

FREDERICO FERREIRA LUIZ GORLA

**TORNEAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO DA CLASSE 6005 UTILIZANDO
FERRAMENTA CERÂMICA**

Guaratinguetá
2015

FREDERICO FERREIRA LUIZ GORLA

TORNEAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO DA CLASSE 6005 UTILIZANDO
FERRAMENTA CERÂMICA

Trabalho de Graduação apresentado 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 (a): José Vitor Candido de Souza

G669t

Gorla, Frederico Ferreira Luiz

Torneamento da liga de alumínio da classe 6005 utilizando ferramenta cerâmica / Frederico Ferreira Luiz Gorla – Guaratinguetá, 2015.

57 f. : il.

Bibliografia: f. 55-57

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. Ligas de alumínio 2. Usinagem 3. Material cerâmico I. Título

CDU 669.715


FREDERICO FERREIRA LUIZ GORLA

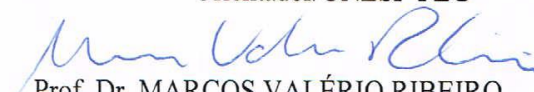
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"

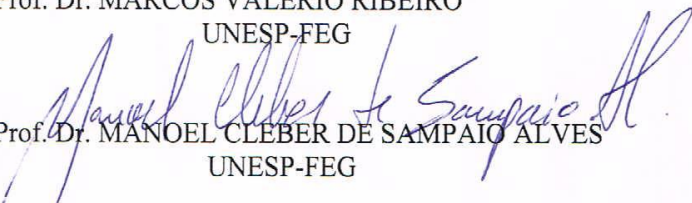
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS


Prof. Dr. MIGUEL ÁNGEL RAMÍREZ GIL
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ VITOR CÂNDIDO DE SOUZA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
UNESP-FEG


Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP-FEG

DADOS CURRICULARES

FREDERICO FERREIRA LUIZ GORLA

NASCIMENTO	22.05.1993 – ARARAQUARA / SP
FILIAÇÃO	Luiz Augusto Outeiro Gorla Ana Maria Ferreira Luiz Gorla
2011/2015	Curso de Graduação Engenharia de Materiais – FEG/UNESP

Aos meus pais e meu irmão que, incondicionalmente, demonstraram todo apoio, companheirismo e amor em todas as etapas de minha vida. Serei eternamente grato.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha mãe Ana, meu pai Luiz Augusto, e meu irmão Felipe, pelo amor, carinho e confiança em mim depositados durante todos esses anos,

aos outros irmãos que a República Amoribunda me deu, que se tornaram eternas amizades, pelo companheirismo, solidariedade e lealdade. Em especial aos meus irmãos de ano Fifa e Celino, pela união,

aos grandes amigos de Araraquara de longa data, pela amizade verdadeira e imutável, mesmo com o passar dos anos,

a todos os outros amigos que fiz na Universidade, em especial aos companheiros da minha sala de Engenharia de Materiais, pela coletividade e união,

ao meu orientador, Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza, pela paciência, pelo acolhimento e pelos valiosos conhecimentos transmitidos,

a todos os outros professores e funcionários da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, que me ajudaram e me ensinaram de alguma forma inestimáveis conceitos durante esses cinco anos de graduação,

à Votorantim Metais – CBA, pelo fornecimento dos tarugos de alumínio para a realização deste trabalho,

e, por fim, a todas as pessoas que passaram por minha vida e, de alguma forma, me ajudaram a me tornar uma pessoa melhor.

“E a coisa mais divina que há no mundo é viver cada segundo como nunca mais.”

Vinicius de Moraes

GORLA, F. F. L. **Torneamento da liga de Alumínio da classe 6005 utilizando ferramenta cerâmica**. 2015. 57 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Os processos de usinagem apresentam-se como um dos processos de fabricação mais importantes no mundo moderno. Nestes processos existem vários elementos que irão influenciar no resultado final da peça usinada. Dentre estes, as ferramentas apresentam-se como principal fator do aumento de custo, devido à sua influência global no processo. Nas indústrias aeronáuticas esse fator pode ser ainda mais evidenciado em função da necessidade de usinagem de diversas ligas, entre elas, as ligas de alumínio. Essas ligas devem possuir um acabamento superficial específico para uso de fuselagem dos aviões. Esta modalidade de indústria é um dos segmentos que ainda se mantém em crescimento no Brasil, e buscam assim alternativas viáveis nos processos de fabricação dos materiais, devido à necessidade de produzir cada vez mais peças e equipamentos, com custos cada vez mais reduzidos. O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de uma cerâmica com diferencial de propriedade. As cerâmicas foram desenvolvidas utilizando uma pré-sinterização a 1200 °C, com posterior sinterização a 1600 °C, e aplicada ao processo de torneamento a seco na liga de Alumínio 6005. As caracterizações das cerâmicas demonstraram dureza no centro de 1700 MPa e na superfície 1950 MPa, densidade de $98,5 \pm 0,14$ g/cm³. Os insertos cerâmicos foram retificados e lapidados de acordo com norma ISO 1832. Posteriormente os insertos cerâmicos foram submetidos aos testes de torneamento a seco em um torno da marca ROMI, modelo GL240M, utilizando-se as velocidades de corte de 500, 800 e 1000 m/min, e avanços variados. Os resultados demonstraram baixo desgaste de flanco para todas as velocidades de corte, e o melhor acabamento superficial, (R_a e R_t) com rugosidades de $R_a = 0,4935$ μ m e $R_t = 8,112$ μ m. De maneira geral, pôde-se constatar que a ferramenta apresenta importante potencial para usinagem da liga 6005, e que o uso dos parâmetros corretos pode diminuir e/ou eliminar processos posteriores, proporcionando importantes reduções de custos nos processos de usinagem.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem. Liga de Alumínio. Ferramenta cerâmica. Rugosidade.

GORLA, F. F. L. **Turning of 6005 Aluminum alloy using ceramic tool**. 2015. 57 f. Final Paper (Bachelor's Degree in Materials Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

Machining processes are one of the most important manufacturing processes in the modern world. In these processes, there are many elements which will influence in the final result of the machined part. Among them, the tools are the principal factor of the rising cost, because its global influence on the process. In aeronautical industries, this can be more evidenced due the need to machining several alloys, between them, aluminum alloys. These alloys have to demonstrate a specific surface finishing to be used in aircraft's fuselage. This kind of industry is one of the segments which is still rising in Brazil, and they are looking viable alternatives in the manufacturing processes of materials, due the need to produce more and more parts and equipment, with costs increasingly reduced. The purpose of this project is the development of a ceramic with differentiated properties. The ceramics were developed using a pre-sintering at 1200 °C, with posterior sintering at 1600°C, and subjected to dry turning process on aluminum alloy 6005. The characterizations showed that ceramics presented with toughness on the center of 1700 MPa and on the surface of 1950 MPa, density $98,5 \pm 0,14$. g/cm³. Ceramics were grinded and faceted, according to ISO standard 1832, and subjected to turning tests in a ROMI lathe brand, model GL240M, using cutting speeds of 500, 800 and 1000 m/min with different feed rates. The machining results showed low occurrence of flank wear to all cutting speeds, and better surface finishing average values of $R_a = 0,4935$ μm and $R_t = 8,112$ μm. In general, it could be seen that the tool presents important potential to machining 6005 alloy, and that the use of correct parameters can decrease and/or eliminate subsequent processes, providing important reductions in costs related to the machining processes.

KEYWORDS: Machining. Aluminum alloy. Ceramic tool. Roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma indicativo dos processos de fabricação de acordo com a máquina-ferramenta empregada	18
Figura 2 – Ilustração dos torneamentos	20
Figura 3 – Séries das ligas forjadas	25
Figura 4 – Características de resistência dos materiais de ferramentas.....	30
Figura 5 – Resistência à quente dos materiais de ferramentas	31
Figura 6 – Ferramenta de corte e seus respectivos parâmetros	32
Figura 7 – Indicação dos planos referenciais na ferramenta de corte.....	33
Figura 8 – Ilustração dos Ângulos de Posição e Ponta.....	34
Figura 9 – Ilustração do Ângulo de Inclinação.....	35
Figura 10 – Ilustração dos Ângulos de Cunha, Folga e Saída.....	36
Figura 11 – Fluxograma das etapas de fabricação e testes da ferramenta desenvolvida	39
Figura 12 – Microestrutura da superfície da Ferramenta de Al_2O_3 + DOPANTES + SiC, polida e atacada termicamente.....	42
Figura 13 – Alumínio 6005 fornecido pela Votorantim Metais - CBA.....	43
Figura 14 – Porta Ferramenta	44
Figura 15 – Rugosímetro Mahr, modelo Marsurf M300	45
Figura 16 – Ferramenta desgastada por quebra de ponta.	47
Figura 17 – Adesão de alumínio na ferramenta.....	48
Figura 18 – Cavacos formados pela Condição 1 ($v_c = 500$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,1$ mm/rot): (a) escala real; (b) Microscópio Óptico com aumento de 10x..	51
Figura 19 – Cavacos formados pela Condição 2 ($v_c = 800$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,1$ mm/rot): (a) escala real; (b) Microscópio Óptico com aumento de 10x..	51
Figura 20 – Cavacos formados pela Condição 3 ($v_c = 1000$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,2$ mm/rot): (a) escala real; (b) Microscópio Óptico com aumento de 10x..	52
Figura 21 – Cavacos formados pela Condição 4 ($v_c = 1000$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,15$ mm/rot): (a) escala real; (b) Microscópio Óptico com aumento de 10x..	52
Figura 22 – Cavacos formados pela Condição 5 ($v_c = 1000$ m/min; $a_p = 0,7$ mm; $f = 0,15$ mm/rot): (a) escala real; (b) Microscópio Óptico com aumento de 10x..	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais elementos de ligas e os efeitos ocasionados pela sua introdução	23
Tabela 2 – Amostra dos parâmetros de corte utilizados nos testes de usinagem	44
Tabela 3 – Parâmetros e resultados envolvidos na Condição 1 de usinagem.....	49
Tabela 4 – Parâmetros e resultados envolvidos na Condição 2 de usinagem.....	49
Tabela 5 – Parâmetros e resultados envolvidos na Condição 3 de usinagem.....	49
Tabela 6 – Parâmetros e resultados envolvidos na Condição 4 de usinagem.....	50
Tabela 7 – Parâmetros e resultados envolvidos na Condição 5 de usinagem.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Aluminum Association
Al	Alumínio
ALCOA	Aluminium Company Of America
APAL	Associação Portuguesa De Anodização E Lacagem
ASTM	American Society for Testing and Materials
Aw	Aluminum Wrought
B	Boro
C	Carbono
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
CBN	Nitreto de Boro cúbico
CFC	Cúbico de Face Centrada
CNC	Comando Numérico Computadorizado
Co	Cobalto
Cu	Cobre
EN	New European
Fe	Ferro
HSS	High Speed Steel
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
NBR	Normas Brasileiras
Ni	Níquel
O	Oxigênio
PCD	Polycrystalline Diamond
Si	Silício
Ta	Tântalo
Ti	Titânio
W	Tungstênio
Zn	Zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

Aa	superfície principal de folga
Aa'	superfície secundária de folga
a_p	profundidade de corte
A_r	superfície de saída
B	largura da haste da ferramenta
d	diâmetro
f	avanço
F1	medida do ponto PK até o plano de base 2
H	altura da haste da ferramenta
hrc	dureza Rockwell C
hv	dureza Vickers
k_r	ângulo de posição
kVA	kilo-volt-ampere
L1	comprimento de programação
L3	máximo comprimento de operação
l_c	comprimento de corte
l_f	percurso de avanço
n	rotação
R _a	rugosidade média
rpm	rotações por minuto
R _t	rugosidade total
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	15
1.1	OBJETIVO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	USINAGEM	17
2.1.1	Torneamento	18
2.1.1.1	Grandezas de Corte	21
2.1.1.2	Velocidades	21
2.1.1.3	Conceitos Auxiliares	22
2.2	ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	22
2.2.1	Aplicação das Ligas de Alumínio	24
2.2.2	Aplicação das Ligas de Alumínio Classe 6000	26
2.3	TIPOS DE FERRAMENTAS DE CORTE	27
2.3.1	Geometria das Ferramentas de Corte	31
2.4	TIPOS E MECANISMOS DE DESGASTE EM USINAGEM	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA FERRAMENTA	39
3.1.1	Composição das Misturas	40
3.1.2	Homogeneização e Secagem	40
3.1.3	Compactação	40
3.1.4	Sinterização	41
3.1.5	Densidade Relativa	41
3.1.6	Preparação para Determinação da Tenacidade a Fratura	41
3.1.7	Testes de Usinagem	41
3.1.8	Avaliação da Ferramenta	42
3.1.9	Máquina Ferramenta	42
3.1.10	Porta Ferramenta	43
3.1.11	Parâmetros de Usinagem	44
3.1.12	Análise da Rugosidade e Desgastes da Ferramenta	45
3.1.13	Formas do Cavaco	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	DESGASTES E AVARIAS DA FERRAMENTA	47
4.2	ANÁLISE DA RUGOSIDADE	48

4.3	ANÁLISE DOS CAVACOS	51
5	CONCLUSÕES.....	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é o metal mais abundante na crosta terrestre e, por suas excelentes propriedades físico-químicas, entre as quais se destacam o baixo peso específico, a alta condutividade térmica e elétrica e a reciclagem, tornou-se o metal não-ferroso mais consumido no mundo. É maleável, dúctil e apto para a mecanização e para a fundição.

O alumínio fundido dissolve outros metais e substâncias metalóides como o silício (que atua como metal). Quando o alumínio se resfria e se solidifica, alguns dos constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida. Isto faz com que a estrutura atômica do metal se torne mais rígida. Os átomos podem ser visualizados como sendo arranjados em uma rede cristalina regular formando moléculas de tamanhos diferentes daqueles do elemento de liga principal. A principal função das ligas de alumínio é aumentar a resistência mecânica sem prejudicar as outras propriedades. Assim, novas ligas têm sido desenvolvidas combinando as propriedades adequadas a aplicações específicas.

A usinagem, por sua vez, é um importante processo de fabricação, sendo responsável por grande parcela de produtos e processos nas indústrias. Contemplar a usinagem de significativos avanços pode ser uma importante ferramenta para superar a atual dificuldade do país. Sendo assim uma possível inserção de uma nova ferramenta no mercado pode ser a chave para melhoria dos processos e por consequente redução de custo.

Segundo Diniz (2003), o desempenho de uma ferramenta no processo de usinagem se faz muito importante para melhorias do acabamento final da peça. Nas indústrias aeronáuticas, o aparecimento de novas ligas e novos materiais tem sido objeto obrigatório de desempenho dos aviões. Importantes pesquisas têm sido realizadas em todo mundo, tendo como objetivo atender as novas implicações de mercados. Estas evoluções já podem ser observadas nas indústrias, entretanto esses fatos implicam em melhorias das propriedades dos materiais utilizados como ferramentas de corte (EZUGWU, 1999).

O desempenho de uma ferramenta no processo de usinagem se faz muito importante para melhorias do acabamento final da peça. Nas indústrias aeronáuticas, o aparecimento de novas ligas e novos materiais tem sido objeto obrigatório de desempenho dos aviões.

Importantes pesquisas têm sido realizadas em todo mundo, tendo como objetivo atender as novas implicações de mercados. Estas evoluções já podem ser observadas nas indústrias, entretanto esses fatos implicam em melhorias das propriedades dos materiais utilizados como ferramentas de corte.

1.1 OBJETIVO

Analisar o desempenho da ferramenta cerâmica na usinagem do alumínio da classe 6005. Avaliar o desempenho da ferramenta quanto aos desgastes em geral, como adesão de material, desgastes de flanco, arestas postiças, quebra de material e afins. Assim como se realizar uma análise a respeito das rugosidades R_a e R_t , e dos cavacos formados a partir do torneamento do material.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

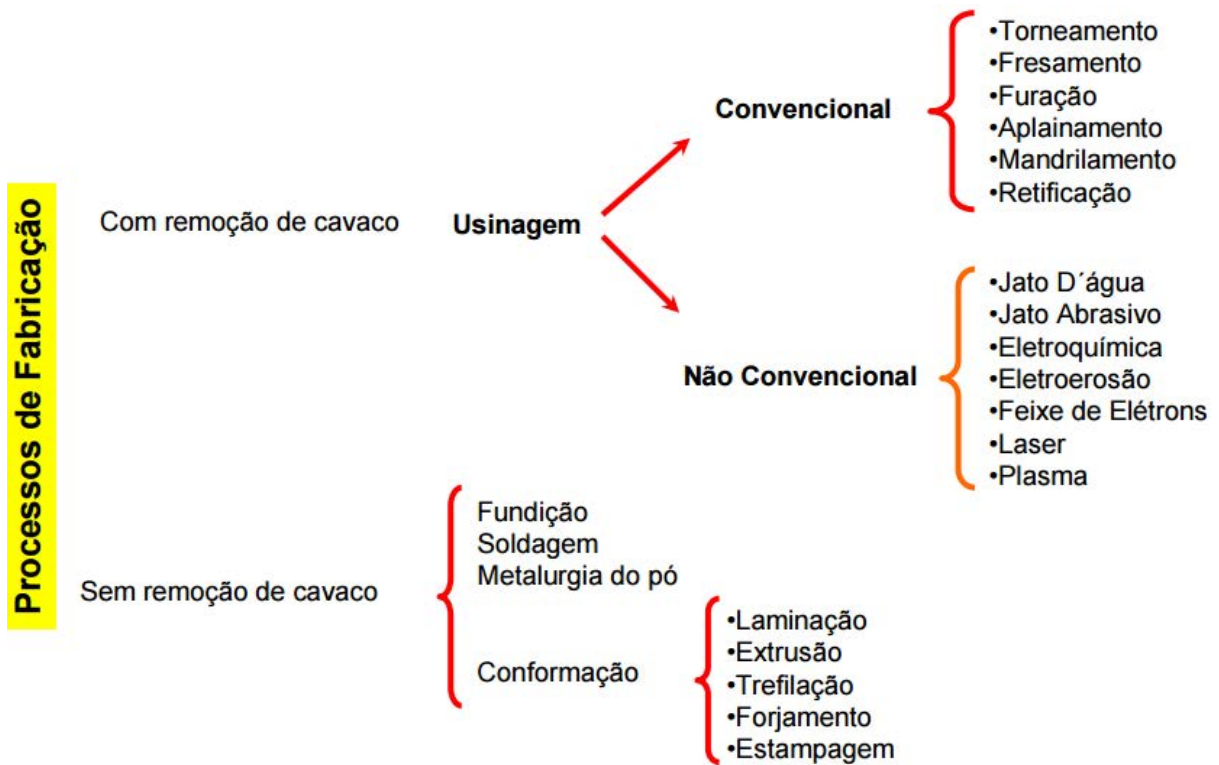
2.1 USINAGEM

A usinagem é um processamento tão antigo quanto o próprio ser humano. No período Paleolítico, quando o homem começa a adquirir suas próprias ferramentas, com o auxílio da pedra lascada, todo o processo de confecção de lanças e afins, pode ser denominado como um processo de usinagem. Segundo Ferraresi (1977), usinagem pode ser descrito como uma operação que, ao conferir à peça forma, dimensão e acabamento, produz cavaco. Cavaco é a porção de material retirada da peça pela ferramenta, que é caracterizada por ter forma geométrica irregular.

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas. Apesar dessa popularidade, trata-se de um processo bastante imprevisível e a definição paradoxal que se segue relata com exatidão toda a sistemática que o envolve: processo complexo e simples ao mesmo tempo, no qual se produzem peças removendo-se o excesso de material na forma de cavacos. É um processo complexo devido às dificuldades em determinar as imprevisíveis condições ideais de corte. É simples porque, uma vez determinadas essas condições, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de intervenção do operador. As condições ideais de corte são as capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível (TRENT, 1985).

Na Figura 1, as principais operações de usinagem convencional executadas com ferramentas de geometria definida são apresentadas e agrupadas de acordo com a máquina-ferramenta empregada. É importante salientar que todas as operações apresentadas a seguir podem ser subdivididas em desbaste e acabamento. No desbaste, a principal preocupação é garantir elevada taxa de remoção de material, sendo, portanto, limitado pela potência da máquina-ferramenta. No acabamento, quando o sobremetal deixado pela operação de desbaste é removido, a qualidade final do componente é prioritária (MACHADO et al., 2009).

Figura 1 – Fluxograma indicativo dos processos de fabricação de acordo com a máquina-ferramenta empregada.



Fonte: Machado et al. (2009).

Em geral, na prática, geralmente haverá mais de uma opção de método de processamento para se fabricar um componente. Para tal, é necessária uma triagem para se analisar alguns fatores e chegar a uma conclusão otimizada. Na seleção de processos, segundo Kalpakjian (2006), os seguintes fatores devem ser considerados: tipo do material e suas propriedades; propriedades finais desejadas; tamanho, forma e complexidade do componente; tolerâncias e acabamentos superficiais exigidos; processo subsequente envolvido; projeto e custo de ferramental; efeito do material na vida da ferramenta ou matriz; sucata gerada e seu valor; disponibilidade do equipamento e experiências operacionais; lead time necessário para iniciar a produção; número de partes requeridas e taxa de produção desejada; custo total do processamento.

O presente trabalho, por sua característica, tratará apenas do processo de torneamento e, o mesmo, será abordado em seguida.

2.1.1 Torneamento

O processo de torneamento, atualmente, é o processo de usinagem mais aplicado nas indústrias e, segundo Ferraresi (1977), pode ser definido como um processo mecânico de

usinagem, destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. Quanto à forma da trajetória, o torneamento pode ser retilíneo ou curvilíneo.

O torneamento retilíneo é um processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, podendo ser: cilíndrico, cônico, radial e perfilamento. O processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina chama-se torneamento cilíndrico, podendo ser externo ou interno como mostram, respectivamente, as Figuras 2 (a) e (b). Quando o torneamento cilíndrico visa à obtenção de um entalhe circular na face perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina, o torneamento é denominado sangramento axial, ilustrado na Figura 2 (c) (DINIZ et al., 2003).

Entende-se que o torneamento cônico é o processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, inclinada em relação ao eixo principal de rotação da máquina e também pode ser externo ou interno, relatados respectivamente nas Figuras 2 (d) e (e).

No processo de torneamento radial a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina. Quando o torneamento radial visa à obtenção de uma superfície plana é denominado faceamento, ilustrado na Figura 2 (f). Quando o torneamento radial visa à obtenção de um entalhe circular é denominado sangramento radial, como mostra a Figura 2 (g) (DINIZ et al., 2003).

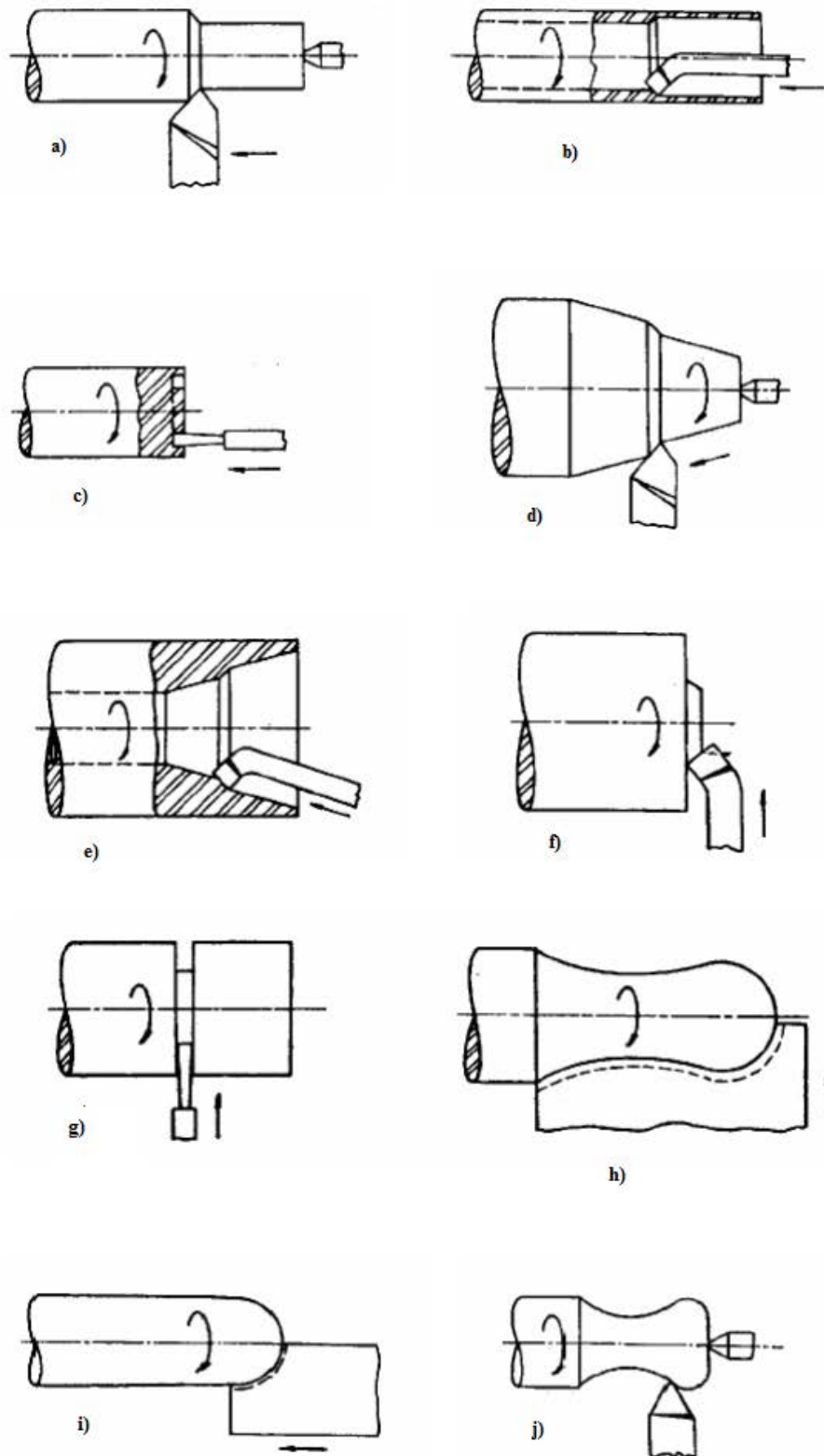
O perfilamento é um processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea radial ou axial, visando à obtenção de uma forma definida, determinada pelo perfil de uma ferramenta. Tais métodos de perfilamento são mostrados abaixo nas Figuras 2 (h) e (i), respectivamente.

O torneamento curvilíneo, mostrado na Figura 2 (j), é o processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória curvilínea.

Quanto à finalidade, as operações de torneamento também podem ser divididas em torneamento de desbaste e acabamento (DINIZ et al., 2003).

Em relação aos tipos de torneamento, as figuras abaixo ilustram os mesmos.

Figura 2 – Ilustração dos torneamentos: (a) cilíndrico interno; (b) externo; (c) sangramento axial; (d) cônico externo; (e) cônico interno; (f) faceamento radial; (g) sangramento radial; (h) perfilamento radial; (i) perfilamento axial; (j) torneamento curvilíneo.



Fonte: Diniz et al. (2003).

Ferraresi (1977) nos diz que, o processo de torneamento é guiado por algumas grandezas, que irão influenciar diretamente na performance do processo, e que serão descritas abaixo.

2.1.1.1 Grandezas de Corte

As grandezas de corte são aquelas que devem ser ajustadas na máquina para que o cavaco seja removido. Para uma boa escolha destes valores, devem ser levados em consideração fatores como o material a ser usinado, a ferramenta utilizada, o grau de acabamento desejado, etc. Dentre essas grandezas, as mais importantes para o entendimento do trabalho são:

- Avanço (f): é o espaço percorrido pela ferramenta em cada rotação da peça, usualmente expresso em [mm/rot].
- Profundidade de corte (a_p): A profundidade de corte é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, expressa em [mm].

2.1.1.2 Velocidades

- Velocidade de corte (v_c): Normalmente indicada em [m/min], é a velocidade tangencial instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte (Ferraresi, 1977). No torneamento, pode ser calculada da seguinte maneira:

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

Sendo, v_c = Velocidade de corte (m/min); d = Diâmetro da peça (mm); n = Rotação (rpm).

- Velocidade de avanço (v_f): Expressa em [mm/min], a velocidade de avanço é a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e o sentido de avanço. Seu valor é calculado da seguinte forma:

$$V_f = f \cdot n \quad (2)$$

Onde, v_f = Velocidade de avanço (mm/min); f = Avanço (mm/rot).

2.1.1.3 Conceitos Auxiliares

Para que tudo que será exposto seja corretamente compreendido, será necessário ainda a introdução de um conceito auxiliar:

- Percurso de avanço (l_f): É o espaço que a ferramenta percorre durante a usinagem da peça, na direção em que se dá o avanço. Este percurso é medido em [mm].

2.2 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

Hoje, sabe-se que o alumínio é o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre. Seus compostos acham-se concentrados nos 15 km mais externos da crosta e correspondem a cerca de 8% em massa da mesma. Só é menos abundante que o oxigênio e o Silício. Seu minério mais importante é a bauxita (PEIXOTO, 2001).

O alumínio e suas ligas são caracterizados por uma massa específica relativamente baixa ($2,7\text{g/cm}^3$, em comparação com $7,9\text{g/cm}^3$ para o aço), condutividades elétricas e térmicas elevadas, e uma resistência à corrosão em alguns ambientes comuns, incluindo a atmosfera ambiente. Muitas dessas ligas são conformadas com facilidade em virtude de suas ductilidades elevadas; isso fica evidenciado nas finas folhas de papel-alumínio nas quais o material relativamente puro pode ser laminado. Uma vez que o alumínio possui uma estrutura cristalina FCC, a sua ductilidade é mantida mesmo em temperaturas muito baixas. A principal limitação do alumínio é sua baixa temperatura de fusão [660°C (1220°F)], o que restringe a temperatura máxima na qual o alumínio pode ser utilizado (CALLISTER, 2008).

Existem inúmeras possibilidades de combinações de elementos químicos com o alumínio. Estas combinações denominadas de ligas de alumínio têm como objetivo principal melhorar as propriedades mecânicas da liga e conferir outras propriedades de uso ou características de fundição.

Assim as Ligas de Alumínio de uso comercial têm na sua composição química:

- Elementos Principais: responsáveis pelas propriedades mecânicas como Cobre, Silício, Magnésio, Manganês, Zinco;
- Elementos Secundários: cujos percentuais são menores e tem como objetivo uma ação específica para se obter determinada propriedade de uso ou característica de fundição como: Níquel, Ferro, Berílio;
- Elementos modificadores, refinadores ou neutralizadores: usados em pequenos percentuais com a finalidade de alterar a microestrutura, obtendo-se melhores propriedades ou características de processo como Titânio, Sódio, Estrôncio, Boro;
- Elementos tidos como impurezas: os quais devem ser controlados ou balanceados de maneira mais rigorosa como: Chumbo, Cromo, Cálcio, entre outros, que em geral exercem influência perniciosa sobre certas propriedades ou características de fundição.

Os principais elementos de ligas e os efeitos ocasionados pela sua introdução são encontrados na tabela 1.

Tabela 1 – Principais elementos de ligas e os efeitos ocasionados pela sua introdução.

Elementos	Efeitos Ocasionados
Cobre (Cu)	Aumento progressivo da resistência e da dureza até adição de 12%Cu. Confere à liga boas propriedades mecânicas a temperaturas elevadas, porém diminui a resistência à corrosão.
Silício (Si)	Teores crescentes de Si, até o ponto eutético, aumentam a fluidez e a resistência mecânica da liga e diminuem a fragilidade a quente e a contração do material.
Magnésio (Mg)	Aumento do limite de resistência e dureza, além de aumento na resistência à corrosão e excelente usinabilidade. Boa resistência ao impacto.
Zinco (Zn)	Confere ao alumínio excelente limite de resistência e ductilidade à temperatura ambiente, por outro lado aumenta a susceptibilidade à corrosão sob tensão.

2.2.1 Aplicação das Ligas de Alumínio

Diógenes (2011) nos diz que, pelo fato do alumínio possuir as melhores combinações possíveis para se reunir em uma liga, este se caracteriza como um dos materiais mais versáteis existentes, quando se trata de engenharia, arquitetura ou indústrias em geral.

As ligas de alumínio, por possuírem ampla gama de combinações possíveis, são produzidas de maneiras diferentes, de acordo com a aplicação a ser destinada para o mesmo, são elas (ALCOA, 2010):

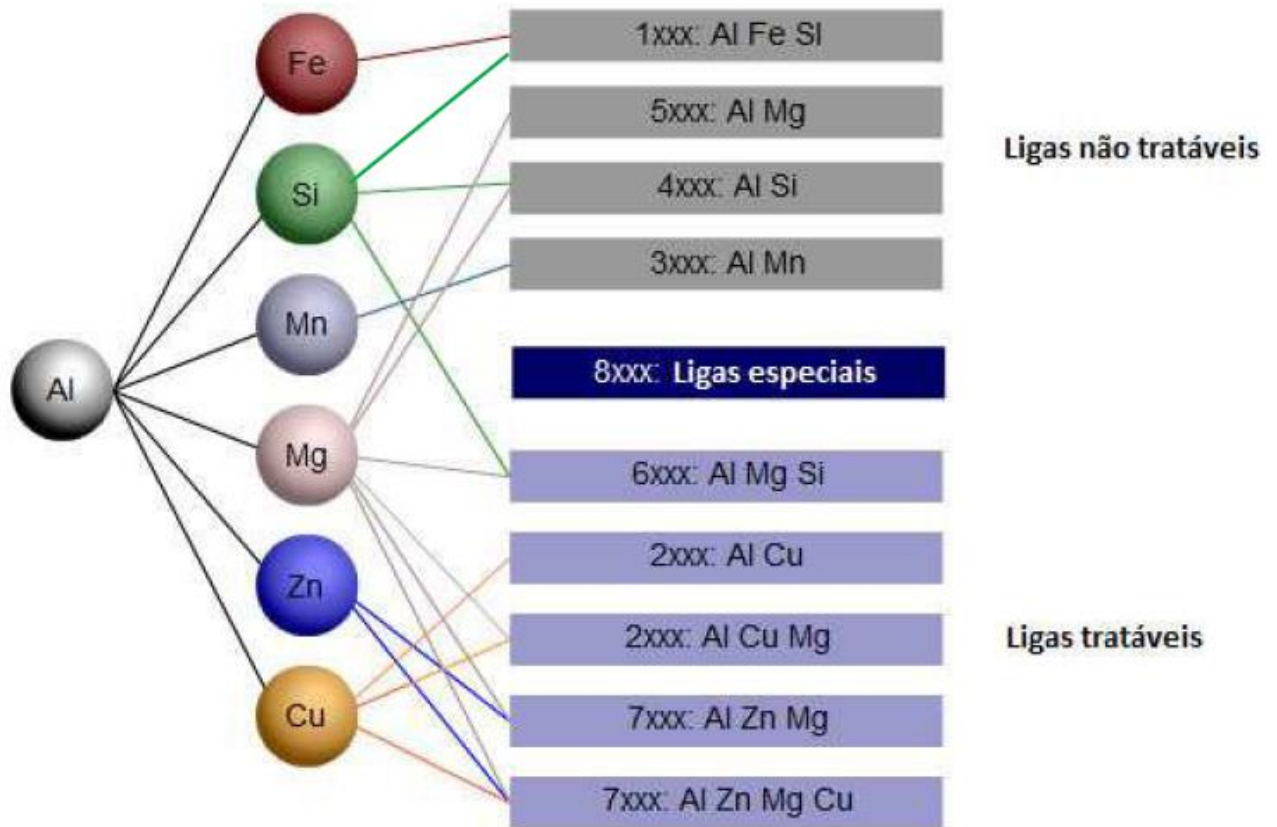
- Construção civil;
- Esquadrias e revestimentos;
- Telhas;
- Estruturas;
- Transportes;
- Aeronáutica;
- Indústria Automotiva;
- Embarcações;
- Vagões;
- Indústria eletroeletrônica;
- Bens de consumo;
- Máquinas e equipamentos;
- Embalagens.

Quanto à composição, as ligas trabalhadas podem ser classificadas em 8 diferentes séries. As séries das ligas trabalhadas são designadas por 4 dígitos que podem ser precedidos ou seguidos por letras. O prefixo A representa o padrão AA da Aluminum Association e o prefixo EN AW representa o padrão Europeu. O primeiro dígito indica a série e o segundo dígito indica as leves modificações na liga já existente. Os significados do terceiro e quarto dígitos dependem do primeiro: para a série 1xxx, o terceiro e quarto dígitos indicam 0,xx% de alumínio maior do que 99,00% (BAUCCIO, 1990).

Para as séries de 2xxx a 8xxx, o terceiro e quarto dígitos representam uma liga específica sem significado físico. Eles somente diferenciam as diversas ligas existentes nesses grupos. A série 8xxx contém todas as ligas com formulações especiais que não se encaixam

nos padrões das séries de 1xxx a 7xxx. O sufixo A indica a variação nacional da liga. Na Figura 3, são mostrados os principais elementos que constituem as ligas de cada série (ALUMINUM, 2011; ASM, 1990).

Figura 3 - Séries das ligas forjadas.



Fonte: Alcoa (2015).

As ligas fundidas são classificadas de acordo com sua composição em 9 grupos que são designados por um sistema de 3 dígitos seguido por um valor decimal. O decimal .0 em todos os casos diz respeito aos limites de fundição da liga. Decimais .1 e .2 referem-se às composições de lingote, as quais depois da fusão e do processamento devem resultar em produtos químicos em conformidade com as especificações de fusão requeridas (ASM,1990).

Quanto ao tratamento térmico, as ligas se dividem em não-tratáveis termicamente e tratáveis termicamente. As ligas não-tratáveis termicamente não são endurecidas por meio de tratamento térmico. Estes tratamentos incluem a solubilização, têmpera, precipitação, envelhecimento e endurecimento.

2.2.2 Aplicação das Ligas de Alumínio Classe 6000

O magnésio e o silício são os principais elementos de liga. A proporção de Mg e Si visa à formação da fase Mg_2Si , formando ligas tratáveis termicamente. As ligas da série 6xxx apresentam boa ductilidade, boas características de soldagem e de usinagem e boa resistência à corrosão. Podem ser aplicadas, por exemplo, em arquitetura e decoração, quadros de bicicletas ou ainda estruturas soldadas (MOREIRA, 2015).

As ligas ternárias Al-Mg-Si são talvez as mais importantes ligas à base de Al endurecidas por precipitação. Esta classe de ligas é produzida em maior quantidade entre as ligas de Al (ASM, 1990; POLMEAR, 1995; SON et al., 2011; YAOA et al., 2001).

A composição e as condições de tratamento para alcançar as melhores propriedades nessas ligas devem ser devidamente escolhidas desde que a composição e o estágio de precipitação influenciam significativamente em suas propriedades. Assim, numerosos estudos têm sido direcionados a entender a sequência de envelhecimento e as fases metaestáveis que são supostamente responsáveis pelo controle das propriedades mecânicas (SON et al., 2011).

Segundo a Apal (2015), a liga 6xxx de alumínio possui ótima extrudabilidade e, é uma das ligas mais versáteis e também uma das mais industrializadas atualmente. A seguir, são mostradas algumas de suas aplicações:

- Liga EN AW-6060 [Al Mg Si]: Devido à sua versatilidade, é uma das ligas mais usadas deste grupo, principalmente em aplicações onde se pretendem propriedades mecânicas moderadas, em simultâneo com uma boa resposta à anodização. Apresenta uma boa resistência à corrosão e boas características de soldabilidade. É usada em perfis para construção, sobretudo em caixilharia, na indústria automóvel e indústria em geral.
- Liga EN AW-6063 [Al Mg_{0.7} Si]: É bastante semelhante à liga 6060, mas com propriedades mecânicas superiores. Devido à sua versatilidade, é usada em aplicações diversificadas na indústria automóvel e de transportes, e na indústria em geral.
- Liga EN AW-6061 [Al Mg₁ Si Cu]: É considerada uma liga de média resistência e é usada sobretudo em aplicações que combinam resistência mecânica com boa resistência à corrosão. Aplicações típicas desta liga incluem componentes para indústria automóvel e de transportes, industrial em geral, componentes para máquinas, entre outras.
- Liga EN AW-6082 [Al Si Mg Mn]: Caracteriza-se pela adição de manganês à sua composição química, e é tida como a liga com propriedades mecânicas mais elevadas desta

série (boa resistência à corrosão e boa tenacidade). Devido à combinação destes fatores, as aplicações típicas desta liga são tanto aplicações estruturais na construção, na indústria de transportes e na indústria geral, como em peças maquinadas para a indústria automóvel.

2.3 TIPOS DE FERRAMENTAS DE CORTE

Para a seleção criteriosa do material da ferramenta, uma série de fatores devem ser ponderados, dentre os quais podem ser mencionados os seguintes: material a ser usinado; processo de usinagem; condição da máquina operatriz; forma e dimensão da ferramenta; custo do material da ferramenta; condições de usinagem; condições da operação (DINIZ et al., 2003).

Os materiais a serem escolhidos, devem ser cirurgicamente escolhidos e, de preferência, apresentarem algumas propriedades desejáveis, segundo Machado et al. (2009), são elas:

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

Não existe uma classificação geral de materiais para ferramentas, entretanto, com base nas suas características químicas, eles podem ser agrupados da seguinte maneira, segundo Diniz et al. (2003):

- Aços Rápidos: High Speed Steel (HSS) em inglês, são aços ferramenta de alta liga de tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio, cobalto e nióbio, e um apropriado tratamento térmico. O uso principal do aço rápido continua a ser na fabricação de várias ferramentas de corte: brocas, fresas, serras, bits de usinagem, discos para cortar engrenagens, etc. O aço rápido revolucionou a prática de usinagem na época, com um grande aumento na

produtividade. As velocidades de corte puderam ser aumentadas em uma ordem de grandeza: de 3 a 5 m/min - aço carbono para 30 a 35 m/min - aços rápidos. Exatamente por isso, eles levaram este nome. Os principais elementos constituintes são: tungstênio, molibdênio, cobalto e vanádio, elementos que conferem alta tenacidade às ferramentas. Têm dureza de 60 a 67 H_RC. Conseguem resistir a temperaturas de até aproximadamente 520 a 600°C.

- **Aços Rápidos com Cobertura:** A restrição imposta pela forma e dimensões de ferramentas como brocas, alguns tipos de fresas, machos, alargadores, brochas, cortadores de dentes de engrenagens, somado as condições de usinagem que as empregam, dificultam a aplicação de materiais de ferramentas mais resistentes ao desgaste como metal duro e cerâmicas. Como consequência, o desenvolvimento dessas ferramentas tem caminhado no sentido de melhorias do próprio aço rápido, através, principalmente, da aplicação de uma cobertura (revestimento) de um material mais resistente ao desgaste como: carboneto de titânio (TiC) e nitreto de titânio (TiN). Têm durezas da ordem de 2000 a 2500 HV, elevada ductilidade, baixo coeficiente de atrito e maior estabilidade química.

- **Metal Duro:** É o mais importante material pra ferramenta de corte utilizado na indústria moderna. Esse sucesso deve-se a combinação de dureza a temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade. Essa combinação é possível de se obter pela variação da sua composição. Ele é um produto da metalurgia do pó. Produzido a partir de partículas finas (carbonetos), sinterizados com um ou mais metais (aglomerante). Resistem a temperatura de até aproximadamente 1000°C (mesma dureza que o aço rápido à temperatura ambiente); têm maiores velocidades de corte com relação às ligas fundidas, aços rápidos e aços ferramenta; possuem aumento na vida útil na ordem de 200 a 400%. Têm elevada dureza, resistência à compressão, estrutura homogênea, e sua composição química típica é: 81% W, 6% C e 13% Co.

- **Metal Duro com Cobertura:** Como exemplo pode-se dizer que a operação de tornear uma barra de aço ($\phi = 100 \text{ mm} \times l = 500 \text{ mm}$), em um torno levava aproximadamente 100 min no início do século - material de ferramenta aço-carbono endurecido. Quando o aço rápido foi introduzido o tempo foi reduzido para aproximadamente 26 min e com as primeiras ferramentas de metal duro a mesma operação levou só 6 minutos. Usando as modernas pastilhas com cobertura, a tarefa levou menos de um minuto 1 min. Substrato tenaz com

revestimento duro (TiC, TiN, Ti(C,N), etc.) - combinando-se assim uma alta resistência a choques com alta resistência a desgaste (maior vida de ferramenta e menores esforços de corte).

- **Cermets:** São materiais para ferramentas de corte que contêm uma fase cerâmica e uma fase metálica. Possuem uma estrutura semelhante ao metal duro, pois são feitos de partículas duras (TiN; TiCN + Ta, W e algumas vezes Mo) ligadas por um aglomerante (Co; Ni). Possuem estabilidade química, tenacidade e resistência ao desgaste intermediária entre o metal duro e os materiais cerâmicos. Conseguem manter uma tenacidade comparável aos metais duros e têm alta resistência a deformação plástica, assim como resistência à oxidação.

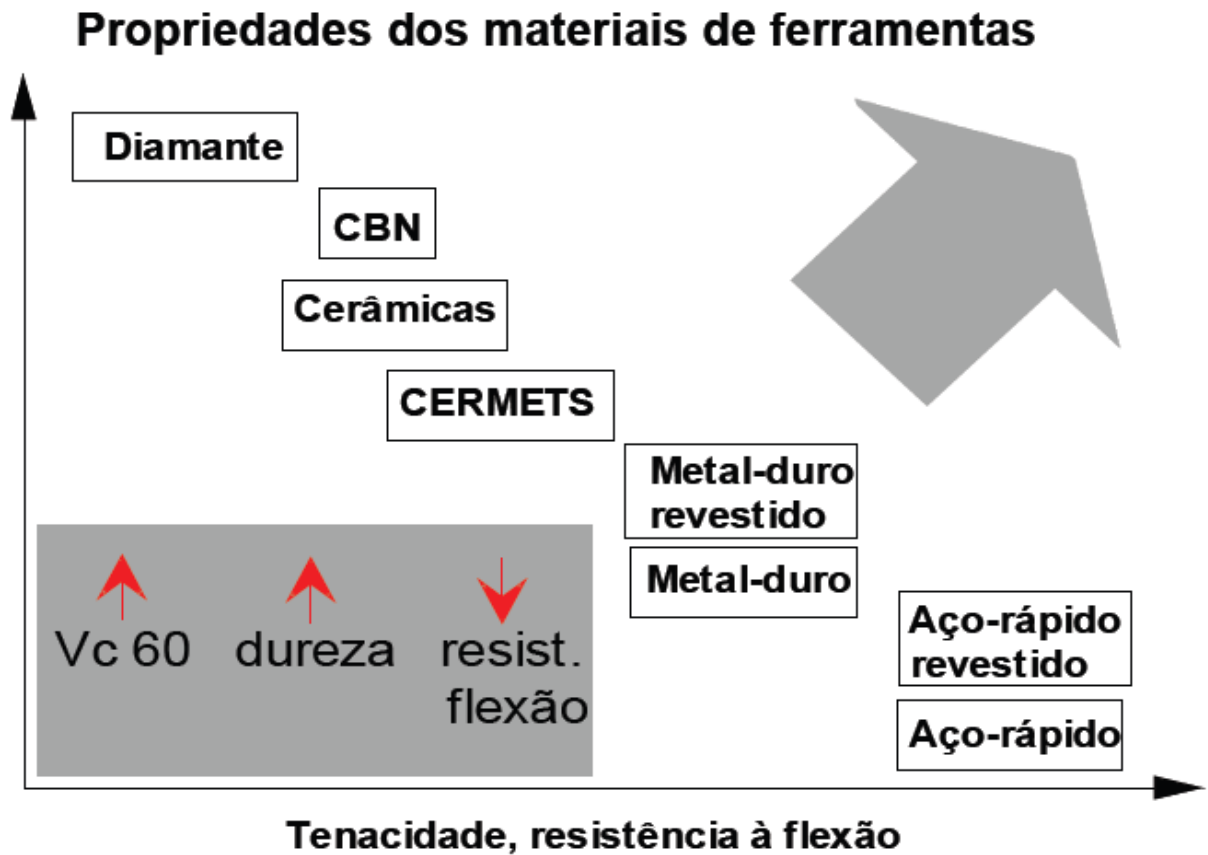
- **Materiais Cerâmicos:** As principais propriedades das ferramentas de corte cerâmicas são: alta dureza a quente e a frio; alta estabilidade química (até em altas temperaturas); alta resistência ao desgaste; capacidade de usinagem em altíssimas velocidades de corte (2000 m/min); baixa condutividade térmica; baixa tenacidade; alto custo; limitações na aplicação devido ao comportamento frágil; indispensável em áreas como fabricação de discos de freio. São usados para usinar ferro fundido, aço endurecido, e ligas de titânio e níquel resistentes ao calor.

- **Nitreto de Boro Cúbico (CBN):** Trata-se de um material sintético, obtido através de um processo com pressões de 5000 a 9000 MPa e temperatura de 1500°C a 1900°C, na presença de um catalizador, em geral, o lítio. Plaquetas de CBN são produzidas da seguinte maneira: uma camada de 0,5mm de espessura de CBN é sinterizada com uma fase ligante e, posteriormente, é fixada sobre um substrato de metal duro. O CBN é mais estável que o diamante, podendo, portanto, usinar ligas ferrosas sem o problema do desgaste por difusão. Têm alta dureza, alta estabilidade química e alta resistência à abrasão.

- **Diamante:** O diamante sintético policristalino (PCD) é constituído de partículas muito finas deste material, de granulação definida para se obter o máximo de homogeneidade e densidade. A camada de PCD é produzida pela sinterização das partículas de diamante com cobalto num processo de alta pressão (6000 a 7000 MPa) e temperatura (1400°C a 2000°C). A camada de, aproximadamente, 0,5 mm de espessura é aplicada diretamente sobre uma pastilha de metal duro ou é ligada ao metal duro através de brasagem (plaquetas). Possuem altíssimo valor de condutividade térmica, altíssima dureza e tenacidade relativamente alta. É usado para usinar ligas de alumínio-silício e ligas de cobre, entre outros materiais.

Na Figura 4, são exemplificadas, de maneira didática, as respectivas propriedades dos materiais em termos da dureza, resistência à flexão, tenacidade e etc.

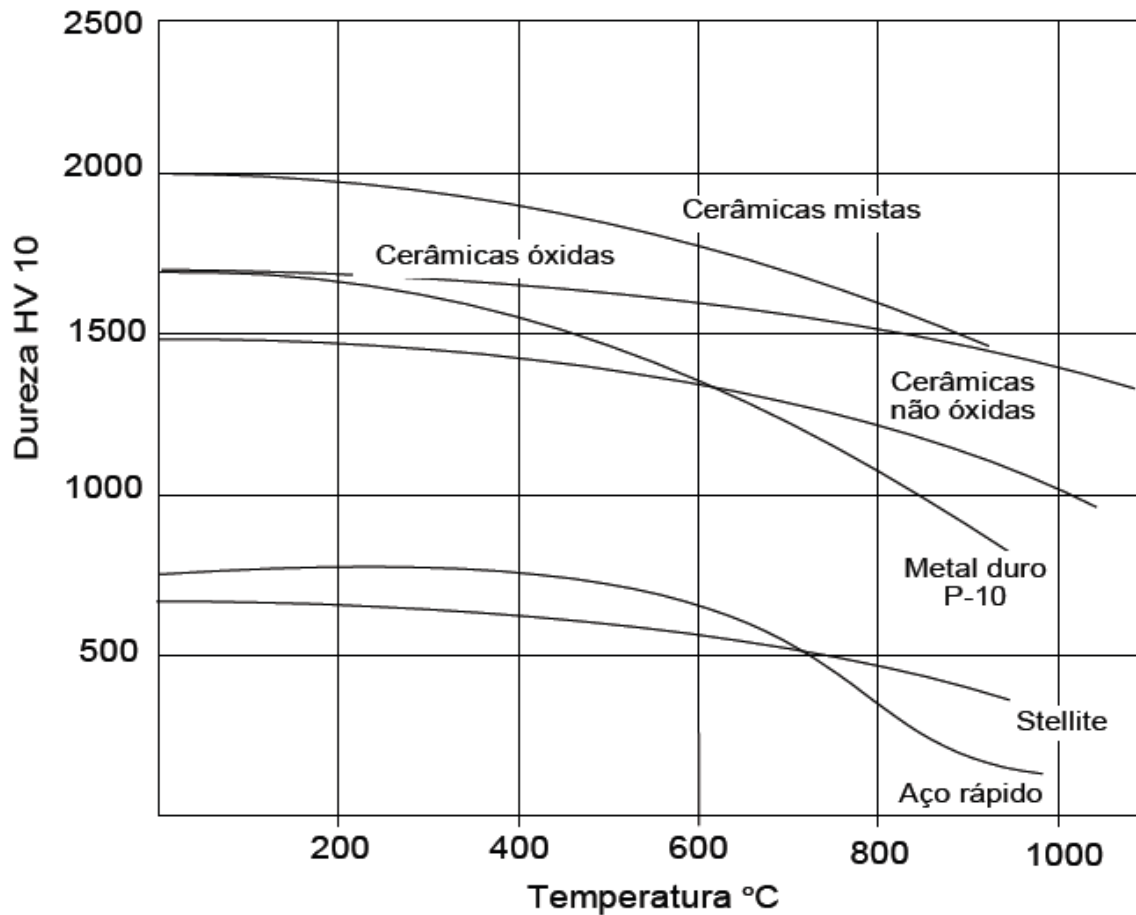
Figura 4 - Características de resistência dos materiais de ferramentas.



Fonte: Stoeterau (2015).

Na Figura 5, são ilustradas as resistências à quente de alguns materiais em função de suas respectivas durezas.

Figura 5 – Resistência à quente dos materiais de ferramentas.



Fonte: Stoeterau (2015).

2.3.1 Geometria das Ferramentas de Corte

A geometria da ferramenta de corte também representa uma variável de extrema relevância na fenomenologia da usinagem, uma vez que pequenas alterações dimensionais e angulares causam respostas distintas quanto ao comportamento do material da peça sobre a aresta de corte da ferramenta.

Segundo Ferraresi (1977), cada perfil de ferramenta é escolhido para desempenhar uma operação específica de usinagem. Para que tal operação seja feita com precisão a geometria da ferramenta, ou seja, seus ângulos devem ser devidamente escolhidos.

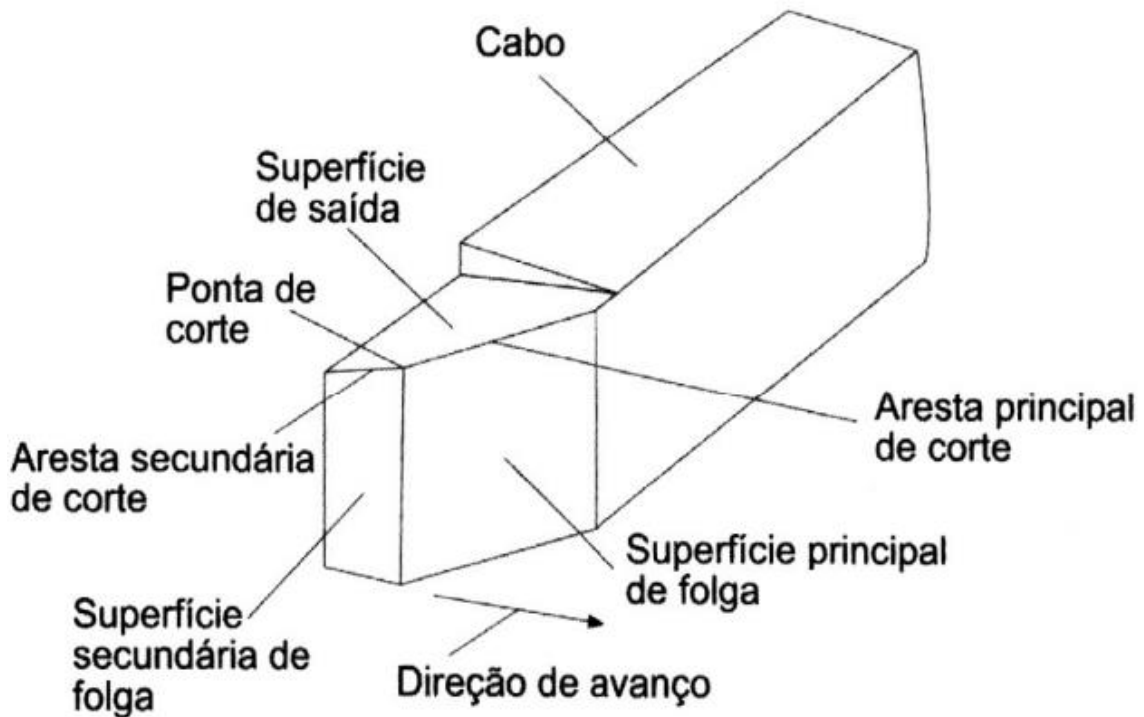
Machado et al. (2009) nos diz que a superfície de saída (A_r) é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco se move e, por superfície de folga, entende-se a superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem. Distinguem-se a superfície principal de folga (A_a) e a superfície secundária de folga (A_a'). Por meio do movimento

relativo entre a peça e a ferramenta, formam-se os cavacos pela ação da cunha de corte, composta pelas superfícies de saída e de folga da ferramenta.

As arestas de corte são definidas pela interseção das superfícies de saída e de folga. Deve-se distinguir a aresta principal de corte (S) da aresta secundária de corte (S'): a primeira é aquela cuja cunha de corte, observada no plano de trabalho, e para um ângulo da direção de avanço (φ) igual a 90° , indica a direção de avanço; a segunda é aquela cuja cunha de corte, observada no plano de trabalho, e para um ângulo da direção de avanço (φ) igual a 90° , indica a direção contrária à direção de avanço (FERRARESI, 1977).

A Figura 6 permite uma melhor visualização das superfícies e arestas acima citadas, em uma ferramenta de corte.

Figura 6 – Ferramenta de corte e seus respectivos parâmetros.



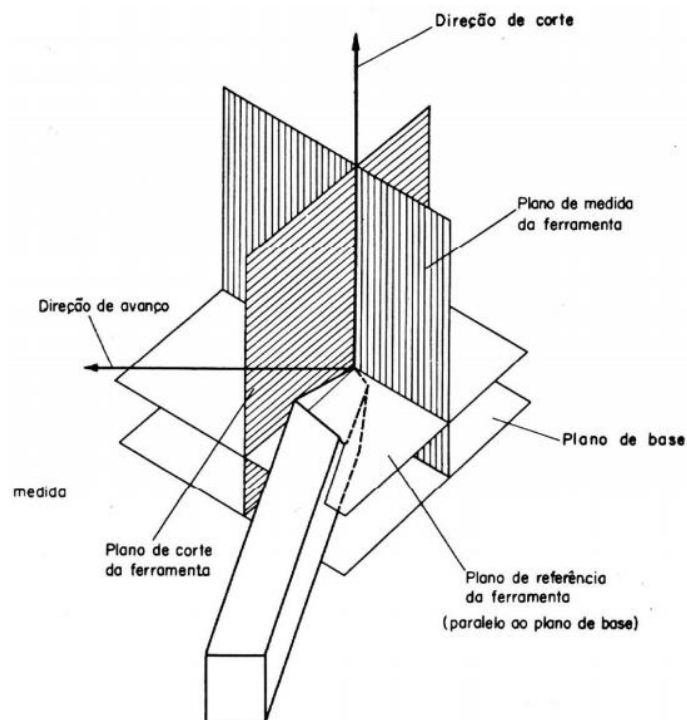
Fonte: Beskow (2015).

A ponta de corte é a interseção das arestas principal e secundária de corte, ao passo que o ponto de corte escolhido serve como referência para a determinação das superfícies e dos ângulos da cunha de corte, ou seja, as definições se referem a um ponto arbitrário da ferramenta: o "ponto de corte escolhido" ou o "ponto de referência" (MACHADO et al., 2009).

Para a determinação dos ângulos na cunha cortante emprega-se um sistema de referência. Este sistema de referência é constituído por três planos ortogonais, passando pelo ponto de referência da aresta cortante. São eles: plano de referência, plano de corte e plano de medida (BESKOW, 2015).

- Plano de referência da ferramenta é o plano perpendicular à direção admitida de corte;
- Plano de corte da ferramenta: é o plano perpendicular ao plano de referência que é tangente ou contém a aresta de corte da ferramenta;
- Plano ortogonal da ferramenta: é o plano ortogonal aos planos de referência e de corte da ferramenta;
- Plano admitido de trabalho: é o plano perpendicular ao plano de referência da ferramenta, definido pelas direções de avanço e de velocidade de corte;
- Plano normal à aresta de corte: é o plano que é perpendicular à aresta de corte.

Figura 7 – Indicação dos planos referenciais na ferramenta de corte.

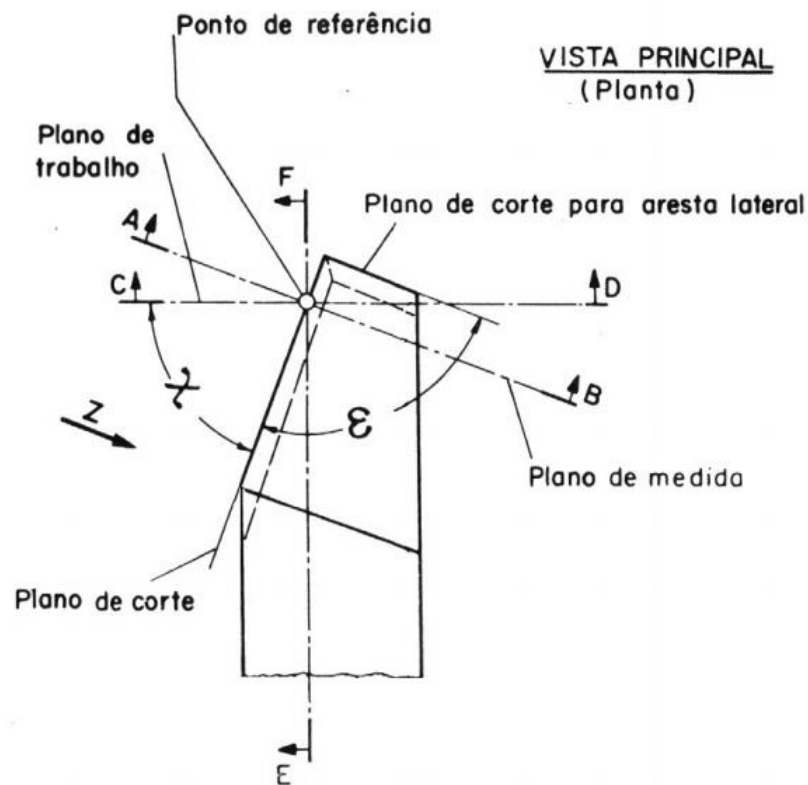


Fonte: Beskow (2015).

Segundo Beskow (2015), os ângulos de corte servem para a determinação da posição e da forma da cunha cortante. Devem-se distinguir também os ângulos do sistema efetivo de referência e os ângulos do sistema de referência da ferramenta.

- Ângulo de Posição (χ): é o ângulo entre o plano de corte e o plano de trabalho, medido no plano de referência. Controla o comprimento atuante na aresta de corte da ferramenta (ângulo pequeno = cavaco fino e maior força de corte).
- Ângulo de Ponta (ε): é o ângulo entre os planos de corte correspondentes – planos principal e lateral de corte – medido no plano de referência.

Figura 8 – Ilustração dos Ângulos de Posição e Ponta.

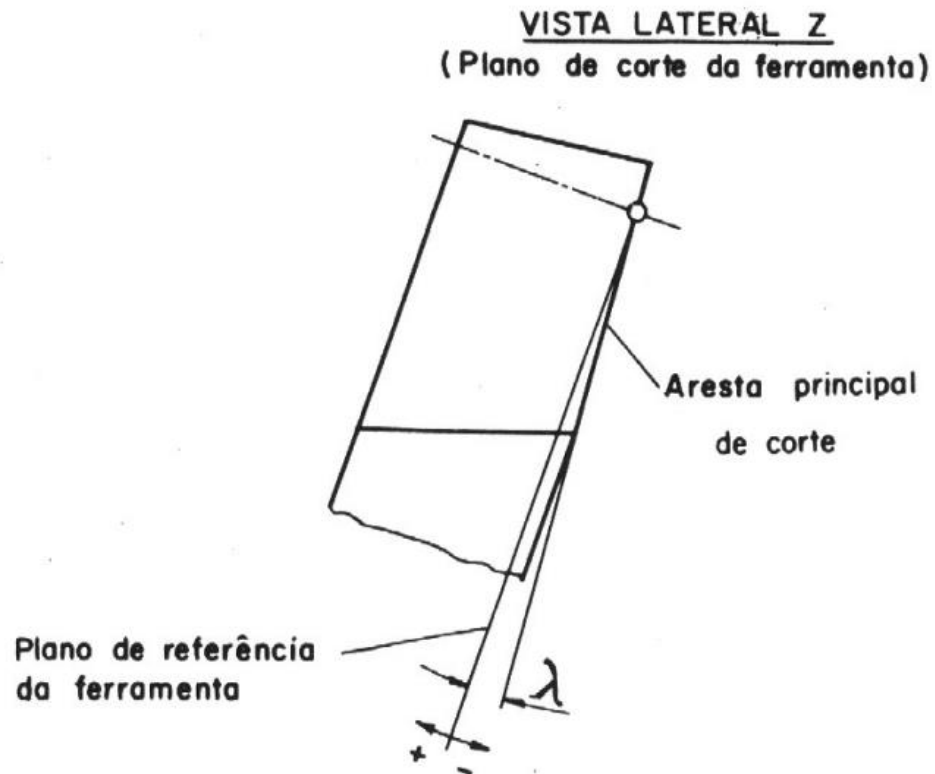


Fonte: Beskow (2015).

- Ângulo de Inclinação (λ): é o ângulo entre a aresta de corte e o plano de referência, medido no plano de corte. O ângulo de inclinação situa-se sempre de forma que o seu vértice indica a ponta de corte. É positivo quando a interseção de um plano paralelo ao de referência (que passa pela ponta da ferramenta) com o plano de corte fica fora da cunha cortante. A ponta de corte adianta-se em relação aos outros pontos da aresta cortante, no

sentido da velocidade de corte. No caso de haver várias ou nenhuma ponta de corte, a posição do ângulo de inclinação é fixada em particular.

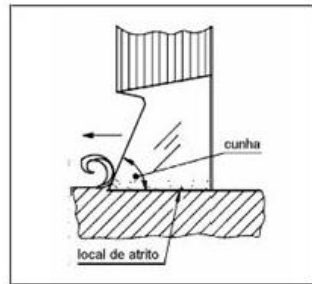
Figura 9 – Ilustração do Ângulo de Inclinação.



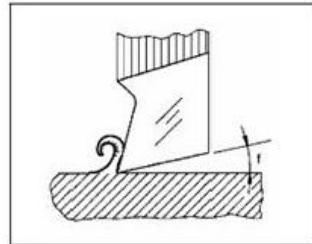
Fonte: Beskow (2015).

- Ângulo de Folga (α) também é chamado de ângulo de incidência, é o ângulo entre a superfície de folga e o plano de corte, medido no plano de medida da cunha cortante.
- Ângulo de Cunha (β): é o ângulo entre a superfície de folga e a superfície de saída, medido no plano de medida da cunha cortante.
- Ângulo de Saída (γ): é o ângulo entre a superfície de saída e o plano de referência, medido no plano de medida da cunha cortante.

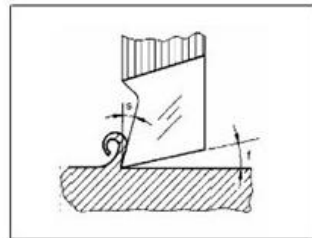
Figura 10 – Ilustração dos Ângulos de Cunha, Folga e Saída.



- Ângulo da cunha



- Ângulo de folga



- Ângulo de saída ou ataque

Fonte: Machado et al. (2009).

2.4 TIPOS E MECANISMOS DE DESGASTE EM USINAGEM

Podem-se distinguir três fenômenos pelos quais uma ferramenta de corte perde sua eficácia na usinagem: avaria, desgaste e deformação plástica. Esses três fenômenos causam a mudança na geometria da aresta de corte. Os dois primeiros, geralmente, promovem a perda de material, enquanto o último promove somente o seu deslocamento. Para que se possa, desde o início, distinguir esses fenômenos que conduzem à perda e à consequente substituição das arestas, suas definições são apresentadas a seguir.

- Avaria: fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte. A quebra e o lascamento levam à destruição total ou à perda de uma quantidade considerável de material da aresta de forma repentina e imprevisível. A quebra é mais comum em ferramentas com baixa tenacidade, como as cerâmicas e os ultraduros, já o lascamento depende também da tenacidade da ferramenta, mas pode ocorrer até mesmo em ferramentas de aço rápido (SANTOS, 2004). A trinca promove a

abertura de uma fenda no corpo da ferramenta de corte. No caso da trinca não existe a perda imediata de material, mas sua presença pode comprometer a continuidade do processo de corte pela sua transformação em sulco (no caso de trincas de origem térmica) ou promoção de um lascamento ou mesmo pela quebra da aresta. O lascamento também pode ocorrer quando a trinca é mais superficial, enquanto a quebra ocorrerá se a trinca for mais profunda. As trincas são comumente observadas em ferramentas de metal duro e cermets, podendo aparecer também em ultraduros e aço rápido, enquanto as cerâmicas, na maioria das vezes, são frágeis demais, e a propagação da trinca é imediata, praticamente sem deformação. Assim, em geral, uma trinca na ferramenta cerâmica promove instantaneamente seu lascamento ou quebra.

- Desgaste: a Norma ISO 3685 (1993) define desgaste em ferramentas como a "mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material". Em tribologia, define-se desgaste como sendo a destruição de uma ou de ambas as superfícies que compõem um sistema tribológico, geralmente envolvendo perda progressiva de material (HUTCHINGS, 1992). À destruição relacionam-se alterações geométricas, e ao desgaste em usinagem, a mudança da geometria da ferramenta de corte por perda de massa. No desgaste, ao contrário da avaria, essa perda acontece de maneira contínua e progressiva, e em proporções pequenas, às vezes no nível atômico, às vezes no nível dos grãos do material. O desgaste pode ocorrer segundo vários mecanismos e a deformação plástica pode fazer parte desses mecanismos. Nesse processo, a temperatura desenvolvida durante o corte tem um papel decisivo e atinge ferramentas de corte de qualquer material.

- Deformação plástica: mudança da geometria da aresta de corte pelo deslocamento de material, Ela ocorre por cisalhamento devido às altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. Em casos extremos, vai levar à total destruição da cunha cortante. É mais comum ocorrer em ferramentas com resistência relativamente baixa ao cisalhamento e com maior tenacidade, como o aço rápido, as ligas fundidas e o metal duro: A ocorrência nas cerâmicas é difícil, porque a grande fragilidade desse grupo de materiais não apresenta campo plástico suficiente para permitir o deslocamento de material, promovendo, antes, a quebra ou fratura. É comum encontrar na literatura (TRENT, 1984) o tratamento da deformação plástica como desgaste, o que é perfeitamente aceitável, uma vez que ambos promovem a mudança da geometria da ferramenta. o que pode culminar na destruição total da aresta de corte.

Assim, em um processo de usinagem, existem duas causas fortes para a substituição da ferramenta de corte, encerrando sua vida (MACHADO et al., 2009):

- Ocorrência de uma avaria (trinca, lascamento ou quebra). Isso é muito raro de ocorrer no corte contínuo (torneamento), a não ser que as condições de corte usadas estejam acima das máximas recomendadas para cada tipo de ferramenta; ou a geometria da ferramenta seja inapropriada; ou, mais raro ainda, quando a ferramenta de corte já possuir algum defeito de fabricação. As avarias são mais comuns no corte interrompido (fresamento) devido aos choques mecânicos e térmicos inerentes a tais processos de usinagem. O desgaste ou a deformação atinge proporções elevadas que podem comprometer a usinagem dentro das especificações.
- O desgaste e a deformação acontecem tanto nas superfícies de folga como na superfície de saída das ferramentas, em cortes contínuos ou interrompidos.

A difusão entre ferramenta e cavaco é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na região de corte. Em elevadas velocidades de corte, é responsável, principalmente, pelo desgaste de cratera; tendo-se em conta que é na superfície de saída da ferramenta que se tem as condições apropriadas, tais como: alta temperatura (causada pelas velocidades e zona de aderência) e tempo de contato cavaco-ferramenta na zona de aderência, onde a velocidade de saída do cavaco é zero (DINIZ et al., 2003).

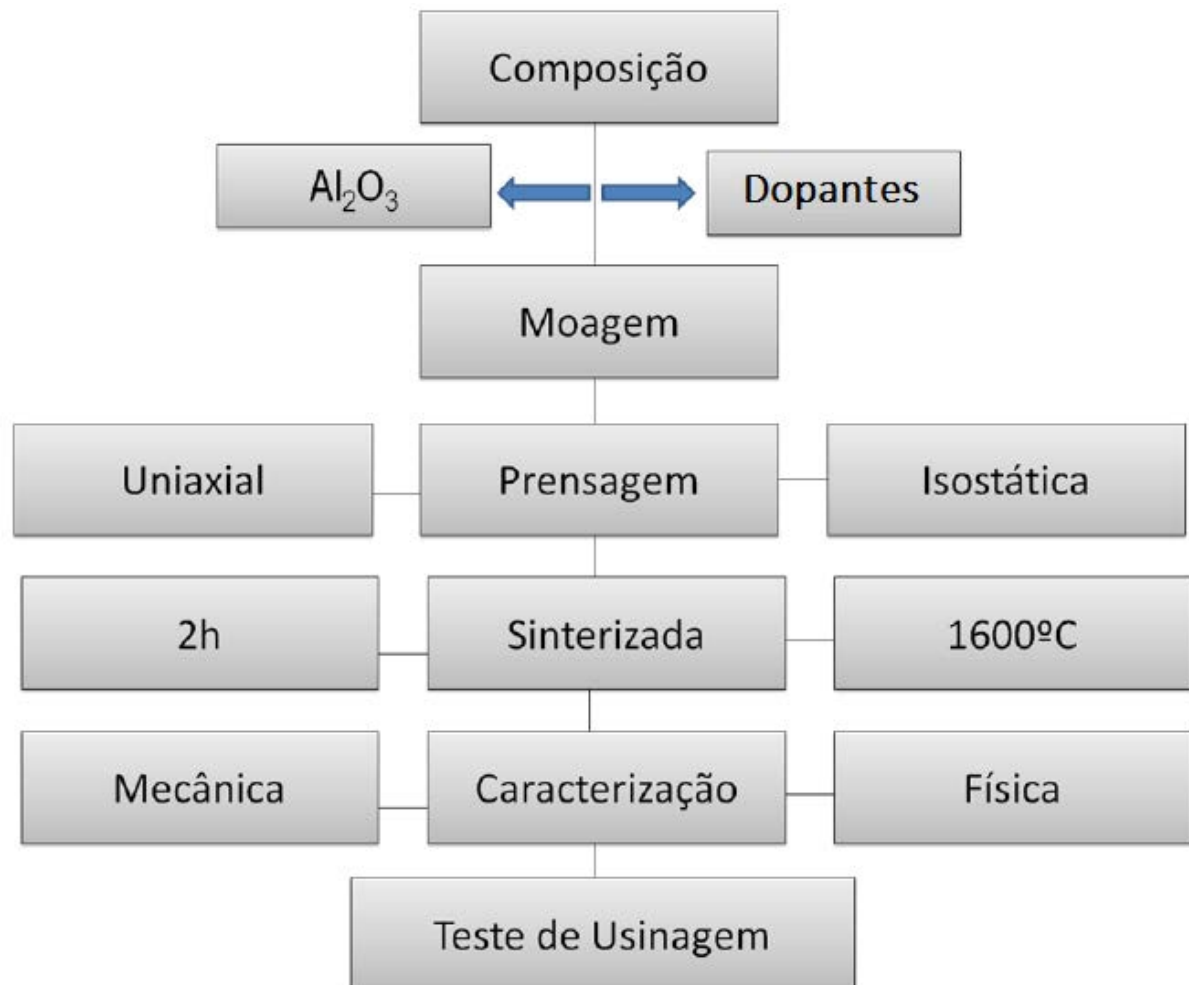
A elevação da temperatura e a presença de ar e água contidos nos fluidos de corte levam à oxidação na maioria dos metais. O tungstênio e o cobalto durante o corte formam filmes de óxidos porosos sobre a ferramenta, que são facilmente levados embora pelo atrito, gerando desgaste. Alguns materiais de ferramenta desgastam-se com facilidade devido à oxidação, por não conter óxidos com maior dureza e resistência. Esse mecanismo de desgaste ocorre especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido a sua exposição ao ar nessa região, permitindo assim uma possível explicação para o aparecimento do desgaste de entalhe (MACHADO et al., 2009).

Portanto para se assegurar à vida da ferramenta e a integridade da superfície é necessário o controle dos principais parâmetros da usinagem, como escolha correta da ferramenta de corte (incluindo material e geometria), processo de usinagem, velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem, etc. (DINIZ et al., 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O capítulo a seguir desenvolverá o tema à cerca de como o trabalho foi realizado, e descreverá as etapas dos procedimentos realizados. A Figura 11 representa um fluxograma das etapas de fabricação e dos testes da ferramenta desenvolvida:

Figura 11 – Fluxograma das etapas de fabricação e testes da ferramenta desenvolvida.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.1 FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA FERRAMENTA

Este capítulo foi dividido em duas etapas, a primeira delas envolvendo a fabricação da ferramenta, desde a seleção dos materiais, passando pela sinterização, caracterização e afiação. Na segunda etapa, são abordados os itens referentes aos ensaios de usinagem, desde os equipamentos utilizados, parâmetros e materiais utilizados.

3.1.1 Composição das Misturas

A ferramenta cerâmica foi produzida usando pós de alumina α (α -Al₂O₃) e um grupo de dopantes incluindo carbeto de silício (SiC). A mistura foi obtida em uma composição em peso de alumina, dopantes e SiC.

3.1.2 Homogeneização e Secagem

Inicialmente, com o auxílio de uma balança analítica com precisão de duas casas decimais, os pós foram pesados. Logo após, a composição foi moída e homogeneizada em um meio líquido durante o período de tempo de 24 horas, com a utilização de um moinho de bolas rotativo com potes e esferas de alumina. Feita a homogeneização, foi realizado um controle de qualidade levando em conta o das esferas e do copo do moinho, para se observar uma possível contaminação das misturas devido ao desgaste e atrito das partes em contato com a mistura dos pós. Posteriormente, o pó foi submetido a um processo de secagem em estufa, a 120°C por 24 horas, para depois ser desagregado e submetido a um peneiramento em malhas de 100 mesh (0,15mm) para desaglomeração.

3.1.3 Compactação

A compactação das misturas ocorreu em duas etapas: primeiro através da prensagem uniaxial e depois pela prensagem isostática.

A prensagem uniaxial foi executada, inicialmente com a pesagem de pó necessário para a fabricação de uma amostra. Após a pesagem, o pó foi inserido no interior de uma matriz metálica com dimensões de 16,36 x 16,36 x 7,50 mm, preenchendo a mesma de forma homogênea, com o intuito de se obter uma melhor distribuição do pó. Após o preenchimento da matriz metálica, o pó foi compactado com uma carga de 80MPa, durante 30 segundos através de uma prensa hidráulica uniaxial, obtendo as dimensões descritas no formato da matriz metálica, para futura transformação em insertos.

Na prensagem isostática a frio, os corpos de prova foram prensados isostaticamente a frio, com o intuito de se obter alguns resultados com maiores densidades a verde, para se evitar os problemas de gradiente de pressão de compactação ao longo do corpo de prova. Inicialmente os corpos de prova foram encapsulados a vácuo em moldes de látex flexível,

sendo imersos em óleo na câmara de prensagem, com uma velocidade de compactação de 15MPa/s e pressão de 300MPa durante 2 minutos.

3.1.4 Sinterização

O processo de sinterização ocorreu em um forno com atmosfera controlada, com um elemento resistivo de grafite, com temperatura máxima de 2200°C.

Inicialmente, os corpos a verde foram acomodados sobre um cadinho de alumina, protegido por uma cama de alumina, seguido de uma sinterização nas temperaturas de 1600 °C por 1 h, com taxas de aquecimento de 15 °C/min até 1200 °C, 10 °C/min até 1400 °C e 5 °C/ min até a temperatura final. Após o aquecimento, o resfriamento das amostras se deu na inércia do próprio forno.

3.1.5 Densidade Relativa

Depois de realizada a sinterização das cerâmicas, foi analisada a densidade relativa das amostras utilizando-se o princípio de Arquimedes. Tal princípio se baseia na imersão dos corpos de prova por um fio em água destilada a 20°C. Para a determinação da massa específica das composições utilizou-se a norma ASTM C20-87.

3.1.6 Preparação para Determinação da Tenacidade a Fratura

Após a sinterização os corpos de prova, as amostras foram lixadas e polidas com o objetivo de eliminação de defeitos superficiais que possam alterar os resultados de tenacidade à fratura obtidos no experimento.

3.1.7 Testes de Usinagem

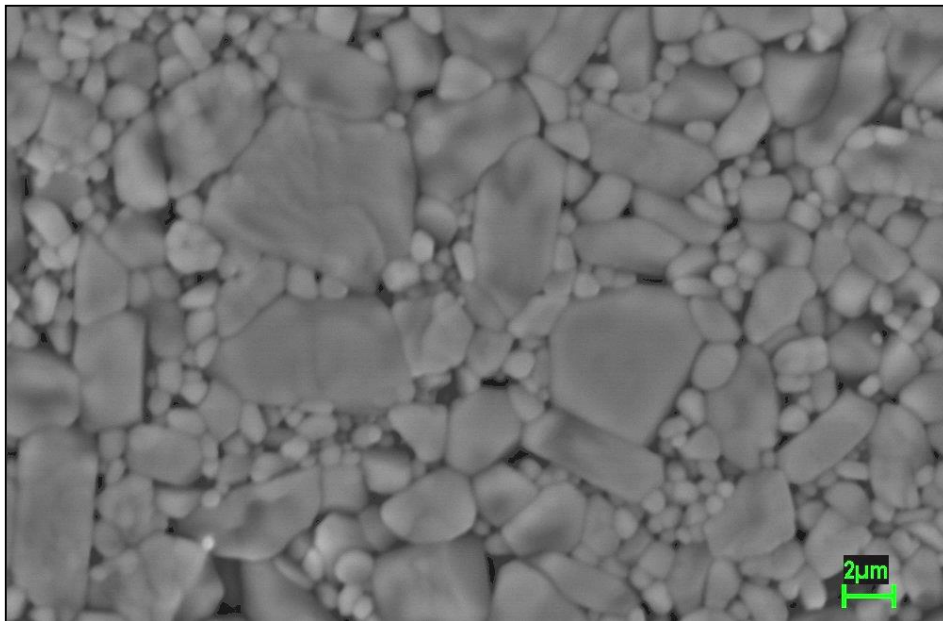
Os testes de usinagem têm como objetivo avaliar o desempenho da ferramenta de alumina desenvolvida em laboratório nas condições de semi-desbaste e acabamento, especificando os melhores parâmetros de uso para essa ferramenta, além de se realizar um estudo sobre a rugosidade R_a e R_t do material analisado, assim como validar o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte de baixo custo, desenvolvidos no Brasil.

3.1.8 Avaliação da Ferramenta

Os testes de usinagem por torneamento foram realizados utilizando-se ferramenta de alumina com dopantes e SiC.

A microestrutura da ferramenta é mostrada na Figura 12, onde se pode fazer uma avaliação a cerca de suas características estruturais. Os corpos de prova para os testes foram pré-usinados em torno mecânico universal, para obtenção de um rebaixo no diâmetro de 50 mm para a fixação na placa do torno onde seriam realizados os testes. Também realizado um furo de centro obedecendo à norma NBR 12288 para uma melhor fixação do contra ponta do torno.

Figura 12 – Microestrutura da superfície da Ferramenta de Al_2O_3 + DOPANTES + SiC, polida e atacada termicamente.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.1.9 Máquina Ferramenta

Para execução dos ensaios de torneamento foi utilizado um torno CNC marca Romi modelo GL 240M, com RPM máxima de 4500 RPM e potência de 25kVA pertencentes ao Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Para a realização dos testes de torneamento os corpos de prova foram fixados pelo rebaixo na placa

universal de três castanhas e o furo de centro apoiado na contra ponta do cabeçote móvel do equipamento para uma melhor fixação e diminuição de vibrações.

Os corpos de prova da liga 6005 de Alumínio foram fornecidos pela Votorantim Metais – CBA, na forma de tarugos, com dimensões de 7” x 100mm, conforme ilustra a Figura 16.

3.1.10 Porta Ferramenta

O porta ferramentas utilizado foi escolhido em função do tamanho e geometria do inserto, e também da correta fixação do suporte na torre elétrica para que o inserto estivesse na altura correta para a realização do experimento. O Porta Ferramentas está ilustrado na Figura 14, e é apropriado para insertos cerâmicos.

Figura 13 – Alumínio fornecido pela Votorantim Metais – CBA.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 14 – Porta Ferramenta.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.1.11 Parâmetros De Usinagem

Os parâmetros de usinagem foram selecionados de acordo com os dados existentes na literatura (Souza, 2005 e Teles, 2007), testes preliminares e posteriores dados contidos em catálogos de fabricantes de ferramentas de corte. Para determinação dos parâmetros de corte da ferramenta de alumina desenvolvida em laboratório, as velocidades de corte foram as que sofreram maiores variações em função dos dados da literatura, seguida pelos avanços e, por último, profundidade de corte. Esses parâmetros tiveram como objetivo fornecer informações para uma avaliação do desempenho da ferramenta nas diversas condições de usinagem, analisando o desgaste de flanco e comparando seus resultados de rugosidade de acordo com os parâmetros de amplitude e funcional. Para melhor dinâmica do trabalho, os dados foram especificados na Tabela 2.

Tabela 2 - Amostra dos parâmetros de corte utilizados nos testes de usinagem.

Condição	Vc (m/min)	f (mm/rot)	a _p (mm)
1	500	0,10	0,50
2	800	0,10	0,50
3	1000	0,20	0,50

4	1000	0,15	0,50
5	1000	0,15	0,70

Fonte: Produção do próprio autor.

3.1.12 Análise da Rugosidade e Desgastes da Ferramenta

Para a avaliação das rugosidades nos testes foi utilizado um rugosímetro de Marca Mahr, modelo Marsurf M300, ilustrado na Figura 15, pertencente ao Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade De Engenharia de Guaratinguetá, onde a peça foi submetida à análise dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t .

Figura 15 – Rugosímetro Mahr, modelo Marsurf M300.



Fonte: Produção do próprio autor.

Após realizada a análise da rugosidade, fez-se uma breve análise sobre o desgaste das ferramentas utilizadas, se houve variações no material, deposição de material, e afins.

3.1.13 Formas do Cavaco

A análise do cavaco pode apresentar muitas características inerentes à usinagem. Cavacos curtos são característicos de materiais frágeis enquanto cavacos longos para materiais tenazes. A análise visual da cor do cavaco é um indicativo do fim de vida da ferramenta. A rugosidade maior ou menor na parte de traz do cavaco mostra se este foi gerado

por uma ferramenta mais ou menos positiva. Amostras de cavacos produzidas durante a realização dos testes de vida da ferramenta foram coletadas para posteriores análises e classificação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo será dedicado a uma discussão dos resultados obtidos pelos experimentos acima citados. Será feita uma análise da rugosidade do material, em função dos parâmetros de usinagem descritos pela Tabela 2. Após isso, será discutida uma possível ocorrência de desgaste da ferramenta e observações a seu respeito.

Por fim, um estudo sobre os cavacos será feito, levando em conta os parâmetros utilizados durante o processo de torneamento, para que se possa traçar um paralelo com as informações obtidas na literatura.

4.1 DESGASTES E AVARIAS DA FERRAMENTA

Na Figura 16, são ilustradas as ocorrências de uma quebra de ponta na aresta da ferramenta utilizada, assim como lascamentos, comprovando a existência de desgastes e avarias na ferramenta.

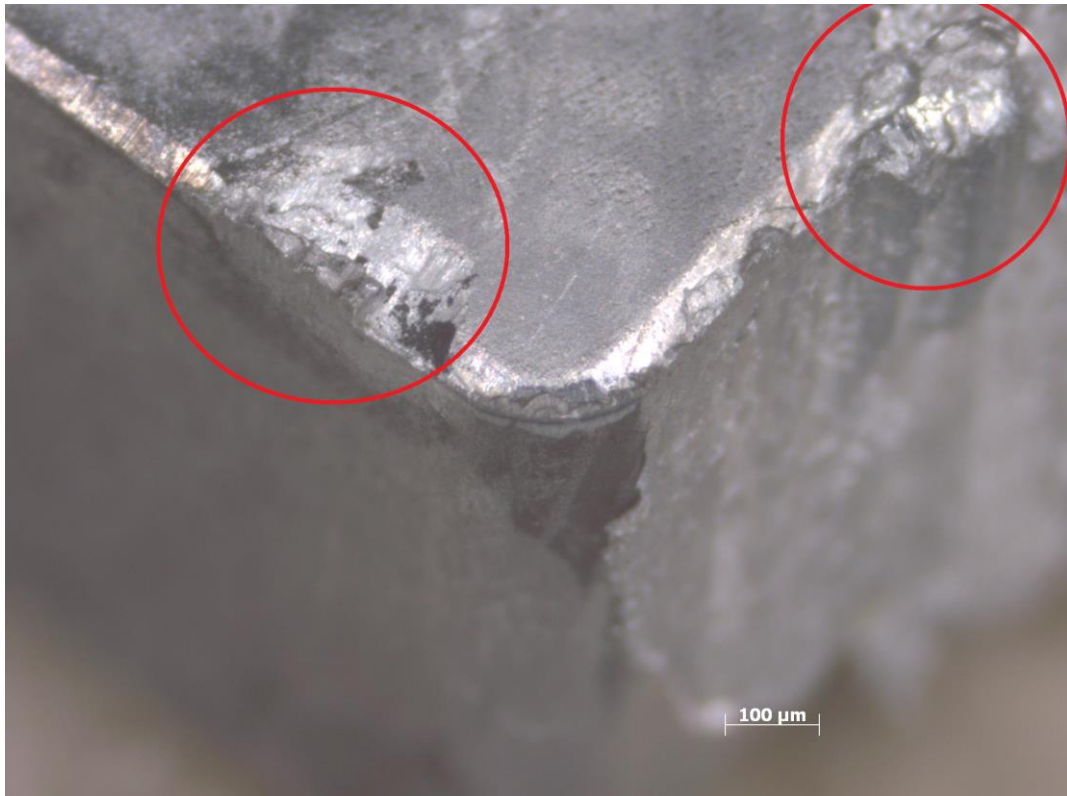
Figura 16 – Ferramenta desgastada por quebra de ponta e lascamentos.



Fonte: Produção do Próprio autor.

Por sua vez, a Figura 17 comprova a ocorrência de uma adesão de material (alumínio) à aresta da ferramenta, devido à alta abrasão ocorrida no processo.

Figura 17 – Adesão de alumínio na ferramenta.



Fonte: Produção do próprio autor.

A análise destas figuras nos ajuda a concluir que os desgastes e avarias ocorridos na ferramenta têm como motivo a alta abrasão do processamento. O aumento significativo da temperatura diminui a resistência mecânica do material e ocasiona os desgastes. A temperatura também tem influência na adesão do alumínio na aresta da ferramenta, sendo a principal motivação para tal acontecimento. Estas conclusões serão amparadas pelos dados à respeito da rugosidade, que serão explicitados abaixo, pois têm total conexão com o assunto aqui discutido.

4.2 ANÁLISE DA RUGOSIDADE

A Tabela 3 informa os parâmetros e resultados envolvidos na Condição 1 de usinagem.

$v_c = 500$ m/min; $a_p = 0,50$ mm; $f = 0,10$ mm/rot.

Tabela 3 – Parâmetros e resultados envolvidos na Condição 1 de usinagem.

	MEDIDA 1	MEDIDA 2
l_f (mm)	72	72
D (mm)	177	176
l_c (mm)	400,02	397,76
R_a (μm)	0,466	0,521
R_t (μm)	8,777	7,447

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 4 informa os parâmetros e resultados envolvidos na Condição 2 de usinagem.

$$v_c = 800 \text{ m/min}; a_p = 0,50 \text{ mm}; f = 0,10 \text{ mm/rot.}$$

Tabela 4 - Parâmetros e resultados envolvidos na Condição 2 de usinagem.

	MEDIDA 1	MEDIDA 2
l_f (mm)	72	72
D (mm)	175	174
l_c (mm)	395,84	393,24
R_a (μm)	1,220	1,026
R_t (μm)	16,93	7,642

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 5 informa os parâmetros e resultados envolvidos na Condição 3 de usinagem.

$$v_c = 1000 \text{ m/min}; a_p = 0,50 \text{ mm}; f = 0,20 \text{ mm/rot.}$$

Tabela 5 - Parâmetros e resultados envolvidos na Condição 3 de usinagem.

	MEDIDA 1	MEDIDA 2
l_f (mm)	72	72
D (mm)	173	172
l_c (mm)	195,62	194,36
R_a (μm)	2,162	2,149
R_t (μm)	10,25	9,485

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 6 informa os parâmetros e resultados envolvidos na Condição 4 de usinagem.

$$v_c = 1000 \text{ m/min}; a_p = 0,50 \text{ mm}; f = 0,15 \text{ mm/rot.}$$

Tabela 6 - Parâmetros e resultados envolvidos na Condição 4 de usinagem.

	MEDIDA 1	MEDIDA 2
l_f (mm)	72	72
D (mm)	171	170
l_c (mm)	257,86	256,35
R_a (μm)	0,737	0,733
R_t (μm)	4,346	4,975

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 7 informa os parâmetros e resultados envolvidos na Condição 5 de usinagem.

$$v_c = 1000 \text{ m/min}; a_p = 0,70 \text{ mm}; f = 0,15 \text{ mm/rot.}$$

Tabela 7 - Parâmetros e resultados envolvidos na Condição 5 de usinagem.

	MEDIDA 1	MEDIDA 2
l_f (mm)	72	72
D (mm)	169	167
l_c (mm)	254,72	252,61
R_a (μm)	1,411	1,315
R_t (μm)	13,97	6,427

Fonte: Produção do próprio autor.

Analisando as tabelas acima, chegou-se à conclusão que a Condição 1 de usinagem forneceu o melhor valor de rugosidade R_a , o que já era esperado, devido ao baixo avanço, que provavelmente forneceu uma maior regularidade topográfica à peça, e uma boa relação na interface ferramenta/peça. Por sua vez, a condição que forneceu os valores menos satisfatórios de R_a foi a Condição 3, o que pode ser explicado devido ao aumento do valor de avanço em relação às outras condições, o que acarretou irregularidades na topografia do material.

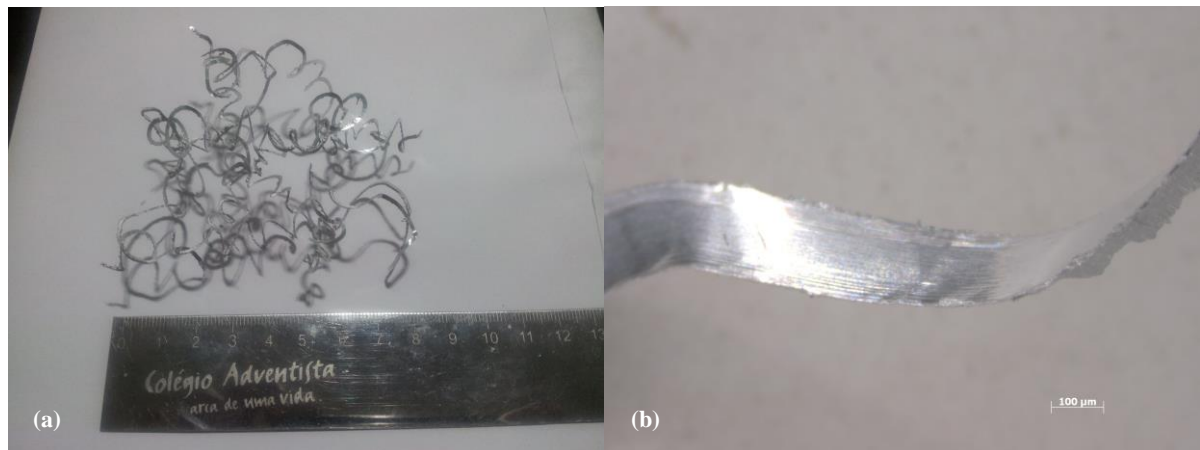
Em relação aos valores de rugosidade R_t , notou-se que a Condição que forneceu os valores mais satisfatórios para tal parâmetro foi a Condição 1, e os valores menos satisfatórios ocorreram na Condição 3, pelos mesmos motivos explicados acima.

A análise das condições de usinagem será de extrema importância também para o estudo dos cavacos formados, que serão mostrados a seguir.

4.3 ANÁLISE DOS CAVACOS

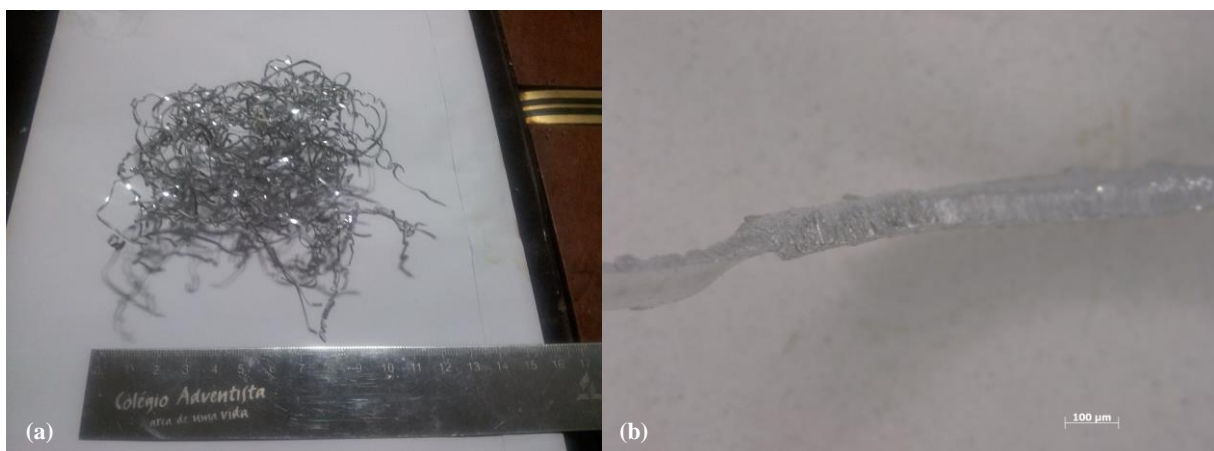
Nas Figuras 18, 19, 20, 21 e 22, são exibidos os cavacos formados pelo processamento da peça nas respectivas Condições 1, 2, 3, 4 e 5. As figuras alocadas no índice “a” são as figuras registradas em escala real, e as figuras alocadas no índice “b” são as figuras tiradas com o auxílio de um microscópio óptico com aumento de 10x.

Figura 18 – Cavacos formados pela Condição 1 ($v_c = 500$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,1$ mm/rot): (a) escala real; (b) Microscópio Óptico com aumento de 10x.



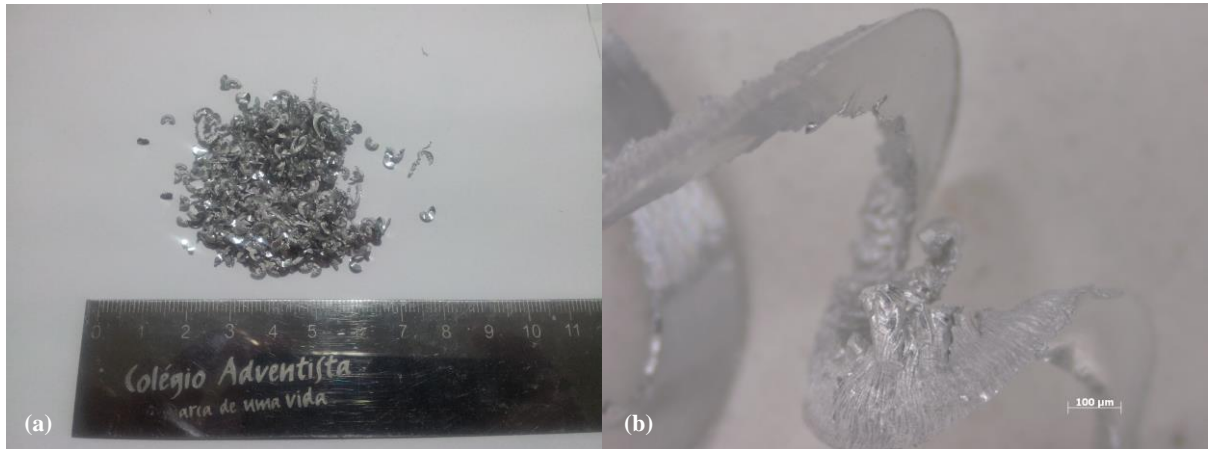
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 19 - Cavacos formados pela Condição 2 ($v_c = 800$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,1$ mm/rot): (a) escala real; (b) Microscópio Óptico com aumento de 10x.



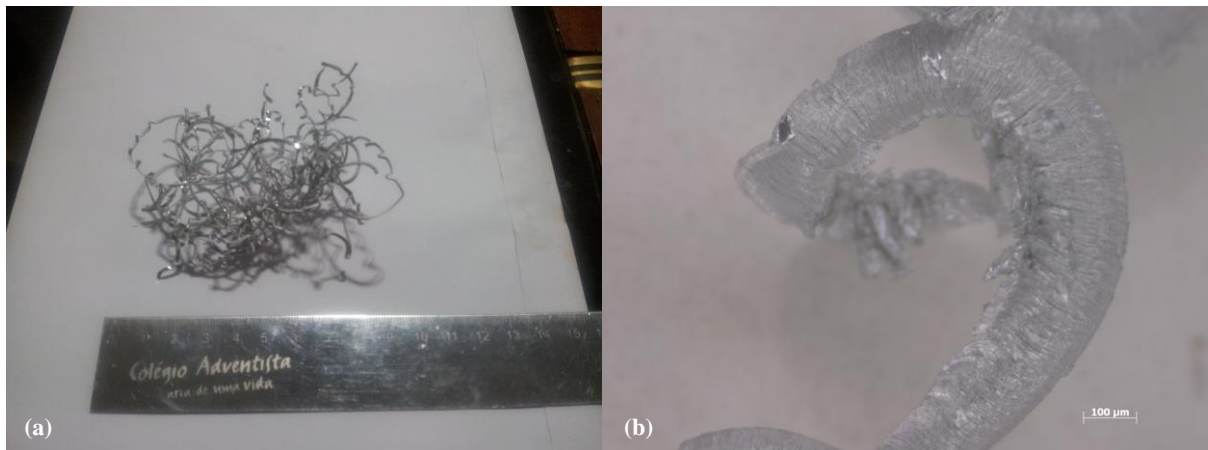
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 20 - Cavacos formados pela Condição 3 ($v_c = 1000$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,2$ mm/rot): (a) escala real; (b) Microscópio Óptico com aumento de 10x.



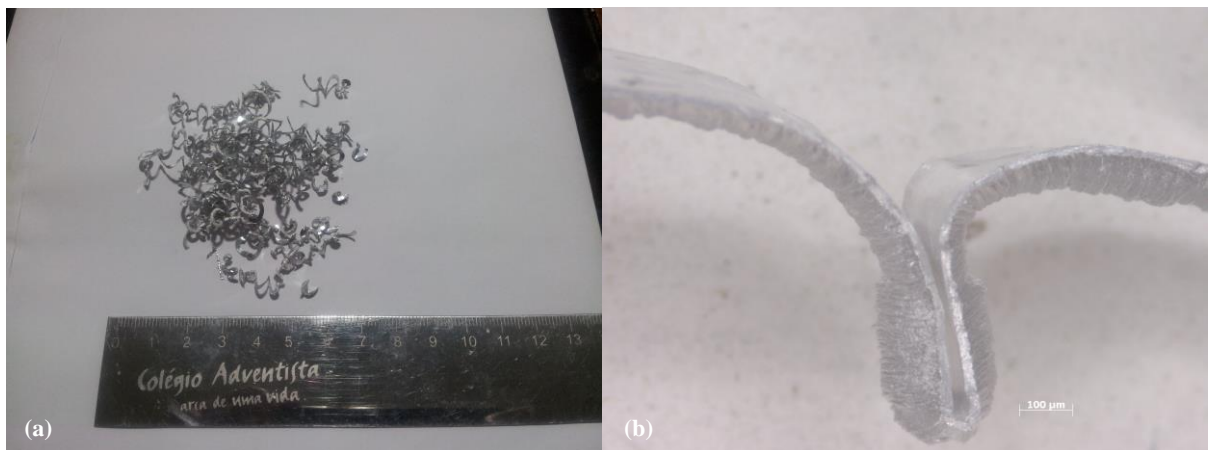
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 21 - Cavacos formados pela Condição 4 ($v_c = 1000$ m/min; $a_p = 0,5$ mm; $f = 0,15$ mm/rot): (a) escala real; (b) Microscópio Óptico com aumento de 10x.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 22 - Cavacos formados pela Condição 5 ($v_c = 1000$ m/min; $a_p = 0,7$ mm; $f = 0,15$ mm/rot): (a) escala real; (b) Microscópio Óptico com aumento de 10x.



Fonte: Produção do próprio autor.

Analisando os cavacos formados, pôde-se notar, como já esperado, que os cavacos submetidos às Condições 3 e 5 forneceram os resultados mais aceitáveis e mais favoráveis à usinagem, pois se mostraram menores e mais curtos, na forma de lascas e pedaços. Tal resultado pode ser explicado pelos maiores valores de avanço e profundidades de corte decorrentes destas condições. Os cavacos submetidos às Condições 1, 2 e 4 não se mostraram muito favoráveis à usinagem, pois apresentaram formato em fita, assim como um caráter emaranhado, o que não é aconselhável para a integridade da máquina. O fato das peças submetidas a essas condições apresentarem esta característica deve-se ao fato de apresentarem menores valores de avanço e profundidade de corte. Todos os cavacos analisados apresentaram-se cisalhados, ou parcialmente contínuos.

5 CONCLUSÕES

Pôde-se concluir que, o trabalho aqui apresentado, exibiu resultados coerentes e condizentes com a literatura existente. A ferramenta de cerâmica apresentou caráter positivo e eficiente para a usinagem da Liga de Alumínio 6005, com resultados satisfatórios. Foram verificados valores positivos para a rugosidade com avanços de 0,1 mm/rot, com o intuito de se manter uma regularidade topográfica. Já com relação a análise dos cavacos, notou-se um melhor resultado para avanços com 0,15 mm/rot e 0,2 mm/rot, o que já era previsto pela literatura estudada.

Com os resultados obtidos, pôde-se contemplar um avanço científico e tecnológico, com o estudo de uma ferramenta cerâmica, para a usinagem de uma liga de alumínio 6005 fornecida pela Votorantim Metais – CBA.

Para trabalhos futuros, sugere-se uma maior gama de parâmetros, com novos valores de velocidade de corte, e um espectro de valores de avanço maior, para que se possa seguir em frente com o trabalho apresentando, buscando resultados cada vez mais satisfatórios e inusitados para esta ferramenta cerâmica.

REFERÊNCIAS

- ALCOA. **Catálogo de ligas e têmperas**. São Paulo: Alcoa, 2010. 52p. v. 1. Disponível em: <https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2015.
- APAL. **Alumínio: 100% a favor**. 2. ed. Porto: Apal, 2013. 47p. Disponível em: <http://www.apal.pt/pdf/15-11-2013_WORKSHOP_OE_Porto.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2015.
- BAUCCIO, M. **Nonferrous alloys and special-purpose materials**. 9th ed. Columbus: Metals Park, 1990. v. 2, 900p.
- BESKOW, A. B. **Processos de usinagem**. Erechim: URI, 2011. 65p. v. 1. Disponível em: <https://plant3d.files.wordpress.com/2011/04/processos_de_usinagem_i_-_aula_03_-_geometria_da_ferramenta_de_corte.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2015.
- BRADASCHIA, C. Técnicas de fundição do alumínio e suas ligas. In: _____. **Curso de fundições de ligas não-ferrosas**. São Paulo: ABM, 1987. 155p.
- CALLISTER JR; WILLIAM, D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 703p.
- DINIZ, A. E. et al. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 3.ed. São Paulo: Artilber, 2003.
- DIÓGENES, A. C. **Estudo da usinagem por torneamento de ligas de alumínio**. 2011. 69 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.
- EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M.; MACHADO A. R. The machinability of nickelbased alloys: a review. **Journal of materials processing technology**, Amsterdam, v. 86, p. 1 - 16, 1999.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1977. v.1.
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Londres: Edward Arnold, 1992. 273p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3685**: Tool life testing with single-point turning tools. Zurich, 1993.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 5th ed. Upper Saddle River: Pearson Education, Inc., 2006.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2009. 371p.

MOREIRA, M. F. **Ligas de alumínio conformadas: alumínio e suas ligas**. 3. ed. São Paulo: Dalmolim, 1999. Disponível em: <<http://www.dalmolim.com.br/educacao/materiais/bibliomat/aluminioconf.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

PEIXOTO, E. M. A. Elemento: Alumínio. **Química nova na escola**, São Paulo, n. 13. maio 2001. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc13/13-aluminio.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2016.

POLMEAR, I. J. **Light alloys: metallurgy of the light metals**. 3rd. ed. London: Wiley, 1995. 362p.

SANTOS, J. A. B. **O estudo da aplicação de revestimentos superficiais em fresas caracóis**. 2004. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Usinagem) - Pontifícia Universidade Católica de Minas, PUC-MG, Belo Horizonte, 2004.

SON, S.K.; MATSUMURA, S.; FUKUI, K.; TAKEDA, M. The compositions of metastable phase precipitates observed at peak hardness condition in an Al–Mg–Si alloy. **Journal of alloys and compounds**, Amsterdam, v. 509, n. 2., jan. 2011. 241 - 245p.

SOUZA, J. V. C., **Desenvolvimento de pastilhas cerâmicas à base de Si₃N₄ para aplicações tribológicas**. 2005. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

STOETERAU, R. L. Fabricação por remoção de material. **Processos de usinagem**, Florianópolis: UFSC Editora, v. 1., n. 8, ago. 2004. 180p.

TELES, M. T., **Torneamento do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizando ferramentas de metal duro**. 2007. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Projeto e Fabricação) - Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Itajubá, 2007.

TRENT, E. M., **Metal cutting**. 2nd ed. London: Butterworths, 1984. 446p.

YAOA, J. Y.; GRAHAMA D. A.; RINDERER, B.; COUPER, M. J.; **A TEM study of precipitation in Al-Mg-Si alloys**. Amsterdam: Elsevier, 2001, v. 32., 870p.