

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

BRUNO D'AVILA GRUNER

ANALISE DO DESGASTE E RUGOSIDADE NO FRESAMENTO DURO EM
SUPERFÍCIE INCLINADA, COM FERRAMENTA DE TOPO ESFÉRICA

JARAGUÁ DO SUL

NOVEMBRO, 2018

BRUNO D'AVILA GRUNER

ANALISE DO DESGASTE E RUGOSIDADE NO FRESAMENTO DURO EM
SUPERFÍCIE INCLINADA, COM FERRAMENTA DE TOPO ESFÉRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Campus Jaraguá do Sul – Rau, do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Prof. Cristiano Da Silva, Me.

Coorientador: Prof. Giovani Conrado Carlini, Me.

JARAGUÁ DO SUL

NOVEMBRO, 2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Gruner, Bruno D'avila

**ANALISE DO DESGASTE E RUGOSIDADE NO FRESAMENTO DURO
EM SUPERFÍCIE INCLINADA, COM FERRAMENTA DE TOPO ESFÉRICA /**

Bruno D'avila Gruner ; orientação de Cristiano da
Silva; coorientação de Giovani Conrado Carlini. -
Jaraguá do Sul, SC, 2018.

52 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -

Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .

Inclui Referências.

1. Fresamento. 2. Parâmetros de corte. 3. Rugosidade.

4. Desgaste de flanco. 5. Inclinação da superfície.

I. Silva, Cristiano da. II. Carlini, Giovani Conrado.

III. Instituto Federal de Santa Catarina. . IV.

Título.

BRUNO D' AVILA GRUNER

ANÁLISE DO DESGASTE E RUGOSIDADE NO FRESAMENTO DURO EM
SUPERFÍCIE INCLINADA COM FERRAMENTA DE TOPO ESFÉRICA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo
indicada.

Jaraguá do Sul, 28 de novembro de 2018



Prof. Me. Cristiano da Silva

Orientador

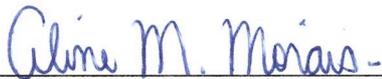
IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU



Prof. Me. Giovanni Conrado Carlini

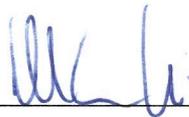
Coorientador

IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Profa. Me. Aline Medeiros Moraes

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU



Prof. Me. Delcio Luís Demarchi

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU

AGRADECIMENTOS

Aos professores que me auxiliaram durante toda a caminhada nesta formação, em especial aos professores Giovani Carlini e Cristiano da Silva pela orientação e dedicação durante este trabalho de conclusão.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) campus Rau Jaraguá do Sul, pela disponibilidade dos equipamentos para realização dos ensaios.

A Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), pela disponibilidade dos equipamentos para realização do EDS.

A toda minha família, em especial a meus pais e minha esposa por me apoiarem e me incentivarem durante todo processo de graduação.

RESUMO

Fica claro em vários estudos que a qualidade dos produtos fabricados depende diretamente da ferramenta utilizada, com isso, este trabalho tem como objetivo principal a busca por melhorias no processo de fabricação de moldes e matrizes através dos estudos dos parâmetros de corte utilizados no processo de fresamento. O foco nesta pesquisa é a variação dos parâmetros de avanço por aresta e inclinação de superfície, analisando a rugosidade gerada na superfície e desgaste na ferramenta. Segundo os experimentos realizados por Wojciechowski et. al. (2017) com uma $V_c = 375$ m/min e ângulo de inclinação de superfície $\alpha = 15^\circ$ pode-se reduzir as deflexões da ferramenta e o tempo de corte, com base nestes dados, realizou-se ensaios variando os parâmetros em busca da mínima rugosidade média. Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem ROMI D600 com uma fresa esférica de metal duro com diâmetro de 8 milímetros e cobertura NACO, em corpos de prova de Aço AISI D6 temperados e fixados com inclinação de 15° e 45° . Após a realização do fresamento dos corpos de prova, foram realizados ensaios de medição da rugosidade do corpo de prova, análise do desgaste de flanco e composição química da ferramenta via EDS. Os resultados alcançados tratam principalmente da influência do avanço na rugosidade da superfície e na integridade da ferramenta de corte, onde o maior avanço resultou em maiores rugosidades médias e mais avarias na forma de lascamento nas fresas. Houve desgaste de flanco em todas as fresas utilizadas, devido a baixa usinabilidade e elevada dureza do material. Pode-se concluir que a velocidade de avanço é extremamente influente no acabamento da superfície, porém, outros fatores como: velocidade de corte; ferramenta utilizada e rigidez da máquina, também possuem influência direta no processo de fresamento.

Palavras-Chave: Fresamento; Parâmetros de corte; Rugosidade; Desgaste de flanco; Inclinação da superfície.

ABSTRACT

It is clear in several studies that the quality of the manufactured products depends directly on the tool used, with this, the main objective of this work is the search for improvements in the manufacturing molds and dies process through the studies of the cutting parameters used in the milling process. The focus in this research is the variation of the parameters of advance by edge and surface slope, analyzing the surface roughness and wear on the tool. According to the experiments carried by Wojciechowski et. al. (2017) with a cutting Speed of 375 m/min and surface slope angle of 15° it is possible to reduce the deflections of the tool and the cutting time, based on these data, tests were performed varying the parameters in search of the minimum average roughness. The tests were carried out in a ROMI D600 machining center with ball nose end mill of solid carbide and NACO coating in tempered AISI D6 steel inclined at 15° and 45°. After the milling of the workpieces, measurements were made of surface roughness, flank wear analysis and chemical composition of the tool through EDS. The obtained results mainly deal with the influence of the advance on the surface roughness and the cutting tool integrity, whose the greater advance resulted in bigger average roughness and more damages in the end mills. There was flank wear in all mills used, due to low machinability and high material hardness. It can be concluded that the relation between the speed of advance is extremely influent, however, other factors, such as: Speed of cut; used tool and stiffness of the machine, also have a direct influence on the milling process.

Keywords: Milling; Cut Parameters; Roughness; Flank Wear; Surface slope.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fresas de topo reto e fresa esférica.....	16
Figura 2 - Aplicações das fresas de metal duro reto e esférico	16
Figura 3 - Formação dos cavacos	18
Figura 4 - Influência dos parâmetros de corte na forma do cavaco.....	19
Figura 5 - Desgaste de flanco	20
Figura 6 - Rugosidade e ondulação	22
Figura 7 - Rugosidade média (Ra)	23
Figura 8 - Fluxograma de desenvolvimento	26
Figura 9 - Diâmetro efetivo de corte	28
Figura 10 - Suporte de fixação	30
Figura 11 - Programação da usinagem em EdgeCam	31
Figura 12 - Referenciamento da peça	32
Figura 13 – Medição de rugosidade	34
Figura 14 – Desgaste de flanco inclinação de 15° com fz de 0,10 mm/z	38
Figura 15 – Lascamento na inclinação de 45° com avanço 0,05 mm/z.....	39
Figura 16 – EDS na fresa das amostras 6 e 12 com avanço de 0,10 mm/z.....	40
Figura 17 – EDS na fresa das amostras 3 e 9.....	41
Figura 18 – Cavacos do ensaio 2.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cálculo do raio e diâmetro efetivo.....	27
Tabela 2 - Parâmetros de corte para o ensaio.....	29
Tabela 3 - Composição do Aço AISI D6.....	33
Tabela 4 – Rugosidade avaliada	35
Tabela 5 – Mecanismos de desgaste	37
Tabela 6 – Desgaste de flanco	38
Tabela 7 – Resultados do EDS na fresa das amostras 3 e 9	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

EDS – Espectroscopia de raio-X por dispersão de energia (energy dispersive spectrometer)

HRC – Dureza Rockwell classe C (Hardness Rockwell C)

HSM – Usinagem em altas velocidades (High Speed Machining)

mm – Milímetros

PVD – Deposição física a vapor (Physical Vapor Deposition)

rpm – Rotações por minuto

UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

a_e – Largura de corte

a_p – Profundidade de corte

f_z – Avanço por aresta de corte

mm/z – Milímetros por aresta

v_c – Velocidade de corte

v_f – Velocidade de avanço

z – Número de arestas da ferramenta

α – Ângulo de inclinação da superfície

μm – Milésimo de milímetro ou micrometro

TiN – Nitreto de Titânio

AlTiN – Nitreto de titânio e alumínio

SiN – Nitreto de Silício

Ra – Rugosidade Média

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
2 DESENVOLVIMENTO.....	15
2.1 Revisão de literatura	15
2.1.1 Processo de fresamento.....	15
2.1.2 Ferramentas de corte para fresamento	15
2.1.2.1 Materiais para ferramentas de corte.....	17
2.1.3 Formação de cavaco	18
2.1.3.1 Tipos de cavacos.....	18
2.1.4 Critério de vida útil da ferramenta	19
2.1.5 Desgastes de flanco – VB	20
2.1.6 Forças de corte	20
2.1.7 Acabamento superficial	21
2.1.8 Usinabilidade dos materiais.....	24
2.1.9 Aços ferramenta	25
3 METODOLOGIA.....	26
3.1 Processo experimental.....	26
3.2 Materiais Utilizados	32
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	35
4.1 Acabamento da superfície	35
4.2 Mecanismos de desgaste.....	36
4.3 EDS.....	40
4.4 Cavacos	42
5 CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS.....	46
APÊNDICE A – Desenho técnico do suporte dos corpos de prova	49
APÊNDICE B – EDS na fresa 2C.....	50

1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos de fabricação mecânica, a usinagem é um dos mais utilizados, e o estudo e aprimoramento desse processo é fundamental. Estudos mais aprofundados iniciaram na revolução industrial e prosseguem cada vez mais nas indústrias em todo o mundo, onde os processos de fabricação representam cerca de um terço da economia dos países industrializados.

O fresamento é um dos processos mais importantes na área de usinagem, conhecido pela sua versatilidade, grande capacidade de remoção de cavaco e possibilidade de diversos formatos e tamanhos de peças produzidas. Durante a fabricação de moldes e matrizes, o processo de usinagem é um dos processos de maior importância, além de ser responsável por cerca de 65% dos custos de fabricação dos moldes, segundo Oliveira e Diniz (2009).

Devido ao fato de que os materiais para fabricação de moldes necessitam de características como dureza e resistência ao desgaste, esses materiais possuem baixa usinabilidade, ou seja, são materiais difíceis de usinar, onde as ferramentas de corte chegam rapidamente ao fim da vida útil, com pouca remoção de material.

Nesta pesquisa, o foco principal é o estudo da influência dos parâmetros de corte, no acabamento superficial durante o processo de fresamento em Aço AISI D6 temperado, um dos aços mais utilizados na fabricação de matrizes de corte e alguns tipos de ferramentas de estampo, utilizando fresas de topo de metal duro.

Uma superfície com altos valores de Ra (rugosidade média) requer um aumento do tempo de polimento manual e pode provocar erros de forma. O acabamento manual em superfícies usinadas é necessário para obter uma boa rugosidade superficial e melhora na qualidade do produto (ARRUDA et. al., 2013).

Segundo Santos et. al. (2003), a tecnologia HSM (high speed machining) se torna muito útil no processo de fabricação de moldes e matrizes, devido à alta qualidade superficial gerada durante o processo de usinagem, diminuindo ou até em alguns casos eliminando o processo de acabamento manual através de polimento, diminuindo a cadeia de processo e reduzindo os custos e tempo de produção. Arruda et. al. (2013) citam que a qualidade superficial de um produto injetado depende muito da rugosidade da superfície do seu molde. Com isso se torna necessário o

conhecimento das capacidades das máquinas e ferramentas para se obter o acabamento desejável.

Ficam claro nos estudos de acabamento superficial que são vários os fatores que influenciam neste aspecto, mas qual a influência dos parâmetros de corte utilizados nesse processo? Que fatores deve-se levar em consideração na hora de determinar estes parâmetros? E quais são os fatores influentes na geometria da superfície usinada? Conhecendo melhor os parâmetros adequados para este processo de usinagem pode-se otimizar a capacidade das ferramentas de corte buscando minimizar os custos e os tempos de fabricação melhorando a qualidade do produto final e aumentando os lucros.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a influência dos parâmetros de corte e da inclinação da superfície no acabamento superficial no processo de fresamento com fresa esférica de metal duro revestido na usinagem do aço AISI D6.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar a relação entre a velocidade de avanço da ferramenta de corte com a rugosidade superficial gerada na peça usinada;
- Analisar o desgaste de flanco produzido na superfície de saída da ferramenta;
- Avaliar a aresta de corte da ferramenta analisando possíveis adesões do material da peça e lascas ou trincas na ferramenta;
- Analisar o cavaco gerado no processo de usinagem relacionando com os parâmetros utilizados em cada ensaio.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão de literatura

2.1.1 Processo de fresamento

Entre os processos de fabricação mais conhecidos e utilizados atualmente, o processo de fresamento apresenta-se como um dos mais importantes, devido a grande variedade de tipos de peças que podem ser produzidas, agilidade no processo de usinagem e alta taxa de remoção de material. Dentro deste processo, a fabricação de moldes de injeção plástica se destaca, pois, a quantidade de peças fabricadas por esse tipo de processo gera uma demanda enorme quando comparado com alguns outros tipos de processos de fabricação.

Segundo Diniz (2000) o processo de fresamento se caracteriza pela ferramenta utilizada que é chamada de fresa, pelo movimento de corte resultante da rotação da fresa ao redor de seu eixo e pelo movimento de avanço que é realizado pela peça que está sendo usinada fixa na mesa da máquina. Resumindo, o fresamento é um processo mecânico de usinagem destinado à produção de qualquer superfície, onde a remoção de material é feita pela rotação de uma ferramenta multicortante, sendo que cada aresta de corte remove uma pequena quantidade de material por revolução e o fator limitante para fabricação das peças é o tipo de máquina que será utilizado. (FERRARESI, 1977).

2.1.2 Ferramentas de corte para fresamento

As ferramentas utilizadas no processo de fresamento são chamadas de fresas, essas são ferramentas rotativas com várias arestas de corte e podem ser divididas em dois grupos, fresas inteiriças e fresas com insertos intercambiáveis.

As ferramentas inteiriças são formadas por apenas um corpo, geralmente formada toda do mesmo material. Estas ferramentas podem ser encontradas em diversas formas, sendo que umas das formas mais comuns na usinagem de cavidades

são as fresas de topo reto e as fresas esféricas contendo no mínimo duas arestas cortantes, essas fresas são mostradas na figura 1. As fresas de topo reto e esféricas cortam tanto na sua periferia como na sua face frontal e podem ter corte a esquerda ou à direita. São utilizadas para faceamento, rebaixos, matrizes, contornos, canais e diversos perfis. (STREMMER, 1995).

Figura 1 - Fresas de topo reto e fresa esférica



Fonte: WT Ferramentas (2018)

Estas fresas são muito utilizadas devido a sua versatilidade, ou seja, a possibilidade de usinagem de diversas geometrias, dependendo do tipo de máquina utilizada. A figura 2 mostra algumas aplicações de alguns tipos de fresas de topo reto e fresas esféricas. Sendo elas, diversos formatos de cavidades e fresamento tangencial

Figura 2 - Aplicações das fresas de metal duro reto e esférico



Fonte: Sandvik (2018)

2.1.2.1 Materiais para ferramentas de corte

Maior dureza, resistência ao desgaste e tenacidade são algumas das propriedades mais procuradas em ferramentas de corte. Porém, existem outras diversas propriedades desejadas, mas é complicado reunir todas elas em uma única ferramenta. Diante disto, se torna necessário o estudo do processo em que a mesma será aplicada para determinar quais as propriedades essenciais esta ferramenta deve possuir.

Para MACHADO et. al. (2011), as propriedades principais das ferramentas de corte podem ser listadas assim:

- Alta dureza;
- Tenacidade suficiente para evitar falhas por fratura;
- Alta resistência ao desgaste abrasivo, à compressão, ao impacto, ao choque térmico e ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas em altas temperaturas de trabalho;
- Ser inerte quimicamente.

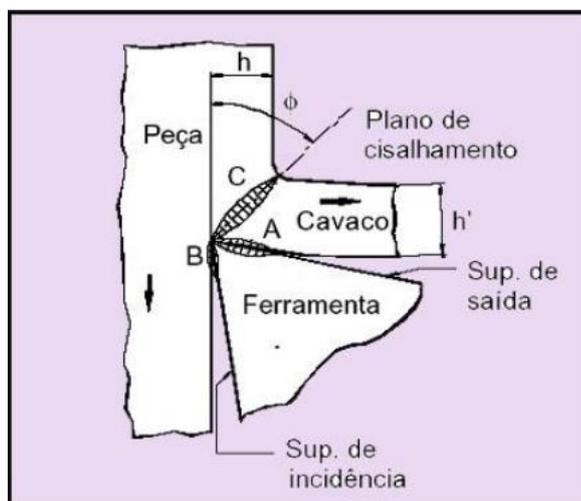
Segundo Diniz (2000) para definir o material correto é preciso saber alguns fatores como:

- O material que será usinado: devem ser consideradas as propriedades do material e o tipo de cavaco ideal para o processo;
- As condições da máquina: potência, estado de conservação, folga e vibrações envolvidas;
- Custo do material da ferramenta: ter uma ferramenta com boas propriedades físicas e mecânicas nem sempre é totalmente favorável, dependendo da ocasião pode-se utilizar uma ferramenta mais simples e barata;
- Os tipos de movimentos e os parâmetros de corte utilizados;
- O processo de usinagem em questão.

2.1.3 Formação de cavaco

Ferraresi (1977) descreve que o cavaco é formado durante a usinagem pela penetração da ferramenta, onde parte do material da peça é forçada sobre a superfície da ferramenta, é quando acontece a ruptura por cisalhamento, ou seja, há uma formação de uma trinca que se propaga caracterizando a ruptura. Devido ao movimento relativo entre ferramenta e peça, acontece o escorregamento do material deformado e rompido sobre a superfície de saída da ferramenta. A figura 3 apresenta uma ilustração do processo de formação de cavaco.

Figura 3 - Formação dos cavacos



Fonte: Moldes injeção plásticos (2018)

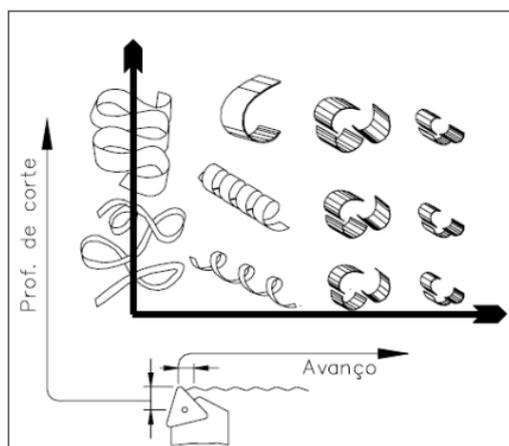
2.1.3.1 Tipos de cavacos

Para Machado et. al. (2011) os tipos de cavaco podem ser classificados em cavaco contínuo, descontínuo e segmentados. A formação dos cavacos contínuos depende muito da ductilidade do material e dos parâmetros de corte utilizados no processo, este tipo de cavaco é comum na usinagem de materiais como o alumínio e sempre que possível deve ser evitado, pois podem causar acidentes com o operador e danificar a superfície da peça usinada.

Os cavacos descontínuos são mais comuns na usinagem de materiais como o ferro fundido que não são capazes de suportar grandes deformações sem quebrar. Esse tipo de cavaco é produzido em processos que são utilizadas baixas velocidades

de corte, ângulos de saída pequenos e grandes avanços. Já os cavacos segmentados se caracterizam por grandes deformações continuadas, o acabamento superficial é ruim devido a grandes variações de corte e fortes vibrações. (MACHADO et. al., 2011). A figura 4 mostra a influência da profundidade de corte e velocidade de avanço na forma do cavaco.

Figura 4 - Influência dos parâmetros de corte na forma do cavaco



Fonte: Geocities (2012)

2.1.4 Critério de vida útil da ferramenta

Uma definição de vida útil da ferramenta é o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, até que se atinja um critério de fim de vida previamente determinado, podendo ser este critério acabamento superficial alcançado, potência de corte gerada, desgaste da ferramenta, entre outros. Os fatores para definir o fim da vida de uma ferramenta podem ser o tempo de usinagem efetiva, o volume de material removido, o número de peças fabricadas ou até o percurso de avanço. (KRATOCHVIL, 2004).

Para Machado et. al. (2011), a velocidade de corte é o parâmetro de maior influência no desgaste de uma ferramenta de corte, sendo este parâmetro responsável pelo aumento da temperatura de usinagem na região da formação de cavaco, este aumento da temperatura é responsável por ativar ou até acelerar o desgaste das ferramentas determinando o fim da vida útil das mesmas.

2.1.5 Desgastes de flanco – VB

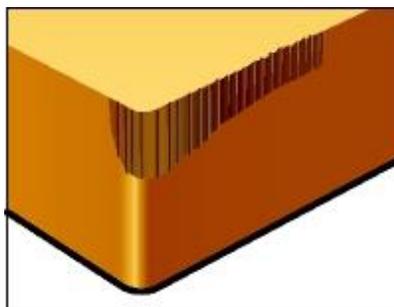
Segundo Rathod (2017) o desgaste das ferramentas durante o processo de usinagem é um fenômeno utilizado para avaliar o desempenho da ferramenta na maioria dos processos, devido a influência direta do desgaste na vida útil da ferramenta, no acabamento superficial, na precisão, na força de corte e nos custos.

O desgaste de flanco é aquele causado pelo contato entre ferramenta e peça, o mesmo também é conhecido como desgaste frontal pois acontece na aresta de corte da ferramenta juntamente com os ângulos de folga da ferramenta. É o tipo de desgaste mais comum, encontrado em todos os processos com geometria definida. Este desgaste modifica a geometria da aresta de corte, por isso está ligado diretamente ao acabamento e a precisão da superfície usinada.

Rathod (2017) comenta que é difícil saber exatamente como o desgaste foi gerado, pois depende de vários fatores, tais como, material da peça e da ferramenta, parâmetros de corte, temperatura, condições da máquina, entre outros.

No geral, o desgaste de flanco é gerado através do mecanismo de desgaste conhecido como abrasão, ou seja, ele é gerado pelo atrito entre a superfície da peça com a superfície de folga da ferramenta, partindo desde a aresta de corte. A figura 5 mostra a visualização do desgaste de flanco na superfície de folga da ferramenta.

Figura 5 - Desgaste de flanco



Fonte: Sandvik (2018)

2.1.6 Forças de corte

As forças de corte envolvidas nos processos de usinagem são fenômenos gerados a partir da resistência ao corte do material, gerando uma ação da peça nas

ferramentas.

Segundo Wojciechowski et. al. (2017), um fator chave nos processos de usinagem é a força de corte e os seus componentes. Os valores excessivos das forças envolvidas durante o corte são indesejáveis na usinagem, pois podem gerar deflexão nas ferramentas induzindo à erros dimensionais e geométricos e influenciando no acabamento superficial, porém, dificilmente consegue-se diminuir estas forças a zero.

As forças de corte envolvidas no processo de fresamento influenciam diretamente no acabamento superficial, na geometria da peça usinada e na eficiência do processo, além disso, a inclinação da superfície usinada é um dos fatores influentes nas forças de corte geradas. (WOJCIECHOWSKI et. al., 2017)

Em seus resultados, Wojciechowski et. al. (2017), citou-se que no intervalo: $15^\circ < \alpha \leq 60^\circ$ a influência do ângulo de inclinação da superfície usinada na força de corte é baixa. Concluiu-se também que com uma velocidade de corte $v_c = 375$ m/min e ângulo de inclinação de superfície $\alpha = 15^\circ$ pode-se reduzir as deflexões da ferramenta e o tempo de corte.

Além dos problemas provocados na peça de trabalho, altos valores de forças de corte podem danificar a ferramenta, sendo grande responsável por gerar alguns mecanismos de desgastes, avarias e diminuindo a vida útil da mesma.

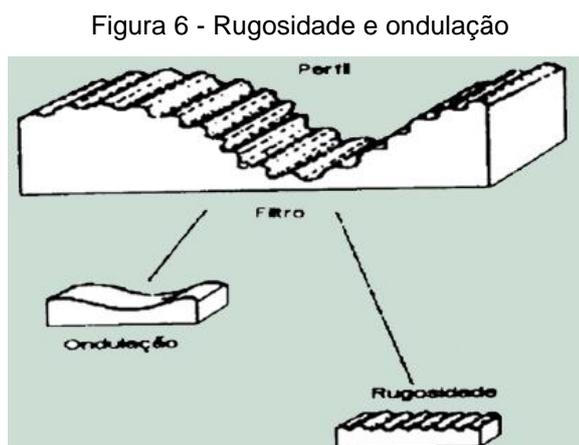
2.1.7 Acabamento superficial

Uma superfície gerada por um processo de usinagem sofre diversas alterações durante o corte, são elas, deformações plásticas, rupturas, recuperação elástica, vibrações, temperaturas elevadas, tensões residuais e em alguns casos pode acontecer também reações químicas.

O acabamento superficial pode ser considerado como combinação de três fatores: ondulações, falhas e rugosidade. Estes fatores devem ser observados com alguns cuidados, pois nem sempre o melhor acabamento superficial é o mais plano e o mais liso possível, uma superfície que deve se manter lubrificada por exemplo, não deve ser muito plana e pouco rugosa, pois a lubrificação irá escorrer, ou um disco de freio, que não pode ter uma rugosidade muito baixa devido a necessidade de atrito.

Detalhes estes que devem ser previstos no projeto. No geral, acabamento superficial deve ser considerado como as condições ideais para o funcionamento da superfície em questão. (MACHADO et. al., 2011)

Para Machado et. al. (2011) a rugosidade de uma superfície pode ser considerada como um conjunto de irregularidades finas ou erros micrométricos resultantes da ação de arrancamento de material e do processo de corte. Este parâmetro é um dos mais estudados quando o assunto é qualidade superficial, pois é utilizado como parâmetro na qualidade da peça usinada. No geral, ondulações e falhas são geradas por erros de fabricação, erros geométricos, já a rugosidade é um aspecto micro geométrico é gerado pela ação inerente do processo de corte. A figura 6, mostra simbolicamente a diferença entre rugosidade e ondulação.



Fonte: Moldes injeção plásticos (2018)

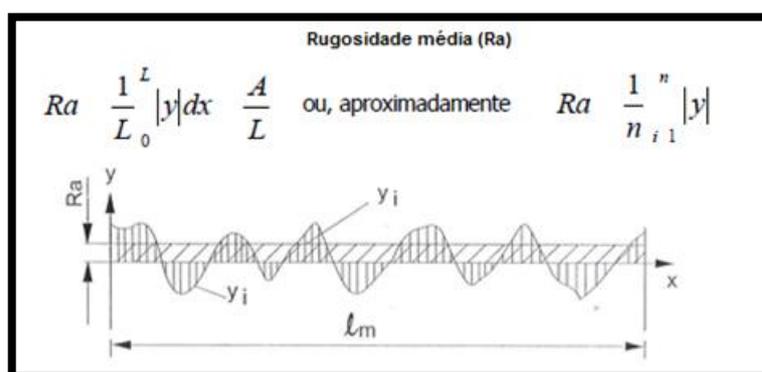
Existem diversos parâmetros de rugosidade, diferentes organizações utilizam normas técnicas para medição dos parâmetros de rugosidade. A ABNT NBR ISO 4287 (2002) normatiza os parâmetros e a quantificação da rugosidade no Brasil. O parâmetro mais comum é a rugosidade média, conhecida como Ra. Esta rugosidade trata de uma média aritmética dos afastamentos do perfil em relação com a linha média sendo medida em milésimos de milímetro (μm), a figura 8 mostra a representação da Ra no gráfico de rugosidade.

Este parâmetro se torna um dos mais utilizados devido a aplicação em diversos componentes, a maioria dos rugosímetros podem medir este parâmetro e em alguns casos riscos não alteram o valor, porém isto também pode ser uma desvantagem, pois

por ser uma média, acaba ocultando alguns picos ou vales mais profundos e várias geometrias diferentes podem alcançar a mesma média, sendo outra desvantagem deste parâmetro.

Para realizar o procedimento de medição da rugosidade deve-se utilizar um rugosímetro, este instrumento possui uma agulha apalpadora que entra em contato com a superfície a ser medida, esta agulha percorre uma distância conhecida como comprimento de amostragem, esta agulha transmite sinais em forma de pulsos elétricos para um amplificador conforme os picos e vales encontrados na superfície, este amplificador calcula a rugosidade conforme o parâmetro escolhido.

Figura 7 - Rugosidade média (Ra)



Fonte: Moldes de injeção plásticos (2018)

São vários os aspectos que influenciam no acabamento das peças, os mais influentes são: a geometria e as propriedades das ferramentas, o material da peça a ser usinada e os parâmetros de corte utilizados durante o processo de usinagem. A rugosidade das superfícies usinadas é gerada por duas causas: as marcas de avanço, decorrentes da ferramenta e em alguns casos a aresta postiça de corte gerada durante o processo de usinagem. (AGUIAR, DINIZ E PEDERIVA, 2013)

A velocidade é um parâmetro muito influente e depende do material da ferramenta e da peça a ser usinada. Geralmente o acabamento superficial melhora com o aumento da velocidade de corte, esta melhora é rápida até certa velocidade, isso também varia de acordo com o ângulo de saída e as dimensões do cavaco. Outros parâmetros muito influentes são as dimensões de corte que são: a profundidade de corte e o avanço utilizado durante o processo. Um corte com muita profundidade gera mau acabamento, mas em alguns casos pouca profundidade não

é favorável. Já o avanço tem um efeito mais significativo do que a profundidade de corte.

Segundo Aguiar, Diniz e Pederiva (2013), as forças de corte influenciam diretamente na precisão dimensional e no acabamento superficial das peças fresadas. Essas forças são influenciadas por diversos fatores, tais como, geometria da ferramenta utilizada, propriedades do material usinado, condições variadas de corte, estratégia de corte, etc.

A velocidade de corte é um parâmetro relacionado às condições de corte que tem grande influência nas forças geradas, alguns estudos mostram que maiores velocidades de corte diminuem as forças de corte, devido a esse fator, a tecnologia HSM é muito utilizada para fabricação de moldes e matrizes. Além do fator de diminuição das forças de corte, outros parâmetros importantes tornam esse processo muito útil no processo de acabamento, gerando superfícies favoráveis. O uso da tecnologia HSM permite a melhoria da rugosidade superficial devido ao deslocamento preciso, rápida remoção, baixas temperaturas e baixo esforço de corte. (ARRUDA et. al., 2013).

2.1.8 Usinabilidade dos materiais

Segundo Wang e Liu (2015), os aços endurecidos têm sido cada vez mais utilizados em várias áreas de engenharia devido a sua alta resistência, alta dureza e boa resistência ao desgaste. No entanto, eles geralmente são considerados difíceis de usinar em comparação com aços carbono comuns e aços de baixa liga, que atribui aos vários fatores como pouca plasticidade e baixa condutividade térmica dos aços endurecidos.

A alta dureza desses materiais contribui para o grande aumento da força de corte e do atrito entre cavaco e ferramenta. Além disso, a baixa condutividade térmica do material eleva ainda mais a temperatura de corte, o que aumenta os desgastes e a falha da ferramenta, tais como desgaste adesivo, desgaste de oxidação, difusão e fraturas.

Outro fator que contribui para a diminuição da usinabilidade é a dureza, aços endurecidos são conhecidos por ter uma dificuldade de usinagem por serem materiais

geralmente com dureza entre 50 e 65 HRC. Devido à resistência ao desgaste e alta dureza, estes materiais têm sido amplamente utilizados para fabricação de moldes, matrizes e diversos componentes básicos.

Quando aços endurecidos são submetidos à fresamento HSM cavacos fragmentados e o fenômeno de endurecimento tem um efeito significativo nas ferramentas. A força de corte, energia de corte e a temperatura de corte aumentam significativamente e a tensão na região da ponta da ferramenta é concentrada, que causa na ferramenta desgaste e falha prematura. (WANG et. al., 2015)

2.1.9 Aços ferramenta

Segundo Oliveira e Diniz (2009), uma numerosa quantidade de indústrias depende da fabricação de suas peças a partir de processos como injeção plástica, forjamento, metalurgia do pó, fundição, trefilação, entre outros. As ferramentas utilizadas nestes processos são aços de médio teor de carbono com alguns elementos de liga, sendo os principais, Molibdênio, Tungstênio, Cromo, Níquel e Vanádio.

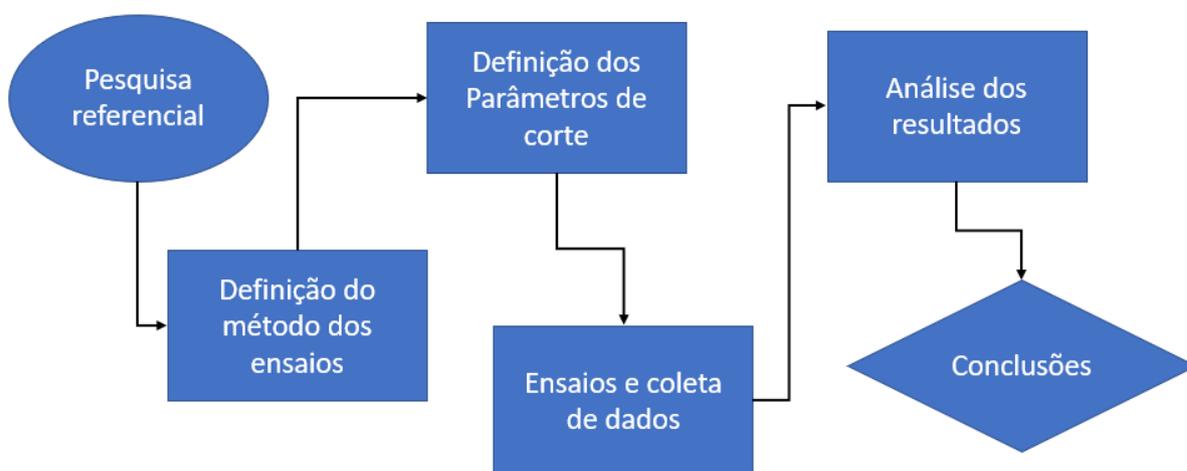
As principais aplicações destes materiais são na fabricação de ferramentas, conhecidas como moldes e matrizes, os componentes destas ferramentas possuem geometrias complexas e devem ser fabricados em materiais de dureza elevada, além de passar por processos de tratamento térmico. Quando tratamos de moldes e matrizes a qualidade do produto fabricado está diretamente ligado a qualidade da fabricação da ferramenta, não só em questão de acabamento, mas também geometricamente.

Os aços ferramenta possuem características como, elevada dureza, resistência a abrasão, tenacidade considerável e em alguns casos, mantem suas propriedades em temperaturas elevadas. Características estas, tornam estes aços especiais, porém, juntamente com estas propriedades, a usinabilidade destes materiais é baixa, tornando-os materiais de difícil usinagem. Como o processo de usinagem é um dos processos mais utilizados para fabricação de ferramentas de aço ferramenta, se torna imprescindível os estudos aprofundados com o intuito de tornar a usinagem cada vez mais produtiva. (MACHADO et. al., 2011)

3 METODOLOGIA

A Figura 8 apresenta a metodologia utilizada para a realização deste trabalho. Este capítulo apresenta os materiais e os métodos utilizados nos ensaios realizados, a partir da pesquisa.

Figura 8 - Fluxograma de desenvolvimento



Fonte: O Autor

3.1 Processo experimental

A metodologia deste trabalho foi elaborada a partir dos experimentos realizados por Wojciechowski et. al. (2017), onde realizaram experimentos com fresa esférica em aço liga 55NiCrMoV6, em um aço utilizado para moldes e matrizes.

O objetivo de seu trabalho foi a otimização dos parâmetros de corte durante o acabamento em aço liga 55NiCrMoV6, utilizando fresas esféricas e variando a inclinação da superfícies visando a diminuição das forças de corte.

A partir desses dados apontados no experimento de Wojciechowski et. al. (2017), define-se os ângulos de inclinação de trabalho de 15° e 45° e o material dos corpos de prova de Aço AISI D6, com estas informações pode-se definir todos os parâmetros necessários para realizar a usinagem experimental nesta pesquisa,

conforme tabela 2 com os parâmetros utilizados.

A velocidade de avanço (v_f) é calculada pela equação 1 e os valores de avanço por aresta são 0,05 mm/z e 0,10 mm/z, seguindo os valores utilizados pelo autor citado.

$$v_f = f_z \times n \times z \quad (1)$$

onde:

v_f = velocidade de avanço (mm/min);

f_z = avanço por aresta de corte (mm);

n = rotação (RPM);

z = número de arestas da fresa

Devido ao processo de usinagem com as inclinações de 15° e 45°, deve-se utilizar como parâmetro a velocidade de corte efetiva, que é a velocidade de corte no diâmetro efetivo de corte, ou seja, o diâmetro que se forma no ponto em que a ferramenta está em contato com a peça. Podemos calcular o raio do diâmetro efetivo através da equação 2, os resultados do cálculo de raio e diâmetro efetivo estão apresentados na tabela 1.

$$\sin \alpha = \frac{\text{cat. oposto}}{\text{raio}} \quad (2)$$

onde:

α = ângulo de inclinação da superfície;

cat. oposto = raio efetivo;

raio = raio da fresa;

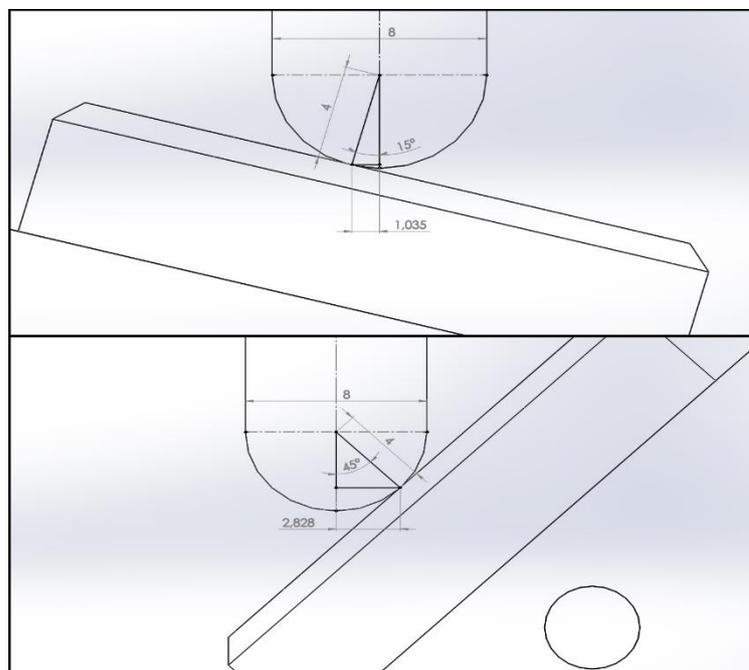
Tabela 1 – Cálculo do raio e diâmetro efetivo

Ângulo	Raio efetivo (mm)	Diâmetro efetivo (mm)
15°	1,035	2,07
45°	2,828	5,656

Fonte: O autor

A figura 9 mostra a representação do diâmetro efetivo.

Figura 9 - Diâmetro efetivo de corte



Fonte: O Autor

Entre as conclusões de Wojciechowski et. al. (2017), a velocidade de corte onde se tem mínima força de corte é 375 m/min, essa velocidade só pode ser alcançada em máquinas High Speed Machining para diâmetros efetivos pequenos, neste caso a velocidade de corte efetiva máxima para os ensaios se limitam em 48 m/min conforme equação 3, devido ao limite de rotação do centro de usinagem utilizado de 7500 rpm.

$$V_c = \frac{\pi d_x n}{1000} \quad (3)$$

onde:

V_c = velocidade de corte em (m/min);

d = diâmetro efetivo de corte;

n = rotação (RPM);

Tabela 2 - Parâmetros de corte para o ensaio

<i>Ensaio</i>	<i>Amostra (Fresa)</i>	<i>Ângulo</i>	<i>v_c efetiva (m/min)</i>	<i>Rotação (rpm)</i>	<i>a_p (mm)</i>	<i>f_z (mm/z)</i>	<i>v_f (mm/min)</i>	<i>a_e (mm)</i>
1	1	15	48	7500	0,1	0,05	750	0,1
	2	15	48	7500	0,1	0,05	750	0,1
	3	15	48	7500	0,1	0,05	750	0,1
2	4	15	48	7500	0,1	0,1	1500	0,1
	5	15	48	7500	0,1	0,1	1500	0,1
	6	15	48	7500	0,1	0,1	1500	0,1
3	1	45	48	2746	0,1	0,05	275	0,1
	2	45	48	2746	0,1	0,05	275	0,1
	3	45	48	2746	0,1	0,05	275	0,1
4	4	45	48	2746	0,1	0,1	549	0,1
	5	45	48	2746	0,1	0,1	549	0,1
	6	45	48	2746	0,1	0,1	549	0,1

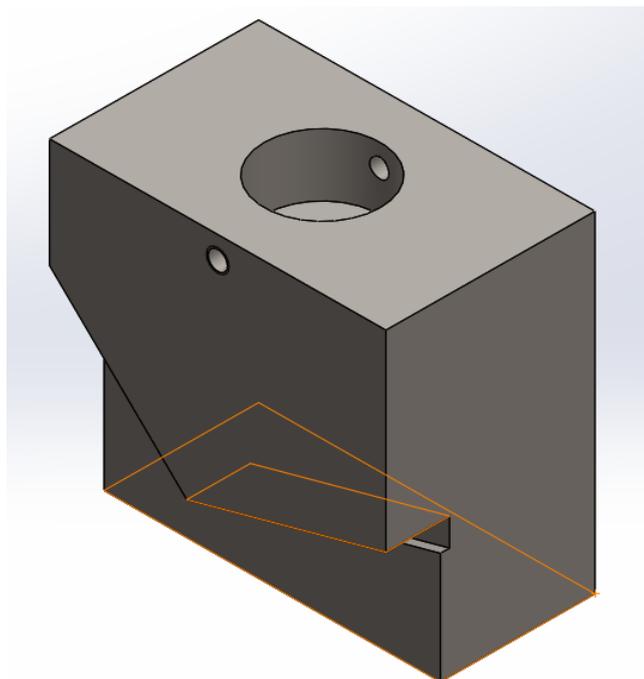
Fonte: O Autor

São realizados 4 ensaios diferentes variando o ângulo de inclinação e a velocidade de avanço, para cada ensaio é realizado 3 amostras com três fresas diferentes. Cada fresa é utilizada para um ensaio em 15° e um ensaio em 45°, portanto, um total de 6 fresas.

Após a determinação de todos os parâmetros realizou-se o procedimento experimental de usinagem. Sendo necessário o desenvolvimento e fabricação de um dispositivo que permita a fixação dos corpos de prova nas inclinações definidas para a realização da usinagem, a figura 10 mostra o dispositivo utilizado em perspectiva e o apêndice A mostra o desenho técnico do suporte, sendo dispositivo único para a fixação nas duas inclinações.

O dispositivo foi projetado devido a necessidade de repetição dos ensaios com vários corpos de prova com mesma geometria e também para garantir o ângulo de inclinação da superfície mantendo a mesma referência para a usinagem.

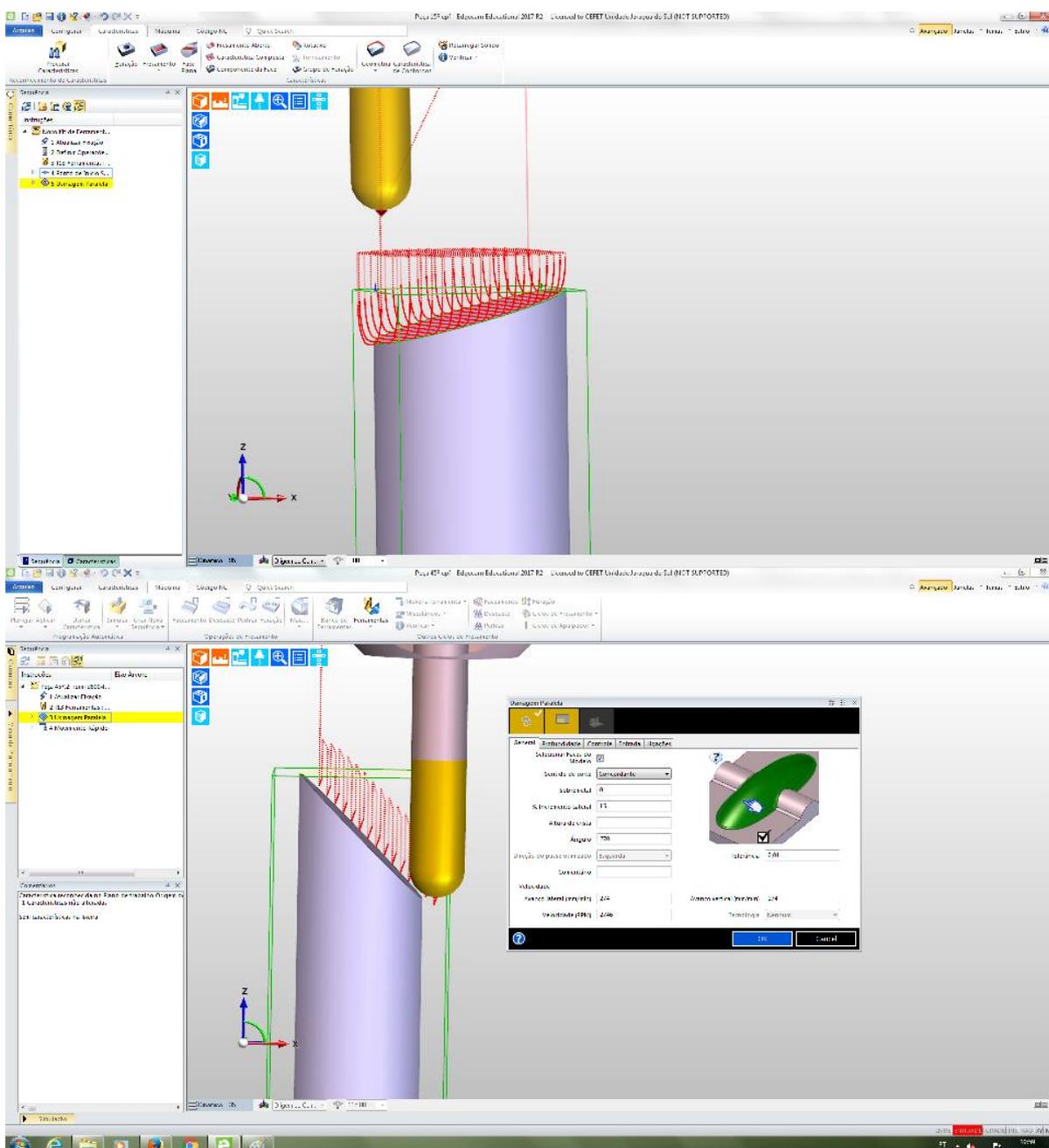
Figura 10 - Suporte de fixação



Fonte: O Autor

O procedimento de usinagem foi realizado em um centro de usinagem CNC com 3 eixos de movimentação, sendo a programação feita no software de CAM, EdgeCam®. Antes de realizar a usinagem, é feita toda a programação definindo todos os parâmetros e a estratégia de usinagem. Neste caso a estratégia de usinagem utilizada é o corte no sentido concordante, ou seja, o movimento de avanço segue a mesma direção do movimento de corte, e também no sentido ascendente, onde a ferramenta começa o corte na parte inferior da peça e avança na direção superior após cada passe de remoção. A figura 11 mostra o caminho de deslocamento da ferramenta, gerado no próprio software de programação e também mostra a interface para inserção dos parâmetros de corte inseridos durante a programação.

Figura 11 - Programação da usinagem em EdgeCam



Fonte: O autor

Assim definida toda a programação, com os parâmetros e a estratégia de usinagem, foi transferido o programa para a máquina e realizado a usinagem, porém, antes é necessário o referenciamento da peça e da altura da ferramenta. Para isto, é utilizado o localizador de arestas eletrônico e o presseter de altura digital, conforme a figura 12.

Figura 12 - Referenciamento da peça



Fonte: O autor

Após o processo de usinagem, as peças foram embaladas em papelão e protegidas em óleo para que não haja nenhuma alteração na sua superfície tanto por colisão como por corrosão.

Para as análises da fresa, foram utilizados um estereoscópio para medição dos desgastes de flanco e lascamento. O mesmo procedimento, para fotografar os cavacos. Para análise de adesão e análise do revestimento da ferramenta, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura modelo ESM 90 – Zeiss.

3.2 Materiais Utilizados

O corpo de prova utilizado para os ensaios, é um corpo cilíndrico de diâmetro de uma polegada por um comprimento de 20 milímetros. Este corpo de prova foi fabricado pelo processo de trefilação, cortado no comprimento próximo de 20 mm e retificado no comprimento de 20 mm para que todos ficassem na mesma dimensão em relação a espessura.

O material do corpo de prova usinado é de Aço AISI D6, popularmente conhecido como VC131. Após a retificação forem encaminhados para o processo de

têmpera, onde se alcançou uma dureza na ordem de 56 a 58 HRC, determinada pela medição de dureza após a têmpera. A tabela 3 mostra a composição química dos elementos de liga principais do Aço AISI D6 fabricado pela empresa Villares Metals.

Tabela 3 - Composição do Aço AISI D6

Material	C	Cr	W	V
<i>AISI D6</i>	2,1	11,5	0,7	0,15

Fonte: Villares Metals

A ferramenta utilizada para remoção de material é uma fresa de topo esférico inteiriça de metal duro, com cobertura comercialmente conhecida como NACO (Nanocomposite), contendo: nitreto de titânio (TiN), nitreto de alumínio e titânio (AlTiN) e nitreto de Silício (SiN) sendo depositado através do método PVD (Deposição física a vapor). As fresas contém duas arestas de corte, diâmetro 8 milímetros e comprimento útil de 9 milímetros, possuindo um ângulo de hélice de 35° e dureza superior a 68 HRC.

Para caracterização do revestimento da ferramenta, foram realizadas análises químicas por espectro de raio-x via EDS, desenvolvidas no laboratório da UDESC, na cidade de Joinville. Este procedimento também foi aplicado na aresta de corte da fresa após o ensaio para análise de possíveis adesões.

Para medição de desgaste de flanco, lascamento e fotografar os cavacos, foi utilizado um estereoscópio STEMI 2000-C com câmera AxioCam ERc 5s.

Para a fixação da ferramenta foi utilizado um mandril hidráulico porta pinças com cone ISO 40, sendo necessário a utilização de uma pinça de 8 mm para a fixação da fresa. A máquina utilizada para realizar os ensaios foi um Centro de usinagem CNC 3 eixos ROMI D600, com limite de rotação de 7500 rpm e para a programação da usinagem foi utilizado o software EdgeCam® educacional versão 2017 R2.

Para referenciamento da peça foi utilizado um localizador de arestas eletrônico marca Li-Hsun modelo S0E-20LB com luz de LED para sinalização de contato e esfera de contato de diâmetro 10 mm, já para o referenciamento preciso da altura da ferramenta, foi utilizado um presseter de altura eletrônico marca Vertex com base

magnética e altura de 50 mm.

Para avaliação dos resultados, na medição da rugosidade das peças foi utilizado Rugosímetro Mitutoyo SJ-201P, a figura 13 mostra o esquema de fixação do rugosímetro e da peça para medição das rugosidades. Para uma análise mais completa, foram realizadas 6 medições em cada superfície, sendo 3 medições paralelas ao sentido de avanço da fresa e 3 medições perpendiculares ao sentido de avanço da fresa.

Figura 13 – Medição de rugosidade



Fonte: O autor

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios foram relacionados com os parâmetros e discutidos com relação às análises realizadas nos corpos de prova e nas ferramentas utilizadas, para que possam ser aplicados os parâmetros em diversos processos semelhantes colaborando com o avanço tecnológico e possíveis melhorias nos processos de usinagem. As análises seguem como base os objetivos desta pesquisa.

4.1 Acabamento da superfície

A avaliação da superfície usinada se trata da medição das rugosidades geradas em cada superfície. A tabela 4 mostra os resultados das medições de rugosidade para cada ensaio.

Tabela 4 – Rugosidade avaliada

Amostra	Ra Perpendicular a direção de avanço					Ra Paralelo a direção de avanço				
	Ra 1 (µm)	Ra 2 (µm)	Ra 3 (µm)	Média	Desvio Padrão	Ra 1 (µm)	Ra 2 (µm)	Ra 3 (µm)	Média	Desvio Padrão
1	0,23	0,21	0,21	0,22	0,01	0,14	0,13	0,14	0,14	0,01
2	0,19	0,19	0,20	0,19	0,01	0,20	0,16	0,15	0,17	0,03
3	0,18	0,22	0,18	0,19	0,02	0,15	0,17	0,16	0,16	0,01
4	0,21	0,20	0,21	0,21	0,01	0,23	0,20	0,24	0,22	0,02
5	0,28	0,25	0,29	0,27	0,02	0,29	0,25	0,24	0,26	0,03
6	0,24	0,22	0,23	0,23	0,01	0,22	0,24	0,25	0,24	0,02
7	0,19	0,18	0,19	0,19	0,01	0,17	0,18	0,17	0,17	0,01
8	0,26	0,23	0,24	0,24	0,02	0,12	0,15	0,15	0,14	0,02
9	0,21	0,20	0,19	0,20	0,01	0,15	0,18	0,16	0,16	0,02
10	0,30	0,28	0,31	0,30	0,02	0,22	0,20	0,21	0,21	0,01
11	0,32	0,31	0,29	0,31	0,02	0,24	0,22	0,24	0,23	0,01
12	0,33	0,35	0,33	0,34	0,01	0,20	0,24	0,23	0,22	0,02

Fonte: O autor

Pode-se perceber que a média de rugosidade aumenta conforme o aumento do avanço da fresa. Nos ensaios com avanço de 0,05 mm/z (1, 2, 3, 7, 8 e 9), a Ra é menor do que nos ensaios com avanço de 0,1 mm/z (4, 5, 6, 10, 11 e 12). Isto acontece devido ao deslocamento maior da ferramenta com avanço maior, gerando sulcos mais distantes. Como já comentado a rugosidade é gerada pelo movimento da ferramenta removendo material, portanto com movimentos mais rápidos tem-se rugosidade maior segundo Aguiar, Diniz e Pederiva. (2013)

A média de rugosidade apresentou uma pequena variação para mais nas amostras em que houve lascamento.

Segundo uma das conclusões de Arruda et. al. (2013), os parâmetros mais influentes para se obter menor rugosidade média são a velocidade de avanço e a profundidade de corte lateral, ou largura de corte. Nestes ensaios os autores realizaram testes variando estes parâmetros e a inclinação da superfície. Em seus resultados, eles mostram que baixa velocidade de avanço e baixa largura de corte geram superfícies com menos rugosidade média.

De acordo com os resultados, a diferença entre a rugosidade nas superfícies em 15° e 45° é mínima, considerando os mesmos parâmetros, ou seja, para avanço de 0,05 mm/z, a rugosidade nas duas inclinações são semelhantes, tanto na medição perpendicular como na medição paralela ao avanço. Para o avanço de 0,1 mm/z, a diferença entre as rugosidades nas superfícies em 15° e 45° é ligeiramente maior do que para o avanço de 0,05 mm/z. A maior diferença notada, foi entre os ensaios 6 e 12.

4.2 Mecanismos de desgaste

Foram apresentados 3 mecanismos de desgaste, sendo classificados como: Abrasão, Adesão e Avarias. A tabela 5 representa quais foram os mecanismos que aconteceram em cada ensaio. Estes dados foram analisados nas imagens de cada ferramenta no estereoscópio.

Tabela 5 – Mecanismos de desgaste

Ensaio	Ângulo	Abrasão	Adesão	Avarias
1	15°	✓	✓	✓
2	15°	✓	✓	✓
3	15°	✓	✓	✓
4	15°	✓	✓	✗
5	15°	✓	✗	✗
6	15°	✓	✓	✓
7	45°	✓	✓	✗
8	45°	✓	✓	✓
9	45°	✓	✓	✓
10	45°	✓	✗	✗
11	45°	✓	✗	✗
12	45°	✓	✓	✗

Fonte: O autor

✗

Não apresenta

✓

Apresenta

O mecanismo de abrasão ocorreu em todos os ensaios, este mecanismo gerou desgaste na aresta de corte e na superfície de saída da ferramenta (desgaste de flanco). Devido a característica de baixa usinabilidade dos aços endurecidos, este mecanismo se torna muito comum, sendo fator determinante no fim da vida útil da ferramenta. Segundo Sandvik (2018), o desgaste de flanco também pode ser gerado devido à baixa resistência ao desgaste da ferramenta ou baixa velocidade de avanço. Segundo Oliveira e Diniz (2009), que realizaram ensaios relacionados a vida útil da ferramenta variando a inclinação, inicialmente o desgaste de abrasão é predominante e após um desgaste considerável, aparecem outros mecanismos, como adesão e micro trincas. Foram realizadas medições dos desgastes de flanco nas fresas, conforme mostra a tabela 6.

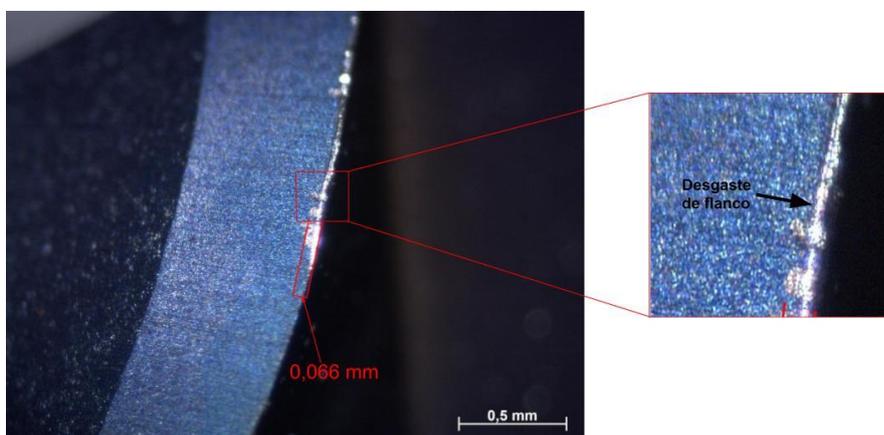
Tabela 6 – Desgaste de flanco

Ensaio	Ângulo	f_z (mm/z)	Desgaste de flanco (mm)
1	15°	0,05	0,057
2	15°	0,05	0,057
3	15°	0,05	0,063
4	15°	0,1	0,066
5	15°	0,1	0,060
6	15°	0,1	0,047
7	45°	0,05	0,056
8	45°	0,05	0,074
9	45°	0,05	0,059
10	45°	0,1	0,055
11	45°	0,1	0,058
12	45°	0,1	0,055

Fonte: O autor

Diferentemente da rugosidade, o desgaste de flanco não apresenta uma relação com o aumento do avanço da ferramenta. O maior desgaste apresentado ocorreu na amostra 8, onde se utilizou avanço de 0,05 mm/z com inclinação de 45°, porém, na amostra 7, com os mesmos parâmetros, o desgaste é bem inferior. Rathod (2017) cita que, muitos fatores podem influenciar no aumento ou na diminuição do mecanismo de desgaste, mesmo com todo o cuidado na preparação e na realização do ensaio, qualquer pequena alteração, seja na profundidade, na fixação da peça e da ferramenta ou até mesmo na própria fabricação da ferramenta, pode ocorrer esta variação. A figura 14 mostra o desgaste de flanco na fresa utilizada no ensaio 4.

Figura 14 – Desgaste de flanco inclinação de 15° com f_z de 0,10 mm/z

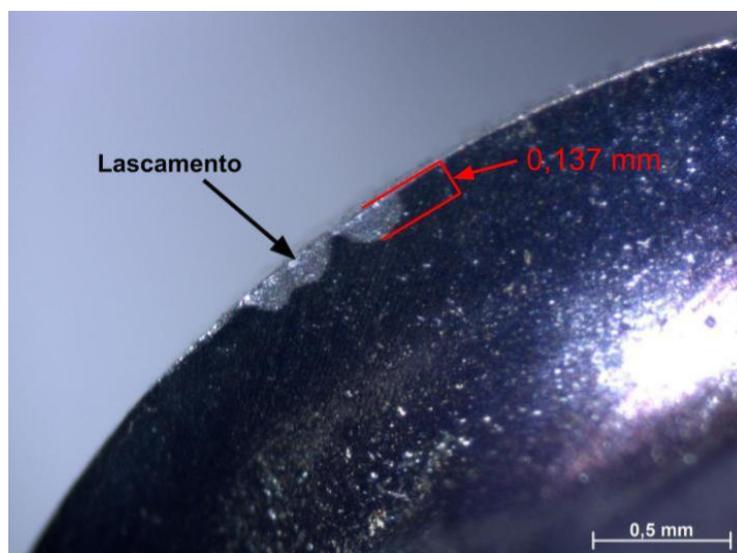


Fonte: O autor

As avarias encontradas nas amostras ocorreram principalmente nos ensaios com avanço de 0,1 mm/z na forma de lascamento na superfície de saída. A figura 16 mostra detalhadamente o lascamento na superfície da ferramenta. Este tipo de lascamento geralmente é causado devido a vibrações e ou variações micro estruturais na peça, sendo comum na usinagem de materiais temperados e com elevada dureza. (RATHOD, 2017)

Devido à maior espessura do cavaco de acordo com o aumento da velocidade de avanço, que, por sua vez, eleva a força de corte, pode-se relacionar estes fatores as avarias encontradas nas ferramentas nos ensaios com avanço de 0,1 mm/z com mais frequência. Outros fatores também podem influenciar nas avarias encontradas na forma de lascamento, como por exemplo: rigidez da máquina, fixação da ferramenta, fixação da peça e variação da microestrutura da peça. Tornando-se assim um mecanismo extremamente complexo.

Figura 15 – Lascamento na inclinação de 45° com avanço 0,05 mm/z

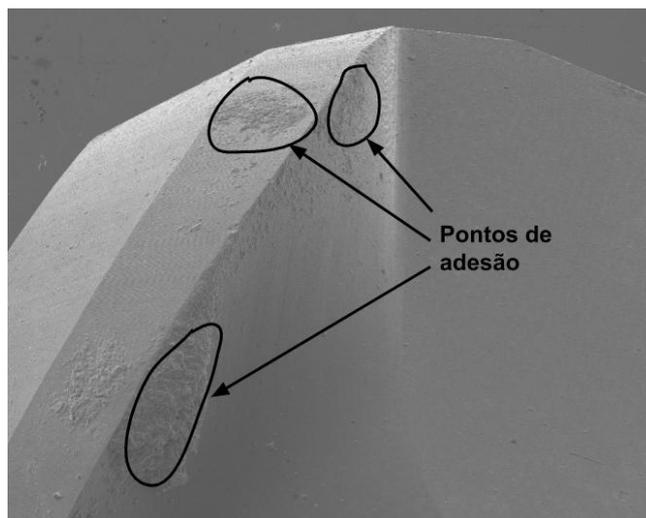


Fonte: O autor

O mecanismo de adesão ocorreu com mais incidência nas mesmas amostras que houveram lascamento, onde pequenas partículas do material removido se aderem à superfície. Isso acontece, pois, parte da ferramenta com revestimento se deslocou e a região onde aconteceu o lascamento perde o revestimento, sendo um dos

responsáveis pela diminuição do mecanismo de adesão. Através do EDS pode detectar algumas partículas do material do corpo de prova que aderiram a ferramenta. A figura 16 mostra o procedimento EDS na amostra com inclinação de 45° com avanço de 0,10 mm/z.

Figura 16 – EDS na fresa das amostras 6 e 12 com avanço de 0,10 mm/z

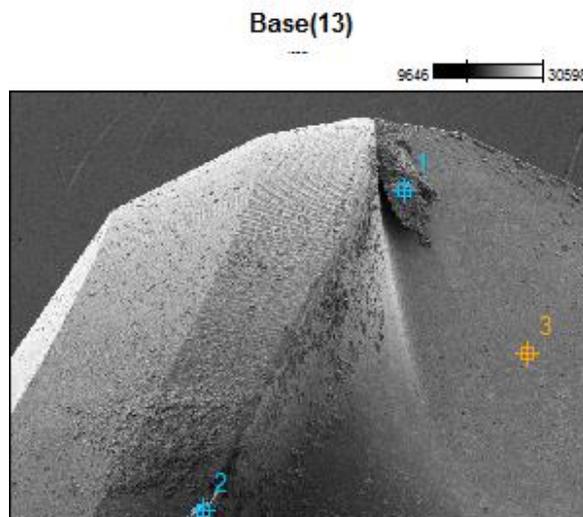


Fonte: O autor

4.3 EDS

O procedimento de EDS foi realizado nas ferramentas em três áreas distintas, sendo elas: no substrato de metal duro, na região com revestimento e na região de contato entre ferramenta e peça. A figura 17 mostra a imagem gerada no procedimento de EDS, com os pontos de análise. O apêndice B mostra o relatório gerado no procedimento, para mais informações.

Figura 17 – EDS na fresa das amostras 3 e 9



Fonte: O autor

Na figura 18, o ponto 1 está localizado em uma porção de material aderida a ferramenta, o ponto 2 está localizado na região de contato entre fresa e corpo de prova e o ponto 3 se situa em uma região para análise do revestimento da ferramenta. A tabela 7 mostra os resultados do EDS nessa mesma fresa, com a quantidade de cada elemento em cada região.

Tabela 7 – Resultados do EDS na fresa das amostras 3 e 9

	C %	N %	O %	Al %	Si %	Ti %	Cr %	Fe %	Cu %	Br %
<i>Ponto 1</i>	12.51	-	10.22	-	-	-	17.43	59.84	-	-
<i>Ponto 2</i>	26.82	26.10	-	-	1.77	31.46	-	-	2.90	10.96
<i>Ponto 3</i>	8.18	20.57	7.25	9.43	1.89	52.68	-	-	-	-

Fonte: O autor

No ponto 1, encontra-se grande quantidade de ferro, cromo e carbono, elementos que compõem o aço AISI D6, porém, a quantidade de carbono está muito elevada e existe também o oxigênio. Esta região não contém nenhum traço do revestimento nem do substrato da ferramenta.

No ponto 2 percebe-se que ainda contém alguns elementos do revestimento da ferramenta, como o titânio, o silício e o nitrogênio, mas outros elementos já não aparecem devido a abrasão gerada na saída do cavaco, neste ponto a porcentagem

de carbono também está bem elevada.

Na região do ponto 3, não houve contato entre a peça e a ferramenta, portanto, o resultado apresenta os elementos encontrados no revestimento, entre eles, os mais predominantes são: Titânio, Alumínio, Nitrogênio e Silício, sendo estes os elementos principais constituintes do revestimento das fresas utilizadas.

O resultado do EDS para o substrato da fresa, ou seja, material da ferramenta sem o revestimento, apresentou os seguintes elementos: 7,11% de carbono, 10,23% de cobalto e 82,66% de tungstênio, formando assim a base do metal duro.

4.4 Cavacos

Os cavacos gerados nos ensaios têm forma de lascas, sendo cavaco típico do processo de fresamento de aços endurecidos. A figura 18 mostra os cavacos gerados no ensaio em 15° de inclinação com avanço de 0,05 mm/z.

Figura 18 – Cavacos do ensaio 2



Fonte – O autor

Os cavacos de todos os ensaios são muito semelhantes, principalmente pelo fato de que a profundidade de corte e a largura de corte foi mantida, já em relação ao avanço, a única alteração é em relação a espessura do cavaco, que aumenta de acordo com o aumento do avanço, mas a forma do cavaco não se altera.

Segundo Ning et. al. (2001 apud Magalhães, 2017) em processos de

fresamento estáveis, os cavacos se apresentam ligeiramente cônicos e enrolados, aparência semelhante aos cavacos mostrados na imagem 19.

Pode-se apresentar uma semelhança em relação a cor dos cavacos obtidos nos experimentos com os obtidos nos ensaios de Magalhães (2017), onde ele cita que conforme a coloração metálica dos cavacos gerados, pode-se concluir que a temperatura gerada durante a maior parte da remoção de material não foi excessiva.

5 CONCLUSÃO

Conforme análise dos resultados, pôde-se alcançar com êxito os objetivos desta pesquisa. Após os ensaios foi realizada uma análise na superfície dos corpos de prova, nas ferramentas utilizadas e no cavaco gerado durante o procedimento de usinagem, podendo assim chegar nas seguintes conclusões:

- A rugosidade média da superfície usinada varia gradativamente de acordo com o avanço, porém, este não é o único parâmetro influente.
- A média variou nos ensaios em que a ferramenta de corte possuiu lascamento em seu gume.
- O desgaste de flanco mostrou-se presente em todos os ensaios, como já esperado, devido ao mecanismo de adesão ser comum na usinagem de materiais com elevada dureza e baixa usinabilidade.
- Outro ponto importante verificado no EDS foi a adesão, causada principalmente pelo elevado teor de cromo no material da peça.
- Houve lascamento em diversos ensaios, mas, principalmente nas usinagens com maior avanço.
- Por fim, os cavacos gerados, apresentaram muita semelhança, alterando somente sua espessura de acordo com a velocidade de avanço. O formato de cavaco se manteve como segmentado, um formato característico no processo de fresamento de materiais com elevada dureza.

Os ensaios evidenciaram a complexidade dos processos de usinagem de materiais endurecidos e a grande variedade de fatores influentes no processo. Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de analisar as influências da velocidade de avanço e da inclinação da superfície no acabamento, contudo, percebe-se que em relação ao acabamento existem diversos fenômenos influentes, desde a fixação da peça até a qualidade da construção da ferramenta.

Em virtude dos resultados e das discussões apresentadas, novas pesquisas podem ser realizadas seguindo o a mesma linha de estudo, com o objetivo de explicar

outros parâmetros envolvidos no processo, podendo ser:

- Analisar da influência dos revestimentos das fresas no acabamento de materiais endurecidos;
- Utilizar de outros valores de v_c e v_f ;
- Realizar novos ensaios evidenciando o desgaste de flanco em usinagens com refrigeração ou mínima quantidade de lubrificante
- Utilizar outros aços ferramenta para coleta e análise de qualidade da superfície em relação ao desgaste da ferramenta de corte.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Marcelo Mendes de; DINIZ, Anselmo Eduardo; PEDERIVA, Robson. Correlating surface roughness, tool wear and tool vibration in the milling process of hardened steel using long slender tools. **International Journal Of Machine Tools & Manufacture**. São Paulo, p. 1-10. jan. 2013.

ARRUDA, Etoy Madrilles et al. Integrated optimization using mixture design to confirm the finishing of AISI P20 using different cutting strategies and ball nose end mills. **Measurement**. São João Del-rei, p. 54-63, ago. 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: Abnt, 2002. 18 p.

CIMM. **Quadro comparativo de propriedades**. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/4825-quadro-comparativo-de-propriedades#.W_WEDjhKgdU. Acesso em: 14/09/2018.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2000. 244 p.

FERRARESI, Dino. Fundamentos da usinagem dos materiais. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

KRATOCHVIL, Rafael. **Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafita industrial**. 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MACHADO, Alisson Rocha et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

MOLDES E INJEÇÃO PLÁSTICOS. **Fundamentos do processo de usinagem**. Disponível em: <http://moldesinjecaoplasticos.com.br/fundamentos-do-processo-de-usinagem/>. Acesso em: 10/08/2018

MOLDES E INJEÇÃO PLÁSTICOS. **Informativo de tolerância de acabamento superficial**. Disponível em: <http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/informativos2010/11.htm>. Acesso em:

14/08/2018

MOLDES E INJEÇÃO PLÁSTICOS. **Parâmetros de avaliação da rugosidade.** Disponível em: <http://moldesinjecaoplasticos.com.br/parametros-de-avaliacao-da-rugosidade-acabamento-superficial/>. Acesso em: 19/10/2018

OLIVEIRA, Adilson José de; DINIZ, Anselmo Eduardo. Tool life and tool wear in the semi-finish milling of inclined surfaces. **Journal Of Materials Processing Technology**. Joinville, p. 5448-5455. abr. 2009.

RATHOD, K. B.; LALWANI, D. I. Modeling of flank wear progression for coated cubic boron nitride tool during hard turning of AISI H11steel. **Elsevier**, Surat, p.6692-6701, fev. 2018.

SANDVIK COROMANT. **Problemas e soluções em fresamento.** Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/troubleshooting.aspx>. Acesso em: 02/11/2018

SANTOS, Aldeci Vieira dos et al. **Usinagem em Altíssimas Velocidades:** Como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica. 2. ed. São Paulo: Érica, 2003. 214 p.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais. São Paulo: Artliber Editora, 2007. 246 p.

STEMMER, Caspar Erich. Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos e abrasivos. 2ª ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

WANG, Bing; LIU, Zhanqiang. Cutting performance of solid ceramic end milling tools in machining hardened AISI H13 steel. **Int. Journal Of Refractory Metals And Hard Materials**. Shandong, p. 24-32. nov. 2015.

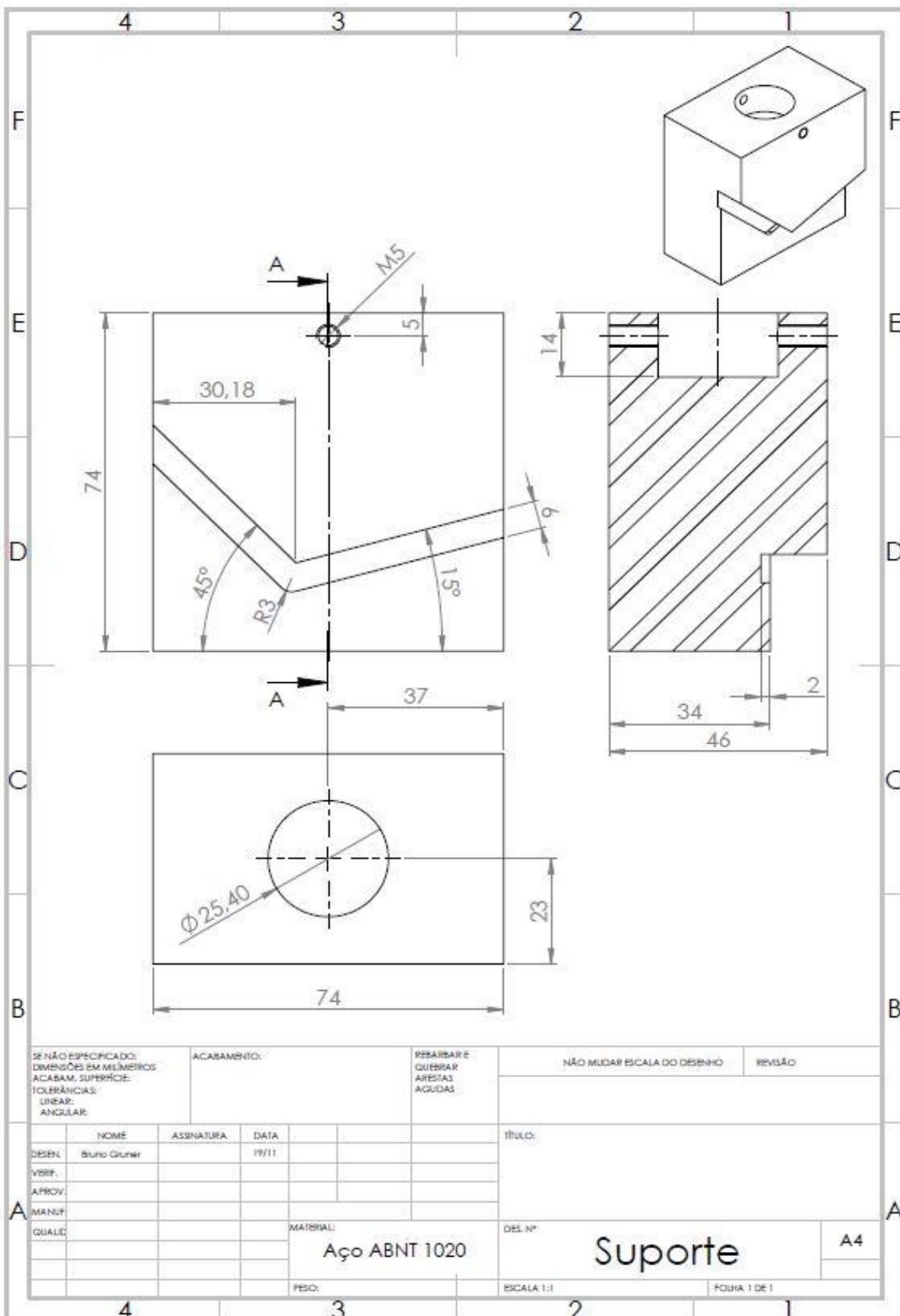
WANG, C.y. et al. Wear and breakage of TiAlN- and TiSiN- coated carbide tools during high-speed milling of hardened steel. **Wear**. Guangzhou, p. 29-42. maio 2015.

WOJCIECHOWSKI, S. et. al. Optimisation of machining parameters during ball end milling of hardened steel with various surface inclinations, **Measurement**. Poznan. Jul. 2017.

WT FERRAMENTAS. **Fresas high speed NACO**. Disponível em: http://www.wtferramentas.com.br/index.php?route=product/product&path=60&product_id=32
2. Acesso em: 14/08/2018

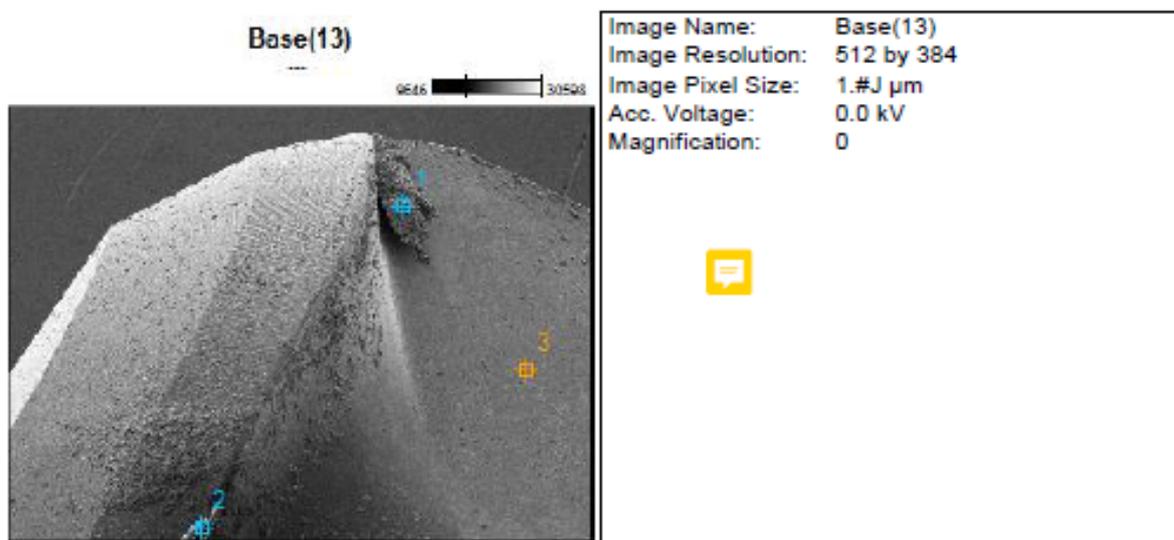
MAGALHÃES, Laurence Colares. **Influência do contato entre ferramenta e peça no fresamento de superfícies curvas em aço h13 temperado e revenido**. 2017. 201 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

APÊNDICE A – Desenho técnico do suporte dos corpos de prova



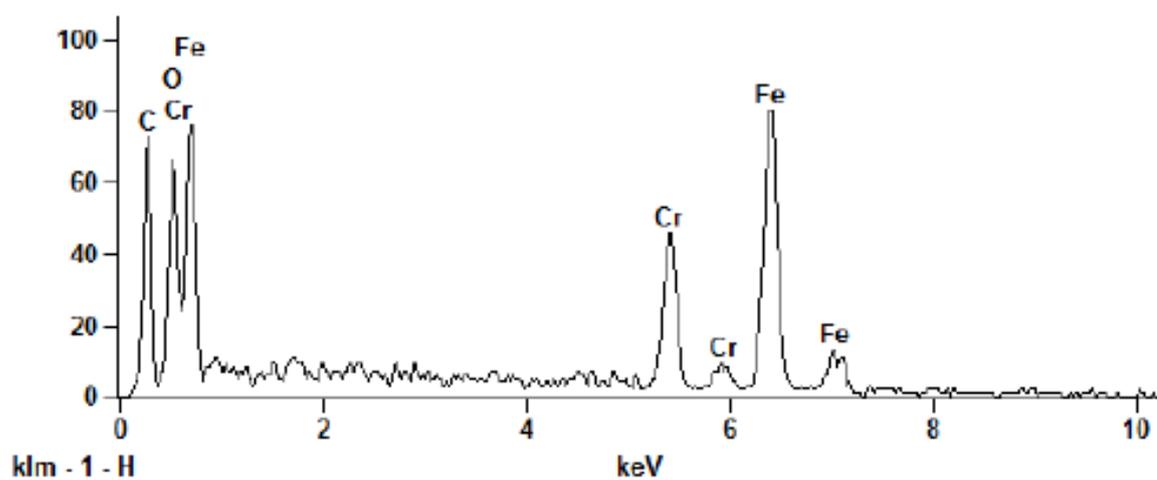
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA			TÍTULO:			
VERIF.	Bruno Gruner		19/11			Suporte			
APROV.									
MANUF.									
QUALID.									
				MATERIAL:		DES. Nº		A4	
				Aço ABNT 1020					
				PESO:		ESCALA 1:1		FOLHA 1 DE 1	

APÊNDICE B – EDS na fresa 2C



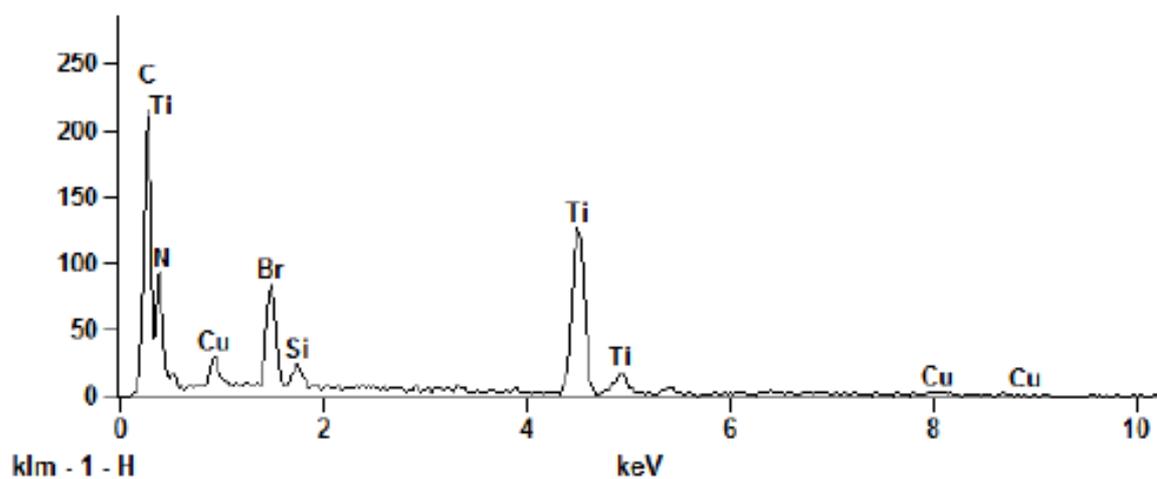
Full scale counts: 80

Base(13)_pt1



Full scale counts: 215

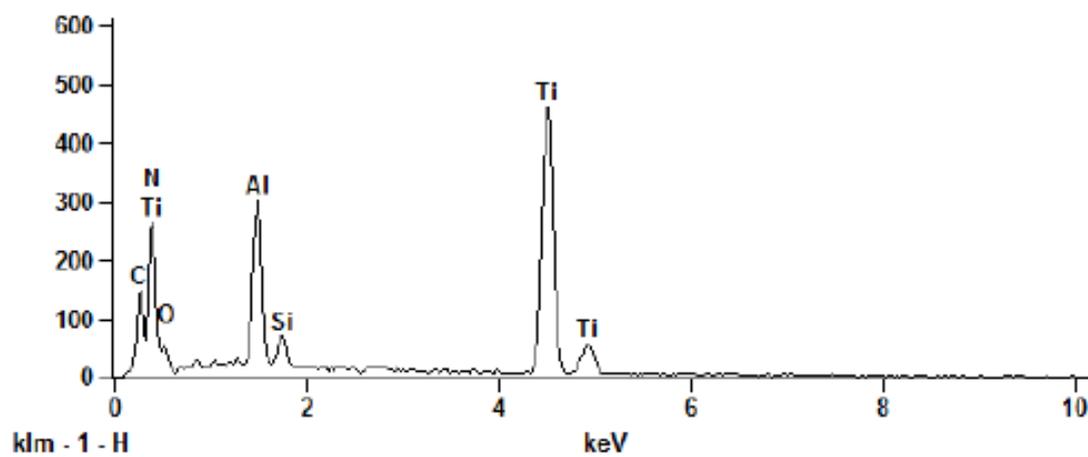
Base(13)_pt2



Project: Kamila

Full scale counts: 460

Base(13)_pt3



Weight %

	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Br</i>
<i>Base(13)_pt1</i>	12.51		10.22				17.43	59.84		
<i>Base(13)_pt2</i>	26.82	26.10			1.77	31.46			2.90	10.96
<i>Base(13)_pt3</i>	8.18	20.57	7.25	9.43	1.89	52.68				

Weight % Error (+/- 1 Sigma)

	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Br</i>
<i>Base(13)_pt1</i>	+/-0.46		+/-1.03				+/-0.86	+/-3.00		
<i>Base(13)_pt2</i>	+/-0.66	+/-2.07			+/-0.24	+/-0.98			+/-1.15	+/-0.40
<i>Base(13)_pt3</i>	+/-0.35	+/-1.95	+/-1.91	+/-0.17	+/-0.12	+/-0.87				

Atom %

	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Br</i>
<i>Base(13)_pt1</i>	33.74		20.69				10.86	34.71		
<i>Base(13)_pt2</i>	44.67	37.28			1.26	13.14			0.91	2.74
<i>Base(13)_pt3</i>	16.53	35.66	11.00	8.48	1.63	26.70				

Atom % Error (+/- 1 Sigma)

	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Br</i>
<i>Base(13)_pt1</i>	+/-1.25		+/-2.09				+/-0.54	+/-1.74		
<i>Base(13)_pt2</i>	+/-1.10	+/-2.96			+/-0.17	+/-0.41			+/-0.36	+/-0.10
<i>Base(13)_pt3</i>	+/-0.70	+/-3.39	+/-2.90	+/-0.15	+/-0.10	+/-0.44				

Formula

	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Br</i>
<i>Base(13)_pt1</i>	C		O				Cr	Fe		
<i>Base(13)_pt2</i>	C	N			Si	Ti			Cu	Br
<i>Base(13)_pt3</i>	C	N	O	Al	Si	Ti				

Compound %

	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Br</i>
<i>Base(13)_pt1</i>	12.51		10.22				17.43	59.84		
<i>Base(13)_pt2</i>	26.82	26.10			1.77	31.46			2.90	10.96
<i>Base(13)_pt3</i>	8.18	20.57	7.25	9.43	1.89	52.68				