

RENATO BRANDÃO WATANABE

ANÁLISE COMPARATIVA DA USINAGEM DO AÇO 4340 UTILIZANDO FERRAMENTAS DE METAL
DURO E FERRAMENTAS DE CERÂMICA

Guaratinguetá
2016

RENATO BRANDÃO WATANABE

Análise comparativa da usinagem do aço 4340 utilizando ferramentas de metal duro e ferramentas de cerâmica

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Vitor Candido Souza

**Guaratinguetá
2016**

Renato Brandão Watanabe

W324a Análise comparativa da usinagem do aço 4340 utilizando ferramentas de metal duro e ferramentas de cerâmica / Renato Brandão Watanabe – Guaratinguetá, 2016.
44 f : il.
Bibliografia: f. 43

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.
Orientador: Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza

1. Aço de alta resistência. 2. Usinagem. 3. Cerâmica (Tecnologia).
I. Título

CDU 669.14

UNESP 

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

Curso de Engenharia Mecânica

**ANÁLISE COMPARATIVA DA USINAGEM DO AÇO 4340 UTILIZANDO
FERRAMENTAS DE METAL DURO E FERRAMENTAS DE CERÂMICA**

RENATO BRANDÃO WATANABE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

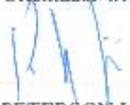

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

Coordenador do Departamento de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA

Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI

UNESP-FEG


Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES

UNESP-FEG

Janeiro 2016

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer o apoio e todo suporte para a realização e concretização de minha graduação em Engenharia Mecânica aos meus pais Henry Watanabe e Margareth de Marco Brandão Watanabe, e aos meus amados irmãos Robson B. Watanabe, Ricardo B. Watanabe e Nathalia B. Watanabe.

Aos colegas da República Estudantes da FEG.

Ao Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza, pelo companheirismo, dedicação e orientação durante o trabalho de graduação.

Ao Prof Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves professor do Departamento de Engenharia Materiais da FEG/Unesp.

Ao Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro chefe do Departamento de Engenharia de Materiais da FEG/Unesp.

Ao Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins Coordenador do curso de Engenharia Mecânica da FEG/Unesp.

À todos os professores que compartilharam seus conhecimentos e se dedicaram a ensinar.

WATANABE, R.B. **Análise comparativa da usinagem do aço 4340 utilizando ferramentas de metal duro e ferramentas de cerâmica.** 2016 44 p. Trabalho de Graduação (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Os processos de usinagem apresentam grande importância no mundo moderno, sendo fundamental na redução de custos e aumento de vida dos materiais. Dentre os materiais, as ligas metálicas apresentam um consumo na ordem de 1,4 bilhões de toneladas, onde uma parcela destas matérias é destinada à fabricação de peças que compõe as indústrias aeronáutica, aeroespacial, automobilística e outras. O objetivo deste trabalho é o estudo da usinagem por torneamento do aço ABNT/AISI 4340, sem o uso de fluido de corte utilizando ferramentas cerâmicas de alumina (Al_2O_3) desenvolvida em laboratório e uma ferramenta de metal duro disponível comercialmente para análise comparativa. A ferramenta de metal duro possui especificação de acordo com a norma ISO TNMG 160404, enquanto a ferramenta de Al_2O_3 foi retificada e lapidada de acordo com a norma ISO 1832. Os testes foram realizados em dois tornos CNC, sendo o primeiro da marca Romi GL240M com potência de 18KW e a outra marca Litz-350-VEKER com potência de 15KW. Os testes foram realizados utilizando velocidades de corte de (V_c) 200, 300 e 500m/min; avanços de (f) 0,10, 0,20 e 0,15mm/rot e profundidade de corte de (a_p) 0,5mm para ferramenta de alumina, e para ferramenta de metal duro com utilização de fluido de corte $V_c=200m/min$, $f=0,2mm/rot$ e a_p 0,5mm. As caracterizações foram realizadas em função do desgaste de flanco, rugosidades, dureza e análises dos cavacos utilizando microscópio óptico da marca Wilson Instruments mod.401 MVD, rugosidade com rugosímetro da Marsurf modelo M300 e dureza com o microdurômetro da marca Wilson Wolpert modelo 401 MVD. Os resultados demonstraram que a ferramenta de cerâmica possui potencial para usinagem do aço 4340 em altas velocidades de corte, apresentando um melhor acabamento superficial na $V_c=500m/min$ e $f=0,15mm/rot$. Os resultados obtidos são promissores para utilização destas ferramentas na usinagem do aço ABNT/AISI 4340, com possibilidades de importantes reduções de custo.

PALAVRAS- CHAVES: Aço 4340. Ferramentas cerâmicas. Metal duro. Usinagem a seco. Redução de custo.

WATANABE, R.B. **Comparative analysis of steel processing 4340 using carbide tools and ceramic tools.** 2016 44 p. Graduation Work (Mechanical Engineering) - Faculty of Engineering of the Guaratinguetá Campus, State University of São Paulo, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

The machining processes have great importance in the modern world, it is fundamental in reducing costs and increasing life of the materials. Among the materials, the alloys have a consumption of around 1.4 billion tonnes, where a portion of these materials are intended for the manufacture of parts that make up the aerospace industries, aerospace, automotive and others. The objective of this work is the study of machining for steel turning ABNT / AISI 4340, without the use of cutting fluid using alumina ceramic tools (Al_2O_3) developed in the laboratory and a carbide tool commercially available for comparative analysis. The carbide tool has specified in accordance with ISO TNMG 160.404, while the Al_2O_3 tool has been rec-tified and polished in accordance with ISO 1832. The tests were performed on two CNC lathes, the first brand Romi with GL240M power of 18KW and other brand Litz-350-VEKER with power of 15KW. The tests were conducted using cutting speed (V_c) 200, 300 and 500m / min; advances to (f) 0.10, 0.20 and 0.15 mm / rev and depth of cut (a_p) to 0.5mm alumina tool and cemented carbide tool with use of cutting fluid $V_c = 200m / min$, $f = 0.2 mm / rev$ and $a_p 0.5 mm$. The characterizations were carried out according to the flank wear, roughness, hardness and analysis chip using optical microscope Mark Wilson Instru-ments mod.401 MVD, roughness with roughness of MarSurf M300 model and hardness with microhard-ness brand Wilson Wolpert 401 model MVD. The results showed that the ceramic tool has potential for 4340 steel machining at high cutting speeds, with a better surface finish on $V_c = 500m / min$, $f = 0.15 mm / rev$. The results are promising for use of these tools in machining steel ABNT / AISI 4340, with substan-tial cost reductions possible.

KEYWORDS: Steel 4340. Ceramic tool. Metal-hard tool. Machining.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Aeronave Embraer EBM-110 e seu respectivo trem de pouso | 12 |
| Figura 2 - Setor dentado do trem de pouso..... | 13 |
| Figura 3 - Processos de conformação dos metais | 16 |
| Figura 4 - Cinemática da usinagem com ferramenta de geometria definida | 17 |
| Figura 5 - Grandezas do processo de Usinagem..... | 17 |
| Figura 6 - Ilustração torneamento | 18 |
| Figura 7 - Exemplos de ferramentas para torneamento..... | 21 |
| Figura 8 - Medidas do desgaste..... | 28 |
| Figura 9 - Funções dos fluidos de corte..... | 28 |
| Figura 10 - Matéria-prima Aço 4340 | 30 |
| Figura 11 - Dimensões do corpo de prova em milímetros | 31 |
| Figura 12 - Fixação do CDP..... | 31 |
| Figura 13 - Máquina-Ferramenta Experimento do inserto de Metal Duro | 32 |
| Figura 14 - Dimensões da ferramenta de metal duro | 33 |
| Figura 15 - Suporte para inserto de metal-duro | 33 |
| Figura 16 - Máquina – Ferramenta Experimento do inserto de alumina | 34 |
| Figura 17 - Ferramenta e suporte da ferramenta de alumina..... | 34 |
| Figura 18 - Rugosímetro | 35 |
| Figura 19 - Microscópio 401 MVD | 35 |
| Figura 20 - Ensaio 1 de Metal duro | 37 |
| Figura 21- Ensaio 2 de Metal duro | 37 |
| Figura 22 - Ensaio 1 de Alumina | 38 |
| Figura 23 - Ensaio 2 de Alumina | 38 |
| Figura 24 - Ensaio 3 de Alumina | 39 |
| Figura 25 - Ensaio 4 de Alumina | 39 |
| Figura 26 - Ensaio 5 de Alumina | 39 |
| Figura 27 - Ensaio 6 de Alumina | 40 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Operação de torneamento..... | 19 |
| Tabela 2 - Classificação dos cavacos | 24 |
| Tabela 3 - Classificação dos Desgastes de Ferramentas..... | 26 |
| Tabela 4 - Composição Química (% em peso) do aço AISI-SAE 4340..... | 30 |
| Tabela 5 - Parâmetros de usinagem das ferramentas..... | 32 |
| Tabela 6 - Valor de Cutoff..... | 35 |
| Tabela 7 - Rugosidade dos corpos de prova..... | 36 |
| Tabela 8 - Resumo dos desgastes nos ensaios | 40 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

DIN - German Institute for Standardization

AISI - American Iron and Steel Institute

SAE - Society of Automotive Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------|---|
| V_c | Velocidade de corte [mm/min] |
| V_f | Velocidade de avanço [mm/min] |
| V_e | Velocidade efetiva de corte [mm/min] |
| d | Diâmetro da matéria-prima [mm] |
| n | Rotação [RPM] |
| a_p | Profundidade de corte [mm] |
| f | Avanço por revolução [mm/rot] |
| b | Largura de usinagem [mm] |
| h | Espessura de usinagem |
| α | Ângulo de folga ou incidência |
| γ | Ângulo de saída |
| HV | Dureza Vickers [HV] |
| HRC | Dureza Rockwell [HRC] |
| V_B | Largura média de desgaste do flanco [mm] |
| $V_{Bmáx.}$ | Largura máxima de desgaste de flanco [mm] |
| Al | Alumínio |
| C | Carbono |
| Mo | Molibdênio |
| O | Oxigênio |
| Si | Silício |
| N | Nitrogênio |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 | OBJETIVO | 14 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 3.1 | AÇOS BAIXA LIGA..... | 15 |
| 3.2 | AÇO ABNT/AISI 4340 | 15 |
| 3.2.1 | <i>Aplicações do aço ABNT/AISI 4340</i> | 16 |
| 3.3 | PROCESSOS DE FABRICAÇÃO..... | 16 |
| 3.4 | FUNDAMENTOS DA USINAGEM..... | 16 |
| 3.5 | TORNEAMENTO 18 | |
| 3.5.1 | <i>Principais operações no torneamento – DIN 8589 (8589, 2003)</i> | 18 |
| 3.6 | FERRAMENTAS DE CORTE PARA TORNEAMENTO | 19 |
| 3.6.1 | <i>Influências da geometria da ferramenta de tornear</i> | 19 |
| 3.7 | CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE FERRAMENTAS | 20 |
| 3.7.1 | <i>Propriedades dos materiais de ferramentas</i> | 21 |
| 3.7.2 | <i>Evolução dos materiais de ferramenta</i> | 22 |
| 3.7.3 | <i>Funções dos revestimentos</i> | 23 |
| 3.7.4 | <i>Aplicações das ferramentas de corte de alumina</i> | 23 |
| 3.7.5 | <i>Ferramenta de metal duro</i> | 23 |
| 3.8 | CLASSIFICAÇÃO DOS CAVACOS..... | 24 |
| 3.8.1 | <i>Influência do avanço e da profundidade de corte sobre formação do cavaco</i> | 24 |
| 3.8.2 | <i>Desgaste em ferramentas de usinagem</i> | 25 |
| 3.9 | FLUIDOS DE CORTE | 28 |
| 3.9.1 | <i>Tipos de fluidos de corte</i> | 28 |
| 3.9.2 | <i>Influências do fluido de corte</i> | 28 |
| 3.10 | RUGOSIDADE..... | 29 |
| 4 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 29 |
| 4.1 | DENSENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS DE USINAGEM | 29 |
| 4.1.1 | <i>Corpos de prova</i> | 29 |
| 4.1.2 | <i>Preparação dos ensaios</i> | 30 |
| 4.1.3 | <i>Descrição dos ensaios</i> | 31 |
| 4.1.4 | <i>Máquinas-Ferramentas e insertos utilizados nos ensaios</i> | 32 |
| 4.2 | MEDIÇÕES E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO | 34 |
| 4.2.1 | <i>Medição de rugosidade</i> | 34 |
| 4.2.2 | <i>Medição dos desgastes dos insertos por microscópio</i> | 35 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 36 |
| 5.1 | RUGOSIDADE E TIPO DE CAVACO..... | 36 |
| 5.2 | DESGASTE..... | 37 |
| 5.2.1 | <i>Desgaste ferramenta de metal duro</i> | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.2.2 | <i>Desgaste inserto de alumina</i> | 38 |
| 6 | CONCLUSÕES | 42 |
| 6.1 | CONCLUSÕES SOBRE A RUGOSIDADE..... | 42 |
| 6.2 | CONCLUSÕES SOBRE O DESGASTE | 42 |
| 6.3 | CONCLUSÕES COMPARATIVAS..... | 42 |
| | REFERÊNCIAS | 43 |

1 INTRODUÇÃO

Estudos aprofundados nos processos de usinagem se iniciaram no século XIX e se difundiram no mundo inteiro, muito recurso financeiro e horas de desenvolvimento são gastos por ano em busca de melhorias em diversas áreas. A área aeronáutica é uma das áreas em que se investe muito em busca de tecnologia que contribua para qualquer que seja a melhoria na eficiência do processo de fabricação, tendo em vista que o valor agregado de uma aeronave é suficientemente alto e permite este investimento. Desde os meados do século XX houve uma transformação enorme a respeito dos materiais utilizados na aviação, se iniciando com madeira, tecidos de algodão e seda, os quais foram substituídos por estruturas metálicas, materiais compostos entre outros. O impulso inicial para o desenvolvimento de materiais cada vez mais leves e resistentes pode ser atribuído grande parte à Força Aérea Americana, que buscou inovações para a fabricação de caças assim como o F-15, F-16 e F-18. Houve uma notável evolução em 1986 quando se reduziu o peso estrutural metálico em 35%, e 30% de redução no consumo de combustível (HADCOCK, 1986).

Em uma aeronave o trem de pouso é uma das partes essenciais Figura 1, tendo em vista que se dedica muito estudo e tempo para projetá-lo, pois toda decolagem, pouso e movimentação da aeronave geram esforços sobre o trem de pouso, a resistência a fadiga por sua vez deve ser alta. O direcionamento da aeronave Bandeirante da Força Aérea Brasileira quando está manobrando em solo é realizado por um sistema hidráulico através de uma bomba de óleo que rotaciona o setor dentado Figura 2 que fica nos interiores do trem de pouso Figura 1 permitindo a manobra. A peça em questão sofre muito desgaste ao longo da operação da aeronave, por este motivo deve ser trocada de tempos em tempos, a fabricação do setor dentado envolve diversos processos complexos de usinagem demandando um grande uso de ferramentas-máquina, por este motivo foi selecionada a fase de desbaste da matéria-prima onde se tornea uma boa parcela do material. Na fase de desbaste inicialmente se utilizou a ferramenta de metal duro atingindo uma rugosidade máxima especificada pelo projetista, em seguida utilizamos uma ferramenta de alumina para podermos comparar as diferenças, como por exemplo a formação de cavaco, a rugosidade e o desempenho.

Figura 1 - Aeronave Embraer EBM-110 e seu respectivo trem de pouso



Fonte: O Autor

Figura 2 - Setor dentado do trem de pouso



Fonte: O Autor

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o estudo da usinagem por torneamento do aço ABNT/AISI 4340, utilizando ferramentas cerâmicas de alumina (Al_2O_3) desenvolvida em laboratório e uma ferramenta de metal duro comercial para análise comparativa, visando à otimização da usinagem desta liga e buscando proporcionar aumentos reais de produtividade sem a necessidade de investimentos em novos meios de produção.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇOS BAIXA LIGA

Os aços chamados ARBL – São aços baixo carbono ou aço carbono-manganês, conhecidos como de alta resistência e baixa liga e foram desenvolvidos para uso em grandes estruturas, não apresentando, entretanto, aumento de peso. Estes aços são também conhecidos pela sigla em inglês HSLA – High Strength Low Alloy. Estes aços apresentam como principais características uma alta resistência mecânica em relação aos aços de uso geral, resistência à corrosão atmosférica, ao choque e à fadiga, além de apresentarem uma maior relação entre limite de escoamento e limite de resistência à tração sem perda apreciável da ductilidade.

Esses aços microligados, em cuja fabricação a laminação controlada desempenha um papel vital, permitiu a produção de aços para estruturas, com tamanhos de grãos inferiores a 10 μm , níveis de resistência, entre 400 e 600 MPa e baixas temperaturas de transição. Nesses aços, aos quais se adicionam pequenas concentrações ($< 0,1\%$) de nióbio, vanádio ou titânio, o teor de carbono é geralmente inferior a 0,15%, sendo freqüentemente inferior a 0,10%. Por isso os carbonetos ocupam uma pequena fração volumétrica. Por outro lado, a cementita, que forma partículas relativamente grosseiras ou lamelas na perlita, é parcialmente substituída por dispersões muito mais finas de carbonetos de liga, como NbC (HONEYCOMBE, 1981).

3.2 AÇO ABNT/AISI 4340

A classe de aços ultra-resistentes foi desenvolvida para aplicação aeroespacial, mas estendeu-se a outros setores da indústria. Apresentam limite de escoamento superior a 1.400 MPa, boa tenacidade, elevada resistência à fadiga, boa soldabilidade e alta relação resistência/massa específica. Um aço do tipo ABNT/AISI 4340 de ultra-alta resistência, temperado em óleo e revenido a 427°C (T&R 427) possui resistência à tração em torno de 1.590 MPa e limite de escoamento de 1.370 MPa. Aços de baixa e média liga, ultra-resistentes podem atingir valores de resistência a tração da ordem de 1.900 MPa quando devidamente temperados e revenidos, como é o caso do aço ABNT/AISI 4340 temperado e revenido entre 200°C e 230°C, usados em componentes de trem de aterrissagem de aviões. O inconveniente é a baixa ductibilidade em torno de 14% de alongamento, que pode ser parcialmente sanada com adição de elementos de liga. O aço AISI 4340 foi modificado com adição de Mo, V e Si atingindo assim resistência da ordem de 2.100 MPa, utilizados em temperaturas próximas da ambiente (RANIERI, 2010).

AISI / SAE 4340 aço é considerado o padrão pelo qual os outros aços de ultra-alta resistência são comparados. Ele combina profunda temperabilidade com alta ductibilidade, tenacidade e força. Tem alta resistência à fadiga. A fragilização por hidrogênio é um problema para 4340 tratados termicamente para resistência à tração superior a cerca de 1400 MPa (200 ksi). Peças expostas a hidrogênio, tais como durante decapagem e metalização, deve ser tratado posteriormente. Este aço quando tratado termicamente adquire uma resistência à tração de 1500 a 1950 MPa (220 a 280 ksi). Pode ser prontamente nitretado, que frequentemente melhora a vida de fadiga.

O aço 4340 é normalmente forjada a 1065-1230 ° C (1950-2250 ° F); depois de forjamento pode ser resfriado ao ar em local seco ou, de preferência arrefecida no próprio forno. A classificação de usinabilidade de 4340 é de 55% para o material estirados, e 45% para o material recozido (B1112

laminado a frio, 100%). Uma estrutura parcialmente esferoidizada obtidas normalizando e depois temperando a 650 ° C (1200 ° F) para uma melhor usinabilidade. O aço 4340 tem boas características de soldadura. Pode deve ser usado gás ou soldada de arco, mas de soldadura hastes da mesma composição.

3.2.1 Aplicações do aço ABNT/AISI 4340

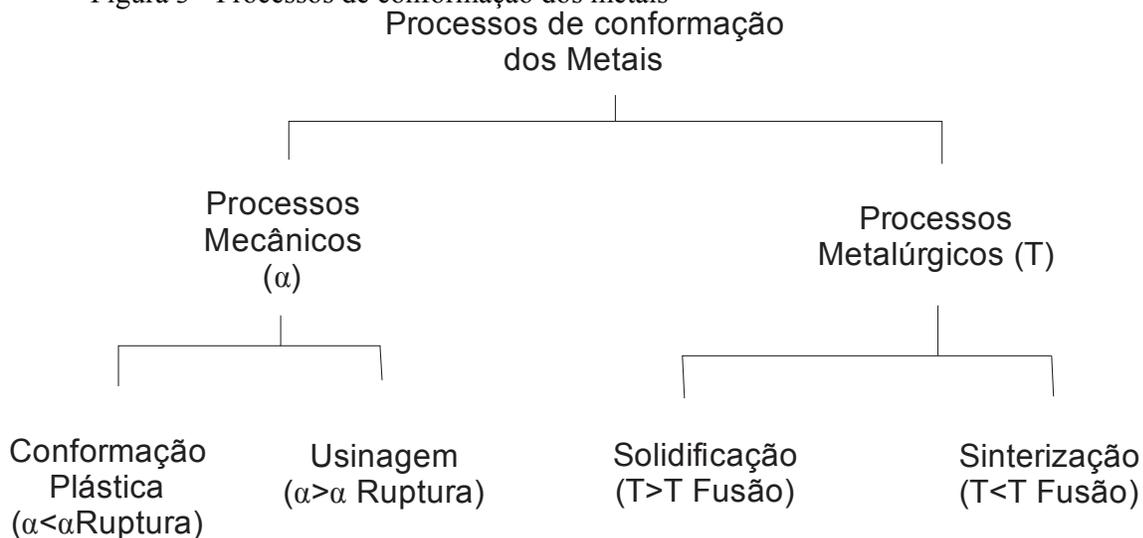
O aço 4340 é ampla e facilmente disponíveis como tarugos, barras, haste, peças forjadas, chapas, tubos e arame de solda. As aplicações típicas incluem parafusos, porcas e outros elementos de fixação; engrenagens, pinhões, eixos, e componentes semelhantes; virabrequins e bielas para motores; e trem de pouso e outros membros críticos para as aeronaves. Ele é frequentemente usado onde existem condições severas e onde é necessária alta resistência em perfis pesados.

3.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Fabricação é o ato de transformar matérias-primas em produtos acabados através de diversos processos, seguindo planos bem organizados em todos os aspectos.

Os processos de usinagem são classificados em três formas: Usinagem com ferramenta de Geometria Definida, Usinagem com Ferramenta de Geometria Não Definida e Usinagem por processos não convencionais (LIMA, 2015). Na Figura 3 pode-se observar os diversos processos de conformação dos metais.

Figura 3 - Processos de conformação dos metais



Fonte: O autor

3.4 FUNDAMENTOS DA USINAGEM

O fundamento da usinagem se dá pela remoção de material através da interferência entre ferramenta e peça, sendo a ferramenta constituída de um material de dureza e resistência muito superior a do material da peça, assim dando à peça: forma, dimensões ou acabamento superficial, ou ainda uma combinação destes, através da remoção de material sob forma de cavaco. Cavaco é a porção de material da peça retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma irregular.

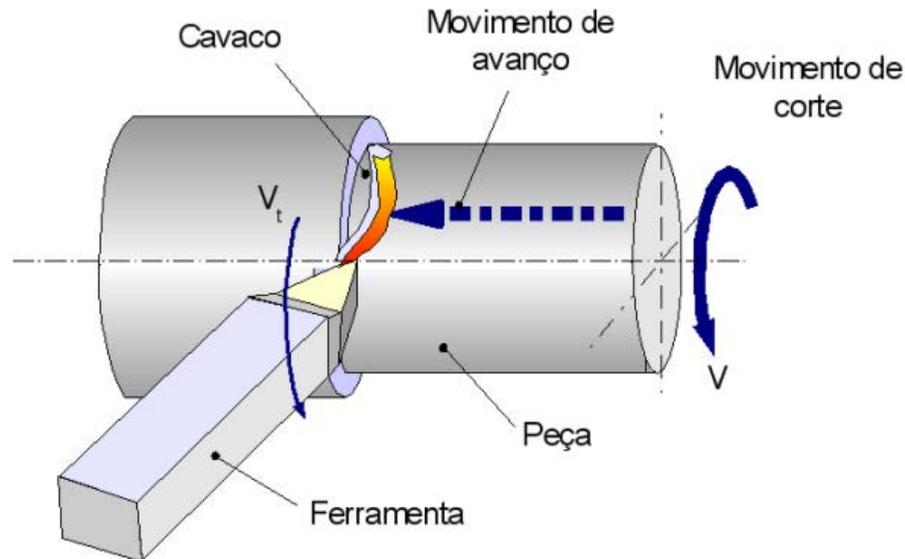
A maior parte dos produtos industrializados em alguma de suas etapas de produção sofre algum processo de usinagem como seguem alguns exemplos:

- 80% dos furos são realizados por usinagem
- 100% dos processos de melhoria da qualidade superficial são feitos pro usinagem
- O comércio de máquinas-ferramentas representa uma das grandes fatias da riqueza mundial.

- 100% dos pinos médico-odontológicos (STOETERAU, 2012)

O princípio dos elementos para um torneamento se encontram na [Figura 4](#)

Figura 4 - Cinemática da usinagem com ferramenta de geometria definida

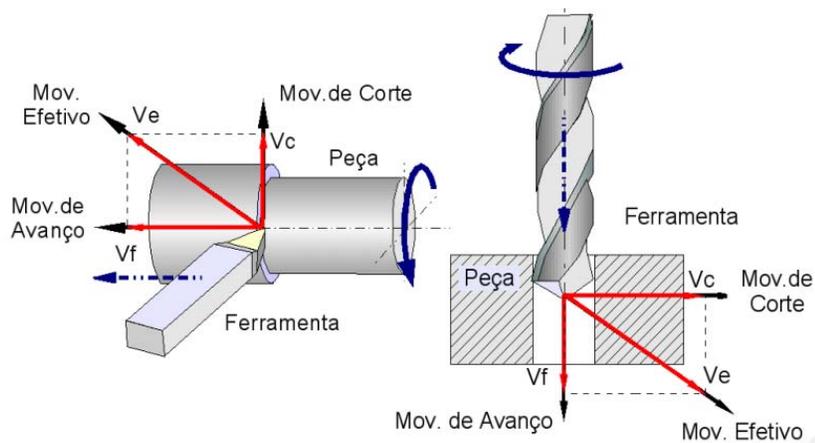


Fonte: (LIMA, 2015)

3.4.1.1 Grandezas do processo de usinagem

Os movimentos entre ferramenta e peças são caracterizados pelas grandezas do processo de usinagem. As grandezas do processo de usinagem durante a usinagem são aqueles que permitem a caracterização do processo de usinagem.

Figura 5 - Grandezas do processo de Usinagem



Fonte: (LIMA, 2015)

- Velocidade de Corte (V_c)

A velocidade de corte é o resultado do deslocamento da ferramenta diante da peça, considerado no tempo, para operações do tipo do aplainamento e brochamento, nas quais o movimento de corte e de avanço não ocorrem concomitantemente. A velocidade de corte é a

velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, para as operações do tipo torneamento, fresamento ou furação, onde os movimentos de corte e de avanço ocorrem concomitantemente. Para estes últimos, a velocidade de corte é calculada pela Equação (1)(DINIZ; COPPINI, 2008) :

$$V_c = \frac{\tau * d * n}{1000} \quad [\text{m/min}] \quad (1)$$

τ : 3,14159

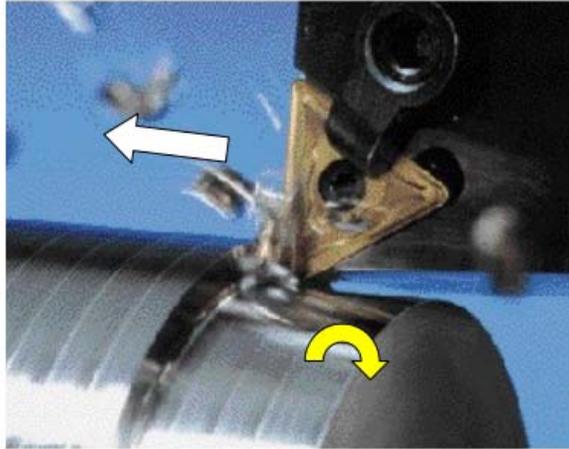
d : metros diâmetro da fresa

n : rotação/min da fresa

3.5 TORNEAMENTO

Processo de usinagem onde a peça executa o movimento de corte rotativo e a ferramenta o movimento de translativo de avanço Figura 6. Geralmente utilizado na fabricação de peças simétricas de revolução.

Figura 6 - Ilustração torneamento

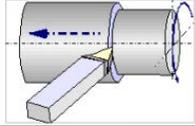
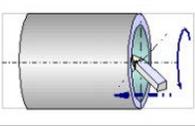
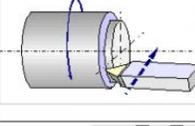
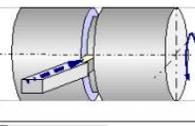
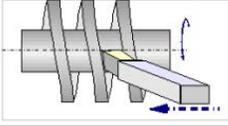
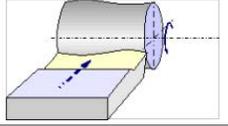
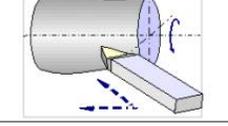


Fonte: (LIMA, 2015)

3.5.1 Principais operações no torneamento – DIN 8589 (8589, 2003)

Existem inúmeras formas de torneamento dependendo da complexidade da peça usinada, segue a Tabela 1 que ilustra os principais tipos de torneamento.

Tabela 1 - Operação de torneamento

| <i>Operação de torneamento</i> | <i>Externo</i> | <i>Interno</i> |
|--------------------------------|--|--|
| Longitudinal |  |  |
| Plano ou transversal | <i>Faceamento</i>  | <i>Sangramento</i>  |
| Helicoidal |  | |
| de forma |  | |
| de perfil |  | |

Fonte: (LIMA, 2015)

3.6 FERRAMENTAS DE CORTE PARA TORNEAMENTO

Ferramentas de corte são compostas de uma parte cortante e de uma haste para fixação, podem ser integrais ou com insertos exemplos ilustrativos na Figura 7. Os insertos podem ser fixados à haste mecanicamente ou por brasagem.

Figura 7 - Exemplos de ferramentas para torneamento



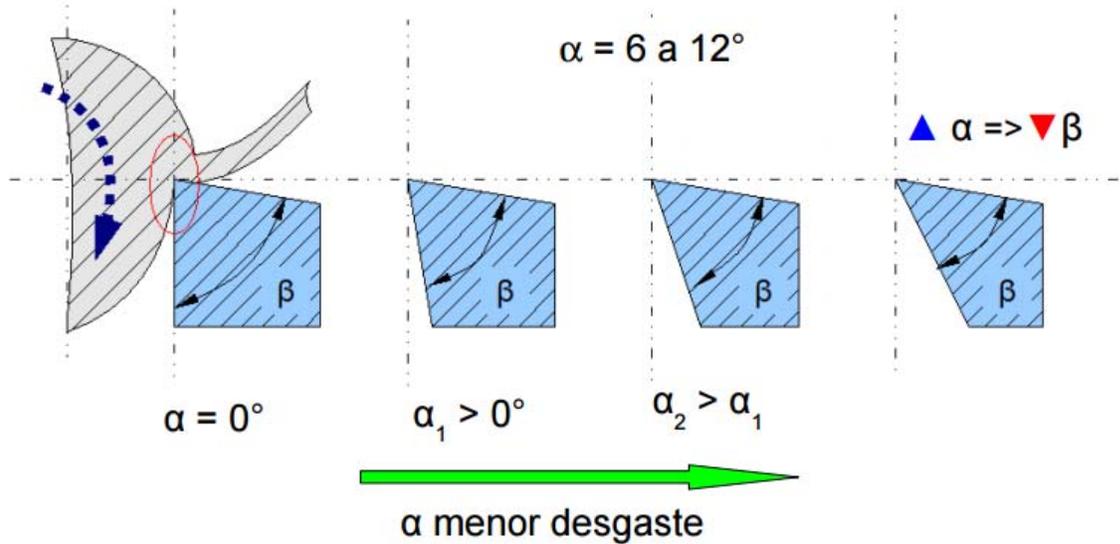
Fonte: (LIMA, 2015)

3.6.1 Influências da geometria da ferramenta de torneamento

A geometria da ferramenta pode influenciar muitos fatores no torneamento vide Figuras 8 e 9.

α = ângulo de folga, reduz o atrito entre a superfície de folga e a peça e melhora a estabilidade da aresta de corte.

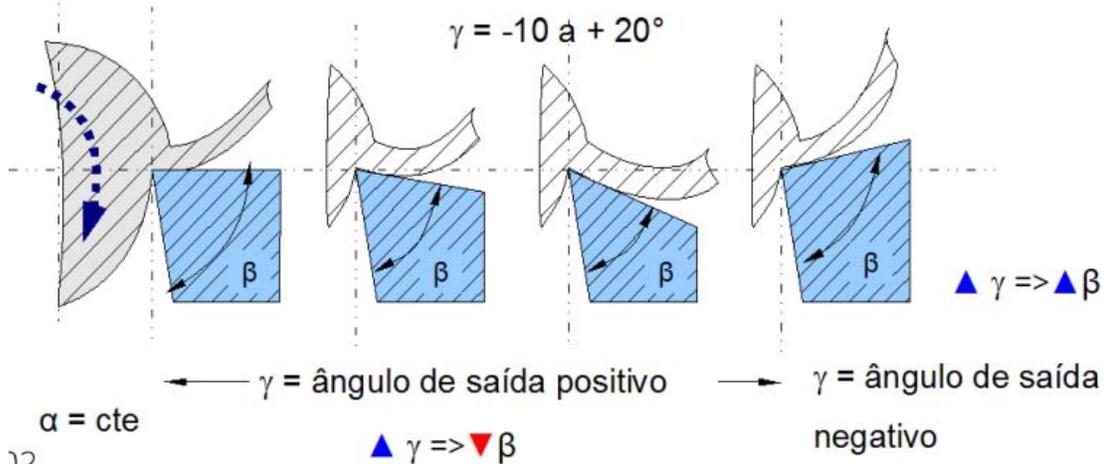
Figura 8 - Esquema do ângulo de folga



Fonte: (LIMA, 2015)

γ = Ângulo de saída, melhora a formação do cavaco, melhora a superfície gerada na peça, reduz a força de corte (trabalho de dobramento do cavaco), facilita o escoamento do cavaco sobre a face.

Figura 9 - Esquema do ângulo de saída



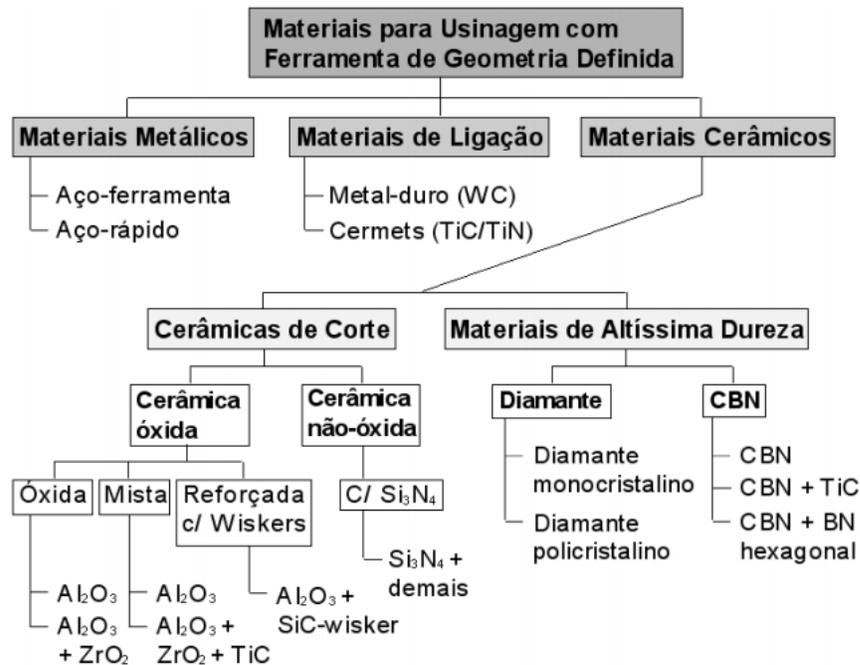
17

Fonte: (LIMA, 2015)

3.7 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE FERRAMENTAS

O torneamento pode ser realizado com diversos materiais de ferramentas na Figura 10 pode se visualizar os tipos e seus respectivos usos.

Figura 10 - Classificação dos materiais de ferramentas

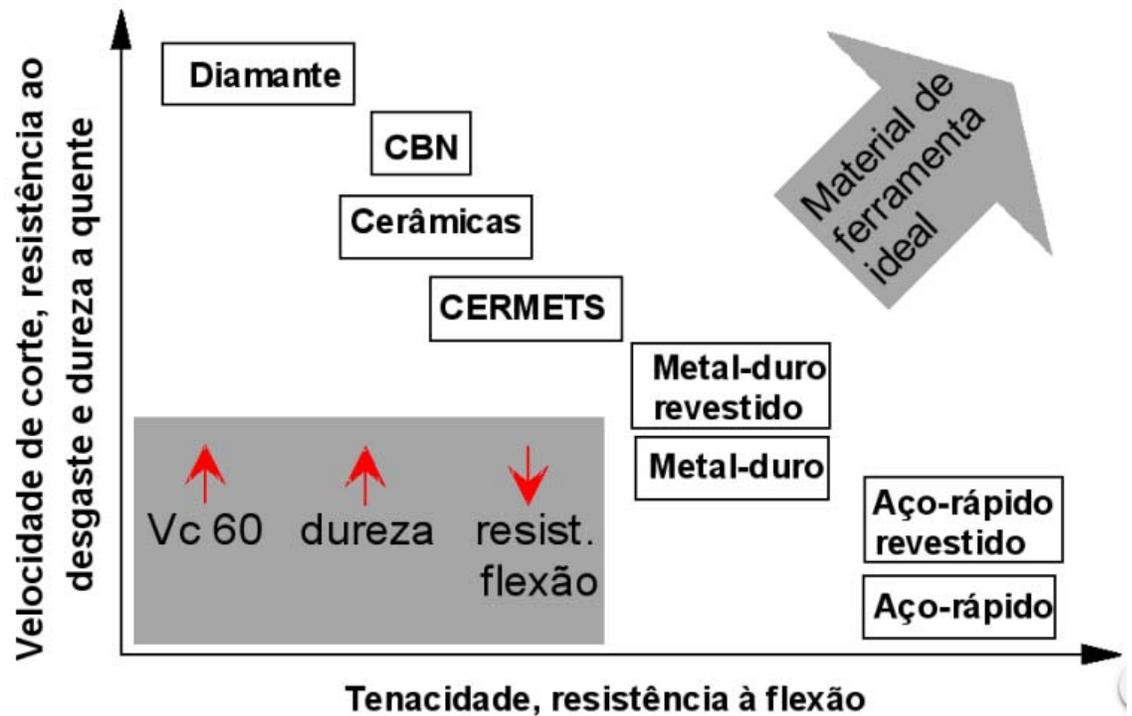


Fonte: (LIMA, 2015)

3.7.1 Propriedades dos materiais de ferramentas

Os diversos fatores que influenciam na escolha do material da ferramenta está ilustrada abaixo na Figura 11.

Figura 11 - Propriedades dos materiais de ferramentas



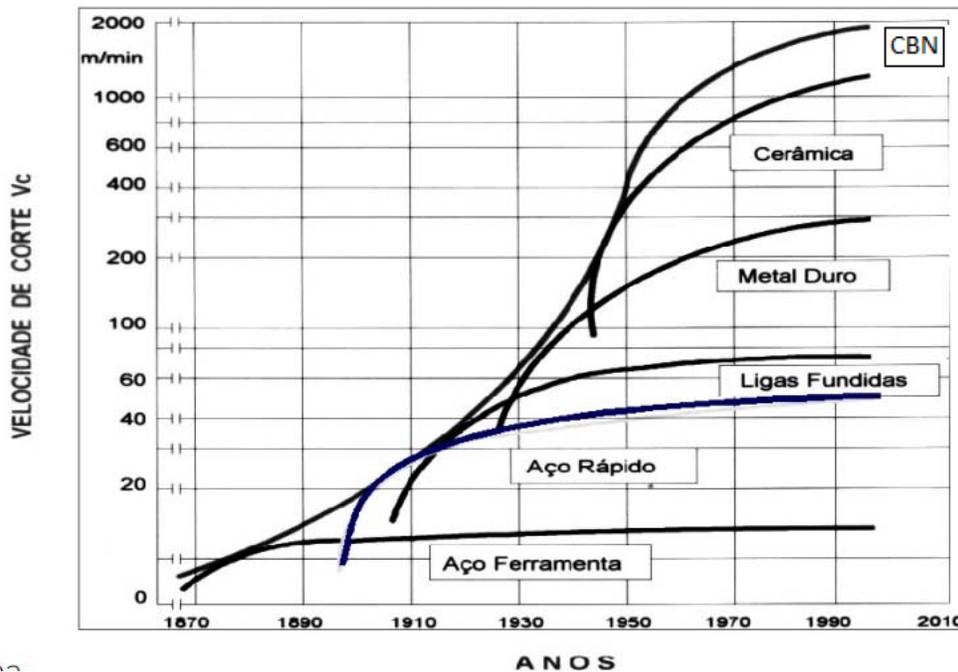
Fonte: (LIMA, 2015)

Como pode-se observar a Figura 11 relaciona e orienta ao mesmo tempo o material de ferramenta ideal que deve ser utilizado dependendo das variáveis.

3.7.2 Evolução dos materiais de ferramenta

Ao longo dos anos se desenvolveram muitos tipos de ferramentas para aumentar a produtividade e assim elevar a eficiência. Na Figura 12 é possível verificar os tipos de materiais e a recomendação da velocidade de corte.

Figura 12 - Evolução dos materiais de ferramenta



Fonte: (LIMA, 2015)

O aço ferramenta passa a ser utilizada por volta de 1868, e é empregada até os dias de hoje, por oferecer diversas vantagens tais como: baixo custo, facilidade de afiação, tratamento térmico relativamente simples entre outros.

Com a chegada dos aços rápidos foi possível realizar a usinagem em elevadas temperaturas (520°C a 600°C). Iniciou-se a utilização dos mesmos com cobertura de TiC e TiN, acrescentando propriedades como: alta dureza, elevada ductilidade e quimicamente inerte.

Após 26 anos (1926), através da metalurgia do pó surgem as ferramentas de metal duro, que são sinterizados de partículas duras tais como: carboneto de titânio, ferro níquel cobalto e tântalo, tungstênio e nióbio.

Cerâmicas passam a ser empregadas como ferramenta em 1938, apresentando altas velocidades de corte, elevada estabilidade química e resistência à compressão.

Por volta da década de cinquenta obtido sinteticamente, com transformação de estrutura hexagonal para cúbica (pressão + temperatura), surgem as ferramentas de nitreto de Boro (CBN), quimicamente mais estável que o diamante (até 2000 graus) e segundo material de maior dureza conhecido.

3.7.3 Funções dos revestimentos

- Proteção do material de base da ferramenta
- Redução de atrito na interface cavaco/ferramenta
- Aumento da dureza na interface cavaco/ferramenta
- Condução rápida de calor para longe da região de corte
- Isolamento térmico do material de base ferramenta

3.7.4 Aplicações das ferramentas de corte de alumina

Cerâmicas: são constituídas basicamente de grãos finos de Al_2O_3 e Si_3N_4 sinterizados, a velocidade de corte de 3 a 6 vezes maiores que a do metal duro. Elas se dividem basicamente em dois grandes grupos:

- A base de Al_2O_3 (Alumina sinterizada);
- A base de Si_3N_4 (mesma resistência ao desgaste porém com uma tenacidade superior).

Principais características das ferramentas cerâmicas:

- Capacidade de suportar altas temperaturas (materiais refratários);
- Alta resistência ao desgaste (alta dureza);
- Baixa condutividade térmica;
- Boa estabilidade química (inércia química);

No passado o principal limitador das ferramentas cerâmicas era a sua fragilidade. Hoje com a introdução no mercado de cerâmicas mistas, reforçadas com SiC (Whiskers) e a base de nitreto de silício o grau de tenacidade destas ferramentas melhorou significativamente, podendo ser usadas em cortes interrompidos (fresamento) em altíssimas velocidades de corte e avanço. No entanto, o uso de fluido de corte deve ser evitado, se requerido, deve-se usá-lo em abundância na aresta de corte (Costa; Santos, 2006).

Ferramentas de corte a base de cerâmica apresentam propriedades mecânicas e químicas excelentes, quando comparadas ao diamante, com a vantagem de serem normalmente quimicamente estáveis quando aplicadas na usinagem de metais ferrosos. Em usinagem convencional essas ferramentas se destacam pelas elevadas taxas de remoção de material, vida mais longa, alta dureza a quente e resistência ao desgaste.

Todos esses fatores permitem que a cerâmica seja aplicada também na usinagem de materiais endurecidos como aço inoxidável e aços temperados (BRUNO; et al., 2011).

Alguns aspectos inconvenientes das ferramentas de cerâmica a base de Al_2O_3 são: baixa resistência à fratura, baixa tenacidade e baixa resistência ao choque térmico que as tornam susceptíveis ao lascamento excessivo ou à fratura durante a usinagem materiais endurecidos, especialmente em condições de corte interrompido, implicando em redução na vida da ferramenta. Apesar da variedade de propriedades físicas úteis das cerâmicas a base de óxidos sinterizados através da modificação química e térmica da alumina alfa ($\alpha-Al_2O_3$) sua aplicação como ferramenta de usinagem, submetida a esforços mecânicos e condições de choque térmico, é considerada limitada devido a sua fragilidade e baixa resistência (BRUNO; JASINEVICIUS; FORTULAN, 2011).

3.7.5 Ferramenta de metal duro

3.7.5.1 Caracterização da ferramenta de metal duro

Metais duros são materiais compostos, constituídos de um ligante metálico dúctil (cobalto ou níquel) e de carbonetos dos metais de transição (como: W, Ti, Ta, Nb, etc). Os materiais duros são à base da dureza e da resistência ao desgaste, enquanto a função do ligante é constituir a ligação dos carbonetos frágeis, formando um corpo relativamente resistente e dúctil (KRAIN; et al., 2006).

3.7.5.2 Aplicações das ferramentas de corte de metal duro

O metal duro é o material de ferramenta mais largamente utilizado na indústria atualmente, sendo que somente a indústria automobilística consome cerca de 50% das ferramentas de metal duro produzidas no mundo. Este material apresenta melhor relação custo / benefício na maioria das aplicações em usinagem, devido à grande variedade de tipos obtidos pela adição de elementos liga e diferentes

revestimentos, o que possibilita a obtenção de propriedades adequadas às solicitações em diferentes condições de usinagem. A possibilidade da utilização de insertos intercambiáveis é também um fator positivo, tornando as ferramentas versáteis e econômicas (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

3.8 CLASSIFICAÇÃO DOS CAVACOS

Etapas de mecanismo de formação de cavaco:

1. Recalque, devido a penetração da ferramenta na peça;
2. O material recalado sofre deformação plástica, que aumenta progressivamente, até que tensões cisalhantes se tornem suficientemente grandes para que o deslizamento comece;
3. Ruptura parcial ou completa, na região de cisalhamento, dando origem aos diversos tipos de cavacos;
4. Movimento sobre a superfície de saída da ferramenta.

A Tabela 2 mostra os tipos de cavacos, bem como sua formação e a classificação de desfavorável, médio, favorável ou médio. (Costa; Santos, 2006)

Tabela 2 - Classificação dos cavacos

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------|------------|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|---------|---------|------------|
| FITA | | HÉLICE | | | | | OUTROS | | |
| FITA | EMARANHADO | HÉLICE PLANA | HÉLICE OBLÍQUA | HÉLICE LONGA | HÉLICE CURTA | HÉLICE ESPIRAL | ESPIRAL | VÍRGULA | ARRANCADOS |
| | | | | | | | | | |
| desfavorável | | médio | | favorável | | médio | | | |

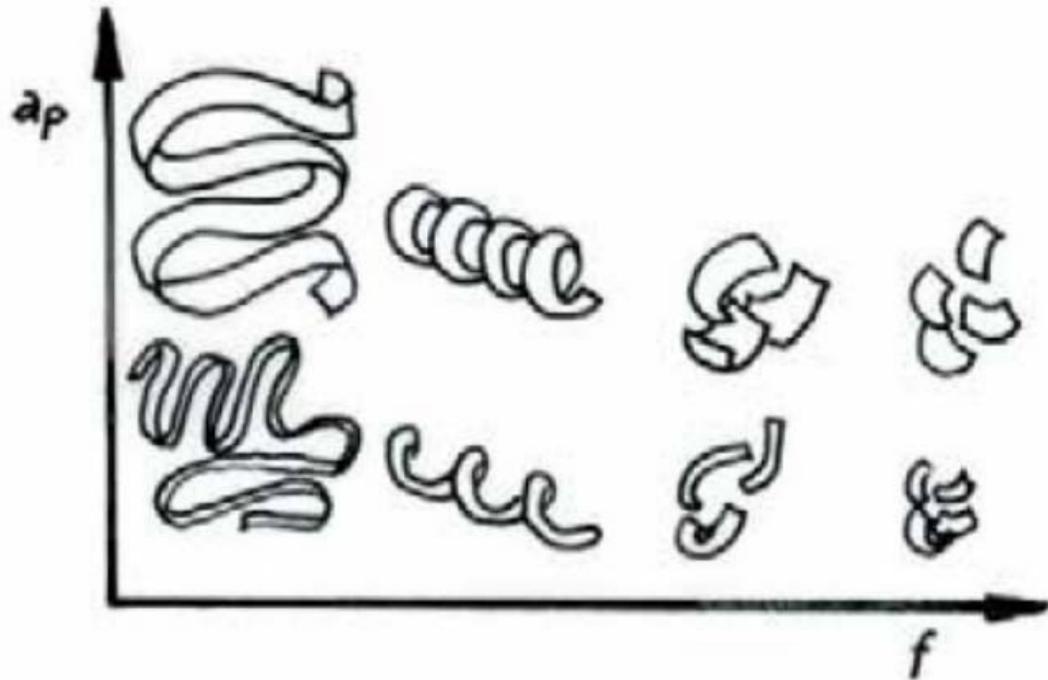
Fonte: (LIMA, 2015)

3.8.1 Influência do avanço e da profundidade de corte sobre formação do cavaco

O material da peça é o principal fator que vai influenciar na classificação quanto à forma dos cavacos. Quanto às condições de corte: maior v_c (velocidade de corte), f (avanço) e γ (ângulo de saída) tende a produzir cavacos em fitas (ou contínuos, quanto ao tipo). O “ f ” é o parâmetro mais influente e o ap é o que menos influencia na forma de cavacos. A Figura 13 ilustra a influência destes parâmetros na forma do cavaco. Os cavacos do tipo contínuos (em fita) têm sérios inconvenientes, entre eles destacam:

- Pode ocasionar acidentes, visto que eles se enrolam em torno da peça, da ferramenta ou dos componentes da máquina;
- Dificulta a refrigeração direcionada, desperdiçando o fluido de corte;
- Dificulta o transporte (manuseio);
- Ele prejudica o corte, no sentido de poder afetar, o acabamento, as forças de corte e a vida útil das ferramentas. (COSTA; SANTOS, 2006)

Figura 13 - Influência dos parâmetros sobre a formação de cavaco



Fonte: (LIMA, 2015)

3.8.2 Desgaste em ferramentas de usinagem

Os tipos de deterioração mais comuns encontrados são:

a) Desgaste frontal ou de flanco: ocorre na superfície de folga, é causado pelo contato com a peça e é o desgaste mais comum encontrado nas ferramentas.

b) Desgaste de cratera: ocorre na superfície de saída da ferramenta e é causado pelo atrito da ferramenta com o cavaco e pelas elevadas temperaturas geradas pela interface entre o cavaco e a ferramenta. Na utilização de ferramentas cerâmicas ou ferramentas de metal duro com revestimento, este desgaste é minimizado, em especial quando se utiliza revestimento à base de Al_2O_3 ;

c) Deformação plástica da aresta de corte: ocorre devido às elevadas pressões e temperaturas geradas na ponta da ferramenta, esta deformação é muito comum acontecer em ferramentas de aço rápido que não suportam elevadas temperaturas;

d) Lascamento: é o arrancamento de partículas com razoável tamanho, comuns em ferramentas com metal frágil ou com arestas de corte pouco reforçadas;

e) Trincas: são provocadas por pressões mecânicas alternadas e/ou variações bruscas e de temperatura, levando à rápida propagação e ruptura. As trincas podem ser transversais ou longitudinais;

f) Quebras: podem ocorrer por inúmeros fatores como: erro do operador, tipo de raio ou ângulos de ponta muito pequenos, carga excessiva sobre a ferramenta, dificuldade de saída de cavacos, etc.

Segundo (Diniz, 2001), os mecanismos que proporcionam estas deteriorações são:

a) Difusão: ocorre quando a usinagem atinge temperaturas elevadas proporcionando a mobilidade dos átomos da ferramenta de corte e da peça;

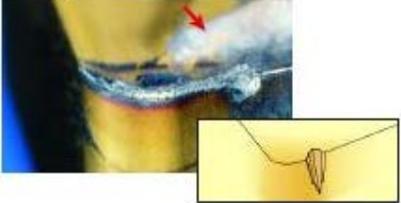
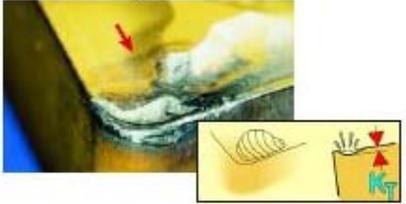
b) Aderência: ocorre entre a ferramenta de corte e a peça devido às altas temperaturas e pressões presentes na zona de corte;

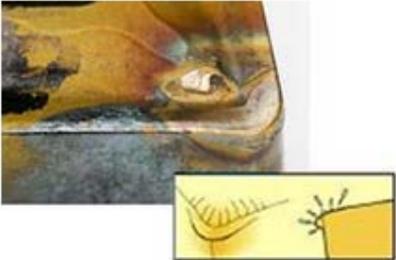
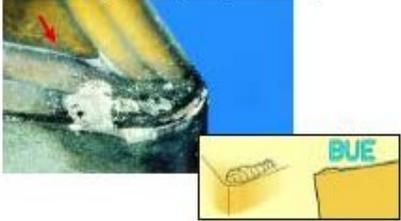
c) Abrasão: é a remoção do material via o contato entre a peça e a ferramenta de corte, através de mecanismos de micro-corte, sulcamento e trincamentos;

d) Oxidação: está sempre presente devido ao meio em que a zona de corte é encontrada, mas a mesma é potencializada pelas altas temperaturas de corte. (JÚNIOR, 2009)

Abaixo na Tabela 3 e na figura 8 é possível visualizar os tipos de desgates e suas formas de medida.

Tabela 3 - Classificação dos Desgates de Ferramentas

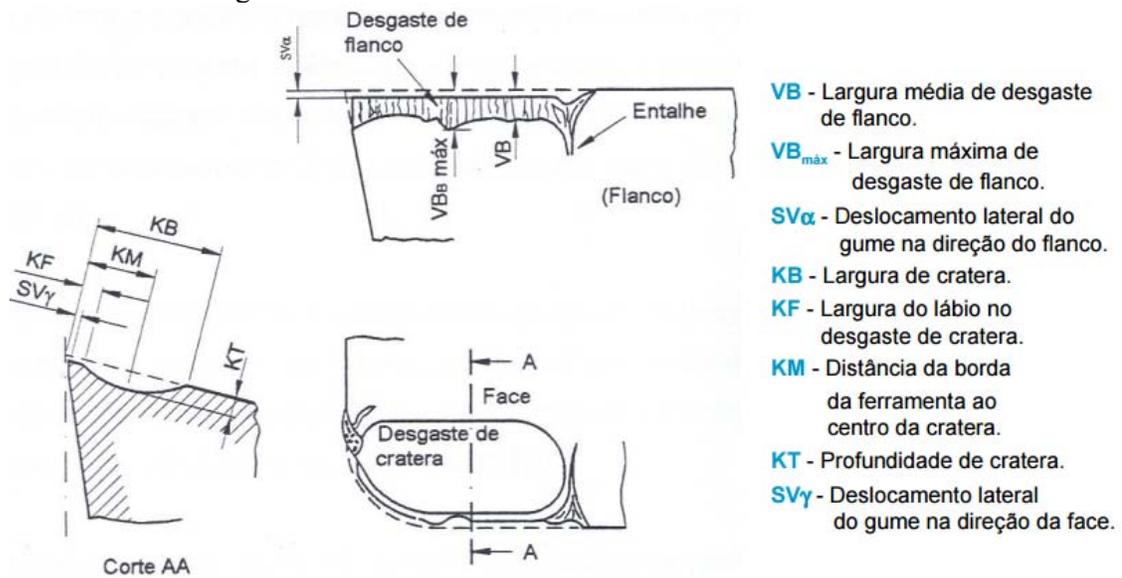
| Ilustração | Causa |
|---|---|
| <p>Desgaste de flanco</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Velocidade de corte muito alta - Classe muito tenaz - Resistência ao desgaste insuficiente - Falta de refrigeração |
| <p>Desgaste tipo entalhe</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Materiais pastosos e/ou endurecidos por trabalho - Uso de ângulo de posição $\sim 90^\circ$ - A geometria é muito negativa |
| <p>Craterização</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Velocidade de corte e/ou avanço muito alto - Classe muito tenaz - Quebra-cavacos muito estreito |

| | |
|--|---|
| <p>Deformação plástica, depressão/impressão</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Carga de calor e pressão altas, temperatura de corte muito alta - Classe muito tenaz - Falta de refrigeração |
| <p>Aresta postiça (B.U.E)</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de corte muito baixa - Solda do cavaco na pastilha - Material pastoso - Geometria muito negativa |
| <p>Lascamento fora da zona de corte</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Entupimento de cavacos devido à usinagem de encontro a cantos a 90 graus - Os cavacos são desviados contra a aresta de corte - Direção do avanço ou avanço não otimizados |
| <p>Lascamento na aresta</p>  | <ul style="list-style-type: none"> - Condições instáveis - Classe muito dura/quebradiça |

Fonte: O Autor

O desgaste de flanco pode ser mensurado através de sua largura média de desgaste de flanco (VB) ou largura máxima de desgaste de flanco ($VB_{\text{máx}}$)

Figura 7 - Medidas do desgaste

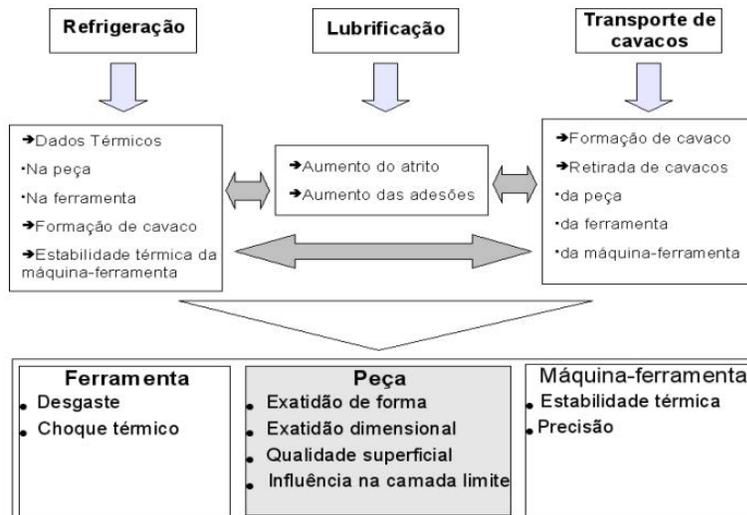


Fonte: (LIMA, 2015)

3.9 FLUIDOS DE CORTE

Na Figura 9 é possível visualizar as diversas funções dos fluidos de corte.

Figura 8 - Funções dos fluidos de corte



Fonte: (LIMA, 2015)

3.9.1 Tipos de fluidos de corte

- Não miscíveis em água ou óleos de corte
 - Óleos integrais ou minerais
 - Óleo solúvel
 - Semi-sintéticos
 - Sintético
- Miscíveis em água ou emulsões

3.9.2 Influências do fluido de corte

Durante o corte, se desenvolve grande quantidade de calor, devido a energia necessária para deformação do cavaco e a energia devido ao atrito ferramenta-peça, cavaco-ferramenta.

Reduz-se este calor através da lubrificação (diminuição do atrito) e/ ou da refrigeração, a fim de minimizar-se o desgaste da ferramenta, a dilatação térmica da peça e o dano térmico à superfície da peça (obtenção de tolerâncias apertadas e formas).

O fluido beneficia também a peça em casos de acabamento superficial e/ou de obtenção de tolerâncias apertadas.

Para obtenção de baixas rugosidades superficiais, o fluido deve apresentar boa ação lubrificante (reduzindo o atrito)(Diniz, et al., 2003).

3.10 RUGOSIDADE

A qualidade da superfície influi diretamente sobre a capacidade de resistência à corrosão, à fadiga, ao desgaste e ainda define o atrito. Para as peças submetidas a esforços ou 42 condições de trabalho crítico, o acabamento deverá ser melhor do que as peças auxiliares. Um rolamento, por exemplo, deverá ter melhor acabamento que uma simples alavanca de comando manual. Para (NUSSABAUM, 1988), a avaliação da superfície é feita por:

- Microscópicos metalográficos ou eletrônicos sobre o plano horizontal;
- Apalpadores num plano normal à superfície;
- Métodos de interferência óptica num plano oblíquo transversal.

O rugosímetro mais comum na indústria consiste num apalpador, geralmente com ponta diamantada cônica ou piramidal, com ângulo de sessenta graus e raio na ponta, que se desloca em contato com a superfície da peça.

A rugosidade é medida em micron (1/1000 mm) e dependendo do método e da norma utilizada, apresenta variações de critérios:

- Ra: É a profundidade média da aspereza superficial. Segue abaixo a Equação(2)
Aplicações: - Controle contínuo da rugosidade na linha de produção;
- Superfícies com sulcos de usinagem bem orientado (torneamentos, fresagem, etc.);
- Superfícies de pouca responsabilidade, como no caso de acabamentos com fins apenas estéticos.

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx = \frac{A}{L} \quad \rightarrow \quad Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad \text{Eq.(2)}$$

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 DENSENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS DE USINAGEM

O desenvolvimento dos ensaios foi conduzido pelas condições reais em que se tinha na fabricação de uma peça já em fabricação. Através destes parâmetros preparamos os ensaios a seguir.

4.1.1 Corpos de prova

Os materiais na Figura 10 utilizados para os ensaios são de aço ABNT/AISI 4340, com dureza média de 222,7 HV (16 HRC).

Figura 9 - Matéria-prima Aço 4340



Fonte: O autor

Destinados a fabricação de um componente do trem de pouso de uma aeronave, a cremalheira, em etapas posteriores a usinagem irá passar por tratamento térmico afim de assumir propriedades capazes de suportar altas solicitações mecânicas.

Porém os ensaios serão realizados antes do tratamento térmico. A composição química deste material está descrita logo abaixo na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição Química (% em peso) do aço AISI-SAE 4340

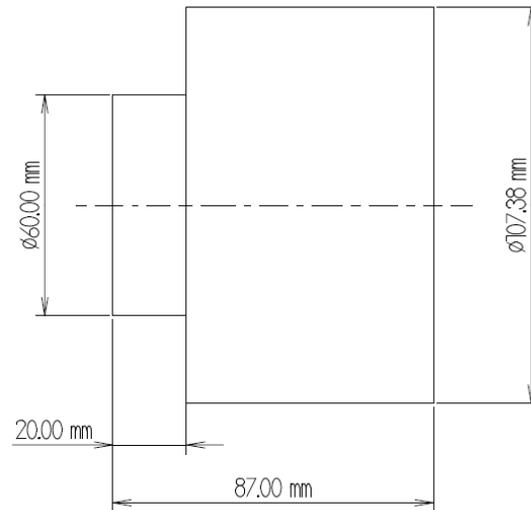
| C | Mn | P | S | Si | Ni | Cr | Mo | Cu | Al |
|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| 0,42 | 0,73 | 0,025 | 0,008 | 0,26 | 1,74 | 0,78 | 0,23 | 0,21 | 0,017 |

(MANOEL, 2011)

4.1.2 Preparação dos ensaios

A primeira atividade como preparação dos ensaios é a medição de dureza antes da usinagem dos corpos de prova, visando-se evitar que diferenças de dureza influenciem nos resultados dos testes experimentais. Antes da usinagem, os corpos de prova foram usinados todas as suas faces com as mesmas condições de corte, evitando-se a falta de concentricidade da peça. A matéria-prima utilizada como corpo de prova foi desbastada e preparada para os ensaios até as seguintes dimensões da Figura 11 :

Figura 10 - Dimensões do corpo de prova em milímetros



Fonte: O autor

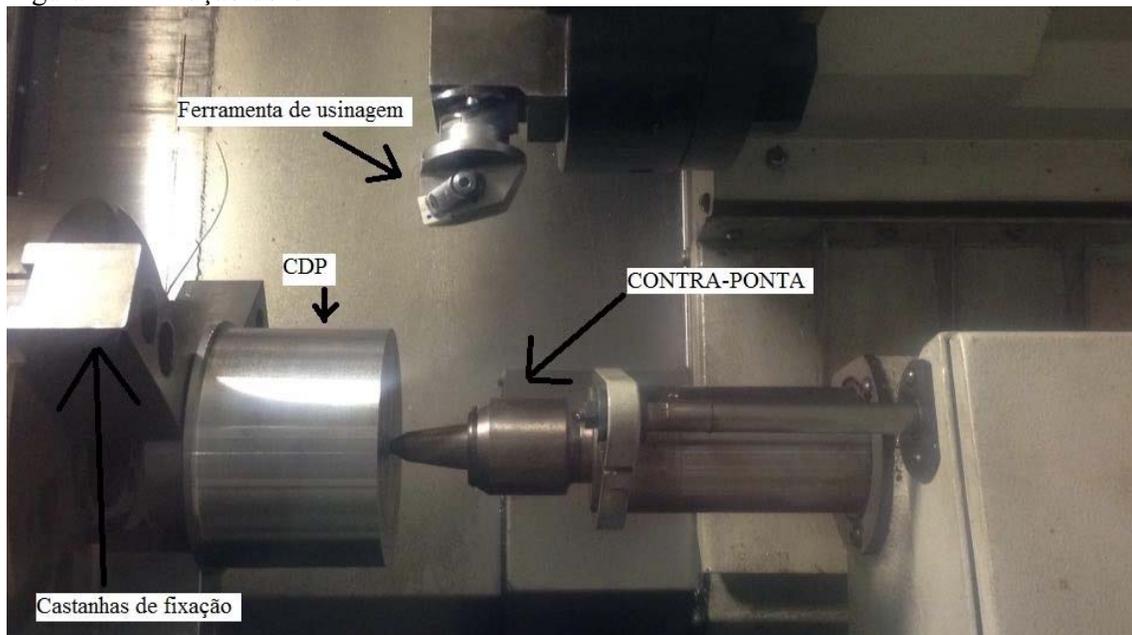
4.1.3 Descrição dos ensaios

Os corpos de prova foram submetido ao processo de torneamento, onde se desbastou uma parcela da matéria prima. Os ensaios foram realizados em tornos CNC e os parâmetros de usinagem levantados estão descritos abaixo.

4.1.3.1 Usinagem

A peça foi fixada por contra-ponta para se evitar a vibração, vide Figura 12, os parâmetros utilizados para a busca da mesma rugosidade em ambos os ensaios (ferramenta de metal duro e alumina) seguem descritos abaixo:

Figura 11 - Fixação do CDP



Fonte: O autor

4.1.3.1.1 Parâmetros do ensaio com ferramenta de metal duro

Os parâmetros utilizados nos dois ensaios da usinagem estão abaixo na Tabela 5:

Tabela 5 - Parâmetros de usinagem das ferramentas

| Metal | Testes | V_c [m/min] | a_p [mm] | f_z [mm/rot] |
|---------------------------------|--------|---------------|------------|----------------|
| Duro | 1 | 200 | 0,5 | 0,1 |
| A L U M I N A | 1 | 200 | 0,5 | 0,1 |
| | 2 | 300 | 0,5 | 0,1 |
| | 3 | 400 | 0,5 | 0,1 |
| | 4 | 500 | 0,5 | 0,2 |
| | 5 | 500 | 0,5 | 0,15 |
| | 6 | 500 | 0,5 | 0,18 |

Fonte: O Autor

4.1.4 Máquinas-Ferramentas e insertos utilizados nos ensaios

4.1.4.1 Máquina – Ferramenta e Insertos utilizados para ferramenta de metal duro

O teste realizado com a ferramenta de metal duro foi executado nas condições descritas abaixo na Figura 13.

Máquina Utilizada: Torno CNC

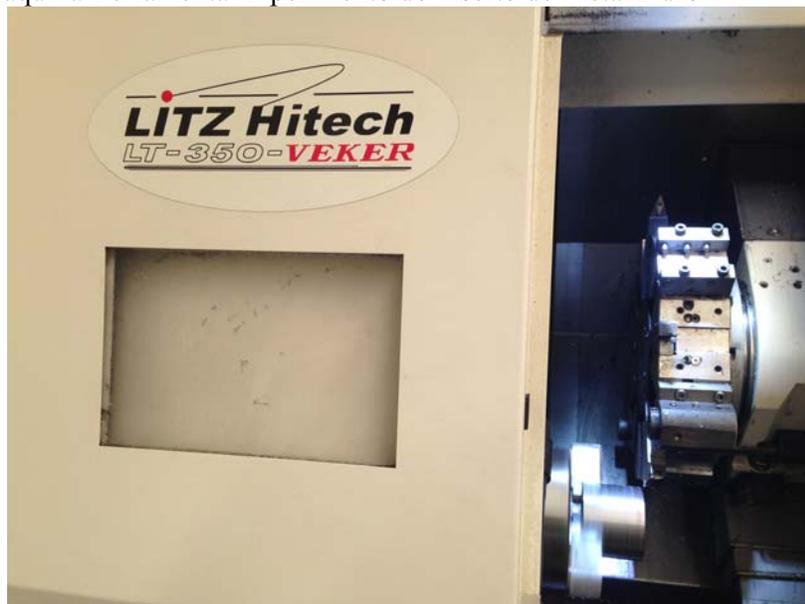
Marca: Litz Hitech

Modelo: Litz-350-VEKER

Potência: 15 KVA

Velocidade Máxima: 6000 RPM

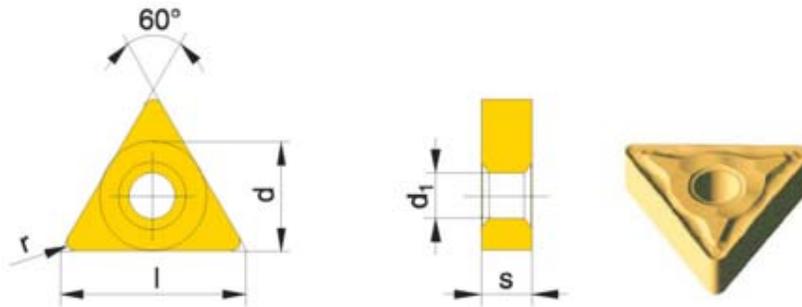
Figura 12 - Máquina-Ferramenta Experimento do inserto de Metal Duro



Fonte: O autor

A usinagem com metal duro foi realizada com insertos, modelo TNMG 160404 com cobertura de nitreto de titânio. As especificações seguem ilustrada na Figura 14.

Figura 13 - Dimensões da ferramenta de metal duro



Fonte: Catálogo Cedifer

Onde: $l = 16.50 \text{ mm}$

$d = 9.52 \text{ mm}$

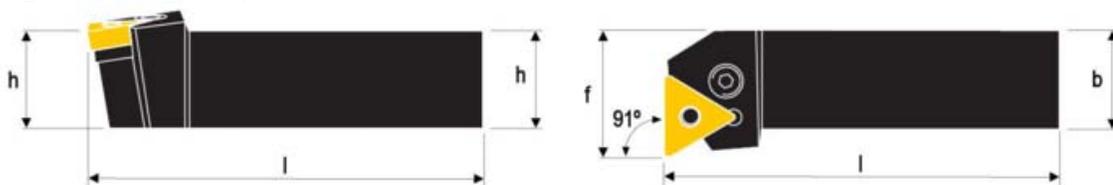
$s = 4.76 \text{ mm}$

$d1 = 3.81 \text{ mm}$

Raio = $0,4 \text{ mm}$

O modelo do suporte para a ferramenta, modelo PTFNL 1616 H16, fabricante Hard-Tools, foi utilizado para o torneamento Figura 15.

Figura 14 - Suporte para inserto de metal-duro



Fonte: Catálogo Cedifer

Onde: $h = 16 \text{ mm}$

$b = 16 \text{ mm}$

$l = 100 \text{ mm}$

$f = 20 \text{ mm}$

4.1.4.2 Máquina – Ferramenta e Insertos utilizados para ferramenta de alumina

As especificações da máquina utilizada para o ensaio da ferramenta de alumina seguem abaixo na Figura 16.

Máquina Utilizada: Torno CNC

Marca : Romi

Modelo : GL 240 Potência 18 kW

Localização: Laboratório de ensaio de usinagem FEG/UNESP

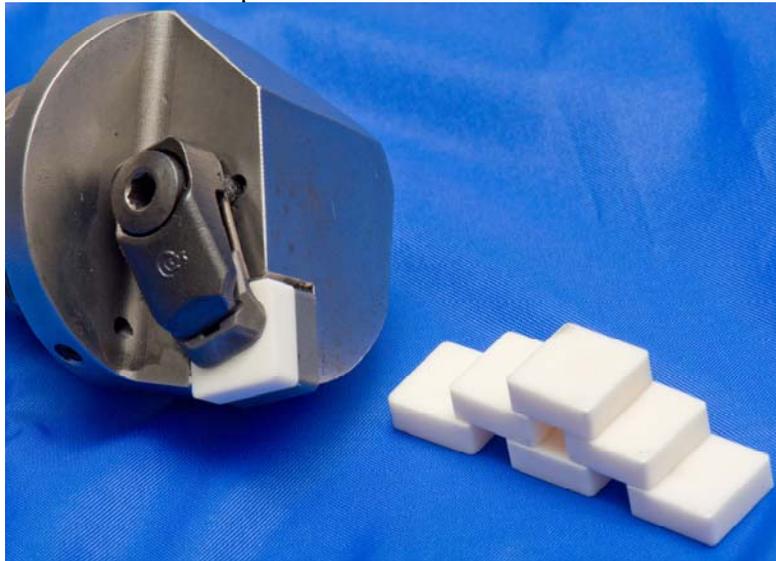
Figura 15 - Máquina – Ferramenta Experimento do inserto de alumina



Fonte: O autor

A ferramenta de Al_2O_3 foi retificada e lapidada de acordo com a norma ISO 1832, fabricada na FEG-UNESP, com as seguintes dimensões (Largura 12mm x Altura 6mm x Raio 0.8mm), e o suporte do fabricante SECO B01T90324 21139-02/15 como mostrado logo abaixo na Figura 17.

Figura 16 - Ferramenta e suporte da ferramenta de alumina



Fonte: O autor

4.2 MEDIÇÕES E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

4.2.1 Medição de rugosidade

Para a medição da rugosidade dos corpos de prova foi utilizado um rugosímetro portátil, Marca MarSurf, Modelo M300 como ilustrado na Figura 18.

Figura 17 - Rugosímetro



Fonte: O autor

Cutoff: Uso do comprimento de amostragem, dependendo da faixa de rugosidade esperada se adota um cutoff, conforme Tabela 6 abaixo:

Tabela 6 - Valor de Cutoff

| Rugosidade Ra | Cutoff |
|------------------------------------|---------|
| Menor ou igual a 0,1 μm | 0,25 mm |
| Maior que 0,1 a 2 μm | 0,8 mm |
| Maior que 2 a 10 μm | 2,5 mm |
| Maior que 10 μm | 8,0 mm |

Fonte: (Diniz, 2006)

4.2.2 Medição dos desgastes dos insertos por microscópio

O desgaste dos insertos foram identificados e medidos por um microscópio com ampliação de 10x e 20x, marca Wilson Wolpert, modelo 401 MVD, o microscópio é ilustrado na Figura 19.

Figura 18 - Microscópio 401 MVD



Fonte: Catálogo Zeiss

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e as análises dos experimentos têm como objetivo comprovar a realidade dos fatos, sendo estes fatos monitorados o máximo possível de variáveis que afetem os ensaios.

5.1 RUGOSIDADE E TIPO DE CAVACO

A rugosidade média obtida no ensaio do inserto de metal duro foi de $R_a = 0.8 \mu\text{m}$.

A rugosidade do inserto de alumina foi realizado em várias fases, as quais variaram alguns parâmetros de usinagem como (V_c e f_z). Segue abaixo na tabela 7 os resultados com seus respectivo parâmetros de usinagem.

Na tabela 7 também foi adicionado o tipo de cavaco gerado em cada ensaio.

Tabela 7 - Rugosidade dos corpos de prova

| Teste | V_c (m/min) | a_p (mm) | f (mm/rot) | R_a (μm) | Tipo de avaco | Classificação do Cavaco |
|-------|------------------|---------------|-----------------|----------------------------|----------------|-------------------------|
| 1 | 200 | 0,5 | 0,1 | 1,544 | Emaranhado | Desfavorável |
| 2 | 300 | 0,5 | 0,1 | 3,395 | Emaranhado | Desfavorável |
| 3 | 400 | 0,5 | 0,1 | 2,089 | Fita | Desfavorável |
| 4 | 500 | 0,5 | 0,1 | 0,918 | Hélice Oblíqua | Médio |
| 5 | 500 | 0,5 | 0,2 | 1,683 | Vírgula | Médio |
| 6 | 500 | 0,5 | 0,15 | 0,493 | Hélice Espiral | Favorável |

Fonte: O Autor

O “ f ” é o parâmetro mais influente na forma do cavaco e o “ a_p ” é o que menos influencia na forma de cavacos, assim sendo foi variado apenas o “ f ” e o “ V_c ”, a velocidade de corte foi variada pois o inserto de alumina apresenta uma desempenho melhor em velocidades de corte superiores ao inserto de metal duro, em busca da rugosidade igual ou menor do inserto de metal duro.

Durante a variação dos parâmetros foram obtidos diversos tipos de cavacos começando pelo emaranhado (teste 1 e 2) e a fita (teste 3) que são classificados como desfavoráveis, pelos seguintes fatores:

- Pode ocasionar acidentes, visto que eles se enrolam em torno da peça, da ferramenta ou dos componentes da máquina;
- Dificulta a refrigeração direcionada, desperdiçando o fluido de corte;
- Dificulta o transporte (manuseio);
- Ele prejudica o corte, no sentido de poder afetar, o acabamento, as forças de corte e a vida útil das ferramentas.

Já os testes 4 e 5 apresentaram cavacos em hélice oblíqua e vírgula considerados médio. Ao chegar na rugosidade desejada (teste 6) o cavaco gerado foi hélice espiral, considerado favorável, pois não é contínuo e proporcionou um ótimo acabamento superficial.

A Tabela 5 resume a média da rugosidade realizada em cada ensaio da ferramenta de alumina.

- Os valores da rugosidade (R_a) dos ensaios variam entre 0.493 e 3.395 μm
- Os valores apresentados foram médias aritméticas, onde cada rugosidade em cada ensaio, foi realizado três vezes. Como houve baixa variação dentro da média, a amostra de três medidas se dá por satisfeita.

Através da variação da V_c e da A_p , constatou-se que o corpo de prova do ensaio de número 6 obteve o melhor acabamento $R_a = 0.493 \mu\text{m}$

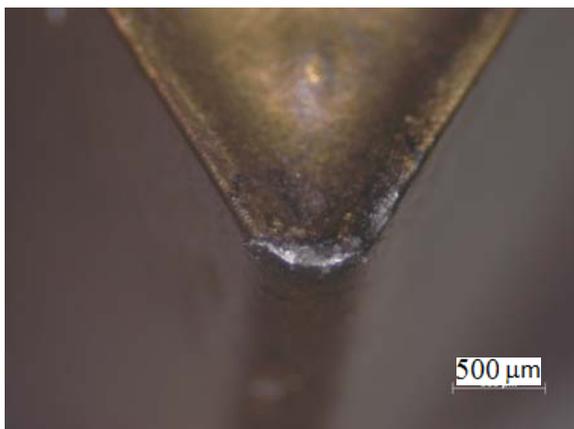
5.2 DESGASTE

A identificação e medida do desgaste do inserto foi realizada através do microscópio, vide abaixo as Figuras para uma melhor ilustração.

5.2.1 Desgaste ferramenta de metal duro

Os ensaios das ferramentas de metal duro foram analisados em duas ferramentas, segue abaixo nas Figuras 20 e 21 mostrando os desgastes e demonstrando suas dimensões :

Figura 19 - Ensaio 1 de Metal duro



(Fonte: O Autor)

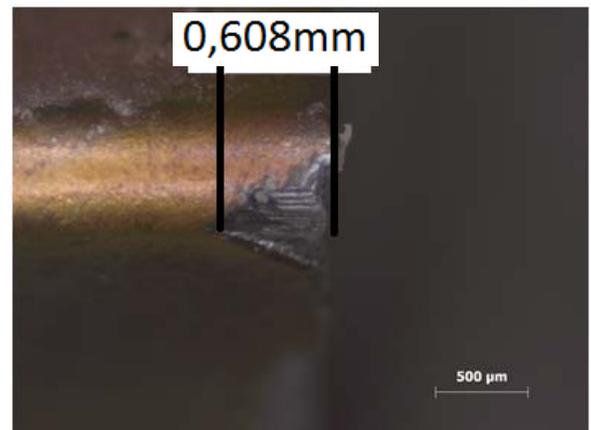
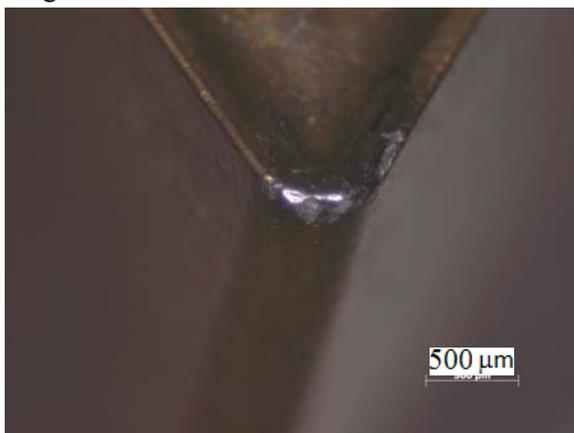
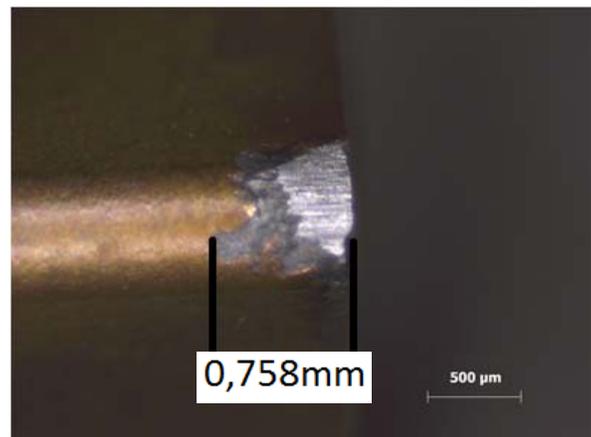


Figura 20- Ensaio 2 de Metal duro



(Fonte: O Autor)



A usinagem com inserto de cerâmica é realizada a seco, enquanto a usinagem com inserto de metal duro foi executada com o auxílio do fluido de corte. Apesar do fluido de corte auxiliar no acabamento da usinagem com metal duro, a ferramenta de alumina apresentou um desempenho melhor em relação ao parâmetro V_c atingindo um acabamento melhor que o adquirido com a ferramenta de metal duro. A velocidade de corte com a ferramenta de alumina foi aproximadamente 2,48 vezes mais rápida do que a de metal duro.

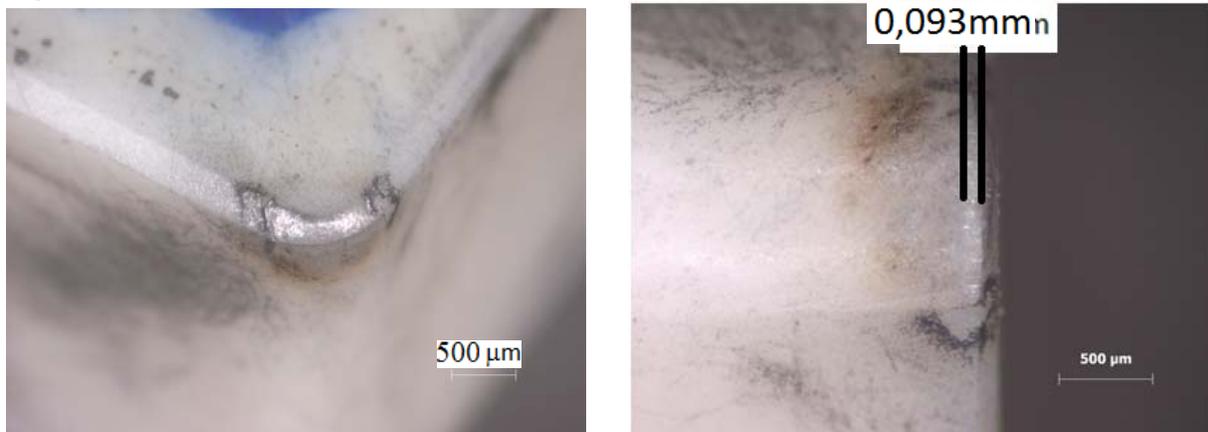
Por tanto em termos produtivos, o inserto de cerâmica possui um desempenho melhor. Porém um estudo deve ser levantado em relação as diferentes geometrias dos insertos e o custo comparativo das ferramentas de cerâmica e metal duro, para uma conclusão quanto a viabilidade comercial.

O desgaste observado em ambos os insertos através do microscópio são classificados como sendo desgaste de flanco, as medidas dos desgastes foram resumidas conjuntamente com os desgastes dos insertos de alumina e em seguida discutidos e comparados.

5.2.2 Desgaste inserto de alumina

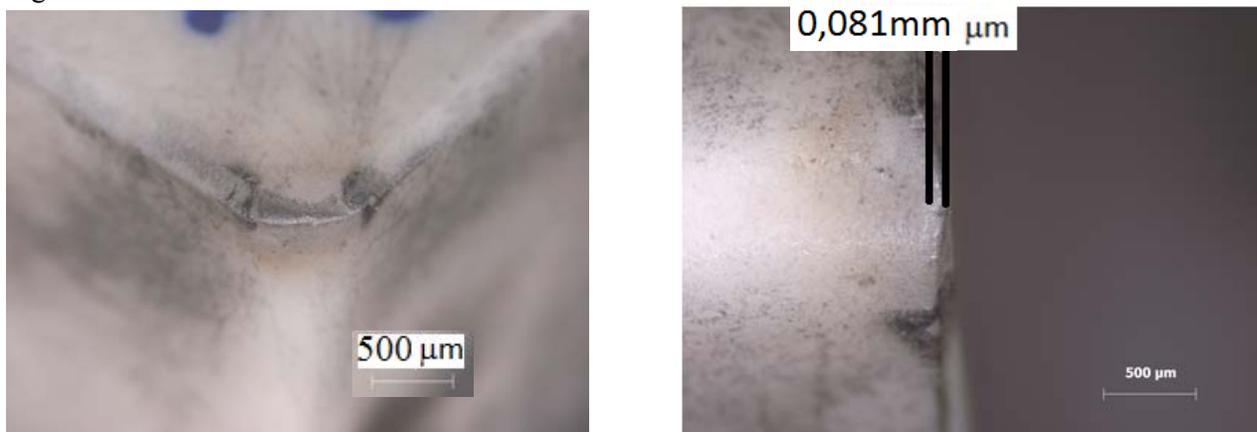
O desgaste da ferramenta de alumina foi ensaiado em 6 diferentes situações, seguem as ilustrações das fotos retiradas do microscópio com seus respectivos desgastes nas Figuras 22, 23, 24, 25, 26 e 27.

Figura 21 - Ensaio 1 de Alumina



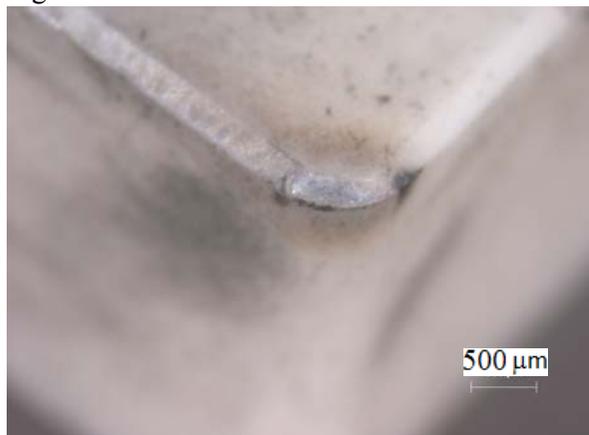
(Fonte: O Autor)

Figura 22 - Ensaio 2 de Alumina



(Fonte: O Autor)

Figura 23 - Ensaio 3 de Alumina



(Fonte: O Autor)

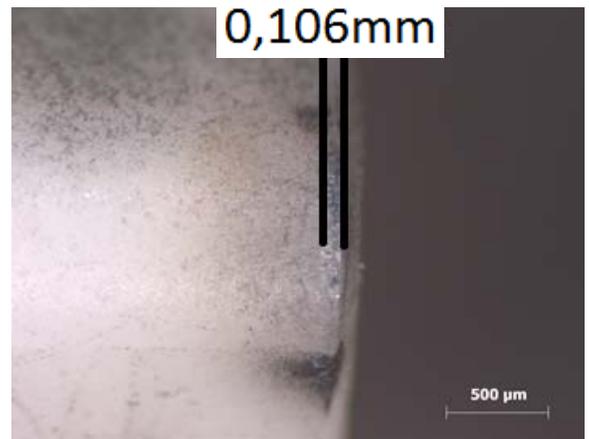
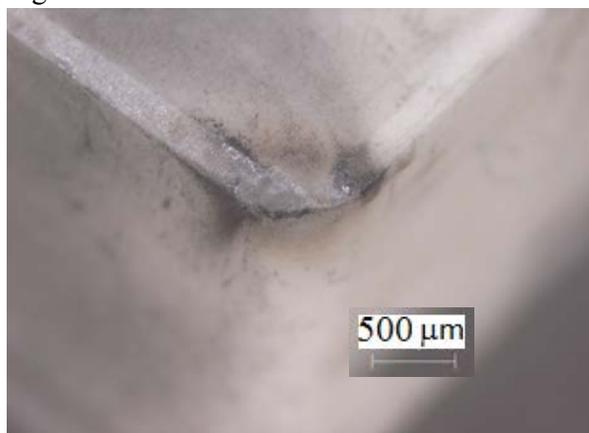


Figura 24 - Ensaio 4 de Alumina



(Fonte: O Autor)

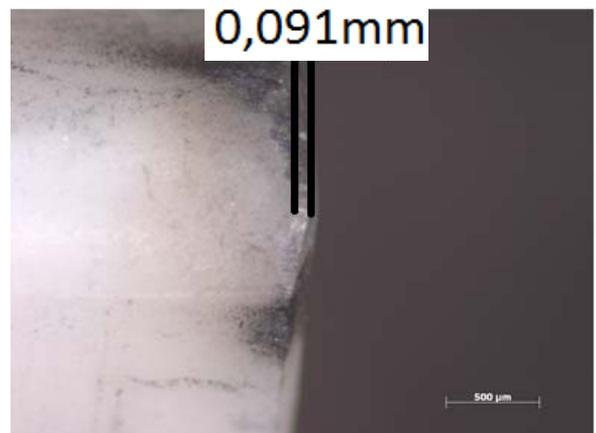
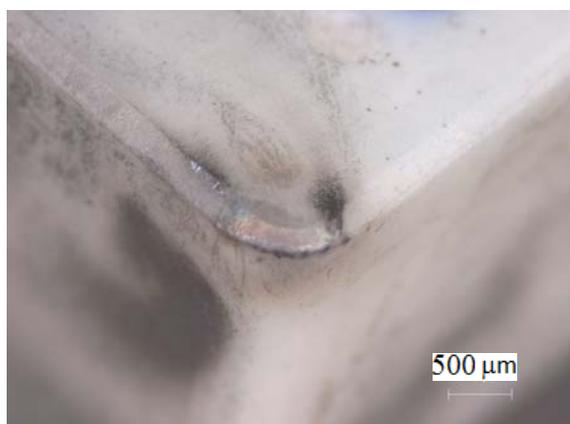


Figura 25 - Ensaio 5 de Alumina



(Fonte: O Autor)

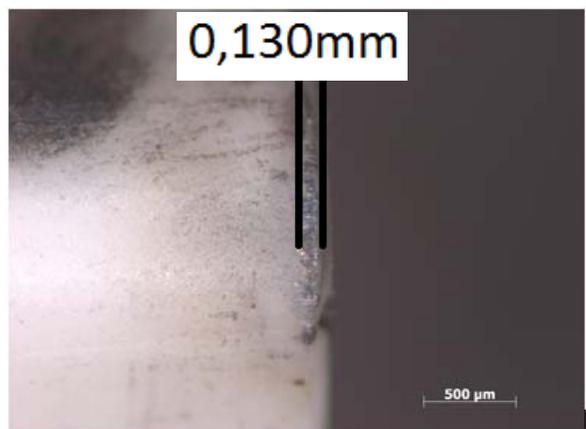
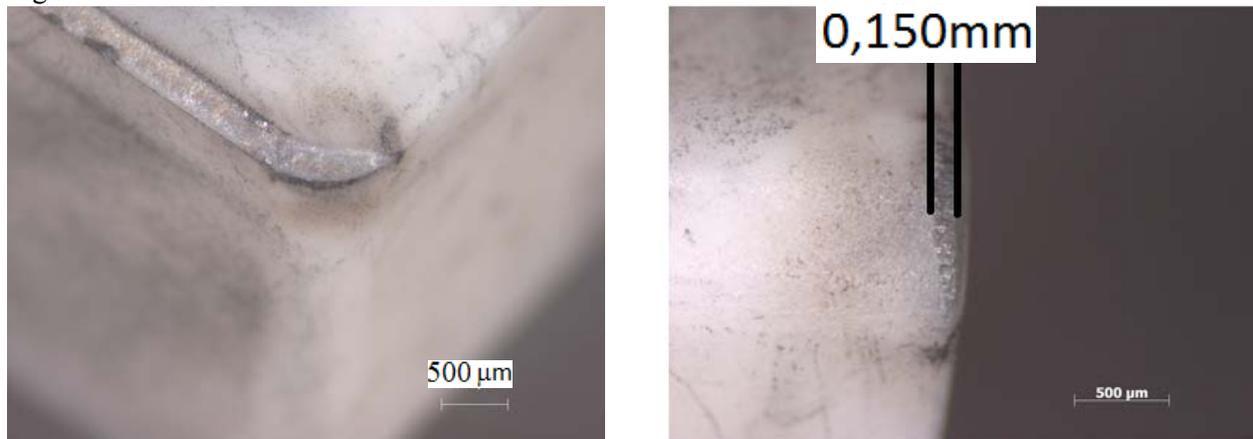


Figura 26 - Ensaio 6 de Alumina



(Fonte: O Autor)

Para uma melhor visualização dos resultados e em seguida uma discussão há um resumo na Tabela 8 abaixo:

Tabela 8 - Resumo dos desgastes nos ensaios

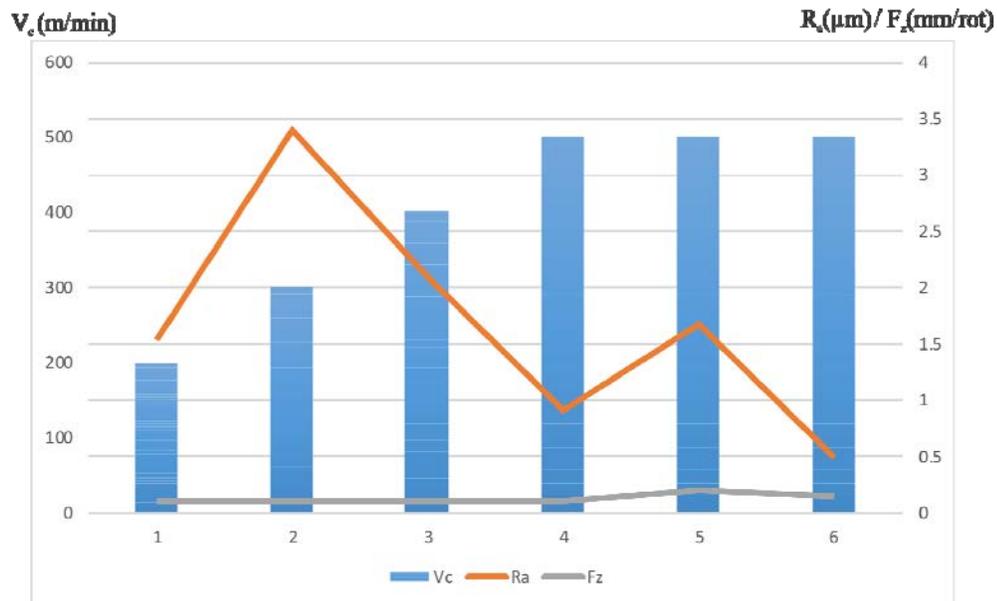
| Metal Duro | | |
|------------|------------------|------------------------|
| Ensaio | Tipo de desgaste | VB _{máx} (µm) |
| 1 | Flanco | 0,608 |
| 2 | Flanco | 0,758 |
| Alumina | | |
| Ensaio | Tipo de desgaste | VB _{máx} (µm) |
| 1 | Flanco | 0,093 |
| 2 | Flanco | 0,081 |
| 3 | Flanco | 0,106 |
| 4 | Flanco | 0,094 |
| 5 | Flanco | 0,130 |
| 6 | Flanco | 0,150 |

(Fonte: O Autor)

Observou-se através da tabela 8 que o tipo de deterioração dos inserts foram através do desgaste de flanco, ocorre na superfície de folga, é causado pelo contato com a peça e é o desgaste mais comum encontrado nas ferramentas. E o mecanismo que proporcionou a deterioração foi a abrasão, ou seja, a remoção do material via o contato entre a peça e a ferramenta de corte, através de mecanismos de micro-corte, sulcamento e trincamentos. Isto demonstra uma grande estabilidade química (ausência de difusão) por parte da ferramenta o que evita o aparecimento deste tipo de desgaste. O fato da usinagem por torneamento ser realizado com o auxílio de uma contra-ponta, minimizar os efeitos da vibração ajudando na obtenção de um melhor acabamento superficial.

A Gráfico 1 resume os desgastes ocorridos em ambos os insertos ensaiados e pode-se observar que a variação do VB máx. para a ferramenta de metal duro foi entre 0,608 a 0,758 mm. Já a ferramenta de alumina apresentou uma variação menor entre 0,081 a 0,130 mm.

Gráfico1. Comparativo entre $V_c \times R_a \times F_z$



Fonte: O Autor

As variações dos parâmetros da ferramenta e o desgaste foram confrontados com a rugosidade obtida em cada teste, e apresentadas no Gráfico 1. Inicialmente observou-se que o inserto de metal duro apresentou um desgaste médio de 0,683 mm com os parâmetros descritos pela Tabela 3, em seguida buscou-se uma rugosidade semelhante, porém desta vez utilizando um inserto de alumina. Inicialmente no Teste 1 foi ensaiado com os parâmetros próximos ao do metal duro, contudo não se obteve uma rugosidade semelhante, em seguida foi alterada a velocidade de corte onde resultados passaram a se apresentar favoráveis com menores rugosidades. Após a variação da velocidade de corte ser alterada conjuntamente com o avanço e assim se alcançou a rugosidade desejada.

6 CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES SOBRE A RUGOSIDADE

A tabela 7 resume a média da rugosidade realizada em cada ensaio da ferramenta de alumina.

As conclusões a respeito da rugosidade seguem abaixo:

- Os valores da rugosidade (R_a) dos ensaios variam entre 0.493 e 3.395 μm
- Os valores apresentados foram médias aritméticas, onde cada rugosidade em cada ensaio, foi realizado três vezes. Como houve baixa variação dentro da média, a amostra de três medidas se dá por satisfeita.
- Através da variação da V_c e da A_p , constatou-se que o corpo de prova do ensaio de número 6 obteve o melhor acabamento $R_a = 0.493 \mu\text{m}$.

6.2 CONCLUSÕES SOBRE O DESGASTE

A tabela 8 resume os desgastes ocorridos em ambos os insertos ensaiados. E as respectivas conclusões se encontram abaixo.

A variação do VB máx. para a ferramenta de metal duro foi entre 608.14 a 758.26 μm . Já a ferramenta de alumina apresentou uma variação menor entre 81.08 a 130.63 μm . Por tanto é plausível a conclusão de que a ferramenta de alumina desgastou menos que a metal duro.

6.3 CONCLUSÕES COMPARATIVAS

A usinagem com inserto de cerâmica é realizada a seco, enquanto a usinagem com inserto de metal duro foi executada com o auxílio do fluido de corte. Apesar do fluido de corte auxiliar no acabamento da usinagem com metal duro, a ferramenta de alumina apresentou um desempenho melhor em relação ao parâmetro V_c atingindo um acabamento melhor que o adquirido com a ferramenta de metal duro. A velocidade de corte com a ferramenta de alumina foi aproximadamente 2,48 vezes mais rápida do que a de metal duro.

Por tanto em termos produtivos, o inserto de cerâmica possui um desempenho melhor. Porém um estudo deve ser levantado em relação as diferentes geometrias dos insertos e o custo comparativo das ferramentas de cerâmica e metal duro, para uma conclusão quanto a viabilidade comercial.

REFERÊNCIAS

BRUNO, Danver Messias; JASINEVICIUS, Renato Goulart; FORTULAN, Carlos Alberto. **Estudo da aplicação de insertos de cerâmica avançada na usinagem de ultraprecisão em aços endurecidos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. 6., 2011, Caxias do Sul. Anais. Caxias do Sul: ABCM, 2011. 1-9p.

COLEMAN, Robert Mark. **The effects of design, manufacturing processes and operations management on the assembly of aircraft composite structure**. 1991. Tese de Doutorado. Massachusetts Institute of Technology

HADCOCK, R. N. Design of advanced composite aircraft structures. Inderscience Enterprises Ltd, **Designing With Plastics and Advanced Plastic Components**, p. 283-293, 1986. Tese de Doutorado. Massachusetts Institute of Technology

HONEYCOMBE, Robert William Kerr. **Steels--Microstructure and Properties**. Edward Arnold Ltd., xi+ 244, 23 x 15 cm, illustrated(8. 50), CRC press, 1981.

GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION. **DIN 8589**: Manufacturing Processes Chip Removal: Part 0: general, classification, subdivision, terms and definitions. Springer Berlin Heidelberg, 2003.

LIMA, P. D. E. R. S; **Fundamentos dos processos de usinagem**,2002 . Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA_RS1.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2015.

MANOEL, Paulo Afonso Franzon et al. **INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ NA RESPOSTA AO IMPULSO APLICADO EM BARRAS DE AÇO ABNT/AISI 4340 ENGASTADAS UNILATERALMENTE**. Periódico . RM Natal Jorge. Porto Porgutal

NUSSBAUM, Guillaume Ch. **Rebolos & abrasivos: tecnologia básica**. São Paulo: Icone, 1988.

PEREIRA, Fernando de Souza et al. **Torneamento em alta velocidade do ferro fundido cinzento FC 250 com ferramenta de nitreto de silício**. 2012.

RANIERI, Arus. **Caracterização mecânica e microestrutural de um aço 4340 com estrutura multifásicas e tratamento de nitrocarbonetação a plasma.** 2010. 180 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2010.