

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.10.16.40-TDI

AVALIAÇÃO DO TIPO DE DESGASTE DE FERRAMENTA DE UM COMPÓSITO CERÂMICO DE ALUMINA-ZIRCÔNIA PARA USINAGEM DE LIGAS METÁLICAS DE USO AEROESPACIAL

Marcela Dalprat Alegre Braga

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Maria do Carmo de Andrade Nono, Miguel Adriano Inácio, e Irineu dos Santos Yassuda, aprovada em 31 de maio de 2017.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NS4B48>

> INPE São José dos Campos 2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE Gabinete do Diretor (GB) Serviço de Informação e Documentação (SID) Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970 São José dos Campos - SP - Brasil Tel.:(012) 3208-6923/6921 E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID) BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID) EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.10.16.40-TDI

AVALIAÇÃO DO TIPO DE DESGASTE DE FERRAMENTA DE UM COMPÓSITO CERÂMICO DE ALUMINA-ZIRCÔNIA PARA USINAGEM DE LIGAS METÁLICAS DE USO AEROESPACIAL

Marcela Dalprat Alegre Braga

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Maria do Carmo de Andrade Nono, Miguel Adriano Inácio, e Irineu dos Santos Yassuda, aprovada em 31 de maio de 2017.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NS4B48>

> INPE São José dos Campos 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Braga, Marcela Dalprat Alegre.

B73a

Avaliação do tipo de desgaste de ferramenta de um compósito cerâmico de alumina-zircônia para usinagem de ligas metálicas de uso aeroespacial / Marcela Dalprat Alegre Braga. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xxviii + 118 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.10.16.40-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadores : Drs. Maria do Carmo de Andrade Nono, Miguel Adriano Inácio, e Irineu dos Santos Yassuda.

Compósito cerâmico alumina-zircônia.
Ferramenta de corte.
Parâmetros de corte.
Propriedades mecânicas.
Microestruturas.
I.Título.

CDU 621.7.01:629.78



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aluno (a): *Marcela Dalprat Alegre Braga* "AVALIAÇÃO DO TIPO DE DESGASTE DE FERRAMENTA DE UM COMPÓSITO CERÂMICO DE ALUMINA - ZIRCÔNIA PARA USINAGEM DE LIGAS METÁLICAS DE USO AEROESPACIAL".

> Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em

ETE/Clência e Tecnologia de Materiais e Sensores

Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono

53

Presidente / Orientador(a) / INPE / SyCampos - SP

Dr. Miguel Adriano Inácio

Offentador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

- Dr. Irineu dos Santos Yassuda
- Dr. Francisco Piorino Neto

Dr.

1

Membro da Banca / AMR/IAE/DCTA / SJCampos - SP

Orientador(a) / IFSP / São José dos Campos - SP

Olivério Moreira de Macedo Silva

livenis Moneina de M. S.W.

Convidado(a) / AMR/IAE/DCTA / SJCampos - SP

Este trabelho foi aprovado por:

- () maioria simples
- (x) unanimidade

"A lei da mente é implacável. O que você pensa, você cria. O que você sente, você atrai. O que você acredita, torna-se realidade".

Buddha

Dedico a meus pais, Hairton (in memoriam) e Marília, e a meu esposo Danilo.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Ao Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS/CTE/INPE), à Divisão de Materiais (AMR/CTA/IAE) e à oficina mecânica do prédio de Serviço de Manufatura (SEMA/ETE/INPE) pela disponibilização de suas instalações e equipamentos para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Federal de São Paulo (IFSP), *Campus* de São José dos Campos pela disponibilização de suas instalações e equipamentos.

A minha orientadora, Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono, pela oportunidade de estudo concedida, pela confiança transmitida desde o começo, e principalmente por sua amizade e pelos conhecimentos compartilhados.

Aos meus coorientadores, Dr. Miguel Adriano Inácio e Dr. Irineu dos Santos Yassuda, por toda ajuda e orientação desde o começo deste trabalho, pelo apoio de sempre, e pela amizade verdadeira.

A todos meus professores da Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores (CMS) do Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE), pelo conhecimento compartilhado.

Ao Dr. Antonio Jorge Abdalla e ao Instituto Tecnológico de Estudos Avançados (IEAv), do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), pela doação dos materiais utilizados neste trabalho

A Dra. Míriam Kasumi Hwang Yassuda, por todo auxílio prestado na execução deste trabalho.

Ao Daniel Alessander Nono por toda ajuda durante o trabalho, pela amizade, e por todas as conversas e conhecimentos compartilhados.

Ao Luis Carlos Pires Videira pela ajuda nos ensaios de dureza, e por toda sua amizade.

A meu esposo, Danilo, por todos esses anos ao meu lado me apoiando, cuidando de mim em todos os momentos, e por todo amor transmitido.

A meus pais Hairton (*in memoriam*) e Marília, por sempre me incentivarem a estudar e por estarem ao meu lado em todos os momentos e decisões de minha vida, e pelo grande amor.

A Deus, pela vida, pela saúde, pela minha família, pela oportunidade de continuar a estudar, por tudo!

RESUMO

Grande parte das pesquisas na área aeroespacial, no que diz respeito à aplicação de materiais para fabricação de componentes de foguetes e satélites, tem como objetivo a otimização das tecnologias envolvidas para a obtenção de materiais com peso baixo e resistência mecânica alta. Diversos materiais são utilizados, tais como os ferros fundidos, os aços endurecidos, alumínios, ligas de níquel e materiais compósitos. Estes materiais são escolhidos por apresentarem ótimas propriedades mecânicas, como alta resistência à fratura, dureza e tenacidade à fratura. Estas propriedades causam influência na usinagem destes materiais, tornando um desafio para as indústrias aeroespaciais para a produção dessas peças. Nos últimos anos, muitos estudos na tecnologia de processamento de materiais cerâmicos têm sido realizados, permitindo que estes materiais fossem utilizados na confecção de ferramentas de corte. Estas ferramentas de compósitos cerâmicos de alta performance exibem melhorias em suas propriedades mecânicas, tais como tensão de ruptura, dureza e tenacidade à fratura. Este trabalho de dissertação teve como objetivo estudar os tipos de desgastes e o comportamento de ferramentas de compósitos cerâmicos de alumina-zircônia com composição química (em peso) de 81.5 % de Al₂O₃ e 18,5 % de ZrO₂, em processos de usinagem por torneamento de ligas metálicas como o ferro fundido cinzento GG20, o aco 4340 e o alumínio 6351. Foram realizados testes de usinagem com diferentes parâmetros de corte, variando-se a velocidade de corte (V_c) em 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 e 450 m/min, e mantendo constante o avanço para acabamento (f) de 0.05 mm/rot e profundidade de corte (A_p) de 0.2 mm. Foi estudado o desempenho da ferramenta cerâmica e os tipos de desgastes a partir de análises de caracterizações da morfologia da aresta de corte. Também foram avaliados os cavacos gerados. Além disso, foi determinada a tensão de ruptura da ferramenta cerâmica, cujo valor médio foi 412 MPa. Os resultados mostraram que entre os materiais testados, a usinagem do ferro fundido cinzento GG20 foi a que apresentou menos desgastes na superfície da aresta de corte da ferramenta cerâmica, sendo do tipo abrasivo. Os resultados dos testes de usinagem do aço 4340 apresentaram desgastes do tipo adesivo e abrasivo. E os testes de usinagem do alumínio 6351, apresentaram a formação de aresta postiça de corte na ponta da ferramenta. Deste modo, a ferramenta de compósito cerâmico de Al₂O₃-ZrO₂ estudada neste trabalho, demonstrou potencial para aplicação no torneamento do ferro fundido cinzento GG20.

Palavras-chave: Compósito cerâmico alumina-zircônia. Ferramenta de corte. Parâmetros de corte. Propriedades mecânicas. Microestruturas.

EVALUATION OF THE TYPE OF WEAR OF AN ALUMINA-ZIRCONIA CERAMIC COMPOSITE TOOL FOR MACHINING OF AEROSPACE METAL ALLOYS

ABSTRACT

Much of the research in the aerospace area, regarding the application of materials for the manufacture of rocket and satellites components, has the objective of optimizing the technologies involved in obtaining materials with low weight and high mechanical resistance. Various materials are used, such as casts iron, hardened steels, aluminum, nickel alloys and composite materials. These materials are chosen because they have excellent mechanical properties, such as high fracture strength, hardness and fracture toughness. These properties influence machining of these materials, making it a challenge for the aerospace industries to produce these parts. In recent years, many studies in the technology of processing of ceramic materials have been carried out, allowing these materials to be used in the confection of cutting tools. These high performance ceramic composite tools exhibit improvements in their mechanical properties, such as fracture stress, hardness and fracture toughness. This work aimed to study the types of wear and the behavior of tools of alumina-zirconia ceramic composites (by weight) of 81.5% Al₂O₃ and 18.5% of ZrO₂, in machining processes by turning metal alloys such as gray cast iron GG20, steel 4340 and aluminum 6351. Machining tests were performed with different cutting parameters, varying the cutting speed (V_c) at 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 and 450 m/min, and maintaining the feed rate constant (f) at 0.05 mm/rot and depth of cut (A_p) at 0.2 mm. The performance of the ceramic cutting tool and the types of wears from analyzes of characterization of the cutting edge morphology was studied. The generated chips were also evaluated. In addition, the fracture stress of the ceramic tool, whose average value was 412 MPa, was determined. The results showed that among the tested materials, the machining of gray cast iron GG20 showed the least wear on the surface of the ceramic cutting edge tool, being the abrasive wear. The results of the steel machining tests 4340 showed wear of the adhesive and abrasive type. And the machining tests of the 6351 aluminum, presented the cut edge formation at the tip of the tool. Thus, the Al₂O₃-ZrO₂ ceramic composite tool studied in this work demonstrated potential for application in the turning of grav cast iron GG20.

Keywords: Alumina-zirconia ceramic composite. Cutting tool. Cutting parameters. Mechanical properties. Microstructures.

LISTA DE FIGURAS

<u>Pág</u>.

Figura 2.1: Indentação de dureza de escala Vikers9)
Figura 2.2: Representação esquemática de um ensaio de flexão com quatro apoios 11	
Figura 2.3: Gráfico de comparação entre as características dos diferentes materiais	
de ferramentas	-
Figura 2.4: Movimentos relativos entre a ferramenta de corte e a peça	
Figura 2.5: Representação dos formatos e ângulos das pastilhas intercambiáveis	
para processo de torneamento	,
Figura 2.6: Exemplo de pastilhas intercambiáveis com diferentes geometrias e	
números de arestas de corte	,
Figura 2.7: Aresta de corte e superfícies de uma ferramenta para torneamento	,
Figura 2.8: Representação dos ângulos das ferramentas no plano de referência da	
ferramenta para processo de torneamento)
Figura 2.9: Representação dos ângulos das ferramentas no plano admitido de	
trabalho da ferramenta para processo de torneamento)
Figura 2.10: Processo de formação do cavaco41	
Figura 2.11: Tipos de cavacos: a) contínuo, b) cisalhado ou lamelar e c) ruptura ou	
arrancado43	
Figura 2.12: Formas de cavaco: a) em fita; b) helicoidal, c) espiral; d) em lascas43	
Figura 2.13: Exemplo de distribuição de calor entre o sistema peça-ferramenta-	
cavaco	,
Figura 2.14: Zonas de desgastes na ferramenta de corte47	,
Figura 2.15: Demonstração do desgaste do tipo entalhe por uma imagem da	
ferramenta deste trabalho	,
Figura 2.16: Demonstração da formação de aresta postiça através de uma imagem	
da ferramenta deste trabalho49)
Figura 2.17: Desenho esquemático do desgaste do tipo fratura)
Figura 2.18: Desenho esquemático do desgaste por trincas térmicas)
Figura 2.19: Desenho esquemático do desgaste por deformação plástica	
Figura 2.20: Desenho esquemático do desgaste por difusão	
Figura 2.21: Desenho esquemático do desgaste por craterização	

Figura 2.22: Demonstração do desgaste do tipo flanco por uma imagem da	
ferramenta deste trabalho	53
Figura 3.1: Inserto de cerâmica alumina-zircônia desenvolvido no INPE	55
Figura 3.2: Geometria das pastilhas utilizadas nesse trabalho	56
Figura 3.3: Suporte de torneamento de código DSBNL 2020 K 12 posicionado na	
máquina	57
Figura 3.4: Suporte de torneamento com o inserto de cerâmica	57
Figura 3.5: Desenho esquemático das dimensões do suporte DSBNL 2020 K 12	58
Figura 3.6: Torno Mecânico CNC utilizado nos ensaios e alocado no IFSP	58
Figura 3.7: Torno Mecânico CNC utilizado nos ensaios e alocado no SEMA/ETE	59
Figura 3.8: Fluxograma das etapas seguidas neste trabalho	61
Figura 3.9: Representação da geometria do corpo de prova	62
Figura 3.10: Posicionamento dos corpos de prova para os ensaios de flexão	63
Figura 3.11: Operação de usinagem longitudinal com a ferramenta de cerâmica	64
Figura 3.12: Denominações das arestas de corte	64
Figura 4.1: Microscopias do ferro fundido cinzento GG20, a) aumento de 500x e	
b) aumento de 1000x	71
Figura 4.2: Lamelas de grafita do tipo D	71
Figura 4.3: Microscopias do aço 4340, a) aumento de 500x e b) aumento de	
1000x	72
Figura 4.4: Microscopias do alumínio 6351, a) aumento de 500x e b) aumento de	
1000x	72
Figura 4.5: Imagens de FEG-MEV do compósito cerâmico de Al ₂ O ₃ - ZrO ₂ ,	
obtido utilizando pós misturados mecanicamente em álcool etílico: a) elétrons	
secundários e b) elétrons retro-espalhados. Zircônia: grãos mais claros. Alumina:	
grãos mais escuros	73
Figura 4.6: Imagens de FEG-MEV do compósito cerâmico de Al ₂ O ₃ - ZrO ₂ ,	
mostrando grãos aglomerados de zircônia obtidas por: a) elétrons secundários e b)	
elétrons retro-espalhados. Zircônia: grãos mais claros. Alumina: grãos mais	
escuros	74
Figura 4.7: Representação gráfica de distribuição de Weibull do compósito	
alumina-zircônia investigado	75
Figura 4.8: Fatores da ferramenta que influenciam a vibração	77
Figura 4.9: Ângulos de ponta de ferramenta de corte	77

Figura 4.10: Demonstração das geometrias de ferramenta: a) positiva e b) negativa......78 Figura 4.11: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 1, lados AB, usinagem do ferro fundido cinzento GG20, A) $V_c = 100 \text{ m/min e B}$ $V_c = 150 \text{ m/min}$82 Figura 4.12: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 1, lados CD, usinagem do Figura 4.13: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 4, lados AB, usinagem do Figura 4.14: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 4, lados CD, usinagem do ferro fundido cinzento GG20, C) $V_c = 400 \text{ m/min e D}$ $V_c = 450 \text{ m/min}$85 Figura 4.15: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 1, lado EF, usinagem do Figura 4.16: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 1, lados GH, usinagem do aço 4340, G) $V_c = 200 \text{ m/min e H}$ $V_c = 250 \text{ m/min.}$ 88 Figura 4.17: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 3, lados AB, usinagem do aço 4340, A) $V_c = 300 \text{ m/min e B}$ $V_c = 350 \text{ m/min.}$ 89 Figura 4.18: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 3, lados CD, usinagem do Figura 4.19: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 2, lados AB, usinagem do Figura 4.20: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 2, lados CD, usinagem do Figura 4.21: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 2, lados EF, usinagem do Figura 4.22: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 2, lados GH, usinagem do Figura 4.23: Cavacos recolhidos após a usinagem do ferro fundido cinzento GG20, i) Vc = 100 m/min, ii) Vc = 150 m/min, iii) Vc = 200 m/min e iv) Vc = Figura 4.24: Cavacos recolhidos após a usinagem do ferro fundido cinzento GG20, a) Vc = Vc = 300 m/min, b) Vc = 350 m/min, c) Vc = 400 m/min e d) VcFigura 4.25: Cavacos recolhidos após a usinagem do aço 4340, i) Vc = 100

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 2.1: Comparações entre os módulos de elasticidade de cerâmicas e metais	,
Tabela 2.2: Dureza na escala Vikers de alguns materiais cerâmicos10)
Tabela 2.3: Propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento GG20)
Tabela 2.4: Composição química do Ferro Fundido Cinzento GG 20)
Tabela 2.5: Propriedades mecânicas do aço 434021	
Tabela 2.6: Composição química do Aço 434021	
Tabela 2.7: Propriedades mecânicas do alumínio 6351)
Tabela 2.8: Composição química do Alumínio 6351)
Tabela 3.1: Especificações do suporte DSBNL 2020 K 1257	,
Tabela 3.2: Especificações do torno CNC localizado no IFSP 59)
Tabela 3.3: Especificações do torno CNC localizado no SEMA/ETE60)
Tabela 3.4: Parâmetros iniciais de corte que foram estudados para cada material	
(V _c : velocidade de corte, f: avanço, A _p : profundidade de corte)	j
Tabela 3.5: Parâmetros de corte que foram estudados para cada material (V_c :	
velocidade de corte, f: avanço, A _p : profundidade de corte)66	;
Tabela 4.1: Composição química dos materiais utilizados nos testes de usinagem	
por FRX)
Tabela 4.2: Valores de dureza na escala Brinell dos materiais utilizados nos testes	
de usinagem)
Tabela 4.3: Valores de dureza Vickers e de tenacidade à fratura dos compósitos	
cerâmicos de Al ₂ O ₃ - ZrO ₂ , sinterizados em 1600 °C74	ł
Tabela 4.4: Propriedades mecânicas do compósito alumina-zircônia 76)

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LAS	Laboratório Associado de Sensores e Materiais
TECAMB	Micro e Nanotecnologia de Cerâmicas e Compósitos
CBN	Cubic Boron Nitride
Y-TZP	Cerâmica de Zircônia Tetragonal estabilizada por Ítria
CNC	Comando Numérico de Controle
ISO	International Organization for Standardization
IFSP	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
SEMA	Serviço de Manufatura
ETE	Engenharia e Tecnologia Espacial
DCTA	Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
AMR	Divisão de Materiais
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
CTE	Centro de Tecnologias Especiais
DSLR	Digital Single-Lens Reflex
FRX	Fluorescência de Raios X
MEV	Microscópio Eletrônica de Varredura

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão aplicada (MPa)
E	Módulo de elasticidade (MPa)
3	Comprimento de deformação (mm/mm)
ΔL	Variação de comprimento (mm)
Li	Comprimento inicial (mm)
HV	Dureza Vikers
HB	Dureza Brinell
Р	Força aplicada (kg)
d	Comprimento da diagonal da impressão (mm)
α	Ângulo das faces da pirâmide (136°)
σ_{f}	Tensão de fratura (MPa)
b	Largura do corpo de prova (mm)
h	Espessura do corpo de prova (mm)
L	Espaçamento dos apoios (mm)
e	Espaçamento dos pontos de aplicação da carga (mm)
\mathbf{P}_{f}	Probabilidade de fratura
σ_0	Constante de normalização
m	Módulo de Weibull
Pi	Probabilidade de fratura acumulada
Ν	Número de amostras
i	Índice ordenador de ensaios
σ_{50}	Tensão média de fratura
V _c	Velocidade de corte (m/min)
f	Avanço (mm/rot)
A _p	Profundidade de corte (mm)
π	constante irracional
D	Diâmetro da peça (mm)
n	Rotação por minuto (rpm)
Αγ	Superfície de saída
Αα	Superfície principal de folga
A'α	Superfície secundária de folga
S	Aresta principal de corte
S'	Aresta secundária de corte

- P_r Plano de referência da ferramenta
- P_f Plano admitido de trabalho
- P_s Plano de corte da ferramenta
- P's Plano de corte secundário da ferramenta
- γ_f Ângulo de saída da ferramenta
- α_f Ângulo de folga da ferramenta
- β_f Ângulo de cunha da ferramenta
- χ_r Ângulo de posição da ferramenta
- χ'_r Ângulo de posição da aresta secundária da ferramenta
- ϵ_r Ângulo da ponta da ferramenta
- Φ Ângulo de cisalhamento
- r_{ϵ} Raio de ponta da ferramenta (mm)

SUMÁRIO

<u>Pág</u>.

1	INTRODUÇÃO			1
2	CERÂMICAS PARA APLICAÇÕES COMO FERRAMENT	AS	DE	
COR	ГЕ			5
2.1.	Materiais cerâmicos			5
2.2.	Propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos	, .	•••••	6
2.2.1	Módulo de elasticidade		•••••	7
2.2.2	Dureza		•••••	8
2.2.3	Resistência à fratura		•••••	. 10
2.2.4	Análise estatística de Weibull		•••••	. 12
2.2.5	Resistência ao choque térmico		•••••	. 14
2.3.	Cerâmica de Al ₂ O ₃		•••••	. 14
2.4.	Cerâmica de óxido de zircônio (ZrO ₂)	, .	•••••	. 15
2.5.	Compósito cerâmico de alumina-zircônia (Al ₂ O ₃ -ZrO ₂)			. 16
2.6.	Materiais aeroespaciais		•••••	. 17
2.6.1	Ferro fundido cinzento GG 20		•••••	. 18
2.6.2	Aço 4340	, .	•••••	. 20
2.6.3	Alumínio 6351		•••••	. 21
2.7.	Materiais para ferramentas de corte			. 23
2.7.1	Ferramentas cerâmicas de corte	•••••	•••••	. 24
2.7.1	1. Cerâmica de nitreto de silício	•••••	•••••	. 25
2.7.1	2. SiAlONs	•••••	•••••	. 26
2.7.1	3. Cerâmicas de compósito alumina-zircônia	•••••	•••••	. 26
2.7.1	4. Cerâmicas mistas de Al ₂ O ₃ /Ti(C,N)	•••••	•••••	. 27
2.7.1	5. Cerâmicas reforçadas		•••••	. 28
2.7.1	6. Ceramica de nitreto cúbico de boro	•••••	•••••	. 28
2.8.	Recomendações para aplicação de ferramentas de corte cerâmicas		•••••	. 29
2.9.	Usinagem de materiais	•••••	••••••	. 30
2.10.	Máquinas operatrizes para a usinagem com ferramentas de corte cer	âmica	as	. 30
2.11.	Torneamento			. 31

2.12.	Parâmetros de usinagem	33
2.13.	Geometria das ferramentas de corte	34
2.14.	Processo de formação do cavaco	40
2.14.	1. Classificação dos tipos e formas dos cavacos	42
2.15.	Temperatura de usinagem	44
2.16.	Usinagem sem fluido de corte	45
2.17.	Tipos de desgastes da ferramenta de corte	46
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	55
3.1.	Ferramenta de corte cerâmica	55
3.2.	Materiais utilizados nos testes de usinagem	56
3.3.	Equipamentos de usinagem	56
3.3.1	Porta ferramentas	56
3.3.2	Máquina ferramenta	58
3.4.	Metodologia	60
3.4.1	Ensaio de flexão	61
3.4.2	Testes de usinagem	63
3.5.	Caracterização da ferramenta de corte cerâmica e do material usinado	66
3.5.1	Exame visual do cavaco	67
3.5.2	Caracterização da morfologia das arestas de corte	67
3.5.3	Caracterização da microestrutura do material de compósito cerâmica e dos	
mater	iais usinados	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1.	Caracterizações	69
4.1.1	Materiais utilizados nos testes de usinagem	69
4.1.2	Compósito alumina-zircônia	72
4.2.	Determinação da tensão de fratura	74
4.3.	Estudo do comportamento da ferramenta nos testes de usinagem	76
4.3.1	Discussões sobre os resultados	76
4.3.2	Morfologia da ferramenta após a usinagem	81
4.3.2	1. Ferro fundido cinzento GG20	81
4.3.2	2. Aço 4340	86
4.3.2	3. Alumínio 6351	91
4.3.3	Análise do cavaco	96
4.3.3	1. Ferro fundido cinzento GG20	96

4.3.3.	2.	Aço 4340	. 99
4.3.3.	3.	Alumínio 6351	101
5	CON	CLUSÕES	105
6	SUG	ESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
REFE	ERÊN	CIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

1 INTRODUÇÃO

Vários estudos referentes à indústria aeroespacial estão ligados aos materiais que compõem a fabricação de foguetes e satélites, com a finalidade de melhorar as tecnologias envolvidas utilizando materiais com boa relação peso/resistência mecânica. Muitos materiais apresentam propriedades importantes para o uso espacial e aeronáutico. Dentre os diversos materiais estão presentes os aços endurecidos, alumínios, ligas de níquel, ligas de titânio e materiais compósitos. Esses materiais por combinarem alta resistência mecânica e tenacidade à fratura são amplamente utilizados nas indústrias aeronáutica e aeroespacial na fabricação de diversos componentes utilizados em turbinas e sistemas de propulsão de foguetes, mísseis e satélites [1, 2].

Essas mesmas propriedades mecânicas, que são benéficas aos produtos são, entretanto, geradoras de obstáculos aos processos de fabricação. Esses materiais exigem esforços maiores dos equipamentos, maior consumo de energia, ferramentas mais resistentes e causando maiores desgastes nas mesmas. Durante a usinagem, a aresta de corte é estressada pelas temperatura e pressão mais elevadas que são atingidas, ocasionadas pela interação da superfície da ferramenta de corte em contato com o material de trabalho, influenciando nos tipos de desgastes da ferramenta e causando a diminuição da vida útil [3]. Portanto, tornou-se essencial o estudo do processo de remoção de material através da usinagem, e fazer uma seleção criteriosa do material a ser utilizado na ferramenta, a fim de manter a precisão dimensional desejada e a qualidade da superfície do produto acabado [4].

As ferramentas de corte cerâmicas são encontradas nas literaturas desde a década de 50, onde as primeiras ferramentas foram utilizadas. Porém, os materiais cerâmicos só passaram a serem considerados como ferramentas de corte na década de 80, após terem adquirido os desenvolvimentos necessários nas suas propriedades mecânicas [5]. O material cerâmico utilizado como ferramenta de corte possui alguns pontos fortes que são muito importantes para uma ferramenta de usinagem, que são: dureza alta, resistência ao desgaste e estabilidade química. Os pontos negativos deste material fazem com que sua utilização na usinagem não seja tão produtiva, tais como: condutividade térmica baixa, prejudicando a transferência de calor causada pelo atrito da ferramenta com a peça, e

principalmente a tenacidade à fratura baixa, facilitando a quebra da aresta de corte [5, 6]. O último ponto negativo citado é a razão fundamental com que as ferramentas cerâmicas não fizessem parte do mercado de trabalho nas últimas décadas.

Desta forma, progressos na tecnologia de processamento de cerâmicas tem resultado em compósitos cerâmicos de alta performance mecânica, exibindo melhores propriedades, tornando-se mais atrativos no mercado. Atualmente, os compósitos cerâmicos de alumina-zircônia têm se mostrado adequados para serem aplicados na área de ferramentas de corte, devido às propriedades superiores a outros materiais cerâmicos. Além disso, estes compósitos têm apresentado melhorias consideráveis nas propriedades de tensão de ruptura, de dureza, e de tenacidade à fratura. Portanto, estes compósitos se tornam qualificados para garantir um alto desempenho mecânico no setor de fabricação de peças para componentes aeroespaciais [7].

Melhoramentos têm sido realizados nas propriedades das ferramentas de corte cerâmicas, permitindo que fossem utilizadas na usinagem de vários tipos de aços, ferros fundidos, metais não ferrosos, ligas refratárias de base níquel e materiais compósitos. Desta forma, estas ferramentas podem usinar materiais produzindo um melhor acabamento superficial, facilitando a efetiva utilização de máquinas mais potentes, reduzindo o tempo de usinagem. Por resistirem à temperaturas altas possui ainda a capacidade de reduzir o consumo de fluidos de corte, permitindo a redução de custo e menor agressão ao meio ambiente. A produtividade é melhorada por ciclos curtos de tempo, reduzindo, portando, o custo de produção [8].

Por estas razões, este trabalho tem como objetivo geral o estudo dos tipos de desgastes de ferramentas de compósitos cerâmicos de Al_2O_3 - ZrO_2 causados pelo torneamento de ligas metálicas de uso aeroespacial, bem como o desempenho e a caracterização das mesmas. Foram escolhidos os materiais disponíveis que pudessem causar elevados desgastes às ferramentas a fim de caracterizá-las e verificar o desempenho.

Os materiais utilizados no processo de torneamento foram o ferro fundido cinzento GG20, o aço 4340 e o alumínio 6351. Esses materiais apresentam características de resistência alta à corrosão, erosão e desgaste, e também são capazes de manterem suas propriedades mecânicas em ambientes de temperatura alta. Em razão do ferro fundido cinzento GG20 ter sido utilizado em trabalhos preliminares realizados pelo grupo TECAMB/LAS/INPE [9], foram feitos novos testes de usinagem com uma ferramenta similar de compósito cerâmico de Al₂O₃ - ZrO₂. O resultado obtido neste trabalho serviu como parâmetro de comparação para nortear a usinagem dos outros materiais.

Os compósitos cerâmicos selecionados são compostos por: i) 81.5 % (em peso) de Al_2O_3 e 18,5% 3Y-ZrO₂ (zircônia tetragonal estabilizada com 3 %, em mol, de Y₂O₃) que foram desenvolvidas pelo grupo TECAMB/LAS/INPE e que não foram caracterizadas anteriormente quanto ao seu desempenho em processos de torneamento [9]. Ferramentas confeccionadas com a composição proposta foram submetidas a testes de usinagem, nos quais tornos CNC programados para manterem constantes os parâmetros de avanço e profundidade de corte, trabalharam os materiais selecionados variando a velocidade de corte. E a cada velocidade ensaiada foram analisados os tipos de desgastes da ferramenta.

2 CERÂMICAS PARA APLICAÇÕES COMO FERRAMENTAS DE CORTE

2.1. Materiais cerâmicos

As cerâmicas são definidas como materiais essencialmente sólidos e são compostos em grande parte por materiais inorgânicos metálicos e não metálicos, unidos por meio de ligações atômicas do tipo iônica e covalente, ou a mistura de ambas. Devido este material ser composto por pelo menos dois elementos ou mais, a estrutura cristalina pode ser considerada mais complexa em relação aos metais. A maioria desses materiais apresentam características de dureza alta, resistência mecânica elevada, peso baixo, ótima resistência ao calor e propriedades isolantes. Entretanto, apresentam como desvantagem a sua relativa fragilidade [10].

Nos últimos 60 anos os materiais cerâmicos conhecidos eram chamados de "cerâmicas tradicionais", os quais as matérias primas eram encontradas de forma direta na natureza, como por exemplo, a argila. Popularmente se associa as cerâmicas a produtos com baixa resistência mecânica e complexidade, mais alta dureza e estabilidade, como por exemplo a porcelana, tijolos, telhas, azulejos e vidros. Com o avanço da tecnologia de materiais, foram feitos estudos na produção de novas cerâmicas, onde uma nova geração evoluiu conhecida como "cerâmicas avançadas", também conhecidas como "cerâmicas de engenharia". Deste modo foi possível ampliar o uso dos materiais cerâmicos em áreas de eletrônica, informática, aeroespacial, e em várias outras indústrias [10, 11].

As cerâmicas avançadas são compostas por substâncias sintetizadas artificialmente, possuindo propriedades específicas que as levam a uma série de aplicações tecnológicas. Algumas propriedades gerais a serem observadas são a dureza alta, excelente desempenho a altas temperaturas, boa resistência ao desgaste, condutividade térmica baixa, bem como resistência alta à corrosão e à oxidação. Entretanto, tais propriedades podem depender fortemente da microestrutura e da composição desses materiais, onde a maioria das cerâmicas avançadas é baseada principalmente em óxidos de alta pureza, nitretos, carbonetos e boretos [12].

Existem duas categorias de cerâmicas avançadas, as cerâmicas funcionais e as estruturais:

- 1- materiais conhecidos como cerâmicas funcionais incluem as cerâmicas que servem para cumprir um grupo de funções, como por exemplo os materiais semicondutores, podendo ser utilizadas em aplicações elétricas, magnéticas, eletrônicas e ópticas [11].
- 2- as cerâmicas estruturais fazem parte de um grupo de materiais onde as propriedades mecânicas possuem um papel fundamental. Um exemplo de aplicação destes materiais é a confecção de ferramentas de corte, permitindo a usinagem de metais de difícil usinabilidade. [11].

Avanços nas tecnologias de processamento das cerâmicas avançadas tem resultado em uma nova geração de cerâmicas estruturais para ferramentas de corte, exibindo propriedades superiores aos materiais tradicionalmente utilizados.

Os melhoramentos nas propriedades das ferramentas cerâmicas incluem a tenacidade à fratura, a resistência ao choque térmico, à dureza elevada e a resistência ao desgaste. Estes desenvolvimentos permitiram que estas ferramentas cerâmicas pudessem ser utilizadas na usinagem de diversos materiais, tais como aços endurecidos, ferros fundidos, metais não ferrosos e ligas refratárias à base de níquel. Um exemplo de grande aplicação é a cerâmica de óxido de alumínio, sendo amplamente utilizada como material de ferramenta de corte. E, através da adição de partículas na estrutura do óxido de alumínio, como o óxido de zircônio, carbeto de titânio, e nitreto de titânio, pode-se melhorar ainda mais as propriedades desta cerâmica, tornando-a mais resistente [8].

2.2. Propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos

Materiais quando submetidos a cargas mecânicas devem obter níveis aceitáveis de desempenho e economia, garantindo-se que ao serem submetidos a esforços, como por exemplo, tração, compressão, cisalhamento e flexão, podem ser considerados seguros e duráveis. A partir disso, pode-se dizer que as propriedades mecânicas correspondem com as respostas dos materiais às
influências externas quando submetidos a esforços de diversos tipos, podendo causar deformações reversíveis e irreversíveis, tal como a fratura. As propriedades dos materiais podem ser adquiridas através da realização de ensaios ou testes de laboratório, os quais reproduzem as condições de trabalho onde serão submetidos [13].

Quando comparados com os materiais metálicos, as aplicações dos materiais cerâmicos em esforços mecânicos são atualmente relativamente limitadas. Um exemplo de limitação do material cerâmico é em relação a sua relativa fragilidade à fratura, devido a sua baixa energia de absorção de impacto. Assim esses materiais normalmente não apresentam deformação plástica e sua resistência ao impacto é reduzida. Entretanto esses materiais possuem outras propriedades mecânicas que os tornam interessantes para algumas aplicações, tornando os materiais cerâmicos aptos a serem utilizados como ferramentas cerâmicas de corte, motores cerâmicos e implantes ortopédicos [14].

Este trabalho focou nas propriedades das cerâmicas que interessam aos processos que são aplicados as ferramentas de cortes, entre eles o módulo de elasticidade, dureza, resistência à fratura e resistência ao choque térmico.

2.2.1. Módulo de elasticidade

A região inicial da curva tensão-deformação dos testes de tensão de tração exibe uma variedade de comportamentos para diferentes materiais. Esta região é definida por uma linha reta inicial, igualmente apresentada para muitos metais de engenharia, onde a deformação é predominantemente elástica. O módulo elástico, E, também conhecido como módulo de Young, é a medida do material à deformação elástica. Esta propriedade pode ser calculada a partir da Lei de Hooke, apresentada pelas equações 2.1 e 2.2 [13, 15].

$$σ = Eε$$
Equação 2.1

ΔL
Equação 2.2

Onde:

- σ: tensão aplicada (MPa);
- E: módulo de elasticidade (MPa);
- ε: comprimento de deformação (mm/mm);
- ΔL : diferença entre o comprimento final e o inicial (mm) e
- L_i: comprimento inicial (mm).

Assim como os metais, a cerâmica possui módulo de Young bem definido. Os módulos de elasticidade das cerâmicas são na maioria das vezes superiores aos dos os metais, e isto decorre devido à energia alta de ligação dos átomos das cerâmicas. Demonstrando, portanto, a rigidez das ligações químicas iônica e covalente presentes nestes materiais [16]. Na Tabela 2.1 são apresentados alguns valores aproximados de módulo de elasticidade entre cerâmicas e metais.

Material	Módulo de elasticidade (GPa)
Aços	210
Ligas de Al	70
Alumina, Al ₂ O ₃	390
Silica, SiO ₂	69

Tabela 2.1: Comparações entre os módulos de elasticidade de cerâmicas e metais.

Fonte: adaptado de [16]

2.2.2. Dureza

Os materiais cerâmicos são considerados os de maior dureza entre os outros materiais sólidos, podendo ser utilizados como abrasivos para cortar, triturar ou polir em diversas situações. Em engenharia, esta propriedade é geralmente definida como a resistência de um material a uma indentação. Ou seja, indentação é o pressionamento de uma ponta de diamante contra a superfície do material através da aplicação de uma força de penetração. A carga aplicada e a geometria da ponta penetradora são variáveis utilizadas nos cálculos da dureza [13]. Um tipo de ensaio de dureza muito utilizado em cerâmicas é o de dureza de escala Vikers, o qual é baseado na penetração de um indentador de diamante no formato piramidal (Figura 2.1). Deste modo, o número HV da dureza de escala Vickers é obtido a partir da equação 2.3, sendo a razão da força aplicada pela área superficial da penetração da pirâmide [13].

$$HV = \frac{2P}{d^2} sen \frac{\alpha}{2}$$
 Equação 2.3

Onde:

- HV: dureza de escala Vikers;
- P: força aplicada (kg);
- d: comprimento da diagonal da impressão (mm);
- α: ângulo das faces da pirâmide (136°).

Figura 2.1: Indentação de dureza de escala Vikers



Fonte: adaptado de [13]

Na Tabela 2.2 estão informados valores aproximados de dureza de escala Vikers de alguns materiais cerâmicos.

Material	Dureza Vickers (HV, 0,1 kg)		
Nitreto de silício, Si ₃ N ₄ , prensado a quente	1700		
Alumina, Al ₂ O ₃ (99,5% de densidade)	1750		
Carbeto de silício, SiC, prensado a quente	2600		
Carbeto de boro, B ₄ C, prensado a quente	3200		

Tabela 2.2: Dureza na escala Vikers de alguns materiais cerâmicos

Fonte: adaptado de [13]

2.2.3. Resistência à fratura

De modo geral, as cerâmicas são consideradas materiais frágeis, isto devido à grande resistência da rede cristalina. Por consequência, o valor de tenacidade à fratura é relativamente baixo em relação aos metais. Esta propriedade está relacionada com a energia absorvida na zona de deformação plástica do material, isto é, quando menos energia absorvida, menor é a tenacidade à fratura [16].

Para estabelecer os valores desta propriedade são utilizados ensaios de resistência à flexão, onde a tensão de ruptura, o módulo elástico e a tenacidade à fratura podem ser estimados. Devido à fragilidade dos materiais cerâmicos, recomenda-se que sejam feitos ensaios de resistência à flexão em quatro apoios, de acordo com a Figura 2.2 [15].



Figura 2.2: Representação esquemática de um ensaio de flexão com quatro apoios.

Fonte: adaptado de [17]

A partir disso, o corpo de prova é apoiado entre quatro roletes, como demonstrado na Figura 2, permitindo que um volume maior do mesmo seja submetido ao carregamento máximo de flexão. Aplicando-se a carga P nos roletes superiores até a sua fratura, obtém-se, portanto, os valores da força máxima suportada pelos corpos de prova na ruptura e sua tensão de flexão máxima. Então, a tensão de fratura pode ser calculada através da equação 2.4 [18].

$$\sigma_f = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{bh^2} \cdot (L - e) \qquad \text{Equação } 2.4$$

Onde:

- $\sigma_f = tensão de fratura (MPa);$
- P = carga aplicada (kgf);
- b = largura do corpo de prova (mm);
- h = espessura do corpo de prova (mm);
- L = espaçamento dos apoios (mm);

• e = espaçamento dos pontos de aplicação da carga (mm).

2.2.4. Análise estatística de Weibull

Com a finalidade de obter um tratamento estatístico adequado para prever a probabilidade de fratura das cerâmicas, um método muito utilizado atualmente é a distribuição estatística de Weibull. Este método se mostrou o mais apropriado para este tipo de análise estatística. Esta teoria foi sugerida, em 1939, pelo físico Ernest Weibull, o qual propôs uma função empírica de distribuição de probabilidade de falhas [10, 18, 19]. Então, obteve a expressão para a probabilidade de fratura acumulada, conhecida como Distribuição de Weibull, dado pela equação 2.5.

$$P_f = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_f}{\sigma_0}\right)^m\right] \qquad \text{Equação } 2.5$$

Onde:

- P_f: probabilidade de fratura;
- σ₀: constante de normalização;
- m: módulo de Weibull.

Este cálculo de probabilidade de fratura corresponde à tensão cuja probabilidade de falha é 63,2%. O coeficiente "m" é adimensional e está relacionado à homogeneidade do material, bem como a confiabilidade da dispersão de seus valores de resistência. À medida que "m" tende a zero, o valor da probabilidade de falha tende a ser alto, ou seja, o material seria tão frágil que qualquer tensão seria capaz de fraturá-lo. Porém, à medida que "m" tende ao infinito, o valor da probabilidade de falha tende a ser menor. Neste último caso, todos os defeitos estariam igualmente distribuídos, e o material cerâmico teria o comportamento de um material mais homogêneo, semelhante ao de um metal que apresenta uma tensão de ruptura bem característica. Deduzindo, portanto, que quanto maior o módulo de Weibull, maior é a confiabilidade do material cerâmico, pois irá possuir menor dispersão das tensões de ruptura [10, 19].

Após obter os resultados das tensões de flexão através de ensaios com corpos de prova descritos no item 2.2.1.3, é necessário ordenar os valores por ordem crescente, calculando posteriormente a probabilidade de fratura acumulada do corpo de prova, através da Equação 2.6 [10, 19].

$$P_i = \frac{i}{N+1}$$
 Equação 2.6

Onde:

- Pi: probabilidade de fratura acumulada;
- N: Número de amostras;
- i: índice ordenador de ensaios.

Com os dados obtidos, tornam-se conhecidas as tensões de ruptura de cada um dos N corpos de prova ensaiados, isto é, os valores σ_f . E a probabilidade de fratura acumulada também pode ser alcançada, obtendo o valor de P_i. Com estes cálculos, pode-se facilmente plotar um gráfico pelas equações 2.7 e 2.8, sendo possível definir os pontos do gráfico de distribuição de Weibull [10, 19].

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{(1-P_i)}\right)\right] \qquad \text{Equação 2.7 X} \qquad \ln(\sigma_f) \qquad \text{Equação 2.8}$$

Com o gráfico adquirido pela relação entre as equações 2.7 e 2.8, encontra-se a equação da reta obtida, sendo possível estabelecer o coeficiente angular da mesma que é correspondente ao valor do módulo de Weibull. Com os valores do coeficiente angular (m) e do parâmetro de escala σ_0 , determina-se, portanto, a tensão média σ_{50} , onde a probabilidade de ruptura P_f vale 50%, pela equação 2.5.

2.2.5. Resistência ao choque térmico

Mais uma característica importante a ser estudada em relação aos materiais cerâmicos é a resistência ao choque térmico. A mudança brusca de temperatura causa problemas de aparecimento de fraturas nas cerâmicas. Esta característica é entendida como a capacidade do material em resistir a grande variação de temperatura, com ciclos frio-quente-frio, sem sofrer perda de sua integridade e manter suas propriedades mecânicas [13, 16].

Para obter os valores da propriedade mecânica de resistência ao choque térmico destes materiais, são feitos ensaios de variação de temperatura. Uma maneira de medir esta propriedade é aquecer um corpo de prova de cerâmica em temperaturas mais altas, deixando-o cair em seguida em água fria. Devido ao interior do material ainda apresentar temperatura relativamente quente após o ensaio, isto pode delimitar as dimensões originais do corpo de prova, carregando, portanto, uma tensão elástica de tração gerada na superfície. Se esta tensão elástica de tração presente no interior do material ultrapassar a tensão de fratura, a superfície do corpo de prova tende a quebrar. Portanto, a medida da resistência ao choque térmico de um material é relacionada com a tensão elástica de tração gerada no material devido à variação de temperatura [16].

2.3. Cerâmica de Al₂O₃

Cerâmica de óxido de alumínio, também chamada de alumina, é um dos materiais cerâmicos mais importantes conhecidos. A aplicação desta cerâmica tem origem na variedade de suas propriedades, como especificamente na sua dureza elevada e resistência à abrasão, estando entre os valores mais altos para as cerâmicas óxidas. Também possui características de temperatura alta de fusão (aproximadamente 2054 °C), tenacidade à fratura e ser quimicamente estável e não reativa com outros materiais. Isto faz deste material útil para ser empregado em aplicações estruturais, como particularmente em materiais abrasivos, rolamentos e ferramentas de corte [20].

A cerâmica de alumina se apresenta em várias formas cristalinas, sendo a alumina alfa a que mais possui características de estabilidade e densidade. A α -alumina funde em temperaturas altas de 2040 °C, iniciando-se seu processo de

sinterização a 1750 °C. Em relação com a composição da alumina em produtos cerâmicos, as quantidades mais comuns utilizadas são as que contêm 85, 90, 94, 96, 99, 99,8 e 99,9 % de Al₂O₃. Cerâmicas com menos de 80% de alumina são classificadas como porcelana. Por consequência do aumento da porcentagem de alumina, a resistência e outras propriedades deste material apresentam melhora, porém admitem aumentos também no custo e na complexidade do processamento. Contudo as propriedades não dependem somente do teor de composição da alumina, relacionando-se também a microestrutura e a porosidade [21].

Ferramentas cerâmicas de alumina podem ser consideradas como uma alternativa para o uso de ferramentas de metais duros, também utilizados na usinagem de aços em condições endurecidas. Estas ferramentas cerâmicas permitem o uso de parâmetros de usinagem com velocidades de corte altas, tendo como resultado um bom acabamento superficial da peça [8].

2.4. Cerâmica de óxido de zircônio (ZrO₂)

Cerâmica de óxido de zircônio, também conhecida como zircônia, possui estruturas cristalográficas polimórficas. Este material no estado puro pode ser identificado em três fases cristalinas, baseando-se na temperatura e na composição, sendo as fases monoclínica, tetragonal e cúbica. Estas fases passam por transformações térmicas até o ponto de fusão da zircônia. Em temperatura ambiente, a estrutura da zircônia é monoclínica, mantendo-se até a temperatura de 1170 °C. Com o aumento da temperatura de 1170 °C até 2370 °C, a estrutura se transforma na fase tetragonal, a qual é chamada de fase de transição. Por fim, quando a temperatura excede 2370 °C, forma-se a fase cúbica [17, 22].

Um modo efetivo de estabilizar a zircônia nas fases tetragonal e cúbica é a partir do processo de dopagem do material. O objetivo deste processo de dopagem da zircônia é estabilizar as fases tetragonal e cúbica em temperaturas mais baixas. A dopagem é realizada com a introdução de elementos que possuem cátions de números de valência menores que a zircônia, sendo os óxidos os dopantes mais utilizados, tais como o óxido de magnésio (MgO) e o oxido de ítria (Y₂O₃). Deste modo, o processo de dopagem ocorre através da incorporação dos cátions Mg²⁺ e Y^{3+} na estrutura cristalina da zircônia. O material resultante é denominado de

zircônia estabilizada, podendo ter a estabilização de forma total ou parcial, a qual depende da quantidade de óxidos dopantes introduzidos no material. Com a introdução destes dopantes, a zircônia pode estabelecer uma fase metaestável tetragonal em temperaturas ambientes até 1200 °C. Para valores mais altos de temperatura, a fase tetragonal tende a mudar para uma fase cúbica ou tetragonal. [17, 22].

Cerâmica de zircônia tetragonal estabilizada por ítria (Y-TZP) possui grande interesse na área cientifica e tecnológica, sendo atribuído as suas propriedades mecânicas excelentes. Estas cerâmicas após a estabilização apresentam valores maiores de resistência mecânica, tenacidade à fratura, dureza e resistência ao desgaste, podendo ser utilizadas em diversas aplicações estruturais, como por exemplo, em componentes mecânicos de blindagens de satélites [15, 17].

2.5. Compósito cerâmico de alumina-zircônia (Al₂O₃-ZrO₂)

A cerâmica de alumina pura tem sido bastante utilizada como material para aplicações estruturais, como principalmente na área de ferramental de corte. Isto é devido às propriedades mecânicas presentes em sua estrutura cristalina. Entretanto, apesar da variedade de propriedades exibidas, a utilização da alumina pura como ferramenta de corte, sob condições de trabalho com cargas mecânicas altas e choque térmico, é limitada devido a sua fragilidade. Uma alternativa para melhorar as propriedades da cerâmica de alumina pura é por meio da adição de quantidades pequenas de zircônia em sua composição, resultando em um compósito cerâmico de alumina-zircônia [23].

O compósito cerâmico de alumina-zircônia consiste em partículas de zircônia tetragonal dopadas com ítria dispersas na matriz de alumina. Este mecanismo é baseado na transformação polimórfica da zircônia de fase tetragonal em fase monoclínica durante o resfriamento da temperatura de sinterização para temperatura ambiente. Este processo permite o aumento da tenacidade à fratura do compósito alumina-zircônia, e consequentemente a ampla aplicação como ferramentas de corte em usinagens de materiais de usinabilidade baixa [23].

2.6. Materiais aeroespaciais

O setor aeroespacial tem sido um precursor para o desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente no que diz respeito aos materiais avançados de engenharia. A exigência por esses materiais é geralmente incentivada pelos requisitos necessários dos componentes utilizados na construção de satélites, foguetes, veículos espaciais e aeronaves. Estes componentes serão parte integrante de sistemas complexos que tem por característica exigir elevados padrões de desempenho e confiabilidade, o que determina que suas propriedades mecânicas, tais como a força, a rigidez e a tolerância a danos decorrente de meio-ambientes de temperaturas altas sejam elevadas [1].

Os materiais aeroespaciais metálicos mais utilizados são as ligas de alumínio, ligas de titânio e ligas de níquel. Cada um destes materiais exerce um tipo de aplicação, a qual está relacionada às suas propriedades mecânicas. No geral, estes materiais exibem relação entre a resistência mecânica e o peso, demonstrando propriedades como a resistência alta a corrosão, erosão e desgaste, e também são capazes de manterem suas propriedades mecânicas em ambientes de temperatura alta [1, 24].

Além do conhecimento das propriedades mecânicas dos componentes aeroespaciais, outras questões a serem abordadas pelo desenvolvimento de materiais avançados é a fabricação dos mesmos, e por fim, os custos. Os componentes mecânicos são principalmente produzidos a fim de obterem formas utilizando diferentes operações de usinagem. Logo, tornou-se necessário entender o processo de remoção de material no corte de metais, e fazer uma seleção criteriosa do material da ferramenta empregada [1, 25].

Nos dias de hoje, a usinagem de materiais é um assunto de grande interesse pelas indústrias de manufatura e pelos pesquisadores científicos. Características de materiais de uso aeroespacial fornecem um sério desafio para os processos de fabricação, onde as tensões e temperaturas altas geradas durante o corte dificultam muito a usinagem. Por consequência, a usinagem destes materiais pode ocasionar o desgaste da ferramenta de corte por processos mecânicos (abrasão e atrito) e térmicos (difusão e deformação plástica), diminuindo a vida da ferramenta e aumentando o custo do processo [4, 26].

Visando as características desses materiais aeroespaciais, torna-se necessário a escolha das ferramentas de corte específicas para cada aplicação. As ferramentas selecionadas devem ser capazes de manter sua dureza e outras propriedades mecânicas mesmo em temperaturas altas produzidas durante a usinagem com velocidade de corte alta [4, 26].

Os materiais escolhidos para avaliar o desempenho das ferramentas de corte cerâmicas em relação aos desgastes ocorridos pela usinagem de materiais de uso aeroespacial foram o ferro fundido cinzento GG20, o aço 4340 e o alumínio 6351.

2.6.1. Ferro fundido cinzento GG 20

Entre as ligas de ferro-carbono, o ferro fundido constitui um grupo de materiais de grande importância para as indústrias, sendo utilizado em larga escala pelas áreas de máquinas e equipamentos, automobilística, ferroviária, naval, entre outras. Os ferros fundidos são materiais que possuem teor de carbono acima de 2,0 % aproximadamente, e que são adicionados elementos de liga como o silício. Desta forma, o ferro fundido pode ser considerado uma liga ternária de Fe-C-Si, onde o silício está frequentemente presente em teores equivalentes ao do próprio carbono [27].

O ferro fundido cinzento é um tipo de material de coloração escura, caracterizado por constituir como elemento principal de liga o carbono. A microestrutura predominante é a matriz de perlita com dispersão do elemento grafite, em duas formas diferentes, sendo uma parcela relativamente grande no estado de grafita na forma de veios (lamelas) e outra parcela no estado combinado de cementita (Fe₃C). A forma e a distribuição da grafita, assim como a estrutura da matriz são fatores que podem influenciar nas propriedades destes materiais, razão pela qual a escolha da classe apropriada depende muito da sua aplicação [27].

Este material é, dentre os ferros fundidos, a liga mais utilizada em virtude de suas características de fácil fusão e moldagem, boa resistência mecânica, boa resistência ao desgaste e boa capacidade de absorver vibrações. Tais propriedades mecânicas estão relacionadas à estrutura final obtida, ou seja, dependem da matriz metálica utilizada na fundição, bem como da forma e quantidade de grafita presente na microestrutura do material [28].

O estado de grafite combinado na forma de cementita introduz descontinuidades na microestrutura do material, que atuam como quebra cavacos. As lamelas de grafite também atuam como lubrificante para a ferramenta de corte, diminuindo a temperatura na zona de corte. Porém, a morfologia da grafita é um fator importante no acabamento superficial das peças usinadas. Isto é, quando maiores e mais espessas as lamelas de grafita, pior é o acabamento superficial. Este fator é causado pela heterogeneidade entre as lamelas de grafite e as estruturas duras de cementita, as quais causam desgaste na ferramenta. Devido este motivo, é necessário escolher o material da ferramenta de corte que resista ao desgaste causado pelas descontinuidades do ferro fundido [28].

A classe de ferro fundido cinzento GG 20 normalmente possui maior quantidade de grafita, veios mais longos e, em geral, maiores quantidades de ferrita. A classe GG 20 tem como característica principal uma boa usinabilidade, permitindo o aumento dos valores de velocidade de corte e a diminuição do desgaste prematura das ferramentas, possibilitando estreitas tolerâncias dimensionais da peça. Este material é normalmente recomendado para aplicações que requisitam moderadas propriedades mecânicas [29]. Algumas propriedades e a composição deste material estão informadas nas Tabelas 2.3 e 2.4, respectivamente.

Ferro Fundido Cinzento GG20
214
276
752
210
90-113
36-45

Tabela 2.3: Propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento GG20.

Fonte: adaptado de [28]

Elemento	% em peso
С	3,10-3,40
Si	1,90 - 2,30
Mn	0,60 - 0,90
Р	0,10
S	0,15
Fe	Restante

Tabela 2.4: Composição química do Ferro Fundido Cinzento GG 20.

Fonte: [28]

2.6.2. Aço 4340

Existem classes de aços de baixa liga que constituem uma categoria de materiais ferrosos que oferecem propriedades mecânicas superiores as classes simples de aços carbono, através de adições de elementos de liga como níquel, cromo e molibdênio. O aço 4340 é um tipo de aço de baixa liga, sendo classificado como aço de resistência ultra-alta. Este material também é classificado como aço médio carbono, por possui composição de carbono entre 0,3 a 0,7% [28, 30].

O aço 4340 possui em sua microestrutura a fase martensita, a qual fornece dureza e resistência aos aços. Esta microestrutura é obtida por tratamento térmico de têmpera, causando tensões no interior do material, sendo necessário fazer um revenimento posterior para melhorar a ductilidade e a tenacidade do mesmo. O aço 4340 possui propriedades de resistência ótimas, porém usinabilidade baixa [31].

Este material é amplamente aplicado nas indústrias aeronáutica e aeroespacial em função do seu baixo custo, aliado à combinação das propriedades mecânicas de resistência e tenacidade à fratura. O aço 4340 pode ser encontrado em algumas aplicações estruturais, onde o volume é confinado e precisa-se de resistência alta. Com isso, este material é utilizado na fabricação de componentes estruturais críticos para veículos espaciais, trens de pouso e suportes de motores de aeronaves [28, 30]. As propriedades do aço 4340 e a composição química estão informados nas Tabelas 2.5 e 2.6, respectivamente.

Propriedade Mecânica	Aço 4340
Resistência ao escoamento (MPa)	899
Resistência à tração (MPa)	1073
Alongamento (%)	14,2
Estricção (%)	32,0
Dureza (HB)	341
E ([00 20]	-

Tabela 2.5: Propriedades mecânicas do aço 4340.

Fonte: [28, 30]

Tabela 2.6: Composição química do Aço 4340.

% em peso
0,38 - 0,43
0,20 - 0,35
0,60 - 0,80
≤ 0,025
≤ 0,025
1,65 - 2,00
0,70 - 0,90
0,20 - 0,30
Restante

Fonte: [28]

Com a finalidade de desenvolver um material com propriedades mecânicas melhoradas, como a tenacidade à fratura, o aço 300M surgiu mais recentemente como uma evolução tecnológica do aço 4340. O aço 300M apresenta teores de carbono semelhantes ao aço 4340, diferenciando-se apenas por conter teores altos de silício e adição de vanádio em sua composição. Embora o aço 300M apresente propriedades mecânicas otimizadas em relação ao aço 4340, ainda ocorre a predominância da utilização do aço 4340, devido ao seu custo unitário baixo [30].

2.6.3. Alumínio 6351

Nas indústrias de metais, o alumínio é um dos materiais mais utilizados na fabricação de peças, principalmente nas áreas de aeronáutica e automotiva. Tal aplicação no mercado é causada pelas importantes propriedades deste material, como a baixa relação peso/resistência mecânica, boa condutividade elétrica e térmica e resistência mecânica. Deste modo, o alumínio tem sido um material bastante utilizado em aplicações de engenharia, tornando-se o metal não ferroso mais produzido na indústria metalúrgica [32].

Para atender a diversas solicitações, o alumínio é normalmente combinado com outros elementos de liga. As ligas de alumínio da série 6XXX contêm silício (Si) e magnésio (Mg) como elementos principais, estando os mesmos na proporção necessária para formação de siliceto de magnésio (Mg₂Si), permitindo esta liga ser tratada termicamente. A série 6XXX possui boa formabilidade, soldabilidade, usinabilidade e resistência à corrosão [32].

A liga de alumínio 6351, assim como as ligas 6082 e 6005A, contém uma quantidade superior de Mg₂Si do que as ligas 6063 e 6061 com um excesso de silício. Um excesso de 0,2 % de Si resulta no aumento da resistência de uma liga contendo 0,8 % de Mg₂Si em cerca de 70 MPa [32]. Nas Tabelas 2.7 e 2.8 estão informadas algumas propriedades do alumínio 6351 e a composição química.

Propriedade Mecânica	Alumínio 6351	
Resistência ao escoamento (MPa)	285	
Resistência à tração (MPa)	310	
Alongamento (%)	14,0	
Módulo de elasticidade (GPa)	69	
Dureza (HB)	95	

Tabela 2.7: Propriedades mecânicas do alumínio 6351.

Fonte: [33]

Tabela 2.8: Composição química do Alumínio 6351.

Elemento	% em peso
Si	0,70 - 1,30
Fe	0,50
Cu	0,10
Mn	0,40 - 0,80
Mg	0,40 - 0,80
Zn	0,20
Ti	0,20
Outros	0,05 (cada)
Al	Restante
Fonter [33]	

Fonte: [33]

Em relação a outros metais na indústria metalúrgica, o alumínio é um material de boa usinabilidade, tendo aplicação em componentes de tanques de foguetes. No entanto é necessário considerar a gama de ligas disponíveis no mercado, sendo preciso entrar em detalhes sobre as características de usinagem de cada uma. Ou seja, é necessário estudar as condições de usinagem de alumínios para não ocorrer principalmente problemas de empastamentos do material na superfície do produto acabado, devido a temperatura alta na zona de corte [32].

2.7. Materiais para ferramentas de corte

As ferramentas de corte de geometria definida, as quais possuem arestas cortantes com formato, ângulos e tamanhos definidos, são utilizadas para operações de usinagem de torneamento, fresamento, furação, entre outros. Basicamente, estas ferramentas de corte devem ser produzidas por um material de dureza superior ao material da peça a ser usinada, de modo que tenham condições de cortar o material de dureza inferior [5].

A escolha do material da ferramenta de corte deve satisfazer alguns requisitos considerados básicos, tais como:

i) resistência ao desgaste, principalmente por abrasão devido ao atrito,

ii) dureza a quente, tendo a capacidade de resistir às tensões de corte em temperaturas altas de usinagem,

 iii) tenacidade à fratura, que representa a quantidade de energia necessária para romper o material e

iv) estabilidade química, a fim de evitar o desgaste por difusão.

Outros fatores externos também devem ser levados em consideração, como a dureza do material a ser usinado pela ferramenta, o processo de usinagem, a condição da máquina operatriz (potência, limites de rotação e conservação), a forma e a dimensão da ferramenta, o custo do material para confeccionar a ferramenta e as condições de usinagem (desbaste ou acabamento) [5]. Com isso, correlações entre características químicas, físicas e mecânicas das ferramentas de corte e suas performances em operações de usinagem é, portanto, uma questão fundamental a ser estudada. No geral, não existe uma classificação definida de materiais para ferramentas, no entanto, com base nas suas características químicas, eles podem ser agrupados como: aços rápidos, aços rápidos com revestimento, metal duro, metal duro com revestimento, cermet, cerâmica, CBN (*"cubic boron nitride"* – nitreto cúbico de boro) e diamante [5, 34]. Na Figura 2.3 estão demonstrados os tipos de materiais para ferramentas de corte, fazendo uma comparação entre suas características de resistência ao desgaste e tenacidade à fratura.

Figura 2.3: Gráfico de comparação entre as características dos diferentes materiais de ferramentas.



Fonte: adaptado de [35]

2.7.1. Ferramentas cerâmicas de corte

Entre os materiais de ferramentas citados no item 2.7, os materiais cerâmicos podem ser classificados da seguinte maneira [6]:

• cerâmica de nitreto de silício (Si₃N₄);

- cerâmica sialon (SiAlON);
- cerâmicas de compósitos alumina-zircônia (Al₂O₃ e ZrO₂);
- cerâmicas mistas de Al₂O₃/TiC;
- cerâmicas reforçadas de óxido de alumínio (Al₂O₃) e
- cerâmica de nitreto cúbico de boro (CBN).

2.7.1.1. Cerâmica de nitreto de silício

A cerâmica de nitreto de silício (Si_3N_4) é muito utilizada no setor industrial de usinagem de materiais como ferramenta de corte. O principal material utilizado para a usinagem com essa ferramenta cerâmica é o ferro fundido cinzento, em razão de possuir característica de dureza alta, necessitando o emprego de uma ferramenta de alto desempenho [36].

Outra vantagem dessa ferramenta a base de nitreto de silício é permitir a usinagem a seco, ou seja, sem fluidos de corte. Desta forma, podem contribuir com a economia do custo operacional, através do aumento da vida útil da ferramenta, e por não ter a necessidade de utilização de fluido de corte, o qual equivale a uma grande parcela do custo final da peça, além do impacto ambiental [36].

A cerâmica a base de nitreto de silício é obtida através de ligações químicas do tipo covalente, entretanto, devido ao seu baixo coeficiente de autodifusão, essa cerâmica é muito difícil de ser sinterizada pelo processo com a fase sólida. Com isso, torna-se necessário fazer a sinterização com a fase líquida, por intermédio da adição de pequenas quantidades de aditivos, tais como Si₃O₂, Al₂O₃, Y₂O₃, AlN, entre outros, os quais ativam os mecanismos de difusão, aumentando a densificação e consequentemente contribuem para a melhora das propriedades mecânicas [36].

2.7.1.2. SiAlONs

O SiAlON é um tipo de ferramenta cerâmica covalente, podendo ser obtida a partir do processo de sinterização de fase líquida. Neste processo ocorre a adição de Al₂O₃ e AlN ao Si₃N₄, cristalizando-se em duas estruturas diferentes, o β -SiAlON e o α - SiAlON, os quais dependem da composição dos aditivos utilizados. Para que o SiAlON seja densificado completamente, faz-se necessário a adição de um excesso de aditivos, pois à medida que ocorre a reação de formação da solução sólida SiAlON, os aditivos incluídos são gradativamente consumidos. Com isso, se não houver uma quantidade adequada de fase líquida no final do processo, não haverá a completa densificação da cerâmica. Este desvio da composição estequiométrica leva a um equilíbrio de duas fases na temperatura de sinterização, a fase sólida SiAlON e uma fase líquida, a qual contém, além do Si, Al, N e O, também as impurezas dos materiais de partida. Portanto, com o processo de resfriamento, a fase líquida presente se transforma em fase amorfa que se acomoda nos contornos de grãos do SiAION [37].

Com relação às características dessa ferramenta cerâmica, pode-se dizer que possui excelentes propriedades mecânicas, tais como a alta dureza à quente e a resistência ao choque térmico, no entanto, possui baixa estabilidade química. Por este motivo, é utilizada de preferência na usinagem do ferro fundido, onde as propriedades de dureza a quente, resistência ao choque térmico e a tenacidade à fratura são imprescindíveis [38]

2.7.1.3. Cerâmicas de compósito alumina-zircônia

Com o desenvolvimento das tecnologias de processamento das cerâmicas avançadas, permitiu-se a utilização de compósitos cerâmicos com propriedades otimizadas como materiais de ferramentas de corte. Ferramentas cerâmicas de corte com composição alta de Al₂O₃, são conhecidas como cerâmicas brancas, devido ao processamento de prensagem a frio utilizado em sua preparação. A alumina é amplamente empregada como ferramentas de corte quando reforçada com a adição de partículas como ZrO₂, com a finalidade de melhorar suas propriedades mecânicas. Deste modo, esta classe de ferramentas cerâmicas é recomendada na usinagem de materiais de dureza elevada, tal como o ferro fundido [6].

2.7.1.4. Cerâmicas mistas de Al₂O₃/Ti(C,N)

Com a adição de uma fase metálica de carbeto de titânio (TiC) ou nitreto de titânio (TiN) ao óxido de alumínio, tem-se a formação da denominada cerâmica mista. Esta adição da fase metálica tem como propósito melhorar as propriedades de resistência ao choque térmico da alumina, tornando-se menos sensível a fratura em situações de aumentos de temperaturas. Estas fases metálicas consistem em composições de 20 a 40% de TiC ou TiN na matriz da alumina [6].

Muitas tecnologias na preparação do compósito cerâmico de Al₂O₃/Ti(C,N) são baseadas no processo de sinterização sem pressão e sinterização por prensagem a quente. Quando a sinterização sem pressão é utilizada, este processo requer um tempo longo de espera, por volta de 1 a 2 horas, ou temperaturas altas de sinterização de aproximadamente 1750 a 1800 °C. Tal processo resulta no endurecimento das partículas e diminuição das propriedades mecânicas. Porém, devido a vantagem do processo de sinterização por prensagem a quente, as propriedades mecânicas e a densidade são melhoradas, pois, as partículas podem ser sinterização por prensagem a quente possui a desvantagem de produzir apenas simples formatos de cerâmicas, além do custo alto [39].

Como uma alternativa, processos de sinterização por micro-ondas tem conquistado as indústrias de processamento deste compósito, os quais podem desenvolver materiais de diversos formatos com maior uniformidade e densidade de sua estrutura. Este último processo de sinterização por micro-ondas resulta em materiais mais homogêneos e um aumento de suas propriedades mecânicas [39].

Compósitos de Al₂O₃/TiC tem sido amplamente utilizado como materiais de ferramentas de corte para condições de velocidades de corte altas. Sua aplicação consiste na usinagem de aços endurecidos, superligas ou ferro fundido. Outra característica deste compósito de cerâmica mista é a coloração escura apresentada, sendo atribuída aos processos de sinterização em temperaturas altas [6].

2.7.1.5. Cerâmicas reforçadas

As cerâmicas reforçadas de óxido de alumínio são materiais com desenvolvimento recente no mercado. São produzidas através da inclusão de reforços de fibras de monocristas do tipo whisker na matriz da alumina. Estes reforços do tipo whisker consistem em monocristais de tamanho de um mícron de diâmetro com comprimento de aproximadamente vinte mícrons. Os whiskers são compostos por carbeto de silício (SiC), sendo materiais muito resistentes. A composição pode variar em torno de 30% da cerâmica [6].

Estes reforços são introduzidos na matriz da alumina com a finalidade de causar efeitos de aumento de tenacidade à fratura, dureza, resistência ao desgaste e resistência ao choque térmico. A confecção destas cerâmicas é por meio de prensagem a quente, a qual distribui os monocristais de whiskers de forma homogênea, resultando no aspecto de coloração verde [6, 40].

Uma aplicação deste tipo de material é como ferramenta de corte na usinagem de ligas de titânio e ligas níquel resistentes ao calor, como o Inconel. Outra aplicação é em usinagens de superfícies interrompidas de aço endurecido no processo de torneamento. Possui boa tenacidade à fratura, permitindo suportar choques mecânicos típicos da usinagem deste tipo de superfície interrompida [5].

2.7.1.6. Ceramica de nitreto cúbico de boro

Com características próximas ao diamante, a cerâmica de nitreto de boro cúbico, também denominado como CBN, do inglês "*cubic boron nitride*", é um material sintético com dureza elevada. As propriedades mecânicas excelentes deste material incluem a resistência alta ao desgaste abrasivo e estabilidade química. Entretanto, em comparação com outros materiais cerâmicos utilizados como ferramentas de corte, o CBN se mostra com fragilidade maior devido sua dureza. Este material cerâmico também possui a capacidade de manter sua dureza em temperaturas altas, cerca de 2000 °C, fazendo do mesmo um material ideal como ferramenta de corte para usinagem de materiais muito duros e resistentes com velocidades de corte altas. [6, 41].

Ferramentas de CBN consistem de uma camada de revestimento de nitreto cúbico de boro policristalino, sendo firmemente ligada a superfície de um substrato de carboneto cementado. De acordo com as propriedades mecânicas descritas deste material, recomenda-se aplicá-lo em usinagens de classes de materiais de usinabilidade baixa. E, também é indicada para esta ferramenta a utilização em condições de usinagem de desbaste e acabamento, principalmente em ligas de aço endurecido, ferro fundido, entre outros [6, 41].

2.8. Recomendações para aplicação de ferramentas de corte cerâmicas

Em épocas passadas, a única forma de moldar os materiais com dureza elevada era através de processos de retificação ou por usinagens extremamente lentas. Hoje, com novos desenvolvimentos de materiais de ferramentas, entre eles os compósitos cerâmicos, permitiram que os materiais de dureza elevada pudessem ser moldados através da usinagem com velocidades de corte mais altas. Desta forma, os compósitos cerâmicos utilizados como ferramentas de corte são amplamente recomendados para a usinagem de materiais endurecidos, como por exemplo o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular, com valores de dureza entre 163 a 207 HB, as ligas resistentes ao calor e os aços endurecidos [6].

Estes materiais de dureza elevada possuem características que os tornam difíceis de usinar, especificamente como: i) a geração de temperatura alta na zona de corte, ii) as forças de corte de magnitudes altas e variáveis, iii) a ocorrência de desgastes da aresta de corte mais rapidamente e iv) as tensões liberadas pelo material da peça durante a usinagem. Assim sendo, a escolha do material da ferramenta de corte é influenciada diretamente por estas características descritas [6].

As ferramentas de corte cerâmicas atendem as necessidades requeridas para usinagem destes tipos de materiais. Por este motivo, muitos estudos têm sido conduzidos com a finalidade de investigar a performance das ferramentas de cerâmica na usinagem de diversos materiais de usinabilidade baixa [6]. Desta forma, diversos autores relataram o estudo destas ferramentas em processos de usinagem de torneamento, avaliando sua performance em relação aos parâmetros de corte, temperatura, desgaste e vida útil da ferramenta [8, 9, 34, 40, 42, 43, 44].

Portanto, nestes trabalhos comprovam que as ferramentas de corte cerâmicas podem ser aplicadas na usinagem de materiais de dureza elevada, obtendo um excelente desempenho.

Essas ferramentas podem usinar com velocidades de corte altas e produzir um melhor acabamento superficial, facilitando a efetiva utilização de máquinas de alta velocidade, reduzindo o tempo de usinagem. A produtividade é melhorada por ciclos curtos de tempo, reduzindo, portanto, o custo de produção [45].

2.9. Usinagem de materiais

Processos de usinagem envolvem operações de corte que permitem conferir à peça, a forma, dimensões, tolerâncias e acabamento necessário, através da remoção de excesso de material (cavaco) com o auxílio de uma ferramenta. O cavaco é definido como a porção de material da peça retirada pela ferramenta de corte, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular [6, 45].

A usinagem é uma das operações na indústria mecânica mais importantes na fabricação de produtos nas mais variadas formas, podendo atender diversas aplicações do mercado. Apesar de a usinagem ser um processo amplamente utilizado, não existe um modelamento abrangente para o grande número de variáveis envolvidas. Deste modo, o estudo da vida útil de ferramentas de corte exige a realização de testes que envolvem ensaios em diferentes parâmetros de usinagem, com a finalidade de avaliar o desempenho e os desgastes das mesmas, bem como o acabamento das peças produzidas [45].

2.10. Máquinas operatrizes para a usinagem com ferramentas de corte cerâmicas

Na época atual, um considerável avanço das máquinas operatrizes CNC (Comando Numérico de Controle) tem influenciado no aumento da produtividade de peças e nas suas precisões dimensionais, tornando-os importantes fatores nos processos de usinagem [47]. Tais máquinas oferecem rigidez e potência, permitindo operações com velocidades altas de corte sem comprometer a qualidade do processo. Estes equipamentos promovem as seguintes vantagens [46, 47]:

- i) versatilidade;
- ii) qualidade de acabamento;
- iii) precisão dimensional;
- iv) uniformidade das peças usinadas;
- v) produtividade;
- vi) usinagem de geometrias complexas;
- vii) redução de custos e
- viii) menos dependência de operadores de máquinas. Contudo, estas máquinas requerem programadores de comandos numéricos.

O comando numérico de controle é um sistema eletrônico computadorizado acoplado a máquina, permitindo o controle da mesma, sendo utilizado principalmente em tornos e centros de usinagem. O CNC comanda simultaneamente os vários eixos da máquina através de um programa escrito em código específico. Desta forma, permite a confecção de peças com geometrias complexas, de forma seriada, com precisão dimensional e com o tempo reduzido de usinagem, diminuindo, portanto, o retrabalho e o desperdício [9].

Estas máquinas operatrizes são as mais indicadas para o uso de ferramentas cerâmicas de corte. Estas máquinas evitam vibrações durante a usinagem, e consequentemente, a quebra precoce da ferramenta. Desta maneira, podem garantir maior tempo de vida útil da ferramenta, bem como o aumento da reprodutibilidade [9].

2.11. Torneamento

A operação de usinagem de torneamento, também chamado de corte semi ortogonal em pesquisas de laboratório, é uma das mais comuns utilizadas em trabalhos de corte de metais. Esta operação permite trabalhar peças cilíndricas movidas por um movimento uniforme de rotação em torno de um eixo fixo. O processo se baseia no posicionamento do material de trabalho pelas castanhas de uma placa e rotacionado em torno de seu próprio eixo. A ferramenta de corte é fixada rigidamente em um porta-ferramenta ou suporte e movimentada com uma taxa constante ao longo do eixo do material de trabalho, permitindo um corte contínuo e regular. Desta forma, a ferramenta de corte penetra no material de trabalho retirando camadas de metal (cavaco) para formar um cilindro ou uma superfície com perfil complexo. O cavaco retirado é cortado por uma ferramenta de um só gume cortante, que deve ter dureza superior à do material de trabalho. A força necessária para retirar o cavaco é realizada sobre o material de trabalho, enquanto a ferramenta de corte, firmemente presa ao porta-ferramenta, contrabalança a reação dessa força [48].

Para realizar a operação de torneamento são necessários três movimentos relativos entre o material de trabalho e a ferramenta de corte (Figura 2.4), os quais são:

1. movimento de corte: movimento principal que permite cortar o material, sendo rotativo e realizado pelo material de trabalho;

2. movimento de avanço: movimento que desloca a ferramenta de corte ao longo da superfície do material de trabalho;

3. movimento de penetração: movimento que determina a profundidade de corte ao pressionar a ferramenta de corte em direção ao interior da peça, podendo, portanto, regular a profundidade do passe e a espessura do cavaco.



Figura 2.4: Movimentos relativos entre a ferramenta de corte e a peça.

Fonte: adaptado de [49]

2.12. Parâmetros de usinagem

Os parâmetros de corte são fatores importantes na determinação do desempenho da ferramenta, no consumo de energia e qualidade do produto. Em função da escolha dos parâmetros de corte, podem afetar altamente os processos de usinagem em termos de desgaste da ferramenta, integridade superficial da peça, forças de corte, temperatura, estabilidade de corte, entre outros [26].

Tradicionalmente, os parâmetros de corte de processo são selecionados baseados na experiência do operador ou por referências aos bancos de dados ou manuais de operações de usinagem fornecidos pelos fabricantes de ferramentas de corte. Contudo, as informações fornecidas nessas fontes são na realidade valores iniciais, não sendo os ideais, e muitas das vezes são eficazes apenas quando destinados a um único produto. Com isso, torna-se necessário selecionar a combinação dos parâmetros de processo mais apropriados com o objetivo de melhorar a eficiência do corte, processo a baixo custo, alcançar alta produtividade e fabricar produtos de alta qualidade [26]. No processo de torneamento os parâmetros de corte mais importantes que devem ser estudados são: velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de corte (A_p).

A velocidade de corte (Vc), por definição, é a velocidade tangencial ou de rotação da peça, dada em metro por minuto (m/min). Em cada rotação da peça fixa no eixo do torno mecânico, o seu perímetro passa pela aresta cortante da ferramenta. Este parâmetro é muito importante no estabelecimento de uma boa usinabilidade do material da peça, influenciando na quebra do cavaco, no grau de rugosidade e vida útil da ferramenta. E também varia conforme o tipo de material da ferramenta e a operação de usinagem. A velocidade de corte pode ser definida como uma grandeza numérica diretamente proporcional ao diâmetro da peça e à rotação do eixo-árvore da máquina ferramenta, dada pela Equação 2.9 [48, 50].

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \tag{2.9}$$

Onde:

• Vc: Velocidade de corte (m/min)

- π = constante da circunferência (3,14159265358...);
- D = diâmetro da peça (mm)
- n = rotação por minuto (rpm).

O avanço (f) se define como a velocidade de deslocamento longitudinal ou transversal de uma ferramenta em cada volta de 360° de uma peça, dado em milímetro por rotação (mm/rot), ou por unidade de tempo, milímetro por minuto (mm/min). Deve-se levar em consideração na escolha do avanço o material da peça, a ferramenta e a operação de usinagem [50].

A profundidade de corte (A_p) se trata de uma grandeza numérica que define a penetração da ferramenta para a realização de retirada de certa quantidade de material em uma determinada operação de usinagem. Esse parâmetro é dado em unidade de comprimento, em milímetro (mm) [50].

2.13. Geometria das ferramentas de corte

Diversas são as geometrias utilizadas para a produção das pastilhas intercambiáveis, podendo variar em diversos formatos e tamanhos, assim como nos diferentes números de arestas. Para tal escolha da geometria, é relevante estudar os valores de profundidade e avanço necessários para realizar a usinagem do material de trabalho, a fim de determinar a geometria final da peça mais compatível [51].

De acordo com Coppini (2015), para se fazer a escolha da geometria da pastilha é necessário considerar alguns fatores importantes. Deve-se primeiramente conhecer os limites da máquina ferramenta de acordo com os valores das forças de usinagem e potência de corte que serão alcançados durante o processo de usinagem. Outro fator a ser observado é identificar quais são os tipos de operações de usinagem que serão realizadas (desbaste pesado, desbaste, desbaste leve, semiacabamento, acabamento, acabamento fino) de acordo com a geometria final do material de trabalho, a fim de a mesma ser reproduzida fielmente. E por fim, verificar o volume de peças a ser usinado, adequando-se, portanto, a geometria da pastilha à resistência ao desgaste das arestas de corte, evitando quebras e desgastes da ferramenta durante o processo de usinagem.

De acordo com a norma ISO 1832, podem ser observados nas Figuras 2.5 e 2.6 vários tipos de formatos das pastilhas intercambiáveis existentes no mercado, com o objetivo de atender às diversas geometrias dos materiais de trabalho através dos processos de usinagem.

Formato do Inserto			Ângulo de Folga		
Símbolo	Descrição	Ângulo	Figura	Simbolo	Folga
н	Hexagonal	120°	\bigcirc	Δ	
0	Octagonal	135°	\bigcirc		3° ++
Р	Pentagonal	108°	\bigcirc	в	5° +
S	Quadrado	90°		<u> </u>	
Т	Triangular	60°	\triangle	C	7° ++
С		80°		D	150
D		55°			15° ++
E	Bômbico	75°		E	200
F	Tiombioo	50°			20 44
M		86°		F	250
V		35°	-		25 44
L	Retangular	90°		G	30°
Α	Paralelo- grâmico	85°		N	
в		82°	0	N	0° ++
к		55°	-	Р	110
R	Redondo	-	\bigcirc		11 44
W	Trigon	80°	\triangle	0	Outros

Figura 2.5: Representação dos formatos e ângulos das pastilhas intercambiáveis para processo de torneamento

Fonte: [52]

Figura 2.6: Exemplo de pastilhas intercambiáveis com diferentes geometrias e números de arestas de corte



Fonte: [53]

Em geral, de acordo com Diniz [5], as ferramentas de corte apresentam as seguintes partes construtivas:

• cunha de corte: é a parte onde se encontram as arestas da ferramenta, bem como a intersecção das superfícies de saída e de folga da mesma.

 superfície de saída (Aγ): é a superfície da cunha de corte sobre a qual é formado o cavaco, sendo o mesmo escoado por essa saída durante a operação de corte do material de trabalho.

• superficie principal de folga (A α): é a superficie da cunha de corte da ferramenta que contém a sua aresta principal de corte.

• superfície secundária de folga (A'α): é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém a sua aresta secundária de corte.

• aresta principal de corte (S): é a aresta da cunha de corte da ferramenta formada pela intersecção das superfícies de saída e folga principal. Nessa aresta é onde ocorre a retirada ativa do cavaco.

• aresta secundária de corte (S'): é a aresta da cunha de corte da ferramenta formada pela intersecção das superfícies de saída e folga secundária.

 ponta de corte: é a parte da ferramenta onde ocorre a intersecção das arestas principal e secundária de corte. A ponta de corte também pode ser a concordância de duas arestas através de um raio de ponta, ou através de um chanfro.

Através de um desenho esquemático da pastilha utilizada neste trabalho, pode-se demonstrar na Figura 2.7 as partes da ferramenta de corte descritas acima.

36



Figura 2.7: Aresta de corte e superfícies de uma ferramenta para torneamento.

Fonte: do autor.

Outras partes construtivas que devem ser levadas em consideração são os ângulos da aresta de corte e os sistemas de referência, ilustrados nas Figuras 2.8 e 2.9. Os principais ângulos da aresta de corte e outras definições importantes estão descritos da seguinte forma [5, 41]:

- ponto de corte: intersecção das superfícies de saída (A_{y}) e de folga (A_{q}) , local onde ocorre o corte do material de trabalho.
- plano de referência da ferramenta (P_r): definido como o plano que, passando pelo ponto de corte, é perpendicular à direção admitida de corte.
- direção admitida de corte: escolhida de forma que o plano de referência da ferramenta (Pr) seja paralelo ou perpendicular a uma superfície da ferramenta.
- plano admitido de trabalho (P_f): definido como o plano que, passando pelo ponto de corte, é perpendicular ao plano de referência da ferramenta (Pr) e paralelo à direção admitida de avanço.
- direção admitida de avanço: escolhida de forma que o plano admitido de trabalho da ferramenta (P_f) seja paralelo ou perpendicular a uma uma superfície da ferramenta.

- plano de corte da ferramenta (P_s): definido como o plano que, passando pelo ponto de corte, é tangente à aresta principal de corte (S).
- plano de corte secundário da ferramenta (P's): definido como o plano que, passando pelo ponto de corte, é tangente à aresta secundária de corte (S').
- ângulo de saída da ferramenta (γ_f): é o ângulo formato pelo plano de referência da ferramenta (P_r) e a superfície de saída (A_γ).
- ângulo de folga da ferramenta (α_f): é o ângulo formado pelo plano de corte da ferramenta (P_s) e a superfície de folga (A_α).
- ângulo de cunha da ferramenta (β_f): é o ângulo formado pela superfície de saída (A_γ) e superfície de folga (A_α).
- ângulo de posição da ferramenta (χ_r): é o ângulo formado pelo plano de corte da ferramenta (P_s) e o plano admitido de trabalho da ferramenta (P_f), medido sobre o plano de referência da ferramenta (P_r).
- ângulo de posição da aresta secundária da ferramenta (χ'_r) : é o ângulo formado pelo plano de corte secundário da ferramenta (P'_s) e o plano admitido de trabalho da ferramenta (P_f) , medido sobre o plano de referência da ferramenta (P_r) .
- ângulo da ponta da ferramenta (ε_r): é o ângulo formado pelo plano de corte da ferramenta (P_s) e plano de corte secundário da ferramenta (P'_s), medido sobre o plano de referência da ferramenta (P_r).



Figura 2.8: Representação dos ângulos das ferramentas no plano de referência da ferramenta para processo de torneamento

Fonte: adaptada de [5]

Figura 2.9: Representação dos ângulos das ferramentas no plano admitido de trabalho da ferramenta para processo de torneamento



Fonte: adaptada de [5]

Nesse trabalho de mestrado foi escolhido a geometria de formato quadrado (tipo S, vinda da palavra quadrado em inglês "*square*") com ângulos retos de 90° (ângulo de ponta da ferramenta ε_r). O ângulo da superfície de folga (A_a) desta ferramenta é de 0°, também conhecido como ângulo de folga do tipo negativo (N). Este ângulo de folga do tipo negativo geralmente é aplicado para aumentar a resistência da aresta de corte e permitir que a mesma seja utilizada em condições de corte pesado para torneamento externo [54]. Desta maneira, tal escolha da geometria citada foi determinada devido as propriedades dos materiais que foram usinados, os quais oferecem maiores exigências nos esforços mecânicos nas arestas de corte da ferramenta. Essa geometria pode ser utilizada para os desbastes leve e pesado de várias ligas metálicas e também para o acabamento de ferros fundidos [9].

2.14. Processo de formação do cavaco

Durante o processo de usinagem, a aresta da ferramenta de corte é pressionada contra uma porção da peça, determinada pelo valor do avanço de corte (região t_1 , representada na Figura 2.10), a qual sofre deformação elástica com a penetração da ferramenta (região A). O material pressionado sofre deformação plástica que vai aumentando até atingir a tensão de cisalhamento necessária para que o cavaco deslize sobre a ferramenta. Esse deslizamento se dá em um plano, chamado plano de cisalhamento (região AB) [48].

O ângulo entre o plano de cisalhamento e a direção de corte (indicada pela seta "V") é chamado de ângulo de cisalhamento (região indicada por Φ). Quanto menor o ângulo de saída (região indicada por γ_0), maior a variação da direção de fluxo de cavaco, maior sua deformação e menor o ângulo de cisalhamento. Isto influencia no aumento da razão h_2 por h_1 demonstrada na Figura 2.10. Onde h_2 é a espessura do cavaco depois de formado, e h_1 é a espessura do cavaco antes de formado, ou seja, o valor da profundidade de corte [5, 48].



Figura 2.10: Processo de formação do cavaco

Com a continuidade da penetração da ferramenta que ocorre com um movimento relativo (dado pelo valor da velocidade de corte indicada pela seta "V"), o limite de resistência do material é ultrapassado e ocorre a ruptura parcial ou total do cavaco, na região de cisalhamento (região AB). Isto pode depender das condições de usinagem e ductilidade do material [48].

Com o movimento relativo de corte entre a peça e ferramenta, a porção de material deformado e cisalhado (cavaco) escorrega sobre a face da ferramenta (região AC). O processo se repete com o restante do material, iniciando-se um ciclo periódico. Desta forma, o processo de formação do cavaco envolve duas novas superfícies formadas, a superfície do material de trabalho (região AE) e a superfície do cavaco (região CD) [48].

Fonte: adaptado de [48]

Diversos fatores do processo de usinagem estão ligados à formação do cavaco, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na retirada de material, o meio lubrificante e refrigerante, entre outros. Desta maneira, a qualidade do acabamento da superfície da peça é bastante influenciada pelo tipo de cavaco formado, o qual pode apresentar aspectos distintos, dependendo dos parâmetros de corte utilizados, bem como a utilização da ferramenta adequada [5].

2.14.1. Classificação dos tipos e formas dos cavacos

De acordo com a característica de cada material a ser usinado, os cavacos podem ser classificados em tipos e formas diferentes. Os tipos mais comuns são: cavaco contínuo, cavaco de cisalhamento e cavaco de ruptura. E as formas mais comuns são: cavaco em fita, cavaco helicoidal, cavaco espiral e cavaco em lascas ou pedaços [5].

O cavaco contínuo é o mais desejável em relação ao acabamento superficial da peça, que promove uma maior durabilidade da ferramenta e uma menor energia consumida. Este tipo de cavaco desliza de forma suave e uniforme sobre a face da ferramenta (superfície de saída), tendo como sua constituição lamelas justapostas numa disposição contínua, porém as mesmas não são nítidas. Forma-se na usinagem de materiais dúcteis, onde o ângulo de saída da ferramenta deve obter valores altos [5, 48].

O cavaco cisalhado ocorre através de uma formação descontínua, pois a força de corte cresce de forma acentuada com a deformação do material até a seu rompimento e fragmentação. Desta forma, o cavaco se apresenta constituído de lamelas justapostas bem distintas, podendo ser diferenciado do cavaco contínuo pelos serrilhados nas bordas. Um ponto negativo é a qualidade superficial da peça que passa a ser inferior, podendo também serem formados através de materiais dúcteis [5, 48].

O cavaco de ruptura se apresenta constituído de fragmentos arrancados da peça usinada. São gerados por ruptura, não sendo capazes de suportar grandes deformações sem se romper. Normalmente este tipo de cavaco ocorre em materiais frágeis, tais como o ferro fundido e latões [5, 48].
Para melhor representar os tipos de cavacos, os mesmos são ilustrados na Figura 2.11.



Figura 2.11: Tipos de cavacos: a) contínuo, b) cisalhado ou lamelar e c) ruptura ou arrancado.

Fonte: adaptado de [55]

Além do tipo de cavaco, também é possível diferenciá-lo quanto à sua forma. A Figura 2.12 representa as diferentes geometrias que podem ser encontradas.

Figura 2.12: Formas de cavaco: a) em fita; b) helicoidal, c) espiral; d) em lascas.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FI	ТА			HÉLICE			ESPI	RAL	LASCAS
FITA	EMARA- NHADO	HÉLICE PLANA	HÉLICE OBLÍQUA	HÉLICE LONGA	HÉLICE CURTA	HÉLICE ESPIRAL	ESPIRAL	VİRGULA	ARRANCA DOS
	States	MM	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	Keenson.	N. S.	H OH	9 Q ()		
desfavorável		médio		favorável		mé		dio	

Fonte: adaptado de [55]

O cavaco em fita é um tipo de cavaco desfavorável nas operações de usinagem, por ser cortante e devido seu formato longo, podendo provocar acidentes. Este tipo de cavaco apresenta algumas desvantagens [56]:

- i) oferece risco ao operador, obstrui o local de trabalho devido ao seu longo comprimento;
- ii) pode danificar tanto a ferramenta quanto prejudicar o acabamento superficial da peça;
- iii) difícil manuseio e transporte;
- iv) causa aumento da força de corte e da temperatura prejudicando a vida da ferramenta [56].

O cavaco do tipo helicoidal, espiral e em lascas, sãos os mais convenientes entre os processos de usinagem, considerados usáveis. Estes tipos de cavacos ocupam pouco volume, não obstruem o local de trabalho, podendo ser removidos facilmente [48, 56].

2.15. Temperatura de usinagem

Durante o processo de usinagem ocorrem fenômenos de aumento de temperatura, os quais devem ser levados em consideração na escolha do material da ferramenta e das condições de corte. Este fato é proveniente do atrito formado pela interface ferramenta-peça-cavaco, tendo muita influência pelos valores dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e pela dureza dos materiais a serem usinados, podendo gerar temperaturas altas de corte. Os mecanismos de desgastes formados também podem promover este tipo de fenômeno, tais como a abrasão, adesão e difusão. Os pontos negativos do aumento de temperatura na zona de corte são a perda da precisão dimensional, prejuízo no acabamento superficial da peça e a diminuição da vida útil da ferramenta [57].

A energia térmica é um dos elementos principais que mais influenciam no valor dimensional da peça usinada, pois provocam a dilatação térmica do material da ferramenta e da peça. Esta desvantagem está relacionada com a mudança de geometria da ferramenta prejudicando o parâmetro de profundidade de corte, o que leva a dificuldade em atingir tolerâncias apertadas na geometria final da peça [58].

As principais fontes geradoras de calor no processo de usinagem são a deformação e o cisalhamento do cavaco, o atrito do cavaco com a ferramenta e o atrito da ferramenta com a peça. O calor gerado é distribuído de forma distinta pelos elementos compostos pela zona de corte (ferramenta, peça e cavaco), como demonstra a Figura 2.13, onde a maior parcela do calor é dissipada pelo cavaco. Geralmente, devido a ferramenta ser constituída de material refratário de baixa condutividade térmica, a dissipação do calor gerado possui uma parcela menor. Por fim, o calor dissipado pelo material da peça também tem relação a condutividade térmica do mesmo [5, 48].

Figura 2.13: Exemplo de distribuição de calor entre o sistema peça-ferramenta-cavaco.



Fonte: adaptado de [59]

2.16. Usinagem sem fluido de corte

Os processos de usinagem de alta produção geram altas temperaturas na zona de corte, os quais na maioria das vezes fazem o uso de fluidos de corte com o objetivo de refrigerar e remover o calor causado. A alta temperatura atingida pode provocar a falha prematura da ferramenta de corte, bem como prejudicar a integridade do produto, induzindo tensões residuais de tração através da dilatação térmica do material e microfissuras na superfície, além da rápida oxidação e corrosão superficial [60]. Entretanto, de acordo com Dhar (2006) os fluidos de corte utilizados em altas velocidades de corte perdem sua eficiência de remoção de calor, devido não conseguirem penetrar na interface ferramenta-cavaco. Outro problema enfrentado pelas indústrias é a manipulação inadequada dos fluidos de corte, danificando o solo e os recursos hídricos, causando sérios danos ao meio ambiente. Deste modo, o manuseio destes agentes químicos deve obedecer às regras rígidas de proteção ambiental. Outra desvantagem está relacionada aos operadores das máquinas, que podem ser afetados pelos maus efeitos dos fluidos de corte à saúde, tais como problemas de pele e respiratórios. Em relação ao custo, os fluidos de corte representam uma grande quantidade dos custos totais de usinagem.

Visando o meio ambiente e a redução de custos, a eliminação dos fluidos de corte na área de produção tem sido uma decisão bastante utilizada pelas empresas. Uma alternativa é a utilização de materiais de ferramentas com potenciais que dispensam o uso de fluidos de corte durante a usinagem, como por exemplo, as cerâmicas. Com os avanços recentes no desenvolvimento de materiais cerâmicos para ferramentas de corte, as mesmas podem ser utilizadas em processos de usinagem a seco sem prejudicar o acabamento superficial do material usinado [9].

2.17. Tipos de desgastes da ferramenta de corte

Com o uso da ferramenta de corte durante a usinagem, a ponta da ferramenta pode sofrer desgastes de diversos tipos. Em geral, os desgastes sofridos por ferramentas cerâmicas são do tipo abrasão, adesão e difusão [8].

No geral, os desgastes ocasionados nas ferramentas são atribuídos a fenômenos complexos, onde uma combinação de efeitos dos mecanismos de desgaste depende de alguns fatores. Tais fatores incluem:

- tipo do material da ferramenta, bem como a geometria da mesma;
- tipo do material que será usinado, levando em consideração sua dureza e usinabilidade;

 as condições de corte utilizadas, como a velocidade de corte, avanço e profundidade [8].

No geral, os desgastes em ferramentas de corte podem ser divididos em cinco categorias principais: adesivo, mecânico, térmico, químico e abrasivo, conforme demonstrado na Figura 2.14.



Figura 2.14: Zonas de desgastes na ferramenta de corte

Fonte: adaptado de [6]

1. Desgastes adesivos:

• Desgaste tipo entalhe

O desgaste do tipo entalhe pode ser definido como um dano excessivo formado na superfície de saída da ferramenta e em sua lateral na direção da profundidade de corte. É um desgaste do tipo adesivo causado por um mecanismo de oxidação. Ocorre uma solda do material da peça no material da ferramenta de corte através da pressão do cavaco, e em seguida a deformação da superfície desgastada. Isto ocorre devido ao desgaste ser localizado na extremidade da aresta da ferramenta, onde há presença de oxigênio na zona de corte. A superfície da aresta de corte é afetada, consequentemente influenciando no acabamento superficial da peça usinada. Na Figura 2.15 está exemplificado o desgaste do tipo entalhe [6].



Figura 2.15: Demonstração do desgaste do tipo entalhe por uma imagem da ferramenta deste trabalho.

Fonte: do autor e adaptado de [6]

• Formação de aresta postiça

Este tipo de avaria envolve o mecanismo onde os grãos da aresta de corte da ferramenta são arrancados pelo material da peça durante o atrito causado pela usinagem. Este problema pode ser mais severo quando as interfaces entre as diferentes fases da ferramenta cerâmica são mais fracas [8].

Desta forma, com o atrito, partículas do material da peça são aderidas de forma permanente na aresta de corte da ferramenta, formando a chamada aresta postiça de corte. Uma característica observada é a rugosidade da superfície desgastada da ferramenta, onde o desgaste por adesão produz superfícies ásperas. Na Figura 2.16 pode ser observada a aresta postiça de corte [8].

Figura 2.16: Demonstração da formação de aresta postiça através de uma imagem da ferramenta deste trabalho.



Fonte: do autor e adaptado de [6]

2. Desgaste mecânico:

• Desgaste por lascamento ou fratura

A fratura da aresta de corte é o resultado da ação de uma sobrecarga de tensões mecânicas, causando uma falha catastrófica. O surgimento de fraturas pode ser o resultado de várias razões, tais como: estresse do material da ferramenta, desgastes excessivos de outros tipos na ferramenta, parâmetros de corte insuficientes, aresta postiça de corte, vibrações da máquina, entre outros. Ferramentas de materiais frágeis são mais suscetíveis a este tipo de desgaste, originando fraturas repentinas, principalmente na usinagem de materiais de dureza alta [6]. Um exemplo de desgaste por fratura está demonstrado na Figura 2.17.





Fonte: adaptado de [8]

3. Desgastes térmicos:

• Desgaste por trincas térmicas

O surgimento de trincas na aresta de corte da ferramenta é ocasionado pelo choque térmico sofrido pela ferramenta, onde a temperatura muda repentinamente de quente para frio. Este desgaste ocorre em usinagens onde é feito o uso de fluidos refrigerantes, com a finalidade de diminuir a temperatura na zona de corte, principalmente em processos de fresamento [6]. Na Figura 2.18 é ilustrado o surgimento de trincas na aresta de corte.

Figura 2.18: Desenho esquemático do desgaste por trincas térmicas



Fonte: adaptado de [6]

• Desgaste por deformação plástica

Com o aumento de temperatura e da pressão na zona de corte, o material da ferramenta pode sofrer um amolecimento, dando início a um mecanismo de desgaste por deformação plástica. Este processo ocorre principalmente em usinagem de materiais de dureza elevada e com o uso de valores altos de velocidades de corte e avanço [6].

A superfície da aresta de corte apresenta uma deformação em seu formato, prejudicando a vida útil da ferramenta e o acabamento superficial da peça usinada. Para evitar este tipo de desgaste é necessário que o material da ferramenta tenha características de dureza elevada e que mantenha sua resistência mecânica em temperaturas altas de usinagem [6]. Na Figura 2.19 é ilustrado este tipo de desgaste.

Figura 2.19: Desenho esquemático do desgaste por deformação plástica.



Fonte: adaptado de [6]

• Desgaste por difusão

Este desgaste ocorre através de uma reação química entre o material da peça e a ferramenta de corte, sendo o processo ativado por altas temperaturas. Pode ser observado principalmente na interface ferramenta-cavaco na superfície de saída da ferramenta. Este desgaste é mais acentuado em usinagens com altas velocidades de corte, ou quando há altas temperaturas na interface ferramentacavaco, podendo ser acelerado através da afinidade química entre o material da peça e o material da ferramenta [8].

A razão que causa este tipo de problema é a solubilidade do material da peça no material da ferramenta. Deste modo, em velocidades de corte altas ocorre o aumento de temperatura na zona de corte, ocorrendo, portanto, a transferência de partículas entre o material da peça e da ferramenta. Em oposição ao desgaste do tipo adesivo, o desgaste por difusão resulta em superfícies menos rugosas na aresta de corte [8]. Na Figura 2.20 é demonstrado o desgaste por difusão.



Figura 2.20: Desenho esquemático do desgaste por difusão.

Fonte: adaptado de [6]

4. Desgaste químico:

• Desgaste por craterização

As crateras formadas na ferramenta de corte são causadas devido a uma reação química entre o material da ferramenta e o material da peça usinada. Esta reação química está relacionada ao aumento de temperatura e pressão na zona de corte. O desenvolvimento deste desgaste também pode ser provocado pelo atrito entre o cavaco sendo removido e a ferramenta de corte [6]. Deste modo, este desgaste é estabelecido pela remoção de material da superfície de saída da ferramenta, podendo ser notado pela Figura 2.21.

Figura 2.21: Desenho esquemático do desgaste por craterização



Fonte: adaptado de [6]

5. Desgaste abrasivo:

• Desgaste de flanco

Este tipo de desgaste ocorre geralmente na superfície de folga (flanco) e na superfície de saída da ferramenta. É caracterizado pela formação de ranhuras e cumes na direção em que a ferramenta desliza contra o material da peça, ou quando o cavaco desliza contra a superfície de folga da ferramenta. Na Figura 2.22 pode ser observada este tipo de desgaste [6].

Figura 2.22: Demonstração do desgaste do tipo flanco por uma imagem da ferramenta deste trabalho.



Fonte: do autor e adaptado de [6]

Em geral, os desgastes por abrasão ocorrem em materiais de ferramentas com características de tenacidade à fratura baixa e dureza alta, como os materiais cerâmicos. A resistência ao desgaste por abrasão do material cerâmico é diretamente proporcional ao produto da tenacidade à fratura pela dureza do material da ferramenta de corte. Tal parâmetro pode ser utilizado para prever a resistência da ferramenta no processo de usinagem, onde a abrasão é um mecanismo dominante [8].

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os materiais e equipamentos utilizados e a metodologia adotada durante a execução deste trabalho.

3.1. Ferramenta de corte cerâmica

As ferramentas de corte cerâmicas já existentes que foram utilizadas neste trabalho são compostos pela mistura de 81,5% (em peso) de Al_2O_3 e 18,5% (em peso) de 3Y-ZrO₂, desenvolvidas em um trabalho de dissertação pelo grupo TECAMB [9]. Estas ferramentas possuem o formato quadrado (ângulo reto) com dimensões de 12,76 x 12,76 x 4,76 mm, sendo representadas pelas Figuras 3.1 e 3.2. De acordo com o item 2.13, este formato e dimensões escolhidos foram definidos em função da resistência mecânica, das condições de uso e do tipo de porta ferramenta, podendo esta geometria ser utilizada para a usinagem de acabamento de diversas ligas metálicas.

Figura 3.1: Inserto de cerâmica alumina-zircônia desenvolvido no INPE



Fonte: do autor.



Figura 3.2: Geometria das pastilhas utilizadas nesse trabalho

Fonte: do autor.

3.2. Materiais utilizados nos testes de usinagem

Devido os testes de usinagem ser do tipo torneamento, os materiais precisam ter o formato cilíndrico para serem usinados. Os materiais utilizados neste trabalho, com exceção do ferro fundido cinzento GG20, foram doados pelo DCTA. Estes materiais não passaram por tratamento térmico, e foram utilizados neste trabalho como recebidos, e as dimensões iniciais eram:

- ferro fundido cinzento GG20: diâmetro de 50 mm e comprimento de 300 mm;
- aço 4340: diâmetro de 38,4 mm e comprimento de 390 mm;
- alumínio 6351: diâmetro de 50,9 mm e comprimento de 395 mm.

3.3. Equipamentos de usinagem

3.3.1. Porta ferramentas

Para os testes de usinagem, a ferramenta de cerâmica foi posicionada em um suporte de código DSBNL 2020 K 12 da marca Pramet, conforme demonstrado nas Figuras 3.3 e 3.4. O sentido da usinagem foi no sentido longitudinal da peça.



Figura 3.3: Suporte de torneamento de código DSBNL 2020 K 12 posicionado na máquina.

Fonte: do autor.

Figura 3.4: Suporte de torneamento com o inserto de cerâmica



Fonte: do autor.

Este suporte possui as seguintes especificações mostradas na Tabela 3.1, conforme o desenho da Figura 3.5, onde χ_r é o ângulo de posição da ferramenta, e γ_o é o ângulo de saída da ferramenta.

Tabela 3.1: Especificações do suporte DSBNL 2020 K 12

20 20 125 20 34,2 17 75 -6	a (mm)	b (mm)	L (mm)	h (mm)	e (mm)	s (mm)	$\chi_r(^\circ)$	γ ₀ (°)
	20	20	125	20	34,2	17	75	- 6





Fonte: adaptado de [61]

3.3.2. Máquina ferramenta

Os testes de usinagem foram realizados em duas máquinas ferramentas, com especificações e locais distintos. Para os testes iniciais de usinagem com baixas velocidades de corte (100, 150, 200 e 250 m/min) o equipamento disponível foi um torno mecânico CNC da marca Veker, modelo LVK-175, localizado no Laboratório de Fabricação Mecânica, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo/ Câmpus São José dos Campos (IFSP), conforme Figura 3.6.



Figura 3.6: Torno Mecânico CNC utilizado nos ensaios e alocado no IFSP

Fonte: do autor.

Para velocidades superiores de corte (300, 350, 400 e 450 m/min), os testes de usinagem foram desenvolvidos na oficina mecânica do prédio de Serviço de Manufatura da coordenação geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (SEMA/ETE/INPE), localizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O equipamento disponível foi torno mecânico CNC da marca ROMI, modelo Centur 30D (Figura 3.7).



Figura 3.7: Torno Mecânico CNC utilizado nos ensaios e alocado no SEMA/ETE

Fonte: do autor.

O torno mecânico CNC localizado no IFSP possui as seguintes especificações técnicas principais, de acordo com a Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Especificações do torno CNC localizado no IFSP.

Capacidade do eixo X relacionado ao diâmetro (mm)	250
Capacidade do eixo Z relacionado ao comprimento (mm)	760
Taxa de velocidade de rotação (rpm)	4 - 3000
Potência do motor (kW)	5,5 / 7
Sistema operacional Siemens	Sinumerik 802D

E as especificações técnicas do torno mecânico CNC localizado no SEMA/ETE são as seguintes informadas na Tabela 3.3.

Capacidade do eixo X relacionado ao diâmetro (mm)	220
Capacidade do eixo Z relacionado ao comprimento (mm)	1065
Taxa de velocidade de rotação (rpm)	4 - 4000
Potência do motor (kW)	21 / 15,7
Sistema operacional Siemens	Sinumerik 802D

Tabela 3.3: Especificações do torno CNC localizado no SEMA/ETE.

3.4. Metodologia

Neste item está apresentada a metodologia utilizada para a compactação e sinterização das barras de cerâmica destinadas aos ensaios de flexão, bem como a metodologia empregada nos testes de usinagem para as pastilhas de aluminazircônia e as técnicas de caracterização. Na Figura 3.8 é apresentado o fluxograma das etapas seguidas neste trabalho.



Figura 3.8: Fluxograma das etapas seguidas neste trabalho



3.4.1. Ensaio de flexão

Para este trabalho foram realizados ensaios de flexão em 34 corpos de prova cerâmicas, de mesma composição que os insertos utilizados nesta dissertação (mistura de 81,5% (em peso) de Al₂O₃ e 18,5% (em peso) de 3Y-ZrO₂). O ensaio de flexão é um teste essencial para a análise da tensão de ruptura

à flexão, e seus resultados exigem a aplicação de um método matemático específico, no caso, a estatística de fratura frágil por Weibull.

Para a realização dos ensaios foi necessário confeccionar corpos de prova de cerâmica, semelhante a pequenas barras ou paralelepípedos. O procedimento constou na prensagem uniaxial dos pós de cerâmica em uma prensa hidráulica calibrada para exercer sobre o pó uma pressão máxima de 40 MPa. Para modelar a geometria do corpo de prova, fez-se uso de uma matriz de aço inox com sistema de camisa flutuante, conferindo aos corpos de prova uma geometria como demonstrado na Figura 3.9. Após a prensagem uniaxial, os corpos de prova foram prensados isostaticamente em uma prensa isostática a 300 MPa. O conjunto de amostras prensadas foram sinterizadas simultaneamente para maximizar a homogeneidade da operação. Levados ao forno, eles são aquecidos a uma taxa de 10 °C por minuto até a temperatura de 1600 °C, na qual permanecem por 3 horas.

Figura 3.9: Representação da geometria do corpo de prova.



Fonte: do autor.

Onde:

- L: comprimento do corpo de prova;
- h: altura do corpo de prova e
- b: largura do corpo de prova.

Com os corpos de prova sinterizados, primeiramente foram medidas suas dimensões. A partir disso, realizaram-se os ensaios de flexão para cada um dos corpos de prova, obtendo, portanto, os valores da força máxima (N) suportada na ruptura. Consequentemente, obteve-se a tensão máxima σ_f (Mpa), podendo-se

calcular através das equações descritas no item 2.2.4 o módulo de Weibull e a tensão de fratura deste conjunto de amostras.

Para a realização dos ensaios de flexão dos corpos de prova de cerâmica, o equipamento utilizado foi uma Máquina de Ensaios Mecânicos Universal da marca Instron, modelo 4301, acoplada a um microcomputador. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos, situado no AMR/IAE/DCTA.

Conforme informado no item 2.2.3, os corpos de prova foram ensaiados através do posicionamento em 4 pontos de apoio para ser aplicada a carga de flexão, como ilustrado na Figura 3.10.



Figura 3.10: Posicionamento dos corpos de prova para os ensaios de flexão.

Fonte: do autor.

3.4.2. Testes de usinagem

Os parâmetros de corte, tais como velocidade de corte, profundidade de corte, e avanço, foram avaliados para cada material usinado. Para estes testes não foram utilizados fluidos de corte, a fim de estudar somente o comportamento da ferramenta de corte cerâmica. Na Figura 3.11 está representado o processo de usinagem longitudinal realizado neste trabalho com a ferramenta de corte cerâmica.

Figura 3.11: Operação de usinagem longitudinal com a ferramenta de cerâmica



Fonte: do autor.

Nos testes de usinagem foram utilizadas quatro ferramentas cerâmicas disponíveis. Para melhor organização, as arestas foram denominadas por letras, como demonstrado na Figura 3.12.



Figura 3.12: Denominações das arestas de corte.

Fonte: do autor.

Os parâmetros de corte de início de processo foram selecionados, considerando os dados existentes nas literaturas específicas [62, 63] e padronizados para todos os materiais usinados, sendo agrupados na Tabela 3.4. Deste modo, foi avaliado o desempenho da ferramenta de corte cerâmica para a usinagem de cada material, através dos parâmetros de corte escolhidos. Estes testes foram realizados no torno mecânico CNC da marca Veker, localizado no IFSP.

	Testes	Parâmetros de usinagem			
Material	I estes	V _c	f	Ap	
		(m/min)	(mm/rot)	(mm)	
Ferro fundido	Ferram. 1 – Aresta A	100			
	Ferram. 1 – Aresta B	150	0,05	0,2	
cinzento GG20	Ferram. 1 – Aresta C	200			
	Ferram. 1 – Aresta D	250			
	Ferram. 1 – Aresta E	100			
Aço 4340	Ferram. 1 – Aresta F	150		0,2	
	Ferram. 1 – Aresta G	200	0,05		
	Ferram. 1 – Aresta H	250			
	Ferram. 2 – Aresta A	100			
Alumínio 6351	Ferram. 2 – Aresta B	150	0,05	0,2	
	Ferram. 2 – Aresta C	200			
	Ferram. 2 – Aresta D	250			

Tabela 3.4: Parâmetros iniciais de corte que foram estudados para cada material (V_c : velocidade de corte, f: avanço, A_p : profundidade de corte).

Fonte: do autor.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3.4, foram utilizadas duas ferramentas de cerâmica para os testes de usinagem. A ferramenta 1, desenvolvida pelo grupo TECAMB [9], destinou-se aos testes de usinagem com o ferro fundido cinzento GG20 e o aço 4340. As arestas A, B, C e D foram utilizadas para cada velocidade de corte do ferro fundido cinzento GG20, e as arestas E, F, G e H para cada velocidade de corte do aço 4340, mantendo-se sempre constante os parâmetros de avanço e profundidade de corte. Para a ferramenta 2, também desenvolvida pelo grupo TECAMB, destinou-se aos testes de usinagem com o alumínio 6351, onde as arestas A, B, C e D foram utilizadas da mesma forma para cada velocidade de corte.

Com o intuito de avaliar as ferramentas em condições de usinagem mais exigentes, foram feitos testes com velocidades de corte mais altas, mantendo-se os mesmos valores constantes de avanço e profundidade de corte, de acordo com a Tabela 3.5. Com estes testes, foi possível determinar um limite superior do valor da velocidade de corte desta ferramenta cerâmica para cada material usinado. Estes testes foram feitos no torno mecânico CNC da marca ROMI, localizado no SEMA/ETE.

		Parâmetros de usinagem			
Material	Testes	V _c	f	A _p	
		(m/min)	(mm/rot)	(mm)	
	Ferram. 2 – Aresta A	300			
Alumínio 6351	Ferram. 2 – Aresta B	350	0,05	0,2	
	Ferram. 2 – Aresta C	400			
	Ferram. 2 – Aresta D	450			
	Ferram. 3 – Aresta A	300			
Aço 4340	Ferram. 3 – Aresta B	350			
	Ferram. 3 – Aresta C	400	0,05	0,2	
	Ferram. 3 – Aresta D	450			
Ferro fundido	Ferram. 4 – Aresta A	300			
	Ferram. 4 – Aresta B	350	0,05	0,2	
cinzento GG20	Ferram. 4 – Aresta C	400			
	Ferram. 4 – Aresta D	450			

Tabela 3.5: Parâmetros de corte que foram estudados para cada material (V_c: velocidade de corte, f: avanço, A_p: profundidade de corte).

Fonte: do autor.

Da mesma forma que os primeiros testes, a ferramenta 2 destinou-se a continuação dos testes de usinagem do alumínio 6351, onde as arestas E, F, G e H foram utilizadas para cada velocidade de corte, como descrita na Tabela 3.5. Na sequência, a ferramenta 3 foi utilizada para a continuação dos testes de usinagem do aço 4340, e a ferramenta 4 para o ferro fundido cinzento GG20.

3.5. Caracterização da ferramenta de corte cerâmica e do material usinado

A cada passe de usinagem, foram realizadas análises de verificação de desgaste da ferramenta, através da avaliação do cavaco gerado e de caracterizações morfológicas das arestas de corte. O material do compósito

cerâmico e os materiais usinados também foram caracterizados para determinar sua microestrutura.

3.5.1. Exame visual do cavaco

A cada teste de usinagem finalizado foram recolhidas amostras dos cavacos gerados, com o objetivo de analisar visualmente o tipo e o formato dos mesmos. Tal análise é importante para observar se os parâmetros de corte escolhidos foram adequados para determinado material usinado. Para isto, foram feitas imagens fotográficas com uma câmera DSLR (*Digital Single-Lens Reflex* – Câmera digital de reflexo por uma lente) da marca Nikon, modelo P510.

3.5.2. Caracterização da morfologia das arestas de corte

As análises da morfologia da ponta das ferramentas foram obtidas através de imagens geradas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), marca Tescan, modelo Mira 3, do Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS) do CTE/INPE. Através desta técnica de caracterização, pode-se obter as imagens ampliadas do tipo de desgaste ocorrido nas pontas das ferramentas, e determinar os melhores parâmetros de corte.

3.5.3. Caracterização da microestrutura do material de compósito cerâmica e dos materiais usinados

As análises das microestruturas do compósito cerâmico e dos materiais utilizados nos testes de usinagem foram obtidas através de imagens geradas em um Microscópio Eletrônico de Varredura, marca Tescan, modelo Mira 3, do Laboratório Associado de Sensores e Materiais do CTE/INPE. Para esta caracterização, os materiais foram embutidos, polidos e atacados quimicamente para a revelação dos grãos. Com isto, as microestruturas serviram para verificar a homogeneidade, a distribuição e o tamanho dos grãos dos materiais analisados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterizações

4.1.1. Materiais utilizados nos testes de usinagem

Neste item são apresentadas as caracterizações realizadas nos materiais utilizados nos testes de usinagem. Amostras do ferro fundido cinzento, do aço 4340 e do alumínio 6351 foram coletadas e analisadas, sendo possível determinar as composições químicas, as durezas e as microestruturas de cada material como recebido.

A partir de testes de caracterização por fluorescência de Raios X (FRX) foi possível obter os dados semiquantitativos de composição química para cada material usinado. Foi utilizado um espectrofotômetro de fluorescência de Raios X com tubo de ródio, de modelo Axios Advanced, marca Panalytical. Os dados estão disponíveis na Tabela 4.1.

Elemento	Ferro fundido cinzento GG20 (%)	Elemento	Aço 4340 (%)	Elemento	Alumínio 6351 (%)
Fe	94,03	Fe	96,32	Fe	0,39
Si	2,25	Si	0,27	Si	0,86
Mn	0,36	Mn	0,71	Mn	0,25
Al	0,25	Al	0,06	Al	97,84
S	0,078	S	0,01	S	0,04
Cr	0,06	Cr	0,87	Cu	0,21
Р	0,03	Р	0,02	Mg	0,41
Cu	0,01	Ni	1,17		
С	2,93	С	0,392		
		Мо	0,18		

Tabela 4.1: Composição química dos materiais utilizados nos testes de usinagem por FRX.

Fonte: do autor.

Também foram medidos os valores de dureza na escala Brinell de cada material através da impressão de um penetrador nas amostras. O equipamento utilizado foi um durômetro da marca Pantec, modelo DHB 3000. Os resultados são informados na Tabela 4.2.

Material	Dureza (HB)
Ferro fundido cinzento GG20	199
Aço 4340	437
Alumínio 6351	85,5
7 . 1 .	

Tabela 4.2: Valores de dureza na escala Brinell dos materiais utilizados nos testes de usinagem

Fonte: do autor.

Com a finalidade de estudar a microestrutura dos materiais utilizados nos testes de usinagem, realizaram-se caracterizações através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Observa-se na Figura 4.1 que a microestrutura do ferro fundido cinzento GG20 possui uma matriz predominantemente de perlita. O teor da fase de ferrita (fase mais clara) pode estar entre 5 e 20% em sua composição. Também foi verificado lamelas de grafita presentes na microestrutura do material (Figura 4.1 a). Os tipos de orientações das lamelas de grafita se referem ao processo de solidificação do ferro fundido em sua fundição. A fundição pode ser variada de forma que a nucleação e o crescimento das lamelas de grafita ocorram em um padrão que forneça uma melhora das propriedades mecânicas desejadas para o material. A quantidade, tamanho e distribuição das lamelas de grafita são fatores importantes, as quais são divididas em cinco tipos padrões, classificados pelas letras que vão de A até E, de acordo com a norma ASTM A48. Entretanto, mostra na Figura 4.2 somente a grafita do tipo D, característica deste material (Figura 4.1 b). A grafita do tipo D é encontrada em ferros fundidos hipoeutéticos ou eutéticos, tal como o ferro fundido cinzento GG20, os quais são solidificados em taxas de resfriamento bastante altas. Este tipo de grafita é formado por flocos pequenos interdentríticos orientados aleatoriamente, os quais favorecem a formação da fase ferrita em sua solidificação, reduzindo as características mecânicas do material [28].

Figura 4.1: Microscopias do ferro fundido cinzento GG20, a) aumento de 500x e b) aumento de 1000x.



Fonte: do autor.





Fonte: adaptado de [28]

Em aços sem tratamento térmico de baixo e médio teor de carbono, tal como o aço 4340, pode ser verificado a presença de muitas fases de colorações diferentes. Foram identificadas na Figura 4.3 a, que as fases claras correspondem às fases dúcteis de ferrita e austenita presentes no material, e as fases mais escuras representam os microconstituintes de perlita que possuem maior dureza, bem como os elementos de liga presentes no aço 4340. Na Figura 4.3 b ilustra mais claramente que este material é constituído por uma matriz de fase ferrita que envolve os microconstituintes de perlita [64].

Figura 4.3: Microscopias do aço 4340, a) aumento de 500x e b) aumento de 1000x.



Fonte: do autor.

No processo industrial de solubilização das ligas de alumínio da série 6XXX, ocorre a formação do composto intermetálico de siliceto de magnésio (Mg₂Si) através da combinação dos elementos magnésio e silício. Este composto é o responsável pelo endurecimento do material, e apresenta a forma de precipitados finos de fase beta distribuídos uniformemente na microestrutura da matriz de alumínio de fase alfa, conforme [65]. Este comportamento do alumínio 6351 pode ser observado na Figura 4.4, na qual apresentou o composto intermetálico Mg₂Si na microestrutura do alumínio [65, 66].





Fonte: do autor.

4.1.2. Compósito alumina-zircônia

A morfologia da microestrutura do compósito cerâmico de Al_2O_3 - ZrO_2 deste trabalho é mostrada na Figura 4.5 e 4.6. Observa-se que existe uma distribuição de tamanhos de grãos de zircônia não uniforme na microestrutura do compósito. Assim, a microestrutura obtida neste trabalho apresenta grãos de ZrO_2 resultantes da sinterização dos aglomerados, localizados nos contornos de grãos da matriz de Al_2O_3 . Estes aglomerados são procedentes do processo de mistura mecânica e a úmido dos pós iniciais de alumina e de zircônia. Este procedimento mostrou não ser adequado para desaglomerar os aglomerados de nanopartículas do pó de ZrO_2 . A porosidade observada nas Figuras 4.5 e 4.6 foi relacionada às falhas de empacotamento das partículas do pó principalmente de alumina (componente da matriz do compósito).

Um estudo sobre processos de mistura de pós de Al_2O_3 e ZrO_2 para obtenção de compósitos cerâmicos densos, realizado por Nono (2016), mostrou que o pó de zircônia é composto de aglomerados de nanopartículas e não são desaglomerados neste tipo de processo de mistura. Assim, a solução encontrada para minimizar homogeneizar a distribuição dos tamanhos de grãos da zircônia na matriz da alumina, foi realizar a mistura de suspensões pré defloculadas dos pós componentes. Este procedimento de mistura será adotado em trabalhos futuros.

Figura 4.5: Imagens de FEG-MEV do compósito cerâmico de Al₂O₃ - ZrO₂, obtido utilizando pós misturados mecanicamente em álcool etílico: a) elétrons secundários e b) elétrons retro-espalhados. Zircônia: grãos mais claros. Alumina: grãos mais escuros.



Fonte: do autor.

Figura 4.6: Imagens de FEG-MEV do compósito cerâmico de Al₂O₃ - ZrO₂, mostrando grãos aglomerados de zircônia obtidas por: a) elétrons secundários e b) elétrons retro-espalhados. Zircônia: grãos mais claros. Alumina: grãos mais escuros.



Fonte: do autor.

4.2. Determinação da tensão de fratura

Os valores de dureza Vickers e de tenacidade à fratura (K_{IC}) via penetração Vickers, obtidos em trabalho anterior por Inácio (2010), são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores de dureza Vickers e de tenacidade à fratura dos compósitos cerâmicos de Al₂O₃ - ZrO₂, sinterizados em 1600 °C.

	Sinterização em 1600 °C			
Composição (% em peso)	K _{IC}	Dureza Vickers		
	(MPa.m ^{1/2})	(GPa)		
81,5 Al ₂ O ₃ – 18,5 3Y-ZrO ₂	$6,21 \pm 0,24$	$16,22 \pm 0,10$		

Fonte: [9]

Com o objetivo de acrescentar informações sobres a ferramenta cerâmica de corte já desenvolvidas pelo grupo TECAMB [9], foram realizados outros ensaios mecânicos para determinar os valores da tensão de fratura e o respectivo valor do módulo de Weibull destes compósitos cerâmicos de alumina-zircônia. A partir dos ensaios de flexão em quatro pontos, utilizando 34 corpos de prova, os dados adquiridos da carga máxima suportada na ruptura foram analisados. Em seguida foram feitos os cálculos descritos no item 2.2.4, podendo ser obtido o gráfico de distribuição de Weibull e o corresponde valor do módulo, conforme mostrado Figura 4.7.



Figura 4.7: Representação gráfica de distribuição de Weibull do compósito aluminazircônia investigado.

Para este conjunto de corpos de prova, o módulo de Weibull apresentou um valor aproximado de 4,12, podendo-se concluir que este resultado está dentro do apresentado pela literatura, estando no limite aceitável para materiais cerâmicos, como abordado por Nono (2016). Também foi determinado o valor da tensão média de ruptura desse conjunto de corpos de prova, bem como seu desvio padrão, sendo apresentado na Tabela 4.4, estando também compatível aos valores encontrados na literatura.

Fonte: do autor.

	Sinterização em 1600 °C			
Composição (% em peso)	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Weibull		
81,5 Al ₂ O ₃ - 18,5 3Y-ZrO ₂	412 ± 86	4,12		

Tabela 4.4: Propriedades mecânicas do compósito alumina-zircônia

Fonte: do autor.

4.3. Estudo do comportamento da ferramenta nos testes de usinagem

Após cada passe de usinagem dado no material da peça, para cada uma das velocidades de corte estudadas, o desempenho da ferramenta de corte cerâmica e os tipos de desgastes ocorridos foram avaliados. Estes resultados foram estudados através das caracterizações de morfologia das arestas de corte, bem como análises do cavaco obtido a cada parâmetro de corte.

4.3.1. Discussões sobre os resultados

Um fenômeno que pode explicar a formação dos desgastes das pontas das ferramentas é a variação da rugosidade da peça com o aumento da velocidade de corte. Este fenômeno é a resposta que o conjunto ferramenta-peça-máquina fornece, em termos de vibração, ao acréscimo da velocidade de corte [5]. Esta vibração tem relação com alguns pontos importantes como: raio de ponta da ferramenta, ângulo de ponta da ferramenta, ângulo de saída, arredondamento da aresta de corte e profundidade de corte, conforme mostra a Figura 4.8 [6].



Figura 4.8: Fatores da ferramenta que influenciam a vibração

Fonte: adaptado de [64]

A escolha da geometria da ferramenta influencia diretamente em sua resistência mecânica e também em fenômenos vibracionais. De acordo com a Figura 4.9, pode-se notar que a geometria da ferramenta influencia na tendência de vibrações do conjunto ferramenta-peça, onde ângulos de ponta mais próximos de 90° requerem mais potência de usinagem, por terem formatos mais robustos. No caso de ângulos menores da ponta da ferramenta, o processo de usinagem terá uma maior estabilidade da mesma. Por outro lado, ângulos de ponta maiores oferecem maior resistência mecânica e confiabilidade [6]. Com isso, ferramentas cerâmicas de corte possuem geometrias mais robustas, a fim de resistirem maiores pressões de corte, devido à sua característica de fragilidade.



Figura 4.9: Ângulos de ponta de ferramenta de corte

Fonte: adaptado de [6, 67]

Outro ponto importante é o ângulo de folga e de saída da ferramenta, demonstrado na Figura 4.10. Estes ângulos estão relacionados à geometria positiva ou negativa da ferramenta. Isto é, ferramentas positivas possuem ângulos de saída positivos, e são caracterizadas pelo ângulo de aresta o qual é inferior à 90°. Estas geometrias positivas geram forças tangenciais de corte mais baixas e, consequentemente, menos vibração da ferramenta. Neste trabalho, foi utilizada uma geometria negativa, onde o ângulo da aresta era de 90°. Esta geometria pode contribuir com a formação de desgastes por abrasão, pois existe uma área maior de contato da ponta da ferramenta com a peça, gerando forças de atritos dando origem às vibrações [5, 6].



Figura 4.10: Demonstração das geometrias de ferramenta: a) positiva e b) negativa.

Fonte: adaptado de [54]

Deste modo, torna-se importante adequar o material e a geometria da ferramenta cerâmica com o material da peça a ser usinado, evitando maiores desgastes e diminuição da vida útil da ferramenta [6]. No caso de materiais frágeis como os ferros fundidos, geometrias negativas são recomendadas, pois influenciam pouco em função das forças de corte e propiciam resistência maior aos choques da cunha da ferramenta.

De acordo com a Figura 4.8, o aumento dos valores de raio de ponta e ângulo de ponta, bem como o formato da macrogeometria da ferramenta (ângulo de folga e ângulo de saída), influenciam de forma considerável tanto na
rugosidade da peça manufaturada quanto no aumento da vibração durante a usinagem. A Equação 4.1 auxilia nessa interpretação [5, 68].

$$R_{max \ teor} = \left(\frac{f^2}{8r_{\varepsilon}}\right) \tag{4.1}$$

Onde:

- Rmax teor: rugosidade máxima teórica da peça (μm);
- f: avanço da ferramenta (mm/rot);
- rɛ: raio de ponta da ferramenta (mm).

Esta equação permite verificar que quanto maior o raio de ponta da ferramenta maior será o valor da rugosidade teórica da peça manufaturada, aumentando a abrasividade da peça em relação à ferramenta. Esta abrasividade pode favorecer as condições de vibração do conjunto ferramenta-peça e elevar os esforços durante o corte, resultando em desgastes elevados [68].

Se houver excitação de uma força externa que coincidam com as frequências naturais de vibração da ferramenta, esta também possibilitará a quebra, devido ao fenômeno de ressonância [6]. Uma possível solução para as consequências advindas das vibrações, dentre outras alternativas, é a utilização de profundidades de corte menores, o que proporciona menor área de contato ferramenta-peça. Normalmente ferramentas de cerâmica são preferíveis em desbastes leves e de acabamento, que usam parâmetros de usinagem menos agressivos por serem frágeis aos choques mecânicos [5].

De acordo com Diniz (2008), em valores de velocidade de corte onde não há a formação de desgastes adesivos na ponta da ferramenta, os valores de pressão de corte tendem a diminuir com o aumento da velocidade de corte. Como consequência, as forças também tendem a minimizar em razão da diminuição da pressão de corte em decorrência do crescimento da velocidade. Isto acontece devido à diminuição da deformação e da dureza do cavaco e dos coeficientes de atrito que o aumento da velocidade de corte pode proporcionar.

Esta última afirmação pode ser justificada por Santos (2015), o qual fez uma abordagem sobre as vibrações que são provocadas devido à variação na espessura do cavaco durante as operações de usinagem. Com a retirada de material através do movimento de rotação (relacionado a velocidade de corte), uma superfície ondulada é formada na peça, a qual é removida em uma rotação posterior, deixando uma outra superfície ondulada. Estas ondulações da superfície estão relacionadas aos valores de rugosidade da peça resultantes de vibrações durante a usinagem. A diferença de fase entre as duas ondulações das superfícies formadas de forma consecutiva, causa o aumento da espessura máxima do cavaco e por consequência o aumento das forças de corte, enquanto houver vibrações no conjunto peça-ferramenta.

Desta forma, pode-se dizer que velocidades de corte mais baixas causam maiores vibrações no sistema ferramenta-peça, devido a maior deformação do cavaco gerado. E também provocam o aumento da rugosidade superficial do acabamento da peça. Podendo-se dizer que as ferramentas cerâmicas são mais propícias a trabalharem em velocidades de corte mais altas, resultando em menores desgastes da aresta de corte e melhores acabamentos superficiais da peça usinada.

A vida útil da ferramenta também é dependente do grau de arredondamento de sua ponta, podendo ser outro fator a dar origem às vibrações do conjunto ferramenta-peça-máquina. Valores de arredondamento são cuidadosamente determinados através de gráficos que relacionam vários tamanhos de raio para diferentes aplicações. Alguns materiais de peças também influenciam no grau de arredondamento, os quais exigem arestas de corte afiadas com arredondamento mínimo. Uma aresta excessivamente arredondada em operações de acabamento pode representar aproximadamente como uma aresta desgastada, como demonstra a Figura 4.8, e pode ocasionar o desenvolvimento de desgastes subsequentes e forças de corte [6, 67]. A partir disso, a formação do desgaste da aresta de corte ao longo da usinagem da peça, pode estar similarmente relacionado com este arredondamento excessivo e consequentemente com a geração de vibração. Deste modo, deve-se evitar o desgaste excessivo da ferramenta, pois altera a geometria da mesma acarretando em problemas de vibração.

80

4.3.2. Morfologia da ferramenta após a usinagem

4.3.2.1. Ferro fundido cinzento GG20

Nas Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 estão demonstradas as imagens da morfologia das arestas de corte após os testes de usinagem com o ferro fundido cinzento GG20, para cada velocidade de corte.

Figura 4.11: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 1, lados AB, usinagem do ferro fundido cinzento GG20, A) $V_c = 100$ m/min e B) $V_c = 150$ m/min.



Lado A - Topo

Lado A

Lado B - Topo





Figura 4.12: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 1, lados CD, usinagem do ferro fundido cinzento GG20, C) $V_c = 200$ m/min e D) $V_c = 250$ m/min.



Lado C - Topo

Lado C

Lado D - Topo





Figura 4.13: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 4, lados AB, usinagem do ferro fundido cinzento GG20, A) $V_c = 300$ m/min e B) $V_c = 350$ m/min.



Lado A - Topo

Lado A

Lado B - Topo





Figura 4.14: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 4, lados CD, usinagem do ferro fundido cinzento GG20, C) $V_c = 400$ m/min e D) $V_c = 450$ m/min.



Lado C - Topo

Lado C

Lado D - Topo





Nas imagens apresentadas foi possível verificar que em velocidades de corte baixas de 100 m/min e 150 m/min o desgaste da aresta de corte foi maior em relação aos outros testes com velocidades de corte maiores. Causou principalmente o desgaste abrasivo, formando flancos nas arestas de corte, muito comum na usinagem de ferros fundidos. Este desgaste ocorre devido o ferro fundido ter em sua composição de matriz perlítica o estado de grafite combinado na forma de cementita, que agem como partículas abrasivas, ocasionando um corte do tipo interrompido e consequentemente prejudicando a aresta da ferramenta. Por outro lado, as lamelas de grafita agem como lubrificante, diminuindo o atrito e facilitando o desempenho da ferramenta. Outro ponto que foi analisado é que com o aumento da velocidade de corte, o desgaste na aresta de corte foi diminuindo. Isto caracteriza que em velocidades de corte maiores a ferramenta apresentou melhor resultado, sendo característica de ferramentas cerâmicas de corte.

4.3.2.2. Aço 4340

Nas Figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 estão demonstradas as imagens da morfologia das arestas de corte após os testes de usinagem com o aço 4340, para cada velocidade de corte utilizada.

Figura 4.15: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 1, lado EF, usinagem do aço 4340, E) $V_c = 100$ m/min e F) $V_c = 150$ m/min.



Lado E - Topo



Lado F - Topo





Figura 4.16: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 1, lados GH, usinagem do aço 4340, G) $V_{\rm c}$ = 200 m/min e H) $V_{\rm c}$ = 250 m/min.



Lado G - Topo

Lado G

Lado H - Topo





Figura 4.17: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 3, lados AB, usinagem do aço 4340, A) $V_c = 300$ m/min e B) $V_c = 350$ m/min.



Lado A - Topo



Lado B - Topo





Figura 4.18: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 3, lados CD, usinagem do aço 4340, C) $V_{\rm c}$ = 400 m/min e D) $V_{\rm c}$ = 450 m/min.



Lado C - Topo

Lado C

Lado D - Topo





As imagens apresentadas indicam que houve muitos desgastes do tipo abrasivo e adesivo. Nas velocidades de corte de 100 m/min, 300 m/min e 350 m/min foram observados os desgastes mais acentuados do tipo adesivo, onde parte do material da peça é soldado na aresta de corte da ferramenta e arrancado consequentemente, formando uma deformação do tipo entalhe. Já nas velocidades de corte de 150, 200, 250, 400 e 450 m/min foram verificados desgastes abrasivos do tipo flanco.

Os desgastes adesivos podem ter sido causados pelo aumento da temperatura na zona de corte exigindo muito desempenho da ferramenta. Portanto, pode-se dizer que a faixa de utilização desta ferramenta pode estar nas velocidades de corte acima de 350 m/min, entre 400 a 450 m/min, as quais apresentaram menores desgastes nas arestas de corte.

4.3.2.3. Alumínio 6351

Nas Figuras 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22 estão demonstradas as imagens da morfologia das arestas de corte após os testes de usinagem com o alumínio 6351, para cada velocidade de corte.

Figura 4.19: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 2, lados AB, usinagem do alumínio 6351, A) $V_c = 100$ m/min e B) $V_c = 150$ m/min.



Lado A - Topo



Lado B - Topo





Figura 4.20: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 2, lados CD, usinagem do alumínio 6351, C) $V_c = 200$ m/min e D) $V_c = 250$ m/min.



Lado C - Topo

Lado C

Lado D - Topo





Figura 4.21: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 2, lados EF, usinagem do alumínio 6351, E) $V_c = 300$ m/min e F) $V_c = 350$ m/min.



Lado E - Topo



Lado F - Topo





Figura 4.22: Imagens obtidas por MEV da ferramenta 2, lados GH, usinagem do alumínio 6351, G) $V_c = 400$ m/min e H) $V_c = 450$ m/min.



Lado G - Topo

Lado G

Lado H - Topo





Ao analisar as imagens apresentadas é possível dizer que a usinagem do alumínio 6351 evidenciou a formação de arestas postiças de corte na maioria das arestas da ferramenta, com exceção da velocidade de corte de 100 m/min. Este tipo de avaria é bastante comum em usinagem de alumínios, pois são materiais com características de ductilidade alta, isto é, quanto mais dúctil o material, mais tende a formar a aresta postiça de corte, pois os cavacos ficam mais longos e sofrem mais atrito com a superfície de saída da ferramenta, como abordado por Diniz (2008).

Diante dos parâmetros de corte adotados, verificou-se que este tipo de desgaste adesivo pode influenciar no acabamento superficial da peça, apresentando pontos de empastamento, ou seja, deformidades causadas pela adesão de material na superfície usinada. Deste modo, desgastes deste tipo podem ser evitados com mudança da geometria da ferramenta de corte, onde ferramentas com arestas afiadas (sem raio de ponta) e com ângulos bastante positivos são os mais indicados para usinagem de alumínios.

4.3.3. Análise do cavaco

4.3.3.1. Ferro fundido cinzento GG20

Nas Figuras 4.23 e 4.24 estão representadas as fotografias dos cavacos recolhidos de ferro fundido cinzento GG20, para cada velocidade de corte a cada passe de usinagem.

Figura 4.23: Cavacos recolhidos após a usinagem do ferro fundido cinzento GG20, i) Vc = 100 m/min, ii) Vc = 150 m/min, iii) Vc = 200 m/min e iv) Vc = 250 m/min.



i) $V_c = 100 \text{ m/min}$

ii) $V_c = 150 \text{ m/min}$

iii) $V_c = 200 \text{ m/min}$

iv) $V_c = 250 \text{ m/min}$



Figura 4.24: Cavacos recolhidos após a usinagem do ferro fundido cinzento GG20, a) Vc = Vc = 300 m/min, b) Vc = 350 m/min, c) Vc = 400 m/min e d) Vc = 450 m/min



i) $V_c = 300 \text{ m/min}$ ii) $V_c = 350 \text{ m/min}$

iii) $V_c = 400 \text{ m/min}$ iv) $V_c = 450 \text{ m/min}$



De acordo com a definição dada no item 2.1.6, determinou-se que em todas as velocidades de corte na usinagem do ferro fundido cinzento GG20 foram obtidos cavacos do tipo de ruptura, sendo característica deste material, não apresentando diferença entre as velocidades de corte. Para a usinagem do ferro fundido cinzento GG20, os cavacos apresentaram a coloração amarelada,

retratando que o calor gerado na zona de corte foi baixo, impedindo maiores oxidações do cavaco removido.

4.3.3.2. Aço 4340

Nas Figuras 4.25 e 4.26 estão representadas as fotografias dos cavacos recolhidos após a usinagem do aço 4340, para cada velocidade de corte a cada passe da ferramenta.

Figura 4.25: Cavacos recolhidos após a usinagem do aço 4340, i) Vc = 100 m/min, ii) Vc = 150 m/min, iii) Vc = 200 m/min e iv) Vc = 250 m/min.



ii) $V_c = 150 \text{ m/min}$

iii) $V_c = 200 \text{ m/min}$

iv) $V_c = 250 \text{ m/min}$



Figura 4.26: Cavacos recolhidos após a usinagem do aço 4340, i) Vc = 300 m/min, ii) Vc = 350 m/min, iii) Vc = 400 m/min e iv) Vc = 450 m/min.



i) $V_c = 300 \text{ m/min}$ ii) $V_c = 350 \text{ m/min}$

iii) $V_c = 400 \text{ m/min}$ iv) $V_c = 450 \text{ m/min}$



Para o aço 4340, observou-se que o tipo de cavaco obtido foi o contínuo, porém a forma foi alterada com o aumento da velocidade de corte. Para as velocidades iniciais de 100 m/min e 150 m/min, o formato dos cavacos são de fitas, mudando seu formato consequentemente para helicoidal nas velocidades de 200 m/min e 250 m/min. Este último formato é o mais indicado para os processos

de usinagem, pois contribui para um melhor acabamento da peça e menor desgaste da ferramenta.

Para velocidades de corte maiores que 300 m/min, houve também o surgimento de cavacos do formado fita, podendo ser justificado pela troca do equipamento. Porém para as velocidades de 400 e 450 m/min houve uma diminuição da deformação do cavaco em relação às velocidades baixas. Em todos os testes com o aço 4340, os cavacos apresentaram a cor azulada, demonstrando o aumento da temperatura de corte na zona de contato cavaco-ferramenta.

4.3.3.3. Alumínio 6351

Nas Figuras 4.27 e 4.28 estão ilustradas as fotografias dos cavacos recolhidos após a usinagem do alumínio 6351, para cada velocidade de corte a cada passe da ferramenta.

Figura 4.27: Cavacos recolhidos após a usinagem do alumínio 6351, i) Vc = 100 m/min, ii) Vc = 150 m/min, iii) Vc = 200 m/min e iv) Vc = 250 m/min.



i) $V_c = 100 \text{ m/min}$ ii) $V_c = 150 \text{ m/min}$

iii) $V_c = 200 \text{ m/min}$

iv) $V_c = 250 \text{ m/min}$



Figura 4.28: Cavacos recolhidos após a usinagem do alumínio 6351, i) Vc = 300 m/min, ii) Vc = 350 m/min, iii) Vc = 400 m/min e iv) Vc = 450 m/min.



i) $V_c = 300 \text{ m/min}$

ii) $V_c = 350 \text{ m/min}$

iii) $V_c = 400 \text{ m/min}$





Para o alumínio 6351, constatou-se que foram obtidos cavacos do tipo contínuo com formato de fitas para todas as velocidades de corte. As fitas de cavacos formadas eram longas e de difícil quebra, causando desvantagens durante a usinagem, tais como descritas no item 2.14.1. Algumas desvantagens observadas foram: i) a obstrução da região de torneamento da máquina operatriz, devido ao acúmulo de cavaco, ii) risco de ferimento ao operador da máquina, iii) acabamento superficial ruim da peça, e consequentemente iv) danificação da ferramenta através da formação da aresta postiça de corte, como descrita nos items anteriores.

5 CONCLUSÕES

A análise da microestrutura do compósito cerâmico de alumina-zircônia indicou uma distribuição não uniforme de grãos de zircônia na matriz de alumina. Os grãos de ZrO2, localizados nos contornos de grãos apresentaram-se em grande parte como como resultantes dos aglomerados das partículas do pó inicial. Este resultado indicou que o processo de mistura mecânica a úmido dos pós de alumina e zircônia, não foi adequado para desaglomerar os aglomerados de nanopartículas de zircônia.

Houve resultados distintos no desgaste das ferramentas durante a usinagem das ligas metálicas em função das variações das velocidades.

As ferramentas cerâmicas de corte de alumina-zircônia apresentaram os melhores resultados para a usinagem do ferro fundido cinzento GG20, em relação ao aço 4340 e o alumínio 6351, para os parâmetros de corte adotados neste trabalho em condições de usinagem de acabamento.

Os valores maiores de velocidade de corte de 400 e 450 m/min resultaram em desgastes menores nas arestas de corte da ferramenta, nos testes de usinagem do ferro fundido cinzento GG20 e do aço 4340. Os desgastes observados nas velocidades de corte mais baixas foram do tipo abrasivo e adesivo, os quais podem ser relacionados a geração de flancos e entalhes nas arestas de corte, respectivamente. Este comportamento está relacionado principalmente com o aumento de vibração do conjunto ferramenta-peça-máquina em velocidades de corte menores, o que proporciona uma variação da rugosidade da peça e uma maior deformação do cavaco gerado. Assim, os resultados indicaram que a ferramenta cerâmica de corte de alumina-zircônia utilizada possui maior desempenho em usinagens com velocidades de corte acima de 400 m/min, resultando consequentemente em menores desgastes da aresta de corte e melhores acabamentos superficiais da peça usinada.

Nos testes de usinagem do alumínio 6351 ocorreu a formação de aresta postiça de corte para todos os valores de velocidades adotados, com exceção da velocidade de 100 m/min. Este tipo de formação (depósito do material usinado na ferramenta) é muito comum nos processos de fabricação de alumínios, onde

outros fatores também podem causar influência, tais como a geometria da ferramenta de corte e a ductilidade alta deste material. Outro ponto levado em consideração foram os cavacos obtidos, os quais apresentaram características de cavaco do tipo contínuo com formato de fitas. Estes cavacos também influenciaram nestes depósitos, devido ao longo comprimento e por sofrerem maior atrito com a superfície de saída da ferramenta.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar misturas de pós previamente defloculados, já desenvolvidas no TECAMB, para otimizar as homogeneidade da microestrutura quanto à distribuição e tamanhos de grãos da zircônia na matriz da alumina e minimizar a porosidade;
- 2) Testes comparativos de ferramentas desenvolvidas com ferramentas comerciais no torneamento do ferro fundido cinzento GG20;
- Usinagem com variações em outros parâmetros de corte como avanço e profundidade de corte;
- Usinagens com velocidades de corte superiores àquelas testadas neste trabalho;
- 5) Desenvolvimento de ferramentas com geometrias diferentes;
- Desenvolvimento de ferramentas do compósito cerâmico de aluminazircônia com composições químicas diferentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]ANAZAWA, R. M.; ABDALLA, A. J.; HASHIMOTO, T. M.; PEREIRA, M. S. Caracterização microestrutural e mecânica dos aços 4340 e 300m após tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE TEMAS DE TRATAMENTO TÉRMICO (TTT 2012), 6., 2012, Atibaia, SP. Anais... Atibaia, 2012.
- [2]PETERS, M.; LEYENS, C. Aerospace and space materials. Materials Science and Engineering, v. 3, p. 1-11, 2009.
- [3]ISIK, Y. Investigating the machinability of tool steels in turning operations.Materials & Design, v. 28, n. 5, p. 1417-1424, 2007.
- [4]FERREIRA, J.R. Características da usinagem de um compósito de resina fenólica reforçada com fibras de vidro e carbono. 1992. 156f. Dissertação (mestrado) - Universidade estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000051436>. Acesso em: 14 mar. 2017.
- [5]DINIZ, A. E.; COPPINI, N. L., MARCONDES. F. C. Tecnologia da usinagem dos materiais. 6. ed.. São Paulo: Editora MM, 2008. 262p.
- [6]COROMANT, S. (FIRM). Modern metal cutting: a practical handbook. Sandvik Coromant, 1994.
- [7]INÁCIO, M. A.; DE SOUZA, J. V. C.; NONO, M. C. A; MINEIRO, S. L. Estudo do desgaste de ferramenta cerâmica de Al2O3-3Y/ZrO2 usinando ferro fundido cinzento. In: WORKSHOP EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS, 4. (WETE)., 2013, São José dos Campos.
 Anais... São José dos Campos: INPE, 2013. On-line. IBI: > http://wrlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3F4BHM5>.

- [8]KUMAR, A. S.; DURAI, A. R.; SORNAKUMAR, T. Machinability of hardened steel using alumina based ceramic cutting tools. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 21, n. 3, p. 109-117, 2003.
- [9] INÁCIO, M. A. Desenvolvimento de compósitos cerâmicos de Al₂O₃ e ZrO₂ para confecção de ferramentas de corte para torneamento. 2010.
 97 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.18.18.05-TDI). Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtcm19@80/2010/05.18.18.05/doc/publicacao.pdf. Acesso em: 20 fevereiro de 2017.
- [10]BARSOUM, M.; BARSOUM, M. W. Fundamentals of ceramics. CRC press, 2002.
- [11]RAHAMAN, M.; RAHAMAN, M. N. Ceramic processing and sintering. CRC press, 2006.
- [12]TÄFFNER, U.; CARLE, V.; SCHÄFER, U.; HOFFMANN, M. J. Preparation and microstructural analysis of high-performance ceramics. In: Metallography and Microstructures. ASM International, 2004. p. 1057-1066.

[13]DOWLING, N. E. Mechanical behavior of materials. Pearson, 2012.

- [14]ZANOTTO, E. D.; MIGLIORE, A. R. Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: uma introdução. Cerâmica, v. 37, n. 247, p. 7-16, 1991.
- [15]NONO. D. A. Análise comparativa dos processos de obtenção das cerâmicas da alumina α, da zircônia-3YTZP e do compósito alumina α + 18,5 % zircônia-3YTZP para aplicação em satélites como blindagem para impactos com detritos espaciais. 2016. 219 p. IBI:
 <8JMKD3MGP3W34P/3LGLEQH>. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/04.15.17.04-TDI). Dissertação (Mestrado em Ciência e

Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016. Disponível em: http://mtcm21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtcm21b/2016/04.15.17.04/doc/publicacao.pdf?metadatarepository=&mirror= iconet.com.br/banon/2007/01.10.09.37. Acesso em: 04 abril de 2017.

- [16]ASHBY, M.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. Materials engineering, science, processing and design. 3. ed. Londres, Inglaterra: Editora ButterworthHeinemann, 2007. 512p.
- [17]MINEIRO, S. L. Processamento e caracterização física e mecânica de cerâmicas de zircônia-ítria total e parcialmente nanoestruturadas.
 2007. 198p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais Área de Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e Inovação INPE. São José dos Campos. Brasil.
 2007. Disponível em: http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.07.12.32>. Acesso em: 17 de abril de 2017.
- [18]PIORINO, F. N. Sobre as variáveis que afetam a avaliação do módulo de ruptura em ensaios de flexão. 1990. 125p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, São Carlos, 1990.
- [19]BEREZOWSKI, L. R.; MOURA NETO, C; MELO, FCLD. Avaliação da resistência mecânica de cerâmicas à base de carbeto de silício. São José dos Campos: Instituto de Aeronáutica–Divisão de Engenharia Mecânica– Aeronáutica, 2002.
- [20]SHACKELFORD, J. F.; DOREMUS, R. H. Ceramic and glass materials. Structure, properties and processing. Springer, 2008.
- [21]HARPER, C. Handbook of ceramics glasses, and diamonds. McGraw Hill Professional, 2001.
- [22]ZHANG, Y.; ZHANG, J. First principles study of structural and thermodynamic properties of zirconia. Materials Today: Proceedings, v. 1, n. 1, p. 44-54, 2014.

- [23]RITTIDECH, A., SOMRIT, R., TUNKASIRI, T. Effect of Y₂O₃ on structural and mechanical properties of Al₂O₃-ZrO₂ ceramics. Ceramics International, v. 39, p. S433-S436, 2013.
- [24]EZUGWU, E. O., FADARE, D. A., BONNEY, J., DA SILVA, R. B., SALES, W. F. Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 45, n. 12, p. 1375-1385, 2005.
- [25]YADAV, R. K.; ABHISHEK, K.; MAHAPATRA, S. S. A simulation approach for estimating flank wear and material removal rate in turning of Inconel 718. Simulation Modelling Practice and Theory, v. 52, p. 1-14, 2015.
- [26]BOUACHA, K., YALLESE, M. A., KHAMEL, S., & BELHADI, S. Analysis and optimization of hard turning operation using cubic boron nitride tool. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 45, p. 160-178, 2014.

[27]CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. São Paulo: ABM, 1979.

- [28]DAVIS, J. R.; MILLS, K. M.; LAMPMAN, S. R. Metals handbook. vol.1. Properties and selection: Irons, steels, and high-performance alloys.Park, Ohio: ASM International, Materials, 1990. 1063, 1990.
- [29]TUPY. FUCO: Perfis de Fundição Contínua. Manual Técnico [2010].
 Disponível em: <
 <u>http://www.tupy.com.br/downloads/pdfs/granalhas/fuco_pt.pdf</u> > Acesso em: 20 de Novembro de 2016.
- [30]ANAZAWA, R. M.; ABDALLA, A. J.; HASHIMOTO, T. M.; PEREIRA, M. S. Estudo comparativo das propriedades mecânicas em aços 4340 e
 300M submetidos a tratamentos térmicos isotérmicos e intercríticos.
 Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 31, n. 1-2, p. 32-37, 2014.

- [31]CARDOSO, A. S. M. Caracterização mecânica e miscroestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma. 2011. Dissertação (Mestrado em Materiais Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2011. doi: 10.11606/D.97.2011.tde-26092012-143407. Acesso em: 22 de novembro de 2011.
- [32]GONÇALVES, R. A.; SILVA, M. B. Influence of copper content on 6351 aluminum alloy machinability. Procedia Manufacturing, v. 1, p. 683-695, 2015.
- [33]HARDESTY, F. Metals handbook. Volume 2, properties and selection: nonferrous alloys and pure metals: prepared under the direction of the ASM Handbook committee. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1979. ISBN 0-87170-008-5, xii+ 855 p.
- [34]COSTA, C. E.; JUNIOR, M. V.; DE AZEVEDO, V. G. Em busca da otimização da usinagem com cerâmica tendo por ferramenta a emissão acústica. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - ENEGEP, XIX, 1999, Rio de Janeiro-RJ. Anais... Rio de Janeiro: ABEPRO, 1999. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1999_A0670.PDF>
- [35]Analista de ferramentas. Treinamento básico 1 [2015]. Disponível em: < http://www.analistadeferramentas.com.br/o-quefazemos/treinamentos/basico-a1 >. Acesso em: 02 Abril de 2017.
- [36]SOUZA, J. V. C. Vantagens das ferramentas de corte de Si₃N₄ no torneamento do ferro fundido cinzento. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 49°, 2005, São Pedro – SP. Anais... São Pedro: ABCERAM, 2005. Disponível em: https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbc/2005/artigos/49cbc-12-05.pdf>.
- [37]RUIZ, I. R. Obtenção e caracterização de beta-SiAlON utilizando concentrado de terras raras como aditivo de sinterização. 2000. 134p. Tese (Doutorado em Ciências - Área de Tecnologia Nuclear) – Autarquia

Associada à Universidade de São Paulo – IPEN, São Paulo. Brasil, 2000. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Izabel%20Ramos%20Rui z_D.pdf>. Acesso em: 17 de abril de 2017.

- [38]SILVA, J. S. R. Comparação do desempenho de ferramentas de cerâmica no faceamento de ferro fundido nodular no estado endurecido. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Área de concentração de Materiais e Processos de Fabricação) – Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2012. doi: http://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/jose_sebastiao.pdf. Acesso em: 10 de novembro de 2011.
- [39]CHENG, Y.; SUN, S.; HU, H. Preparation of Al 2 O 3/TiC microcomposite ceramic tool materials by microwave sintering and their microstructure and properties. Ceramics International, v. 40, n. 10, p. 16761-16766, 2014.
- [40]KUMAR, A. S.; DURAI, A. R.; SORNAKUMAR, T. The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel. Journal of Materials Processing Technology, v. 173, n. 2, p. 151-156, 2006.
- [41]OBERG, E. Machinery's handbook. 27. ed. Inc. Industrial Press, 2004.
- [42]MANDAL, N.; DOLOI, B.; MONDAL, B. Development of flank wear prediction model of Zirconia Toughened Alumina (ZTA) cutting tool using response surface methodology. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 29, n. 2, p. 273-280, 2011.
- [43]SMUK, B.; SZUTKOWSKA, M.; WALTER, J. Alumina ceramics with partially stabilized zirconia for cutting tools. Journal of Materials Processing Technology, v. 133, n. 1, p. 195-198, 2003.
- [44]ARUNACHALAM, R. M.; MANNAN, M. A.; SPOWAGE, A. C. Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel
718 with CBN and ceramic cutting tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture,** v. 44, n. 9, p. 879-887, 2004.

- [45]SANTOS JUNIOR, T. A. Avaliação da usinagem do INCONEL 718. 2011. 1 CD-ROM. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado -Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/120964> Acesso em: 15 de outubro de 2011.
- [46]PARK, Y.; KIM, T. Y.; WOO, J.; SHIN, D.; KIM, J. Sliding mode cutting force regulator for turning processes. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 38, n. 8, p. 911-930, 1998.
- [47]MARKO, H., SIMON, K., TOMAZ, I., MATEJ, P., JOZE, B., & MIRAN, B. . Turning parameters optimization using particle swarm optimization. Procedia Engineering, v. 69, p. 670-677, 2014.
- [48]TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. Metal cutting. Butterworth-Heinemann, 2000. 464p.
- [49]Usinagem Brasil. O que é torneamento? [2009]. Disponível em <
 http://www.usinagem-brasil.com.br/44-o-que-e-torneamento-/pa-1/>.
 Acesso em: 5 de Fevereiro de 2016.
- [50]MITSUBISHI MATERIALS. Efeitos das condições de corte para torneamento. 2011. Disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical _information/information/turning_effects.html> Acesso em: 5 de Fevereiro de 2016.

[51]COPPINI, N. L. Usinagem enxuta - gestão do processo. Artliber, 2015.

[52]COROMANT, S. Ferramentas para torneamento. Torneamento geral. 2012. Disponível em: <u>http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/glo</u> <u>bal/catalogues/pt-pt/turning/TURN_B.pdf</u>. Acesso em: 04/08/17. [53]COROMANT, S. Corokey 2010. 2010.

[54]COROMANT, S. Torneamento geral: positiva e negativa [2014]. Disponível em: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general_turning/how-to-achieve-good-component-quality/insert-information/positive-and-negative">http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general_turning/how-to-achieve-good-component-quality/insert-information/positive-and-negative Acesso em: 14 de fevereiro de 2017.

[55]STOETERAU, R. L. Fundamentos dos processos de usinagem. São Paulo: USP, [2003]. Disponível em: < http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS1.pdf > Acesso em 23 de janeiro de 2017.

[56]CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. Cavaco? Entenda o que é e quais são suas formas [2007]. Disponível em: http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/2520-cavacoentenda-o-que-e-e-quais-sao-suas-formas Acesso em 18 de janeiro de 2017.

- [57]CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S. K. Evaluation of chip-tool interface temperature: effect of tool coating and cutting parameters during turning hardened AISI 4340 steel. Procedia Materials Science, v. 6, p. 996-1005, 2014.
- [58]ZHOU, J. M.; ANDERSSON, M.; STÅHL, J-E. Identification of cutting errors in precision hard turning process. Journal of Materials Processing Technology, v. 153, p. 746-750, 2004.
- [59]Centro de Informação Metal Mecânica. Geração de Calor e Distribuição de Temperaturas [entre 2000 e 2017]. Disponível em: <</p>
 <u>http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3652-geracao-de-calor-</u> <u>e-distribuicao-de-temperaturas#.WP872dLyvIU</u> > Acesso em: 28 de Abril de 2017.
- [60]DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M.; AHMED, Mahiuddin. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness

in turning AISI-4340 steel. Journal of Materials Processing Technology, v. 172, n. 2, p. 299-304, 2006.

- [61]TOOLSMACH. External turning toolholder: DSBNL-2020-K12. Disponível em: http://toolsmach.com/external-turning-toolholders/1030-external-turning-toolholder-dsbnl-2020-k12.html Acesso em: 11 de outubro de 2017.
- [62]SALES, G. T.; FERREIRA, J. R. Torneamento do aço ASTM 300m endurecido com ferramentas cerâmica e PCBN de geometria
 "WIPER". 2004. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecãinca)
 – Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Itajubá, 2004.
- [63]SANTOS, J. C. Estudo do uso de ferramentas cerâmicas na usinagem de inconel 718. 2010. 65 f. Dissertação (mestrado em engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010. Disponível em: http://hdl.handle.net/11449/94416>.
- [64] FREITAS, B. M.; SOUZA, P. P., NETO, J. C. D. M., TORRES, A. R. Comparativo da microestrutura e da microdureza no aço 4340 a diferentes tempos de recozimento. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA–CONTECC,73., 2016, Foz do Iguaçu. Anais... Confea/Crea, 2016.
- [65]INFOMET . Ligas Al-Mg-Si. [2003]. Disponível em: < www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudoler.php?codAssunto=54> Acesso em: 10 de julho de 2017.
- [66]LIMA, D. R. S.; YURGEL, C. C.; SCHAEFFER, L. Caracterização da evolução da microdureza vickers no processo de forjamento de alumínio.
 In: SEMINÁRIO BAIANO DE TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO -SBTF, 1., 2010, Salvador. Anais... Slavador: FIEB/SENAI, 2010.
- [67]COROMANT, SANDVIK. Fatores que influenciam a vibração. [2013]. Disponível em: < <u>http://www.sandvik.coromant.com/pt-</u> <u>pt/knowledge/technologies/silent-</u>

tools/turning/factors_that_influence_vibration > Acesso em: 05 de Maio de 2017.

[68]SANTOS, R. G. Desenvolvimento de um método para minimizar vibrações em operações de torneamento variando dinamicamente a área de corte. 2015. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em < http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-24092015-091753/pt-br.php >. Acesso em: 10 de Maio de 2017.