

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE MEDAÇÃO DE FORÇA
DE CORTE EM PROCESSO DE USINAGEM EM FRESA DE 5 EIXOS**

Rafael Colla Thosi

São Paulo

2017

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Análise comparativa entre métodos de medição de força de corte em processo de usinagem em fresa 5 eixos

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica da Escola
Politécnica para obtenção do diploma de
Engenheiro Mecânico.

Rafael Colla Thosi

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Lima
Stoeterau

Área de Concentração: Engenharia
Mecânica

São Paulo

2017

Catalogação-na-publicação

Thosi, Rafael Colla

Análise comparativa entre métodos de medição de força de corte em processo de usinagem em fresa de 5 eixos / R. C. Thosi -- São Paulo, 2017.
67 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Dinamômetro 2.Medição de força 3.Usinagem 4.Fresa 5 eixos
5.Equipamento de medição de força I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização do presente trabalho.

Ao IPT Fraunhofer por ter me dado a oportunidade de realizar meus testes em suas instalações e por terem me provido com todo e qualquer suporte que eu precisei durante a sua realização. É uma honra ter feito parte do meu trabalho de conclusão de curso em um instituto tão renomado.

Ao meu supervisor no IPT Fraunhofer, Timur Vildanov, por ter guiado meu trabalho enquanto estava na Alemanha, por ter me ajudado na escolha do tema, na elaboração dos testes e na liberdade de adaptá-los quando necessário.

Aos técnicos, Willi Tontsch e Sascha Kamps, por terem me ajudado com a preparação dos testes e confiar no meu trabalho, me dando a liberdade necessária para realização dos testes.

Sou particularmente grato ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Lima Stoeterau, por ter contribuído com a minha ida ao IPT Fraunhofer e pelo auxílio e acompanhamento durante a elaboração do projeto.

Mais do que todos, agradeço o apoio e dedico esse trabalho aos meus familiares e minha namorada, Juliana Martins, por serem compreensivos e me ajudarem e motivarem durante todo o processo de elaboração do trabalho.

Resumo

Existem diferentes formas de medição de forças e controle durante a usinagem, e é necessário entender cada uma delas para que se possa obter um resultado satisfatório. Este trabalho tem por objetivo avaliar e comparar dois métodos distintos de medição de forças durante processos de usinagem em uma fresa de 5 eixos, um dinamômetro da marca Kistler e um sistema de monitoramento ToolScope da marca Komet Brinkhaus. As motivações por trás deste objetivo são a curiosidade em entender, determinar melhor utilização e peculiaridades de cada sistema e recomendar situações em que cada sistema apresente vantagens em relação ao outro.

Para atingir o objetivo foram elaborados e executados testes com diferentes técnicas de usinagem com forças de ordem de grandeza distintos em uma seleção de materiais e ferramentas de corte. Durante os testes foram colhidos dados de ambos os sistemas simultaneamente para que as forças pudessem ser analisadas.

Os sistemas foram escolhidos por serem ambos utilizados tanto no IPT Fraunhofer Aachen quanto constantemente na indústria, portanto o seu estudo é de profundo interesse.

Palavras-chave: fresa 5 eixos. Dinamômetro. Medição de forças. Usinagem. Equipamento de medição de força.

Abstract

There are different ways to measure force and to control the process during machining, and it is necessary to understand each one so that a satisfactory result can be obtained. This work's objective is to evaluate and compare two different methods of force measurement during machining processes in a 5-axis milling machine, a Kistler brand dynamometer and a Komet Brinkhaus ToolScope monitoring system. The drivers behind this objective are the curiosity to understand, determine the best use and peculiarities of each system and recommend situations in which each system presents advantages over the other.

To reach the objective, tests with different machining techniques were developed and executed with forces of different order of magnitude in a selection of materials and cutting tools. During the tests, data were collected from both systems simultaneously so that the forces could be analyzed.

The systems were chosen because they are both used in the IPT Fraunhofer Aachen and constantly in the industry, so their study is of deep interest.

Key words: 5-axis milling. Dynamometer. Measurement of forces. Machining. Strength measuring equipment.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	4
LISTA DE TABELAS	6
1. INTRODUÇÃO	7
a. Contextualização e Justificativa	7
2. OBJETIVO	9
a. Objetivos Gerais.....	9
b. Objetivo Específicos	9
3. ABORDAGEM METODOLÓGICA	10
4. REVISÃO DA LITERATURA.....	11
a. Usinagem	11
i. Fresamento.....	12
ii. High Speed Machining	16
iii. Furação.....	20
iv. Trocoidal	23
v. Acabamento	27
5. MATERIAIS E MÉTODO	29
a. Materiais utilizados.....	29
i. Aço.....	29
ii. Titânio	30
iii. Inconel.....	31
b. Fresadora.....	32
c. Sistemas de medição	33
i. Dinamômetro Kistler	33
ii. Komet Brinkhaus Toolscope	35
d. Metodologia.....	36

i.	Preparação.....	37
ii.	HPC	39
iii.	HFC	41
iv.	Furação.....	44
v.	Trocoidal	46
vi.	Acabamento	47
vii.	Resumo dos testes.....	49
6.	RESULTADOS	51
7.	CONCLUSÕES E POSSÍVEIS TRABALHOS FUTUROS	58
8.	BIBLIOGRAFIA	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de fresa de topo (KLOCKE, 2001)	13
Figura 2 – Avanços (GARANT, 2005)	14
Figura 3 - Espessura do cavaco durante a usinagem (ARAUJO, 1999)	15
Figura 4 - Forças envolvidas no fresamento (KLOCKE, 2001).....	15
Figura 5 - Relação da temperatura com a velocidade de corte (SCHÜTZER, SCHULZ, 2003)	16
Figura 6 - Faixas de velocidade de corte em relação ao material (SCHÜTZER, SCHULZ, 2003).....	17
Figura 7 - Comparação entre velocidade normal e HSM (MÜLLER, SOTO, 1999) 18	18
Figura 8 - Características do HSM (SCHÜTZER, SCHULZ, 2003)	19
Figura 9 - Distinção entre HPC e HFC, nesse caso denominado como HSC (RODRIGUES, 2005)	20
Figura 10 - Principais variações da furação (KLOCKE, 2001).....	21
Figura 11 - a) furo cego e b) fura passado (TSCHÄTSCH, 2009)	22
Figura 12 - Forças na furação (KLOCKE, 2001)	22
Figura 13 - Visão superior da furação (KLOCKE, 2001)	23
Figura 14 - Desbaste convencional (WIDIA, 2014)	24
Figura 15 - Movimento trocoidal (SANDVIK, 2011)	25
Figura 16 - Parâmetros da estratégia trocoidal (HASCOET, 2007).....	25
Figura 17 - Movimento trocoidal otimizado (HEIDENHAIN, 2013)	26
Figura 18 - Bloco de aço utilizado antes de ser preparado.	30
Figura 19 - Bloco de titânio	31
Figura 20 - Bloco de inconel.....	32
Figura 21 - Fresadora Mikron HPM 800 U HD	33
Figura 22 - Dinamômetro 9255C (KISTLER, 2012).....	34
Figura 23 - Esquema da instalação do dinamômetro (KISTLER, 2012)	34
Figura 24 - Komet Brinkhaus Toolscope (KOMET, 2014)	35
Figura 25 - Vista de corte esquemática do bloco de aço	37
Figura 26 - Montagem completa	38
Figura 27 - Mesa da fresadora em detalhe	38
Figura 28 - Ferramenta HPC da Seco Tools.....	39

Figura 29 - Esquema da ferramenta (SECO, 2017)	40
Figura 30 - Pastilha HFC	42
Figura 31 - Esquema da pastilha HFC (SECO, 2017)	42
Figura 32 - Ferramentas de furação	44
Figura 33 - Esquema das ferramentas de furação (SECO, 2017)	45
Figura 34 - Ferramenta trocoidal	46
Figura 35 - Ferramenta de acabamento	47
Figura 36 - Esquema da ferramenta de acabamento (SECO, 2017)	48
Figura 37 - Resumo dos testes realizados	50
Figura 38 - Comparaçao do teste 13	52
Figura 39 - Média da medição dos testes no eixo X	53
Figura 40 - Média da medição dos testes no eixo Z	53
Figura 41 - Média da medição dos testes no eixo Y	54
Figura 42 - Teste 51	55
Figura 43 - Detalhe teste 51	55
Figura 44 - Comparaçao teste 51	56
Figura 45 - Teste de acabamento	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens HSM (SILVA, 2002)	18
Tabela 2 - Aplicações HSM (TSCHÄTSCH, 2009).....	19
Tabela 3 - Descrição ferramenta HPC (adaptado SECO, 2017).....	40
Tabela 4 - Resumo testes HPC	41
Tabela 5 - Resumo parâmetros comuns HPC	41
Tabela 6 - Descrição pastilha HFC (adaptado SECO, 2017)	43
Tabela 7 - Resumo testes HFC	43
Tabela 8 - Dados testes HFC	43
Tabela 9 - Descrição das ferramentas de furação (adaptado SECO, 2017).....	45
Tabela 10 - Descrição da ferramenta de acabamento (adaptado SECO, 2017)	48

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho é o relatório final referente a matéria PME 2600 – Projeto Integrado III. Ele foi desenvolvido ao longo do 2º semestre de 2017 pelo autor com auxílio e acompanhamento do orientador.

O autor tem objetivo de obtenção do título de graduação em Engenharia por meio do trabalho.

Como o projeto é extenso ele foi iniciado no primeiro semestre de 2016 quando o autor ainda estava trabalhando no IPT Fraunhofer em Aachen, na Alemanha, e desenvolvido ao longo do segundo semestre de 2016 e o ano de 2017. Na Alemanha o foco foi a formulação do problema, estruturação dos testes necessários e realização dos testes. No Brasil o seu foco foi revisão de literatura, transcrição da metodologia utilizada, formalização dos resultados obtidos e suas análises.

O trabalho completo engloba o presente texto, artigo técnico, pôster e apresentação feita para a banca julgadora.

a. Contextualização e Justificativa

Hoje em dia é difícil imaginar um produto que não tenha passado por algum processo de fabricação. Boa parte deles envolve algum tipo de manufatura e eles representam parte considerável dos custos de produção, portanto o seu entendimento é um assunto importante para muitas empresas. Fica claro então que pequenos avanços nessa área podem significar grandes vantagens competitivas e redução de custos.

Dado o amplo leque de processos de manufatura, as mais diversas estratégias envolvidas, diferentes materiais e a complexidade das máquinas envolvidas, o simples ato de monitorar os processos de fabricação na verdade não é tão simples assim. Uma saída possível e boa é fazer um acompanhamento pelas forças envolvidas nos processos.

Existem os mais diversos modelos para monitoramento das forças de usinagem com diferentes finalidades no mercado, portanto é importante entender suas vantagens e desvantagens e o seu funcionamento.

Fica clara a importância, portanto, do assunto estudado e da necessidade de maior aprofundamento sempre que possível do tema.

2. OBJETIVO

a. Objetivos Gerais

O trabalho tem como objetivos gerais aprofundar o conhecimento nas áreas de manufatura estudadas no curso de engenharia mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo por meio de sistema de medições de força, dentro dela explorar novos temas e utilizando a infraestrutura do Fraunhofer IPT em Aachen, fazer experimentos e transformar a teoria em prática assuntos ainda não amplamente explorados na universidade.

b. Objetivo Específicos

O presente trabalho também tem os seguintes objetivos específicos:

- Analisar e comparar dois sistemas de medições de força;
- Entender, determinar melhor utilização e peculiaridades de cada sistema
- Recomendar situações ideais para cada um

3. ABORDAGEM METODOLÓGICA

Como o autor realizou os seus experimentos durante seu período de estágio na Alemanha, a abordagem do problema não foi a mais convencional, porém ela está descrita a seguir:

- Execução dos experimentos na Alemanha;
- Estudo inicial da bibliografia na Alemanha;
- Desenvolvimento inicial do trabalho no Brasil;
- Aprofundamento dos temas e da revisão teórica;
- Revisão e melhoria da lista bibliográfica;
- Discussão dos resultados com o orientador;
- Aprofundamento das análises;
- Conclusões;
- Revisão do trabalho final.

4. REVISÃO DA LITERATURA

a. Usinagem

A história do homem com a usinagem é muito antiga, mesmo que não houvesse uma definição formal do processo. No início, o foco do processo era modificação do material disponível na época, a madeira. Com o passar do tempo, materiais mais complexos e de mais difícil manuseio começaram a ser utilizados e, portanto, novas técnicas para trabalhá-los foram sendo desenvolvidas.

Algumas datas importantes durante a história foram em 1797 a criação do primeiro torno com avanço automático por Henry Maudslay e em 1862 o desenvolvimento da primeira fresadora universal por J. R. Brown (SANTOS e SALES, 2007).

No auge do Fordismo, impulsionado pelos avanços obtidos graças à máquina a vapor de James Watson, as empresas buscavam aumentar a produção no intuito de ganhar fatias de mercado e diminuir os custos dos produtos. Com o passar do tempo outros indicadores foram incorporados ao conceito, como qualidade e acabamento superficial. No século XX em meio ao Taylorismo, com o capitalismo mais avançado, maior desenvolvimento tecnológico e a crescente competitividade entre as empresas, elas buscavam não só aumentar a produtividade, mas também a qualidade final do produto.

É estimado que atualmente em países desenvolvidos e industrializados cerca de 20% a 30% de seu Produto Interno Bruto corresponde a atividades que envolvam processos produtivos (KALPAKJIAN, 1995).

Formalmente a usinagem é definida pela DIN 8580 como todo e qualquer processo que a forma é alterada por meio da redução de material bruto sob a forma de cavaco. A deformação é obtida pelo movimento relativo entre a ferramenta de corte e a peça a ser usinada. Importante ressaltar que durante o processo há grande transferência de energia.

De maneira mais geral a usinagem pode ser entendida como o processo de produzir peças removendo o excesso de material na forma de cavaco (MACHADO, 2008).

O estudo da usinagem apesar de antigo é de grande dificuldade pois envolve variáveis de difícil obtenção e modelagem complexa, muitas vezes de baixa previsibilidade. Além disso, ele também é muito vasto, envolvendo inúmeros processos, porém os importantes para esse estudo são o fresamento e furação, que são os mais comumente utilizados.

Dentre os materiais utilizados na usinagem, o aço tem um papel de grande importância pois possui alta produtividade e flexibilidade. E o processo mais utilizado na usinagem de aços é o fresamento. O fresamento tem papel fundamental em diversos ramos, em especial na indústria mecânica (GROOVER, 2002).

i. Fresamento

O fresamento segundo a NBR-6175 (1971) é destinado à obtenção de uma superfície qualquer com o auxílio de ferramenta multicortante. Mas de maneira geral é um processo no qual a remoção de material da peça é realizada pelo movimento rotativo da ferramenta, normalmente com múltiplos gumes (STEMMER, 1995).

O que é interessante notar é que como a ferramenta geralmente é multicortante então cada gume da fresa remove uma pequena porção do material, formando pequenos cavacos (GROOVER, 2002).

O processo tem grande flexibilidade porque tanto a mesa quanto a ferramenta de corte podem ter movimentos, aumentando bastante as possíveis direções de corte e, portanto, as possibilidades de usinagem, gerando peças finais mais complexas.

Dos diversos tipos de fresamento o que foi utilizado no presente estudo é o fresamento de topo, que é um processo contínuo e frontal que utiliza uma fresa de topo. As fresas de topo são caracterizadas por ter gumes tanto na sua face como na sua periferia (STEMMER, 1995).

O topo da fresa de topo e sua construção tem diversos modelos diferentes, alguns exemplos são mostrados na figura 1

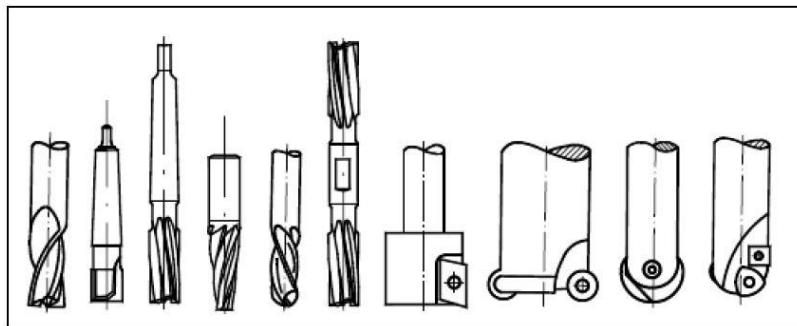


Figura 1 - Tipos de fresa de topo (KLOCKE, 2001)

Pelos motivos acima citados esse processo é largamente utilizado na indústria automobilística, aeronáutica e de moldes e matrizes (POLLI, 2005).

Para o melhor entendimento do trabalho é necessário que alguns parâmetros que influenciam diretamente os processos sejam definidos e esclarecidos:

- Velocidade de corte (v_c em m/min): é a velocidade tangencial com que o diâmetro externo da fresa percorre a peça de trabalho.
- Velocidade de avanço (v_f em mm/min): é a velocidade do movimento da ferramenta em relação à peça.
- Avanço por rotação (f em mm/rev* z): é a distância percorrida pela peça (mesa de trabalho) para cada rotação da fresa.
- Avanço por dente (f_z em mm/rev): é a distância percorrida pela mesa de trabalho para cada rotação da mesa dividido pelo número de dentes da fresa.
- Profundidade de corte (a_p em mm): é a largura de penetração da ferramenta da peça, medido numa direção perpendicular ao plano de trabalho.
- Penetração de trabalho (a_e em mm): é a penetração da ferramenta em relação à peça, medido no plano de trabalho e numa direção perpendicular ao avanço.
- Penetração do avanço (a_f em mm): é a penetração da ferramenta medida no plano de trabalho e na direção de avanço.
- Revoluções (n em rpm): é a velocidade angular da ferramenta.

A velocidade de corte é definida pela NBR 6162 (1989) como a velocidade instantânea do movimento de corte no ponto escolhido e pode ser obtida pela expressão abaixo, sendo que “d” é o diâmetro da fresa.

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

A rotação da ferramenta é obtida a partir da expressão abaixo:

$$n = \frac{v_c * 1000}{\pi * D} \quad (2)$$

A velocidade de avanço pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$v_f = f_z * z * n \quad (3)$$

Os avanços são ilustrados na figura 2.

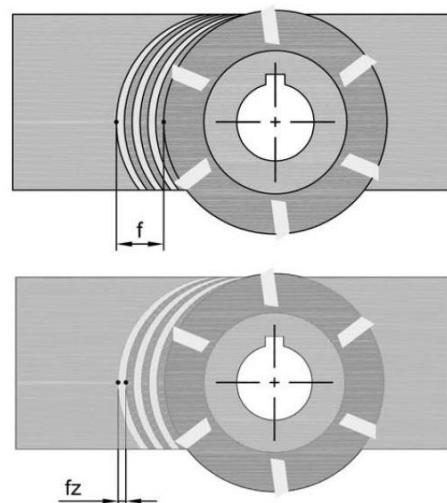


Figura 2 – Avanços (GARANT, 2005)

No fresamento e em especial no fresamento de topo, a espessura do corte, e, portanto, do cavaco não é constante ao longo da rotação. Por isso a força tem um caráter oscilante. A força é nula quando não há contato entre a ferramenta e a peça e aumenta com o avanço da ferramenta sob o material e a espessura do corte aumenta (ARAUJO, 1999).

A espessura do cavaco para cada ponto da aresta pode ser vista na figura 3 e calculado da seguinte maneira:

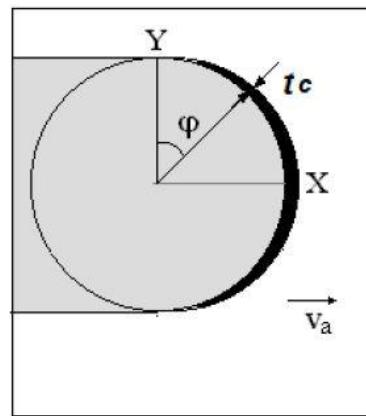


Figura 3 - Espessura do cavaco durante a usinagem (ARAUJO, 1999)

$$t_c = f_z * \operatorname{sen}(\varphi) \quad (4)$$

Portanto a espessura do cavaco depende do avanço por dente f_z e da posição angular do ponto φ .

A figura 4 representa de forma concisa as forças envolvidas no processo de fresamento.

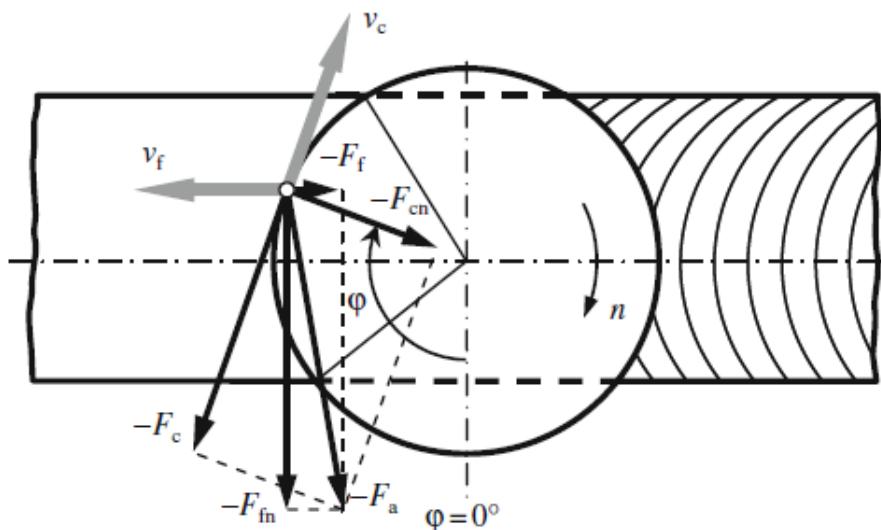


Figura 4 - Forças envolvidas no fresamento (KLOCKE, 2001)

Na figura 4, F_a representa a força ativa que depende da direção e sentido da velocidade de corte v_c , e essa é uma propriedade muito importante de se ter em mente, principalmente na hora que os resultados forem analisados. A força ativa pode ser desmembrada em F_c , força de corte e F_{cn} , força normal ao corte (KLOCKE, 2001).

Fica nítido que a F_a também depende da posição angular do ponto φ .

ii. High Speed Machining

De uma maneira muito genérica e vaga, High Speed Machining (HSM) ou High Speed Cutting (HSC) é um importante processo em desenvolvimento de usinagem caracterizado pelo aumento da velocidade de avanço e/ou velocidade de corte e/ou rotação e desempenho dinâmico (TSCHÄTSCH, 2009).

O processo foi patenteado por Salomon na década de 30 (German Reichspatent no. 523594 em 1931). Ele relacionava uma série de curvas de velocidade de corte em função da temperatura. O resultado mais interessante é que a partir de uma determinada velocidade de corte, a temperatura de corte começa a diminuir, como pode ser observado na figura 5 (TSCHÄTSCH, 2009; SCHÜTZER, SCHULZ, 2003).

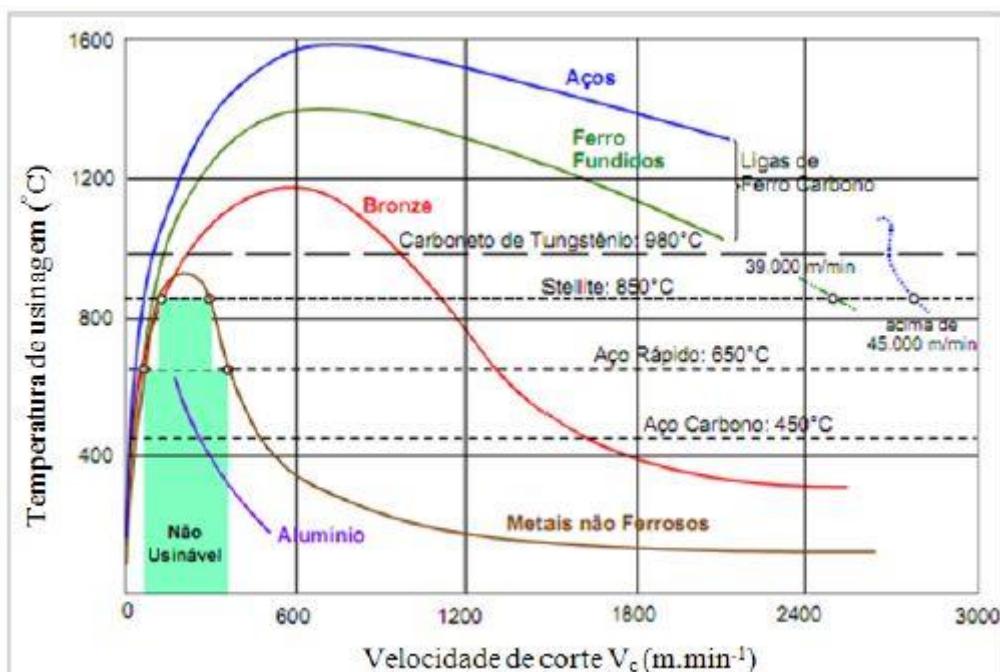


Figura 5 - Relação da temperatura com a velocidade de corte (SCHÜTZER, SCHULZ, 2003)

O estudo do HSM foi sendo aprimorado em diversas partes do mundo desde os primeiros experimentos de Salomon. Nos mais variados tipos de usinagem, materiais e parâmetros, sempre no intuito de ampliar o entendimento inicial de que a partir de uma velocidade de corte, as forças envolvidas na usinagem diminuem. As aplicações industriais das descobertas do Salomon e de outros, assim como de muitos outros avanços científicos, só foram feitas muitos anos após sua descoberta quando máquinas mais adequadas foram criadas, materiais descobertos entre outros fatores.

Uma definição exata de HSM ou dos parâmetros envolvidos é muito difícil pois é necessário levar em consideração o material que está sendo trabalhado, isso é mostrado na figura 6. A divisão mostrada também não é consenso entre todos os pesquisadores, mas funciona aqui para efeito de ilustração.

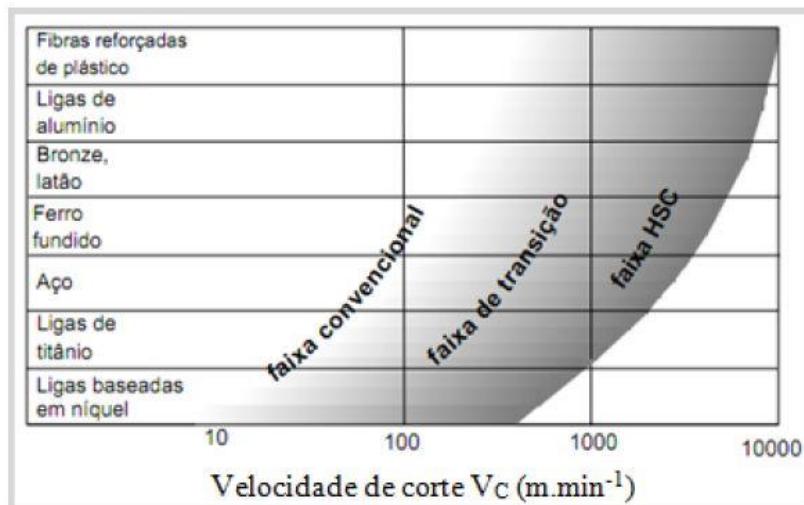


Figura 6 - Faixas de velocidade de corte em relação ao material (SCHÜTZER, SCHULZ, 2003)

Fica claro então que uma velocidade considerada HSM para um material pode não ser para outro. Por exemplo, $150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ já pode ser considerado alta velocidade para ligas baseadas em níquel, porém para ligas de alumínio é considerado como convencional. Observa-se que a faixa do HSC tende a ser de 5 a 10 vezes maior do que a faixa convencional.

Para se obter esse ganho em velocidade de corte é necessário que a espessura média do cavaco seja baixa.

Para dificultar ainda mais uma definição mais geral, além do material, é importante levar em consideração o processo de usinagem, essa relação é mostrada na figura 7.

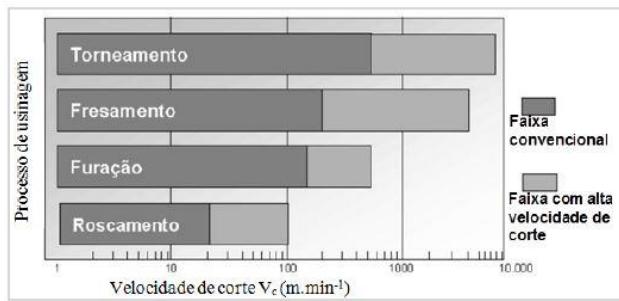


Figura 7 - Comparaçao entre velocidade normal e HSM (MÜLLER, SOTO, 1999)

É inegável a maior facilidade de aplicação do HSM nos processos de fresamento, por suas características dinâmicas, porém, como a figura 7 mostra, é possível que ele seja aplicado em uma variedade muito grande, como torneamento e furação. E fica claro também que cada processo tem seu intervalo de velocidade de corte que é considerado convencional e outro considerado alto (TSCHÄTSCH, 2009).

Com o crescente número de pesquisas relacionadas ao HSM, uma série de vantagens, além da diminuição da força envolvida, foram sendo comprovadas e algumas desvantagens foram sendo encontradas. Um resumo deles é apresentado na tabela 1.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens HSM (SILVA, 2002)

Vantagens	Desvantagens
Altas taxas de remoção de material	Maior desgaste das ferramentas
Menores forças de corte	Custos mais elevados de peças das máquinas
Menor distorção das peças	Controle e máquinas caras
Melhor qualidade superficial	Cuidado no balanceamento das ferramentas
Menos vibrações mecânicas	Baixa vida útil dos eixos das máquinas
Melhor dissipação de calor	Alto custo de manutenção

A tendência é que o HSM seja cada vez mais utilizado devido a um maior conhecimento sobre suas características e melhora dos equipamentos, possibilitando uma maior utilização e mais barata.

O comportamento de algumas das características do processo pode ser visto na figura 8. Nela fica evidente as vantagens de se utilizar e aprimorar o HSM.

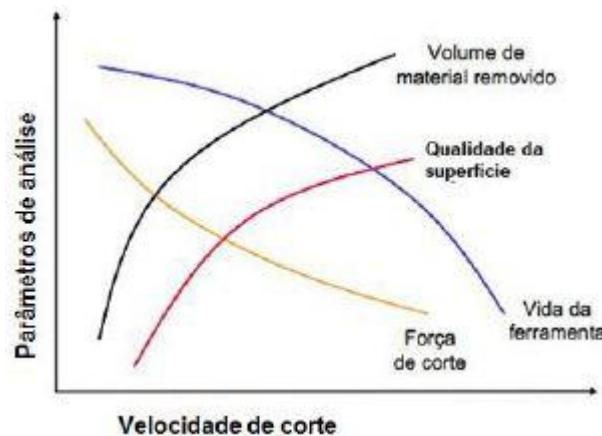


Figura 8 - Características do HSM (SCHÜTZER, SCHULZ, 2003)

Tendo em vista as vantagens e as características do HSM, é possível elencar algumas de suas muitas aplicações, como por exemplo na indústria aeronáutica onde os processos de usinagem contam por boa parte dos custos ou na indústria automobilística. Um resumo dessas aplicações pode ser visto na tabela 2.

Tabela 2 - Aplicações HSM (TSCHÄTSCH, 2009)

Tipo de aplicação	Exemplo
Aeroespacial	Em partes estruturais
Usinagem de compósitos	Pás de turbinas
Automobilística	Moldes de injeção
Bens de consumo, elétrica	Eletrodos
Geração de energia	Rodas de compressores

Para o presente estudo, HSM será divido da maneira como os profissionais do IPT Fraunhofer dividem, em High Performance Cutting (HPC) e High Feed Cutting (HFC).

Em HPC os valores de velocidade de corte são menores enquanto as taxas de avanço maiores, é bastante indicado para operações de desbaste. As operações normalmente são em duas dimensões e o enfoque é o volume de material removido.

Já HFC apresenta velocidades de corte mais altas e taxas de avanço menores. As operações podem ser em três dimensões e tendem a ter profundidade de corte menores, tornando-a ideal para faceamento. O importante é a superfície percorrida por tempo. É comum que ele seja utilizado para substituir um processo com poucos passes de usinagem, lentos e pesados por mais passes mais leves e rápidos.

A figura 9 sintetiza bem algumas das diferenças entre HPC e HFC.

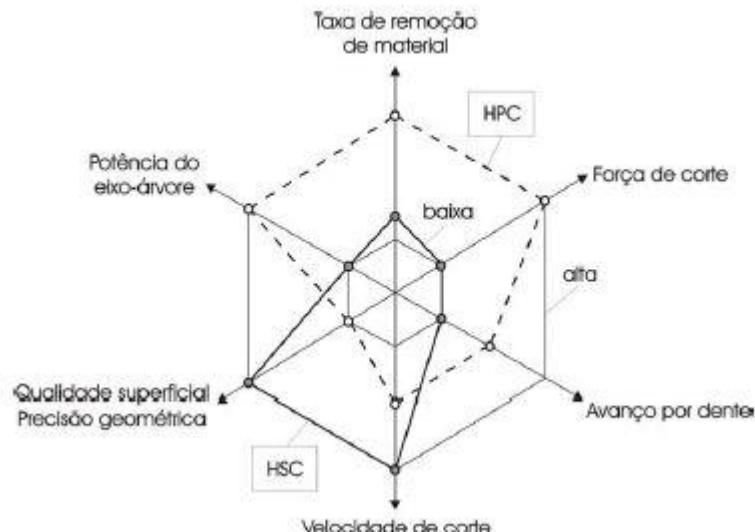


Figura 9 - Distinção entre HPC e HFC, nesse caso denominado como HSC (RODRIGUES, 2005)

É importante lembrar que assim como a definição do HSM, essa divisão entre HPC e HFC não é estática e rígida e boa parte dos processos ocorrem em uma zona mista entre ambas.

iii. Furação

A definição de furação é encontrada na DIN 8589, e ela diz que furação é um processo de usinagem no qual o movimento principal é a rotação da ferramenta de corte e o avanço ocorre apenas em uma direção. Existem algumas variações do

processo, porém as principais são mostradas na figura 10 e suas respectivas direções de movimento (KLOCKE, 2001).

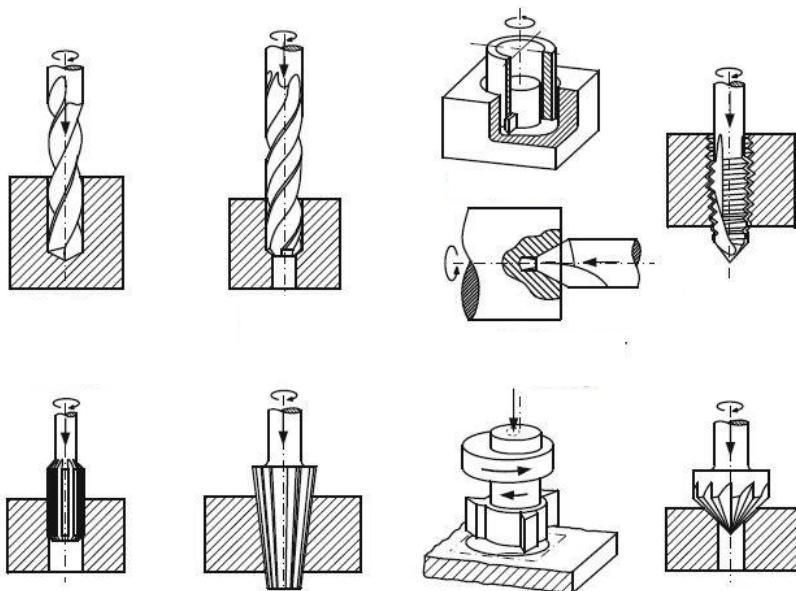


Figura 10 - Principais variações da furação (KLOCKE, 2001)

Algumas peculiaridades do processo que são interessantes de serem mencionadas são: (KLOCKE, 2001)

- A velocidade de corte tende a zero quanto mais próximo do centro da ferramenta;
- Dificuldade na remoção do cavaco;
- Má distribuição de calor no ponto de ação;
- Desgaste acentuado na borda da ferramenta de corte; e
- Atrito entre a ferramenta e as paredes do furo.

Dentre todos os tipos de furação, a que interessa para o presente estudo é a furação de centro.

Nesse tipo, a ferramenta utilizada geralmente tem dois dentes e ela entra no material sólido, sem nenhum tipo de preparação ou pré-furo, no intuito de gerar um furo cego ou passante. A figura 11 ilustra bem o procedimento (TSCHÄTSCH, 2009).

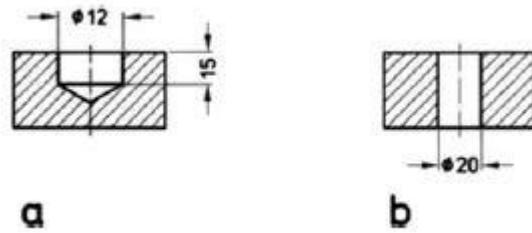


Figura 11 - a) furo cego e b) fura passado (TSCHÄTSCH, 2009)

Para os experimentos realizados, o processo pode ser dividido em 2 partes distintas (TSCHÄTSCH, 2009).

- Início da furação: a ponta da ferramenta toca a peça e a parte cônica penetra a peça. As forças de avanço e de corte aumentam.
- Fase de corte completo: a seção de corte do cavaco é continua e as forças aumentam com a profundidade do corte devido ao aumento do atrito e da dificuldade de extração do cavaco.

É importante ressaltar que o acabamento superficial interno de um furo feito por furação é superior a outro feito por outro tipo de usinagem, como fresamento interno (KLOCKE, 2001).

As forças envolvidas na furação são mostradas na figura 12.

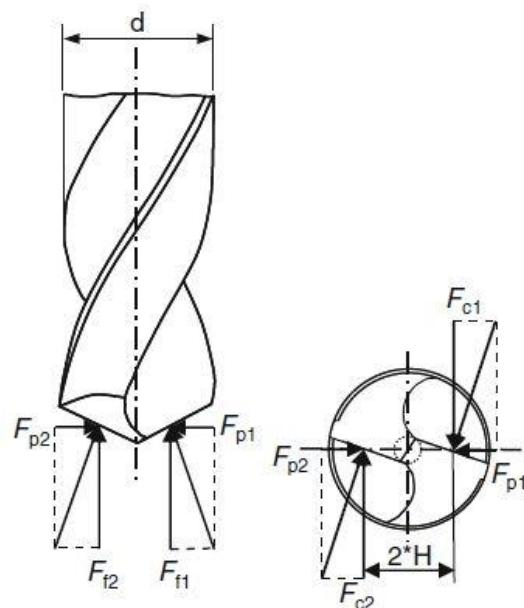


Figura 12 - Forças na furação (KLOCKE, 2001)

Sendo que F_c é a força de corte, a F_f força do avanço, F_p a força passiva e H a distância entre a aplicação das forças. As forças envolvidas nessa operação tendem a ser maiores do que as envolvidas em processos similares, como fresamento, devido à longa aresta de corte e ao atrito do cavaco com o fundo do furo, com as paredes e com a ferramenta de corte (KLOCKE, 2001).

Com base nos parâmetros da figura 13, podemos calcular todas as forças.

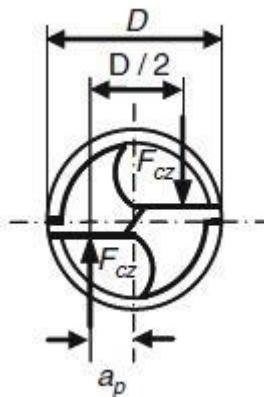


Figura 13 - Visão superior da furação (KLOCKE, 2001)

$$a_p = \frac{D}{4} \quad (5)$$

$$F_{cz} = \frac{D}{2} * f_z * k_c \quad (6)$$

Onde F_{cz} é a força de corte por aresta de corte e k_c é força de corte específica.

$$F_{fz} = \frac{D}{2} * f_z * k_f \quad (7)$$

Onde F_{fz} é a força de avanço por aresta de corte e k_f é a força de avanço específica. E por fim o torque é expressado pela seguinte expressão.

$$M_d = \frac{F_{cz} * D}{2000} \quad (8)$$

O fresamento pode ser dividido em três estágios na elaboração das estratégias: o desbaste, o semi-acabamento e o acabamento. Após a definição das estratégias é necessário que elas sejam modeladas e testadas em programas do CAM. Nele possíveis colisões e erros serão detectados e o processo inteiro será otimizado. Esse procedimento aumentou a confiabilidade e a eficiência dos processos de usinagem.

O desbaste é a estratégia onde ocorrerá a maior remoção de material indesejável, sendo essa a sua principal função, preparando-a para os próximos estágios. A qualidade superficial e precisão entre outros fatores serão melhor observados nos estágios posteriores. Durante o desbaste, geralmente, ocorrem também as maiores forças envolvidas no processo, por isso é muito interessante que esse estágio seja otimizado ao máximo.

O desbaste de forma convencional, que pode ser visto na figura 14, tem uma série de limitação. Nesse caso a penetração máxima de trabalho sempre será igual ao diâmetro da ferramenta de corte. Como o cavaco tem diâmetro variável ao longo de um corte, a geração de calor é alta e ela é má distribuída. A taxa de remoção de material não é otimizada. As forças radiais são altas e a evacuação do cavaco é difícil, isso normalmente faz com que a profundidade de corte se limite a apenas metade do diâmetro da ferramenta. Dadas essas limitações, a dificuldade para usinar peças com alta dureza é muito elevada. Isso tudo aumenta os custos de usinagem, e consequentemente, fabricação, das peças (WIDIA, 2014).

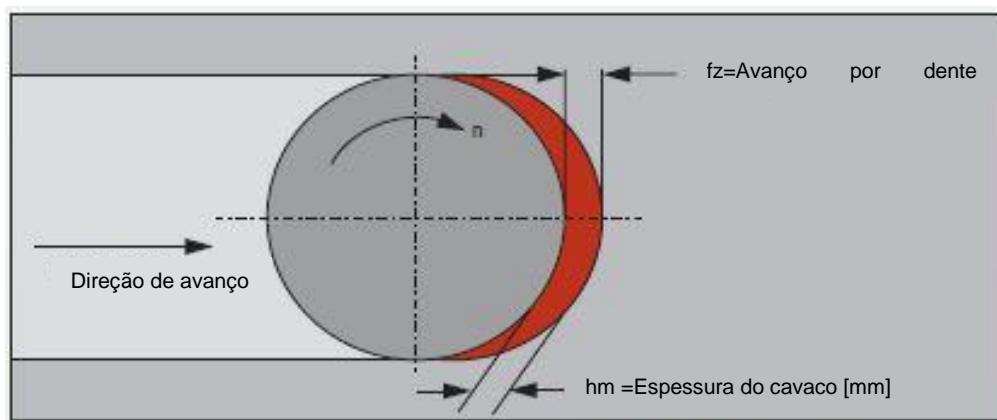


Figura 14 - Desbaste convencional (WIDIA, 2014)

Uma boa estratégia alternativa ao desbaste convencional é a usinagem trocoidal. Ela consiste em movimento de avanço combinado com movimento circular ou cicloide da ferramenta, gerando uma trajetória que pode ser vista na figura 15 (OTKUR e LAZOGLU, 2007).

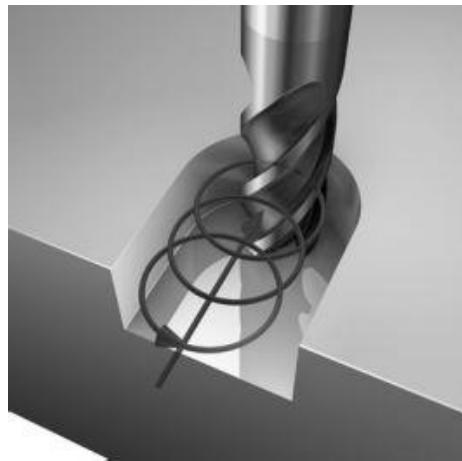


Figura 15 - Movimento trocoidal (SANDVIK, 2011)

Fica claro que nessa estratégia novos parâmetros são necessários e, portanto, controlados. Eles são mostrados na figura 16. Dentre eles os mais importantes são o incremento radial no avanço, representado na figura por Δ , e o raio do movimento cicloide, representado na figura por R .

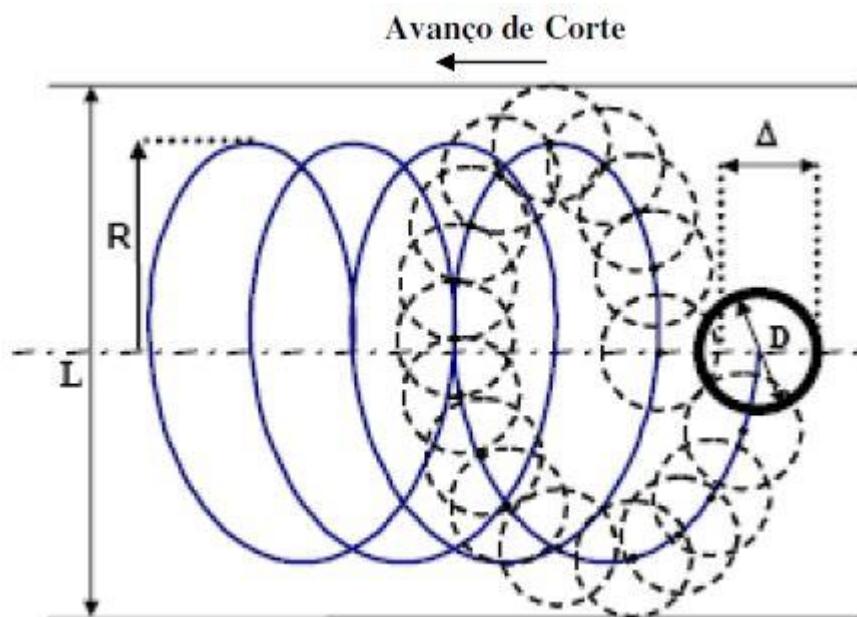


Figura 16 - Parâmetros da estratégia trocoidal (HASCOET, 2007)

Existem dois tipos de fresamento trocoidal, o estático e o dinâmico. O estático consiste em um simples movimento circular com um determinado avanço. Enquanto no dinâmico, o movimento circular é adaptado para que seja mais otimizado, nele o ângulo de contato e a espessura do cavaco tendem a ser constantes. No presente estudo o nosso foco é o movimento dinâmico pois é o que será utilizado nos experimentos (GARANT, 2015).

Para poder utilizar o fresamento trocoidal dinâmico, é necessária a utilização de soluções em CAD/CAM, máquina CNC e ferramentas modernas e adequadas. Essas limitações tornam a utilização da estratégia mais complexa (WIDIA, 2014).

Para aumentar a velocidade do processo e, portanto, a eficiência, é possível que a velocidade do movimento circular seja aumentada quando a ferramenta não está em contato com a peça. O resultado disso pode ser observado na figura 17. O presente estudo utilizou dessa técnica durante os experimentos (HEIDENHAIN, 2013).

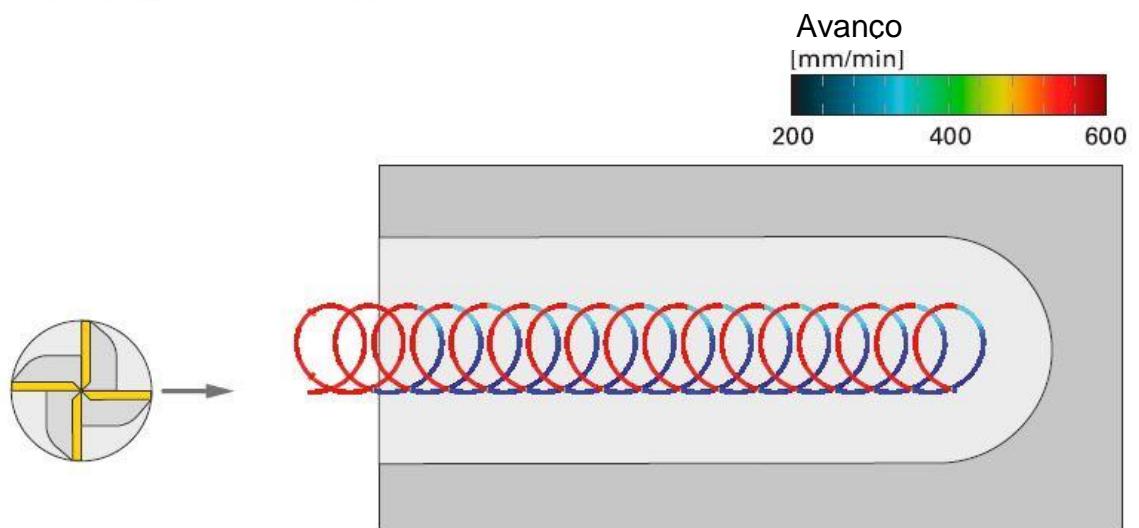


Figura 17 - Movimento trocoidal otimizado (HEIDENHAIN, 2013)

Uma série de pesquisas foram feitas recentemente no intuito de entender e aprofundar no assunto da estratégia trocoidal, dentre elas, em 2007 Otkur e Lazoglu estudaram as forças durante o processo de faceamento utilizando trajetória trocoidal. Em 2009 Hascoet, Rauch e Duc estudam as limitações do processo, com foco especial nas relações entre o diâmetro da ferramenta, diâmetro utilizado na trajetória cicloide e

a distância entre os círculos, e como essas relações determinam o ângulo de corte. (OTKUR e LAZOGLU, 2007; HASCOET, 2007)

A estratégia trooidal tem sido cada vez mais utilizada devido à muitas vantagens, dentre elas: (WIDIA, 2014; GARANT, 2015)

- Por ter um melhor contato entre a ferramenta e a peça e trabalhar com velocidades mais altas, é recomendado para materiais mais duros (50 HR_c),
- Volume de material removido é muito maior do que o fresamento convencional,
- É possível utilizar valores mais altos de profundidade de corte,
- Maior estabilidade do corte e por consequência um melhor acabamento superficial,
- Espessura do cavaco constante,
- Bruta diminuição do esforço no canto da ferramenta de corte,
- Melhora a dissipação do calor gerado durante o processo, diminuindo a temperatura da ferramenta,
- Reduz o desgaste da ferramenta.

v. Acabamento

Como mencionado anteriormente, o processo de usinagem pode ser dividido em três estágios: o desbaste, o semi-acabamento e o acabamento. No acabamento, como a peça já passou pelos dois estágios anteriores, ela já vem muito preparada, então durante o acabamento é onde ocorre a menor taxa de remoção de material.

O objetivo do acabamento é obter exatidão e precisão da geometria, tolerância, tanto de forma quanto de tamanho e qualidade superficial.

Tais objetivos são de difícil obtenção por inúmeros fatores, porém os mais importantes são a deflexão da ferramenta e oscilações durante o processo. Além disso ainda é necessário a escolha correta da estratégia, nessa parte o auxílio de um programa CAM e de alguém com experiência no processo é de grande valor. É interessante que haja contato constante entre a ferramenta e a peça a ser usinada (SANDVIK, 2011).

Durante o acabamento é comum que sejam utilizados valores altos para a velocidade de corte e baixas profundidades de corte, no intuito de diminuir as deflexões e oscilações. Também ferramentas menores são utilizadas para que o trajeto seja feito com maior precisão. Fica clara a importância de se utilizar ferramentas novas e com precisão, afinal ela será responsável pelo resultado final do processo (KLOCKE, 2001).

Se a superfície a ser usinada será plana, é comum que se utilize uma fresa de topo reto, porém se a superfície for complexa a ferramenta mais comumente utilizada é a fresa de topo esférico. Quando essa segunda é utilizada é comum que o ângulo entre ela e peça pode variar bastante, dificultando o processo (MACHADO, 2008).

5. MATERIAIS E MÉTODO

a. Materiais utilizados

O critério de seleção dos materiais foi bem simples: foram utilizados materiais que são constantemente utilizados nas pesquisas do Fraunhofer IPT e que, portanto, a pesquisa teria real impacto. Por casa da alta utilização, esses materiais tinham uma alta quantidade de peças sobressalentes que poderiam ser utilizados para pesquisas paralelas, tornando-os ainda mais atraentes para o trabalho. O critério para a seleção e utilização dos equipamentos e o restante do material utilizado no presente trabalho seguiu o mesmo critério.

Os materiais escolhidos foram: aço 1045, titânio Ti-6Al-4V e inconel 718. Eles foram escolhidos também por suas aplicações e propriedades distintas. O intuito do projeto foi tentar simular diversos contextos comuns à indústria e pesquisa para aumentar a aplicabilidade e por consequência, a importância do estudo.

i. Aço

Foi escolhido o aço 1045, segundo as normas ABNT, porque ele é o mais amplamente utilizado na indústria. Sua popularidade se deve ao seu baixo custo de produção e boa resistência. Ele é classificado como um aço de médio teor de carbono. É bastante utilizado na indústria, por exemplo na mecânica e automobilística. Ele possui ainda uma boa relação entre resistência mecânica e resistência a fratura (CALLISTER, 2008).

O aço utilizado era um bloco com dimensões aproximadas de 70mm de altura, 200mm de comprimento e 150mm de largura. Na figura 18 mostra o bloco antes de ser preparado.



Figura 18 - Bloco de aço utilizado antes de ser preparado.

Como o bloco estava guardado a um tempo e suas superfícies não estavam muito planas foi necessário planificar todas elas e acertar todas as suas medidas. Além disso, para a realização dos testes de acabamento foi necessário planificar superfícies com alguns ângulos em sua lateral.

Para a usinagem do aço 1045 foi recomendada a utilização de velocidade de corte 100m/min e avanço dependendo do tipo de usinagem.

ii. Titânio

O titânio escolhido foi o Ti-6Al-4V, também muito utilizado, principalmente na indústria aeronáutica e aeroespacial devido a sua usinabilidade e propriedades térmicas. Ele é bastante utilizado quando altas resistências térmicas são necessárias. Uma grande falha das ligas de titânio é a sua afinidade com o oxigênio e, portanto, a sua relativa fácil oxidação. Outro fator importante é que as ligas de titânio normalmente têm baixa massa específica quando comparada a outras ligas com características mecânicas parecidas (CALLISTER, 2008).

O material utilizado também estava em forma de bloco e tinha dimensões aproximadas de 60mm de altura, 140mm de largura e 180mm de comprimento. A figura 19 mostra o bloco utilizado.

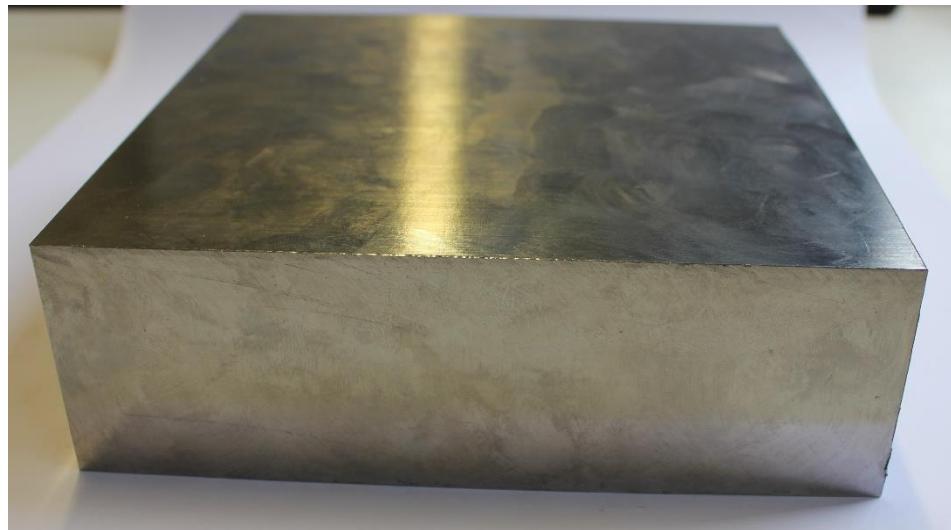


Figura 19 - Bloco de titânio

Esse bloco também precisou ser preparado para os testes, e a velocidade de corte recomendada para ele foi 70m/min.

iii. Inconel

A liga de inconel utilizada foi o inconel 718. O inconel é uma liga composta a base de níquel que contém também cromo e molibdênio, projetada para ter uma alta resistência a corrosão, oxidação e resistência térmica. Além disso essa liga tem boas propriedades mecânicas. É principalmente utilizada na indústria aeroespacial, uma de suas utilizações é para a fabricação de BLISK's (blade integrated disk) (CALLISTER, 2008).

A usinabilidade do inconel é muito baixa e por isso, é muito difícil usinar esse material, isso porque devido as suas propriedades térmicas ele aquece e aquece a ferramenta. Muitas vezes devido a esse problema é melhor usinar com ferramentas mais duras e resistentes para que menos passagens sejam necessárias. As forças de usinagem geradas nos processos com inconel geralmente são bem altas.

Hoje em dia ainda é um material relativamente caro e de difícil manuseio, por isso é pouco utilizado.

A figura 20 mostra o bloco que foi utilizado.

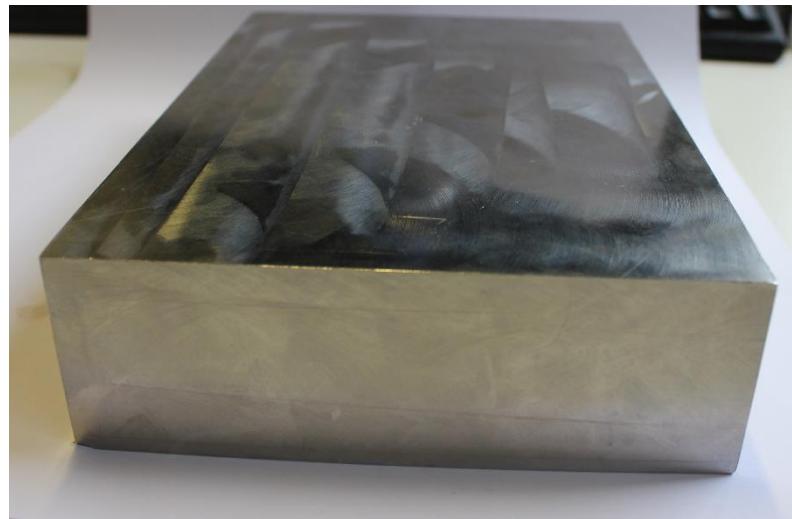


Figura 20 - Bloco de inconel

Devido ao seu preço, esse foi o material de mais difícil acesso. Ele já havia sido utilizado em outros testes, o que fez com que uma parte dele não pudesse ser utilizada nos experimentos.

As suas dimensões aproximadas eram 60mm de altura, 130mm de largura e 190mm de comprimento.

b. Fresadora

A fresadora utilizada nos ensaios foi uma Mikron HPM 800 U HD. A figura 21 mostra ela.



Figura 21 - Fresadora Mikron HPM 800 U HD

Ela foi escolhida porque o autor do trabalho teve a oportunidade de ter contato e trabalhar com ela ao longo de sua experiência no Fraunhofer IPT. Ela é uma fresa de 5 eixos que pode ser utilizada tanto para desbaste quanto para processos de acabamento. Ela armazena até 60 ferramentas ao mesmo tempo. Ela possui potência na árvore do spindle de 36 kW, precisão de 5µm e tinha velocidade máxima de rotação acima de 20000 rpm. A máquina está equipada com o CNC Sinumerik 840D, da Siemens (MIKRON, 2015).

Ela, portanto, supria todas as necessidades necessárias para a realização dos experimentos propostos.

c. Sistemas de medição
 i. Dinamômetro Kistler

Um sistema de medição utilizado foi um dinamômetro em forma de plataforma. A marca escolhida foi a Kistler por ser amplamente utilizado no Fraunhofer IPT e na indústria, além de sua reputação e confiabilidade.

O modelo escolhido foi o 9255C porque ele mede nas três direções; x, y e z; por conseguir medir a grandeza das forças envolvidas e suportar as peças a serem

usinadas. Ele suporta forças de -30kN até 30kN nos eixos x e y, e suporta forças de -10kN até 60kN no eixo z. A força é medida por meio de quatro cristais piezoelétricos presentes nas quatro extremidades da plataforma (KISTLER, 2012).

Para o preparo do equipamento, primeiro é necessário que o dinamômetro seja fixado na bancada por meio de parafusos e depois que esteja devidamente calibrado, e isso foi obtido graças ao auxílio do técnico Franz Möhre do Fraunhofer IPT.

Na plataforma é conectado um cabo 1689B5 da Kistler também, e é necessário que essa conexão seja vedada contra o fluido de corte e para isso foi utilizado um isolante. O cabo por sua vez foi conectado ao amplificador 5080A e esse conectado a um computador por meio de um cabo 1200A27.

A figura 22 mostra em detalhes o dinamômetro utilizado.



Figura 22 - Dinamômetro 9255C (KISTLER, 2012)

E na figura 23 mostra o esquema da instalação.



Figura 23 - Esquema da instalação do dinamômetro (KISTLER, 2012)

Para a captura dos dados é necessário que o computador esteja equipado com o software DynoWare Software.

ii. Komet Brinkhaus Toolscope

O segundo sistema utilizado para medição de forças foi o Komet Brinkhaus Toolscope. Ele não havia sido utilizado ainda no Fraunhofer IPT, porém havia um grande interesse em entender melhor esse novo sistema para que fosse estudada a sua utilização em novos projetos.

O modelo foi escolhido pois um dos clientes da instituição já utilizava esse sistema e tinha interesse em entender melhor os seus benefícios.

O sistema foi instalado e calibrado pelo técnico Sascha Kamps do Fraunhofer IPT na Mikron HPM 600 U HD. O sistema era conectado diretamente na parte de trás da fresadora se ligando em seus sistemas de controle e atuação.

Na figura 24 é mostrado o sistema.



Figura 24 - Komet Brinkhaus Toolscope (KOMET, 2014)

O sistema se conecta a um computador por meio de um cabo USB e para visualizar os resultados é necessário que o software “Tool and Process Monitoring” seja instalado (KOMET, 2014).

A fresadora foi programada para que o sistema começasse a monitorar o processo quando o comando H800 colocado no código do programa fosse executado e parava de monitorar quando o comando H801 fosse executado.

O interessante desse sistema é que além das forças outras medições podem ser feitas caso outros módulos sejam comprados e instalado, por exemplo pode ser adicionado um detector de colisão, um controle de avanço, monitoramento de desgaste de ferramenta, mudança automática de ferramenta entre outros (KOMET, 2014).

d. Metodologia

Como já mencionado o presente trabalho tentou simular alguns cenários comuns à utilização da fresadora e dos equipamentos de medição. E para isso, foram utilizadas todas as técnicas de usinagem apresentadas, HPC, HFC, furação, trocoidal e acabamento, e todos os materiais, inconel 718, liga de titânio e aço.

O procedimento dos experimentos pode ser dividido, por ser uma forma mais prática, da seguinte maneira: preparação, testes HPC, testes HFC, furação, trocoidal e acabamento. Quando os testes foram feitos, porém, a ordem seguida não foi essa, por questão de praticidade quando uma peça era montada, ela era prepara e todos os testes eram feitos naquele material e assim sucessivamente.

Todos os testes foram repetidos uma vez, tendo um total de 2 testes de cada um apresentado para que qualquer comportamento anômalo pudesse ser descartado. Levando isso em consideração, foram feitos um total de 60 testes.

Os testes foram todos feitos utilizando apenas 3 eixos da fresadora (x,y,z) para que a medição de força não envolva a rotação da peça e, portanto o peso dela foi ignorado.

Alguns testes tem um parâmetro variando durante o teste para que o tempo de reação de cada sistema possa ser testado.

Todos os testes foram escritos pelo autor na linguagem G, a utilizada pela fresadora. A única exceção foi o teste trocoidal que devida a sua complexidade seria impossível que fosse escrito, portanto para esse caso foi utilizado para auxiliar na tarefa o programa Mastercam. Nele foi primeiro desenhada a peça com os tamanhos corretos e depois foi escolhida a estratégia trocoidal, já presente nele, e os parâmetros foram escolhidos.

É interessante ressaltar que um dos requisitos para as escolhas das ferramentas é que elas tinhama que conseguir usinar em materiais mais duros e de baixa usinabilidade como as ligas de níquel e de titânio, por mais que elas não fossem ser utilizadas para tal finalidade. Esse requisito foi imposto pelo autor por dois motivos, primeiro porque essas ferramentas seriam mais resistentes gerando menores problemas no futuro e segundo pois caso o planejamento dos testes fosse mudado qualquer ferramenta poderia trabalhar com qualquer um dos materiais escolhidos.

i. Preparação

Primeiramente foi feito chanfros em 3 de suas arestas em ângulos de 15° , 30° e 75° para os testes de acabamento. Na figura 25 é mostrada de forma esquemática uma vista de corte da peça de aço depois de preparada.

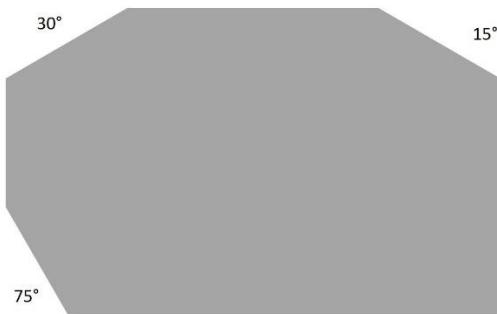


Figura 25 - Vista de corte esquemática do bloco de aço

Para a preparação dos testes, foi utilizado muito a experiência e a ajuda dos técnicos do Fraunhofer IPT, tanto do Willi Tonstch quanto do Franz Möhre e do Sascha Kamps.

Quando a empresa responsável pela instalação e testes do Komet Brinkhaus Toolscolpe terminou o trabalho, as preparações na máquina puderam ser iniciadas. Primeiro foi instalada a plataforma da Kistler na mesa da Mikron por meio de quatro parafusos, um em cada extremidade sua. Depois foi necessário que os seus cabos fossem instalados e vedados contra o fluido de corte utilizado para que ela pudesse ser devidamente calibrada.

Com isso feito as peças poderiam ser montadas em cima da plataforma. Para a sua montagem era instalado um calço na parte de trás da plataforma e na parte da frente ela era presa por grampos fixadores.

A montagem completa pode ser vista na figura 26.



Figura 26 - Montagem completa

Nela pode-se ver a fresadora, a ferramenta, a peça a ser usinada, a plataforma Kistler e os computadores necessários para os testes.

Na figura 27 tem em detalhe a montagem da mesa da fresadora.

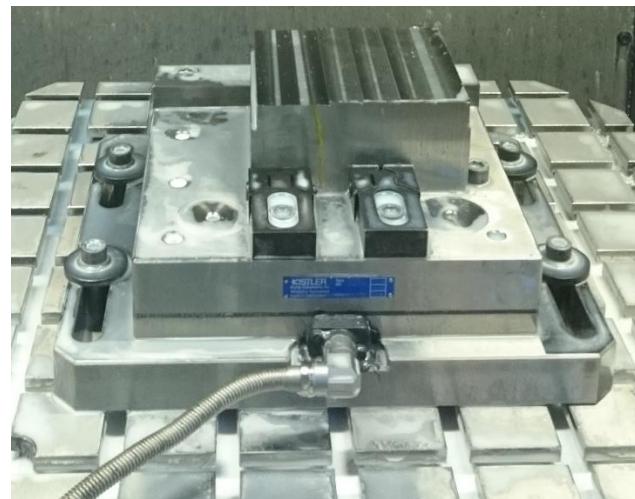


Figura 27 - Mesa da fresadora em detalhe

ii. HPC

Para o processo de High Performance Cutting foi escolhida uma ferramenta da Seco Tools pois é uma fabricante muito utilizada pelo IPT Fraunhofer e de grande confiabilidade.

Foi escolhida a ferramenta com código 554120Z4.0-SIRON-A, uma ferramenta de diâmetro 12mm pois ela é comumente utilizada em projetos e ela era reforçada para usinar os materiais selecionados com esse tipo de estratégia.

A figura 28 mostra a ferramenta utilizada.



Figura 28 - Ferramenta HPC da Seco Tools

Observe que a ferramenta possui cinco arestas de corte. A figura 29 mostra um esquema da ferramenta e na tabela 3 mostra as suas principais informações.

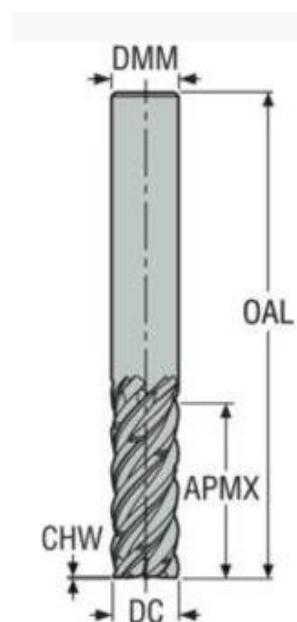


Figura 29 - Esquema da ferramenta (SECO, 2017)

Tabela 3 - Descrição ferramenta HPC (adaptado SECO, 2017)

Nome	Descrição	Valor
DMM	Diâmetro da haste	12,0 mm
OAL	Comprimento total	80,0 mm
APMX	Profundidade máxima de corte	26,0 mm
CHW	Largura do chanfro do canto	0,2 mm
DC	Diâmetro de corte	12,0 mm

A ferramenta 554120Z4.0-SIRON-A da Seco Tools tem 5 dentes e 12 mm de diâmetro. Para essa estratégia foi pensado dois grupos de testes diferentes, o primeiro com ae menor do que o diâmetro da ferramenta e outro com ae do tamanho do diâmetro da ferramenta.

Dentro do primeiro grupo foram feitos 3 tipos de teste, um com um ae pequeno, de $0,1*D$, um segundo com um ae maior, de $0,4*D$, e um terceiro com ae variando de $0*D$ até $0,4*D$.

A tabela 4 mostra um resumo dessas informações e em quais materiais cada teste foi feito.

Tabela 4 - Resumo testes HPC

	Parâmetro variável	Valor	Material
Grupo 1	a_e	$0,1*D$	Inconel e aço
	a_e	$0,4*D$	Inconel e aço
	a_e	$[0;0,4]*D$	Inconel e aço
Grupo 2	a_p	$0,5*D$	Titânio e aço
	a_p	$0,5*D$	Titânio e aço

Os parâmetros que não foram apresentados são constantes e igual para todos os testes, eles podem ser vistos da tabela 5.

Tabela 5 - Resumo parâmetros comuns HPC

Parâmetro	Valor
A_p	$0,5*D$ (grupo 1)
F_z	0,06 mm
V_c	30(inconel), 70(titânio) e 100(aço) m/min

Portanto para HPC, foram feitos 20 testes.

iii. HFC

Para a ferramenta de High Feed Cutting também foi escolhida pastilhas da Seco Tools para serem instaladas em uma ferramenta padrão de 50 mm de diâmetro na fresa.

Para suportar o tipo de estratégia que foi utilizado era necessário que a pastilha fosse revestida de cermet para suportar tanto as forças quanto o calor gerado ao se usinar material de baixa usinabilidade como o Inconel e as ligas de titânio. O modelo

escolhido foi o XOEX120408R-M07 F40M pois ele cumpre com todos os requisitos necessários e era de fácil obtenção do instituto.

A figura 30 mostra a pastilha utilizada antes do início dos testes.



Figura 30 - Pastilha HFC

A figura 31 mostra um esquema da pastilha e a tabela 6 apresenta as principais medidas e características dela.

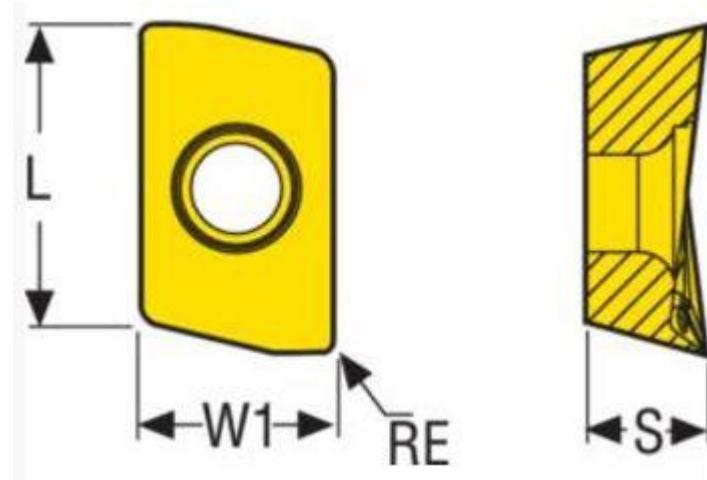


Figura 31 - Esquema da pastilha HFC (SECO, 2017)

Tabela 6 - Descrição pastilha HFC (adaptado SECO, 2017)

Nome	Descrição	Valor
L	Comprimento efetivo da aresta de corte	12,0 mm
W1	Largura da pastilha	6,0 mm
RE	Raio da ponta	0,8 mm
S	Espessura da pastilha	5,0 mm

Foram feitos três testes variando a_e e depois um último foi repetido com f_z maior.

A tabela 7 mostra um resumo dessas informações e em quais materiais cada teste foi feito.

Tabela 7 - Resumo testes HFC

Parâmetro variável	Valor	Material
a_e	$0,4*D$	Inconel e aço
a_e	$1*D$	Inconel, aço e titânio
a_e	$[0;1]*D$	Inconel e aço
f_z	1,3*regular	Titânio e aço

Os parâmetros que não foram apresentados são constantes e igual para todos os testes, eles podem ser vistos da tabela 8.

Tabela 8 - Dados testes HFC

Parâmetro	Valor
A_p	0,5 mm
F_z	0,1 mm
V_c	30(inconel), 70(titânio) e 100(aço) m/min

Portanto, para HFC foram feitos um total de 18 testes.

iv. Furação

Foram escolhidas duas ferramentas para furação, ambas da Seco Tools. Elas são muito similares entre si, mudando apenas o diâmetro e o comprimento delas.

Foi feita essa escolha para que seja avaliada a diferença entre as forças envolvidas e se há diferença na medição dos dois sistemas.

Ambas as brocas são revestidas também para que possam ser utilizadas no Inconel 718 e são ferramentas sólidas.

As ferramentas escolhidas foram SD205A-6.0-32-6R1, sendo a broca de menor diâmetro, e SD205A-10.0-48-10R1, a broca com maior diâmetro.

A figura 32 mostra ambas as brocas antes da realização dos testes.



Figura 32 - Ferramentas de furação

É interessante notar que ambas as ferramentas têm furos para que o fluido lubrificante possa ser utilizado. Ambas também têm duas arestas de cortes, que é um arranjo muito comum para ferramentas de furação.

Na figura 33 é mostrado um esquema de ambas as ferramentas e na tabela 9 as suas principais medidas são apresentadas.

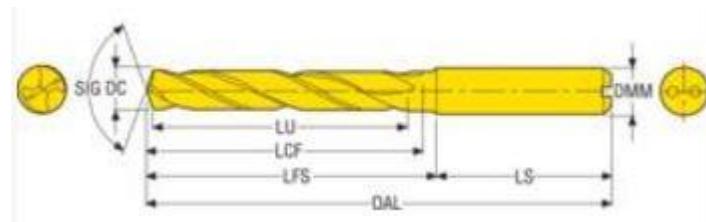


Figura 33 - Esquema das ferramentas de furação (SECO, 2017)

Tabela 9 - Descrição das ferramentas de furação (adaptado SECO, 2017)

Nome	Descrição	Valor SD205A-10.0-48-10R1	Valor SD205A-6.0-32-6R1
SIG	Ângulo de ponta	140,0°	140,0°
LU	Comprimento utilizable	48,0 mm	32,0 mm
DC	Diâmetro de corte	10,0 mm	6,0 mm
LCF	Comprimento do canal de cavacos	61,0 mm	44,0 mm
LFS	Comprimento funcional secundário	63,0 mm	46,0 mm
LS	Comprimento da haste	40,0 mm	36,0 mm
OAL	Comprimento total	103,0 mm	82,0 mm
DMM	Diâmetro da haste	10,0 mm	6,0 mm

Nos testes de furação foram feitos 2 furos com cada uma das brocas em cada um dos materiais, totalizando 12 furos feitos.

Todos os furos foram feitos com 20 mm de comprimento, assim a única mudança entre eles era o material e o diâmetro da ferramenta utilizada.

v. Trocoidal

Para a usinagem com estratégia trocoidal é onde a ferramenta deve ser melhor escolhida. A dificuldade na escolha é tão evidente que existe um grupo de pesquisa no Fraunhofer IPT focado em melhorar as ferramentas.

O autor utilizou uma ferramenta fabricada e aprimorada dentro do próprio Fraunhofer IPT durante os seus testes. O aspecto que ainda precisa de melhora, segundo os pesquisadores do instituto, é o ângulo da aresta de corte com a ferramenta a ser usinada.

A ferramenta utilizada pode ser vista na figura 34.



Figura 34 - Ferramenta trocoidal

Algumas informações importantes sobre essa ferramenta, note que a ferramenta tem 4 dentes e eles formam um ângulo de 10° . O raio da ponta da ferramenta mede 12 mm.

O teste trocoidal foi feito apenas no aço porque era o material já haviam conduzido testes anteriormente no instituto e, portanto, seus parâmetros estavam otimizados. Portanto, foram realizados 2 testes trocoidais em aço.

O incremento radial utilizado para o teste foi de $0,1*D$ e a largura do corte feito foi de $1,5*D$.

Assim como nos outros testes, foram feitos dois testes para que tenha uma amostragem mínima.

vi. Acabamento

Para as ferramentas de acabamento, também foram escolhidas dentre as possíveis do instituto e novamente foi escolhida uma da Seco Tools, 111061-MEGA-64.

Ela assim como as outras pode ser usada junto com fluido de corte. Essa ferramenta não seria a mais indicada para usinagem de materiais de baixa usinabilidade como o Inconel ou o titânio, porém nenhum dos dois blocos foi preparado para que fossem usinados em acabamento então esse requisito pode ser contornado.

A figura 35 mostra a ferramenta antes de ser utilizada nos testes.



Figura 35 - Ferramenta de acabamento

Note que essa ferramenta é menor e apresenta menos arestas cortantes que as outras, e isso faz sentido dada a sua função que é remover menos material e focar mais em precisão e qualidade superficial.

Na figura 36 é mostrado o esquema da ferramenta de acabamento e na tabela 10 as suas principais características são apresentadas.

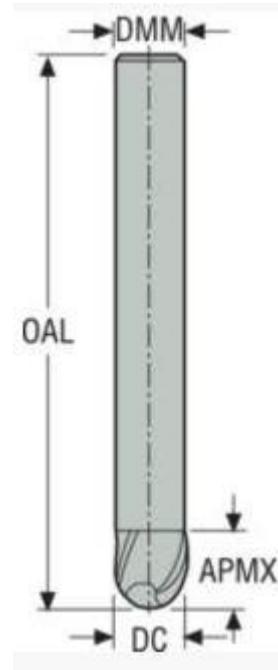


Figura 36 - Esquema da ferramenta de acabamento (SECO, 2017)

Tabela 10 - Descrição da ferramenta de acabamento (adaptado SECO, 2017)

Nome	Descrição	Valor
DMM	Diâmetro da haste	6,0 mm
OAL	Comprimento total	75,0 mm
APMX	Profundidade máxima de corte	6,0 mm
DC	Diâmetro de corte	6,0 mm

Para os testes de acabamento, o interessante para trazê-los próximo da realidade é variar o ângulo de contato entre a ferramenta e a peça. Esse ângulo deve ser usinado na peça para que a sua rotação não influenciasse nas forças medidas, e por isso foi decidido realizar esses testes apenas no aço.

Foram cortados chanfros de 15° , 30° e 75° . Foram feitos dois testes em cada um dos ângulos e no ângulo de 75° foi feito um teste adicional com uma profundidade de corte, ap, maior.

Portanto no total foram feitos 8 testes de acabamento.

vii. Resumo dos testes

É interessante resumir todos os testes e os seus parâmetros em uma tabela para que seja mais visual e fácil de entender. Na figura 37 esse resumo é mostrado. Na coluna ordem mostra em que ordem os testes foram feitos, e ele se deve apenas a facilidade de mexer menos as peças ou mudar menos de ferramentas. Os testes daqui em diante serão referidos por meio do seu número na ordem. A coluna do nome apenas mostra o nome do arquivo salvo no computador.

Ordem	Nome	Material	Número de dentes	Diâmetro [mm]	ap [mm]	ae [mm]	fz [mm]	n [1/min]	vf [mm/min]	vc [m/min]	α [°]
	HPC										
7	7_HPC_1.0	Inconel	5	10	6	1	0,06	954,93	286,48	30	0
8	8_HPC_1.1	Inconel	5	10	6	1	0,06	954,93	286,48	30	0
9	9_HPC_2.0	Inconel	5	10	6	4	0,06	954,93	286,48	30	0
10	10_HPC_2.1	Inconel	5	10	6	4	0,06	954,93	286,48	30	0
11	11_HPC_3.0	Inconel	5	10	6 [0;4,8]		0,06	954,93	286,48	30	0
12	12_HPC_3.1	Inconel	5	10	6 [0;4,8]		0,06	954,93	286,48	30	0
	HFC										
1	1_HFC_1.0	Inconel	1	50	0,5	20	0,1	190,99	19,10	30	0
2	2_HFC_1.1	Inconel	1	50	0,5	20	0,1	190,99	19,10	30	0
3	3_HFC_2.0	Inconel	1	50	0,5	50	0,1	190,99	19,10	30	0
4	4_HFC_2.1	Inconel	1	50	0,5	50	0,1	190,99	19,10	30	0
5	5_HFC_3.0	Inconel	1	50	0,5 [0;50]		0,1	190,99	19,10	30	0
6	6_HFC_3.1	Inconel	1	50	0,5 [0;50]		0,1	190,99	19,10	30	0
	FURAÇÃO										
13	13_Boh_1.0	Inconel	2	6	20	6	0,04	1591,55	127,32	30	0
14	14_Boh_1.1	Inconel	2	6	20	6	0,04	1591,55	127,32	30	0
15	15_Boh_2.0	Inconel	2	10	20	10	0,04	954,93	76,39	30	0
16	16_Boh_2.1	Inconel	2	10	20	10	0,04	954,93	76,39	30	0
	HPC										
21	21_HPC_4.0	Titan	5	12	2	10	0,06	1856,81	557,04	70	0
22	22_HPC_4.1	Titan	5	12	2	10	0,06	1856,81	557,04	70	0
23	23_HPC_5.0	Titan	5	12	6	10	0,06	1856,81	557,04	70	0
24	24_HPC_5.1	Titan	5	12	6	10	0,06	1856,81	557,04	70	0
	HFC										
17	17_HFC_4.0	Titan	1	50	0,5	50	0,1	445,63	44,56	70	0
18	18_HFC_4.1	Titan	1	50	0,5	50	0,1	445,63	44,56	70	0
19	19_HFC_5.0	Titan	1	50	0,5	50	0,13	445,63	57,93	70	0
20	20_HFC_5.1	Titan	1	50	0,5	50	0,13	445,63	57,93	70	0
	FURAÇÃO										
25	25_Boh_3.0	Titan	2	6	20	6	0,04	3713,62	297,09	70	0
26	26_Boh_3.1	Titan	2	6	20	6	0,04	3713,62	297,09	70	0
27	27_Boh_4.0	Titan	2	10	20	10	0,04	2228,17	178,25	70	0
28	28_Boh_4.1	Titan	2	10	20	10	0,04	2228,17	178,25	70	0
	HPC										
37	37_HPC_6.0	Stahl	5	12	6	1,2	0,06	2652,58	795,77	100	0
38	38_HPC_6.1	Stahl	5	12	6	1,2	0,06	2652,58	795,77	100	0
39	39_HPC_7.0	Stahl	5	12	6	4,8	0,06	2652,58	795,77	100	0
40	40_HPC_7.1	Stahl	5	12	6	4,8	0,06	2652,58	795,77	100	0
41	41_HPC_8.0	Stahl	5	12	6 [0;4,8]		0,06	2652,58	795,77	100	0
42	42_HPC_8.1	Stahl	5	12	6 [0;4,8]		0,06	2652,58	795,77	100	0
43	43_HPC_9.0	Stahl	5	12	6	12	0,06	2652,58	795,77	100	0
44	44_HPC_9.1	Stahl	5	12	6	12	0,06	2652,58	795,77	100	0
45	45_HPC_10.0	Stahl	5	12	12	12	0,06	2652,58	795,77	100	0
46	46_HPC_10.1	Stahl	5	12	12	12	0,06	2652,58	795,77	100	0
	HFC										
35	35_HFC_6.0	Stahl	1	50	0,5	20	0,1	636,62	63,66	100	0
36	36_HFC_6.1	Stahl	1	50	0,5	20	0,1	636,62	63,66	100	0
29	29_HFC_7.0	Stahl	1	50	0,5	50	0,1	636,62	63,66	100	0
30	30_HFC_7.1	Stahl	1	50	0,5	50	0,1	636,62	63,66	100	0
33	33_HFC_8.0	Stahl	1	50	0,5 [0;50]		0,1	636,62	63,66	100	0
34	34_HFC_8.1	Stahl	1	50	0,5 [0;50]		0,1	636,62	63,66	100	0
31	31_HFC_9.0	Stahl	1	50	0,5	50	0,13	636,62	82,76	100	0
32	32_HFC_9.1	Stahl	1	50	0,5	50	0,13	636,62	82,76	100	0
	FURAÇÃO										
47	47_Boh_5.0	Stahl	2	6	20	6	0,04	5305,16	424,41	100	0
48	48_Boh_5.1	Stahl	2	6	20	6	0,04	5305,16	424,41	100	0
49	49_Boh_6.0	Stahl	2	10	20	10	0,04	3183,10	254,65	100	0
50	50_Boh_6.1	Stahl	2	10	20	10	0,04	3183,10	254,65	100	0
	FINISHING										
51	51_Fin_1.0	Stahl	2	6	0,15	6	0,035	5305,16	371,36	100	15
52	52_Fin_1.1	Stahl	2	6	0,15	6	0,035	5305,16	371,36	100	15
53	53_Fin_2.0	Stahl	2	6	0,15	6	0,035	5305,16	371,36	100	30
54	54_Fin_2.1	Stahl	2	6	0,15	6	0,035	5305,16	371,36	100	30
55	55_Fin_3.0	Stahl	2	6	0,15	6	0,035	5305,16	371,36	100	75
56	56_Fin_3.1	Stahl	2	6	0,15	6	0,035	5305,16	371,36	100	75
57	57_Fin_5.0	Stahl	2	6	0,35	6	0,035	5305,16	371,36	100	75
58	58_Fin_5.1	Stahl	2	6	0,35	6	0,035	5305,16	371,36	100	75
	TROCOIDAL										
59	59_Tor_1.0	Stahl	5	12	24	1,2	0,03	2652,58	397,89	100	0
60	60_Tor_1.1	Stahl	5	12	24	1,2	0,03	2652,58	397,89	100	0

Figura 37 - Resumo dos testes realizados

6. RESULTADOS

Os resultados não podem ser comparados sem antes serem trabalhados e preparados devido a alguns pontos de divergência.

O primeiro problema na análise dos resultados obtidos está no fato de que o dinamômetro da Kistler nos fornece direto as 4 forças envolvidas na usinagem, eixos x, y e z e a resultante enquanto o sistema de monitoramento ToolScope gera os resultados na forma do torque do motor. Portanto é necessário fazer uma conversão para que os valores possam ser analisados e comparados.

Além disso a fresa tem 4 motores, um no eixo x, outro no eixo y, outro no eixo z e um motor para a rotação do Spindel, portanto o ToolScope nos fornece uma nova variável, o torque da ferramenta, que já está decomposta no resultado da Kistler nos eixos x, y e z. Portanto é necessário que essa força seja decomposta nos outros 3 eixos para que as análises possam ser feitas. Dependendo da análise a ser feita essa informação extra pode ser de grande valia.

Devido à dificuldade na análise e o horizonte de tempo disponível para a realização do trabalho essa transformação e decomposição não foi feita, porém, uma possível metodologia será apresentada.

Como a máquina não tem caixa de transmissão ou redutora e utiliza um rolamento de esferas com funcionamento idêntico ao de uma rosca infinita, é possível fazer a transformação utilizando um catálogo de rolamento, por exemplo o Catálogo de Rolamento da NSK. Nele pode-se encontrar as relações necessárias para fazer a transformação, bastando apenas realizar medições das peças da fresa.

Tendo essas informações e com o auxílio de um software, por exemplo MatLab, é possível tratar os dados para que fiquem de uma maneira que a comparação seja viável.

Já para a decomposição da força de rotação, as análises podem ser incialmente feitas apenas para um teste de HFC. A escolha foi feita pois nessa usinagem é utilizado apenas um dente e, portanto, o resultado é muito mais limpo, então a comparação e as conclusões serão mais próximas a realidade. A força será decomposta por tentativa e erro, isto é, estimando-se valores para o ângulo de rotação até se obter o resultado mais próximo ao da Kistler. A ideia é que o modelo seja validado com esse teste e caso seja

viável ele será aplicado para o restante, caso contrário outras análises terão de ser repensadas.

E por fim, ambos os valores podem ser comparados com um modelo matemático dos testes, e este é ainda mais complexo e exigiria tempo muito maior e mais dedicação. Isso porque cada estratégia deve ser modelada separadamente e com sistemas distintos. Tal trabalho seria recomendado apenas para estudos mais aprofundados e longos, como mestrados etc.

As análises serão, portanto, no sentido de entender as diferenças dos dois sistemas e entender se existe alguma proporcionalidade entre eles.

Quando comparado os resultados de quaisquer um dos 60 testes realizados temos forças, independente do eixo, com comportamentos idênticos, como pode ser visto na figura 38. Nela é mostrado os resultados do teste número 13, furação com a menor broca em aço, e por isso é apenas mostrado o resultado no eixo z.

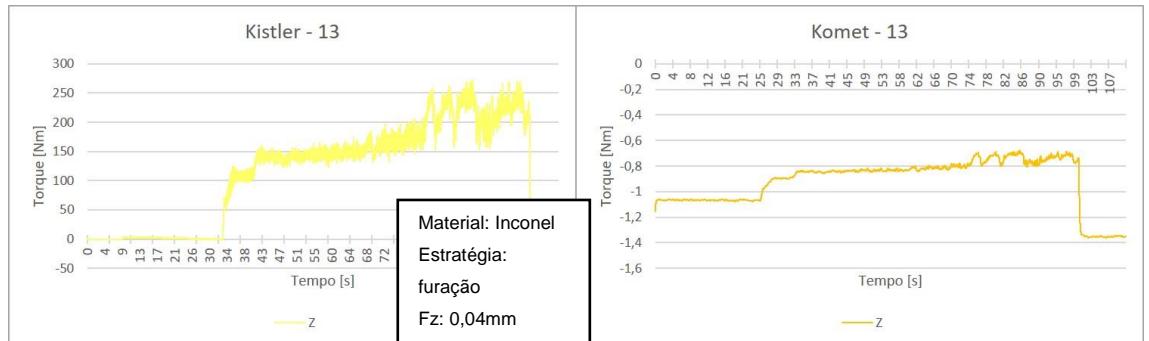


Figura 38 - Comparaçāo do teste 13

É interessante notar que as forças têm uma relação clara entre elas. Uma maneira de comprovar tal fato é fazendo a médias de todas as medições quando elas apresentam valores mais constantes e colocadas em tabelas e gráficos. No caso do teste número 13 mostrado na figura 38 o período utilizado foi dos 47 aos 98 segundos e no caso da Komet e dos 47 aos 80 segundos no caso da Kistler. A figura 39 mostra essa relação para os testes no eixo X, nela os pontos são os testes realizados e o seu valor no eixo x é a média daquele teste medido pelo Komet Brinkhaus e no eixo y é a média medido pela plataforma da Kistler. Importante ressaltar que alguns testes foram omitidos pois eles apresentavam valores muito baixos (caso dos testes de acabamento) ou eles tinham parâmetros não constantes, que influenciava na medição da média.

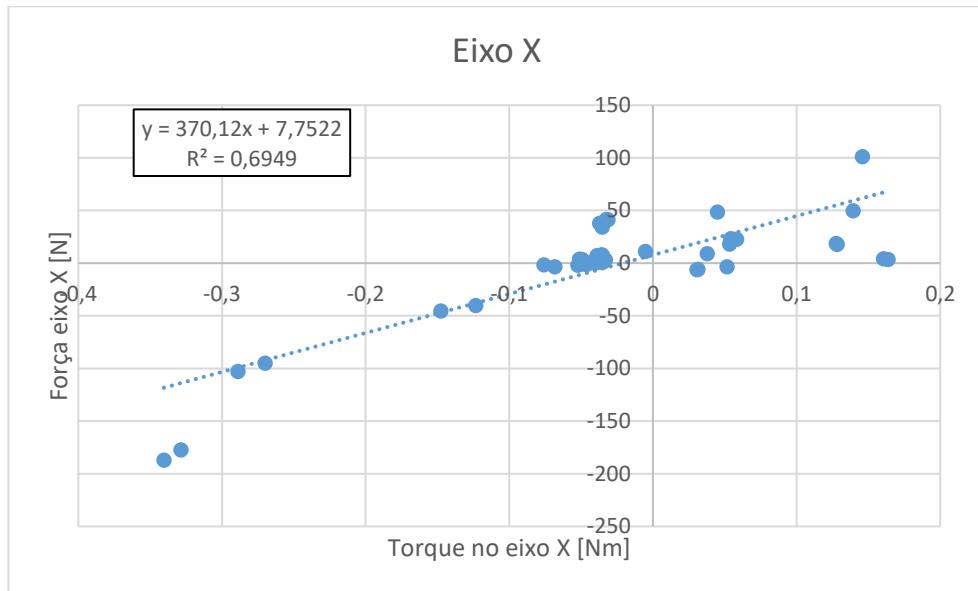


Figura 39 - Média da medição dos testes no eixo X

Na figura 39 foi feita também uma regressão linear com o auxílio do Excel. E foi calculado também o quanto exata é a regressão, nesse caso 69,49% dos pontos estão de acordo com a regressão.

O mesmo teste foi feito para o eixo z e o resultado está apresentado na figura 40.

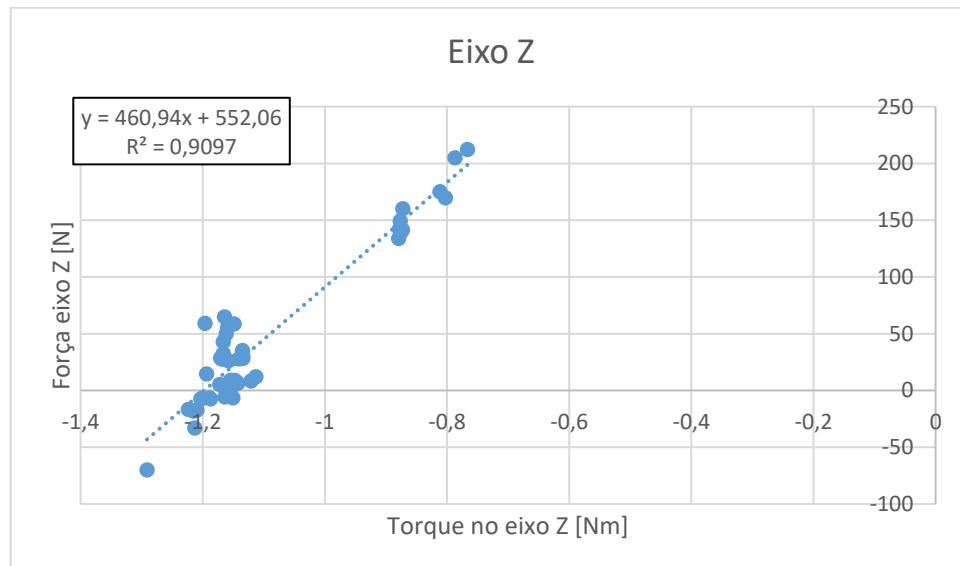


Figura 40 - Média da medição dos testes no eixo Z

No caso do eixo Z a correlação é ainda melhor, 90,97%.

Quando feita essa relação para o eixo Y, a relação é muito baixa como pode ser vista na figura 41.

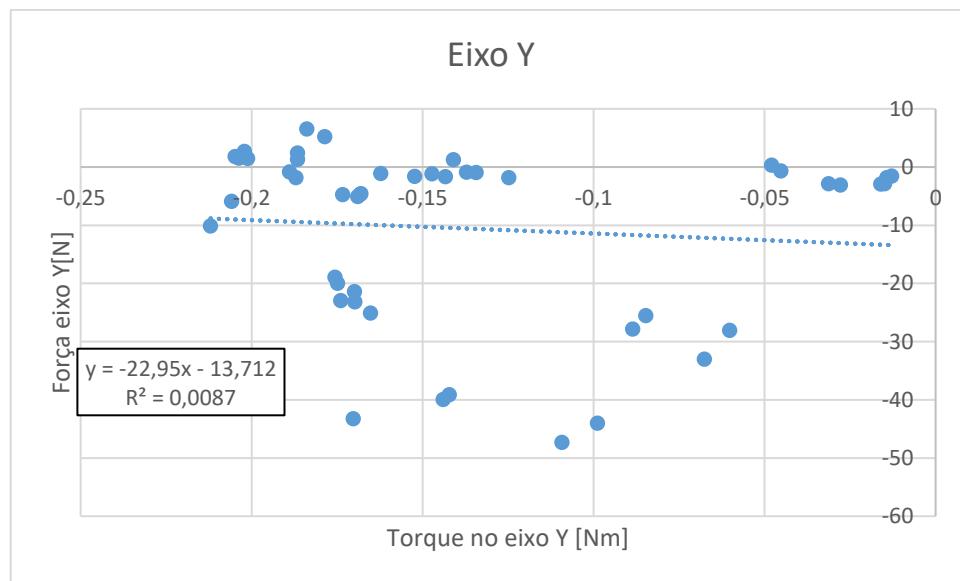


Figura 41 - Média da medição dos testes no eixo Y

A correlação é de 0,87%, estando muito abaixo das obtidas nos outros eixos.

Essa baixa correlação se deve ao fato de que durante os testes a fresadora teve de acionar muito pouco o seu motor do eixo y, que é perpendicular à direção do movimento da ferramenta. Tal fato pode ser comprovado quando analisado um teste separadamente. Foi utilizado o teste 51, acabamento em aço 15°, para exemplificar na figura 42.

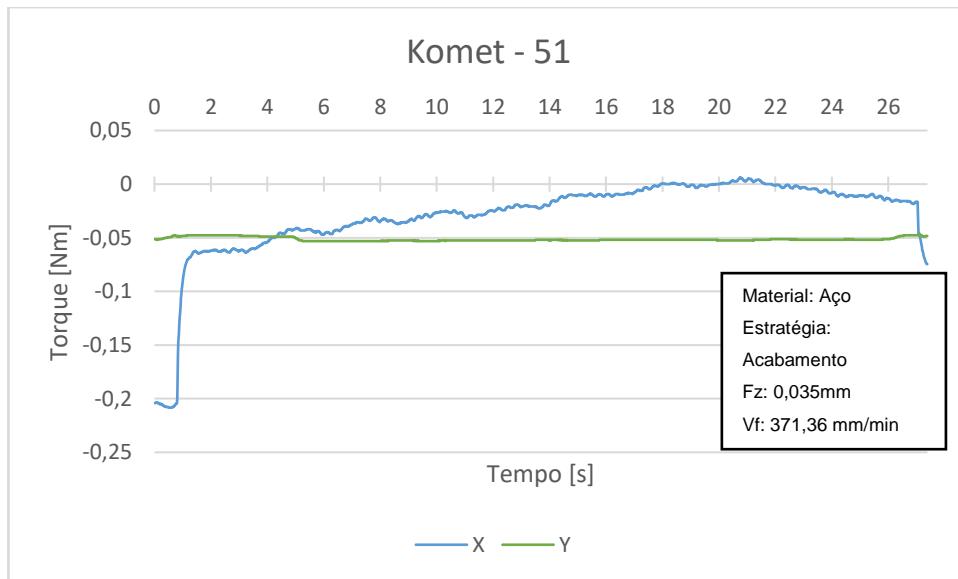


Figura 42 - Teste 51

Durante o teste inteiro o valor do torque no eixo Y se manteve praticamente constante e próximo a -0,05 Nm.

Além de exemplificar essa falha de sensibilidade do eixo perpendicular, a figura 43 mostra também que apesar do teste ter iniciado por volta do instante 0,8s, o torque no eixo Y sofreu mudanças apenas por volta do instante 5s. Esse efeito pode ser melhor visto na figura 43 que mostra o mesmo teste 51, porém com um período menor de tempo.

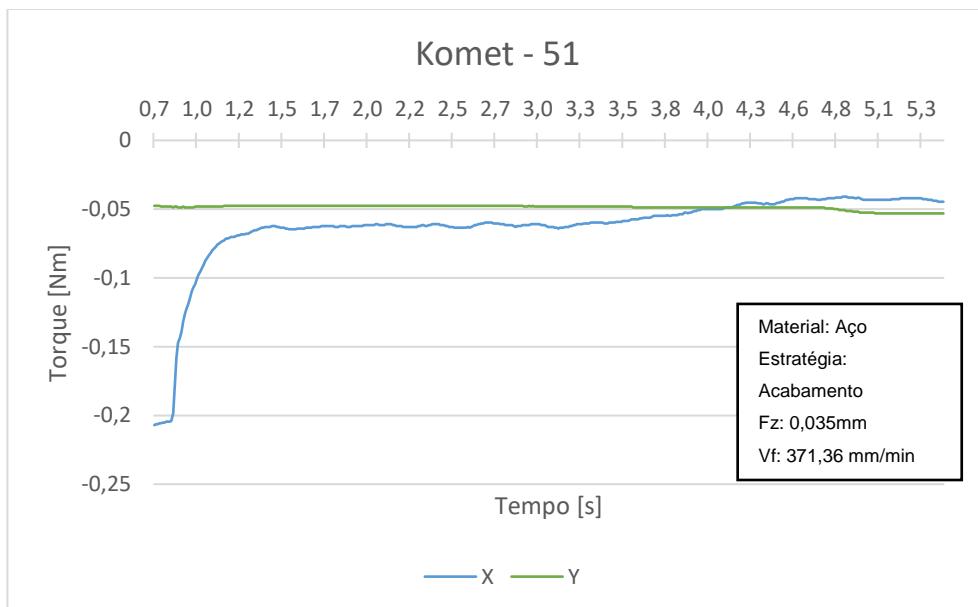


Figura 43 - Detalhe teste 51

A figura 44 mostra uma comparação entre o teste 51 registrado pela Komet e pela Kistler.

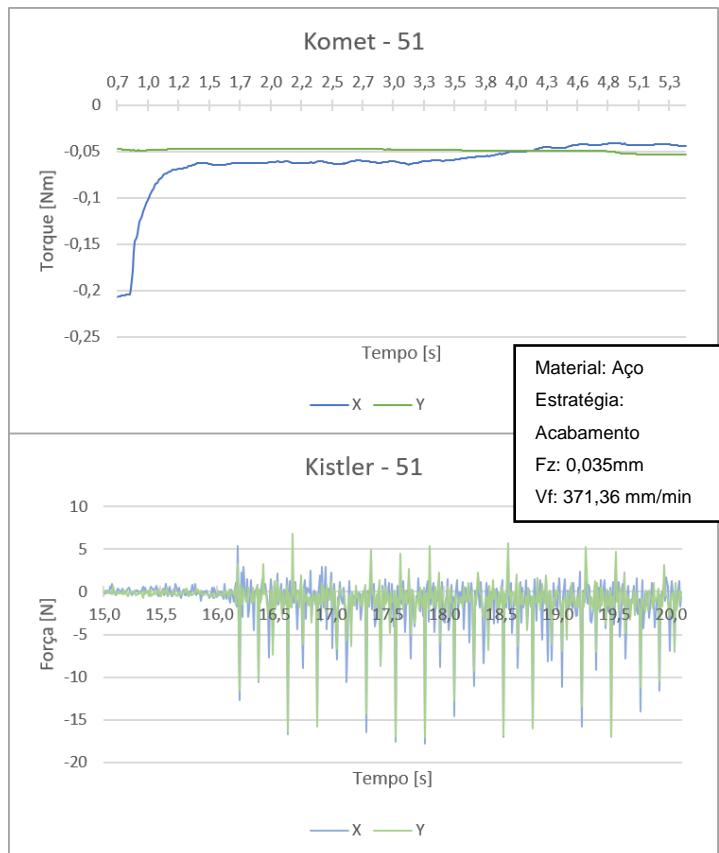


Figura 44 - Comparação teste 51

Na figura 44 é mostrado também que apesar de ambos sistemas captarem os sinais do teste, eles apresentam sensibilidades muito diferentes. O sistema da Kistler é mais sensível pois capta maiores variações da força do que o sistema da Komet.

Na figura 45 são mostrados os testes de acabamento tanto da Kistler quanto da Komet, mostrando que essas evidências encontradas são constantes em todos os testes.

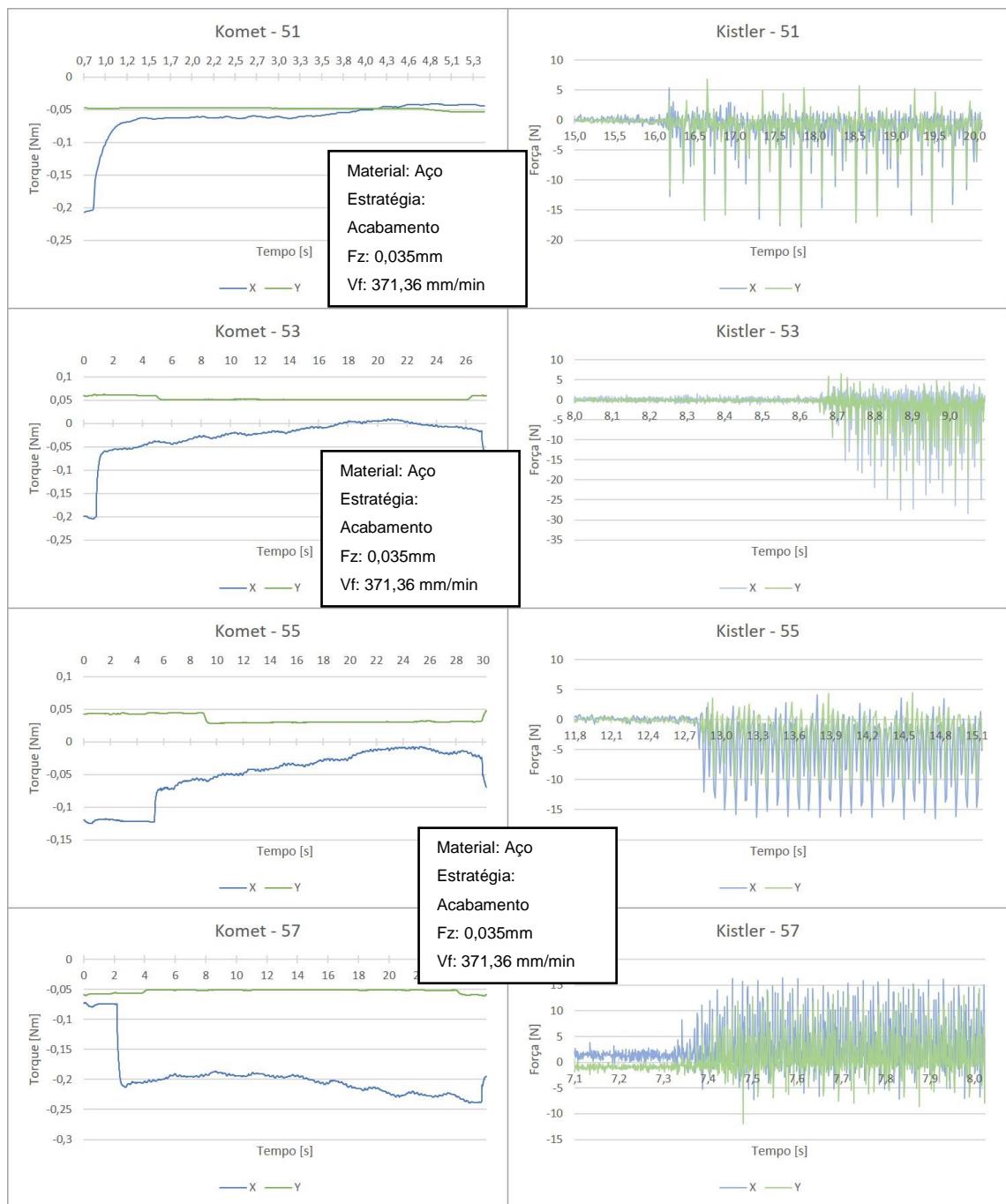


Figura 45 - Teste de acabamento

7. CONCLUSÕES E POSSÍVEIS TRABALHOS FUTUROS

Ao longo desse trabalho muitas conclusões e aprendizados foram obtidos em diversas frentes. Com os resultados obtidos é possível inferir que ambas têm características distintas e, portanto, aplicações diferentes.

Os dois sistemas capturam os mesmos fenômenos, porém por diferentes meios, registrando padrões idênticos. A Kistler mede as forças do processo enquanto a Komet mede o torque dos motores da fresadora. Isso gera algumas dificuldades para a sua comparação, mas para efeito de monitoramento e controle do processo podem ser usados com igual eficácia.

O sistema da Komet por medir o torque dos 4 motores da fresadora, eixos e, y, z e Spindle, requer maior sofisticação no tratamento dos dados caso seja desejado saber o valor das forças envolvidas, sendo necessário fazer decomposições e transformações das variáveis envolvidas.

Além disso, o sistema segundo os técnicos do IPT é aproximadamente 5 vezes mais barato que o seu par, o sistema da Kistler, e de instalação muito mais simples, necessitando apenas a instalação de um modem na parte de trás da máquina. Por se conectar diretamente com a máquina, é possível fazer o controle do processo por meio da aquisição de um módulo extra. Os resultados são obtidos pelo Excel, que é um software mais conhecido e mais difundidos no meio, mas tem limitação de 1048576 linhas, ou seja, 1048576 dados. A frequência de aquisição também é mais baixa, de 100Hz.

O sistema da Komet também não se mostrou tão eficiente na medição do torque perpendicular à direção da ferramenta.

Já o sistema da Kistler é muito mais refinado e caro que o seu par, o sistema da Komet. Ele é muito mais preciso, tendo frequência de aquisição de dados de 6000Hz e sendo mais sensível a variações de forças. Ele mede diretamente as forças envolvidas, que na maioria dos casos é a variável de interesse, porém por ser um aparelho diferente que não se conecta à fresadora é mais difícil para fazer controle do processo.

Por ser um aparelho mais complexo, a sua instalação requer uma série de etapas e cuidados, sendo o mais relevante que o equipamento seja devidamente vedado e

isolado de líquidos, dificultando muito a sua utilização em processos que utilizem fluido de corte, geralmente a maioria deles. Os resultados são gerados no software específicos da marca, necessitando aprendizagem ou mão de obra mais especializada.

Com isso fica clara as vantagens e desvantagens de cada sistema, quando é necessária maior precisão da medição e é possível fazer o preparo então o sistema da Kistler é mais recomendado, em casos por exemplo de pesquisa ou na área acadêmica esse sistema é mais recomendado.

Agora quando não é possível fazer todo o preparo, ou o interesse é o controle ou ainda quando não é necessária maior precisão então o sistema da Komet é mais recomendado. Por isso é mais indicado para casos como linha de produção ou na indústria.

Como dito anteriormente, o assunto é de grande interesse de diversas áreas, como indústria e pesquisas acadêmicas, e de difícil compreensão, por isso é interessante aprofundá-lo ainda mais. Algumas sugestões de continuação dos estudos são modelar matematicamente os testes e compará-los com os resultados obtidos, decomposição e transformação do torque para compará-los com os obtidos pela Kistler, aprofundamento dos testes em alguma estratégia específica, com o modulo extra da Komet, testar o seu sistema de monitoramento e controle de processos ou fazer alguns testes com quebra da ferramenta para comparar os fenômenos captados. Dessa maneira novas conclusões e aplicações podem ser definidos para os sistemas.

8. BIBLIOGRAFIA

- ARAUJO, A.C. Estudo das forças de usinagem no fresamento de topo. Dissertação de mestrado. UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.
- CALLISTER, W. D. Jr. Ciência e Engenharia de Materiais – uma introdução, 7^a edição, Ed. LTC, 2008.
- GARANT, Quicker, More Effective, TPC. 2015.
- GROOVER, Mikell P. Fundamentals of Modern Manufacturing. Materials, processes, and systems. New Jersey: Ed. John Wiley & Sons, 2002.
- HASCOET, J.Y.; RAUCH, M.; SUH, S. H. Relevance of Step-NC standard for high level toolpaths generation, Sixth International Conference High Speed Cutting, 2007.
- HEIDENHAIN, Dynamic Efficiency – Working Efficiently and with Process Reliability, 2013.
- KALPAKJIAN, S. Manufacturing engineering and technology, 3 ed. Nova York; Addison-Wesley Publishing Co., 1995.
- KISTLER, Product Catalog, 2012.
- KLOCKE, F. Manufacturing Processes 1 Cutting, Ed. Springer, 2001.
- KOMET, Process Monitoring Toolscope, 2014.
- MACHADO, Alison Rocha. Teoria da usinagem dos materiais. São Paulo, Ed. Blucher, 2008.
- MIKRON, brochure Mikron HPM 600U HPM 800U.
- MÜLLER, P.; SOTO, M. Usinagem sem refrigeração de furos e roscas, Santa Barbara do Oeste, 1999.
- OTKUR, M.; LAZOGLU, I. Trochoidal Milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007.
- POLLI, M. L.; Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades de Corte. 2005, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – UFSC, Florianópolis, SC.
- RODRIGUES, A. R. Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte, 2005, Tese de doutorado Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- SANDVIK. Technical Guide: Turning, Milling, Drilling, Boring, Tool Holding. 2011.

- SANTOS, S.C.; SALES, W.F. Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais, 1 ed. Ed. Artliber Ltda. São Paulo, 2007.
- SCHÜTZER, K.; SCHULZ, H. Histórico da usinagem com altíssima velocidade até os dias atuais. Usinagem em altíssimas velocidades: como conceitos HSN/HSC podem revolucionar a indústria metal mecânica, São Paulo, 2 Ed., 2003.
- SECO, Web Catalog, <https://www.secotools.com>. 2017.
- SILVA, L. R., Estudo da geometria da aresta de corte de ferramentas aplicadas ao torneamento de superligas à base de níquel com alta velocidade de corte. 2002, Tese de doutorado Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- STEMMER, C. E. Ferramentas de corte II. 2. Ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.
- TSCHÄTSCH, H. Applied Machining Technology, Ed. Springer, 2009.
- WIDIA, Solid Carbide End Mills High-Speed Trochoidal Milling, 2014.