



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
ENGENHARIA DE MATERIAIS

Almir Jose Dias Valverde Junior
Felipe Gianiselle

USINAGEM DO ALUMÍNIO DA CLASSE 6005 COM USO DE
FERRAMENTA CERÂMICA

Guaratinguetá
2015



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
ENGENHARIA DE MATERIAIS

ALMIR JOSÉ DIAS VALVERDE JÚNIOR
FELIPE GIANISELLE

USINAGEM DO ALUMÍNIO DA CLASSE 6005 UTILIZANDO
FERRAMENTA CERÂMICA

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

Orientador: Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza

Guaratinguetá
2015

V215u

Valverde Junior, Almir José Dias

Usinagem do alumínio da classe 6005 com uso de ferramenta cerâmica / Almir José Dias Valverde Junior, Felipe Gianiselle – Guaratinguetá, 2015.

71 f. : il.

Bibliografia: f. 67-71

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.

Orientador: Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza

1. Usinagem 2. Ferramentas de corte 3. Ligas de alumínio 4. Cerâmica (Tecnologia) I. Gianiselle, Felipe II. Título

CDU 621.9


Almir Jose Dias Valverde Junior
Felipe Gianiselle

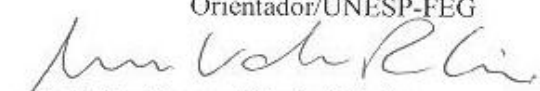
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS


Prof. Dr. Miguel Angel Ramirez Gil
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Jose Vitor Candido de Souza
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Marcos Valerio Ribeiro
UNESP-FEG


Eng. Diego de Souza Almeida
Membro Externo

Dezembro de 2015

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer meus pais, Almir José Dias Valverde e Maria Lucia Manente, por tudo que me ensinaram desde cedo, toda a educação, respeito e valores. Por ter me preparado para a vida, me ensinando a ser uma pessoa melhor a cada dia e sempre buscar meus sonhos. Agradeço a eles por todas broncas e conselhos, pelo apoio em todas as horas e por sempre me esperar com um sorriso no rosto quando eu voltava para casa. Aos meus avós que desde bebê cuidaram de mim, dando todo carinho e amor igual de uma mãe, serei eternamente grato a eles. Aos meus irmãos e todo restante da família que de alguma forma contribuiu em minha caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza, por todo o apoio, ajudas, paciência e disponibilidade para tornar esse trabalho possível, e ao Felipe Gianiselle, que além de ser um grande amigo, batalhou do meu lado todos esses anos na mesma sala e compartilhou comigo a realização desse trabalho.

A Prof. Dr^a. Maria Odila Hilário Cioffi e ao Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro pela oportunidade, desde cedo, de aprender e evoluir como aluno de iniciação científica, por todos os conselhos e paciência nos momentos de dificuldade que passei.

A minha namorada e amiga, Isadora Brandolisi, que apareceu em minha vida para me tornar a pessoa mais feliz do mundo, me ajudando em todos os momentos difíceis desta trajetória, sou infinitamente grato por todas as palavras, broncas, elogios; por todo companheirismo e força que ela sempre me deu. A entrada dela em minha vida foi, com certeza, um banho de motivação e alegria para que eu chegasse até aqui. Agradeço todos os dias por ter o privilégio de conhecê-la.

Gostaria de agradecer ao Dr. Cláudio Coy e sua equipe, que me acompanham desde o primeiro ano de faculdade, por toda dedicação ao tratar de mim e me possibilitar levar uma vida normal. Agradeço por toda preocupação e luta nos dias difíceis que passei.

A república WC-Kzona, a maior e mais querida, por todos os momentos incomparáveis em que tive a oportunidade de vivenciar desde que tive o privilégio de ser acolhido naquele lar. A honra de conhecer verdadeiros irmãos que levarei para a vida toda, Salsicha, Churros, Xiu, Currida, Marquito, Cirilo, Parede, Dutra, Guaxinim, Polengo, Muamba, Série B, Cascão, Brioco, Watchacha, Magal, Satã, Zeco, Hipolito, Pepe, Birgona, João, Tortuga, Patrick, Tapado. Agradeço também a todos ex-moradores pelas inúmeras histórias compartilhadas e pelas amizades que pude construir, apesar de não ter tido a oportunidade de morar junto com eles. Sou um cara de sorte por ter vivido todos esses anos

nesse círculo de amizade, onde acima de qualquer coisa prevalecia o companheirismo. Pude além de tudo isso, crescer infinitamente como pessoa e me tornar campeão do Inter Repúblicas 2014, honrando a história já enorme dessa República.

Agradeço de coração a Elisia e Lindalva, duas “mães” que tive nesses anos longe de casa, por toda ajuda e conselhos. A república Apocalipse, que por um tempo me acolheu e pude também fazer grandes amigos, entre eles Borrinha, Jaime e Cotoco. A todos os outros amigos que fiz nessa Faculdade, que trilharam comigo essa trajetória e vivenciaram comigo o dia a dia.

Por fim, sou muito grato a meu chefe, Marcelo Silva, pela oportunidade de estagiar na Johnson & Johnson, uma empresa maravilhosa, onde tenho o privilégio de aprender todo dia com ele e toda sua equipe. Tive o prazer de fazer novos amigos e conhecer pessoas que levarei para toda a vida.

Almir José Dias Valverde Júnior

Em primeiro lugar agradeço a Deus e aos meus pais Daniel Gianiselle e Alzenir Gianiselle que me deram todo o apoio necessário para que eu estudasse e me formasse engenheiro. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, meu orientador, Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza e principalmente à república Mau Mau e aos seus moradores: GB, Margarida, Idoso, Bruna, Pantanal, Meliante, Prima, Trinca, Russo, Bronha e Cagada, que me acolheram de braços abertos e que jamais deixaram de me incentivar nos momentos de dificuldade. Agradeço muito ao meu amigo Almir José Dias Valverde Júnior, esse que batalhou ao meu lado na realização desse trabalho e nos longos anos de engenharia nessa universidade onde, sem a sua ajuda, não seria possível a conclusão do estudo aqui apresentado.

Agradeço à empresa Votorantim Metais – CBA que nos auxiliou fornecendo o material de estudo para esse trabalho e principalmente ao meu chefe Elvio Antônio da Silva, sem ele eu não teria conseguido essa oportunidade maravilhosa que foi trabalhar com o metal alumínio. Esse conhecimento vou carregar para resto da minha vida.

Felipe Gianiselle

*A vida é como andar de bicicleta.
Para manter o equilíbrio, é preciso se manter em movimento...*

Albert Einstein

VALVERDE JUNIOR, A. J. D.; GIANISELLE, F. **Usinagem do liga Alumínio da classe 6005 com uso de ferramenta cerâmica.** 2015. 71 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

A usinagem é um processo de elevada importância econômica no cenário mundial, conferindo formas e acabamentos à peça final para diversos tipos de aplicação. Diversos parâmetros de usinagem têm sido alvo de muito estudo, afim de maximar os resultados em relação a custo e vida útil (redução de desgaste de ferramenta de corte, melhor acabamento superficial, entre outros). O objetivo desse trabalho é avaliar o desgaste de uma ferramenta de cerâmica na usinagem de uma liga de Alumínio 6005A. A análise do desgaste das ferramentas de corte é muito relevante pois tem um grande impacto no acabamento final da peça como um todo. A avaliação se deu em duas etapas, primeiro foi feito um minucioso estudo da bibliografia de todo processo de usinagem, onde o estudo da formação e classificação de cavacos esteve entre as etapas mais importantes desta fase. A segunda etapa consistiu na realização da usinagem da peça de Alumínio 6005 A com a ferramenta de corte cerâmica constituída de óxido de alumínio e óxido de magnésio com impregnação de carbetto de silício. O cavaco gerado nesse processo foi então fotografado com um microscópio óptico da Zeiss e analisado quanto tamanho e forma. Através dessa comparação foi possível concluir que os cavacos gerados são cavacos contínuos, com forma de emaranhados, fragmentados e arcos conectados, classificando assim o material com dificuldade média de usinagem. Através da análise das imagens da ferramenta foi possível concluir que o parâmetro de menor desgaste foi o $V_c = 500\text{m/min}$, $f = 0.10\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$.

Palavras-chaves: Usinagem, Desgaste, Alumínio, Liga, Ferramenta Cerâmica.

VALVERDE JUNIOR, A. J. D.; GIANISELLE, F. **Machinig of 6005 alumminum alloy using ceramic**. 2015. 71 f. Final Paper (Bachelor's Degree in Materials Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

The machining process is so much important in the economic world. Many machining parameters have been studied to maximize results, in terms of cost and lifetime. (decrease of cutting tool wear, improved surface finish , among others).

The objective of this study is to evaluate the wear of a ceramic tool in the machining of the aluminum alloy 6005 A. The analysis of the wear of the cutting tools is very important due to its big impact on the final finishing of the piece as a whole. The evaluation took place in two stages, first it was done a detailed study of the literature of the whole machining process, where the study of the formation and swarf classification were among the most important steps in this phase. The second step consisted in the machining of the piece of aluminum 6005 A with a ceramic cutting tool constituted of aluminum oxide and magnesium oxide with silicon carbide impregnation. The swarf generated in this process was then photographed with a Zeiss optical microscope and analyzed for its size and shape. Through this comparison it was concluded that the swarf are generated shear swarfs, shaped like a tangled, fragmented and arcs connected, thus classifying the material as medium difficulty machining. Through the image analysis tool it was concluded that the parameter of lower wear was the: $V_c = 500\text{m} / \text{min}$, $f = 0.10\text{mm} / \text{rev}$ and $a_p = 0.5\text{mm}$.

Keywords: Machining, Wear, Aluminum, Alloy, Ceramic tool.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Movimentos e velocidades do processo de torneamento.....	17
Figura 2 - Precisão do processo de usinagem durante o século	18
Figura 3 - Torno modelo ROMI GL240M do laboratório do DMT.....	19
Figura 4 – Modelo de cartas de Piispamen.....	22
Figura 5 – Esquema dos tipos de cavaco.....	23
Figura 6 – Formas do cavaco segundo a cassificação ISSO 3685-1997.....	24
Figura 7 - Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio	29
Figura 8 – Esquema adaptado da tendência de características de alguns materiais.....	32
Figura 9 – Variação da dureza em alguns materiais em função da temperatura.....	33
Figura 10 – Evolução da máxima velocidade de corte ao longo dos anos.....	33
Figura 11 – Ferramentas de corte.....	37
Figura 12 – Formas comuns de insertos e comportamento de algumas características.....	37
Figura 13 – Geometrias comuns de aresta de corte de insertos.....	37
Figura 14 – Principais partes constituintes de uma ferramenta de corte.....	41
Figura 15 – Ângulos de uma ferramenta de corte.....	42
Figura 16 – Direções e planos considerando o plano de referência na mão.....	42
Figura 17 – Efeito do revestimento nas curvas de desgaste das ferramentas de cratera (KT) e de flanco (VB).....	45
Figura 18 – Mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas de corte.....	47
Figura 19 - Amostra de tarugo utilizada no estudo.....	49
Figura 20 – Imagem da microestrutura e estrutura granular na região da periferia e meio raio.....	50
Figura 21 - Torno modelo ROMI GL240M disponível no laboratório do DMT.....	52
Figura 22 – Microscópio marca ZEISS.....	53
Figura 23 - Ferramenta cerâmica.....	53
Figura 24 - Suporte de ferramenta.....	54
Figura 25 – Deteriorização causada pelos parâmetros $V_c = 500\text{m/min}$, $f = 0.10\text{mm/volta}$ e $ap = 0.5\text{mm}$	55

Figura 26 – Deteriorização causada pelos parâmetros $V_c = 800\text{m/min}$, $f = 0.1\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$	56
Figura 27 – Desgaste causado pelos parâmetros $V_c = 1000\text{m/min}$, $f = 0.2\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$	56
Figura 28 – Deteriorização causada pelos parâmetros $V_c = 1000\text{m/min}$, $f = 0.15\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$	57
Figura 29 - Deteriorização causada pelos parâmetros $V_c = 1000\text{m/min}$, $f = 0.15\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.7\text{mm}$	58
Figura 30 - cavacos gerados no processo.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - principais elementos adicionados.....	26
Tabela 2 - ligas Forjadas.	27
Tabela 3 - ligas de fundição.	28
Tabela 4 - Composição química da liga 6005A.....	49
Tabela 5 - Dureza da liga 6005A.....	50
Tabela 6 - Resultados da caracterização do material.....	50
Tabela 7 - parâmetros utilizados no trabalho.	51
Tabela 8 - Parâmetros e cavacos gerados.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Aluminum Association
ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing and Materials
Aw	Aluminum Wrought
B	Boro
C	Carbono
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
CBN	Nitreto de Boro cúbico
CERMET	Ferramenta de corte composta
CFC	Cúbico de Face Centrada
CNC	Comando Numérico Computadorizado
Co	Cobalto
CO ₂	Gás Carbônico
Cu	Cobre
CVD	Chemical Vapor Deposition
DMT	Departamento de Materiais e Tecnologia
Fe	Ferro
HSS	High Speed Steel
ISO	International Organization for Standardization
Mg	Magnésio
MgO	Óxido de Magnésio
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
NBR	Normas Brasileiras
Ni	Níquel
O	Oxigênio
PBCN	Ferramenta de Usinagem
PVD	Physical Vapor Deposition

Si	Silício
SiC	Carbeto de Silício
Ta	Tântalo
Ti	Titânio
TiC	Carbeto de Titânio
TRM	Taxa de Remoção de Material
W	Tungstênio
WC	Carbeto de Tungstênio
Zn	Zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

A_a	superfície principal de folga
A_a'	superfície secundária de folga
a_p	profundidade de corte
A_t	superfície de saída
B	largura da haste da ferramenta
d	diâmetro
f	avanço
F_1	medida do ponto PK até o plano de base 2
F_{ap}	força de apoio
F_c	força de corte
F_e	força efetiva de corte
F_f	força de avanço
F_p	força passiva
F_t	força ativa
F_u	força de usinagem
H	altura da haste da ferramenta
h_v	dureza Vickers
k_r	ângulo de posição
L_1	comprimento de programação
L_3	máximo comprimento de operação
l_c	comprimento de corte
l_f	percurso de avanço
n	rotação
rpm	rotações por minuto
S	aresta principal de corte
S'	aresta secundária de corte
v_c	velocidade de corte
v_f	velocidade de avanço
α	ângulo de folga
β	ângulo de cunha
ε	ângulo de ponta

λ	ângulo de inclinação
φ	ângulo da direção do avanço
χ	ângulo de posição
γ	ângulo de saída

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1.	OBJETIVO.....	19
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1.	USINAGEM.....	20
2.1.1.	Torneamento	23
2.1.2.	Mecanismos de Formação de Cavaco	25
2.1.3.	Classificação de Cavaco	26
2.2.	ALUMINIO E SUAS LIGAS	28
2.2.1	Ligas da Série 6000	33
3.	FERRAMENTAS DE CORTE	35
3.1.	MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE	35
3.2.	FERRAMENTAS DE CORTE DE MATERIAIS CERÂMICOS	39
3.3.	GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE	40
4.	TERMOS BÁSICOS E DEFINIÇÕES	44
5.	DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE	47
5.1.	PRINCIPAIS MECÂNIISMOS DE DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE	49
6.	MATERIAIS E MÉTODOS	53
6.1.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	53
7.	EQUIPAMENTOS, FERRAMENTAS E MATERIAIS UTILIZADOS	56
7.1.	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	56
7.2.	FERRAMENTAS UTILIZADAS.....	57
8.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
8.1.	DESGASTE DA FERRAMENTA	59
8.2.	TIPOS E FORMAS DO CAVACO	62
9.	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

Em 1886, Charles Martin Hall passou uma corrente elétrica em certa quantidade de alumina junto com criolita, resultando assim em uma massa dura que foi quebrada com um martelo, dando origem então a várias partículas de alumínio. O alumínio então de acordo com a ABAL é o terceiro metal mais usado em escala industrial. Foi durante a primeira guerra mundial que a indústria do alumínio foi intensamente impulsionada devido à necessidade da criação de componentes mais leves com certa resistência.

Atualmente, o alumínio dificilmente é utilizado em sua forma primária, as ligas de alumínio possuem forte presença e crescimento no ramo industrial. Suas características como: baixa densidade, elevada resistência a corrosão e relação peso estrutural/resistência do metal, as qualificam para aplicações em diversas e variadas áreas da engenharia.

Uma das aplicações do metal alumínio é em peças com elevado acabamento, tanto para decoração como para itens estruturais, e gradualmente essas ligas vêm sendo introduzidas nos processos de usinagem, esses que se iniciaram em tempos remotos, totalmente manuais e com o passar do tempo, máquinas de alta precisão foram surgindo, trazendo uma elevada evolução para esse processo. Foi durante o período da Revolução Industrial que surgiram as primeiras máquinas de usinar, deixando o processo todo muito mais produtivo e rápido. Os processos de usinagem apresentam importantes aplicações tecnológicas que visam conferir forma e acabamento a uma peça de acordo com a especificação do projeto. No caso do Alumínio, devido uma maior dificuldade de usina-lo, os parâmetros devem ser rigorosamente controlados a fim de obter o melhor acabamento superficial. Em todo processo de usinagem a formação de cavaco, este que é uma quantidade de material retirada da peça pela ferramenta, é estudada e através desses estudos ocorreram diversos ganhos para o processo em geral, já que o avanço nesse assunto alavancou muitas contribuições tanto para o aperfeiçoamento da geometria quanto dos materiais das ferramentas de corte.

Os processos de usinagem podem ser classificados em dois tipos, sendo eles convencionais e não convencionais. Dentro do tipo convencional, encontra-se o torneamento, processo mecânico da usinagem usado para se obter superfícies de revolução por meio de uma ferramenta de corte e objetivo de estudo deste trabalho.

O objetivo principal das ferramentas de corte é a competência de remover material de uma peça por meio de arestas cortantes. Até meados de 1760 a madeira era o material mais importante e utilizado em engenharia devido sua grande quantidade na natureza e certa

facilidade de trabalho na época, na usinagem não era diferente e utilizavam-se as máquinas e ferramentas de corte construídas com a madeira. A necessidade de peças metálicas com alta precisão foi aumentando na proporção que eram desenvolvidas as máquinas a vapor. Essas peças eram produzidas com ferro fundido, bronze e latão, sendo assim, necessitavam de ferramentas mais específicas para serem usinadas. A partir desse contexto a usinagem dos metais passou a ser feita com ferramentas de aço carbono endurecido. A evolução dos materiais das peças (maior dureza, maior resistência à abrasão, etc.) junto com a utilização na indústria e questões econômicas, fez com que se procurassem novas alternativas para atender essas mudanças visando garantir a utilização das ferramentas de maneira mais eficiente, portanto existe uma grande conexão entre o desenvolvimento de máquinas e o de ferramentas de corte.

Os materiais para as ferramentas de corte devem possuir algumas características importantes entre elas destaca-se: resistência ao desgaste, dureza a quente, estabilidade química e tenacidade. Há uma grande variedade de materiais utilizados em sua fabricação, os mais comuns são os aços rápidos com ou sem cobertura, o metal duro, a cerâmica, o CERMET, PBCN e o diamante. Embora seja competentes, nenhum deles consegue unir de maneira satisfatória todos os principais atributos, portanto cada tipo diferente de processo precisa de uma ferramenta específica.

Assim como a escolha do material é importante, a geometria das ferramentas de corte também assume papel decisivo no processo de usinagem, onde pequenas variações na dimensão ou ângulo podem causar respostas diferentes entre o material da peça e a aresta de corte. Há diferentes elementos que interferem no desempenho das ferramentas em relação a geometria, entre eles destaca-se: raio de ponta, ângulo de saída, ângulo de folga, ângulo de inclinação, entre outros. A escolha do ângulo impacta nas características finais da peça, por exemplo, na potência e força necessária ao corte, no acabamento superficial, controle de saída de cavaco, diminuição das vibrações, etc. Inúmeros estudos buscam aperfeiçoar a geometria de corte, a fim de maximizar a vida útil das ferramentas. As ferramentas mais utilizadas em torneamento são as monocortantes, porém apresentam várias semelhanças com as multicortantes.

A geometria de uma ferramenta de corte pode afetar diretamente algumas variáveis do processo de usinagem como: formação do cavaco, produtividade da usinagem, vida da ferramenta, qualidade final do processo, entre outras. Assim, se a geometria da ferramenta não for adequada para uma determinada aplicação, muito provável que efeitos adversos irão aparecer no produto final. As partes principais de uma ferramenta de corte, segundo Diniz, et.

al, (2006), são: parte de corte, cunha de corte, superfície de saída, superfície principal de folga, ponta de corte. Entretanto essas nomenclaturas e definições não são de fácil tarefa, já que dependem da demarcação de diversos planos rigidamente projetados.

Os desgastes das ferramentas de corte impactam diretamente no processo de usinagem como um todo, o conhecimento que se tem sobre esse assunto ainda não é satisfatório, apesar de ter crescido a quantidade de estudos na última metade do século. O complexo entendimento do processo que ronda o desgaste da ferramenta de corte dificulta a criação de uma teoria confiável capaz de explicar esse acontecimento, mesmo assim existem diversas teorias que procuram esclarecer esse mecanismo tão importante para a usinagem em geral. Basicamente o processo de desgaste envolve um conjunto de fenômenos químicos, físicos e termomecânicos. Na maioria das vezes, dependendo das condições de usinagem, ocorre em combinação do material da peça com a geometria da ferramenta. Existem diversos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte, os mais comuns são o desgaste por abrasão mecânica, difusão, oxidação, adesão, cratera, entre outros. Todos esses mecanismos sofrem, principalmente, influência da temperatura de corte, mas outros parâmetros também influenciam, como por exemplo, a velocidade de corte.

1.1 Objetivo

Demonstrar o desempenho e o desgaste de uma ferramenta cerâmica na usinagem de uma liga de Alumínio 6005 A.

O desgaste e o acabamento superficial serão cruciais para os resultados do trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Usinagem

A usinagem iniciou-se em tempos remotos e era totalmente manual, porém veio a evoluir muito nos dias atuais com uso de máquinas de alta precisão. Os primórdios utilizavam pedras como ferramentas de usinagem, os artefatos eram obtidos através do desgaste e polimento da pedra. Com o passar do tempo as técnicas foram sendo aperfeiçoadas e foi durante a revolução industrial que começaram a surgir as primeiras máquinas de usinar, tornando o processo muito mais rápido e produtivo.

Usinagem é a operação que ao conferir forma, dimensões e acabamento a uma peça, gera cavaco, sendo que o cavaco é uma quantidade de material retirada da peça pela ferramenta que apresenta uma forma geométrica irregular (MACHADO et al., 2009).

Assim um material bruto é submetido à ação de uma máquina e/ou ferramenta para ser trabalhado e ajustado dimensionalmente de acordo com a necessidade. De acordo com Childs et al. (2000) a usinagem é o processo mais empregado na indústria de manufatura mecânica para obtenção de peças metálicas. Essa grande utilização é devido principalmente à grande variedade de formas possíveis de serem obtidas com uma elevada precisão dimensional e elevado acabamento superficial, tudo isso sem alterar as propriedades do material.

Para o estudo da usinagem, é necessário definir as grandezas físicas do processo como velocidade, movimentos, direções dos movimentos e percursos das ferramentas (MACHADO et al., 2009).

- Movimentos: os movimentos são relativos entre a peça e a ferramenta. Distinguem-se dois tipos de movimento
 1. Movimentos que causam retirada de cavaco: corte, avanço e efetivo;
 2. Movimentos que não causam a retirada efetiva de cavaco: aproximação, ajuste, correção e recuo.

No caso das direções, elas são divididas em 3 tipos: corte, avanço e efetiva.

As Velocidades também possuem uma classificação de acordo com Ferraresi (1970):

Velocidade de corte: de acordo com Diniz et al., (2006). a velocidade é calculada por:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$$

Equação 1

Onde:

d: diâmetro da ferramenta;

n : rotação da ferramenta;

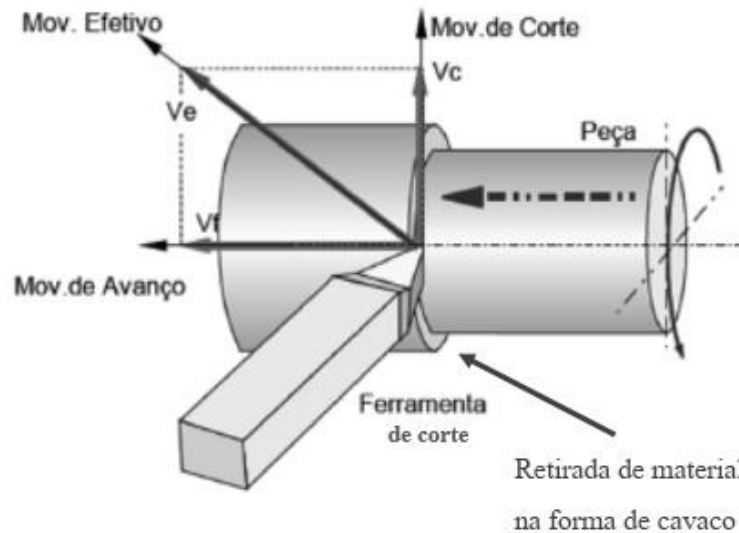
v_c : velocidade de corte

Velocidade de avanço: dada em [mm/min] é o produto do avanço pela rotação da ferramenta em operações de torneamento (DINIZ et al., 2006).

$$v_f = f \cdot n$$

Equação 2

Figura 1 – Movimentos e velocidades do processo de torneamento (adaptado Stoeterau)



(adaptado Stoeterau)

Velocidade efetiva de corte: velocidade instantânea na referência da aresta cortante

Ainda segundo Machado et. al, (2009), os processos de usinagem podem ser classificados em dois tipos:

1. Usinagem convencional:

- Torneamento
- Fresamento
- Furação
- Aplainamento
- Mandrilamento

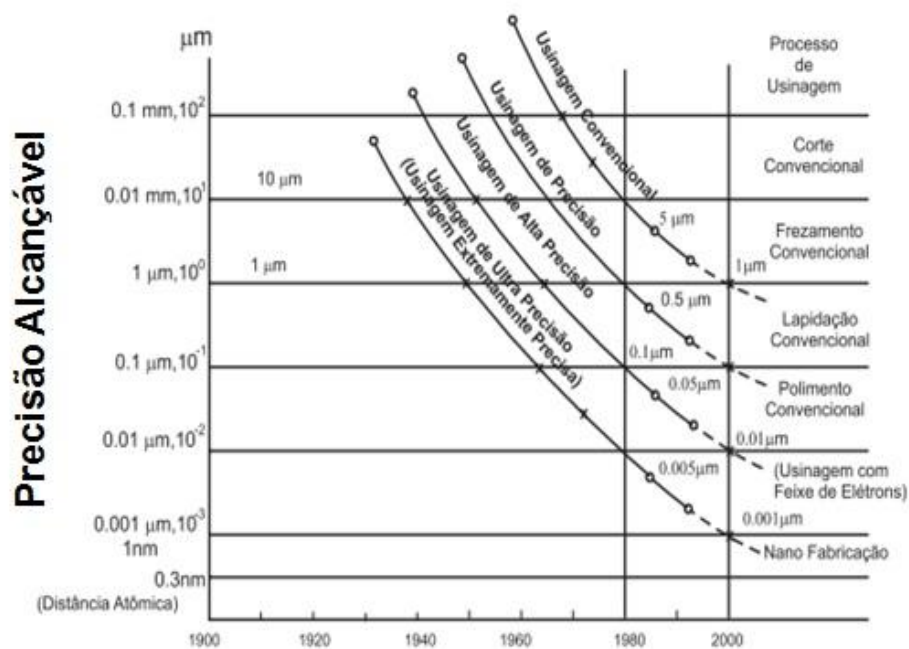
- Serramento
- Brochamento
- Roscamento
- Retificação, etc.

2. Usinagem não convencional:

- Jato d'água
- Jato abrasivo
- Fluxo abrasivo
- Ultrassom
- Eletroquímica
- Eletroerosão, etc.

A figura 2 mostra o desenvolvimento da precisão em usinagem durante o Século XX.

Figura 2 - Precisão do processo de usinagem durante o século XX.



Fonte: (TANIGUCHI, 1994).

Neste presente trabalho trataremos apenas do processo de torneamento, um dos principais processos de usinagem, esse que vai ser abordado logo a seguir.

2.1.1 Torneamento

O torneamento é um processo mecânico de usinagem usado para se obter superfícies de revolução por meio de uma ferramenta de corte, fixa, sobre uma peça girante (ASM METALS HANDBOOK, 1989). Segundo Trent e Wright (2000), este processo é um dos mais utilizados na indústria e em trabalhos experimentais. A peça é fixada em um eixo rotacional e a ferramenta se movimenta de forma coplanar ao eixo, dando assim a geometria definida.

A figura 3 mostra um torno de fabricação mais moderna encontrado no laboratório do DMT da Unesp Guaratinguetá.

Figura 3 - Torno modelo ROMI GL240M do laboratório do DMT



Fonte: Autores.

De acordo com Cervelin (2009) são possíveis várias operações de torneamento, assim peças de diferentes dimensões e geometrias são fabricadas o que torna o torneamento um processo muito versátil.

Algumas das principais operações de torneamento são listadas a seguir:

- Torneamento Longitudinal
- Torneamento Cônico
- Sangramento
- Rebaixo na face
- Recartilhado

Dentre essas operações podemos destacar:

- o torneamento longitudinal, onde há diminuição do diâmetro da peça;
- a furação, que permite a execução de furos na extremidade da peça com a ajuda de brocas;
- o roscamento possibilita a confecção de roscas internas e externas em diferentes diâmetros, padrões, etc;

De acordo com Ferraresi, (1970), o torneamento pode ser classificado quanto a trajetória, podendo ser retilíneo ou curvilíneo

Torneamento retilíneo: A ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea. Ele pode ser dividido em:

Torneamento Cilíndrico: A ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo da máquina. O torneamento cilíndrico é denominado sangramento axial quando se quer obter um entalhe circular na peça.

Torneamento cônico: a ferramenta fica inclinada em relação ao eixo principal da máquina.

Torneamento radial : ferramenta se deslocando no sentido perpendicular ao eixo de rotação

Perfilamento: processo que visa a obtenção de uma forma definida que é determinada pelo perfil da ferramenta. O movimento da ferramenta pode ser axial ou radial.

Torneamento curvilíneo : A ferramenta se desloca segundo uma trajetória curvilínea conforme o nome diz.

Uma variável importante no processo de torneamento é a TRM, taxa de remoção de material, onde é calculada pela taxa de volume de material removida por unidade de tempo, e é dada por:

$$TRM = a_p \times v_c \times f \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

a_p : Profundidade de corte (mm)

v_c : Velocidade de corte (m/min)

f : Avanço (mm/volta)

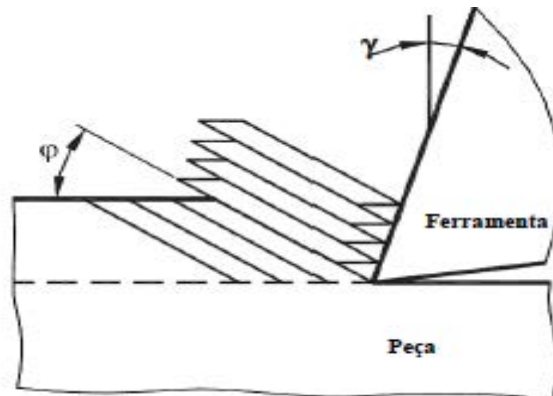
2.1.2 Mecanismos de formação de cavaco

A compreensão do mecanismo de formação de cavacos é a base para o melhor entendimento de todos os processos de usinagem em geral, o avanço nesse estudo proporcionou grandes contribuições para a tecnologia de usinagem e aperfeiçoamento da geometria e dos materiais para ferramentas de corte. (CERVELIN, 2009)

Segundo Asthakhov, 2006, um engenheiro russo chamado de Time foi o pioneiro nos estudos sobre a formação de cavaco (1870, apud ASTHAKOV, 2006). Em meados de 1881, Mallock (1881-1882, apud BOOTHROYD; KNIGHT, 2006) estudou os cavacos de metais tanto ferrosos quanto não ferrosos e assumiu que o processo de usinagem era conseguido, basicamente, por cisalhamento. Da mesma forma percebeu que o atrito entre a ferramenta e o cavaco era um fator chave no processo, para comprovar utilizou lubrificantes no processo para observar as diferenças de atrito, bem como os diferentes cavacos resultantes.

No ano de 1937, o engenheiro Piispanen (1937, apud ASTHAKOV, 2006) utilizou como exemplo um baralho de cartas para explicar o processo de usinagem, onde o material da peça era simulado pelas cartas e estas empilhadas umas sobre as outras enquanto a ferramenta avançava, com as base das cartas formando um ângulo (ângulo de cisalhamento) com a direção de corte, tal modelo é ilustrado na figura 4:

Figura 4 – Modelo de cartas de Piispamen



Fonte: (adaptado de Astakhov, 2006)

De acordo com Ferraresi, (1970), a formação de cavacos se processa da seguinte forma:

Devido à penetração da ferramenta no material, uma pequena porção de material é recalçada, essa que sofre uma deformação plástica de modo a iniciar um deslizamento. O deslizamento vai ocorrer nos planos de cisalhamento do material recalçado. Conforme a penetração contínua, ocorre uma ruptura na região de cisalhamento, essa que pode ser completa ou parcial (depende das características do material e das condições de usinagem). Para materiais dúcteis, a formação do cavaco é contínua e para materiais frágeis temos a ruptura desse cavaco. Continuamente esse processo vai ocorrendo, retirando cada vez mais uma nova porção de material da peça.

2.1.3 Classificação de cavaco

De acordo com Diniz et. al, (2006) e Ferraresi (1970), diversas classificações de cavaco tem sido propostas e a classificação mais aceita é com quatro tipos de cavaco:

Cavaco contínuo: Lamelas justapostas de forma contínua e agrupada. A fratura ou ruptura não ocorre devido à característica dúctil do material. É característico de materiais dúcteis, homogêneos e recozidos, com parâmetros de ângulo de saída elevado.

Cavaco de cisalhamento: Lamelas bem distintas e justapostas. Esse cavaco é cisalhado na região de cisalhamento e é soldado logo em seguida forma – se quando há diminuição da resistência ao cisalhamento do material, devido ao aumento da temperatura, heterogeneidades da microestrutura e deformação. Frequentemente associa-se vibrações a este tipo de cavaco, podendo comprometer o aspecto final da peça, a ferramenta e também a máquina-ferramenta.

Cavaco de ruptura ou arrancado: é constituído de pequenos fragmentos da peça usinada, principalmente através de tensões de compressão e tração no material da peça, ocorre uma ruptura completa do material. Recomenda-se nesse caso o uso de ferramentas com ângulo de saída baixo, nulo ou até negativo. Forma-se na usinagem de materiais frágeis e heterogêneos como o ferro fundido e o latão.

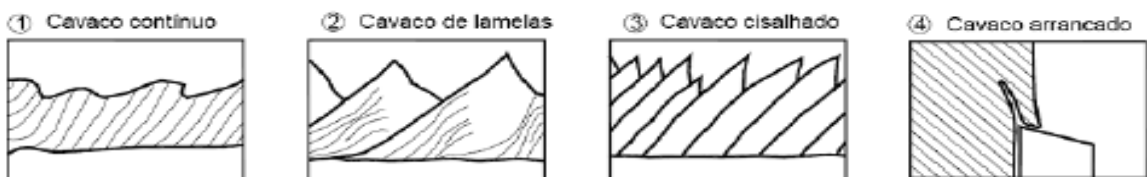
Cavaco segmentado ou lamelar: usualmente provém da usinagem de aços endurecidos ou de titânio com ferramentas com ângulo de saída negativo. As tensões fornecidas na peça fazem com que apareçam trincas que funcionam como uma superfície de escoamento para uma porção de material ser deformada plasticamente. As trincas não levam à separação do cavaco de maneira completa, conferindo, assim, uma aparência serrilhada ao cavaco.

Ainda de acordo com Ferraresi, (1970), o cavaco ainda pode ser classificado simplificarmente de quatro formas:

1. Cavaco em fita
2. Cavaco helicoidal
3. Cavaco espiral
4. Cavaco em lascas

A figura a seguir mostra os tipos de cavacos e ilustra as diferentes formas do mesmo.

Figura 5 – Esquema dos tipos de cavaco



Fonte: (POLLI, 2005)

Figura 6 – Formas do cavaco segundo a classificação ISSO 3685-1997

1- Cavaco em fite	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel tipo erruete	5- Cavaco hel, côvico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conex.		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Côncavo	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

Fonte: (adaptado de Grzeisick , 2008)

De acordo com Ferraresi (1970), a forma do cavaco pode ser mudada alterando alguns parâmetros de usinagem como ângulo de saída, avanço e velocidade, mudando a forma de saída da ferramenta ou colocando – se elementos adicionais na superfície de saída.

Ainda de acordo com Ferraresi (1970), a forma mais conveniente para o cavaco é helicoidal.

2.2 Alumínio e suas ligas

De acordo com Callister (2008) o alumínio é o terceiro metal mais abundante na crosta terrestre e por possuir excelentes propriedades físico-químicas, como o baixo peso específico ($2,7 \text{ g/cm}^3$), a alta condutividade térmica e elétrica e a reciclagem, tornou-se um dos metais mais utilizados no mundo. É maleável, dúctil e apto para a mecanização e para a fundição (ABAL, 2015).

Segundo a Abal (2015), o alumínio foi obtido primeiramente pelo químico inglês Humphrey Davy em 1809, fundindo ferro na presença de alumina, porem apenas em 1854 foi desenvolvido um processo de redução do óxido em banho fundido de criolita, vindo a se tornar público apenas em 1855 Em 1886, o americano Hall e o francês Héroult descobriram e patentearam esse processo e assim ficou conhecido como Hall-Heróult. (ABAL, 2012; CAMARGO, 2007).

Na natureza, o alumínio não existe na sua forma pura de metal, isso devido a sua alta afinidade com o oxigênio (DAVIS, 1996) assim a sua obtenção é dada pelos processos Bayer e Hall-Héroult como descrito anteriormente. Esses processos são detalhados a seguir:

- Processo Bayer

É o processo responsável pela produção da alumina através do minério bauxita. Ele foi patenteado em 1888 por Karl Bayer e envolve a digestão da bauxita em soda caustica sob temperatura e pressão, seguido pela separação do resíduo e da precipitação do óxido hidratado (DAVIS, J. R., 1996). Detalhadamente o processo tem as seguintes etapas:

Moagem: a bauxita passa por um ajuste de granulometria, afim de aumentar a área superficial e assim a sua reatividade.

Digestão: Com a granulometria ajustada, a bauxita é colocada em contato com soda caustica sob temperatura e pressão.

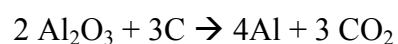
Clarificação: Separação dos resíduos sólidos que não foram dissolvidos pela soda do licor.

Precipitação: Etapa onde ocorre a precipitação da gibsitita que foi dissolvida no processo de digestão, essa que é uma etapa crítica pois toda a qualidade do produto é controlada. A reação que ocorre é a inversa da digestão.

Calcinação: é a parte do processo onde toda a água de cristalização é retirada do hidróxido de alumínio (gibsitita) transformando-o em alumina.

Com o final do processo Bayer, a alumina é submetida a um processo de redução chamado Hall Héroult, que é descrito abaixo:

De acordo com Zangrandi (2008) o processo Hall-Héroult consiste basicamente na eletrólise da alumina, essa que é dissolvida em um banho de criolita em um forno eletrolítico de cuba com pontas anódicas de carbono. A temperatura de trabalho é entre 940 a 980 °C e basicamente a reação que ocorre no forno é:



Equação 4

O alumínio puro possui baixas propriedades mecânicas para a maioria das aplicações, assim são utilizados elementos de liga que possuem a função de dar ao alumínio as propriedades desejadas. Segundo Callister (2008) os principais elementos de liga incluem o cobre, magnésio, silício o manganês e o zinco. As propriedades finais da liga vão depender de sua composição química, tratamento térmico ou mecânico, taxa de resfriamento e nucleação de grãos.

Os principais elementos químicos adicionados são apresentados na quadro a seguir:

Tabela 1 - principais elementos adicionados

Elementos	Função
Cobre (Cu)	Aumento resistência mecânica da liga, tanto antes como após o tratamento térmico..Também diminui as contrações no resfriamento e melhora a usinabilidade, porem ele diminui consideravelmente a fluidez da liga e acarreta a fragilidade a quente. Outro fator que pode ser negativo é a diminuição da resistência a corrosão da liga.
Silício (Si)	Teores crescentes de Si, até o ponto eutético, causam o aumento da fluidez, diminuição de contrações de solidificação, aumento da resistência à corrosão, aumento da resistência à tração e são uma boa soldabilidade. Quando adicionado em grandes quantidades, aumenta consideravelmente a resistência ao desgaste do fundido, porem o material acaba ficando mais frágil.
Magnésio (Mg)	Aumento do limite de resistência e dureza, além de aumento na resistência à corrosão .Melhora a usinabilidade e a resistência ao impacto
Manganês (Mn)	Aumento do limite de resistência e alongamento com uma sensível queda no índice de escoamento.
Zinco (Zn)	Causa um aumento acentuado na resistência mecânica do material.

Fonte: BRADASCHIA (1988) adaptado.

Esses elementos são dissolvidos no banho e quando ocorre a solidificação da liga, alguns desses elementos ficam em solução sólida e/ou se combinam formando precipitados que aumentam a resistência mecânica do material. Segundo Brown e Willey (1990) não existe nenhum elemento químico com solubilidade total no alumínio em estado sólido. A máxima

solubilidade vai ser encontrada na temperatura eutética, peritética e monotética e diminui com a redução de temperatura. (BROWN, 1990 ; WILLEY, 1990)

De acordo com Callister (2008), no geral as ligas de alumínio são divididas em ligas forjadas e ligas fundidas. A nomenclatura é feita com 4 dígitos, os quais podem indicar os elementos presentes na liga e também em alguns casos a pureza da liga. Para ligas de fundição, adiciona-se o ponto decimal após o 3 digito. O último digito indica a forma do produto, sendo 0 para produto fundido e 1 para lingote.

No grupo 1xx.x o segundo e o terceiro digito significam o percentual mínimo de alumínio e nos grupos 2xx.x e 9xx.x o segundo e terceiro digito servem para apenas identificar diferentes ligas dentro do grupo. As ligas de fundição mais utilizadas são as ligas Al-Si. (POLMEAR,1995)

Tabela 2 - ligas de forjadas

Classificação	Elementos principais
1xxx	Alumínio Puro
2xxx	Alumínio e cobre
3xxx	Alumínio e Manganês
4xxx	Alumínio e Silício
5xxx	Alumínio e Magnésio
6xxx	Alumínio, Magnésio e Silício
7xxx	Alumínio e Zinco
8xxx	Alumínio, Ferro, Cobre, Magnésio, Litio e Estrôncio

Fonte: Autores

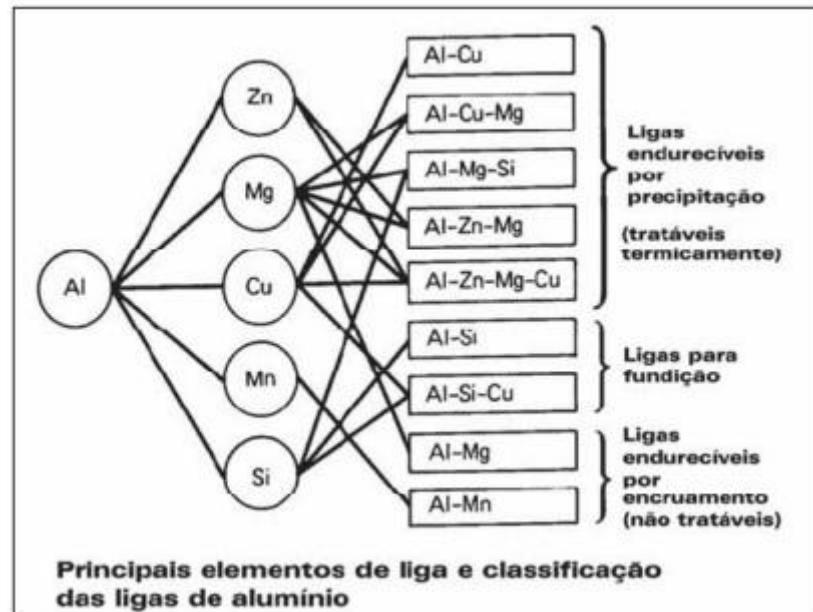
Tabela 3 - ligas de fundição

Classificação	Elementos principais
1xx.x	Alumínio Puro
2xx.x	Alumínio e cobre
3xx.x	Alumínio e Manganês
4xx.x	Alumínio e Silício
5xx.x	Alumínio e Magnésio
7xx.x	Alumínio e Zinco
8xx.x	Alumínio, Ferro, Cobre, Magnésio, Lítio e Estrôncio

Fonte: Autores

Em relação ao tratamento térmico, as ligas podem também ser classificadas em tratáveis e não tratáveis. As ligas não tratáveis são endurecidas por processos de conformação mecânica enquanto as tratáveis são endurecidas por tratamentos térmicos como solubilização, precipitação e envelhecimento.

Figura 7 - Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio



Fonte: (ZANGRANDI, 2008)

Ainda segundo Callister (2008), essas ligas por serem leves, resistentes e duráveis, ganham cada dia mais espaço no mercado e são muito aplicadas na construção civil (janelas, portas, trilhos, etc.) na indústria automotiva (blocos de motores, rodas, chapas de carroceria, caixas de câmbios, chachis, etc.), na indústria alimentícia (folhas de alumínio, revestimentos de embalagens, latas de bebida, etc.) e também na indústria aeronáutica e marinha.

2.2.1 Ligas da série 6000

De acordo com Nogueira (2012) as ligas de alumínio série 6xxx são ligas tratáveis termicamente com os elementos Mg e Si predominantes em sua composição. Elas apresentam excelente ductibilidade e durabilidade, o que as torna muito utilizadas em processos de conformação que impõem elevado grau de deformação, como a extrusão.

Quando comparadas com as outras ligas de alumínio tratáveis termicamente, a série 6xxx é a com maior soldabilidade e maior resistência a corrosão, assim ela é a mais utilizada comercialmente e com ampla aplicação na indústria civil são muito utilizadas na produção perfis estruturais e não estruturais como janelas, portas, estruturas de palco, etc. É possível também a aplicação dessas ligas em algumas peças de automóveis como painéis internos e externos e barras de direção.

A solidificação do fundido forma em proporções estequiométricas o Mg_2Si , esse que é o principal responsável pelo aumento de resistência dessa liga e junto com o tratamento térmico, promove uma precipitação homogênea deste na matriz.

3. FERRAMENTA DE CORTE

O maior objetivo das ferramentas de corte é a remoção de material de uma peça por meio de arestas cortantes. Segundo Boothroyd e Knight (1989), até meados de 1760 não existiam máquinas ferramentas, foi então descoberto no diário de Richard Reynolds o relato de uma máquina para produzir um cilindro. A madeira era o material mais utilizado até então em engenharia devido sua abundância e relativa facilidade de trabalho. Mesmo as máquinas em geral e as ferramentas de corte também eram arquitetadas utilizando a madeira (TRENT; WRIGHT, 2000).

Segundo a literatura, James Watt em meados de 1776, precisava de diversas peças metálicas com grande precisão para construir com êxito a primeira máquina a vapor. Essas peças, entre elas alguns tipos de cilindros, foram fabricados com ferro fundido cinzento, bronze e latão, portanto, materiais que necessitavam de ferramentas mais evoluídas para serem usinados. A partir desse momento a usinagem dos metais passou a ser feita com ferramentas de aço carbono endurecido, uma técnica já estabelecida naquela época (BOOTHROYD; KNIGHT, 1989).

3.1 Materiais para ferramentas de corte

A evolução dos materiais para peças, por exemplo, com dureza elevada e maior resistência à abrasão, aliado com sua posterior utilização na indústria e junto com questões econômicas fez com que se procurasse por alternativas às ferramentas de aço carbono endurecido temperado, já que este material não oferecia um rendimento aceitável. Tanto os novos materiais das peças, quanto os materiais das ferramentas necessitavam de máquinas com atributos que garantissem a sua utilização de maneira eficiente, assim, estabelece-se uma grande ligação entre o desenvolvimento de máquinas e o de ferramentas de corte (CERVELIN, 2009).

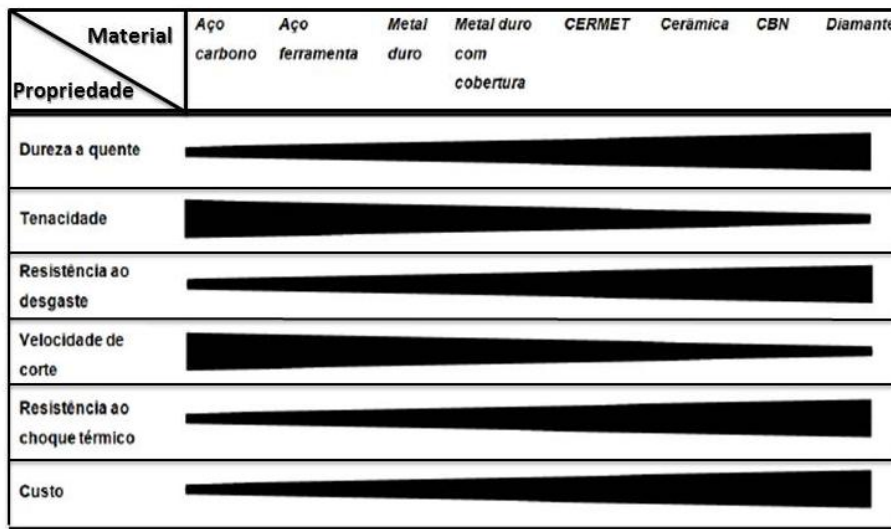
Os materiais para ferramentas de corte devem oferecer, acima de tudo, as características abaixo:

- Resistência ao desgaste: nos processos de usinagem há elevado atrito como um todo e tais ferramentas de corte devem estar aptas a suportar o desgaste por abrasão;

- Dureza a quente: as temperaturas de trabalho podem chegar a 1000°C, sendo assim as ferramentas devem sustentar uma dureza suficiente para que possam manter os esforços de corte;
- Estabilidade química: o material da ferramenta não deve apresentar afinidade química com o material da peça, evitando assim o desgaste por difusão;
- Tenacidade: a ferramenta de corte deve ser tenaz o bastante para absorver energia de choques e assim, conseqüentemente, evitar falha por fratura; (DINIZ, et. al, 2006; GROOVER, 2002)

Nos dias atuais há uma variedade de materiais empregados na fabricação de ferramentas de cortes, entre eles, os principais são os aços rápidos com e sem cobertura, o metal duro, a cerâmica, o CERMET, nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN) e por último e não menos importante, o diamante. A Figura 8 apresenta de forma esquemática alguns materiais e as respectivas tendências de apropriadas características.

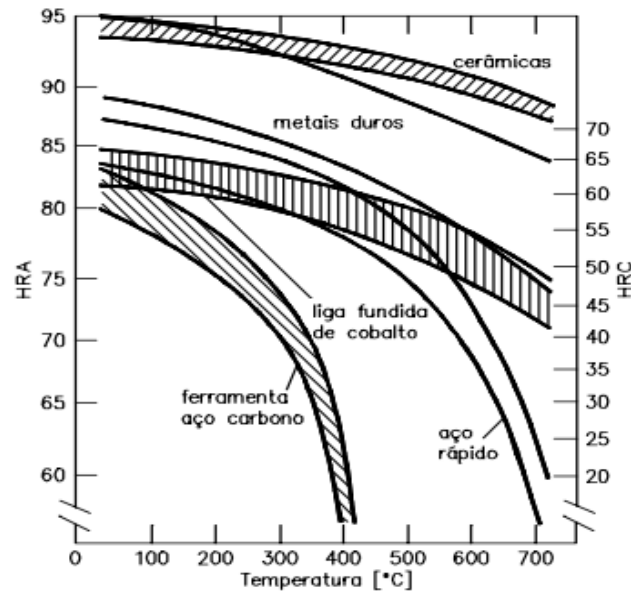
Figura 8 – Esquema adaptado da tendência de características de alguns materiais.



Fonte: (CERVELIN, 2009)

A figura 9 nos mostra a variação da dureza em função da temperatura.

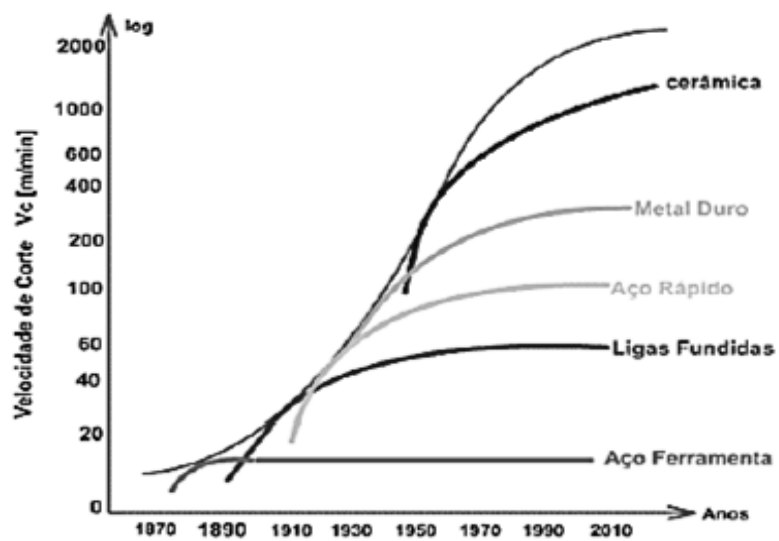
Figura 9 – Variação da dureza em alguns materiais em função da temperatura



Fonte: (COSTA, 2006)

A Figura 10 indica a evolução da velocidade de corte ao longo das últimas décadas.

Figura 10 – Evolução da máxima velocidade de corte ao longo dos anos



Fonte: Disponível em < <http://contrutor.cimm.com.br/cgi.win/contrut.cgi?configuradorresultado+997>>
 acesso em 18 oct. 2015.

Apesar de bastantes eficientes, nenhum desses materiais consegue unir adequadamente os principais atributos em todas situações apresentadas, por isso, cada tipo diferente de processo e de operação necessita de uma ferramenta específica.

O aço rápido é composto, resumidamente, de liga de tungstênio, vanádio, cobalto, nióbio e molibdênio. Suas principais características são grande tenacidade e atenuada resistência ao desgaste e à abrasão. A temperatura de trabalho não pode ultrapassar os 600°C, e para melhorar sua resistência ao desgaste, foi integrada uma pequena camada de cobertura de nitreto de titânio ou de carbonitreto de titânio às ferramentas (DINIZ, et. al. 2006). Através do PVD (*physical vapor deposition*) essas coberturas são incorporadas às ferramentas de corte. Outra deficiência que os aços rápidos apresentam é em relação a dureza a quente, assim, a velocidades elevadas de corte. Para contornar esta limitação foi incorporado o metal duro, composto por partículas duras de carbeto de tungstênio, em grande parte, unidas por outro material metálico usando o processo de sinterização (CERVELIN, 2009).

Segundo Kalpakjian e Schmid (2001), há dois tipos principais de metal duro: o carboneto de tungstênio e o carboneto de titânio, WC e TiC, respectivamente. Atualmente a grande maioria das ferramentas de metal duro comercializadas apresenta até três coberturas com a finalidade de aumentar o desempenho de usinagem. Dentre os tipos mais comuns podemos citar o carboneto de titânio (TiC), o carbonitreto de titânio (TiCN), o nitreto de titânio (TiN) e o óxido de alumínio (Al_2O_3). O ganho com o uso de coberturas são inúmeros, podendo se destacar maior resistência mecânica a quente, melhora na estabilidade química, diminuição do coeficiente de condutividade térmica e por fim, menor porosidade. Este processo possibilita que o núcleo da ferramenta de corte permaneça com a mesma tenacidade, diminuindo, portanto, as quebras e falhas catastróficas, podendo processar até mesmo a usinagem de peças endurecidas, que precisavam ser submetidos a processos menos usuais de usinagem como o aço 4340 temperado (DINIZ, et. al. 2006).

Segundo Boothroyd e Knight (1989), outro material similar ao metal duro muito utilizado é o CERMET, um material composto por cerâmica e metal. Possui outras diversas características destacáveis como resistência ao desgaste e a oxidação, dureza a quente e estabilidade química elevadas em comparação direta com o metal duro, junto com uma tenacidade equiparável. Essas características possibilitam uma maior velocidade de corte ininterruptamente, entretanto seu custo também é superior ao do metal duro.

As cerâmicas tem destacada participação na composição de ferramentas de corte, geralmente tem como base o óxido de alumínio (Al_2O_3) e/ou o Ni_3Si_4 , sinterizados com

elevada pureza (em torno de 99%) ou com uma mínima adição de óxidos (geralmente de zircônio no caso da alumina). Dentre as características mais importantes pode-se destacar a elevada dureza a quente, resistência ao desgaste e ótima estabilidade química, com ressalva da sua tenacidade, que é inferior em comparação com outros materiais (GROOVER, 2002).

As cerâmicas são utilizadas em operações de acabamento no processo de torneamento de aços endurecidos, onde tem-se altas velocidades de corte, baixas velocidades de avanço e profundidades baixas de corte. Vale ressaltar a importância das máquinas apresentarem uma boa rigidez a fim de evitar vibrações. Resultando, por fim, em uma superfície com belo acabamento, dispensando retificação (CERVELIN, 2009).

O Nitreto Cúbico de Boro Policristalino, mais conhecido como PCBN, é um material sintetizado quimicamente mais estável do que o diamante. Sua dureza inferior se limita apenas em relação ao diamante e possui tenacidade comparável às cerâmicas. Segundo Diniz, et. al. (2006), estas ferramentas de corte são mais utilizadas para o trabalho de aços duros, aços ferramentas, metal duro, revestimentos duros e ligas ferrosas resistentes ao calor, podendo, por fim, eliminar a retificação.

3.2 Ferramentas de corte de materiais cerâmicos

As cerâmicas possuem diversas propriedades que são de grande utilidade para uma ferramenta de usinagem, podemos destacar a alta dureza e resistência ao desgaste. Estas duas propriedades são muito valiosas quando se usina a altas velocidades e temperaturas. São classificadas como a base de óxido de alumínio e a base de nitreto de silício. (MACHADO, 2009; DINIZ, 2006).

Os materiais de ferramentas cerâmicas necessitam de algumas propriedades de grande importância como dureza maior em relação ao material a ser usinado, ausência de reação química com o material a ser usinado, propriedades em temperaturas elevadas, entre outros. A fragilidade durante a usinagem pode ser corrigida com a adição de aditivos (SOUSA, 2013).

Com os avanços atingidos nos desenvolvimentos de materiais cerâmicos estruturais, as ferramentas de corte de cerâmica passaram a integrar-se a família das mais importantes ferramentas dos processos de manufatura, onde existe a possibilidade de usar a seco, sem uso de fluidos refrigerante e lubrificante. (SOUSA, 2013).

Segundo Souza, (2011) e Doré, (2007), os avanços no desenvolvimento de revestimentos melhoram a eficiência e durabilidade das ferramentas de cerâmicas. As

ferramentas mais utilizadas nos dias de hoje são Al_2O_3 , Al_2O_3+TiC , CBN, entre outras (YECKLEY, 2005). Entre elas, a que merece mais destaque é a Al_2O_3 , com grande potencial para usinagem de ligas de ferro fundido, ao mesmo tempo que é produzida no Brasil, diminuindo seu custo (SOUSA, 2013).

3.3 Geometria das ferramentas de corte

Há duas definições básicas para as ferramentas de corte: monocortante – quando exibem uma única aresta de corte – ou multicortante – quando apresentam mais de uma aresta. A geometria representa uma importante variável no processo de usinagem, visto que pequenas alterações na dimensão ou no ângulo podem causar respostas distintas quanto a interação do material da peça sobre a aresta de corte. Dentro da geometria das ferramentas de corte, há diversos elementos que sendo modificados podem otimizar seu desempenho, entre eles podemos destacar: raio de ponta, ângulo de saída, ângulo de folga, ângulo de inclinação, ângulo de inclinação, ângulo de posição, quebra-cavaco, entre outros (RODRIGUES, 2005).

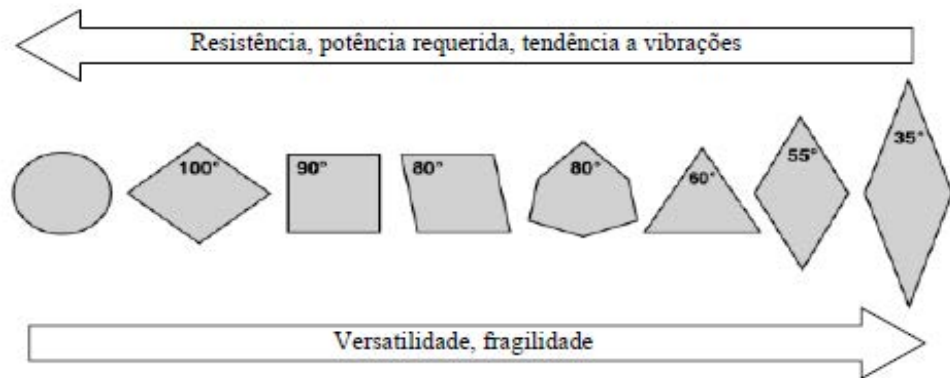
Segundo Groover (2002), as ferramentas mais usadas em torneamento são as monocortantes e elas apresentam muitas similaridades com as multicortantes, como fresas e brocas. Pode-se também encontrar algumas ferramentas inteiriças, onde a parte cortante e o suporte formam uma peça única, assim como mostra a figura 10. Já a figura 11 apresenta as formas mais gerais de inserto, a aresta de corte de insertos pode, também, apresentar variações como aquelas exemplificadas na Figura 12.

Figura 11 – Ferramentas de corte



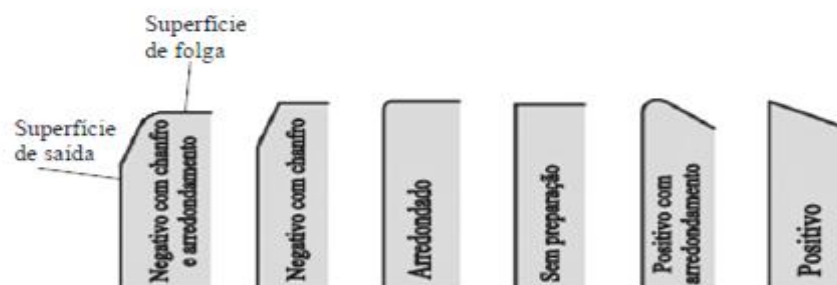
Fonte: (SMITH, 2008)

Figura 12 – Formas comuns de insertos e comportamento de algumas características



Fonte: (GROOVER, 2002)

Figura 13 – Geometrias comuns de aresta de corte de insertos



Fonte: (GROOVER, 2002)

O ângulo de saída impacta decisivamente na potência e força necessária ao corte, no acabamento superficial e no calor produzido (MACHADO E SILVA, 1999). Segundo Wertheim et al. (1994) os ângulos de saída de até 25° em insertos utilizados em fresamento colaboram com a deformação do cavaco e minimizam as forças de corte. Já no corte interrompido, usualmente usufruem-se de ângulos de saída negativos, porém necessitam de maior força e potência de usinagem junto com maior calor gerado. Em contrapartida ângulos de saída muito positivos diminuem a energia de corte e a geração de calor (RODRIGUES, 2005).

O ângulo de inclinação tem algumas finalidades importantes como controlar a direção de saída do cavaco, proteger a aresta da ferramenta contra impactos e por fim, diminuir vibrações geradas pelo processo. Já o ângulo de posição distribui as tensões de corte de maneira favorável desde o início do corte e distribui a força passivamente na ferramenta, colaborando para a diminuição dos ruídos de vibração. Segundo Kaldor, (1986), o ângulo de folga é um dos fatores mais descuidados no processo, se ele for pequeno, a penetração da ferramenta no material é prejudicada, pois a ferramenta perde o corte, gera muito calor e por fim tem o acabamento superficial final insatisfatório. Se ele for grande, promove fragilidade da cunha cortante, levando a ferramenta à falha. Logo, há um valor que otimiza a vida da ferramenta, sua principal função é minimizar o atrito entre as duas superfícies (da peça e de folga da ferramenta). Diversos estudos sobre otimização da geometria de corte já foram conduzidos, potencialmente em operações de torneamento, fresamento e furação. Busca-se, geralmente, maximizar a vida útil das ferramentas. Pequenas alterações na aresta cortante podem elevar a resistência mecânica da ferramenta de corte, aumentando assim sua vida útil e também, melhorando seu acabamento superficial. (RODRIGUES, 2005).

Segundo Darvim, (2008), a geometria de uma ferramenta de corte é de grande importância pois pode afetar diretamente algumas variáveis tais como:

- Formação do cavaco: A forma da ferramenta influencia o desenho e a direção do fluxo do cavaco gerado;
- Produtividade da usinagem: o avanço de corte é avaliado como o maior recurso para alavancar a produtividade, e para obter esse ganho é aumentado o ângulo de posição da ferramenta (X_r);
- A direção e magnitude das forças de corte: A magnitude das componentes ortogonais da força de corte são definidas pelo ângulo de saída da ferramenta, o

ângulo de posição (X_r), o ângulo de posição da aresta secundária (X'_r) e o ângulo de inclinação da ferramenta (α);

- Vida da ferramenta: A geometria interfere nas forças que agem sobre a ferramenta, o escorregamento do cavado sobre a superfície de saída, o calor gerado durante o processo e em sua distribuição sobre a ferramenta;
- Qualidade final do processo: A geometria da ferramenta tem impacto determinante no acabamento e nas tensões residuais na superfície usinada;

Conforme Alauddin et al. (1995) e Boehs et al. (2001), a rugosidade na superfície de uma peça usinada, em condições ideais de trabalho, depende principalmente do avanço e da geometria de corte recebendo, assim, o nome de rugosidade cinemática, já em condições reais, a deflexão da ferramenta e as vibrações influenciam no acabamento superficial, denominada rugosidade de processo. Logo, se a geometria da ferramenta de corte não for apropriada para uma determinada aplicação, possivelmente efeitos adversos ao produto final poderão aparecer no fim do processo. Por fim, Schroeter et al. (2001) complementa que os esforços de usinagem e a espessura do cavaco são também modificados pelas deflexões e vibrações da ferramenta (RODRIGUES, 2005).

Ultimamente, os fabricantes de ferramentas tem preparado a aresta de corte implantando três pequenas alterações, que são elas: raio da aresta, chanfro de aresta e aresta chanfrada com raio. A característica primária do raio de aresta é aumentar a resistência mecânica da própria aresta de corte, variando de centésimos a décimos de milímetros. Este tipo de geometria gera microalterações estruturais, dependendo do material e da dimensão do raio, na superfície da peça conhecida como camada branca e chega a produzir maiores tensões residuais de compressão, aderentes à integridade superficial do componente trabalhado. O chanfro de aresta constitui outro elemento de suma importância para a geometria, visto que afeta diretamente o fortalecimento da aresta, diminuindo as ocorrências de falha prematura, melhora na distribuição de tensão e eficácia da dissipação de calor. (RODRIGUES, 2005).

4. TERMOS BÁSICOS E DEFINIÇÕES

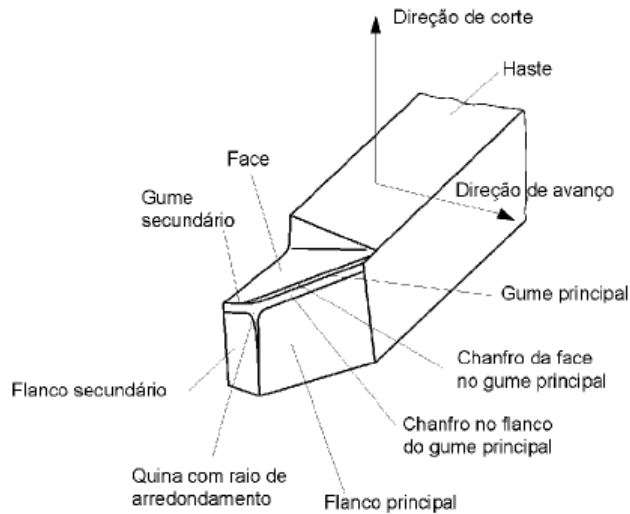
Diniz, et. al. (2006), expõem as partes de uma ferramenta de corte e seus respectivos planos de referência para uma certa descrição dos ângulos da parte de corte, seguindo a Norma NBR 6163 “Conceitos da técnica de usinagem – geometria da cunha de corte”, seguida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas.

As definições, as nomenclaturas das geometrias de corte e os ângulos que dependem da posição da ferramenta e de determinados aspectos do processo, não são uma tarefa fácil de se determinar, pois envolvem a definição de diversos planos, estes que devem ser rigidamente projetados (CEVELIN, 2009).

Continuando com as descrições de Diniz, et. al. (2006), as partes principais de uma ferramenta de corte são expostas abaixo, junto com a Figura 15, que exemplifica estas principais partes:

- Parte de corte: Membro da ferramenta designada a cortar o material da peça composta pela cunha de corte;
- Cunha de corte: Constituída pela intersecção das superfícies de saída e de folga;
- Superfície de saída ($A\gamma$): Consiste da superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco é formado e escoado;
- Superfície principal de folga ($A\alpha$): Consiste da superfície da cunha de corte onde contém a aresta principal de corte;
- Ponta de corte: É a parte da cunha que contém as arestas principais e secundárias de corte, pode ser a intersecção das arestas ou um chanfro ou até um raio que une as arestas;

Figura 14. – Principais partes constituintes de uma ferramenta de corte

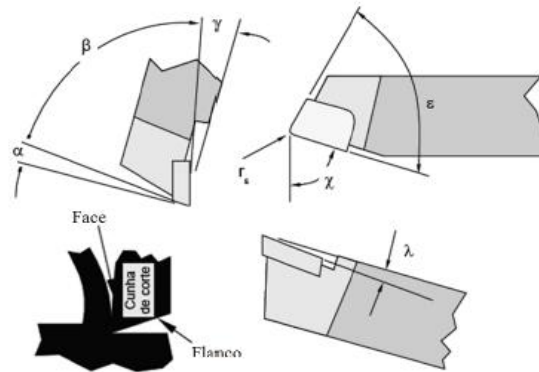


Fonte: (adaptado: <http://www.lmp.ufsc.br>)

De acordo com Stemmer (2005), os ângulos da parte de corte de uma ferramenta são determinados no sistema de referência da ferramenta, estes que podem ser exemplificados pela figura 17. Podem também ser representados pelo plano de referência da mão e está representado pela Figura 18. O P_r , plano de referência da ferramenta, é o plano que passa por um ponto aleatório escolhido da aresta de corte, já no torneamento é paralelo à base da ferramenta ou do suporte de insertos. Outro importante ângulo é o de posição da ferramenta (X_r), composto pelo ângulo entre o plano de corte da ferramenta (P_s) e o plano escolhido de trabalho (P_f), medido sobre o plano de referência da ferramenta (P_r). O P_s é o plano tangente à aresta da ferramenta de corte e perpendicular ao P_r , ao longo que o P_f é o plano perpendicular ao P_r , paralelo à direção de avanço e que passa pelo ponto admitido na aresta de corte (CEVELIN, 2009).

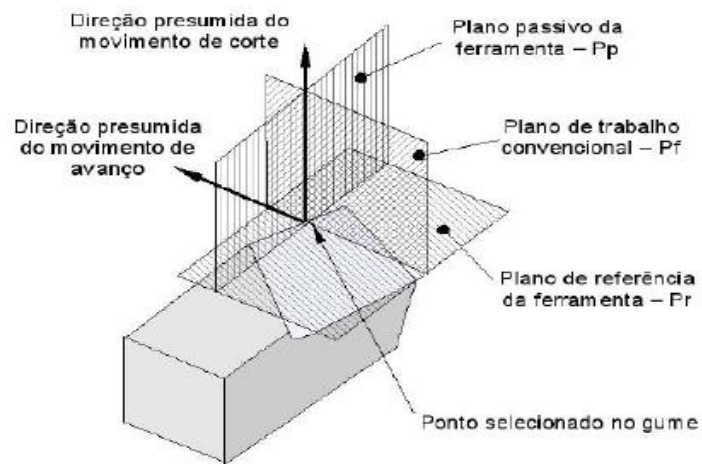
Um dos ângulos mais importantes da ferramenta de corte sem dúvidas é o de saída de cavaco, pois influi decisivamente na força de corte, na potência admitida para o processo de usinagem, no acabamento superficial da peça usinada e por fim, na quantidade de calor gerado (STEMMER, 2005).

Figura 15 – Ângulos de uma ferramenta de corte



Fonte: <http://www.lmp.ufsc.br>

Figura 16 – Direções e planos considerando o plano de referencia na mão



Fonte: <http://www.lmp.ufsc.br/>

5 DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE

O conhecimento que se tem sobre a natureza do desgaste das ferramentas ainda não é satisfatoriamente claro, embora tenha aumentado o número de pesquisas e estudos sobre esse assunto na última metade de século. Segundo Corrêa, (1996), os esforços mecânicos presentes durante o processo de usinagem, os atritos de diversas partes como a peça e ferramenta, cavaco e ferramenta e por fim as vibrações do conjunto máquina-ferramenta, ferramenta e peça acarretam em uma série de desgastes, que no final levam ao fim de vida da ferramenta de corte, podendo ser através da quebra ou lascamento da aresta de corte. A complexidade dos processos que cercam o desgaste da ferramenta de corte dificultam a formulação de uma teoria única e confiável capaz de explicar esse fenômeno, apesar disso existem diversas teorias que tentam, de algum modo, entender e esclarecer o mecanismo de desgaste. O processo de desgaste da ferramenta envolve um conjunto de fenômenos químicos, físicos e termomecânicos. Existem basicamente dois grupos de falhas em ferramentas de corte: contínuas, que tem comportamento determinístico e geradas a partir do desgaste de flanco e de cratera de ferramenta; e as falhas aleatórias, que por sua vez são relacionadas a inúmeras razões, entre elas: choque mecânico, coque térmico, variações no material da peça, etc. (WEINGAERTNER, 2002). Em função da interação desses acontecimentos junto com a ação conjunta de mecanismos de desgaste simples como adesão, abrasão, difusão, oxidação, etc, com influência majoritária de algum deles em diferentes ocasiões, a identificação do mecanismo dominante fica distante de ser fácil, sendo assim algumas interpretações podem ser submetidas a controvérsias. Elas podem ser muito subjetivas até mesmo quando são baseadas na avaliação das condições de corte, velocidades relativas, temperatura e tensões de contato desenvolvidas, entre outros parâmetros específicos do processo (ASTAKHOV, 2006).

O processo de desgaste da ferramenta de corte, na maioria das vezes, ocorre em combinação com o modo dominante de desgaste, dependendo das condições de usinagem, do material da peça e também da geometria da ferramenta (DIMLA, 2000; DEVILLEZ et al., 2003).

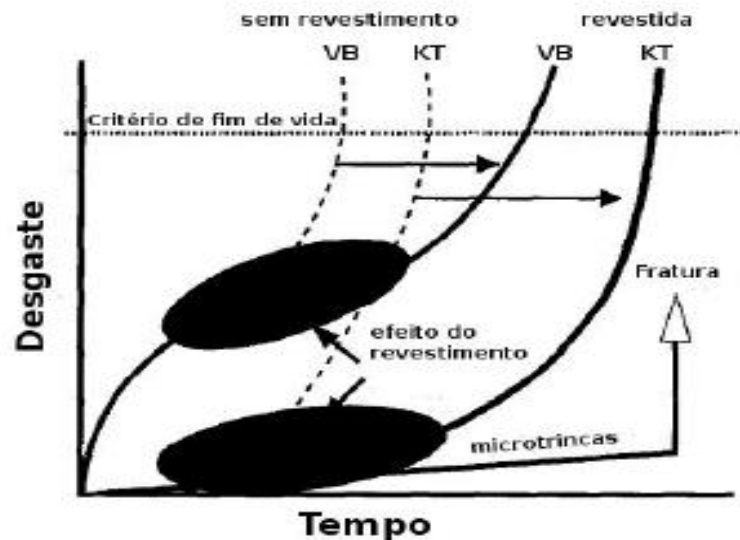
Segundo Mattes, (2009), em situações normais, o tempo em que uma ferramenta de corte perde sua habilidade de produzir peças com dimensões e características superficiais finais esperadas determinam seu fim de vida.

É difícil as propriedades tribológicas do material da ferramenta de corte satisfazer todas as necessidades e condições de desempenho, os revestimentos adequadamente aplicados

elevam a dureza superficial de uma ferramenta de corte em temperaturas elevadas, assim diminuem o desgaste abrasivo, as ferramentas revestidas podem causar alta resistência ao desgaste na parte superficial de um substrato com um material de alta tenacidade. O revestimento impede, através de uma barreira química, a interação entre o material da peça e o material da ferramenta, reduzindo portanto o desgaste da ferramenta. A maior parte do calor gerado durante o processo de usinagem é retirado pelo cavaco e o substrato da ferramenta revestida mantém-se em temperaturas inferiores do que as que não possuem tal revestimento. A maioria dos revestimentos possui uma alta lubrificidade, fator determinante para redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça, levando por fim a redução da temperatura de corte. Outros aspectos também são reduzidos como a adesão e a soldagem de cavacos na ferramenta e por fim, a formação da aresta postiça de corte e a craterização (GU et al., 1999).

De acordo com Quinto, (1996), os mecanismos de desgastes são influenciados pelo revestimento, este que tem como maior função retardar o surgimento do desgaste de cratera e de flanco em substratos de ferramenta com menor resistência ao desgaste. O desenvolvimento dos desgastes de cratera e de flanco é de forma gradual e mais previsível que o aparecimento de microtrincas que acarretam à fratura de maneira abrupta. Os modos de desgaste mudam com a composição do conjunto ferramenta-peça e geometria da aresta de corte em resposta às solicitações térmicas e mecânicas provocadas pelos fatores impostos pela velocidade de corte e avanço, bem como de outros parâmetros da geometria de corte. A figura 19 mostra o efeito do revestimento no mecanismo de desgaste das ferramentas.

Figura 17 – Efeito do revestimento nas curvas de desgaste das ferramentas de cratera (KT) e de flanco (VB) (VB)



Fonte: (QUINTO,1996)

Para realizar a análise dos mecanismos de desgaste, visto que é um processo complexo, Machado, (2009), sugere empregar alguns tipos de diagnóstico onde avaliam-se diretamente as superfícies desgastadas. As ferramentas de corte podem ser limpas em solventes com o intuito de remover o material aderido àquela região desgastada, entretanto a dissolução das partículas aderidas não é o método mais recomendado se o mecanismo de adesão estiver presente. Podem ser empregados outros tipos de análises como as qualitativa e quantitativa superficial de elementos presentes. A finalidade deste método é eliminar a possibilidade de predominância de um ou outro mecanismo de desgaste (NEVES, 2010).

5.1 Principais mecanismos de desgaste das ferramentas de corte

Há diversos mecanismos de desgastes das ferramentas de corte nos processos de usinagem, entre eles os mais comuns são desgaste por abrasão mecânica (ou de flanco), difusão, oxidação, adesão, frontas, cratera, lascamento, entre outros. O primeiro é um dos principais causadores de desgastes das ferramentas, pois é estimulado pela ocorrência de partículas duras e abrasivas no material da peça e pela atuação da temperatura que diminui a dureza da ferramenta. Outro jeito de ocorrer é em função da remoção de partículas duras tanto da ferramenta, como do revestimento, promovendo o desgaste abrasivo em uma área

adjacente. A resistência à abrasão e a dureza estão fortemente relacionadas. O desgaste de flanco causado pela abrasão na maioria das vezes aparece como riscos paralelos à direção de corte. Este tipo de desgaste leva a deterioração da superfície da peça e, por alterar totalmente a forma da aresta de corte, faz com que a peça altere de dimensão, podendo em alguns casos sair de sua faixa de tolerância (SANDVIK COROMANT, 2005; DIMLA, 2000; DEVILLEZ et al., 2003).

Segundo Trent, (1984) e Diniz et al. (2006), o desgaste de cratera ocorre pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco na superfície de saída da ferramenta. O cavaco escorrega na superfície de saída da ferramenta se atritando e, assim, provoca neste plano desgaste em baixo relevo. Geralmente não ocorre esse tipo de desgaste nos processos de torneamento, já que é consequência do tipo de material usinado, da geometria do cavaco, parâmetros de corte, tipo de ferramenta, etc. O aumento do desgaste de cratera acarreta na quebra da ferramenta.

Segundo Diniz et al, (2006), o mecanismo de oxidação se dá especificamente nas extremidades do contato do cavaco com a ferramenta devido a concentração do ar nesta região. Sendo assim, geralmente a oxidação é a responsável pelo desgaste de entalhe. O atrito entre o cavaco e a ferramenta remove facilmente os óxidos formados pelo cobalto e tungstênio, estes dois que são porosos, ocasionando assim o desgaste.

O desgaste por difusão acontece principalmente pela elevada temperatura na região de corte entre o cavaco e a ferramenta. A transferência de átomos entre os materiais é influenciada e depende não só da temperatura, mas também da duração do contato e da afinidade eletroquímica de ambos materiais envolvidos na zona de cisalhamento secundário. A zona de aderência e a zona de cisalhamento secundário favorecem a existência de elevadas temperaturas e tempo suficiente de contato. Logo, se os materiais de cavaco e ferramenta de corte tiverem afinidade química, estão inseridas todas as condições para a difusão (NEVES, 2010).

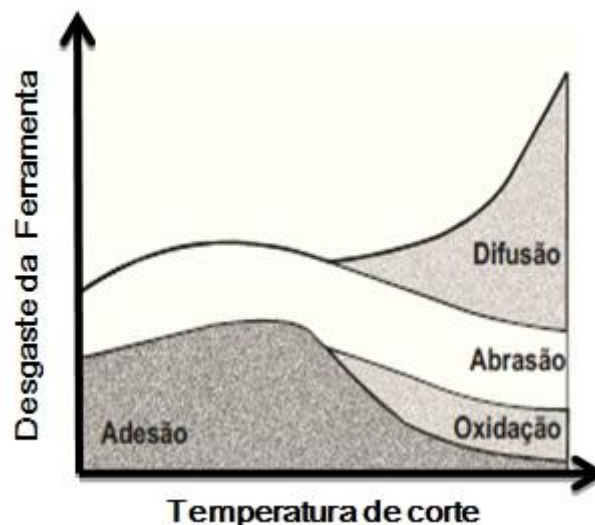
Ainda segundo Diniz, (2000), o desgaste por adesão acontece pela aderência do material da peça sobre a ferramenta, ou seja, se duas superfícies metálicas são colocadas em contato sob cargas altas ou moderadas forma-se entre ambas um extrato metálico que gera aderência. Este extrato tem tamanha resistência que na tentativa de separar as superfícies, ocorre ruptura em um dos metais e não na superfície de contato, logo, as partículas da superfícies de um metal migram para a superfície do outro. O fenômeno da aderência ajuda na formação da aresta postiça de corte, mas o desgaste por adesão pode aparecer mesmo sem a formação desta aresta. Segundo Trent, (2000) e Machado, (2009), se convencionou chamar este mecanismo de “attrition”, e visto que ele se processa no nível dos grãos, no microscópio, as áreas

desgastadas por “attrition” tem um aspecto áspero, e pode ser descrito como uma ação cíclica de adesão e remoção de material da peça na superfície da ferramenta, gerando perdas contínuas de microfragmentos que são deslocados pelo material removido (NEVES, 2010).

Um tipo comum de desgaste da ferramenta é o lascamento, onde partículas maiores são retiradas bruscamente. Ocorre geralmente em ferramentas com material frágil ou quando a aresta de corte é pouco reforçada (DINIZ et al., 2000).

Todos esses mecanismos sofrem grande dependência da temperatura de corte ou de outro qualquer parâmetro que a influencie, especialmente neste caso a velocidade de corte. Em temperaturas mais amenas, apenas os mecanismos de adesão e abrasão estão inseridos, sendo a adesão predominante na formação do desgaste, porém em altas temperaturas a adesão dá lugar aos mecanismos de difusão e oxidação. Através da Figura 20 pode se observar que esses dois últimos mecanismos vão crescendo com o aumento da temperatura, e que a difusão cresce em uma curva exponencial, também observa-se que o aumento da temperatura é fator decisivo para o desgaste total da ferramenta.

Figura 18 – Mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas de corte



Fonte: (KOMANDURI, ADAPTADO, 1997)

Por último, outro mecanismo de falha de ferramentas de corte é a deformação plástica da aresta de corte. Quando se aquece a superfície de saída à temperaturas na faixa de 900-1200 ° C, um fluxo plástico de material se inicia em um volume adjacente a esta face. Este fluxo acontece na zona de aderência, principalmente pela ligação adesiva entre o cavaco e a superfície de saída. No caso de ferramentas de metal duro, a deformação plástica é mais

acentuada na matriz de cobalto. Esta deformação plástica causa o escorregamento de grãos de WC da camada mais macia de cobalto que sofre constante deformação plástica ocasionando sulcos e inclusões no contato com o material da peça. Caso haja aumento da temperatura, uma camada líquida se forma entre a ferramenta e a peça em decorrência da difusão que promove a formação do composto de baixo ponto de fusão Fe_2W ($1130^{\circ}C$). (Esta camada é rapidamente extraída no corte).

A deformação plástica da aresta de corte tende a ocorrer de nas velocidades mais altas e geralmente nos materiais de maior dificuldade de usinagem, em paralelo com o fluxo plástico e o derramamento do material sobre a superfície da ferramenta. Esta deformação plástica é também notada em PCD metalocerâmicos e materiais cerâmicos usados nas ferramentas de corte. Na maioria das vezes a causa determinante da falha antecipada da ferramenta é devido a deformação plástica. A intensidade da deformação plástica nas ferramentas de metal duro aumenta com a concentração de cobalto, pode crescer também com o aumento do tamanho dos grãos de metal duro. A intensidade de deformação plástica diminuiu quando o cobalto na matriz de metal duro está junto ao tungstênio pela grande solubilidade do tungstênio no cobalto. A ocorrência da deformação plástica acarreta na mudança dos ângulos de saída e de folga da ferramenta provocando, assim, uma aceleração da taxa de desgaste. O lascamento e a quebra da aresta de corte ocorrem como estágio final do fenômeno de deformação plástica (ASTAKHOV, 2006).

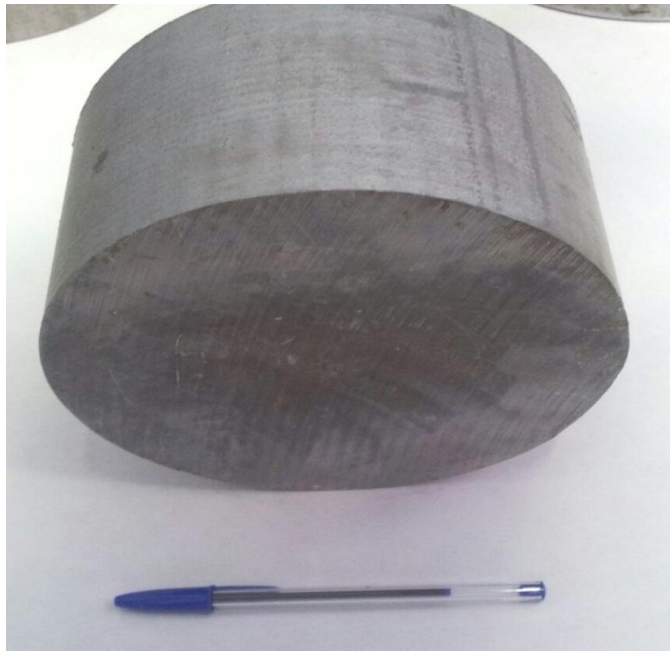
6. MATERIAS E MÉTODOS

6.1 Procedimento experimental

Realizou – se o processo de usinagem por torneamento cilíndrico com a liga de alumínio 6005 A, fabricada por processo de fundição na CBA.

As 3 amostras são todas no formato de tarugos, e foram dispostas em corpos de prova com 100mm de comprimento de usinagem (Lf) e 177 mm de diâmetro, conforme mostra a figura 21.

Figura 19 - Amostra de tarugo utilizada no estudo



Fonte: Autores

Tabela 4 - Composição química da liga 6005A

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros
6005A	0,5-0,9	0,35	0,30	0,50	040-0,70	0,30	0,20	0,10	0,15

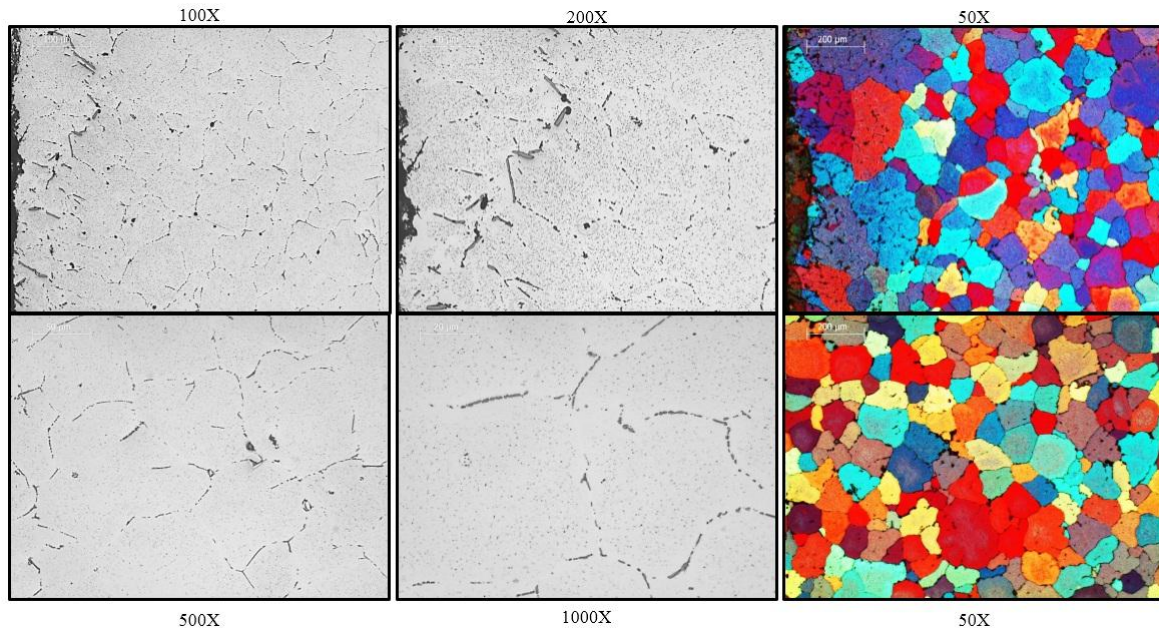
Fonte : Votorantim Metais

Tabela 5 - Dureza da liga 6005A

Liga	Têmperas	Dureza Brinell
6005A	T5 e T6	82

Fonte: Votorantim Metais

Figura 20 – Imagem da microestrutura e estrutura granular na região da periferia e meio raio



Fonte: Votorantim Metais

Tabela 6 - Resultados da caracterização do material

Transformação de fase	Nível de Poros	Segregação TiB ₂	Tam. de grão ASTM	Diâmetro médio de grãos (µm)	Segregação Inversa (µm)	Camada Refusão (mm)	Inclusões e segregações
96,79%	3	3	3,5	107	200	2,2	Isento

Fonte : Votorantim Metais

Por possuir somente um formato cilíndrico, o material foi levado para realizar o rebaixo e acoplá-lo na castanha do centro de usinagem, bem como a colocação do contraponto.

Os ensaios foram realizados com pastilhas cerâmicas sem recobrimento com composição de pós de alumina α (α -Al₂O₃) e óxido de magnésio (MgO), com impregnação de carbetto de silício (SiC).

O processo foi realizado em 5 passos conforme descrito na tabela a seguir:

Tabela 7 - parâmetros utilizados no trabalho.

Condição	Vc (m/min)	f (mm/rot)	a_p (mm)
1	500	0,1	0,5
2	800	0,1	0,5
3	1000	0,2	0,5
4	1000	0,15	0,5
5	1000	0,15	0,7

Fonte: Autores

A escolha dos parâmetros de corte iniciais foram decididos através do estudo da literatura de ferramentas cerâmicas, onde sabemos que esse material deve ser usado em altas velocidades.

Entre cada etapa, o cavaco foi coletado para uma posterior análise sobre os tipos e comprimentos dos mesmos.

Os procedimentos mencionados acima foram realizados todos com condições a seco (sem aplicação do fluido) devido às características do material cerâmico.

Cada aresta de corte foi utilizada uma única vez e identificada de acordo com o parâmetro para a posterior análise de desgaste da mesma.

7. EQUIPAMENTOS, FERRAMENTAS E MATERIAIS UTILIZADOS

7.1 Equipamentos utilizados

Maquina Ferramenta: Torno CNC, marca Romi, modelo GL240M 30S. Máquina com rotação máxima de 4500rpm, 18kW, disponível no DMT/FEG-UNESP – Guaratinguetá, conforme Figura 25:

Figura 21 - Torno modelo ROMI GL240M disponível no laboratório do DMT



Fonte: Autores

Microscópio óptico Zeiss utilizado para a posterior análise das condições finais da ferramenta e dos cavacos originados no processo.

Figura 22 – Microscópio marca ZEISS



Fonte: Autores

7.2 Ferramentas utilizadas

Ferramentas de corte de cerâmica sem cobertura, não comercial obtida pelo professor orientador Dr. José Vitor Candido de Souza.

Figura 23 - Ferramenta cerâmica



Fonte: Autores

Suporte para fixação da ferramenta de corte.

Figura 24 - Suporte de ferramenta



Fonte: Autores

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

8.1 Desgaste da ferramenta

O desgaste da ferramenta foi analisado através do uso do microscópio óptico da marca Zeiss onde a peça primeiramente foi colocada sobre uma resina a fim de posicioná-la da melhor forma para a construção das imagens.

A figura 28 é referente à deteriorização da ferramenta causado pelo parâmetro $V_c = 500\text{m/min}$, $f = 0.10\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$. Essas condições resultaram em um menor desgaste da ferramenta porém é possível observar a avaria da aresta.

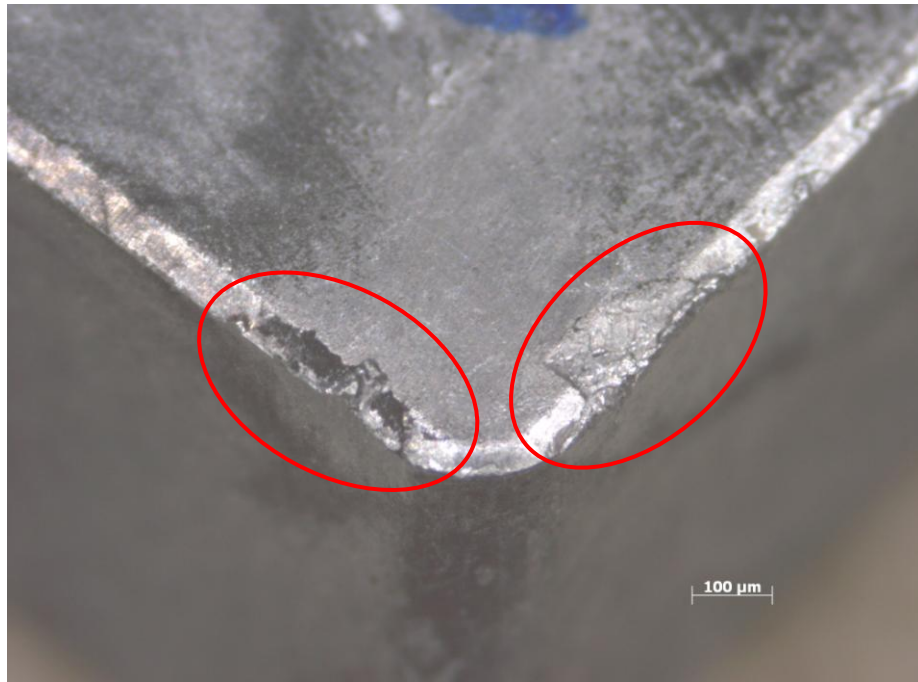
Figura 25 – Deteriorização causada pelos parâmetros $V_c = 500\text{m/min}$, $f = 0.10\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$



Fonte: Autores

A figura 29 é referente à deteriorização da ferramenta causada pelos parâmetros $V_c = 800\text{m/min}$, $f = 0.1\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$. Nota-se um desgaste de avaria e esfoliação nas arestas da ferramenta.

Figura 26 – Deteriorização causada pelos parâmetros $V_c = 800\text{m/min}$, $f = 0.1\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$.



Fonte: Autores

A figura 30 é referente ao desgaste da ferramenta causado pelos parâmetros $V_c = 1000\text{m/min}$, $f = 0.2\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$. É possível notar um desgaste de flanco na aresta da ferramenta.

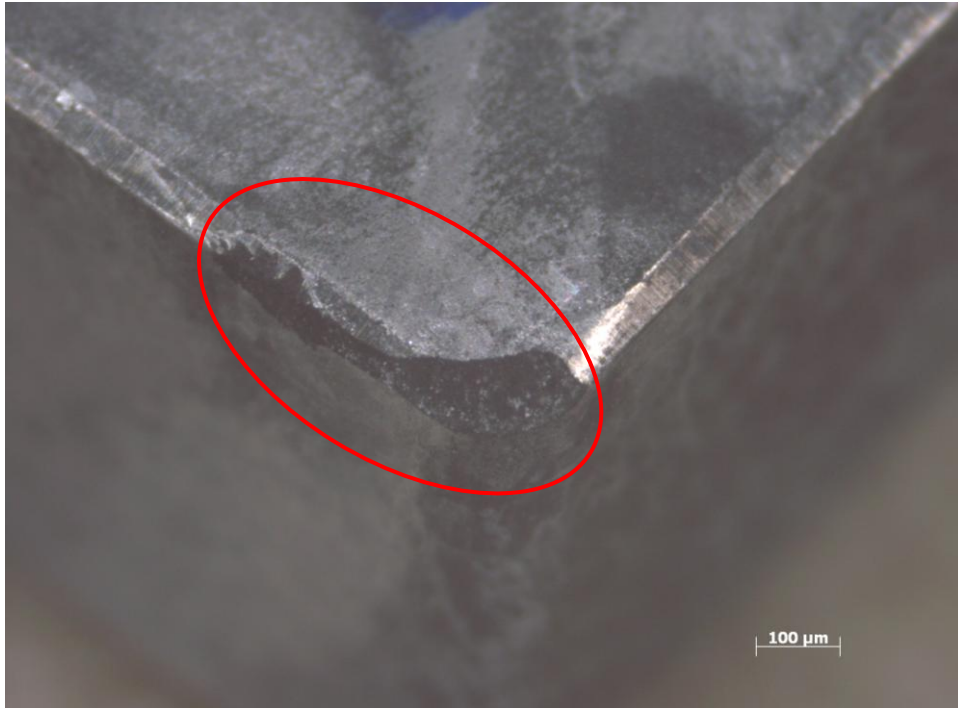
Figura 27 – Desgaste causado pelos parâmetros $V_c = 1000\text{m/min}$, $f = 0.2\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$.



Fonte: Autores

A figura 31 é referente à deteriorização da ferramenta causado pelos parâmetros $V_c = 1000\text{m/min}$, $f = 0.15\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$. É possível notar um desgaste de flanco nas duas arestas da ferramenta e um pequeno desgaste por avaria localizado na aresta esquerda.

Figura 28 – Deteriorização causada pelos parâmetros $V_c = 1000\text{m/min}$, $f = 0.15\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$



Fonte: Autores

A figura 32 é referente à deteriorização causada pelos parâmetros $V_c = 1000\text{m/min}$, $f = 0.15\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.7\text{mm}$. É possível observar um desgaste por avaria na aresta da ferramenta.

Figura 29 - Deteriorização causada pelos parâmetros $V_c = 1000\text{m/min}$, $f = 0.15\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.7\text{mm}$



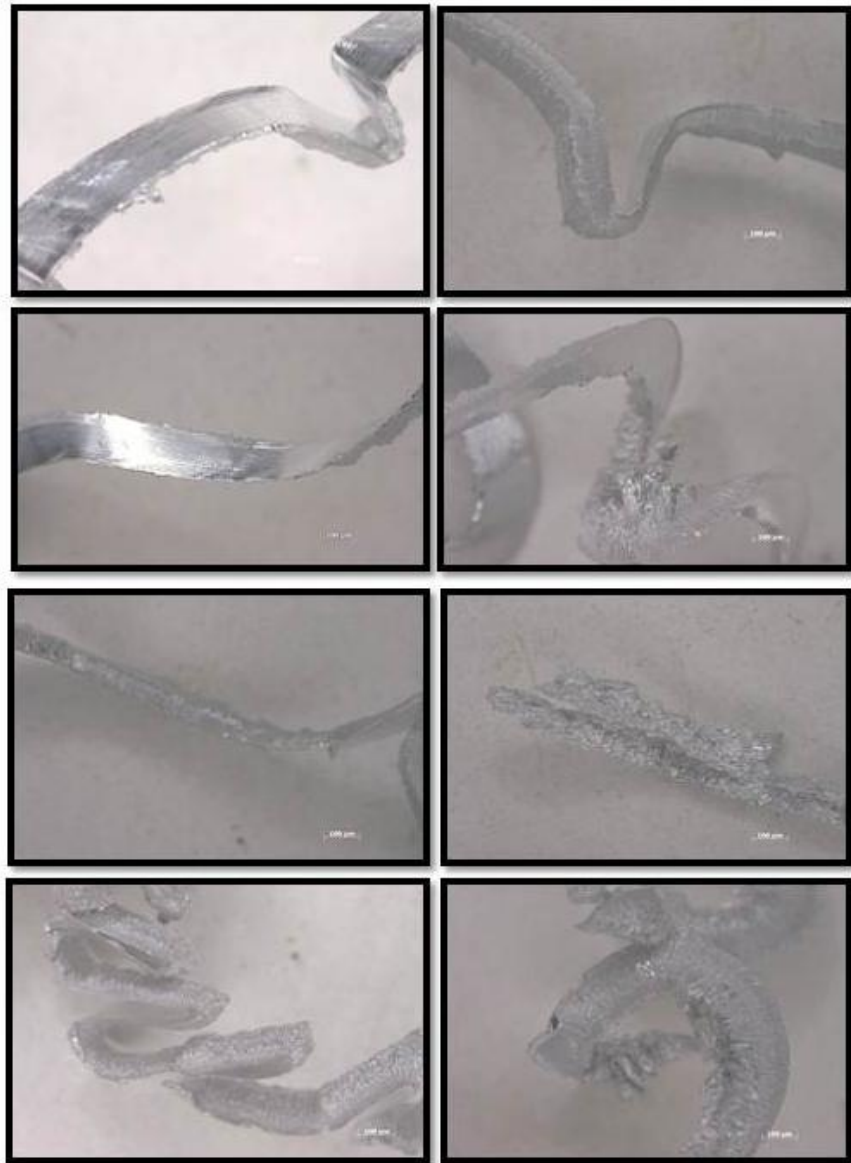
Fonte: Autores

8.2 Tipos e formas do cavaco.

Os tipos e formas de cavaco foram analisados com o microscópio óptico da marca Zeiss.

A figura 33 apresenta os resultados das imagens microscópicas de cada cavaco gerado no processo. Foi utilizada uma objetiva de 10x.

Figura 30 - cavacos gerados no processo








Fonte: Autores

Através das imagens microscópicas, foi possível observar que o tipo predominante de cavaco gerado pela liga 6005A foi contínuo.

A tabela 5 apresenta o parâmetro utilizado e cada forma de cavaco gerado.

Tabela 8 - Parâmetros e cavacos gerados

Condições	Formas de cavaco
V= 500 ; f= 0.1; ap = 0.5	
V= 800 ; f= 0.1 ;ap = 0.5	
V= 1000 ; f= 0.2; ap = 0.5	

V= 1000 ; f= 0.15; ap = 0.5	 A photograph showing a highly tangled and fragmented metal chip. The chip is composed of many thin, interconnected strands. A ruler is placed below the chip for scale, showing markings from 0 to 8 millimeters.
V= 1000 ; f= 0.15; ap = 0.7	 A photograph showing a metal chip that is more organized and less tangled than the one in the first image. It consists of several distinct, interconnected loops and arcs. A ruler is placed below the chip for scale, showing markings from 0 to 11 millimeters.

Fonte: Autores

Os cavacos apresentados possuem forma de emaranhado, arcos conectados e fragmentados (segundo ISSO 3685) e são classificados como dificuldade média de usar, sendo os em forma de emaranhados instáveis e não favoráveis ao processo.

9. CONCLUSÃO

Através dos resultados apresentados, é possível observar que o desgaste da ferramenta está diretamente ligado aos parâmetros utilizados, sendo que os menores desgastes foram observados com os parâmetros $V_c = 500\text{m/min}$, $f = 0.10\text{mm/volta}$ e $a_p = 0.5\text{mm}$.

Com relação ao tipo de desgaste, foi observado mais frequência de avarias, isso devido às propriedades da ferramenta cerâmica, que apresenta elevada dureza e baixa tenacidade, isso ainda aliado à presença de carbeto impregnados na ferramenta (fases duras na estrutura).

A maior parte dos cavacos formados é contínuo isso ocorre devido às características do material usinado. A liga 6005 A é uma liga estrutural com média resistência e com menor deformação plástica, porém o alumínio por possuir uma estrutura CFC tem características dúcteis.. Os parâmetros com maior avanço forneceram o melhor cavaco (fragmentados).

REFERÊNCIAS

ABAL. Associação Brasileira de Alumínio. História do alumínio. Disponível em:<
<http://www.abal.org.br/>>. Acesso em: 21 ago. 2015.

ALAUDDIN, M.; CHOUDHURY, I. A.; EL BARADIE, M.A.; HASHMI, M.S.J. Plastics and their machining: a review. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.54, p.40-46, oct. 1995.

ALEXANDRE, R. P. **Redes neurais**: aplicação no monitoramento da vida de ferramentas. 2005. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Unesp. Ilha Solteira, 2005.

ASTAKHOV, V.P. **Tribology of metal cutting**. Great Britain: Elsevier, 2006. 426 p.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W.A. **Fundamentals of machining and machine tools**. 2.ed. Nova Iorque: Marcel Dekker, 1989. 542 p.

CALLISTER JR., W.D., RETHWISCH, D.G. **Ciência e engenharia dos materiais**: uma introdução. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 724 p.

CERVELIN, J. E. **Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento**. 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

CHILDS, T; MAEKAWA, K.; OBIKAWA, T.; YAMANE, Y. **Metal Machining**: Theory and Applications. London: Arnold, 2000. 411 p.

CORRÊA, M. **Um estudo comparativo do comportamento das afiações cônicas e cônica radial em brocas helicoidais de aço rápido**. 1996. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

D.E. Dimla. P. M. Lister On-line metal cutting tool condition monitoring. I: force and vibration analyses International. **Journal of Machine Tools and Manufacture**. Oxford, v.40, Abr. 2000.

DINIZ, A. E., COPPINI, N. L. E MARCONDES, F. C. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Artliber, 2006. 255 p.

DORÉ, C.; BAGETTI, J. H.; BOEHS, L.; GUESSER, W. L.; BRESSIANI, H. A. Avaliação do desempenho de ferramenta de $Al_2O_3+Y_2O_3+NbC$ na usinagem de ferro fundido vermicular. **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, v.4, 2007, Estância de São Pedro. Anais COBEF 2007.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1970. V.1.

GROOVER, M.P. **Fundamentals of modern manufacturing – materials, process and systems**. 2. ed. Hoboken, New Jersey: John Willey & Sons, 2002. 1024 p.

GU. J., GARY. B, SIMON. T, REN-JYH. G. Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts. **Wear**, Laussane. v.225-229, n.1, p.273-284. abr. 1999.

DAVIS J. R. **ASM Specialty handbook**: Aluminum and Aluminum Alloys. Ohio: ASM International, 1993. 784 p.

SOUZA .J.V.C.; RIBEIRO. O.M.M.; ALVES. M.C.S. ; MUZEL. S.D.; MARCONDES. R. Machining Performance of Nodular Cast Iron With Cemented Carbide And Alumina Ceramic Tools. **Associação brasileira de engenharia e ciências mecânicas**, v.23, Rio de Janeiro, dez. 2015.

JOSEPH. R. D. **ASM metals handBook**: Machining Processes. ASM International, 1989. Vol 16.

MACHADO, A.; ABRÃO, A.; COELHO, R.; SILVA, M. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2009. 384 p.

MACHADO, C. A. M. **Estudo comparativo de diferentes geometrias de corte em broca de metal duro com canal reto em ferro fundido cinzento**, 2011. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2011.

MATTES, W. **Influência dos revestimentos de brocas na furação do ferro fundido nodular austemperados**, 2009. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Sociedade Educacional de Santa Catarina, Joinville, 2009.

NEVES, D. **Influência da texturização laser na vida de ferramentas de torneamento revestido por CVD e PVD**, 2010. 220 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2010.

NOGUEIRA, J. S. S. A. **Recozimento de homogeneização da liga 6063 na empresa sapa II perfis**, 2012. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012.

POLLI, M. L. **Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte**, 2005. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

POLMEAR I. J., **Light alloys: metallurgy of the light metals**. 3.ed. London: Butterworth-Heinemann, 1995. 384 p.

QUINTO, D. T. Mechanical property and structure relationships in hard coatings for cutting tools. **Journal of Vacuum Science & Technology**, New York. v.6. 2149–2157. 1988.

RODRIGUES, A. R. **Estudo da geometria de aresta de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte**, 2005. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

SANDVIK. **Manual técnico de usinagem: torneamento, fresamento, furação, mandrilamento, sistemas de fixação**. Sandviken: AB Sandvik Coromant, 2005. 600p.

SOUSA, L. F.. **Estudo da viabilidade da ferramenta cerâmica alumina e ítria (YAG) desenvolvida na usinagem do ferro fundido nodular**, 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2013.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**, 6. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. 314 p.

TANIGUCHI, N. The state of the art of nanotechnology for processing of ultraprecision and ultrafine products. **Precision Engineering**, Guildford, v.16, n.1, p. 5-24. Set. 1994.

TRENT, E.; WRIGHT, P. **Metal cutting**. 4.ed. Oxford: Butterworth – Heinemann, 2000. 446 p.

Wingaertner, W. L. ; Souza. A. J. Aplicação de um Sistema de monitoramento inteligente no diagnóstico de falhas em ferramentas de corte: uma abordagem teórica. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, João Pessoa. v.2, p. 10. Ago. 2002

ZANGRANDI, A. **Alumínio e suas ligas**: fundamentos metalúrgicos e tecnológicos. Lorena: Instituto Santa Teresa, 2008. 104 p.