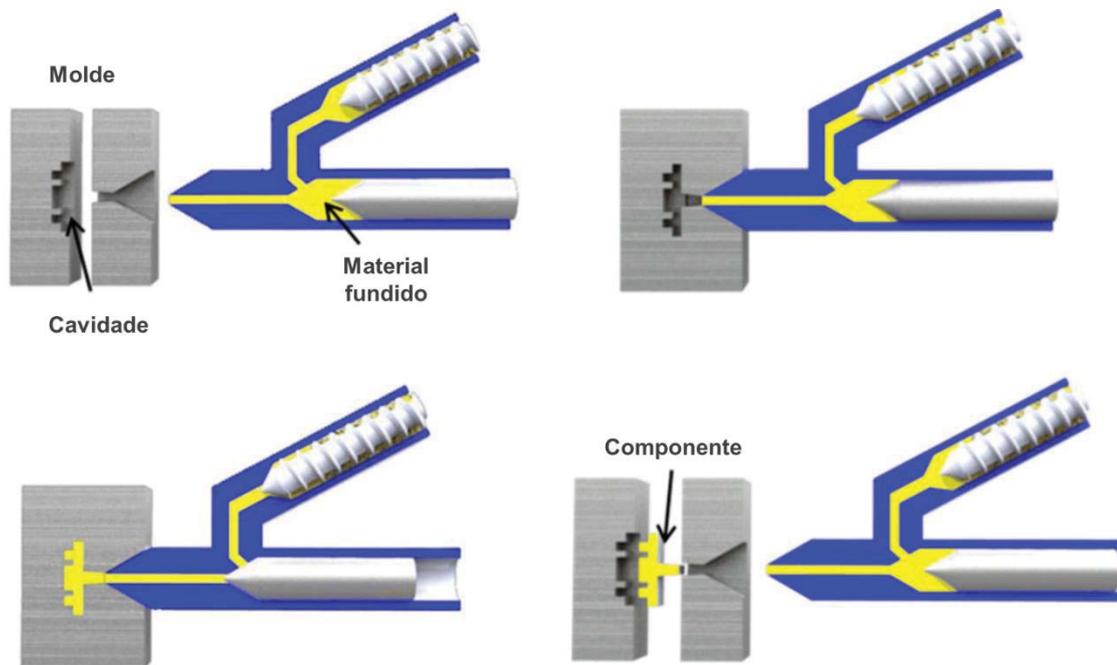


Figura 11: Demonstração de um processo de microinjeção [45].

### 3 Objetivo e método do trabalho

O tema e o objetivo deste trabalho estão vinculados ao projeto Micro-O, descrito no capítulo 3.1. A partir do proposto no projeto, o objetivo do presente trabalho é estudar os parâmetros de corte para o acabamento de moldes em aço-ferramenta utilizados na fabricação de dispositivos microfluídicos.

#### 3.1 Projeto Micro-O

O projeto *Micro Milling Process Optimization* (Micro-O ou Otimização do Processo de Microfresamento) visa à investigação da cadeia de manufatura de alta precisão a partir da modelagem digital da peça até a avaliação da sua qualidade final, focalizando na produção de moldes para dispositivos microfluídicos. O primeiro objetivo do projeto Micro-O é reduzir os tempos totais de processo e assim contribuir para o aumento da produtividade do microfresamento, mantendo os requisitos mínimos relativos à rugosidade, tolerâncias dimensionais e tolerâncias geométricas necessárias para a produção de micromoldes de injeção.

O objetivo do trabalho está vinculado ao *Work Package B*: análise e otimização das condições de corte, do projeto Micro-O, que possui as seguintes atividades propostas:

- WPA: Otimização do planejamento do processo de corte pela análise dos fatores de maior impacto na exatidão e nos tempos totais de processo, tanto na geração do caminho da ferramenta quanto no *setup* do processo;
- WPB: Análise e otimização das condições de corte visando à redução dos tempos totais de processo, sua segurança, desgaste da ferramenta, precisão da manufatura e redução de vibrações;
- WPC: Aprimoramento do controle dimensional da peça, com redução dos tempos totais envolvidos, mantendo a necessária exatidão de medição;

- WPD: Uso de simulação para análise e suporte para a otimização do processo nos assuntos pertinentes aos tópicos anteriores.

O projeto Micro-O faz parte do programa BRAGECRIM (Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura ou *Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology*), que apoia e financia projetos conjuntos de pesquisa entre grupos de pesquisa brasileiros e alemães na área de tecnologias de manufatura avançadas. O programa tem como objetivo gerar conhecimento tecnológico fundamental, possibilitando o desenvolvimento de soluções inovadoras para o aprimoramento da produtividade, qualidade e sustentabilidade das indústrias brasileiras e alemãs.

No escopo do BRAGECRIM, o projeto Micro-O é uma proposta conjunta entre o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), o *Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb* (IWF ou Instituto de Máquinas Ferramenta e Planejamento da Fábrica), da Universidade Técnica de Berlin, o Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura (SCPM) da UNIMEP e o Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas (CECS) da Universidade Federal do ABC.

### **3.2 Método de trabalho**

Neste tópico são apresentadas todas as etapas do método de trabalho. Neste primeiro tópico se encontra a descrição e objetivos principais de cada etapa do método, para a visão geral da organização do trabalho, os detalhes dos experimentos estão descritos no Capítulo 4: Desenvolvimento do trabalho. A Figura 12 apresenta as etapas do método e sua sequência de desenvolvimento. No lado esquerdo do diagrama estão as etapas realizadas no SCPM, como planejamentos e análises, que se basearam em ferramentas computacionais. No lado direito estão as etapas de microfresamento que utilizaram a máquina KERN Evo disponível no IPT.

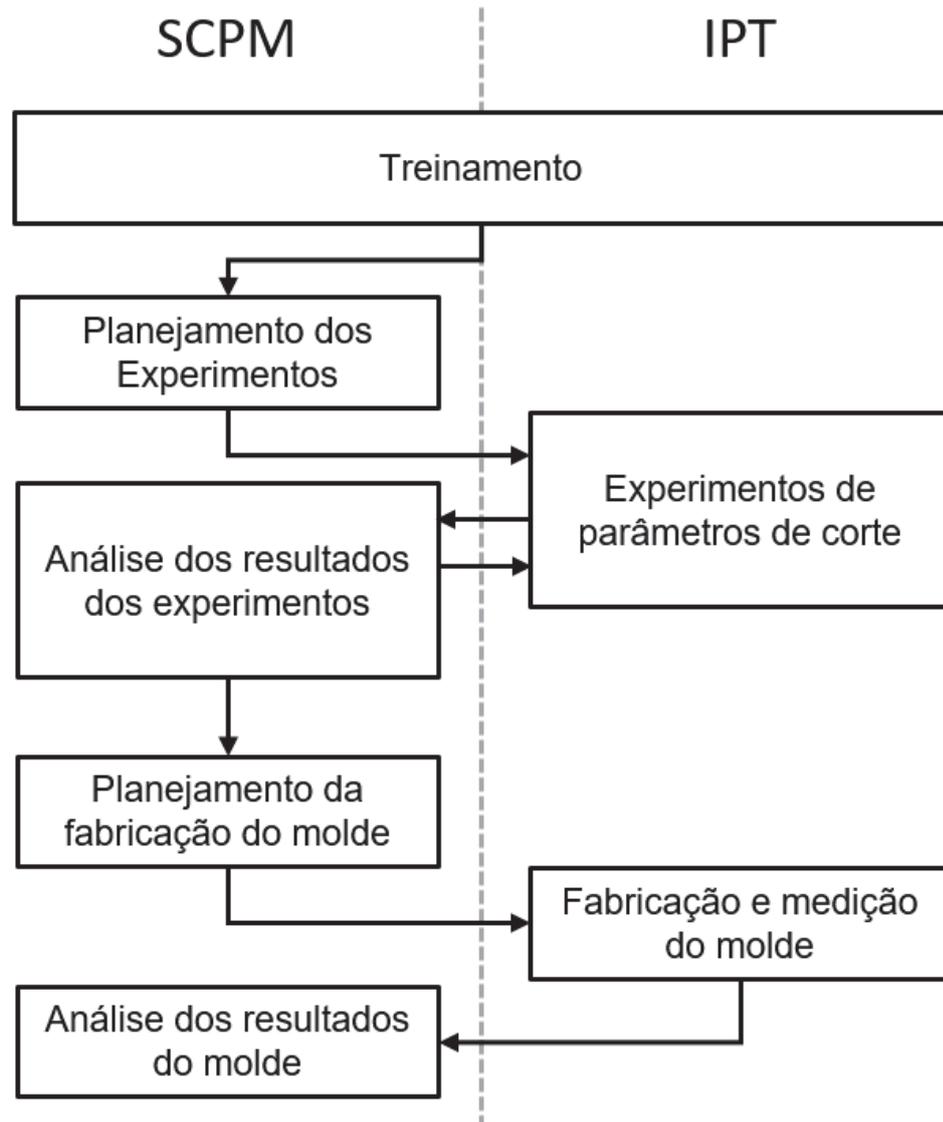


Figura 12: Método de trabalho.

**Pesquisa bibliográfica e treinamento:** Para o início do projeto, foram pesquisados temas e conceitos necessários para entendimento pleno do processo de microfresamento. Junto com a pesquisa foi realizado o treinamento com os equipamentos disponíveis e o acompanhamento dos experimentos dos parceiros de projeto.

**Planejamento dos experimentos:** Esta etapa utilizou os conhecimentos adquiridos na etapa anterior para a escolha dos parâmetros e seus respectivos

valores, buscando não somente valores adequados para a aplicação, mas valores que auxiliassem na definição do impacto de cada parâmetro na qualidade superficial, partindo de parâmetros recomendados pelo fabricante de ferramentas, e evoluindo até os parâmetros limite encontrados para o conjunto de equipamentos e materiais disponível. Esta etapa contém o planejamento e desenvolvimento das geometrias a serem usinadas, para possibilitar e facilitar a avaliação de cada variação nos parâmetros.

**Experimentos de parâmetros de corte:** Nesta etapa foram conduzidos testes de usinagem, com o objetivo de encontrar a combinação de parâmetros que produz a melhor qualidade superficial em termos de menor rugosidade superficial. Para os testes, foram variados os valores de parâmetros como: profundidade de corte, largura de corte, avanço por dente e rotação, com uma combinação única por faixa de corte.

**Análise dos resultados dos experimentos:** As faixas de corte dos experimentos de parâmetros de corte foram comparadas visualmente e por medições de rugosidade superficial. Com isso, é possível correlacionar, com ferramentas estatísticas, os resultados da rugosidade superficial com os parâmetros utilizados para determinar a influência de cada parâmetro na qualidade superficial. Com esses dados, pode-se determinar faixas de parâmetros alvo para otimizações, nos quais a redução ou aumento do valor de um parâmetro pode ser utilizada para redução de tempo de processo, sem prejuízo à qualidade superficial e atendendo aos requerimentos do projeto do molde.

**Planejamento da fabricação do molde:** Com a conclusão dos experimentos e experimentos descritos anteriormente, os dados foram discutidos, e as conclusões foram utilizadas para o desenvolvimento do processo de fabricação de um molde, para testes e injeção de dispositivos microfluídicos. O processo de fabricação foi desenvolvido e dividido em operações de desbaste, semiacabamento e acabamento.

**Fabricação e medição do molde:** Ao final do planejamento da fabricação do molde, para validação do trabalho, o processo de fabricação foi executado. Para avaliar a qualidade superficial do molde, foram realizadas medições para a determinação da rugosidade superficial.

**Análise dos resultados do molde:** Os dados gerados na fabricação e medição do molde foram analisados, discutidos e utilizados para gerar as conclusões deste trabalho e auxiliar trabalhos futuros.

### **3.3 Materiais utilizados no trabalho**

Os tópicos a seguir descrevem os, equipamentos, materiais, ferramentas e *softwares* disponibilizados para o desenvolvimento do trabalho. Os materiais deste trabalho foram cedidos pelos parceiros do projeto Micro-O. Os equipamentos foram disponibilizados pelo laboratório LMI (Laboratório de Micromanufatura) do IPT e os softwares pelo laboratório SCPM da UNIMEP. Nesses dois laboratórios foram realizados todos os experimentos de microfresamento necessários para o desenvolvimento deste projeto.

#### **3.3.1 Material**

O material utilizado em todos os experimentos foi o aço ferramenta ABNT H13 (X40CrMoV5-1) escolhido para o projeto Micro-O. A Tabela 1 apresenta sua composição química. A amostra possui granulação reduzida com grãos aciculares com tamanho entre um e 15  $\mu\text{m}$ , apresentada na Figura 13. Esta característica ajuda a evitar os efeitos de escala descritos na revisão bibliográfica. Esse material também é apropriado para moldes e comumente utilizado na cadeia de produção de componentes poliméricos.

Tabela 1: Composição química do aço ABNT H13.

F	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
90,85	0,40	1,00	0,35	5,20	1,30	0,90

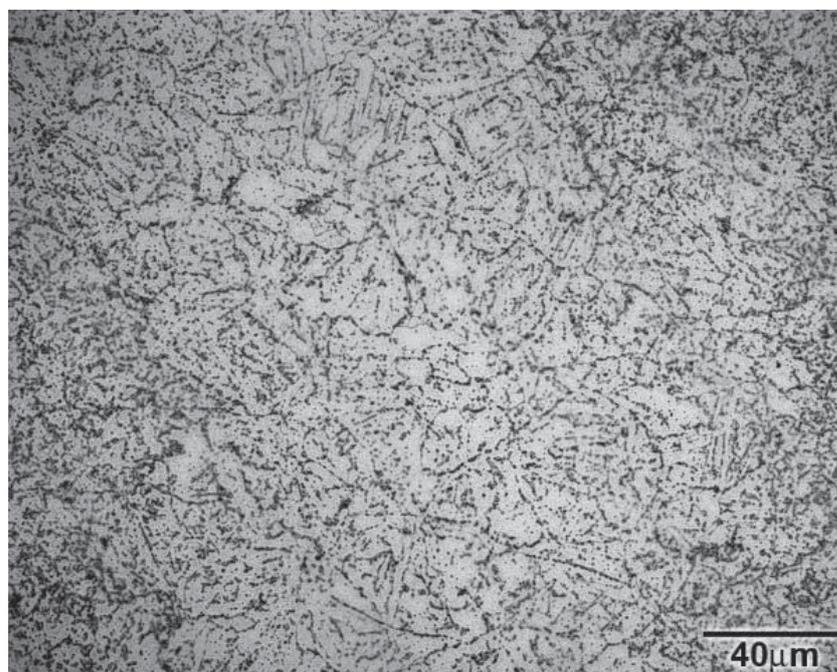


Figura 13: Microestrutura do aço ABNT H13. Foto após Ataque com nital 2%.

### 3.3.2 Máquina ferramenta

Os experimentos foram realizados no IPT, utilizando o centro de usinagem de ultraprecisão KERN Evo, da KERN Microtechnik GmbH. A Figura 14 apresenta o centro de usinagem KERN Evo.

A máquina KERN Evo possui especificações apropriadas para o processo de microfresamento. Entre as especificações estão a repetibilidade de posicionamento de  $\pm 0,5 \mu\text{m}$ , a resolução dos eixos lineares de  $0,1 \mu\text{m}$  e a tolerância posicional de  $\pm 1 \mu\text{m}$  nos três eixos lineares, segundo o fabricante. A KERN Evo dispõe de um eixo-árvore com limite máximo de rotação  $n = 50.000 \text{ rpm}$  alinhado com o eixo Z da máquina. Na montagem experimental, foram utilizados três eixos lineares (XYZ), com

os eixos X e Y montados na mesa da máquina. A máquina possui também dois eixos rotativos, B e C, que foram retirados por serem desnecessários para o trabalho. Essa ação reduz a massa da mesa melhorando a exatidão e reduzindo vibrações. A estrutura da KERN Evo é um monobloco de granito polimérico, similar a equipamentos de metrologia, e possui uma absorção de vibrações 10 vezes maior que as estruturas convencionais de ferro fundido (DIN GG20), além de uma menor condutividade térmica, reduzindo deformações e variações de temperatura, o que melhora a exatidão.



*Figura 14: Centro de usinagem de ultraprecisão KERN Evo.*

### **3.3.3 Ferramentas**

Para os experimentos foram utilizadas fresas de topo da linha Arno AFH. As ferramentas são apropriadas para trabalhos pesados, por exemplo com aço endurecido até 70 HRC, e para técnicas de HSM (*High Speed Machining*). Dessa linha, foram escolhidas as fresas de topo AFH50526 de diâmetros 8, 4, 2, 1 e 0,4

mm. As fresas são fabricadas a partir de *ultra micrograin carbide* com granulação reduzida (máximo 0,5  $\mu\text{m}$ ), recobertas com TiAlN (*Titanium aluminium nitride*), possuem duas arestas de corte e ângulo de hélice de 30°, segundo o catálogo do fabricante [46]. Para a usinagem de aços com as propriedades mecânicas do H13, utilizando a fresa de topo com  $d = 0,4$  mm, o fabricante recomenda os seguintes parâmetros de corte:  $a_p = 0,036$  mm,  $f_z = 0,021$  mm/dente,  $v_f = 1.210$  mm/min e  $n = 28.800$  rpm [46]. A Figura 15 mostra a fresa de topo AFH50526-004A com diâmetro de 0,4 mm e uma ampliação da ponta da ferramenta.

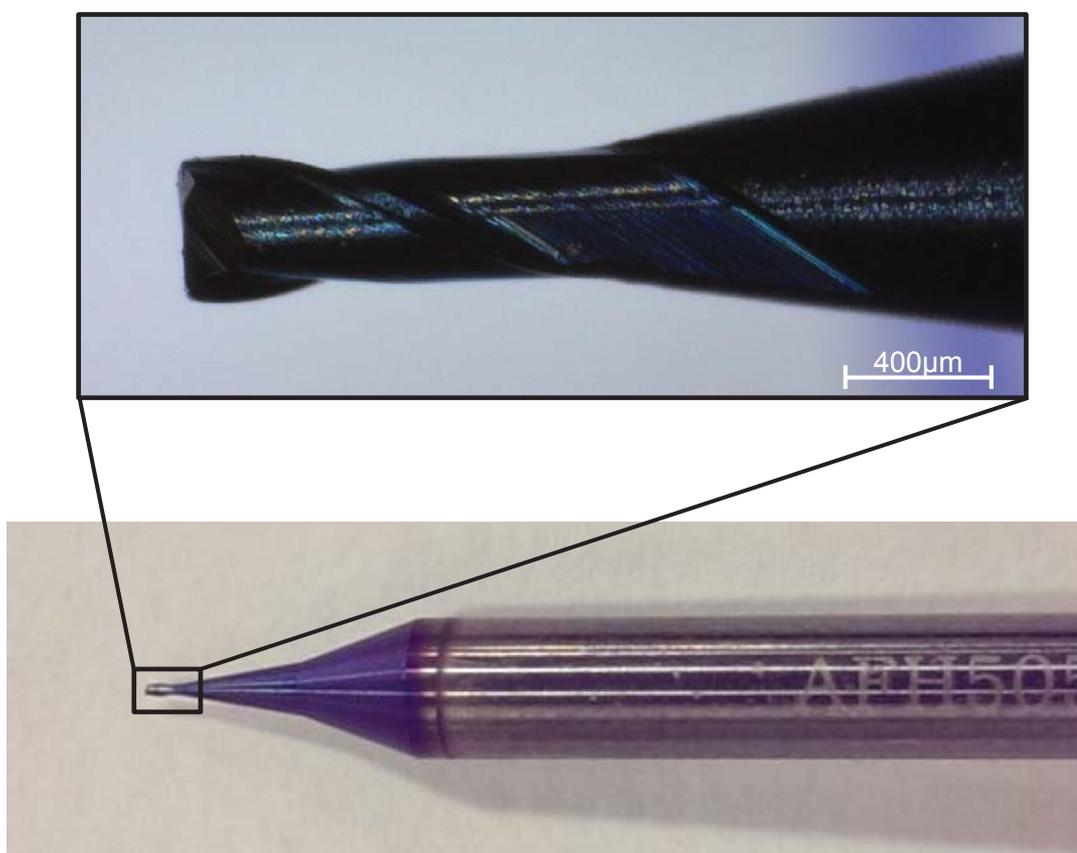


Figura 15: Fresa de topo AFH50526-004A da ARNO werzeuge.

O raio da aresta de corte principal ( $R_e$ ) da ferramenta de  $d = 0,4$  mm, não foi fornecido pelo fabricante, porém, em outros trabalhos com ferramentas deste porte, os  $R_e$  foram medidos e apresentaram valores entre 1 e 2  $\mu\text{m}$ . Para este trabalho foi

adotado  $R_e = 2 \mu\text{m}$ , e este valor foi utilizado para determinar a espessura de corte mínima do experimento.

### 3.3.4 Equipamentos de medição

Para a medição de rugosidade superficial das peças usinadas durante os experimentos foi utilizada o equipamento de perfilometria por contato Bruker DektakXT®, com resolução de 0,1 nm (0,0000001 mm ou 1 angstrom) e repetibilidade de 0,4 nm. O equipamento, que está alocado em uma sala limpa no laboratório LMI do IPT, e está ilustrado na Figura 16. O Bruker DektakXT® tem a capacidade de digitalização da superfície da amostra fazendo uma varredura e detectando a deflexão de uma haste fina em contato com a amostra. A haste pode medir alturas entre 1 mm e 5 nm. Com isso, o equipamento é capaz de medir a diferença de altura das geometrias das peças e a rugosidade da superfície. A figura 2 mostra o equipamento.



Figura 16: Bruker DektakXT® na sala limpa do IPT.

### 3.3.5 Softwares

Entre os *softwares* utilizados para o trabalho estão o Siemens NX<sup>®</sup> 11.0, que oferece recursos para programação da manufatura, desde programação simples (fresamento ou torneamento) até usinagem multieixos e HSM. Também oferece o pós-processamento dos programas NC totalmente integrado. Para a validação do programa NC, o NX<sup>®</sup> 11.0 conta com recursos de simulação que variam desde a verificação básica do caminho da ferramenta até a simulação da máquina-ferramenta orientada por código G. Assim, o *software* possibilita a validação e detecção de erros do programa NC pós-processado, verifica tempos de usinagem e também colisões [47]. O NX<sup>®</sup> 11.0 foi utilizado para programação da usinagem, otimização das trajetórias, verificação e comparação de tempos de usinagem.

Outro software utilizado foi o Minitab 17, que apresenta ferramentas avançadas de estatística e classificação de dados. Seu diferencial está na interface simples e na facilidade de uso. O Minitab 17 oferece ferramentas de Controle da Qualidade, Planejamento de Experimentos (DOE), Análise de Confiabilidade e Estatística Geral, além de ser o software mais utilizado no desenvolvimento de projetos Seis Sigma [48]. O Minitab 17 foi utilizado para avaliação dos dados obtidos e para a análise de correlação.

## **4 Desenvolvimento do trabalho**

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do projeto, seguindo os passos descritos no método de trabalho do capítulo anterior.

### **4.1 Treinamento**

Esta primeira atividade forneceu o conhecimento necessário para o desenvolvimento da dissertação, a familiarização com os processos, equipamentos e ferramentas utilizadas no trabalho, e também o experiência sobre o tema para guiar as escolhas dos experimento.

Com a cooperação entre o SCPM, o IPT e o IWF no projeto Micro-O, surgiu a oportunidade de participar da pesquisa e dos experimentos conduzidos pelos institutos parceiros. No segundo mês de trabalho, pesquisadores do IWF realizaram uma missão de trabalho no IPT, onde foram realizados experimentos de parâmetros de corte em bronze (CuZn39Pb) e a usinagem de um molde simples com o mesmo material. Os experimentos foram observados e auxiliados pelo mestrando. Essa etapa de acompanhamento permitiu a familiarização e o treinamento com os equipamentos disponíveis no IPT, além da discussão e planejamento dos próximos experimentos do projeto Micro-O.

### **4.2 Planejamento dos experimentos**

Esta etapa utilizou os conhecimentos adquiridos na etapa anterior para a escolha dos parâmetros e seus respectivos valores. Foram escolhidos como variáveis para o experimento os parâmetros de corte:  $a_p$ ,  $a_e$ ,  $v_f$ , e  $n$  (respectivamente profundidade de corte, largura de corte, velocidade de avanço e rotação), por apresentarem grande influência na rugosidade superficial como visto em outros trabalhos. Foram executadas duas rodadas de experimentos com conjuntos distintos de parâmetros. Em cada rodada foram escolhidos dois valores para  $a_e$ , três valores

para o  $a_p$ , três valores para o  $v_f$ , dois valores para  $n$ . Todos os valores foram combinados ( $2 \times 3 \times 3 \times 2$ ), resultando em 36 combinações diferentes por rodada.

Para a usinagem das diferentes combinações de parâmetros dos experimentos, foi escolhida a geometria de degraus, porque permite a usinagem com diferentes valores de largura de corte, diferente da usinagem de canais onde a largura de corte é fixa. A peça para o experimento foi desenvolvida no software NX<sup>®</sup> 11.0, ilustrada pelo modelo 3D da Figura 17. A peça possui dois conjuntos de 20 degraus, com medidas de 0,5 mm de largura, 10 mm de comprimento e 0,1 mm de altura, onde foram usinadas faixas com 0,4 mm de largura, cada uma com um conjunto único de parâmetros. Com os diferentes parâmetros, cada degrau apresenta uma rugosidade superficial diferente, que pode ser medida e correlacionada com os parâmetros de corte. Foram preparadas duas peças idênticas partindo do mesmo material, uma para cada rodada.

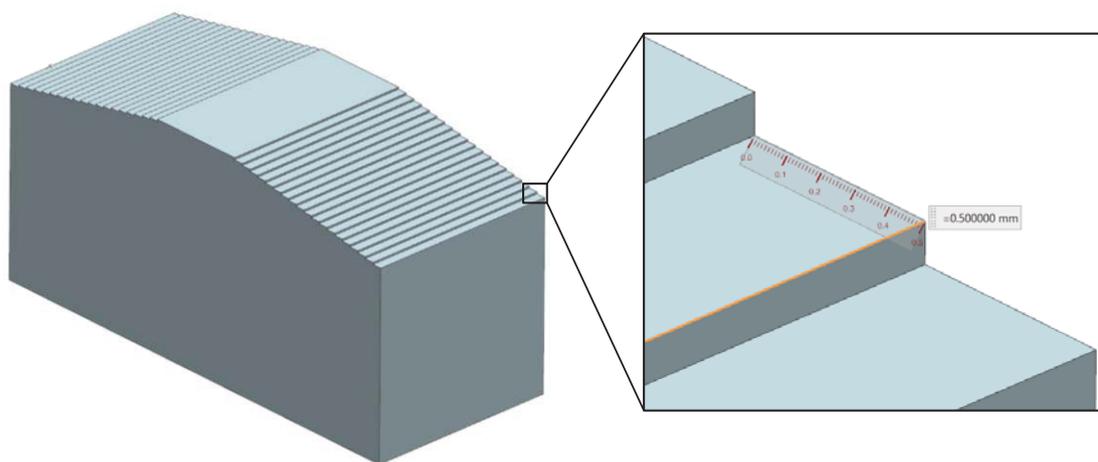


Figura 17: Modelo para os experimentos de parâmetros e corte.

Foi definido um método de fresamento concordante para todos os experimentos. Seguindo essa definição, os programas NC foram escritos de modo que a ferramenta seja posicionada fora da peça já com os valores corretos de  $a_p$  e  $a_e$ , inicie o movimento de corte com a  $v_f$  escolhida, corte todo o comprimento dos



Para definição da tabela de parâmetros de corte da primeira rodada foram adotados como valores máximos:  $v_f = 1.200$  mm/min e  $n = 30.000$  rpm, que são arredondamentos dos valores recomendados pelo fabricante da ferramenta ( $v_f = 1.210$  e  $n = 28.800$ ) [46]. Para os valores intermediários, adotou-se a metade dos valores máximos:  $v_f = 600$  mm/min e  $n = 15.000$  rpm. Para  $v_f$  ainda foi adotado um valor inferior  $v_f = 240$  mm/min que, combinado a  $n = 30.000$  rpm, resulta em um  $f_z = 4$   $\mu\text{m}/\text{dente}$ , com o qual se espera encontrar a melhor qualidade superficial. Para possibilitar a comparação da rugosidade superficial entre as rotações, os valores de  $f_z$  (4, 10 e 20  $\mu\text{m}/\text{dente}$ ) foram mantidos constantes entre as diferentes rotações. Como consequência o valor de  $v_f$  foi reduzido nos degraus com  $n = 15.000$  rpm. Como nos experimentos de corte foram utilizadas ferramentas de mesmo diâmetro, a variação dos valores de velocidade de corte  $v_c$  é diretamente proporcional a variação dos valores da rotação  $n$ , como demonstrado pela formula (1) no capítulo 2. Por esta razão o trabalho não menciona  $v_c$  nos resultados, sendo representados por  $n$ .

Na usinagem de moldes é possível controlar a quantidade de material deixado para a operação de acabamento, permitindo, assim, menores valores de  $a_p$  e  $a_e$ , o que pode resultar em menores forças de corte e menores deflexões da ferramenta. Para o experimento, foram escolhidos valores de  $a_p$  (4, 10 e 20  $\mu\text{m}$ ) e  $a_e$  (40 e 20  $\mu\text{m}$ ) menores que o recomendado pelo fabricante, por serem comuns em operações de acabamento e por gerarem uma rugosidade superficial menor.

Com a tabela definida, o próximo passo foi a criação dos programas NC de cada degrau e a preparação da montagem experimental. O ponto de referência nos programas NC foi definido como sendo o centro da peça nos eixos X e Y e no topo da mesma no eixo Z.

### 4.3 Experimentos de parâmetros de corte

Nesta etapa foram conduzidos experimentos de usinagem, seguindo o planejamento. A peça foi usinada a partir de um bloco de aço H13 com dimensões 21 x 12 x 16 mm e foi fixada por uma morsa retificada, fixada diretamente sobre o eixo Y da KERN Evo. Como as forças de corte são baixas no microfresamento, a fixação foi considerada suficiente para o experimento.

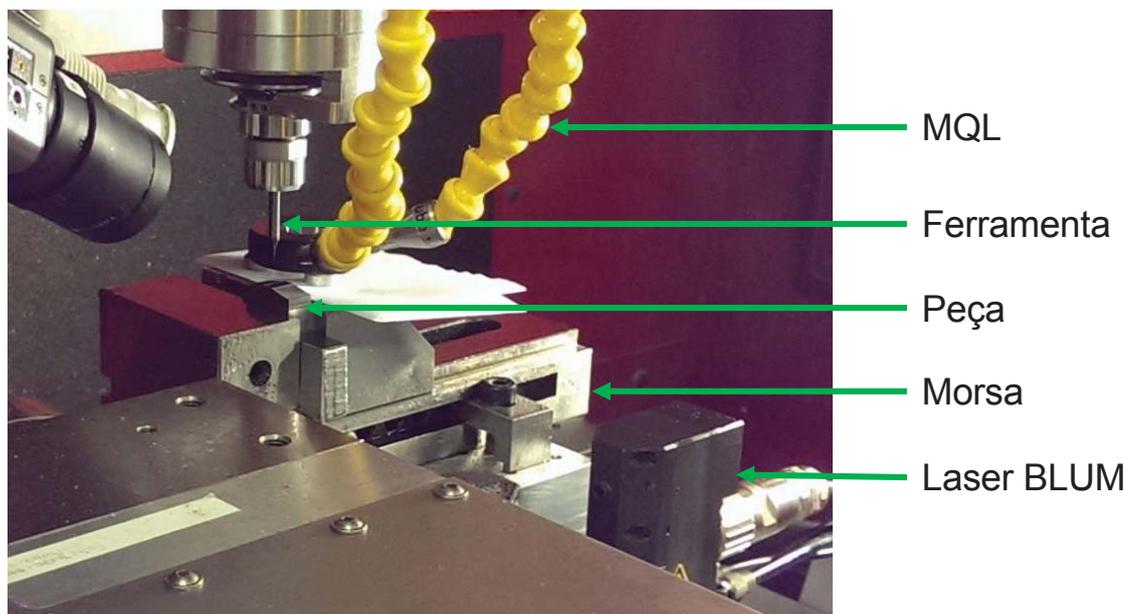
A definição do ponto de referência para a usinagem foi feita com uma *touch probe* M&H IRP25.50 da Hexagon com repetibilidade de medição de  $\pm 1 \mu\text{m}$

Foi utilizada uma fresa de topo Arno AFH50526-080A com  $d = 8 \text{ mm}$  para desbastar os degraus base. Os programas NC para esse desbaste foram feitos no NX<sup>®</sup> 11.0. Porém, os programas NC para o corte dos degraus foram escritos manualmente, para evitar a inserção de tolerâncias do NX no programa e facilitar o processo de mudança dos parâmetros para cada degrau. A ferramenta utilizada para usinar as superfícies medidas foi a fresa de topo Arno AFH50526-004A com  $d = 0,4 \text{ mm}$ , já descrita no capítulo 3.3.3. A ferramenta foi inserida em um *toolholder* Schunk HSK A32. Antes de todas as operações foi executada uma rotina de aquecimento, com aumentos progressivos de rotação até o valor de rotação utilizada na operação. Prosseguiu-se o experimento somente quando a temperatura do *spindle* foi considerada estável, quando observada uma variação máxima de  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  durante o período de um minuto.

O referenciamento da ferramenta no eixo Z foi realizado tocando a ferramenta na superfície da peça com velocidade de avanço baixa e rotação de trabalho. Ao primeiro sinal de toque a ferramenta na superfície da peça, a velocidade de avanço era parada e registrada a posição do eixo Z. Em seguida, o valor do eixo Z recebia um incremento positivo de  $2 \mu\text{m}$  seguido de um pequeno avanço em um dos outros eixos (X ou Y). Se observado o corte, outro incremento positivo de  $2 \mu\text{m}$  no eixo Z

era executado, seguido do pequeno avanço em um dos outros eixos. Caso não fosse observado o corte, era feito um incremento negativo de 1  $\mu\text{m}$  no eixo Z e o valor adotado para a operação. Com isso foi possível realizar o referenciamento da ferramenta no eixo Z com erro próximo à tolerância geométrica da máquina de  $\pm 2 \mu\text{m}$ .

Nos ensaios sempre foi utilizada a técnica de MQL (*Minimum Quantity Lubrication*), com lubrificantes específicos para usinagem de aços, disponível na KERN Evo, tanto por ser a mais eficiente quanto por ser a mais utilizada nessas aplicações. A Figura 19 apresenta a montagem experimental com os elementos descritos anteriormente.

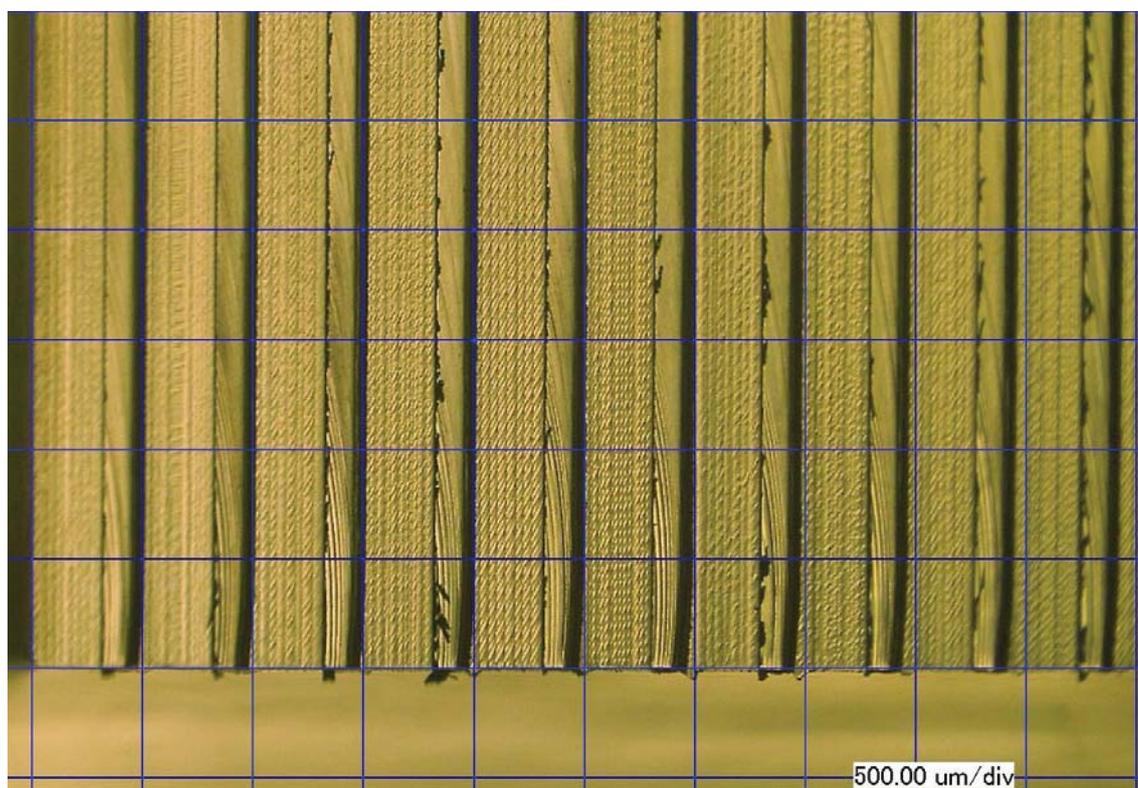


*Figura 19: Montagem experimental.*

Com a peça fixada e referenciada, foram executados os programas NC precedidos do aquecimento e ajuste de comprimento individual para cada ferramenta e rotação utilizados. As operações foram monitoradas, observando-se os sinais de corte na peça e o tempo de execução em cada degrau individualmente. Após o

término, a peça foi retirada da máquina, limpa com etanol e jatos de ar para remover cavacos sem afetar a superfície a ser medida.

A Figura 20 apresenta os degraus 19 (degrau mais à esquerda da imagem) a 28 (a direita) da primeira rodada de experimentos. A Figura 21 apresenta a peça utilizada na primeira rodada de experimentos. Após os ensaios, os degraus foram fotografados com um microscópio digital e foi medida a rugosidade superficial de cada degrau para determinação dos melhores parâmetros de corte.



*Figura 20: degraus 19 a 28 da primeira rodada de experimentos.*



*Figura 21: Peça utilizada na primeira rodada de experimentos.*

#### **4.4 Análise dos resultados dos experimentos**

Para o trabalho, foi escolhida a Rugosidade Superficial Média (Ra) para a comparação entre as superfícies. Ra é a média aritmética dos valores absolutos dos pontos no perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do comprimento de medição ( $l_m$ ). A Ra foi escolhida por ser a mais usual na avaliação de rugosidades e por apresentar uma visão geral de toda a superfície. A Ra pode ocultar alguns erros porém é a mais apropriada para este estudo de correlação. Parâmetros como Rt (Altura máxima do perfil de rugosidade) e Rz (Media das rugosidades parciais) apresentam desvantagens em relação a Ra. Pontos isolados com grandes variações podem levar a valores de Rz e Rt não condizentes com a superfície como um todo. Por exemplo, um risco causado após a usinagem e que não caracteriza o processo.

Para a medição foi utilizada uma máquina Bruker DektakXT® *stylus profiler* disponível no IPT. O artigo de Baldo [49], apresenta e descreve a medição de rugosidade da primeira rodada em detalhes. Em resumo, foram medidas cinco linhas de rugosidade dispostas lado a lado com três repetições de cada linha em cada

degrau. Os comprimentos de amostragem definidos segundo a Norma ISO 4288:1996. O avanço por dente foi considerado como sendo a distância entre sulcos, assim os valores do comprimento de medição ( $l_m$ ) foram fixados em 0,08 mm para todos os degraus. Para o estudo estatístico foram utilizadas as médias das medições de rugosidade superficial de cada degrau.

Os valores obtidos na medição dos degraus foram organizados e avaliados com análises gráficas e estatísticas. Foram gerados gráficos 3D comparando os parâmetros com a  $R_a$ , utilizados para encontrar tendências de comportamento dos valores obtidos além de observar o efeito de conjuntos de parâmetros no resultado medido.

Para a análise dos dados das medições foi utilizado o software Minitab 17, descrito no capítulo 3.3.4. O software permite realizar uma análise de correlação, onde os valores de parâmetros de corte são correlacionados aos valores de rugosidade. Uma das hipóteses do trabalho considera que a rugosidade superficial é resultado direto dos parâmetros utilizados. Para medir essa correlação, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson, que mede o grau da correlação e a direção dessa correlação entre duas variáveis de escala métrica. Este coeficiente assume apenas valores entre -1 e 1, onde 1 significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis, e -1 significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui, e 0 significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. No entanto, pode existir uma dependência não linear. Assim, o resultado 0 deve ser investigado por outros meios. Com todos os erros sistemáticos e variáveis físicas do sistema de usinagem e de medição, é improvável um valor perfeito de 1, -1 ou 0 de correlação entre as variáveis.

Assim, podemos interpretar os valores do coeficiente de correlação de Pearson de acordo com a seguinte classificação:

- 0,9 positivo ou negativo indica uma correlação muito forte, sendo que uma variável tem comportamento muito próximo a outra aumentando e diminuindo do mesmo modo, o que pode ser um indicativo de causalidade;
- 0,7 a 0,9 positivo ou negativo indica uma correlação forte, ainda próxima à causalidade;
- 0,5 a 0,7 positivo ou negativo indica uma correlação moderada;
- 0,3 a 0,5 positivo ou negativo indica uma correlação fraca;
- 0 a 0,3 positivo ou negativo indica uma correlação desprezível, o que significa que as variáveis não têm comportamento próximo, são quase totalmente sem relação ou independentes.

Esta análise permite avaliar e comparar individualmente o efeito que mudanças nos parâmetros têm sobre a rugosidade superficial. Os valores dessa análise se encontram no capítulo 5.

Considerando análises gráficas e as classificações descritas acima, foi possível analisar e correlacionar as variações dos parâmetros de corte com as variações na rugosidade superficial, formando hipóteses e conclusões preliminares. Após essas conclusões, foram escolhidos novos valores de parâmetros para a segunda rodada de experimentos, visando esclarecer questões ainda presentes no estudo após a primeira rodada de experimentos. Tais questões serão discutidas no capítulo 5.1. A Tabela 3 apresenta os valores definidos para a segunda rodada de experimentos.

Tabela 3: Parâmetros de corte utilizados na segunda rodada de experimentos.

Degrau		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$a_p$	[ $\mu\text{m}$ ]	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20
$a_e$	[ $\mu\text{m}$ ]	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200
$f_z$	[ $\mu\text{m}$ ]	1	1	5	5	10	10	1	1	5	5	10	10	1	1	5	5	10	10
$v_f$	[mm/min]	60	60	300	300	600	600	60	60	300	300	600	600	60	60	300	300	600	600
$n$	[krpm]	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Degrau		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$a_p$	[ $\mu\text{m}$ ]	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20
$a_e$	[ $\mu\text{m}$ ]	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200
$f_z$	[ $\mu\text{m}$ ]	0,6	0,6	3	3	6	6	0,6	0,6	3	3	6	6	0,6	0,6	3	3	6	6
$v_f$	[mm/min]	60	60	300	300	600	600	60	60	300	300	600	600	60	60	300	300	600	600
$n$	[krpm]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Os parâmetros da segunda rodada foram escolhidos, resumidamente, pelas razões descritas a seguir. A variação do parâmetro  $a_e$  não apresentou grande influência na rugosidade ou mesmo uma clara tendência quando relacionado aos outros parâmetros. Por esta razão, optou-se por utilizar valores maiores de  $a_e$  (100 e 200  $\mu\text{m}$ ), com o intuito de encontrar uma influência. Para o parâmetro  $n$ , foi mantido o valor de 30.000 rpm, por ser próximo ao recomendado pelo fabricante, e foi escolhido o valor  $n = 50.000$  rpm, por ser o limite máximo do *spindle* da KERN Evo e para avaliar valores mais altos. O parâmetro  $v_f$  foi avaliado juntamente com o  $f_z$ , para possibilitar a comparação da rugosidade superficial entre as rotações. Os valores mais baixos de  $f_z$  (4 e 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ ) se alternaram como mais vantajosos no resultado da rugosidade superficial, com isso foi escolhido utilizar valores menores e explorar a faixa intermediária entre os dois valores. Para a escolha dos parâmetros da tabela, foram escolhidos seis valores de  $f_z$  (0,6, 3 e 6  $\mu\text{m}/\text{dente}$  com 30.000 rpm e 1, 5 e 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$  com 50.000 rpm). Com isso, foram mantidos iguais os três valores de  $v_f$  (60, 300 e 600 mm/min) nas duas variações dos valores de  $n$ . Os valores do parâmetro  $a_p$  foram na maioria mantidos, apenas o valor mínimo teve um acréscimo, sendo adotado o valor de 5  $\mu\text{m}$ , para verificar se ainda existe a formação de rebarbas maiores que nos valores 10 e 20  $\mu\text{m}$ .

A segunda rodada foi realizada com a mesma montagem experimental e os mesmos procedimentos da primeira, descritos no capítulo 4.3. A única diferença

foram os parâmetros utilizados nos programas NC das operações de corte dos degraus, com a ferramenta de  $d = 0,4$  mm. Seguindo o procedimento, após os ensaios, todos os degraus foram fotografados e tiveram a rugosidade superficial medida com o mesmo método da primeira rodada de experimentos. Os valores obtidos na medição dos degraus foram organizados e avaliados com as mesmas análises realizadas nos primeiros experimentos.

#### 4.5 Planejamento da fabricação do molde

A equipe do projeto Micro-O adotou como exemplo, o modelo de dispositivo microfluídico ilustrado na Figura 22. O modelo do dispositivo foi desenvolvido pela equipe do Núcleo de Bionanomanufatura do IPT.

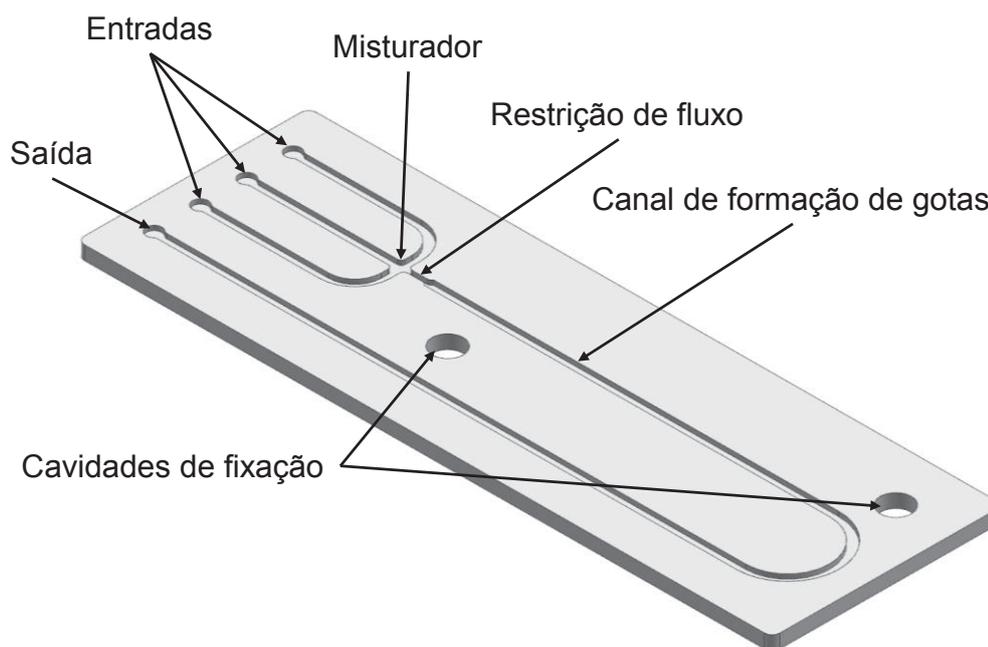


Figura 22: Modelo do dispositivo microfluídico.

A equipe do Micro-O desenvolveu o modelo do molde para a fabricação do dispositivo microfluídico, ilustrado na Figura 23. A geometria do molde produz um dispositivo microfluídico que tem a função de misturar três fluidos e gerar microgotas da solução resultante. Esta geometria foi escolhida por conter exemplos de

microcanais comumente encontrados em dispositivos microfluídicos. Por exemplo, na ampliação da Figura 23, pode ser observado o misturador e o gargalo para restrição do fluxo de fluido, que apresenta 0,3 mm de largura.

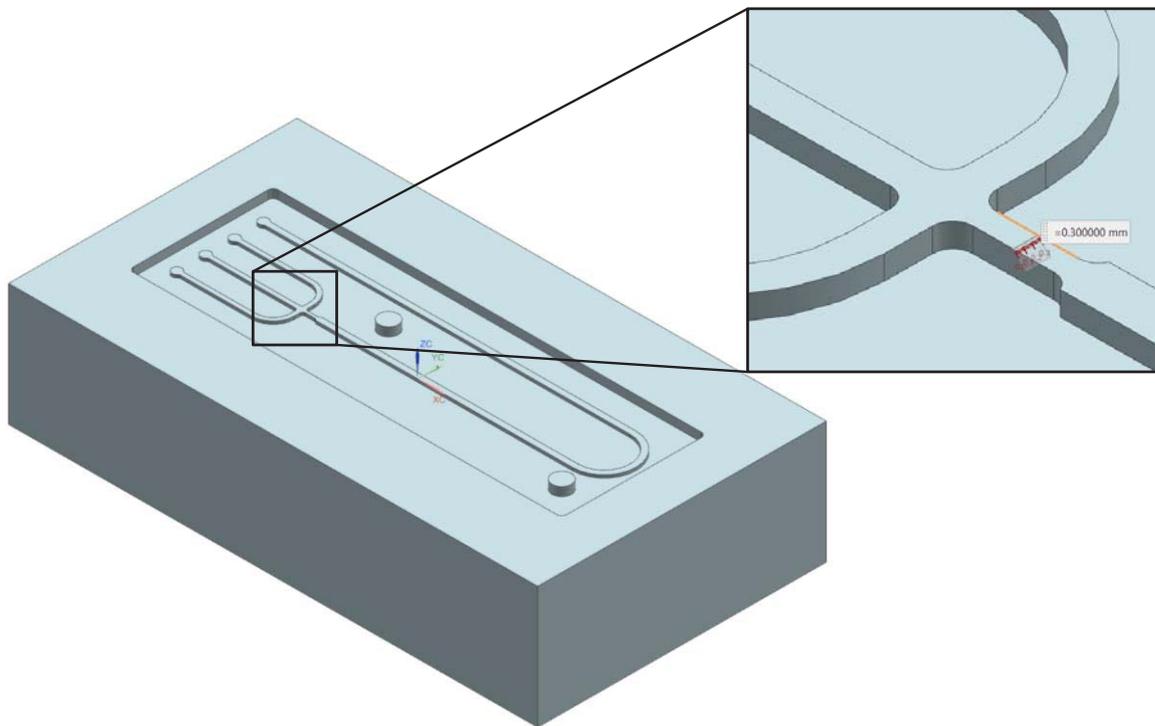


Figura 23: Modelo do molde.

Para a usinagem da cavidade do molde foram utilizadas diferentes ferramentas para reduzir o tempo de usinagem e o desgaste desnecessário das ferramentas menores. A Tabela 4 apresenta a sequência de operações utilizada, as ferramentas e os parâmetros escolhidos para cada operação.

Tabela 4: Dados do processo de fabricação do molde.

Operação	Diametro da ferramenta [mm]	Avanço [mm/min]	Rotação [rpm]	Avanço por dente [mm/tooth]	Profundidade de corte [mm]	Largura de corte [mm]
1 ROUGH_AND_REF_8MM	8	160	4000	0,020	0,050	4,000
2 SEMI_FINISHING_4MM	4	320	8000	0,020	0,050	2,000
3 SEMI_FINISHING_2MM	2	480	16000	0,015	0,050	0,750
4 SEMI_FINISHING_1MM	1	640	32000	0,010	0,025	0,450
5 WALL_FINISHING_04MM	0,4	368	46000	0,004	0,010	0,100
6 FINISHING_04MM	0,4	368	46000	0,004	0,010	0,100
7 FLOOR_FINISHING_04MM	0,4	368	46000	0,004	0,010	0,100

Para melhorar a qualidade superficial do molde, é usual que as operações de acabamento possuam  $v_f$ ,  $a_p$  e  $a_e$  menores que as operações de desbaste, sendo, portanto, as operações que demandam mais tempo em relação ao tempo total do processo. As operações de desbaste foram divididas e desenvolvidas visando deixar o mínimo possível de material para ser removido pela ferramenta de acabamento, reduzindo o tempo de usinagem. As três últimas operações geraram a superfície final do molde e utilizaram a ferramenta de  $d = 0,4$  mm para o acabamento. Estas operações estão ilustradas na Figura 24, onde o caminho percorrido pelo ponto central da ferramenta está representado em azul claro.

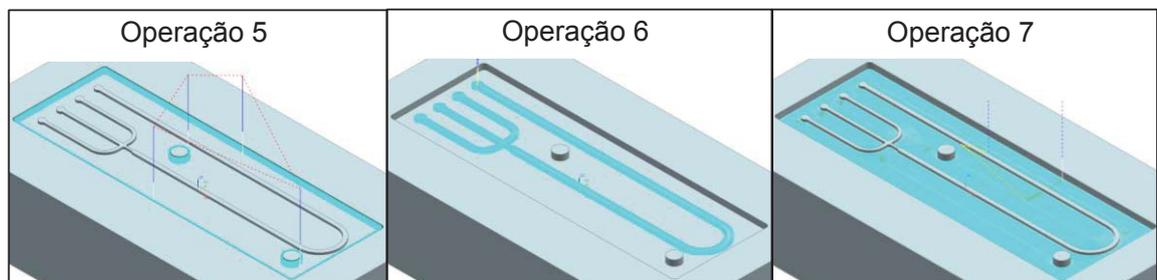


Figura 24: Operações de acabamento do molde.

Como pode ser observado na Figura 24, a operação 5 (WALL\_FINISHING\_04MM) fez as paredes externas e as paredes das cavidades de fixação, a operação 6 (FINISHING\_04MM) gerou as faces dos canais, e a operação 7 (FLOOR\_FINISHING\_04MM) gerou a face do fundo do molde. Elas estão separadas desta maneira para reduzir movimentos de transição entre diferentes áreas de corte, assim reduzindo o tempo total da operação de acabamento. Isso também reduz a quantidade de vezes que a ferramenta inicia o corte do material, evento que apresenta altas variações nas forças de corte, o que pode gerar maior desgaste da ferramenta.

O software NX<sup>®</sup> 11.0 foi utilizado para a geração dos programas NC das operações de usinagem do molde. O NX<sup>®</sup> 11.0 inclui diversas estratégias de

usinagem pré-programadas e permite o controle preciso do material deixado em cada face do modelo, facilitando o desenvolvimento das operações. O trabalho foca nos parâmetros de corte para o acabamento do molde, portanto o desenvolvimento individual das operações de corte não teve destaque no texto.

Os parâmetros de corte para o molde foram escolhidos seguindo as conclusões obtidas nos experimentos de parâmetros de corte. Para o parâmetro  $a_p$  foi escolhido o valor de 10  $\mu\text{m}$ , tanto por ter apresentado alguns dos menores valores de  $R_a$  do estudo, quanto por minimizar rebarbas.

O parâmetro  $a_e$  não foi constante em todas as operações de acabamento. Após a operação 4, foi deixado 20  $\mu\text{m}$  de material em todas as faces do molde. Como consequência, a operação 5 que fez as paredes externas do molde, teve na prática o  $a_e = 20 \mu\text{m}$ . A operação 6, que gerou as faces dos canais, apresentou  $a_e = 20 \mu\text{m}$  no momento de corte das paredes dos canais e  $a_e = 100 \mu\text{m}$  no corte do topo dos canais. A operação 7, que gerou a face do fundo do molde, apresentou  $a_e = 100 \mu\text{m}$  na maior parte do tempo, com exceção da primeira entrada na face, onde é necessário fazer um corte com o diâmetro total da ferramenta (400  $\mu\text{m}$ ) por ser uma área fechada e não haver paredes livres para o início do corte com  $a_e$  menor. Apesar das variações, todas as regiões medidas foram geradas com  $a_e = 100 \mu\text{m}$ .

Para o parâmetro  $f_z$  foi escolhido o valor de 4  $\mu\text{m}$ , que apresentou bons resultados de  $R_a$  nos experimentos, e quando combinado ao  $n = 46.000 \text{ rpm}$ , resultou em  $v_f = 368 \text{ mm/min}$ , valor que apresenta uma boa combinação entre baixa rugosidade superficial e menores tempos de processo.

O parâmetro  $n = 46.000 \text{ rpm}$  foi escolhido por permitir menores valores de  $f_z$  sem comprometer os tempos de processo. Não foi utilizado  $n = 50.000 \text{ rpm}$  para não utilizar a máquina-ferramenta no limite de sua capacidade por grandes períodos de tempo, preservando a durabilidade do equipamento.

## 4.6 Fabricação, medição e análise do molde

A fabricação do molde utilizou a mesma máquina dos experimentos de parâmetros de corte (KERN Evo), o mesmo *setup* (fixação e lubrificação) e os mesmos métodos (pré-aquecimento, medição de ferramentas, referenciamento da peça e ajuste do comprimento da ferramenta por toque) utilizados no capítulo 4.3. Foram executados os programas NC de cada operação individualmente, seguindo a sequência da Tabela 4. Após o término dos programas, a peça foi retirada da máquina e limpa com etanol e jatos de ar para remover cavacos. Em seguida, a superfície do molde foi fotografada com um microscópio digital. A Figura 25 apresenta o molde concluído na KERN Evo. A Figura 26 apresenta imagens de superfícies do molde geradas no microscópio digital.

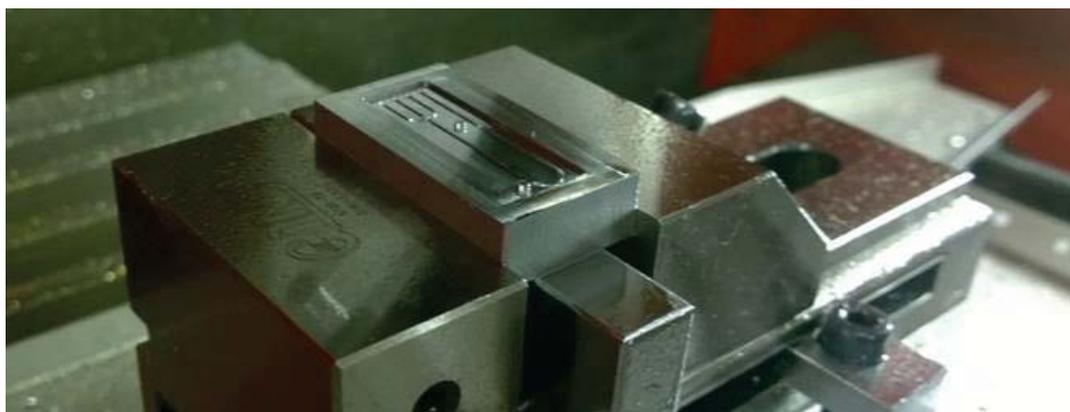


Figura 25: Molde concluído na KERN Evo.



Figura 26: Imagens de superfícies do molde.

A rugosidade superficial do molde foi medida com o procedimento descrito no artigo de Baldo [49]. Para o molde, foram medidas cinco regiões diferentes na face do topo dos canais e cinco regiões diferentes no fundo do molde, com 3 repetições em cada região. Os dados gerados na fabricação e medição do molde foram analisados, discutidos e utilizados para gerar as conclusões deste trabalho e auxiliar trabalhos futuros.

## 5 Resultados e discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados, obtidos a partir do desenvolvimento do trabalho descrito anteriormente. A Tabela 5 apresenta os resultados dos experimentos de parâmetros de corte, com a rugosidade superficial  $R_a$  e os parâmetros de cada degrau. Os valores de  $R_a$  da Tabela 5, para cada degrau, foram determinados como a média aritmética de todas as medidas correspondentes. A incerteza expandida, determinada a partir da combinação das incertezas de medição na repetição de cada linha e entre diferentes linhas, foi de  $U_{Ra} = 1 \text{ nm}$  para todos os degraus.

Tabela 5: Resultados dos experimentos de parâmetros de corte.

Resultados primeira rodada																		
Degrau	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,027	0,035	0,050	0,036	0,041	0,034	0,026	0,016	0,016	0,019	0,022	0,023	0,014	0,020	0,013	0,018	0,034	0,032
$a_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	20	20	20	20	20	20	10	10	10	10	10	10	4	4	4	4	4	4
$a_e$ [ $\mu\text{m}$ ]	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20
$f_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	4	4	10	10	20	20	4	4	10	10	20	20	4	4	10	10	20	20
$v_f$ [mm/min]	120	120	300	300	600	600	120	120	300	300	600	600	120	120	300	300	600	600
$n$ [krpm]	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Degrau	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,042	0,082	0,046	0,065	0,029	0,045	0,024	0,029	0,023	0,021	0,033	0,038	0,035	0,027	0,036	0,034	0,022	0,030
$a_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	20	20	20	20	20	20	10	10	10	10	10	10	4	4	4	4	4	4
$a_e$ [ $\mu\text{m}$ ]	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20	40	20
$f_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	4	4	10	10	20	20	4	4	10	10	20	20	4	4	10	10	20	20
$v_f$ [mm/min]	240	240	600	600	1200	1200	240	240	600	600	1200	1200	240	240	600	600	1200	1200
$n$ [krpm]	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Resultados segunda rodada																		
Degrau	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,033	0,055	0,056	0,055	0,057	0,065	0,062	0,058	0,044	0,047	0,054	0,072	0,045	0,046	0,065	0,069	0,083	0,079
$a_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20
$a_e$ [ $\mu\text{m}$ ]	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200
$f_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	1	1	5	5	10	10	1	1	5	5	10	10	1	1	5	5	10	10
$v_f$ [mm/min]	60	60	300	300	600	600	60	60	300	300	600	600	60	60	300	300	600	600
$n$ [krpm]	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Degrau	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,191	0,152	0,048	0,050	0,051	0,049	0,065	0,113	0,041	0,059	0,048	0,054	0,074	0,083	0,066	0,064	0,060	0,052
$a_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20
$a_e$ [ $\mu\text{m}$ ]	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200
$f_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,6	0,6	3	3	6	6	0,6	0,6	3	3	6	6	0,6	0,6	3	3	6	6
$v_f$ [mm/min]	60	60	300	300	600	600	60	60	300	300	600	600	60	60	300	300	600	600
$n$ [krpm]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Os resultados de rugosidade superficial obtidos podem ser classificados pela norma NBR 8404/1984 [50], que classifica valores de  $R_a$  em 12 classes, de N12 a N1, com N1 como a classe com menor  $R_a$  da lista apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Norma NBR 8404/1984 classes de rugosidade [50].

Classe de rugosidade	N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1
Valores de Ra [ $\mu\text{m}$ ]	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025

Os resultados de Ra obtidos nos experimentos de parâmetros estão dentro das classes N3 a N1 da norma. Os 13 degraus com menor Ra estão na classe N1, que segundo a norma, é obtida apenas com processos como lapidação e polimento utilizando cuidados e métodos especiais.

Apenas observando a Tabela 5, nota-se que os três menores valores de Ra foram obtidos respectivamente nos degraus 15, 13 e 8 dos experimentos da primeira rodada. Esses degraus têm em comum o parâmetro  $n = 15.000$  rpm e o valor de  $a_p$  entre 4 e 10  $\mu\text{m}$ . Esses valores estão entre os menores valores de parâmetros utilizados.

Nos experimentos, em nenhum degrau, com nenhum conjunto de parâmetros, foi identificado o efeito do *chatter* no processo de fresamento. Com o *setup* utilizado no experimento (KERN Evo, *toolholder* Schunk, Fresa Arno, e Aço H13) e utilizando os parâmetros descritos, o processo não chegou ao ponto de instabilidade ou mesmo apresentar efeitos na superfície da peça causados por esse tipo de vibrações. Talvez uma mudança no *setup*, como uma ferramenta mais longa, um *toolholder* com menor rigidez ou um material com estrutura cristalina menos homogênea, poderiam apresentar o efeito do *chatter*. Os parâmetros de corte utilizados foram conservadores, valores maiores poderiam levar a instabilidade.

Utilizando o Minitab 17 foi realizada uma análise de Correlação de Pearson entre os parâmetros de corte de as rugosidades obtidas. Os valores de correlação entre as variáveis foram interpretados como descrito no capítulo 4.4.

## 5.1 Resultados da primeira rodada de experimentos

Com o dados da primeira rodada, isolando os degraus 1 a 18, que possuem o parâmetro  $n = 15.000$  rpm, foi observado que o  $a_p$  tem uma correlação moderada com  $R_a$  (Correlação de Pearson: 0,678),  $f_z$  tem uma correlação fraca (0,341) e  $a_e$  tem uma correlação desprezível (0,053), com nenhum parâmetro mostrando uma forte influência sobre  $R_a$ .

Neste cenário, os parâmetros são interpretados individualmente, como dados sem relação com outros parâmetros. Porém, observar o efeito que uma combinação de dois ou mais parâmetros pode ter sobre o resultado pode trazer benefícios ao entendimento do processo. Por isso, gerou-se o gráfico da Figura 27, para auxiliar na geração das conclusões preliminares. O gráfico apresenta os valores de  $R_a$  na vertical, comparados aos valores de  $a_p$  e  $a_e$  na horizontal e  $f_z$  na diagonal. Os valores de  $a_p$ ,  $a_e$  e  $R_a$  do gráfico estão representados na unidade micrômetro [ $\mu\text{m}$ ] e  $f_z$  por micrômetro/dente [ $\mu\text{m}/\text{dente}$ ]. A incerteza expandida de medição, foi de  $U_{R_a} = 1$  nm para os degraus.

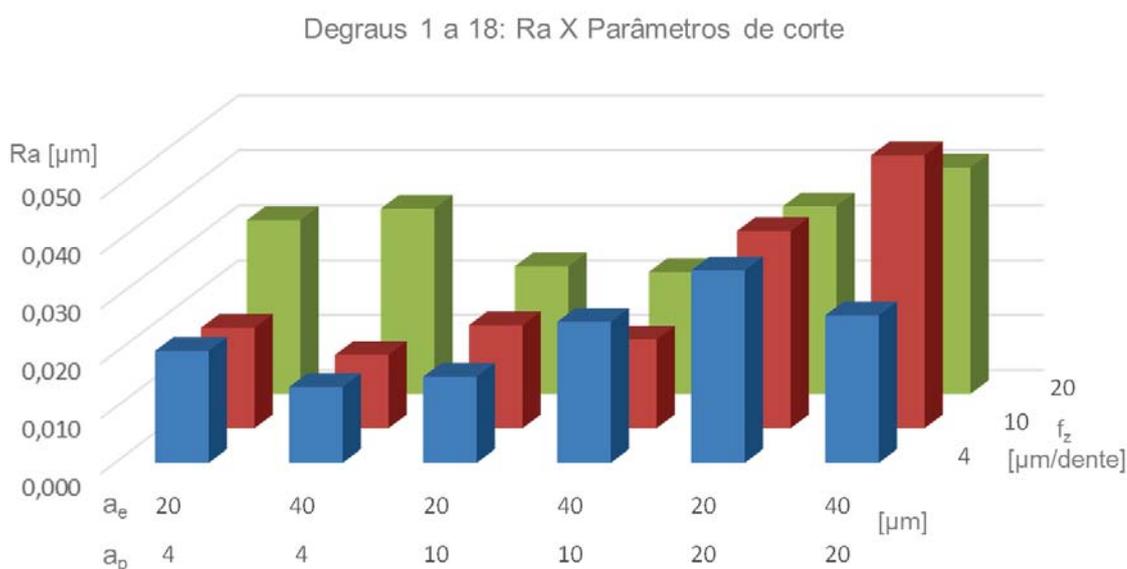


Figura 27: Degráus 1 a 18:  $R_a$  comparado com os parâmetros de corte.

Com o gráfico apresentado na Figura 27 e os dados da Correlação de Pearson foi possível observar que os menores valores de Ra são resultado, em sua maioria, da combinação dos menores valores de  $a_p$  e  $f_z$ , com  $a_e$  não apresentando clara relação com Ra. Essa conclusão é apoiada pelos dados da análise onde  $a_p$  e  $f_z$  apresentam valores de correlação maiores que  $a_e$ .

A Figura 28 apresenta um gráfico com os valores de Ra dos degraus 19 a 36 que possuem o parâmetro  $n = 30.000$  rpm. Como nos gráficos anteriores, os valores apresentam incerteza expandida de  $U_{Ra} = 1$  nm. Os dois maiores valores de Ra no gráfico são dos degraus 20 e 22 (com  $a_p = 20 \mu\text{m}$ ,  $a_e = 20 \mu\text{m}$  e  $f_z = 4$  e  $10 \mu\text{m}$  respectivamente), apresentam o valor de Ra anômalo, maior que os demais e sem seguir a tendência do grupo. Estes dados são resultado de um erro no experimento, originado no processo de usinagem ou na medição, o que acaba por influenciar a correlação entre as variáveis.

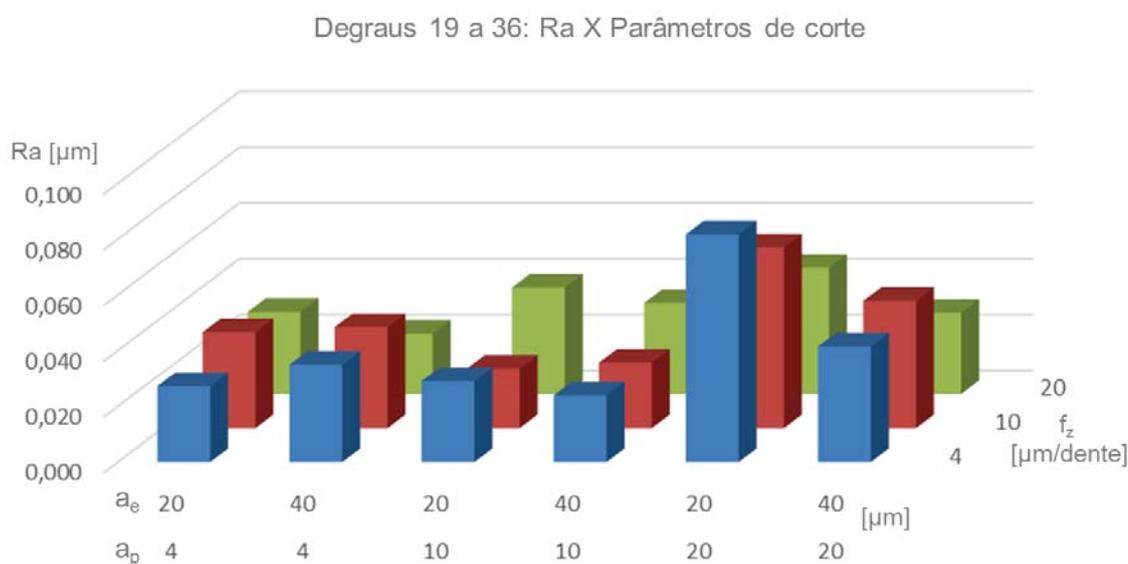


Figura 28: Degráus 19 a 36: Ra comparado com os parâmetros de corte.

Considerando os degraus de 19 a 36,  $a_p$  apresenta uma correlação moderada com Ra (Correlação de Pearson: 0,614),  $a_e$  tem uma correlação fraca (-0,304) e  $f_z$  tem uma correlação desprezível (-0,194). Os parâmetros  $a_e$  e  $f_z$  neste caso apresentam

correlação negativa, o que pode ser interpretado como o aumento do valor de ambos os parâmetros resultaria na diminuição do valor de Ra, o que contradiz os modelos teóricos e os resultados dos outros degraus, reafirmando que os valores de Ra dos degraus 20 e 22 são anômalos.

Para avaliar a influência do parâmetro  $n$ , foi gerado o gráfico da Figura 29, onde são comparados Ra dos degraus 1 a 18 (barras vermelhas) usinados com  $n = 15.000$  rpm, e os degraus 19 a 36 (barras azuis) usinados com  $n = 30.000$  rpm. Abaixo do gráfico estão os outros parâmetros de corte para referência. Comparando degraus com os mesmos parâmetros  $a_p$ ,  $a_e$  e  $f_z$ , pode-se observar que na maioria das comparações os degraus com  $n = 15.000$  rpm apresentam menor Ra. O parâmetro de corte  $n$  está relacionado com a velocidade de corte. Neste experimento,  $v_c = 18,84$  m/min apresentou melhores resultados do que  $v_c = 37,68$  m/min. Como nos gráficos anteriores, os valores apresentam incerteza expandida de  $U_{Ra} = 1$  nm.

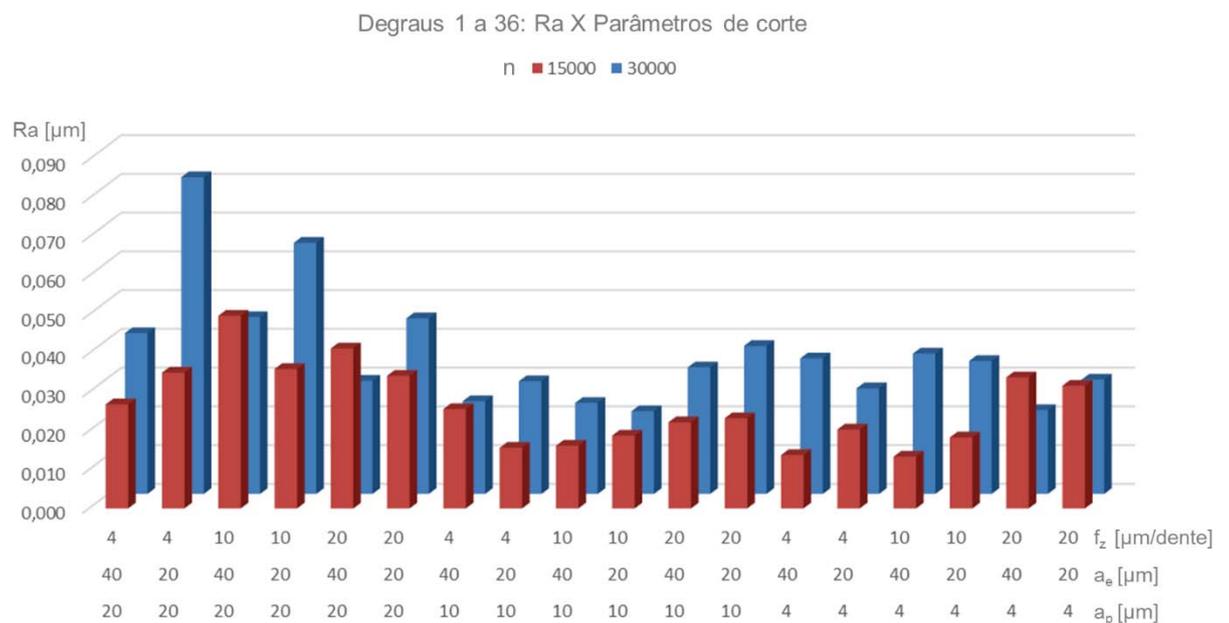


Figura 29: Degráus 1 a 36: Ra comparado aos parâmetros de corte.

Além das análises de correlação e dos gráficos, os degraus foram observados em um microscópio digital. A Figura 30 apresenta os degraus 19 a 36 da primeira

rodada de experimentos e os valores do parâmetro  $a_p$  utilizado em cada degrau. É possível observar que os degraus com  $a_p = 4 \mu\text{m}$  produziram rebarbas (manchas pretas) maiores e em maior quantidade que os outros degraus.

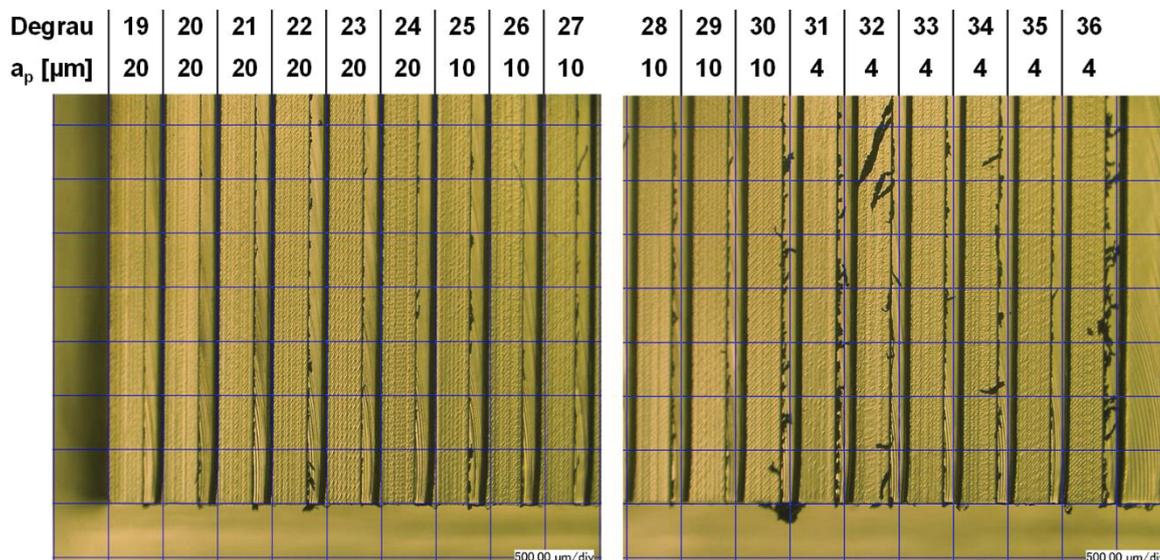


Figura 30: Fotos dos degraus 19 a 36 no microscópio óptico digital.

## 5.2 Resultados da segunda rodada de experimentos

Com as conclusões da primeira rodada, discutidas no capítulo 4.4 e no capítulo 5.1, foram escolhidos os parâmetros para a segunda rodada de experimentos. Em seguida foram realizados os experimentos da segunda rodada e a rugosidade superficial de cada degrau foi medida.

Na segunda rodada de experimentos, os degraus 19, 20 e 26 apresentaram altos valores de rugosidade superficial, devido ao fenômeno de *ploughing*. Os valores de  $R_a$  dos degraus usinados com  $f_z = 0,6 \mu\text{m}/\text{dente}$  são maiores que os valores de  $R_a$  dos degraus com parâmetros de corte análogos. Nesses degraus, o valor de  $h$  não foi alto o suficiente para que a ferramenta extraísse o material completamente na forma de cavaco, deformando o material elasticamente sem sua remoção total, ou seja a espessura do cavaco  $h$  foi menor que o valor mínimo teórico  $h_m$ . Isso gerou

uma superfície com Ra mais alto que a tendência do experimento, mostrando que existe um limite para a redução do  $f_z$ . Esse valor de  $f_z = 0,6 \mu\text{m}/\text{dente}$  foi escolhido por ser o valor teórico de  $h_m$  para o experimento (30% do raio estimado da aresta de corte da ferramenta). Os degraus com  $f_z = 1 \mu\text{m}/\text{dente}$  seguiram a tendência geral do experimento, apresentando baixos valores de Ra, ou seja, sem a influência do *ploughing*. Esse resultado confirma a teoria apresentada na revisão bibliográfica. Para apresentar a diferença nos valores de Ra causada pelo fenômeno, criou-se o gráfico da Figura 31, que mostra Ra medido dos degraus 19 a 36, que foram usinados com  $n = 50.000 \text{ rpm}$ . Como nos gráficos anteriores, os valores apresentam incerteza expandida de  $U_{Ra} = 1 \text{ nm}$ .

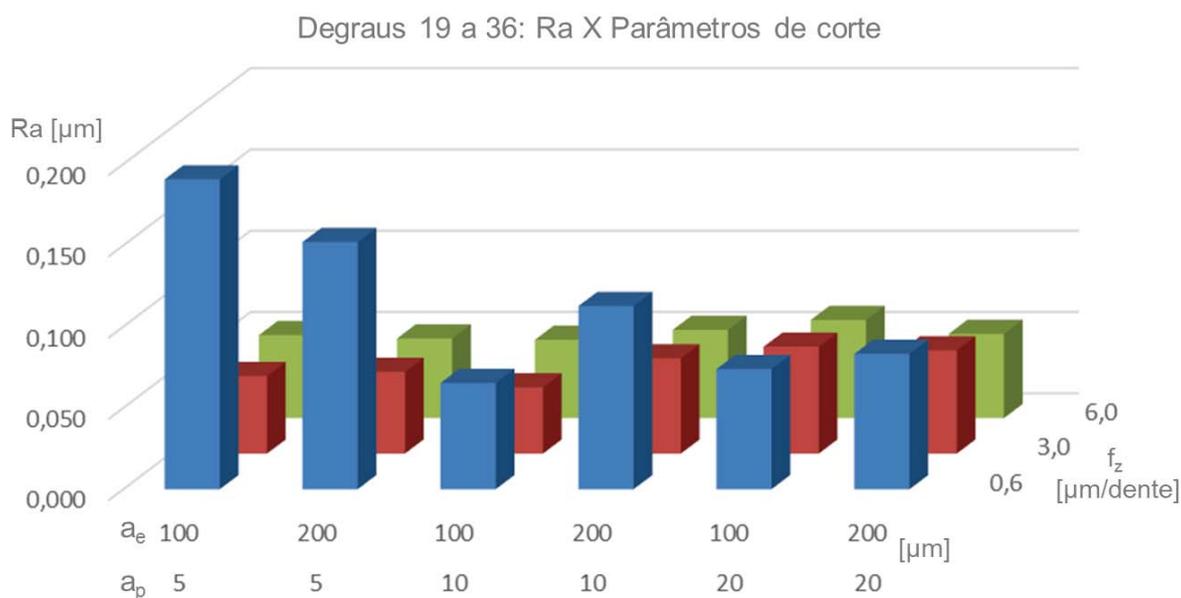


Figura 31: Degraus 19 a 36: Ra comparado aos parâmetros de corte.

Pode se observar que os degraus com  $f_z = 0,6 \mu\text{m}/\text{dente}$  apresentaram um aumento do valor de Ra inferior quando combinados aos valores de  $a_p$  superiores a  $10 \mu\text{m}$ , demonstrando que a combinação desses parâmetros pode amenizar efeitos negativos do *ploughing* na rugosidade superficial.

Para a análise de correlação, os degressos que apresentaram o fenômeno de *ploughing* (19, 20, 25, 26, 31 e 32) foram removidos para não afetar os resultados. Nenhum parâmetro demonstrou forte correlação com Ra. O parâmetro  $n$  apresentou correlação desprezível negativa com o Ra (-0,208). Esse valor sugere que um aumento em  $n$  pode gerar uma baixa redução do Ra. O parâmetro  $a_p$  apresentou correlação fraca com Ra (0,432), o  $f_z$  apresentou correlação moderada com Ra (0,520) e  $a_e$  tem uma correlação desprezível (0,186). Com o aumento dos valores do parâmetro  $a_e$  na segunda rodada de experimentos (de 20 e 40  $\mu\text{m}$  para 100 e 200  $\mu\text{m}$ ), sua correlação com Ra aumentou, e a correlação do parâmetro  $a_p$  foi reduzida se comparada com a primeira rodada de experimentos. Em estudos futuros, pode ser interessante tratar os dois valores em conjunto e relacioná-los com o  $f_z$ , criando um parâmetro volume de corte.

A Figura 32 apresenta os resultados de Ra comparados aos parâmetros utilizados na usinagem. Como nos gráficos anteriores, os valores apresentam incerteza expandida de  $U_{Ra} = 1 \text{ nm}$ . Os valores de  $f_z = 1, 5 \text{ e } 10 \mu\text{m/dente}$  foram usinados com  $n = 30.000 \text{ rpm}$  e os valores de  $f_z = 3 \text{ e } 6 \mu\text{m/dente}$  foram usinados com  $n = 50.000 \text{ rpm}$ . No gráfico, é possível observar que os degressos com  $f_z = 3 \mu\text{m/dente}$  apresentaram valores de Ra próximos ou menores que os degressos com  $f_z = 5 \mu\text{m/dente}$ , os dois conjuntos possuem a mesma velocidade de avanço  $v_f = 300 \text{ mm/min}$  combinado a diferentes rotações ( $n = 50.000 \text{ e } 30.000 \text{ rpm}$  respectivamente). O mesmo efeito pode ser visto com maior intensidade comparando-se os degressos com  $f_z = 6 \text{ e } 10 \mu\text{m/dente}$ . Isso apresenta uma potencial otimização para o processo, em que é possível um menor valor de Ra mantendo o mesmo  $v_f$ , ou seja, melhor qualidade superficial sem aumento do tempo de corte.

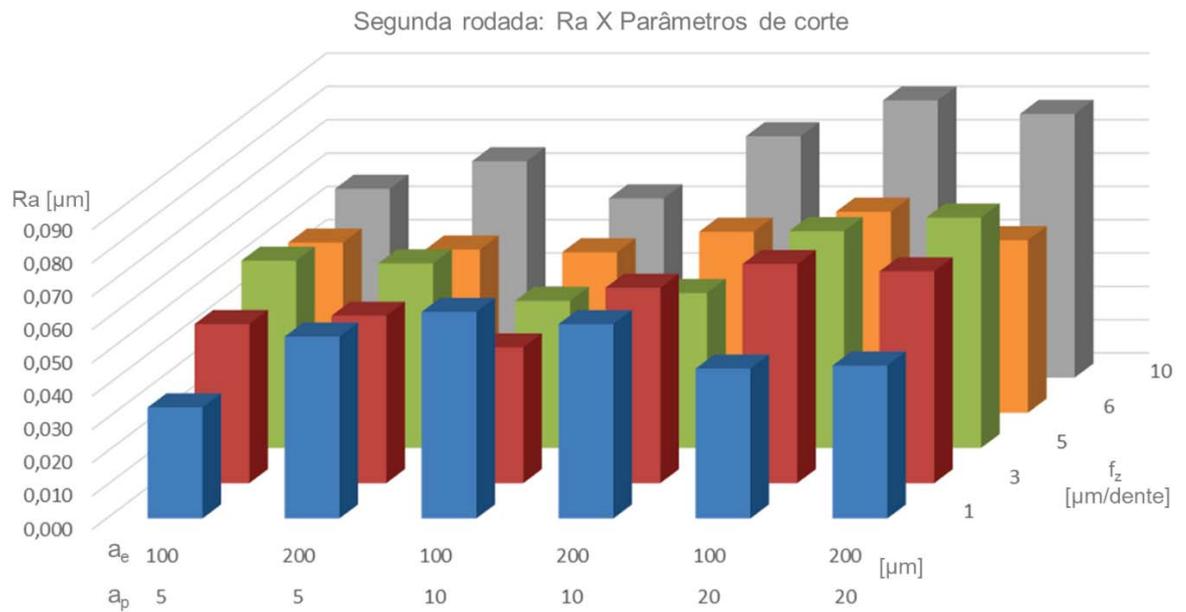


Figura 32: Segunda rodada: Ra comparado aos parâmetros de corte.

### 5.3 Resumo dos resultados dos experimentos de parâmetros de corte

Os resultados dos experimentos de parâmetros de corte podem ser resumidos nos seguintes tópicos:

- Os menores valores de Ra foram conseguidos com valores de  $a_p$  entre 4 e 10  $\mu\text{m}$ , porém, valores mais baixos apresentam mais rebarbas do que valores maiores;
- Os parâmetros  $a_p$  e  $f_z$  apresentaram as maiores correlações com Ra nos experimentos, portanto, tais parâmetros são os que mais influenciam a rugosidade superficial;
- Menores valores de  $a_p$  e  $f_z$  geram menores valores de Ra;
- O parâmetro  $f_z$  tem um limite mínimo, identificado no experimento, confirmando os modelos teóricos de outras pesquisas;

- Valores de  $a_p$  mais altos podem minimizar o efeito do *ploughing*, causado pelo  $f_z$  baixo;
- Os parâmetros  $a_e$  e  $n$  apresentaram as menores correlações com  $R_a$  nos experimentos, portanto a variação destes parâmetros apresenta menor influência na rugosidade superficial se comparados a  $a_p$  e  $f_z$ . Com isso  $a_e$  e  $n$  são parâmetros alvo para otimizações do processo;
- O parâmetro  $n = 15.000$  rpm apresentou menor  $R_a$ , porém, aumenta o tempo de processo;
- Valores maiores de  $n$  permitem valores menores  $f_z$  sem reduzir o valor de  $v_f$ , conciliando menores valores de  $R_a$  com menores tempos de processo.

#### 5.4 Resultados da usinagem do molde

Como resultado da usinagem do molde, foi construída a Tabela 7, que apresenta as médias das rugosidades superficiais  $R_a$ , foram executadas três repetições de medição na mesma linha em cada uma das cinco regiões medidas no fundo do molde e nas cinco regiões medidas no topo dos canais. Os dados completos e o método de medição podem ser encontrados no artigo de Baldo [49]. Em resumo a variação da rugosidade entre os locais medidos foi muito maior que a repetitividade pura, o que implica uma mudança significativa nas condições de corte durante a usinagem, que podem ser explicadas pela maior complexidade do caminho da ferramenta na usinagem do molde, quanto pelo maior desgaste da ferramenta relacionada à operação longa de usinagem. A incerteza expandida, determinada a partir da combinação das incertezas de medição das repetições dentro de cada região e entre diferentes regiões, foi de  $U_{R_a} = 5$  nm para todas as regiões medidas.

Tabela 7: Ra do molde nas diferentes regiões medidas.

Região	Topo dos canais					Fundo do molde				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
<b>Ra [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	0,0136	0,0266	0,0187	0,0251	0,0146	0,0285	0,0155	0,0228	0,0263	0,0243

Apesar dessa variação nos valores de Ra do molde, os valores estão, dentro ou muito próximos, da classe N1 da norma NBR 8404/1984 [50], que é comparável a processos executados com cuidados especiais, como superacabamento, lapidação e polimento. Esses processos apresentam restrições para seu uso em moldes de dispositivos microfluídicos, devido ao tamanho reduzido das geometrias dos canais e do espaço entre eles. Em muitos casos o molde tem necessariamente que sair do processo de fresamento com a rugosidade superficial requerida na aplicação, porque sua geometria impossibilita a aplicação de técnicas posteriores para melhorar o acabamento superficial.

## 6 Conclusões

Nesse capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho, limitações e sugestões para trabalhos futuros.

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou a análise da influência dos parâmetros de corte: profundidade de corte, largura de corte, velocidade de avanço e rotação da ferramenta na rugosidade superficial do aço H13, focando na sua utilização em moldes para dispositivos microfluídicos.

De modo geral, os parâmetros de corte apresentaram diferentes níveis de influência na rugosidade superficial com alguns apresentando valores limites que resultam em efeitos negativos na superfície. Como exemplo, a profundidade de corte possui, entre os parâmetros observados, a maior influência na rugosidade superficial, em que valores menores de  $a_p$  resultaram em menores valores de Ra. Porém, foi observado que profundidades baixas podem causar aumento na quantidade e tamanho das rebarbas na parte externa do passe de corte. Valores de  $a_p$  próximos a 10  $\mu\text{m}$  se mostraram mais vantajosos nos experimentos.

A velocidade de avanço e o avanço por dente apresentaram moderada influência na rugosidade superficial, onde valores menores de  $V_f$  e  $f_z$  resultaram em menores valores de Ra. Contudo, valores muito baixos de  $f_z$ , (menores que 30% do raio da aresta de corte), resultam no fenômeno de *ploughing*, que aumenta consideravelmente o Ra. Observou-se que valores maiores de  $a_p$  podem reduzir o efeito do fenômeno. Valores de  $f_z$  entre 3 e 10  $\mu\text{m}$  apresentaram os menores valores de Ra nos experimentos. O parâmetro rotação apresentou baixa influência na rugosidade superficial, com menores valores de  $n$  apresentando menores valores de Ra. Entretanto, valores maiores de  $n$  permitem valores de  $f_z$  menores sem reduzir o valor de  $v_f$ , conciliando menores valores de Ra com menores tempos de processo, como observado no molde.

A largura de corte apresentou, entre os parâmetros observados, a mais baixa influência na rugosidade superficial, sem uma clara tendência se menores valores de  $a_e$  resultariam em menores valores Ra. Assim, é possível utilizar altos valores de  $a_e$  sem sacrificar a qualidade superficial do molde, permitindo maior liberdade para otimizações do processo quando combinado aos outros parâmetros.

As rugosidades superficiais obtidas nos degraus dos experimentos de parâmetros de corte estão entre as classes N1 e N3 da norma NBR 8404/1984, que são as classificações com menor valor de rugosidade superficial da norma, com 13 valores de Ra presentes na classe N1. Nos experimentos, foram identificados os limites e a influência dos parâmetros de corte na rugosidade superficial.

Nos experimentos, não identificou-se o efeito do *chatter* no processo de fresamento, devido ao *setup* ou aos parâmetros de corte. Em outros experimentos pode ser interessante utilizar valores maiores de parâmetros de corte e outros *setups*, com o objetivo de avaliar os efeitos desse tipo de instabilidade. Outros valores de parâmetros de corte também podem apresentar uma correlação maior entre os valores de  $a_e$  e Ra, esclarecendo a influência deste parâmetro na rugosidade superficial. Outra opção seria avaliar grupos de parâmetros na análise de correlação, como, por exemplo, utilizar um parâmetro volume de corte.

Finalizando as conclusões do trabalho, os valores de rugosidade superficial do molde, gerada no fresamento, está dentro ou muito próxima a classe N1 da norma, que é comparável a processos como superacabamento, lapidação e polimento. Com isso foram identificados valores de parâmetros de corte que produzem rugosidade superficial adequada para a aplicação do molde, dispensando processos posteriores de acabamento, viabilizando o microfresamento de moldes para dispositivos microfluídicos, e contribuindo para os objetivos do projeto Micro-O

## 7 Bibliografia

- /1/ LUO, X. . C. K. . W. D. . W. F. Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 167, p. 515–528, 2005.
- /2/ PICARELLI, T. C. *Microfresamento: Estudo e Aplicação do Processo*. UNIMEP. Santa Bárbara d'Oeste. 2015.
- /3/ TAKÁCS, M.; VERÖ, B.; MÉSZÁROS, I. Micromilling of metallic materials. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 138, p. 1-4, 2003.
- /4/ RAHMAN, M. et al. A multiprocess machine tool for compound micromachining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 50, p. 344-356, 2010.
- /5/ ARDILA, L. K. R. et al. *Micro-milling process for manufacturing of microfluidic moulds*. 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering - COBEM. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2015.
- /6/ CÂMARA, M. A. et al. State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 28, p. 673-685, 2012.
- /7/ BIERMANN, D.; STEINER, M.; KREBS, E. Investigation of Different Hard Coatings for Micromilling of Austenitic Stainless Steel. *Procedia CIRP*, v. 7, p. 246-251, 2013.
- /8/ CRISTOFARO, S. et al. High-speed micro-milling: Novel coatings for tool wear reduction. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 63, p. 16-20, 2012.
- /9/ DORNFELD, D.; MIN, S.; TAKEUCHI, Y. Recent advances in mechanical micromachining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 55, p. 745-768, 2006.
- /10/ MASUZAWA, T. State of the art of micromachining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Amsterdam, v. 49, p. 473-488, 2000.
- /11/ TOSELLO, G.; HANSEN, N. H.; GASPARIN, S. Applications of dimensional micro metrology to the product and process quality control in manufacturing of precision polymer micro components. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 58, p. 467-472, 2009. ISSN 00078506.
- /12/ ALTING, L. et al. Micro Engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, amsterdam, v. 52, p. 635-658, 2003.

- /13/ PILJEK, P.; KERAN, Z.; MATH, M. Micromachining – Review of Literature from 1980 to 2010. *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, Zagreb, v. 12, p. 1-27, 2014.
- /14/ JOHNSON MATTHEY MEDICAL COMPONENTS. Precision machine components. *Johnson Matthey Medical*. Disponível em: <<http://jmmedical.com/machining.html>>. Acesso em: 30 out. 2017.
- /15/ ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, Philadelphia, v. 33, p. 402-407, 2009.
- /16/ OLIVEIRA, F. B. *Estudo dos mecanismos governantes do efeito de escala na microusinagem*. Universidade Estadual Paulista - UNESP. Ilha Solteira, p. 92. 2012.
- /17/ CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHET, T. Investigation of Micro-Cutting Operations. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 46, p. 313-332, 2006.
- /18/ BISSACCO, G.; HANSEN, H. N.; DE CHIFFRE, L. Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 167, p. 201-207, 2005.
- /19/ ARAI, R. *Estudo teórico-experimental do efeito da flexão da ferramenta no processo de microfresamento*. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 114. 2008.
- /20/ ZIBEROV, M. et al. Principais aspectos do processo de microusinagem. *Maquinas e Metais*, São Paulo, v. 1, n. 601, p. 28-37, Fevereiro 2016.
- /21/ ALTINTAS, Y. *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. 2nd. ed. New York: Cambridge University Press, 2012.
- /22/ OLIVEIRA, F. B. et al. Size effect and minimum chip thickness in micromilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 89, p. 39-54, Fevereiro 2015.
- /23/ ZHANQIANG, L.; ZHENYU, S.; YI, W. Definition and determination of the minimum uncut chip thickness of microcutting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 69, n. 5-8, p. 1219-1232, 2013. ISSN ISSN: 02683768.
- /24/ WEULE, H.; HÜNTRUP, V.; TRITSCHLER, H. Micro-Cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 50, p. 61-64, 2001.
- /25/ YUAN, Z. J.; ZHOU, M.; DONG, S. Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision

- machining. *Journal of Materials Processing Technology*, Singapore, v. 62, n. 4, p. 327-330, 1996.
- /26/ SON, S.; LIN, H. S.; AHN, J. H. Effects of the Friction Coefficient on the Minimum Cutting Thickness in Micro Cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 45, p. 529-535, 2005.
- /27/ DUCOBU, F.; RIVIÈRE-LORPHÈVRE, E.; FILIPPI, E. Dynamic simulation of the micro-milling process including minimum. *Key Engineering Materials*, v. 504-506, p. 1269-1274, 2012.
- /28/ MAMEDOV, A.; LAYEGH, S. E.; LAZOGLU, I. Machining forces and tool deflections in micro milling. *Procedia CIRP*, v. 8, p. 147-151, 2013.
- /29/ BIERMANN, D. et al. Using NC-path Deformation for Compensating Tool Deflections in Micro milling of Hardened Steel. *Procedia CIRP*, v. 1, p. 132-137, 2012.
- /30/ UHLMANN, E.; SCHAUER, K. Dynamic load and strain analysis for the optimization of micro end mills. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 54, p. 75-79, 2005. ISSN 00078506.
- /31/ ALTINTAS, Y.; JIN, X. Mechanics of micro-milling with round edge tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 60, p. 77-80, 2011. ISSN 00078506.
- /32/ UHLMANN, E.; MAHR, F. A time domain simulation approach for micro milling processes. *Procedia CIRP*, v. 4, p. 22-28, 2012.
- /33/ ALTINTAS, Y. Virtual high performance machining. *Procedia CIRP*, v. 46, p. 372-378, 2016.
- /34/ AFAZOV, S. M. et al. Chatter modelling in micro-milling by considering process nonlinearities. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 56, p. 28-32, 2012.
- /35/ ZELINSKI, P. Ten Questions About Chatter. *Modern Machine Shop*, 2005. Disponível em: <<https://www.mmsonline.com/articles/ten-questions-about-chatter>>. Acesso em: 29 jun. 2017.
- /36/ METALMAX TRAINING. Affects of Cutting Parameters (Chatter Theory) Dynamics of High Performance / High Speed Machining, 2009. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/guest66e8f6/chatter-overview>>. Acesso em: 29 jun. 2017.
- /37/ JIN, X.; ALTINTAS, Y. Chatter Stability Model of Micro-Milling With Process Damping. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 135, 2013.

- /38/ ALTINTAS, Y. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. New York: Cambridge University Press, 2000.
- /39/ PARK, S. S.; ALTINTAS, Y.; MOVAHHEDY, M. Receptance Coupling for End Mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 43, p. 889-896, 2003.
- /40/ MASCARDELLI, B.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T. Substructure Coupling of Micro End Mills to Aid in the Suppression of Chatter. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 130, 2008.
- /41/ ULTRA Precision Micro Machining – Micro Molding. *Microsystems - micro engineering solutions*. Disponível em: <<https://microsystems.uk.com/ultra-precision-micro-machining/>>. Acesso em: 11 Outubro 2017.
- /42/ BODZIAK, S. et al. Surface integrity of moulds for microcomponents manufactured by micromilling and electro-discharge machining. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 36, p. 623-635, 2014.
- /43/ MALEKIAN, M.; PARK, S. S.; JUN, M. B. G. Tool wear monitoring of micro-milling operations. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, n. 10, p. 4903-4914, 2009.
- /44/ ATTIA, U. M.; MARSON, S.; ALCOCK, J. R. Micro-Injection Moulding of Polymer Microfluidic Devices. *Microfluidics and nanofluidics*, v. 7, p. 1-28, 2009.
- /45/ YANG, C.; YIN, X.-H.; CHENG, G.-M. Microinjection molding of microsystem components: new aspects in improving performance. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, v. 23, 2013.
- /46/ ARNO WERKZEUGE. Solid carbide endmills - Milling. *ARNO USA*, 2017. Disponível em: <<https://www.arnousa.com/products/milling/milling/detail/solid-carbide-endmills.html>>. Acesso em: 31 out. 2017.
- /47/ NX CAM - Uma solução completa de manufatura assistida por computador. *Siemens PLM Software*, 2017. Disponível em: <[https://www.plm.automation.siemens.com/pt\\_br/products/nx/for-manufacturing/cam/](https://www.plm.automation.siemens.com/pt_br/products/nx/for-manufacturing/cam/)>. Acesso em: 11 Julho 2017.
- /48/ MATHWORKS INC. Matlab. *Mathworks*, 2017. Disponível em: <[https://www.mathworks.com/products/matlab.html?s\\_tid=hp\\_ff\\_p\\_matlab](https://www.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_ff_p_matlab)>. Acesso em: 31 out. 2017.
- /49/ BALDO, C. R. et al. Measurement Design For Dimensional Control Of Functional Micro-Scale Features On Microfluidic Moulds. *9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF*, Joinville, 2017.

/50/ DA COSTA, H. N. Parâmetros de Avaliação da Rugosidade (Acabamento Superficial). *Moldes injeção de plásticos*, 2018. Disponível em: <<http://moldesinjecao plasticos.com.br/parametros-de-avaliacao-da-rugosidade-acabamento-superficial/>>. Acesso em: 19 Jan 2018.