

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ DEPARTAMENTO
ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

MARCOS ANTONIO CHEREMETA JUNIOR

**VIABILIZAÇÃO DO PROCESSO DE MICROUSINAGEM DE AÇO INOX 316 NO
LABORATORIO DE USINAGEM DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL
DO PARANA – CAMPUS PONTA GROSSA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

MARCOS ANTONIO CHEREMETA JUNIOR

**VIABILIZAÇÃO DO PROCESSO DE MICROUSINAGEM DE AÇO INOX 316
NO LABORATORIO DE USINAGEM DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA
FEDERAL DO PARANA – CAMPUS PONTA GROSSA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Me. Irapuan Santos

PONTA GROSSA

2017

Dedico este trabalho aos meus pais, em especial minha mãe Gizelle Aparecida Cheremeta, a minha namorada Jessyca Rocha Camargo, amigos, colegas de curso e professores, em especial dois professores e amigos, o Professor Irapuan Santos e o Professor Doutor Marcelo V. Carvalho, que todos os dias de forma direta ou indireta contribuíram para o meu desenvolvimento e crescimento acadêmico, profissional e pessoal, colaborando prontamente para a elaboração e conclusão deste trabalho de conclusão de curso.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Me. Irapuan Santos, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

A UTFPR que com o auxílio financeiro para trabalhos de conclusão de curso possibilitou a realização deste trabalho.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

«Je ne suis pas lié à gagner, mais j'ai le devoir d'être vrai. Je ne suis pas lié à réussir, mais je suis lié de correspondre à la lumière que je l'ai fait." (Abraham Lincoln)

"That your fights challenge the impossibilities, remember that the great things of man were conquered of what seemed impossible." (Charles Chaplin)



TERMO DE APROVAÇÃO

VIABILIZAÇÃO DO PROCESSO DE MICROUSINAGEM DE AÇO INOX 316 NO LABORATÓRIO DE USINAGEM DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – CAMPUS PONTA GROSSA

por

MARCOS ANTONIO CHEREMETA JUNIOR

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 18 de agosto de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Me. Irapuan Santos
Orientador

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho
Membro Titular

Profa. Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC *

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

RESUMO

CHEREMETA, Marcos Antonio Junior. **VIABILIZAÇÃO DO PROCESSO DE MICROUSINAGEM DE AÇO INOX 316 NO LABORATORIO DE USINAGEM DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANA – CAMPUS PONTA**

GROSSA . 2017. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

O microfresamento é uma alternativa de fabricação para microcomponentes, permitindo a usinagem de geometrias complexas nos mais variados materiais. Este trabalho analisa a viabilidade do processo de microusinagem no laboratório de usinagem da UTFPR – Câmpus Ponta Grossa do aço inoxidável AISI SAE 316 para o microfresamento de canais. Os resultados apontaram que é inviável o processo de microusinagem atualmente devido à incapacidade e falta de robustez das maquinas, porém pode-se adequar melhor alguns parâmetros para tentar realizar o processo.

Palavras-chave: Microusinagem. Microfresamento. Inox 316.

ABSTRACT

CHEREMETA, Marcos Antonio Junior. **VIABILIZAÇÃO DO PROCESSO DE MICROUSINAGEM DE AÇO INOX 316 NO LABORATORIO DE USINAGEM DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANA – CAMPUS PONTA**

GROSSA . 2017. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Micromilling is a manufacturing alternative for microcomponents, allowing the machining of complex geometries in the most varied materials. This work analyzes the feasibility of the micromilling process in the UTFPR - Câmpus Ponta Grossa Machining Laboratory of AISI SAE 316 stainless steel for channel microfilling. The results indicated that the micro-machining process is not feasible at present due to the incapacity and lack of robustness of the machines, however, some parameters can be better adapted to try to carry out the process.

Keywords: *Micromachining. Micromilling. Inox 316.*

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química Aço AISI 316	24
Tabela 2 - Combinações de parâmetros de corte.....	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demonstrativo da Força Especifica de Corte para Diferentes Materiais ...	16
Figura 2 - Comparativo de Força Especifica de Corte	17
Figura 3 - Sentido de corte.....	19
Figura 4 - Microfresa de Topo Reto - 2 Cortes	20
Figura 5 - Aspectos-chave do microfresamento	22
Figura 6 - Fresa de topo reto de 6 mm de diâmetro (à esquerda) e micro-fresa de 200 μm (à direita).....	24
Figura 7 - Dispositivo Acoplador.....	28
Figura 8 - Modelo de Tupia de palma 1800 da marca Skil	29
Figura 9 - Dispositivo acoplado à fresadora	30
Figura 10 - Pinça fabricada para Tupia Skill 7800	31
Figura 11 - Comparação da pinça com a microfresa de 0,7 mm de diâmetro.....	31
Figura 12 - Conjunto pinça, tupia e fresa.....	32
Figura 13 - Demonstração da medição realizada para confirmação do batimento devido a fabricação da pinça – valor negativo.....	32
Figura 14 - Demonstração de uma das variáveis - Efeito do batimento com a microfresa em movimento	34
Figura 15 - Corpo de prova preliminar.....	35
Figura 16 - Experimento utilizando microfresas de 0,4 mm de diâmetro.	36
Figura 17 - Experimento utilizando microfresas de 0,7 mm de diâmetro	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	USINABILIDADE DE MATERIAIS.....	15
2.2	FRESAMENTO	18
2.3	FRESA DE TOPO RETO – 2 CORTES.....	19
2.4	PROCESSO DE MICROFRESAMENTO.....	20
	2.4.1 Microfresamento.....	21
	2.4.2 Alguns Fatores Que Influenciam O Microfresamento.....	23
2.5	AÇO INOXIDÁVEL AISI 316	25
	2.5.1 Características	25
	2.5.2 Aplicações.....	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	MATERIAIS.....	27
3.2	MÉTODOS	27
3.3	EXPERIMENTO	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

Com o rápido desenvolvimento das tecnologias de microengenharia, surge uma tendência no crescimento da miniaturização de produtos principalmente nas áreas de aeronáutica, automobilística, médico-odontológica e telecomunicações (Uhlmann et al. 2005a). Demandas da redução de tamanho, peso, baixo erro de forma e alta qualidade superficial, enquanto que ao mesmo tempo é exigida redução dos custos dos componentes e dos tamanhos dos lotes produzidos são os principais requisitos que regem a miniaturização (Dornfeld and Lee, 2008).

De acordo com Astakhov (2005), 15% do total de componentes mecânicos mundialmente manufaturados são derivados da usinagem, enquanto que o fresamento, no setor de moldes e matrizes, é uma das técnicas mais utilizadas (SOUZA, COELHO e RODRIGUES, 2010).

Com relação ao processo de usinagem, o desgaste do ferramental nos conduz a alterações que influenciam diretamente no acabamento superficial, bem como na forma das peças usinadas. Fatores como a deposição de material da peça sobre a ferramenta, mudança na geometria da ferramenta devido a grandes esforços, a forma dos gumes e a perda de material da ferramenta são grandes influenciadores do acabamento superficial da peça. Considerando as dimensões e a grande influência sobre os vários aspectos do processo e da peça, é necessário, na microusinagem, considerar o tamanho e baixa rigidez das microferramentas, a fim de redefinir o critério de desgaste (Tansel et al. 1998).

De acordo com Tansel et al. (1998), a fadiga resultante das variações dos esforços de corte e da tensão no eixo da ferramenta podem levar a quebra e os esforços de corte podem ser um quesito utilizado na decisão do fim de vida de uma ferramenta.

Constata-se com o decorrer do avanço tecnológico a necessidade de estudos na área de usinabilidade, tais estudos nos levam ao desenvolvimento de novos padrões e meios de fabricação, o que também pode acarretar numa maior competitividade no mercado e uma maior eficácia no uso de materiais e recursos. Entretanto, constata-se que o maior responsável pelo desenvolvimento de microdispositivos é o setor de manufatura. Quando atentamos a esse fato, notamos que a moldagem de polímeros termoplásticos através da microinjeção torna-se uma das tecnologias chave para a microfabricação, bem como, quando nos voltamos

para a usinagem, não podemos deixar de citar o microfresamento utilizado na manufatura do molde, das ferramentas de corte, dos dispositivos de fixação e das máquinas-ferramentas.

Devido à isso faz-se necessário o estudo na área de microusinagem, onde busca-se aperfeiçoamento e melhoria de técnicas, novos parâmetros e meios de fabricação na área.

1.1 JUSTIFICATIVA

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral a viabilização do processo de microusinagem de aço inox 316 no laboratório de usinagem da Universidade Tecnológica Federal Do Paraná – Campus Ponta Grossa.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste projeto são:

- Realizar o processo de microusinagem no laboratório de usinagem da Universidade Tecnológica Federal Do Paraná – Campus Ponta Grossa;
- Analisar a eficácia do processo de microusinagem;

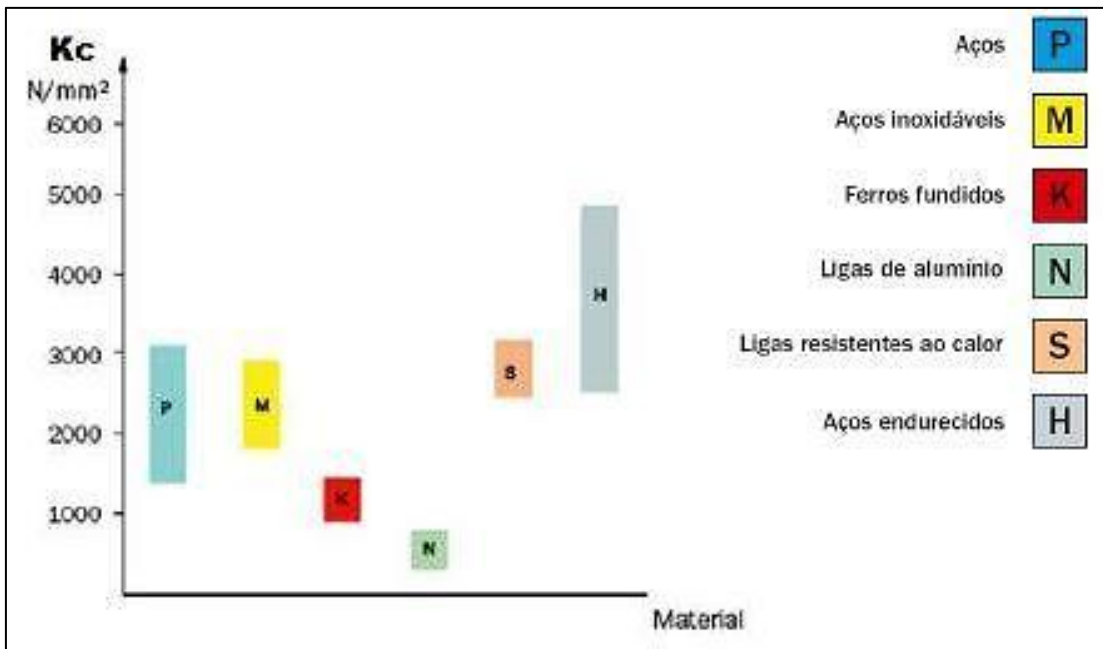
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 USINABILIDADE DE MATERIAIS

São utilizados os seguintes critérios para avaliar a usinabilidade: vida da ferramenta, força de usinagem, qualidade superficial da peça e forma dos cavacos. Quando se trata de aços inoxidáveis, sua usinabilidade é geralmente influenciada pelos elementos de liga do material, tratamento térmico realizado e processo de fabricação do mesmo (forjado, fundido, etc), porém não se pode deixar de citar critérios importantes, dureza, composição química, condutividade térmica, propriedades mecânicas e de eventual encruamento (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006).

Devido ao seu elevado limite de resistência à tração, a maioria dos aços inoxidáveis apresenta uma má usinabilidade quando relacionado com a vida da ferramenta, isso se deve a alta taxa de encruamento, ductilidade e tenacidade, baixa condutividade térmica e forte aderência nas superfícies da ferramenta durante o corte. Esses fatores explicam a tendência do material de formar aresta postiça de corte na ferramenta durante as operações tradicionais de usinagem (TRENT e WRIGHT, 2000; SANTOS e SALES, 2007).

Figura 1 - Demonstrativo da Força Específica de Corte para Diferentes Materiais



Fonte: Sandvik Coromant (2010).

Para o caso do aço inoxidável, os valores de força específica de corte (Kc), encontram-se entre 1800-2850 N/mm², conforme pode-se observar na Figura 1. Esse fator é muito importante quando se fala da baixa taxa de usinabilidade.

Figura 2 - Comparativo de Força Específica de Corte

FORÇA ESPECÍFICA DE CORTE Kc - FRESAMENTO

Material	Resistência à Tração e Dureza (MPa)	Coeficiente de Força Específica Kc (MPa)				
		0.1 (mm/dente)	0.2 (mm/dente)	0.3 (mm/dente)	0.4 (mm/dente)	0.6 (mm/dente)
Aço Baixo Carbono (com ligas especiais)	520	2200	1950	1820	1700	1580
Aço Baixo Carbono	620	1980	1800	1730	1600	1570
Aço Duro	720	2520	2200	2040	1850	1740
Aço Ferramenta	670	1980	1800	1730	1700	1600
Aço Ferramenta	770	2030	1800	1750	1700	1580
Aço Cromo-Manganês	770	2300	2000	1880	1750	1660
Aço Cromo-Manganês	630	2750	2300	2060	1800	1780
Aço Cromo-Molibdênio	730	2540	2250	2140	2000	1800
Aço Cromo-Molibdênio	600	2180	2000	1860	1800	1670
Aço Níquel Cromo-Molibdênio	940	2000	1800	1680	1600	1500
Aço Níquel Cromo-Molibdênio	352HB	2100	1900	1760	1700	1530
Aço Inoxidável Austenítico	155HB	2030	1970	1900	1770	1710

Fonte: Sandvik Coromant (2010).

Segundo Vieira et al. (2010) a interação entre a ferramenta, o cavaco, a peça e o cisalhamento são os responsáveis pela geração de calor durante o processo de usinagem. As altas temperaturas podem ser observadas na interface cavaco-ferramenta, que influenciam substancialmente o modo de formação dos cavacos, a força de corte e a vida da ferramenta.

Os cavacos removidos durante a usinagem exercem altas pressões na aresta de corte. Estas pressões, quando combinadas com altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta causam a aderência de porções de cavacos na ferramenta. Além disso, a baixa condutividade térmica dos aços inoxidáveis contribui com o aumento do calor durante o corte, ficando maior quantidade de calor na peça e na ferramenta de corte do que a quantidade de calor que é removida juntamente aos cavacos (LIN, 2002 e SILVA et al., 2007).

Segundo Machado et al. (2009), os responsáveis pelo rápido desgaste das ferramentas são os carbonetos abrasivos presentes nos aços inoxidáveis altamente ligados, sendo este um dos principais motivos para o uso de ferramentas revestidas.

A fim de envolver todas as operações tecnológicas e elevar a eficiência de uma operação de fresamento em materiais endurecidos, deve-se levar em consideração a seleção das melhores ferramentas, geometrias de insertos e parâmetros de corte adequados. Para os parâmetros são utilizados baixos valores de profundidade de corte (a_p), valores de avanço (f) compatíveis com o padrão de acabamento desejado e níveis de velocidade de corte (V_c) inferiores aos praticados em materiais não endurecidos (SAGLAM, YALDIZ e UNSACAR, 2007).

O aumento da velocidade de corte é muito mais significativo quando se trata da redução da vida da fresa do que o avanço por aresta e em seguida a profundidade de corte (STEMMER, 2007).

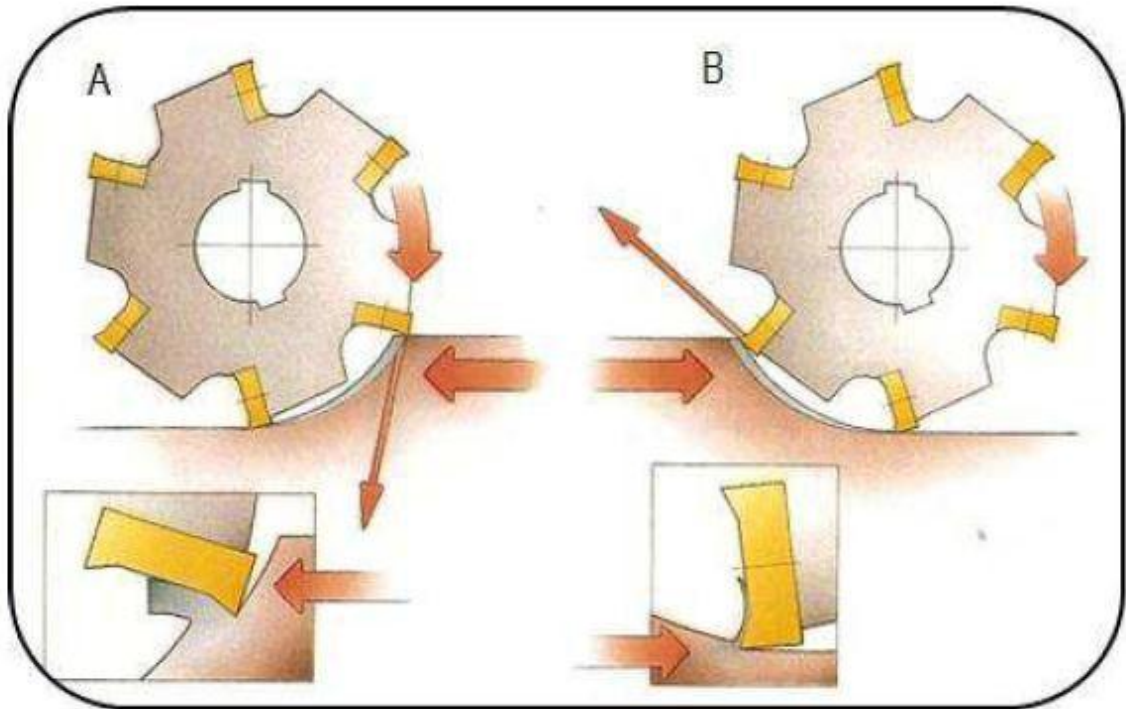
Dentre os elementos a serem analisados na escolha da ferramenta para o processo de usinagem contempla-se também a classe da ferramenta, que deve ser apropriada ao material usinado (ATKINS, 2009).

2.2 FRESAMENTO

O processo de usinagem por fresamento consiste da utilização de uma ferramenta denominada de fresa, que por sua vez é considerada uma ferramenta multicortante e é rotacionada no próprio eixo. A peça usinada é fixa numa mesa que se movimenta linearmente (BLACK, 1995). Esse processo é predominante na fabricação de moldes e matrizes, dada sua versatilidade na produção de geometrias diversas, além de elevadas taxas de remoção de material.

A usinagem por fresamento pode ser classificada como concordante (Figura 3a), quando os movimentos de corte e de avanço possuem a mesma direção e o mesmo sentido e discordante (Figura 3b), quando os movimentos de corte e avanço têm mesma direção, mas sentidos opostos (FERRARESI, 2006).

Figura 3 - Sentido de corte



Fonte: Sandvik Coromant (2010).

2.3 FRESA DE TOPO RETO – 2 CORTES

Considerada uma ferramenta de usinagem com uma larga empregabilidade na indústria, esse tipo de fresa possui aspectos como alta taxa de remoção de material e produção de superfícies com boa precisão superficial, além do fato de ser empregada num processo de elevada flexibilidade. O tipo em questão (Figura 4) vem sendo utilizado na fabricação de superfícies planas, contornos, ranhuras e cavidades.

Figura 4 - Microfresa de Topo Reto - 2 Cortes



Dentre as possíveis variações do processo, a fresa em questão é amplamente utilizada no setor de ferramentaria, onde, para deformar o material no processo, a mesma necessita de velocidades e avanços adequados com o seu diâmetro e revestimento para remoção de material da peça.

O conhecimento do uso correto da fresa de topo reto e da grandeza e direção dessa força também é de vital importância no dimensionamento dos elementos de máquinas-ferramentas como mancais, guias, acionamentos, sistemas de fixação e na determinação dos parâmetros de corte e estimativa da precisão atingível durante a usinagem.

2.4 PROCESSO DE MICROFRESAMENTO

A seguir são apresentados alguns conceitos importantes sobre o tema deste trabalho, além de uma revisão dos estudos mais recentes relacionados aos assuntos abordados.

2.4.1 Microfresamento

Recentemente, a grande maioria dos ramos industriais tem visto crescer a demanda por componentes e produtos miniaturizados. Diversas tecnologias já existentes (como o processo LIGA - Litographie, Galvanoformung, Abformung) apresentam certas limitações em relação à produção em massa, materiais que podem ser trabalhados e às geometrias que se pode obter (Takács, Verö e Mészáros, 2003).

Segundo Takács, Verö e Mészáros, a adaptação dos processos convencionais de remoção de material para escalas micrométricas, principalmente o fresamento, é uma alternativa viável de produção, já que este apresenta uma grande versatilidade em relação às operações de usinagem, permitindo a fabricação de uma ampla gama de micro produtos.

Esse processo apresenta grandes vantagens econômicas e também quanto à flexibilidade dos lotes que podem ser produzidos, sendo necessário o desenvolvimento de ferramentas adequadas para os materiais que se deseja usar.

Segundo Câmara et al. o microfresamento é uma solução para a fabricação de diversos tipos de componentes (podendo apresentar geometrias tridimensionais) para diversos tipos de materiais, como ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos.

Apesar de diversas semelhanças com o processo convencional de fresamento, algumas características específicas surgem com a redução das dimensões envolvidas nas operações. Segundo Komatsu, Yoshino e Torizuka, o tamanho e a orientação dos grãos do material usinado, por exemplo, tem influência direta no processo de corte. Muitas vezes o tamanho do grão tem a mesma ordem de grandeza da aresta de corte da fresa.

O desgaste da ferramenta leva a um aumento contínuo das forças de corte e acaba por provocar a sua quebra, sendo importante a escolha da ferramenta correta e dos parâmetros mais adequados de usinagem para prolongar a vida útil da mesma.

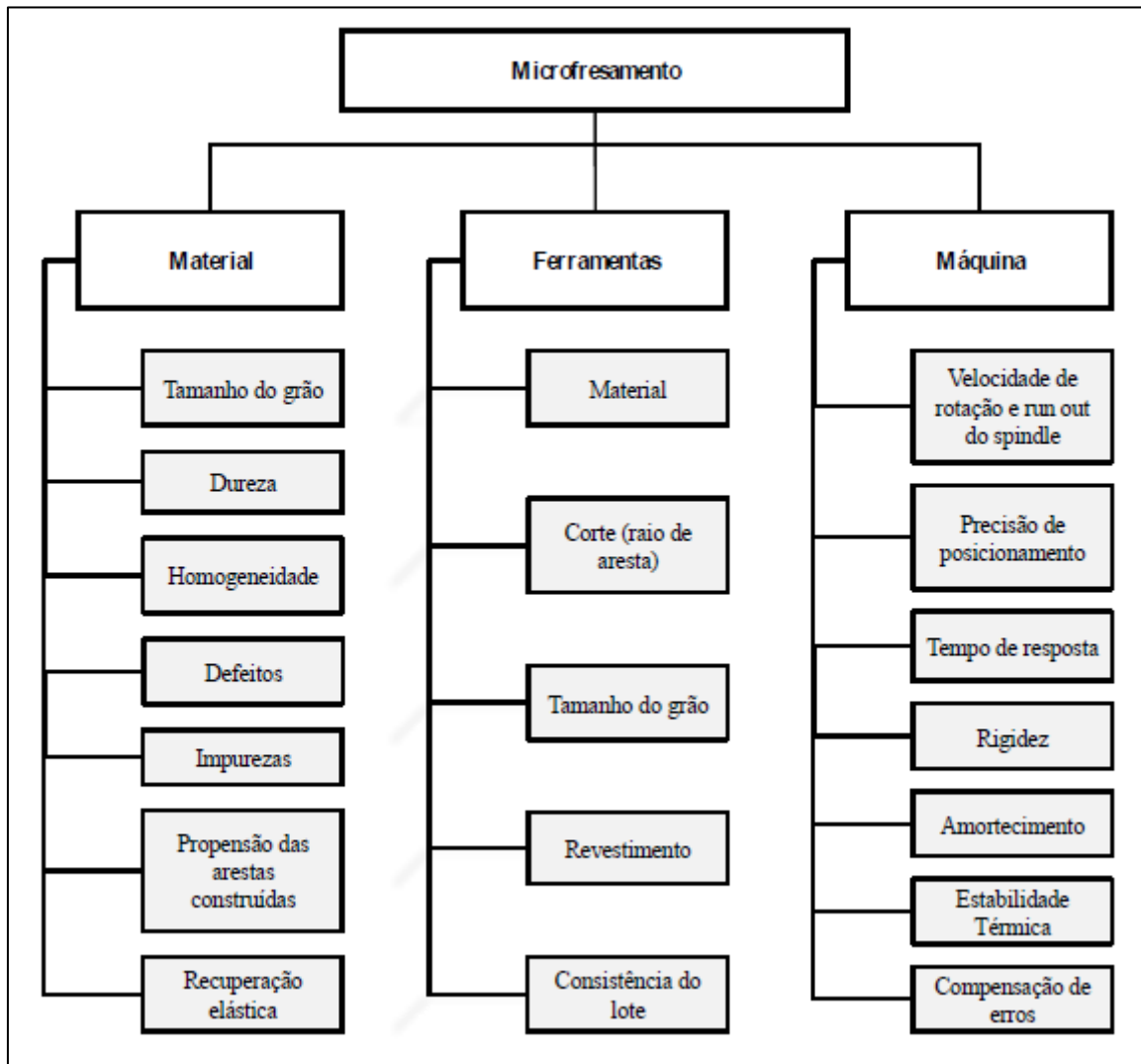
A rugosidade superficial do material usinado, por exemplo, está diretamente ligada ao avanço por dente da ferramenta. Para valores muito baixos de avanço não se consegue atingir a espessura mínima de cavaco. Sendo assim, o material não é removido, apenas deformado. O mesmo ocorre quando a profundidade de

corte é pequena, ocorrendo apenas a deformação plástica do material, sem a sua remoção efetiva (Takács, Verö e Mészáros , 2003).

No microfresamento, o processo de remoção de material é dominado por diferentes fenômenos além do corte, como ploughing, rubbing e deformações plásticas e elásticas. Isso tem como resultado o aumento da rugosidade superficial e também na formação de rebarbas, sendo esses aspectos uma boa forma de avaliar se os parâmetros de usinagem adotados são adequados (Kiswanto et al., 2014).

Alguns dos aspectos importantes que devem ser analisados no processo de microfresamento estão apresentados na Figura 5, como o material a ser usinado, as ferramentas de corte, além da máquina onde as operações serão realizadas.

Figura 5 - Aspectos-chave do microfresamento



Fonte: Câmara et al. (2012).

Estes fatores devem ser analisados para que se possa entender a influência deles no resultado final do microfresamento, permitindo a escolha de parâmetros no planejamento da manufatura.

2.4.2 Alguns Fatores Que Influenciam O Microfresamento

2.4.2.1 Ferramentas de corte

A demanda por novas tecnologias de fabricação, especialmente os processos de microusinagem, surge da necessidade de se criar formas complexas em partes tão pequenas, sendo que para isso é necessário o desenvolvimento de ferramentas de corte específicas.

Existem diversos tipos de processos de microusinagem, conforme apresentado anteriormente, proporcionando diversas alternativas para a remoção de material. Essas técnicas buscam substituir o corte mecânico devido à dificuldade em se fabricar ferramentas com dimensões tão reduzidas, que acabam se quebrando com facilidade durante o corte (Bissacco, Min e Takeuchi, 2006)

A Figura 6 mostra a diferença de tamanho entre uma fresa de topo reto de tamanho convencional (6 mm de diâmetro) e outra própria para o microfresamento (200 μm de diâmetro).

Figura 6 - Fresa de topo reto de 6 mm de diâmetro (à esquerda) e micro-fresa de 200 μm (à direita)



Fonte: Bissacco, Min E Takeuchi (2006).

Segundo Fleischer et al., a concepção geométrica das microfresas foi sempre baseado na geometria das fresas convencionais, apenas reduzindo-se o tamanho, partindo da premissa que os efeitos do processo de corte no microfresamento são análogos ao processo convencional, diferentemente do que apontam os estudos nesta área em relação ao comportamento das ferramentas.

As tolerâncias no diâmetro e no raio de aresta da microfresa não permitiam que fossem mantidas condições de corte constantes para os avanços de apenas alguns microns. Além disso, muitas vezes apenas uma das arestas da ferramenta realiza o corte efetivamente, causando um aumento do desgaste, das forças de corte envolvidas e da probabilidade de quebra desta ferramenta. Isso também implica na deterioração da qualidade superficial do material usinado.

É preciso uma compreensão do processo de corte do microfresamento, para que sejam desenvolvidas abordagens tecnológicas para fabricação das ferramentas, levando-se em conta aspectos estruturais e mecânicos para sua otimização (Fleischer et al.).

2.4.2.2 Material da peça

Com a redução do tamanho da ferramenta, reduz-se também as dimensões e o volume do material removido, porém o tamanho do grão do material mantém o mesmo. No fresamento convencional, o cavaco que se forma compreende um grande número de grãos. Já no microfresamento, muitas vezes o cavaco que se forma tem a espessura de apenas um grão do material que está sendo usinado. Quando essa interação com apenas um grão ocorre, as forças de corte envolvidas variam de forma drástica, dependendo da orientação de cada grão (Bissacco, Hansen e De Chiffre).

Segundo Bissacco, Hansen e De Chiffre, a escolha de materiais com o menor tamanho de grão possível e com alta homogeneidade, traz benefícios para o processo de microfresamento.

O processo de remoção de material no microfresamento torna a interação entre a aresta de corte da ferramenta e o material usinado um fator preponderante nos resultados obtidos. A microestrutura do material usinado pode ter influência significativa nesta interação, modificando as condições de corte. Os efeitos das propriedades do material no mecanismo de corte também exercem grande influência neste processo. Materiais com composições semelhantes podem apresentar comportamentos diferentes durante o microfresamento quando o tamanho dos grãos é diferente. Muitas vezes o volume de material removido durante a usinagem é comparado ao tamanho dos próprios grãos, tornando o acabamento superficial bastante dependente da sua microestrutura (Popov et al.).

2.5 AÇO INOXIDÁVEL AISI SAE 316

2.5.1 Características

O aço inoxidável AISI 316 é um aço cromo-níquel molibdênio, inoxidável austenítico, não temperável e não magnético que possui boa conformabilidade a frio, alta capacidade de endurecimento por deformação e uma elevada ductibilidade (vide Tabela 1 para composição). Embora possua uma usinabilidade tecnicamente

ruim, possui ótima resistência à oxidação até a temperatura de aproximadamente 875 °C, porém a resistência à corrosão intercrystalina é garantida até a temperatura de aproximadamente 300 °C.

Tabela 1 - Composição Química do Aço AISI 316

ABNT/SAE/AISI	C máx.	Mn máx.	P máx.	S máx.	Si máx.	Ni	Cr	Mo
316	0,08	2,00	0,045	0,030	0,75	10,00 - 14,00	16,00 -18,00	2,00 - 3,00

2.5.2 Aplicações

Normalmente os aços inoxidáveis AISI 316 destinado à fabricação de peças que exigem alta resistência à corrosão localizada provocada por ácidos sulfúrico, sulfuroso e banhos clorados. Adequado à fabricação de equipamentos navais, cirúrgicos, criogênicos e farmacêuticos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão apresentados os materiais e métodos utilizados no preparo e na realização do estudo e consequente experimento.

3.1 MATERIAIS

Foram utilizadas microfresas da marca Router de metal duro, com gumes revestidos com AlTiSiN, um revestimento estruturado nanométricamente com uma micro dureza Vickers corresponde a 3500 HV, uma espessura entre 1 a 4 μm , coeficiente de atrito de 0,4 e temperatura máxima de utilização de 900°C. O revestimento possui propriedades como a alta dureza a quente, alta estabilidade química, baixa condutividade térmica e elevada proteção ao desgaste, fazendo com que o mesmo seja indicado para aplicações de usinagem sob condições severas de corte. Microfresas com diâmetros nominais de $D = 0,4 \text{ mm}$ e $D = 0,7 \text{ mm}$, diâmetro de haste de $D = 4 \text{ mm}$, comprimento total $L = 50 \text{ mm}$, dureza HRC55, ângulo de hélice $\varepsilon = 30^\circ$ foram utilizadas.

O corpo de prova utilizado foi um bloco retangular de aço inoxidável AISI 316 que foi usinado e preparado no laboratório de fabricação do departamento de Mecânica da UTFPR – Campus Ponta Grossa.

3.2 MÉTODOS

Os testes foram conduzidos no Laboratório de Usinagem da UTFPR, no campus de Ponta Grossa, em uma fresadora manual Diplomat 3001. Devido à rotação da fresadora atingir no máximo quatro mil e quinhentas rotações por minuto, fez-se necessária a construção de um dispositivo (Figura 7) que teve como finalidade servir de acoplador para que fosse possível anexar à fresadora, uma Tupia de Palma 1800 da marca Skil (Figura 8), no seu eixo árvore.

Figura 7 - Dispositivo Acoplador



Figura 8 - Modelo de Tupia de palma 1800 da marca Skil



Fonte: Skil Ferramentas Eléctricas | Skil LA

Como a Tupia possui uma rotação bem mais elevada que a fresadora, pode-se alcançar uma velocidade de corte maior, o que segundo Uhlmann et al. (2005a), torna o processo de microssinagem mais eficaz.

Figura 9 - Dispositivo acoplado à fresadora



Nota-se na Figura 9, o dispositivo devidamente acoplado na fresadora. Através do dispositivo alcançou-se uma rotação de aproximadamente $n = 32000$ rpm, aproximadamente sete vezes a rotação máxima da fresadora.

O dispositivo foi composto por um cone de acoplamento, que por sua vez tinha a finalidade de unir a Tupia de Palma ao eixo árvore da fresadora. Uma base soldada, que possuía a finalidade de acoplar a Tupia ao dispositivo, de modo que a mesma permanecesse vertical e fixa (Figura 7).

Como a pinça original utilizada na Tupia não atendia os requisitos necessários para fixar as microfresas de aço rápido, fabricou-se uma pinça (Figura 10) utilizando um torno manual Nardini para furação e um torno CNC para fabricação do cone, ambos localizados no Laboratório de Usinagem da UTFPR. Pode-se comparar a pinça com a microfresa de 0,7 mm de diâmetro na Figura 11 e na Figura 12 é possível verificar o conjunto pinça, tupia e fresa.

Figura 10 - Pinça fabricada para Tupia Skill 7800



Figura 11 - Comparação da pinça com a microfresa de 0,7 mm de diâmetro



Figura 12 - Conjunto pinça, tupa e fresa.



Conforme demonstra a Figura 13, a fabricação da pinça acarretou num batimento de aproximadamente dois décimos de milímetro, identificado por meio de um relógio comparador.

Figura 13 - Demonstração da medição realizada para confirmação do batimento devido a fabricação da pinça – valor negativo



3.3 EXPERIMENTO

Durante o experimento foi utilizado o avanço automático da mesa, porém como o mesmo não apresenta exatidão por ser analógico calculou-se através de uma simples expressão de deslocamento sobre tempo, a velocidade da mesma, onde através da definição de um valor de avanço da mesa utilizando o medidor analógico, fez-se deslocar a mesa durante o período de um minuto. Após o tempo

estipulado, verificou-se de quanto foi o deslocamento através do monitor e a partir disso, utilizando a expressão de deslocamento sobre tempo estabeleceu-se a velocidade da mesa. Através de ajustes no medidor analógico de velocidade da mesa, aproximou-se a velocidade da mesa do valor desejado para a realização do experimento. Os corpos de prova de aço inox AISI 316 70x40x10 mm foram montados em uma morsa, utilizando calços padrão retificados para que atingissem a altura necessária para a realização do experimento, onde todos os corpos de prova foram na mesma posição e todas as usinagens utilizaram o mesmo procedimento.

Os parâmetros de corte foram selecionados tentando garantir que a espessura do cavaco fosse maior do que o raio do gume da ferramenta (Uhlmann et al. 2009). Com o objetivo de respeitar as áreas de instabilidade, foi adotada a estratégia de corte em cheio, ou seja, abertura de canais, com comprimento de $L_t = 70$ mm e velocidade de corte de aproximadamente $V_c = 40,2$ m/min e $V_c = 70,3$ m/min, para as respectivos diâmetros nominais de $D = 0,4$ mm e $D = 0,7$ mm, os parâmetros como avanço da mesa (v_f), avanço por dente (a_p) e profundidade de corte (f_z) podem ser vistos na Tabela 2 e foram definidos mantendo uma taxa de remoção de material constante de $V = 0,64$ mm³/min, pois segundo Zanatta e Gomes (2016) a taxa de remoção constante é um fator de extrema importância para a produtividade, além de poder contribuir de forma expressiva na minimização dos esforços de usinagem.

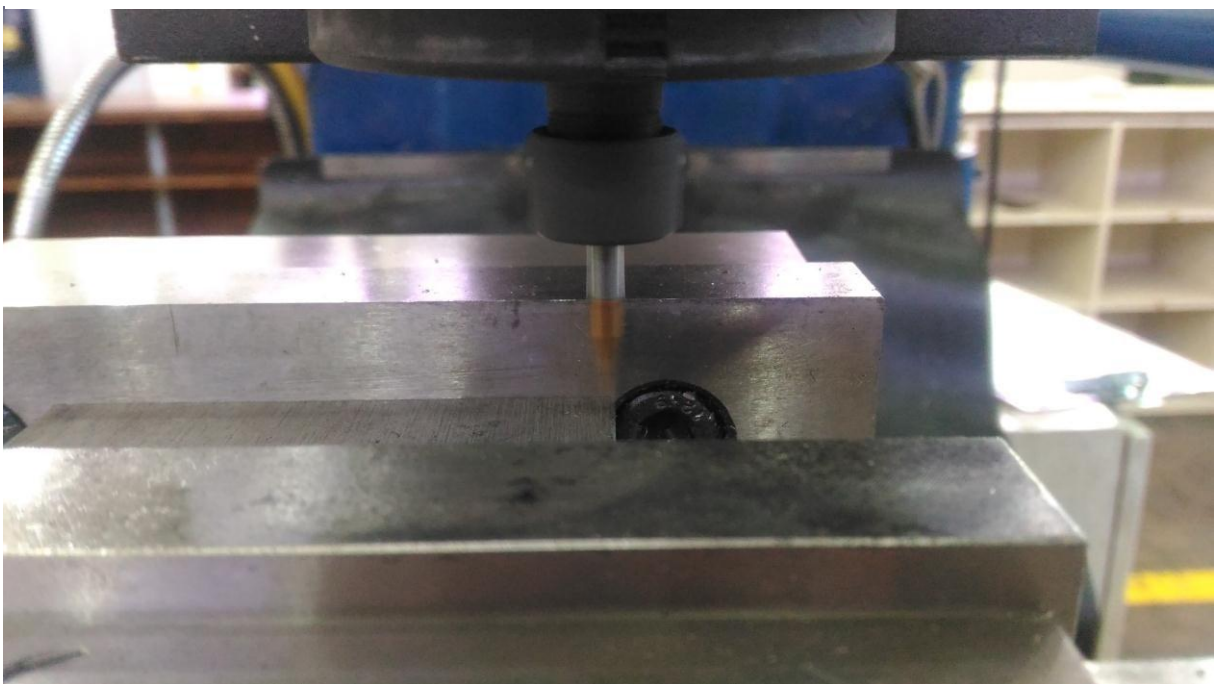
Tabela 2 - Combinações de parâmetros de corte

Experimento	Diâmetro nominal D = 0,4mm				Diâmetro nominal D = 0,7mm			
	V _c (m/min)	a _p (µm)	f _z (µm/dente)	V _f (mm/min)	V _c (m/min)	a _p (µm)	f _z (µm/dente)	V _f (mm/min)
1	40,2	25	1	64	70,3	14,3	1	64
2	40,2	12,5	2	128	70,3	7,15	2	128

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A adaptação da fresadora manual Diplomat 3001 ocorreu de modo satisfatório, possibilitando a acoplagem da Tupia de Palma à fresadora, de modo a permitir uma movimentação da mesa relativamente boa e uma fixação satisfatória da Tupia para o processo propriamente dito de microfresamento.

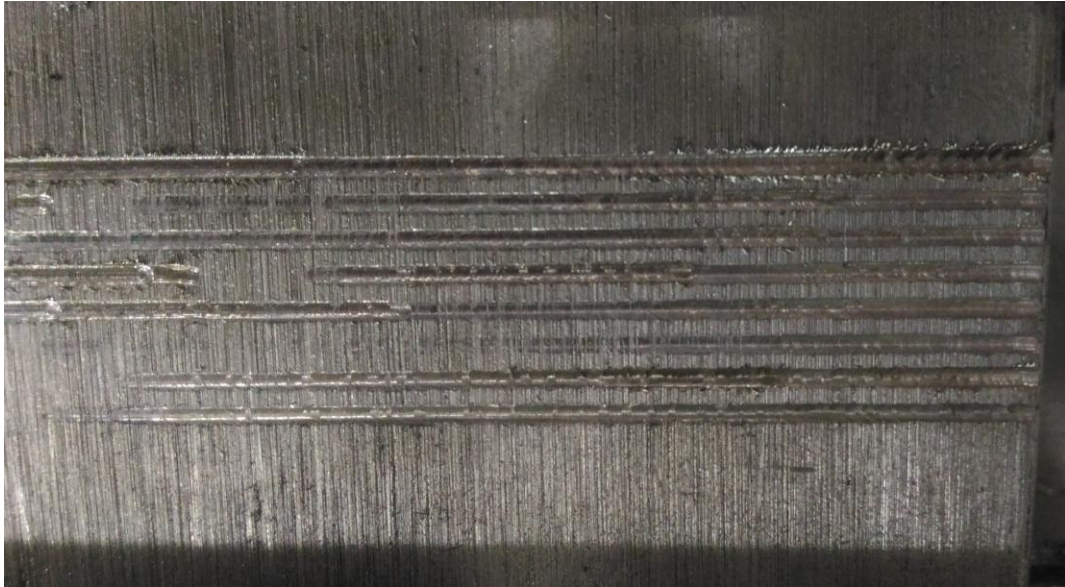
Figura 14 - Demonstração de uma das variáveis - Efeito do batimento com a microfresa em movimento



A fixação da microfresas na Tupia apresentou condições insatisfatórias, isso se deu devido ao batimento (Figura 14) causado na fabricação da pinça responsável pela sua fixação.

Os testes se sucederam após um experimento preliminar onde foi utilizada uma microfresa de 0,7 mm de diâmetro e um corpo de prova de aço inox 316 sem faceamento prévio. Durante o mesmo foram realizados oito canais (Figura 15) a fim de verificar a influência do batimento, fixação do corpo de prova e precisão dos parâmetros de corte.

Figura 15 - Corpo de prova preliminar



Durante o experimento preliminar constatou-se certa irregularidade na superfície do corpo de prova conforme pode ser visto na Figura 15. Comprovando a necessidade do faceamento do corpo de prova antes da continuidade dos experimentos.

No início dos experimentos propriamente ditos, optou-se pelas microfresas de 0,4 mm de diâmetro, porém como pode ser observado na Figura 16 nenhuma das microfresas teve resistência suficiente para continuar o corte, desenvolvendo-se o lascamento da aresta de corte prematuramente, o qual evoluiu rapidamente até o colapso da ferramenta.

Figura 16 - Experimento utilizando microfresas de 0,4 mm de diâmetro.



Estima-se que devido a combinação das forças provenientes de algumas variáveis (batimento, velocidade da mesa, profundidade de corte, etc.) do processo que não puderam ser devidamente controladas, foram demasiadamente grandes e impediram a continuidade dos canais. Nas duas tentativas demarcadas na Figura 16, utilizaram-se os parâmetros descritos na linha 1 da Tabela 2.

Visto que para as fresas com diâmetros menores o fresamento de aço inox 316 dentro dos parâmetros e variáveis do projeto tornou-se inviável optou-se por utilizar as microfresas de diâmetro de 0,7 mm. Ao utilizar os parâmetros descritos na linha 2 da Tabela 2, previa-se que para uma profundidade de corte menor os esforços gerados sobre a ferramenta seriam menores e conforme pode-se observar na Figura 17, com o diâmetro maior e a profundidade de corte menor, foi possível a realização parcial de um canal de 47 mm de comprimento, totalizando uma remoção de 23,5 mm³ de material da peça, porém no decorrer do processo ocorreu

o lascamento da aresta de corte e conseqüentemente o colapso da aresta da ferramenta.

Figura 17 - Experimento utilizando microfresas de 0,7 mm de diâmetro



Após analisar os resultados apresentados, conclui-se que para o processo de microfresamento é necessária uma máquina de maior robustez. Apesar de o dispositivo ter atingido resultados esperados, ainda sim houveram variáveis recorrentes que tornaram a eficácia do processo em si, minimamente satisfatória.

Chegou-se à conclusão de que para os parâmetros em questão e com as variáveis apresentadas no decorrer do processo, as microfresas foram submetidas a esforços além do limite de suas resistências, resultando no rompimento prematuro das mesmas, partindo de um lascamento da aresta de corte.

5 CONCLUSÕES

Com relação ao objetivo geral do trabalho, conclui-se que viabilização do processo de microusinagem de aço inox 316 no laboratório de usinagem da Universidade Tecnológica Federal Do Paraná – Campus Ponta Grossa não é possível atualmente devido ao equipamento hoje utilizado não fornecer um controle adequado das variáveis do processo.

Quando atenta-se aos objetivos específicos constata-se que embora tenha sido curto devido à quebra prematura da ferramenta, o processo em si de microusinagem foi iniciado com sucesso, porém sua eficácia deixou a desejar, uma vez que não foi possível concluir o mesmo e realizar as análises pertinentes. As microfresas romperam-se uma a uma devido as variáveis do processo que não puderam ser controladas devidamente o que ocasionou na interrupção prematura do trabalho.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os seguintes tópicos são sugeridos para investigações e trabalhos futuros:

- Influência do aperfeiçoamento do dispositivo de acoplamento, tendo como principal finalidade restringir ao máximo as variáveis do processo;
- Influência de outros parâmetros de corte para o aço inoxidável (AISI 316);
- Repetição dos experimentos apresentados neste trabalho com valores diferentes para os diâmetros das microfresas utilizadas;
- Utilizar da mesma premissa para estudos aplicados em microfuração de metais.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ZANATTA, A. M.; GOMES, J. O. MICROUSINAGEM NO AÇO P20 PARA MOLDES. Ferramental (Curitiba), v. 64, p. 23-31, 2016.

ARAMCHAROEN, A.; MANTIVENGA, P.T.; Yang, S.; Cooke, K.E.; Teer, D.G., 2008, "Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel". International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.48, p.1578–1584.

DORNFELD, D.; MIN, S.; TAKEUCHI, Y., 2006, "Recent Advances in Mechanical Micromachining". CIRP Annals - Manufacturing Technology, Amsterdam, Vol. 55, No. 2, pp. 745-768.

UHLMANN, E.; PILTZ, S.; DOLL, U., 1989, Machining of micro/miniature dies and moulds by electrical discharge machining - Recent development. Journal of Materials Processing Technology, v.167, p.488–493, 2005a. Bordalo, S.N.,

FERZIGER, J.H. AND KLINE, S.J., "The Development of Zonal Models for Turbulence", Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Vol. 1, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 41-44.

ZANATTA, A. M., 2013, Influência de partículas de segunda fase na usinabilidade e polibilidade. São José dos Campos: ITA, 190 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Materiais e Processos de Fabricação – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

ALTAN, T.; LILLY, B.; YEN, Y. C. Manufacturing of Dies and Molds. Annals of the CIRP - Manufacturing Technology. v. 50, pp. 404 - 422, Ohio, USA, 2001.

AMIN, A.; ABRAHAM, I.; KHAIRUSSHIMA, N.; AHMED, M. I. **Influence of preheating on performance of circular carbide inserts in end milling of carbon steel.** Journal of Materials Processing Technology. v. 185, pp. 97 – 105, Kuala Lumpur, Malaysia, 2007.

ARCELOR MITTAL. **Aços Inoxidáveis: Aplicações e Especificações.** 2008. ASM INTERNATIONAL – ASM Handbook. v. 16, Machining, 3ª ed. Metals Park, 1989.

ASTAKHOV, V. P. On the inadequacy of the single-shear plane model of chip formation. International Journal of Mechanical Sciences. v.47, pp. 1649 – 1672, USA, 2005.

ATKINS, T. Toughness and processes of material removal. *Wear*. v. 267, pp. 1764 - 1771, Whiteknights, United Kingdom, 2009.

BRANDÃO, L. C. Estudo experimental da condução de calor no fresamento de materiais endurecidos utilizando altas velocidades de corte. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo. São Carlos, Brasil, 2006.

CALLISTER JR., W. **Ciência e engenharia de materiais**. 5ª ed. New York, USA, 1991.

FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. Ed. Edgard Blücher Ltda., 12ª reimpressão, São Paulo, Brasil, 2006.

FERREIRA, A.; ALBRECHT, F.; ROHLOFF, R.; ALBANO, A.; SOUZA, A. Estudo dos processos de fabricação para cavidades de moldes com geometria complexa. *Revista do Instituto Superior Tupy*. v. 10, pp 43 – 51, Joinville, Brasil, 2010.

FOX-RABINOVICH, G. S.; BEAKE, B.; ENDRINO, J. L.; VELDHUIS, S.; PARKINSON, R.; SHUSTER, L.; MIGRANOV, M. Effect of mechanical properties measured at room and elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings. *Surface e Coatings Technology*. v. 200, pp. 5738 – 5742, Ontario, Canadá, 2006.

GHANI, J. A.; CHOUDHURY, I. A.; MASJUKI, H. H. Wear mechanism of TiN coated carbide and uncoated cermets tools at high cutting speed applications. *Journal of Materials Processing Technology*. v. 153 - 154, pp. 1067 – 1073, Bangi, Malaysia, 2004.

GREGOLIN, J. A. R.; ANTUNES, A. M. S. Estudo prospectivo sobre tecnologias de fabricação de moldes para injeção de plásticos. Relatório do projeto de pesquisa fomentado pela FINEP. 2002.

GU, J.; BARBER, G.; TUNG, S.; GU, R. J. **Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts**. *Wear*. v. 225 – 229, pp. 273 – 284, USA, 1999.

HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos**. Ed. Artliber, São Paulo, Brasil, 2004.

ISO 3685. **Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools**, 1977.

HOGMARK, S.; JACOBSON, S.; LARSSON, M. **Design and evaluation of tribological coatings**. Wear. v. 246, pp. 20 – 33, Uppsala, Suécia, 2000.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 1ª ed. Ed. Blucher, São Paulo, Brasil, 2009.

OLIVEIRA, A. J. Análise do desgaste de ferramentas no Fresamento com Alta Velocidade de aços endurecidos. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2007.

PRENGEL, H. G.; JINDAL, P.; WENDT, K.; SANTHANAM, A.; HEDGE, P.; PENICH, R. A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools. Surface and Coatings Technology. v. 139, pp. 25 – 34, Fuerth, Germany, 2001.

QIAN, L.; HOSSAN, M. R. Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts. Journal of Materials, Processing and Technology. v. 191, pp. 274–278, Brookings, United States, 2007.

ROHLOFF, R.C.; ALBANO, A.E.; SOUZA, A. F. Analyses of flank wear in coated tools with different coverages used in milling stainless steel AISI 420. 21th Brazilian Congress of Mechanical Engineering. Natal, Brasil, 2011.

ROHLOFF, R. C.; DEGLMANN, E.; ALBANO, A.; SOUZA, A. F. Análise do desgaste de ferramentas de corte com diferentes revestimentos no fresamento de aço inoxidável. 6º Congresso Brasileiro de Fabricação. Caxias do Sul, Brasil, 2011.

SANDVIK COROMANT. Manual técnico de usinagem, torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de fixação. 2ª ed. São Paulo: Elanders, 2010.

SANDVIK COROMANT. **Catálogo técnico 2011 Sandvik Coromant**. 8ª ed. São Paulo: Elanders, 2011.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 7ª Ed. 249 p., Ed. Da UFSC, Florianópolis, Brasil, 2007.

THAMIZHMANII, S.; OMAR, B.; SAPARUDIN, S.; HASAN, S. Surface toughness analyses on hard martensitic stainless steel by turning. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engeneering, v. 26, pp. 139 – 142, Malaysia, 2008.

TOMITA, K. O atual estágio da HSM e dos materiais de ferramentas de corte. Revista Máquinas e Metais. n. 405, pp. 20-39, São Paulo, Brasil, 1999.

TÖNSHOFF, H. K.; ARENDT, C.; BEN AMOR, R. Cutting of hardened steel. CIRP Annals – Manufacturing Technology. v.49, pp. 547 – 566, Hannover, Germany, 2000.

VILLARES METALS. Catálogo técnico aços inoxidáveis. São Paulo, Brazil, 2008. WANG, J. J. J.; ZHENG, M. Y. On the machining characteristics of H13 tool steel 70 in different hardness states in ball end milling. Journal Advanced Manufacture Technology. v. 22, pp. 855 – 863, Tainan, Taiwan, 2003.

YUEFENG, Y.; WUYI, C.; LIANSHENG, G. Tool Materials Rapid Selection Based on Initial Wear. Chinese Journal of Aeronautics. pp. 386 - 392, Beijing, China, 2010.

BISSACCO, H. N. HANSEN e L. DE CHIFFRE, “Micromilling of hardened tool steel for mould making applications.,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 167, nº 2, pp. 201-207, 2005.

G. KISWANTO, D. L. ZARIATIN e T. J. KO, “The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro-milling operation.,” *Journal of Manufacturing Processes*, 2014.

M. TAKACS, B. VERÖ e I. MESZAROS, “Micromilling of metallic materials.,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 138, nº 1, pp. 152-155, 2003.

M. A. CÂMARA, J. C. RUBIO, A. M. ABRÃO e J. P. DAVIM, “State of the Art on Micromilling of Materials, a Review.,” *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 28, nº 8, pp. 673-685, 2012.

FLEISCHER, M. DEUCHERT, C. RUHS, C. KÜHLEWEIN, G. HALVADJIYSKY e C. SCHMIDT, “Design and manufacturing of micro milling tools.,” *Microsystem Technologies*, vol. 14, nº 9-11, pp. 1771-1775, 2008.

K. POPOV, S. DIMOV, D. T. PHAM, R. MINEV, A. ROSOCHOWSKI, L. OLEJNIK e M. RIC HERT, “The effects of material microstructure in micro-milling.,” Proceedings of the 2nd International Conference on Multi-Material Micro Manufacture, pp. 127-130, 2006.

KOMATSU, T. YOSHINO, M. T. e S. TORIZUKA, “Effect of crystal grain size in stainless steel on cutting process in micromilling.,” *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 150-155, 2012.