

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

RAFAEL DE PAULA SILVA

**Desenvolvimento e caracterização de uma ferramenta
cerâmica experimental a base de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ no torneamento do ferro fundido
cinzento**

Lorena

2021

RAFAEL DE PAULA SILVA

**Desenvolvimento e caracterização de uma ferramenta
cerâmica experimental a base de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ no torneamento do ferro fundido
cinzento**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de
São Paulo como requisito parcial para conclusão
da Graduação do Curso de Engenharia de
Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Vitor Candido Souza

Lorena

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Rafael de Paula
DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UMA
FERRAMENTA CERÂMICA EXPERIMENTAL A BASE DE AL₂O₃ +
CR₂O₃ NO TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO /
Rafael de Paula Silva; orientador José Vitor Candido
Souza. - Lorena, 2021.
52 p.

Monografia apresentada como requisito parcial
para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia
de Materiais - Escola de Engenharia de Lorena da
Universidade de São Paulo. 2021

1. Usinagem. 2. Novas ferramentas de corte. 3.
Ferro fundido cinzento. I. Título. II. Souza, José
Vitor Candido, orient.

Este trabalho é dedicado à minha família e amigos.

AGRADECIMENTO

Primeiramente gostaria de agradecer toda minha família, pois sem o apoio e incentivo deles eu não seria o ser humano que sou hoje. Essa conquista é em grande parte mérito deles.

Meus pais, Oliverio Moreira de Macedo Silva e Izabel de Paula Silva, sem o amor, apoio, exemplo de determinação e puxões de orelha eu não estaria onde estou hoje e conquistado o que conquistei.

Minha namorada Flávia Dias Fernandes, pela paciência, incentivo constante e amor. Me mostrando todo dia através da sua determinação o significado da profissão pesquisador.

Ao meu orientador, mentor e grande amigo José Vitor Candido Souza, que desde do início da minha graduação me incentivou e inspirou pelo exemplo de como ser um bom profissional e acima de tudo uma boa pessoa.

Também a todo o corpo docente da EEL, em especial os professores do DEMAR, que contribuíram na minha formação técnica e pessoal.

E por fim, meus amigos que tornaram todos esses anos muito especiais e mais fáceis, dividindo experiências, apoiando uns aos outros e se tornando minha segunda família.

SILVA, R. P. Desenvolvimento e caracterização de uma ferramenta cerâmica experimental a base de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ no torneamento do ferro fundido cinzento. 50 f. 2021. Monografia (Curso de Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo, 2021.

RESUMO

As ferramentas cerâmicas apresentam propriedades vantajosas nos processos de usinagem devido a sua alta dureza em temperaturas elevadas, baixa condutividade térmica, rigidez, alto módulo de elasticidade, resistência ao desgaste e resistência à corrosão e inércia química. Buscando avanços científicos, este projeto teve como objetivo o desenvolvimento, caracterização, retífica, lapidação e aplicação de uma ferramenta a base de alumina (Al_2O_3) com 99,00 % e dopada com 1,00 % de óxido cromo (Cr_2O_3) no torneamento do ferro fundido cinzento. A moagem e homogeneização das cerâmicas foram realizadas em meio líquido por 24 horas utilizando álcool etílico. Posteriormente, a mistura de pós foi secada em uma estufa a 100 °C por 24 horas, e em seguida calcinada na temperatura de 600 °C por 2 horas, sendo subsequente peneirada em malhas de 325 mesh. A compactação uniaxial do pó para a confecção dos insertos cerâmicos se deu em uma matriz quadrada com dimensões de 16,36 mm x 16,36 mm x 7,5 mm. A sinterização das cerâmicas foi realizada na temperatura de 1600 °C, com taxa de aquecimento 15 °C/minutos e patamar 2 horas. Após a sinterização as cerâmicas foram caracterizadas quanto a densidade relativa de $98,14 \pm 0,13$ %, retração linear de $19,80 \pm 0,15$ %, dureza Vickers e tenacidade à fratura de $20,94 \pm 0,08$ % GPa e $3,25 \pm 0,22$ % respectivamente. Analisando os resultados obtidos de propriedades e comparando com informações da literatura, foi possível verificar que a ferramentas de estudo deste trabalho pode ser utilizada na usinagem do ferro fundido cinzento. Utilizando velocidades de corte de 300, 400 e 500 m/min, avanço de 0,1, 0,20 e 0,30 mm/rot e profundidade de corte fixa de 1,0 mm, os resultados demonstraram que a ferramentas de corte desenvolvida apresentar grande potencial na usinagem do ferro fundido cinzento. Vale destacar que em maiores velocidades de corte e menor avanço o desgaste de flanco e força de corte diminuem e também é possível observar um melhor acabamento da peça usinada. Estes resultados são justificados devido à alta temperatura de usinagem que promove uma melhor proteção da aresta de corte através da presença de grafite do material da peça.

Palavras-chave: Usinagem; Novas ferramentas de corte; Ferro fundido cinzento.

SILVA, R. P. Development and characterization of an experimental ceramic tool based on $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ in gray cast iron turning. 2021. Number of sheets 50. Monograph (Undergraduate Work in Materials Engineering) - Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo, 2021.

ABSTRACT

Ceramic tools have advantageous properties in machining processes due to their high hardness at high temperatures, low thermal conductivity, rigidity, high modulus of elasticity, wear resistance and resistance to corrosion and chemical inertness. Seeking scientific advances this project aimed at the development, characterization, grinding, lapping and application of a tool based on alumina (Al_2O_3) with 99.00 % and doped with 1.00 % chromium oxide (Cr_2O_3) in turning the gray cast iron. The grinding and homogenization of ceramics were carried out in liquid for 24 hours using ethyl alcohol. Subsequently, the powder mixture was dried in an oven at 100 °C for 24 hours, and then calcined at a temperature of 600 °C for 2 hours, being subsequently sieved in 325 mesh meshes. The uniaxial compaction of the powder for the manufacture of ceramic inserts took place in a square matrix with dimensions of 16.36 mm x 16.36 mm x 7.5 mm. The sintering of the ceramics was carried out at a temperature of 1600 °C, with a heating rate of 15 °C/minutes and a level of 2 hours. After sintering, the ceramics were characterized by relative density of 98.14 ± 0.13 %, linear shrinkage of 19.80 ± 0.15 %, Vickers hardness and fracture toughness of 20.94 ± 0.08 % GPa and 3.25 ± 0.22 % respectively. Analyzing the results obtained from properties and comparing them with information from the literature it was possible to verify that the studied tool of this research can be used in the machining of gray cast iron. Using cutting speeds of 300, 400 and 500 m/min, feed of 0.1, 0.20 and 0.30 mm/rev and fixed depth of cut of 1.00 mm, the results showed that the developed cutting tools have great potential in the machining of gray cast iron. It is worth noting that at higher cutting speeds and lower feed, flank wear and cutting force decrease and it is also possible to observe a better finish of the machined part. These results are justified due to the high machining temperature that promotes better protection of the cutting edge through the presence of graphite in the workpiece material.

Keywords: Machining; New Cutting Tools; Gray Cast Iron.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de fases $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$	20
Figura 2 - Fluxograma das atividades.....	29
Figura 3 - Desenho esquemático da endentação Vickers.	33
Fonte: Adaptado	33
Figura 4 - Microestrutura do ferro fundido cinzento após superfícies polidas e atacada com 3 % de nital.	35
Figura 5 - Centro de torneamento modelo ROMI GL240M situado no DMT, FEG-UNESP.	36
Figura 6 - Rugosímetro portátil modelo MAHR MARSURF M300 + Rd18.....	37
Figura 7a e 7b - Microscópio Mar Vision MM 200 e Zeiss modelo Stemi 2000.....	38
Figura 8 - Microestrutura da ferramenta de corte.....	39
Figura 9 - Detalhe da Aresta da ferramenta de corte no estereoscópio.	40
Figura 10 - Relação do desgaste do flanco (VB) versus comprimento de corte (L_c).....	41
Figura 11 - Desgaste de flanco para velocidade de corte de $V_c=500$ m/min variando o avanço f	42
Figura 12 - Desgaste de flanco para velocidade de corte de $V_c=400$ m/min variando o avanço f	42
Figura 13 - Desgaste de flanco para velocidade de corte de $V_c=300$ m/min variando o avanço f	43
Figura 14 – a) Rugosidades R_a (μm) e b) Rugosidades R_z (μm) em relação ao comprimento de corte L_{ct} (mm).	44
Figura 15 - Temperatura de usinagem ($^{\circ}\text{C}$) versus comprimento de corte L_c (m).	45
Figura 16 - Forças de Corte (N) em função do comprimento de corte (m).	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de usinagem utilizados no trabalho.....	35
Tabela 2 – Valores obtidos das propriedades da ferramenta de corte.	38

LISTA DE SIGLAS

AMR/DCTA	Divisão de materiais Instituto de aeronáutica e espaço
<i>ap</i>	Profundidade de corte
CAD/CAM	Computer-aided design/ Computer-aided manufacturing
CNC	Controle Numérico Computadorizado
Fc	Forças de corte
FEG- Unesp	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
HB	Dureza Rockell B
HRC	Dureza Rockell C
HSC	High Speed Cutting
HV	Microdureza Vickers
Ltc	Distância de corte
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
Ra	Rugosidade média
Rz	Rugosidade média
Tc	Temperatura de corte
Vb	Desgaste do flanco

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	12
2- OBJETIVOS.....	13
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 - Ferros fundidos	14
3.1.1 - Ferro fundido cinzento.....	14
3.1.2 Usinabilidade do ferro fundido cinzento.....	15
3.2 - Definição de materiais cerâmicos	16
3.2.1 - Cerâmicas à base de alumina.....	19
3.2.2 – Ferramenta de corte Al_2O_3 dopada com Cr_2O_3	19
3.2.3 - Mercado dos materiais cerâmicos	20
3.3 Ferramentas de corte Cerâmico.....	21
3.3.1 Classificação básica de ferramentas de cerâmica	21
3.3.2 Considerações para aplicações de ferramentas cerâmicas	22
3.4 Usinagem.....	25
3.4.1 Máquinas operatrizes para usinagem com ferramentas cerâmicas	25
3.4.2 Vida da ferramenta de corte no processo de usinagem	26
3.4.3 Desgaste do flanco	27
4- MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1 Produção das Cerâmicas	27
4.1.1 Matéria Prima.....	29
4.1.2 Preparação dos pós-cerâmicos	30
4.1.3 Prensagem das amostras cerâmicas	30
4.1.4 Prensagem uniaxial a frio	30
4.1.5 Prensagem isostática a frio	31
4.1.6 Processo de sinterização	31
4.2 Caracterização.....	31
4.3 Propriedades mecânicas à temperatura ambiente.....	32
4.3.1 Dureza Vickers [HV].....	32
4.3.2 Tenacidade à Fratura (K_{IC})	33
4.4 Teste de Usinagem	33

4.4.1	Preparação Ferro Fundido Cinzento	34
4.4.2	Os parâmetros de usinagem	35
4.5	Equipamentos e ferramentas de corte utilizado.....	36
4.5.1	Rugosidades Ra e Rz.....	36
4.5.2	Medidas de forças de corte (Fc, Ff e Fa)	37
4.5.3	Medidas das temperaturas (Tc)	37
4.5.4	Medidas de Desgastes (VB).....	37
5-	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	Análise dos resultados de propriedades da ferramenta de corte	38
5.2	Análise dos resultados dos testes de usinagem.....	40
5.2.1	Desgaste do Flanco da Ferramenta VB (mm).....	40
5.2.2	Desgaste da ferramenta de corte.....	41
5.2.3	Analises das rugosidades R _a e R _z das peças usinadas	44
5.2.4	Temperatura durante a usinagem	45
5.2.5	Análise das forças de corte.....	46
6-	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS	48

1- INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais cerâmicos avançados normalmente tem sua origem na necessidade de materiais que promovam desempenho superior, quando comparados com os materiais existentes, de acordo com as demandas dos avanços tecnológicos. O desenvolvimento destas cerâmicas promove na ciência e tecnologia uma atmosfera de possibilidades de maior competitividade do mercado no plano global, tornando os processos das indústrias mais robustos e eficientes [1].

A demanda de novos materiais cerâmicos tem o objetivo de obter materiais de alta qualidade para substituir os materiais tradicionais agregando qualidade, resistência e eficiência de aplicação. Um dos seguimentos industriais mais carentes de melhoria em seus processos é a manufatura de materiais pelos processos de usinagem. A usinagem pode ser considerada como um processo de tecnologias essenciais que é responsável por mais de 5 % do produto interno bruto (PIB) [2]. Portanto um fato dominante nos processos de usinagem é que as ferramentas atuais chegaram ao seu limite, sendo importante o desenvolvimento de novos materiais e tipos de revestimentos para melhoria dos processos de usinagem. As ferramentas cerâmicas vêm como uma solução com importantes destaques ao longo de décadas, com aplicação nos processos de usinagem sem a utilização de fluidos de corte. As propriedades implícitas das cerâmicas fazem parte de um grande grupo, com destaque para alumina, carbetos de silício, nitreto de silício, carbetos de boro e etc. A consolidação do efetivo potencial de crescimento dessas cerâmicas nos leva a entender que precisamos vencer desafios que estão relacionados à necessidade de aprofundamento científico e tecnológico para atender as necessidades específicas de cada projeto. Um fator a ser observado, é que atualmente o mundo não depende apenas da viabilidade econômica, e sim dos aspectos de sustentabilidade, o que deve ser levado em conta no desenvolvimento de ferramentas cerâmicas [1].

A necessidade de avanços na usinagem é mais visível nas indústrias que precisam produzir peças de alta precisão e com custos cada vez mais reduzidos. As indústrias aeronáuticas, aeroespaciais, petroquímicas, automobilística, segurança, entre outras são as que mais apresentam esta necessidade. Nestas indústrias, o desenvolvimento de novas metodologias, melhorias e controle dos processos de usinagem podem ser a chave para o sucesso e competitividade destas indústrias. As ferramentas de corte utilizadas nestas indústrias possuem propriedades especiais aumentando ainda mais o custo de produção. Estudos realizados no desenvolvimento de novas ferramentas certamente irão significar importantes avanços no

campo de inovação e aplicação destas [3]. Um dos seguimentos indústrias mais exigentes são as indústrias automobilísticas que buscam obter produtos de alta qualidade, baixo custo, mas que atendam às exigências do mercado. Nestas indústrias o uso de ferro fundido possui grande importância por apresentar coeficiente de atrito alto e estável, resistência ao desgaste, resistência em alta temperatura e possuir baixo custo, mas apresentando dificuldades de usinagem. Entre os ferros fundidos, as classes dos cinzentos são adequadas para aplicações como virabrequins, pistões, engrenagens, tubos, estruturas de motores, volantes entre outros [4].

Com o exposto anteriormente, o viés desse trabalho consiste na produção de uma ferramenta de corte cerâmico que busque atender essa necessidade de mercado, reduzindo custos, melhorando performance e mantendo a qualidade exigida pelas normas. Para isso foram feitos testes em diversas condições de usinagem, com o intuito de avaliar as melhores condições de uso e o efeito dos parâmetros na ferramenta.

2- OBJETIVOS

Esse trabalho teve como objetivo principal ampliar estudos no seguimento de ferramentas de corte com desenvolvimento, caracterização e aplicação de blanks cerâmicos como ferramentas de corte na usinagem do ferro fundido cinzento. As ferramentas de corte foram desenvolvidas utilizando 99,00 % de Al_2O_3 com 1,00 % de Cr_2O_3 . Os objetivos específicos são:

- Caracterização das cerâmicas em função das propriedades físicas e mecânicas;
- Retífica e lapidação de acordo com a norma ISO 1832;
- Seleção de parâmetros de corte para a usinagem do ferro fundido cinzento;
- Determinação da força de corte, rugosidades e temperaturas;
- Caracterização dos desgastes e avarias ocorridas nas ferramentas de corte;
- Avaliar a influência das variáveis de entrada utilizadas na usinagem (V_c , f e a_p);
- Ampliar as informações existentes na literatura e formar novos recursos humanos.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica realizada neste trabalho promove uma interação de conhecimento dos processos de usinagem e materiais conjugados com as ferramentas de corte.

3.1 - Ferros fundidos

Os materiais metálicos possuem importantes soluções industriais com destaque aos ferros fundidos que possui propriedades importantes e baixo custo, sendo um dos materiais mais utilizados pelas indústrias. Esta classe de material é mundialmente utilizada em diversas indústrias de máquinas e equipamentos, fábricas automobilísticas, ferroviária, naval, dentre outras várias indústrias metalomecânicas. Estima-se que o mercado de ferro fundidos em 2021 registre um crescimento de até 2,2 % da taxa anual de crescimento no mundo até 2026 [5].

Os ferros fundidos são ligas a base de Fe-C cujo teor de carbono se situa acima de 2,0 % aproximadamente. É considerada uma classe de ligas ternária Fe-C-Si, em que o silício se encontra em quantidades muitas vezes superior ao do próprio carbono em algumas situações [6].

Os ferros fundidos cinzentos e nodulares são compostos de liga de ferro-carbono-silício, com teores de carbono que variam acima de 2,5 % e 4,0 % e silício 1,0 % e 3,0 %, em quantidade superior à que pode ser obtida em solução sólida na austenita, de modo a resultar na formação específica de grafita em forma de veios ou nódulos. Nas mais diversas indústrias o projeto especifica a microestrutura devido a forma e a maneira da distribuição das grafitas que influenciam diretamente nas propriedades dos ferros fundidos [7].

No atual mundo globalizado a evolução científica e tecnologia dos processos de fundição dos ferros fundidos vem dinamizando cada vez mais o desenvolvimento de novas aplicações, possibilitando importantes alternativas econômicas e produtos de qualidade [8].

3.1.1 - Ferro fundido cinzento

Quando utilizamos máquinas e equipamentos fabricados de ferro fundido cinzento nem sempre damos conta de sua importância, nós a tratamos como uma liga metálica qualquer. Entretanto existem algumas características que podem nos colocar em conexão com a importância destas ligas, como por exemplo, a resistência ao atrito, baixo custo, amortecimento e etc. Porém, em função da literatura os engenheiros tem a oportunidade de conhecer as

propriedades desses materiais, e analisando a sua história percebe-se que está presente em nosso dia a dia devido as suas características e estrutura, em que se verifica as diversas aplicações do ferro fundido cinzento [6].

Uma característica importante do ferro fundido cinzento é o baixo custo por oferecer facilidade de fusão e moldagem com boa resistência a compressão, resistência ao desgaste e boa capacidade de amortecimento. Entretanto o ferro fundido cinzento é muito utilizado em um sistema de aplicação de carga por compressão, em condições estáticas e sistema de abrasão [7]. Os ferros fundidos cinzentos são eficientes em sistema de amortecimento de energia vibracional, sendo um dos materiais que apresentam melhor custo benefício em aplicações expostas a vibrações [9].

Mesmo com o desenvolvimento de nova ligas, aços especiais e outros materiais que são criados para atender as especificações de mercado, o ferro fundido cinzento ainda é amplamente usado em diversas aplicações. Isso se deve a algumas características particulares e ao baixo custo que o torna extremamente competitivo [10].

Sua baixa contração durante a solidificação favorece a obtenção de peças com poucos defeitos internos. Essa propriedade também é aliada com uma das menores temperaturas de fusão entre as ligas ferrosas, sendo assim um material com excelente fundibilidade [10, 11].

Segundo ASM Handbook 9th ed os ferros fundidos cinzentos variam de 2,5 a 4 % de C, 1 a 3 % de Si e adições de Mn além de impurezas como S e Ph. Nesta classe de metal o carbono excede a solubilidade da austenita e precipita sob a forma de lamelas ou placas [11].

A norma ASTM A 48 classifica esse tipo de material em classes de 20 a 60, que correlaciona as classes com sua resistência a tração em ksi. Propriedades como resistência mecânica, resistência mecânica a alta temperatura, modo de elasticidade, resistência ao desgaste e acabamento superficial pós usinagem aumentam com o aumento do nível da classe. Porém, propriedades como resistência a choque térmico, capacidade de amortecimento e principalmente usinabilidade, decrescem com o aumento do nível [12].

3.1.2 Usinabilidade do ferro fundido cinzento

Com variações de composição e microestrutura o ferro fundido pode ser tanto fácil de usar como no caso do ferro fundido cinzento ferrítico ($HB \approx 120$) até condições de mais difícil usinabilidade com no caso do ferro fundido branco ($HB \approx 550$). Devido a essa dificuldade de usinagem cerâmicas a base de Alumina e SIALONS tem sido cada vez mais utilizadas para usar com sucesso esse tipo de material [13].

Porém, a dureza não é um indicador tão eficiente no caso dos ferros fundidos cinzentos diferente dos demais aços. Neste caso a microestrutura serve como um indicador mais confiável segundo a American Foundry Society. A seguir serão apresentados os microconstituintes do ferro fundido cinzento e sua influência na ferramenta de corte [14]:

- Ferrita: com baixíssimo teor de carbono é um dos constituintes com menor dureza, afetando pouco no desgaste da ferramenta.
- Perlita: é o microconstituente mais abundante do ferro fundido. É composta pela ferrita que é mole e carbonetos duros (dando a ela uma dureza média). Pode variar de uma estrutura fina para uma mais grosseira, em que a estrutura fina é mais dura sendo usinada a menores velocidades.
- Martensita: Apresenta elevada dureza, na condição de não revenida há dificuldade em ser usinada e alto desgaste da ferramenta. Já com o processo de revenimento dá lugar a uma microestrutura com carbonetos esferoidais em uma matriz ferrítica, apresentando boa usinabilidade.
- Bainita: Também apresenta uma dureza elevada e tem que ser usinada a velocidades baixas (inferiores até mesmo que a martensita revenida).
- Austenita: Apresenta dureza relativamente baixa e é de fácil usinabilidade assim como a ferrita. Porém, em alguns casos a presença do cromo pode formar carbonetos que irão dificultar a usinabilidade.
- Carbonetos: Possuem elevada dureza. Concentrações acima de 5 % de carbonetos livres já representam um declínio significativo na vida útil da ferramenta.
- Esteadita: Extremamente dura se apresenta no ferro fundido com concentrações de fósforo acima de 0,4 %, diminuindo muito a usinabilidade do material e consequentemente na vida útil da ferramenta.

3.2 - Definição de materiais cerâmicos

Fazer uma definição correta e exata de materiais cerâmicos é quase impossível. Com o avanço da ciência e tecnologia das cerâmicas, a ciência dos materiais adota uma classificação ternária que distingue: *i*) materiais orgânicos; *ii*) materiais inorgânicos e metálicos; *iii*) materiais inorgânicos e não metálicos. O conceito de compostos cerâmicos é extremamente amplo, pois incluem a maioria dos minerais e rochas, ou seja, quase a crosta inteira do nosso planeta. Uma definição a ser considerada na literatura de cerâmicas avançadas é bastante restritiva, mas segue o interesse de aplicações, ou seja, qualquer produto inorgânico e não metálico preparado por

tratamento a temperaturas superiores a 540 °C e/ou usado em condições que implicam essas temperaturas [7].

De maneira geral, as cerâmicas podem ser definidas como uma classe de materiais não metálicos inorgânicos que podem ser processados ou usados em altas temperaturas e possui ligação iônica e/ou covalente, que exibem uma ampla gama de propriedades [15].

As cerâmicas mostram que diversidade e unidade não são contraditórias. Os compostos cerâmicos são múltiplos, as aplicações são variadas, as propriedades colocadas em jogo são diferentes e até contraditórias. Os óxidos cerâmicos variam de supercondutores a melhores isoladores elétricos. No entanto, as interações químicas do sistema determinam a natureza das ligações interatômicas que são estruturadas no sistema de produção e sinterização [15].

As propriedades características das cerâmicas incluem alto ponto de fusão, baixa densidade, alta resistência à corrosão, alta dureza, inércia química e baixa expansão térmica. Além disso, eles são muito mais resistentes à compressão do que os metais. Os pessimistas poderiam sugerir que existe um ponto comum, a fragilidade. Isto é verdadeiro, mas também contraditório, pois em altas temperaturas, onde a fluência é um problema, as cerâmicas apresentam propriedades importantes para atender as condições de aplicações, e isto faz com que os leitores que possui informações suficientes possam entender que o termo “quebradiço” é diferente de frágil e o insucesso da cerâmica é apenas para quem não entende o seu significado profundo [3].

A fragilidade é uma condição que pode ser controlada, mas é o preço a ser pago pelos altos módulos de elasticidade e alta dureza. Isso seria um problema se a ciência dos materiais e a engenharia de materiais tivesse uma visão horizontal em torno das características dos materiais, sendo menos vistos como "pontos fortes" ou "pontos fracos" do que como dados importantes de uma evolução científica. Na visão vertical, as variadas características dos materiais cerâmicos são menos vistas como "pontos fortes" ou "pontos fracos", mas como propriedades exclusivas que as diferenciam umas das outras, e com o conhecimento de suas especificações de uso, torna-se possível selecioná-los de maneira mais eficaz [3].

Todos os mecanismos de fratura passam por deformação elástica e plástica em um grau maior ou menor. A deformação plástica de cerâmica e metais cristalinos ocorre por movimentos de deslocamento. A ligação atômica na cerâmica é majoritariamente de caráter covalente ou iônico. Para estes tipos de ligação há um número limitado de deslizamento dos planos, ao longo dos quais as discordâncias podem se mover. Para os átomos ionicamente ligados, as forças repulsivas dos átomos carregados eletricamente restringem seu deslizamento. Para átomos ligados covalentemente, as forças das ligações covalentes impedem o seu deslizamento. Devido ao movimento de deslizamento restrito, a deformação plástica é limitada para a cerâmica e

muitas vezes fratura antes que a deformação plástica possa ocorrer. Também devido ao número restrito de sistemas de deslizamento, a força da cerâmica em tensão é limitada pelos defeitos dentro do material. Um defeito em um material cerâmico enfraquece a estrutura criando uma concentração de tensão a partir da qual a trinca começa a se propagar. Portanto, cerâmicas não devem ser submetidas a altas tensões de tração e flexão. Para as cerâmicas não cristalinas, não existe um átomo regular na estrutura e consequentemente a deformação plástica não ocorre por deslocamento de movimento. Estes materiais se deformam por fluxo viscoso. As forças de cisalhamento aplicadas fazem com que os átomos se deslizem, um para o outro, quebrando e reformando ligações interativas, sem uma direção de deslizamento favorável [15].

Muitas cerâmicas avançadas e/ou estruturadas são produzidas pela compactação de pó e uma posterior densificação das mesmas através da sinterização em altas temperaturas. Devido à alta dureza e fragilidade, qualquer tratamento posterior como a moldagem é complicado e muitas vezes requerem ferramentas de corte de diamante e abrasivos. As bordas e cantos afiados (vivos) devem ser evitados devido a concentrações de tensão durante a aplicação [15].

As cerâmicas são frequentemente utilizadas em aplicações onde as condições abrasivas em alta temperatura não são possíveis para os metais como no caso dos refratários de fornos, motores térmicos, ferramentas de corte, além do uso como isoladores elétricos e barreira térmica. Além disso, a cerâmica pode ter caráter semicondutor (por exemplo, carboneto de silício) e também pode ser usado para transferência de calor [15].

As cerâmicas mais comuns em uso tribológico e usinagem são a base de alumina (Al_2O_3), carbetos de silício (SiC), nitreto de silício (Si_3N_4), zircônia (ZrO_2) ou carbetos de boro (B_4C) [16,17]. Podemos citar para estas os seguintes exemplos de utilização que são: *i*) nitreto de silício em rolamentos e ferramentas de corte; *ii*) alumina em ferramentas de corte e articulações do quadril; *iii*) carbetos de silício em selos mecânicos; *iv*) zircônia em matrizes e articulações do quadril; *v*) carbetos de boro principalmente em aplicações de corte, abrasivos e blindagem balística [18].

Estas cerâmicas termomecânicas podem ser melhor classificadas como: *i*) cerâmica de óxido (Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , etc.) e *ii*) cerâmica não óxidas (SiC , TiC , B_4C , TiB_2 , Si_3N_4 , TiN , etc.). Como ferramentas de corte deve ser mencionado que as propriedades de atrito e desgaste estão relacionadas com a dureza e a tenacidade a fratura, sendo estas propriedades que determinam o desempenho da ferramenta cerâmica na usinagem e aplicações em vários seguimentos da engenharia [18].

3.2.1 - Cerâmicas à base de alumina

A alumina (Al_2O_3) é provavelmente um dos materiais cerâmicos mais estudados para aplicações estruturais. É a cerâmica avançada mais amplamente utilizada, representando mais de 60 % em termos de uso. Quando aplicada para tecnologias avançadas é necessário que se faça o uso de técnicas de processamento especiais. Para isso em sua composição devem ser adicionadas pequenas quantidades de dopantes como o óxido de magnésio (MgO), óxido de titânio (TiO_2), óxido de zircônio (ZrO_2) e outros que possuem a finalidade de produzir efeitos marcantes sobre o comportamento durante a sinterização. Vários procedimentos de tratamento térmico são utilizados para criar estruturas de cristal cuidadosamente controladas [19].

A alumina apresenta módulo de elasticidade elevado, refratariedade alta, dureza alta, resistência ao desgaste, estabilidade térmica, resistência à corrosão, baixa constante dielétrica, excelentes propriedades dielétricas, excelente resistência química e rigidez [19,20,21].

Estas propriedades permitem a utilização da alumina como material abrasivo, revestimento de fornos, componentes para implantes ortopédicos e odontológicos, ferramentas de corte e aplicações nas áreas aeronáuticas, aeroespaciais, entre outras [19].

A estrutura cristalina da alumina- α é conhecida como corundum e é a forma mais termodinamicamente estável da alumina em todas as temperaturas. A alumina apresenta estrutura cristalina romboédrica compreendendo uma rede hexagonal de empacotamento onde os íons Al^{3+} estão ordenados simetricamente em dois terços dos interstícios octaédrais [21,22,23].

A ocorrência do óxido de alumínio- α na natureza é pequena e esta ocorre em formas de grãos ou massas uniformes, ou ainda em cristais com cor variável, apresentando dureza de 9 (escala mohs), brilho adamantino a vítreo, densidade de $3,98 \text{ g/cm}^3$. Ocorre em rochas metamórficas tais como calcários cristalinos, micaxistos, nos contatos de corpos peridotíticos, lamprófirios, pegmatitos e depósitos dentríticos. Pode também ocorrer como gema dando origem à safira e ao rubi. Como a ocorrência natural do óxido de alumínio- α é pequena, ele é obtido artificialmente a partir de hidróxidos de alumínio contidos em minérios pelo processo Bayer [24,25,26].

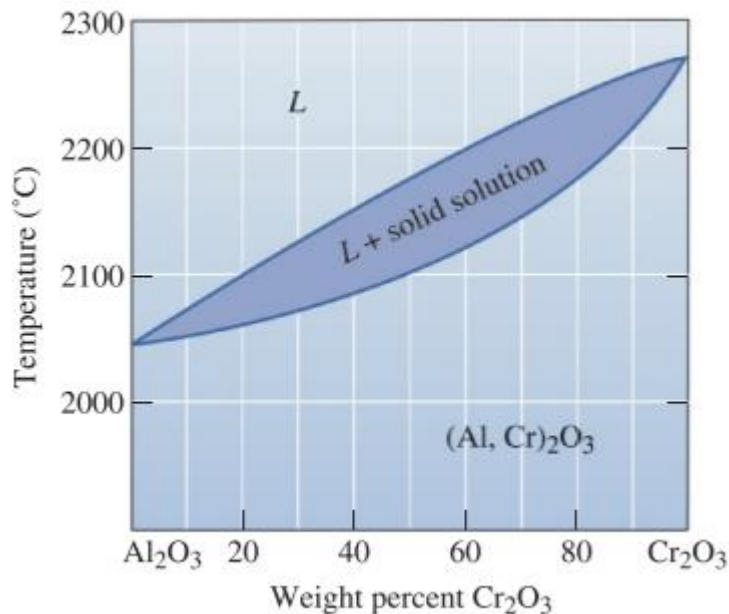
3.2.2 – Ferramenta de corte Al_2O_3 dopada com Cr_2O_3

O intuito de dopar as ferramentas de alumina com o óxido de cromo é uma melhora nas propriedades mecânicas da ferramenta. Pequenos teores de óxido de Cromo formam uma solução sólida substitucional que aumenta a taxa de sinterização. Há um aumento da resistência mecânica e da densificação devido aos coeficientes de auto-difusão que por sua vez são

proporcionais a concentração de Cr_2O_3 . Também se observa uma diminuição dos tamanhos de grão e também de sua mobilidade, porém não inibe o crescimento normal de grão apenas o crescimento descontínuo. [27,28]

O diagrama de fase da mistura Al_2O_3 dopada com Cr_2O_3 é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de fases Al_2O_3 - Cr_2O_3



Podemos observar pela figura 1 que o composto permanece sólido até 2000 °C, conseqüentemente, não há perigo de derreter qualquer um dos constituintes; no entanto, Cr_2O_3 e Al_2O_3 exibem solubilidade sólida ilimitada. Na alta temperatura de serviço, 2.000 °C, os íons Al^{3+} irão se difundir da matriz para as fibras. [29]

3.2.3 - Mercado dos materiais cerâmicos

O mercado global de cerâmicas avançadas apresenta perspectivas de atingir US\$ 134,58 bilhões até 2024, de acordo com um novo relatório da Grand View Research, Inc. [30]. Estas cerâmicas são conhecidas como: cerâmica industrial, cerâmicas modificadas, cerâmicas técnicas, cerâmicas finas, cerâmicas desenvolvidas por técnicas aprimoradas e etc. Estas cerâmicas são desenvolvidas com características compostas para obter excelentes propriedades térmicas, magnéticas, ópticas, elétricas, abrasivas, químicas e outras. Como resultado, elas surgiram como alternativas eficazes em substituição aos plásticos e aço de alto desempenho para várias aplicações se destacando nas indústrias petroquímica, aeronáutica, aeroespacial, automobilística e biomédica [31].

Com um campo de aplicação promissor, o mercado vem testemunhando um crescimento considerável nos últimos anos e perspectivas promissoras de crescimento nos próximos seis anos devido à necessidade e evolução das indústrias. A crescente demanda em cerâmicas avançadas no seguimento de biomateriais, ferramentas de corte, blindagem balística, dispositivos eletrônicos é a esperança dos consumidores, particularmente nos países desenvolvidos, incluindo a região da Ásia-Pacífico (com destaque para a Índia e a China) que deverá ter impacto positivo no mercado ao longo dos anos [31].

3.3 Ferramentas de corte Cerâmico

O primeiro registro do uso de ferramentas de corte cerâmico data do ano de 1930. As propriedades que interessavam sua aplicação na época eram a alta dureza a quente, resistência a compressão e resistência ao desgaste. Porém a falta de tecnologia para a produção das pastilhas, falta de maquinário para seu uso e também a falta de experiência dos pesquisadores atrasou sua implementação comercial [2].

A fabricação de ferramentas de corte cerâmico se assemelha muito a fabricação por metalurgia do pó. Os pós cerâmicos são misturados e moídos em suspensão, após serem secos são prensados na forma desejada e posteriormente sinterizados da maneira que atinjam as propriedades mecânicas desejadas [32].

3.3.1 Classificação básica de ferramentas de cerâmica

As ferramentas de cerâmica chamam bastante a atenção do mercado devido ao seu relativo baixo custo e por performarem bem em relação a outros materiais. Algumas das propriedades mais bem vistas para usinagem de materiais são: alta dureza, resistência ao calor e pequena reatividade com materiais ferrosos. Além disso, esses materiais de corte podem ser usados em alta velocidade de corte sem deformação devido à sua alta dureza a quente. Porém, podemos ressaltar como aspectos negativos sua alta fragilidade e sua grande sensibilidade a choques de temperatura [33].

Os tipos de ferramenta são:

- Cerâmicas de óxido: são baseadas em óxido de alumínio ou também chamada de alumina (Al_2O_3) que é a cerâmica mais básica com excelente estabilidade química. No entanto, a principal desvantagem é sua resistência ao choque térmico muito baixa, o que limita seu uso em ferramentas de corte na forma pura. Devido ao seu baixo custo e boa resistência ao desgaste em temperaturas elevadas, é usado principalmente para usinagem contínua de média a fina, de

ferros fundidos, aços carbono e aços-liga. A aplicação mais comum de ferramentas de corte baseadas em Al_2O_3 puro é a usinagem de peças de ferro fundido cinzento [34].

- Cerâmicas misturadas de Al_2O_3 : são os materiais à base de Al_2O_3 com carbonetos e carbonitretos reforçados como TiC , TiN , ZrO_2 , SiC e alguns outros. A função pretendida desses reforços é melhorar as propriedades estruturais e térmicas. Esta classe de materiais de ferramenta é adequada tanto para operações de corte contínuas como intermitentes, como fresamento de uma ampla gama de condições de usinagem, tanto para corte bruto quanto para corte fino. Uma ampla gama de materiais de peça pode ser usinada usando essas ferramentas de corte como ferros fundidos, materiais frágeis, intermetálicos, aços de alta liga contendo tungstênio. Está bem estabelecido que a dopagem de óxido ou não óxido em Al_2O_3 melhora suas propriedades mecânicas e, portanto, a mistura de aditivos óxidos e não óxidos podem ser atraente. Além disso, os nano-óxidos e não-óxidos podem ser mais atraentes quando adicionados ao Al_2O_3 , pois as nanopartículas tendem a aumentar a dureza e a tenacidade devido à sua segregação nos limites do grão [35].

- Cerâmica de nitreto: outras cerâmicas bastante populares são à base de nitreto de silício (Si_3N_4), devido à sua resistência química relativamente alta e características de resistência a altas temperaturas [36]. Porém, tais cerâmicas têm várias desvantagens, em particular, o Si_3N_4 é um isolante e, portanto, não é muito adequado para o processamento de sinterização por plasma de centelha (SPS), que é uma técnica de fabricação potencial para ferramentas de corte. Este problema pode ser resolvido por vários métodos, em particular, dopando o nitreto de silício com pequenas adições de óxidos (Al_2O_3 e óxido de ítrio (Y_2O_3)) em uma quantidade de 10-12 % [36,37]. A tenacidade aprimorada e a alta resistência química permitem que as ferramentas de classe Si_3N_4 sejam usadas para usinagem de desbaste e semi acabamento de ferros fundidos durante o torneamento e fresamento. Uma nova classe de ferramentas de corte baseadas em Si_3N_4 chamada SiALON recentemente ganhou popularidade, que combina a força das redes de Si_3N_4 com excelente estabilidade química [34].

3.3.2 Considerações para aplicações de ferramentas cerâmicas

O controle e seleção de propriedades de um material para ferramenta de corte é essencial para aproximar das condições ideais de usinagem de uma peça. As propriedades têm influência no tempo de vida útil, parâmetros de usinagem, velocidade de corte e na qualidade do acabamento superficial da peça. As ferramentas de corte de materiais cerâmicos exigem um novo conjunto de conceitos e habilidades para sua aplicação, com a necessidade de um

conhecimento específico de suas propriedades de partida e seu comportamento durante a usinagem para implementá-las [38].

Na maioria dos processos de usinagem com ferramentas de aços rápidos e metal duro (tradicionais), o calor é o inimigo, ou seja, isso é ruim para as ferramentas e geralmente ruim para a peça de trabalho promovendo endurecimento da peça usinada. A maioria das ferramentas de corte, como, aço rápido e metal duro, os aspectos geométricos de sua concepção são desenvolvidos para facilitar a retirada de calor pelo cavaco, e fazer com que o mesmo seja dissipado rapidamente da zona de corte. Já para a concepção das ferramentas cerâmicas, o planejamento geométrico é desenvolvido de acordo com suas propriedades, o que possibilita a geração de alta temperatura à frente da ferramenta de corte diminuindo a dureza ou plastificando o material da peça, o que facilita a remoção de materiais em forma de cavaco. A temperatura de corte ideal na usinagem de aços endurecidos, ferros fundidos, superligas e outros estão em torno de 1.000 °C para o uso de ferramentas cerâmicas. Esta temperatura de corte está além da faixa de tolerância para o aço rápido e metal duro (carbeto sinterizado), onde o cobalto possui ponto de fusão próximo, levando as ferramentas de metal duro a amolecer, deformar e falhar [39].

Para a utilização de ferramentas cerâmicas em aços endurecidos, ferro fundidos, ligas e superligas que possuem dureza de até 60 HRC, obter temperaturas de operação elevadas é fundamental para superar a resistência do material, sendo assim, são sugeridas velocidades de corte altas. Além de todas as questões enfatizadas acima, a usinagem bem sucedida com pastilhas de materiais cerâmicos exige um equilíbrio entre a alta velocidade de corte e a profundidade de corte para obter pressão específica de corte necessária para gerar o calor elevado dentro da zona de corte e assegurar que o calor seja controlado nesta região imediatamente à frente da ponta da ferramenta [38].

Na utilização de ferramentas cerâmicas, uma abordagem conservadora para velocidades de corte, avanços e profundidade de corte são os maiores contribuintes para a falha da ferramenta no processo, dificultando sua implementação no campo da usinagem industrial. Quando as velocidades de corte são muito baixas não é gerado calor suficiente para recozer a peça já endurecida, com isso as forças de corte se tornam muito altas podendo ocorrer a falha na ferramenta [39].

Para aplicação de ferramentas cerâmicas, sempre que possível deve instituir uma geometria mais robusta, sendo definida sempre do maior ângulo de cunha para o menor, pois quanto maior o raio de ponta mais resistente será a aresta de corte. No desbaste, por exemplo, deve se usar um raio de ponta grande para desbastar a peça e, em seguida, termina-se com um raio menor da

ponta da ferramenta para acabamento. Somado a isso a rigidez do suporte da ferramenta é considerado importante para o uso de ferramentas cerâmicas. Possíveis deflexões vão promover vibrações, que são especialmente prejudiciais para as ferramentas, prejudicando também o acabamento superficial da peça. O menor balanço possível é a melhor configuração e quanto mais espesso ou maior diâmetro da haste do suporte da ferramenta melhor para a ferramenta de corte [38].

Para operações de desbaste, o programador deve considerar a variação da profundidade de múltiplos passes de desbaste. Múltiplos passes na mesma profundidade tendem a usar uma inserção na mesma área, causando a formação de um entalhe. Variando a profundidade espalha-se os padrões de desgaste sobre uma seção maior da ferramenta de corte. Outra estratégia para as ferramentas cerâmicas é a profundidade de corte, que deve ser programada em menos passadas, mas com maior profundidade de corte, a fim de acomodar a ferramenta cerâmica na peça. Nessa condição move-se a formação de entalhe de cima da face da ferramenta para uma área, onde a seção transversal é mais resistente [40].

Um dos fatores do uso de ferramentas cerâmicas, está na sobrecarga da máquina, fazendo necessário um estudo anterior. Altas forças de corte juntamente com avanços agressivos e alta velocidade de corte, são prejudiciais para vida útil do equipamento. Tudo tem que estar em sintonia adequada ou ocorrerá uma falha [41].

Embora a usinagem com ferramentas cerâmicas não exija necessariamente máquinas-ferramentas especiais, o processo exige que a máquina esteja em uma condição de alta rigidez. Velocidades superficiais altas e profundidades de corte agressivas levarão a máquina até seus limites de projeto. A lubrificação dos sistemas lineares, rolamentos do fuso e fusos de esferas devem ser confirmados de acordo com as especificações. Ajustes e folgas devem ser eliminados da máquina-ferramenta para que não interfiram no processo [41].

No uso de ferramentas cerâmicas com reforço de whisker em cortes interrompidos a velocidade de corte é o parâmetro mais crítico. As ferramentas cerâmicas com reforços são muito mais tenazes, absorvendo os impactos causados pelas interrupções na superfície da peça. Uma regra básica para cortes interrompidos é estimar a porcentagem de vazios e/ou interrupções na superfície de contato da ferramenta, e quanto menores forem as interrupções, maiores devem ser as velocidades de corte. Nestas condições, o uso de ferramentas cerâmicas reforçadas apresenta desgastes padrões diferente. Os padrões normais de desgaste para ferramentas cerâmicas reforçadas são diferentes dos padrões de desgastes vistos nas ferramentas de metal duro. O uso de ferramentas cerâmicas em cortes interrompidos e/ou com vazios promove a descamação ao longo da aresta de corte. A descamação de pequenos pedaços

na periferia superior da pastilha é o resultado de pressões causadas pelo desgaste do flanco. Em operações de desbaste, onde o acabamento superficial não é uma preocupação crítica, este tipo de desgaste da ferramenta geralmente não é uma preocupação [42].

O controle micrométrico da interface ferramenta/peça com a presença de descamação revela que as faíscas que são vistas subindo na superfície de saída, causado pelo atrito do cavaco ao passar pela superfície rugosa da ferramenta, é a evidência de insucesso na usinagem. Com a crescente evolução de suas propriedades as ferramentas cerâmicas têm sido recomendadas para o torneamento e fresamento de ligas com aceitação crescente nas indústrias. As reduções de tempo de ciclo em várias ordens de grandeza podem ser alcançadas com ferramentas cerâmicas [43, 44].

Apesar de existir muitos tipos de usinagem diferentes, o sucesso pode ser encontrado e ser resolvido de maneira eficiente e econômica com a utilização de ferramentas cerâmicas. As ferramentas de corte de materiais cerâmicos podem ser utilizadas como insertos intercambiáveis para usinagem de peças em ferro fundido, aço temperado, materiais especiais e superligas a base de níquel, promovendo melhoria dos conceitos de engenharia com aumento de produtividade e baixos custos [44].

3.4 Usinagem

A usinagem é um termo que abrange uma grande quantidade de processos de fabricação com o intuito de remover material de uma peça, geralmente na forma de cavacos. Este processamento é utilizado em metais e ligas como cobre, latão, bronze e aços sendo utilizado para a fabricação de uma enorme gama de produtos como ferramentas, motores, roscas entre outros. Devido ao valor agregado do produto final esses processos consomem bilhões de dólares anualmente, sendo os mais caros de toda a cadeia produtiva [45, 46].

O mercado global de usinagem é estimado em mais de \$ 400 bilhões até o ano 2022, com uma taxa de crescimento anual de 6–7 % [47] nos indicando uma grande demanda e também a necessidade da redução de custo desse processo. Extensas pesquisas envolvendo experimentos, modelagem analítica e simulação numérica do processo de usinagem são conduzidas atualmente para entender a interação entre ferramentas de corte e materiais da peça [48].

3.4.1 Máquinas operatrizes para usinagem com ferramentas cerâmicas

Para utilização de ferramentas cerâmicas são recomendadas máquinas operatrizes que oferecem condições de rigidez e potência que permitam trabalhar em altas velocidades sem

comprometer o processo. Entretanto as máquinas operatrizes indicadas para utilização de ferramentas cerâmicas são as que possuem comando numérico e alta rigidez. Em processos de usinagem por torneamento, o torno universal mecânico é descartado, devido o processo ser de operação manual, o que pode ocasionar impacto da ferramenta contra a peça a ser usinada, causando a falha catastrófica da referida ferramenta, sendo o torno automático com comando numérico (CNC) indicado [46,49]. Para atender as especificações de mercado (precisão e acabamento) os fabricantes produzem máquinas cada vez mais rápidas e eficientes, com disponibilidade de programas de desenho auxiliado pelo computador/manufatura auxiliada por computador (CAD/CAM), para acompanhar a evolução dos novos materiais e ferramentas de corte. O comando numérico é um dispositivo eletrônico capaz de receber informações por meio de entrada própria, compilar (processar) essas informações e transmiti-las em forma de comando à máquina operativa, de modo que esta, sem intervenção do operador, realize as operações na sequência programada [50].

Estas máquinas possuem alto grau de precisão e repetitividade, sendo de construção rígida e sólida, o que permite o uso de insertos cerâmicos, obtendo dos mesmos o máximo de rendimento [46]. Com essa evolução, surgiu recentemente a Usinagem a Altas Velocidades (HSC), que utiliza velocidades de corte bem acima das anteriormente utilizadas [50].

3.4.2 Vida da ferramenta de corte no processo de usinagem

A vida da ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido. O fim da vida da ferramenta de corte é pré-estabelecido pelo grau de desgaste [45, 51, 52]. Vários fatores determinam um valor limite de desgaste em que o fim da vida da ferramenta é atingido. Esta deve ser substituída quando: os desgastes forem tamanhos que se receia a quebra da aresta de corte; por conta de os desgastes da superfície de corte não permitirem mais a obtenção de tolerâncias apertadas ou mesmo um bom acabamento superficial; houver um aumento da força de usinagem proveniente de desgastes elevados que interferem no funcionamento da máquina. Muitas vezes o final da vida útil da ferramenta é atingido antes que os desgastes de flanco e cratera sejam altos, devido a fragilidade da ferramenta acontece a quebra de fragmentos da aresta de corte (lascamento) [49].

A vida da ferramenta é fortemente influenciada pelas condições de usinagem. A velocidade de corte, o avanço e a profundidade são, respectivamente, os principais fatores no aumento do desgaste da ferramenta [49,53]. O primeiro é o que mais influência, devido ao aumento de energia que é colocada no processo, porém ele também aumenta a área da ferramenta que recebe

esse calor. Já o segundo tem menos influência, ao ser aumentado também aumenta a área da ferramenta que recebe tal energia. A profundidade de corte não interfere na energia destinada ao corte por unidade de área, nem com a retirada do cavaco, somente faz com que um volume maior seja retirado. Outros fatores também influenciam como a geometria, composição e dureza da ferramenta [49].

3.4.3 Desgaste do flanco

O desgaste do flanco da ferramenta ocorre devido ao contato ferramenta x peça gerando atrito entre as duas o que resulta em adesão e/ou abrasão. Esse processo é fomentado pelo aumento da temperatura durante a usinagem podendo levar também a difusão do material da aresta (principal e secundária) no material usinado [28,54,55]

Quando há desgaste no flanco principal da ferramenta de corte, há um aumento das vibrações durante a usinagem, aumentando a temperatura e as forças de corte envolvidas. Já no flanco secundário esse desgaste irá prejudicar o dimensional final da peça e também seu acabamento superficial (rugosidade). Esses desgastes são inevitáveis durante o processo de usinagem, porém pode ser mitigado pelo uso de uma ferramenta correta para usinagem de cada material [28,56,57]

4- MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item são apresentados os passos necessários para o desenvolvimento do projeto. Faz parte deste contexto, os procedimentos realizados na preparação da cerâmica para o desenvolvimento, caracterização, retífica, lapidação dos blanks e aplicação no processo de torneamento do ferro fundido cinzento. O desenvolvimento, caracterização e aplicação das ferramentas cerâmicas foram realizados na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG-UNESP/DMT) e na Divisão de Materiais do *Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial* (AMR/DCTA).

4.1 Produção das Cerâmicas

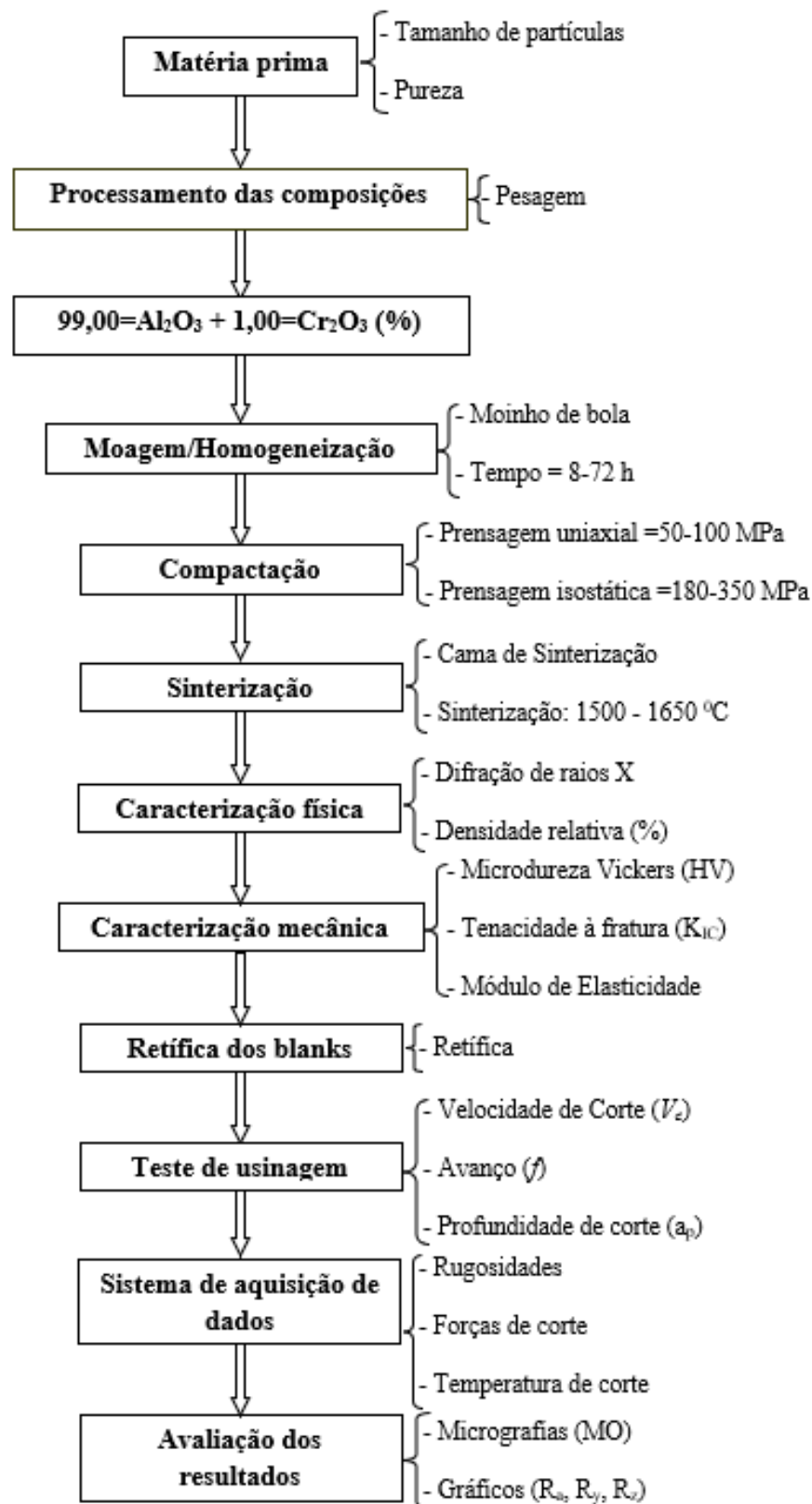
Neste item, são apresentados os passos envolvidos no desenvolvimento, caracterizações e estudos preliminares da ferramenta de 99,00 % de Al_2O_3 + 1,00 % de Cr_2O_3 no processo de torneamento do ferro fundido cinzento sem a utilização de fluidos de corte. Para obter resultados de repetibilidade e reprodutibilidade, as matérias primas foram caracterizadas quanto

à pureza, tamanho médio de partículas, estudo da composição, tempo e meio de moagem, tempo de secagem e calcinação, estudo de adição de ligantes e análise dos valores de carga de compactação uniaxial e isostática.

O principal objetivo nesta etapa foi à obtenção de densidade a verde superior a 55 %. Após a determinação dos parâmetros de preparação das amostras, as cerâmicas a verde na geometria quadrada, foram envolvidas em uma cama de pós da mesma composição e submetida aos processos de sinterização com estudo da taxa de aquecimento, patamares intermediários, temperatura e tempo de sinterização e taxa de resfriamento. Posterior à remoção das cerâmicas do forno, as mesmas foram submetidas à inspeção visual para verificação de possíveis fraturas ou falhas que podem ser causadas pelos processamentos e manuseio. As técnicas, análise e preparação das cerâmicas para caracterizações foram realizadas nos grupos que não possuíam defeitos e as dimensões que atenderam as condições de retificas e lapidações.

As retificas e lapidações das cerâmicas foram definidas em função da remoção de material das seis superfícies para atender a norma ISO 1832 [53]. A norma possui padrão geométrico, mas permite flexibilidade para definição de tamanho e espessura dos chanfros, raios de ponta, alisamento de superfície de saída, e outras que estejam contemplados na norma para os processos de usinagem. Todas as etapas e metodologias utilizadas no desenvolvimento, caracterizações e aplicação da ferramenta foram fundamentados na literatura específica e experiência do orientador. Durante os processos ajustes foram realizados devido à particularidade do projeto. Na Figura 1, são demonstradas as etapas realizadas neste projeto.

Figura 2 - Fluxograma das atividades.



Fonte: Próprio autor.

4.1.1 Matéria Prima

As matérias primas utilizadas neste projeto são comercialmente disponíveis. O óxido de alumínio ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) e o óxido de cromo (Cr_2O_3) foram adquiridos junto à empresa Almatris e Vetec Brasil, pela Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG-UNESP). Neste projeto as matérias primas foram caracterizadas quanto ao tamanho médio de partículas e pureza.

4.1.2 Preparação dos pós-cerâmicos

Os pós de Al_2O_3 e Cr_2O_3 foram pesados e moídos via úmido em meio a álcool etílico, com estudo do tempo variando de 8-48 horas, onde se definiu o tempo ideal de 24 horas. Após esse processo, as misturas de pós foram secadas em uma estufa a 100 °C por 24 horas. Posteriormente foram desagregadas em almofariz de ágata e submetidas ao peneiramento em malhas de 125 mesh. Em seguida, 100 gramas da mistura foi submetida à calcinação na temperatura de 600 °C por 2 horas e então peneiradas em malhas de 325 mesh no laboratório de cerâmica da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG-UNESP).

4.1.3 Prensagem das amostras cerâmicas

A prensagem uniaxial e isostática foi realizada no Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial na Divisão de Materiais (DCTA/AMR). Foram realizados estudos das cargas de compactação para determinação dos valores de carga ideal. O objetivo foi obter a maior densidade a verde das cerâmicas para que após a sinterização, a densidade relativa fosse superior a 98 %.

4.1.4 Prensagem uniaxial a frio

A compactação uniaxial do pó para a confecção dos insertos cerâmicos, se deu através do estudo da curva de compactação com variações de carga de 50-100 MPa e tempo de duração de 30 segundos utilizando uma matriz metálica de aço V132 na forma quadrada com dimensões de 16,36 mm x 16,36 mm x 7,5 mm. A compactação uniaxial se deu com o uso de 4 gramas de pó para cada pastilha com objetivo de após a sinterização, a retração linear permitir a retificação das cerâmicas para obter-se dimensão final de 12,76 x 12,76 e 4,76 mm, a qual é normalizada pela ISO 1832 [53]. Durante o processo de compactação para melhor fluidez do pó foi adicionado ligante na quantidade de 4 % em peso (álcool polivinílico), e a matriz foi lubrificada periodicamente com estearina visando maior fluidez do pó.

4.1.5 Prensagem isostática a frio

Os corpos-de-prova previamente compactados uniaxialmente foram encapsulados a vácuo em moldes flexíveis de látex e submetido a prensagem isostática a frio utilizando valores de cargas de 180, 210, 250, 300 e 350 MPa para definição da maior uniformidade de densidade a verde, com objetivo de eliminar quase que totalmente os problemas relacionados ao gradiente de compactação ao longo do corpo-de-prova. A prensagem isostática a frio consiste da imersão das cerâmicas compactadas e envolvidas em moldes flexíveis de látex em uma câmara de óleo a vácuo. A carga definida no estudo foi de 350 MPa e a velocidade de compactação utilizada de 15 MPa/s.

4.1.6 Processo de sinterização

As sinterizações das cerâmicas foram realizadas após estudos de tempo, temperatura e patamar utilizando um forno convencional. Foram realizados estudos nas temperaturas de 1550, 1600 e 1650 °C e as taxas de aquecimento foram de 5, 10 e 15 °C/minutos e os patamares de 0,5; 1,00; 2,00 e 3 horas. Para sinterização, as amostras foram colocadas em um cadinho de Al_2O_3 e envolvidas por misturas de pós de Al_2O_3 visando evitar contaminação e perda do material por dissociação. Todas estas etapas foram realizadas no Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial na Divisão de Materiais (DCTA/AMR).

4.2 Caracterização

Para as caracterizações das amostras cerâmicas, as mesmas foram submetidas ao controle de qualidade pelo aspecto visual e dimensional com auxílio de um paquímetro, sendo em seguida analisada em um microscópio óptico para detecção de microtrincas. Posteriormente as cerâmicas foram submetidas à pesagem em balança analítica de alta precisão (0,0001) para análise de perda de massa dos corpos cerâmicos durante a sinterização, comparando as massas com a massa do corpo à verde. A densidade relativa foi avaliada utilizando o método de imersão proposto por Arquimedes. Os resultados da massa específica foram correlacionados com a massa específica teórica do material, avaliado através da regra das misturas, sendo obtida então, a densidade relativa das amostras.

As caracterizações microestruturais das cerâmicas sinterizados foram realizadas através da microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para isso as amostras foram cortadas ao centro, embutidas, lixadas com sequência de lixas de 80, 120, 220, 320, 400, 500, 600, 1200, sendo seguida de polimento com pasta de diamante na granulometria de 3 e 1 μm . Após acabamento com superfície espelhada, as cerâmicas foram desembutidas, colocadas em água destiladas no

ultrassom, secadas em estufa e submetidas ao ataque térmico em temperatura de 1550 °C (Marca: Naber Therm –GMBh, 30-3000 °C) em um forno tubular vertical com estudo de tempo de 10, 15, 20, 25 e 30 minutos, sendo definido o tempo de 30 minutos como ideal para esta composição. As fases cristalinas presentes nas misturas de pós e nas amostras sinterizadas foram avaliadas por difratometria de Raios-X, utilizando-se fichas de identificação compiladas pela International Centre for Diffraction Data.

Os estudos de tratamentos térmicos e as caracterizações microestruturais das cerâmicas sinterizadas foram realizadas no Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial na Divisão de Materiais (DCTA/AMR- Marca Zeiss, Modelo Leo 435VPI), enquanto que as demais caracterizações descritas foram realizadas nos laboratórios da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG-UNESP).

4.3 Propriedades mecânicas à temperatura ambiente

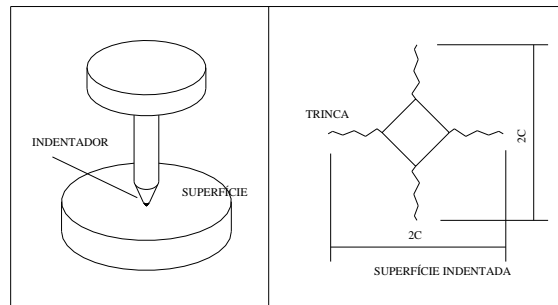
As análises das propriedades mecânicas de microdureza Vickers (Hv) e tenacidade à fratura (K_{Ic}) das cerâmicas foram realizadas na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG-UNESP). Estas propriedades apresentam-se como primordiais para determinar as suas condições e campo de aplicações.

4.3.1 Dureza Vickers [HV]

A metodologia utilizada para a determinação dos valores de dureza das amostras cerâmicas seguiu a norma ASTM C 1327-99 [58], que fornece o método de teste padrão para obtenção da dureza Vickers em cerâmicas avançadas.

Nas amostras devidamente polidas, conforme item 4.2, foram executadas as medidas de microdureza, sendo determinada a microdureza Vickers com penetrador de diamante de 136 °, aplicando carga variando de 1000 – 5000 gf para definição de um padrão. Foram caracterizadas 4 amostras localizadas em diferentes regiões do forno e cada uma foi submetida à 20 impressões (endentações), utilizando um microdurômetro digital. Na Figura 2 é demonstrado de forma esquemática a indentação Vickers.

Figura 3 - Desenho esquemático da endentação Vickers.



Fonte: Adaptado norma ASTM C 1327-99 [51].

4.3.2 Tenacidade à Fratura (K_{IC})

A metodologia utilizada para a determinação dos valores de tenacidade à fratura das amostras seguiu a norma ASTM C 1421-99 [59]. Cada impressão Vickers apresentou dois pares de trincas radiais, (conforme Figura 2) gerando um total de 40 pares de trincas. Nos cálculos, foram realizados para cada lote 50% dos pares de trincas perfeitas, ou seja, aquelas que não apresentarem interações com imperfeições de polimento e desvios da trajetória da trinca nucleada a partir dos vértices das endentações. A medida do comprimento das trincas foi realizada logo após o ensaio de dureza, buscando evitar o crescimento lento de trinca após a impressão. Os valores de tenacidade à fratura foram calculados com base na equação (1), proposta por Anstis [60].

$$K_{IC} = 0,016 \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} \frac{P}{c^{3/2}}$$

Equação 1: Tenacidade à Fratura (K_{IC}).

Onde K_{IC} é a tenacidade à fratura do material [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$]; P a carga aplicada [N]; E o módulo de elasticidade do material calculado pela regra das misturas [GPa]; H a dureza do material [GPa] e c dado por $1 + a$ [m] onde a é a semidiagonal da impressão Vickers [m].

4.4 Teste de Usinagem

Os testes de usinagem por torneamento do ferro fundido cinzento foram realizados com a ferramenta cerâmica de 99,00 % Al_2O_3 + 1,00 % Cr_2O_3 desenvolvida em laboratório. Devido às poucas informações e/ou quase inexistente na literatura para esta ferramenta específica, as

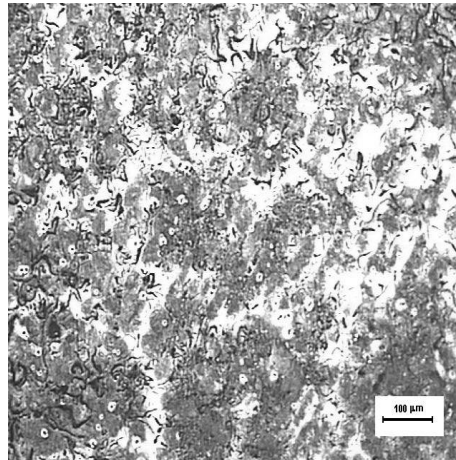
informações iniciais dos testes foram realizadas em observância as informações existentes em catálogos de revendedoras de ferramentas de metal duro no Brasil e complementada com testes preliminares para verificação dos parâmetros a serem utilizados. Todas as condições utilizadas foram fundamentadas nas características das ferramentas cerâmicas e informações na literatura que estas ferramentas possuem potencial para usinagem em altas velocidades de corte. Assim, os testes preliminares permitiram usar velocidades de corte o dobro das utilizadas na usinagem do ferro fundido cinzento com ferramentas de metal duro.

A maior importância foi dada a velocidade de corte (V_c) e avanço (f) por serem os que mais influenciam no desgaste da ferramenta, forças de corte e rugosidades das peças. Os testes de usinagem foram realizados no laboratório de usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP, utilizando o centro de torneamento CNC (Romi GL240M) de 18 kW. Foram realizados 21 passes nas peças para cada avanço dentro de uma única velocidade de corte utilizando aresta de corte nova (sem uso) e com réplicas. Durante os testes de usinagem do ferro fundido cinzento, a cada três passes foram avaliadas as rugosidades, (R_a e R_z), forças de corte, temperaturas de usinagem e verificação de desgastes na ferramenta de corte. Todas as condições de usinagem foram compostas de duas réplicas para avaliação da reciprocidade dos resultados e verificação de possíveis avarias nas ferramentas.

4.4.1 Preparação Ferro Fundido Cinzento

O ferro fundido cinzento perlítico GG25 (DIN1691) possui composição química de 3,0 % de carbono, 2,0 % de silício e 0,6 % de manganês fornecido pela Fundição Tupy, o qual foi caracterizado quanto a microestrutura para análise de seu aspecto e observância da presença de grafita livre conforme pode ser observado na Figura 3. Os resultados de propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento fornecido pela indústria foi resistência à tração de 245-280 MPa, dureza variando de 205-230 HB e a resistência à fadiga de 100 Mpa, valores em concordância com Fiorini, [49]. Foram preparados nove (9) corpos de provas na forma cilíndrica com dimensões de 210 mm (parte útil) de comprimento e diâmetro inicial de 84 e final de 44 mm.

Figura 4 - Microestrutura do ferro fundido cinzento após superfícies polidas e atacada com 3 % de nital.



Fonte: Próprio autor.

4.4.2 Os parâmetros de usinagem

Os parâmetros de usinagem utilizados estão descritos na Tabela 1, e foram constituídos de duas réplicas.

Tabela 1 – Parâmetros de usinagem utilizados no trabalho.

Parâmetro	V_c (m/min)	f (mm/rot)	a_p (mm)
1	300	0,10	1,00
2	400	0,20	1,00
3	500	0,30	1,00
4	300	0,10	1,00
5	400	0,20	1,00
6	500	0,30	1,00
7	300	0,10	1,00
8	400	0,20	1,00
9	500	0,30	1,00

Fonte: Próprio autor.

Conforme descrito no item 4.4. Os parâmetros de usinagem foram escolhidos com base na literatura utilizada para metal duro e informações de aplicações de ferramentas cerâmicas em altas velocidades de corte. A análise de desempenho da ferramenta foi realizada a cada três

passadas percorrendo 252 mm (três passos) constituídos de duas réplicas. Após cada três passes, a ferramenta de corte foi removida para análise dos tipos de mecanismos atuante e monitoramento dos desgastes. As rugosidades R_a (μm) e R_z (μm) foram realizadas com três medidas ao longo do corpo de prova, defasadas de 120° de cada medida e determinação da média para confecção do gráfico. Durante os ensaios foram utilizados equipamentos para análise de forças de corte e temperatura de usinagem.

4.5 Equipamentos e ferramentas de corte utilizado

Neste item são demonstrados e especificados todos os equipamentos utilizados na usinagem do ferro fundido cinzento e nas análises dos resultados. Os testes de torneamento foram realizados em um centro de torneamento modelo ROMI GL240M, alocado no Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG-UNESP), conforme Figura 4:

Figura 5 - Centro de torneamento modelo ROMI GL240M situado no DMT, FEG-UNESP.

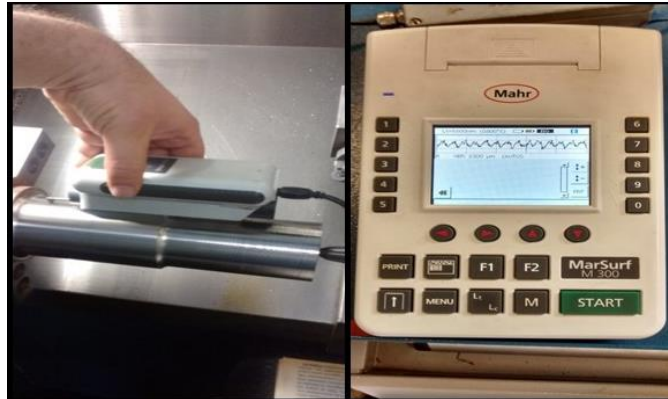


Fonte: Próprio autor.

4.5.1 Rugosidades R_a e R_z

As rugosidades foram obtidas utilizando rugosímetro portátil (Mahr M300) para obtenção do perfil de acabamento superficial das peças em todas as condições específicas. Foram considerados os parâmetros R_a (Rugosidade média) e R_z (Rugosidade média) para um comprimento de amostragem ou “cut-off” adotado foi de 0,8mm de acordo com a norma ISO 4288:2000 [61], ilustrado na Figura 5.

Figura 6 - Rugosímetro portátil modelo MAHR MARSURF M300 + Rd18.



Fonte: Próprio autor.

4.5.2 Medidas de forças de corte (F_c , F_f e F_a)

Foi utilizado um dinamômetro piezoelétrico conectado ao torno CNC auxiliado por um amplificador de marca Kistler (Kistler Brasil Ltda) que permitiu a realização de medidas das componentes de forças de usinagem denominada como, força de corte principal - F_c (na direção tangencial à barra), avanço força - F_f (na direção axial) e força de avanço - F_t (na direção radial). Uma conexão de computador para aquisição de dados foi utilizada e calibrada, permitindo assim a avaliação numérica dos dados.

4.5.3 Medidas das temperaturas (T_c)

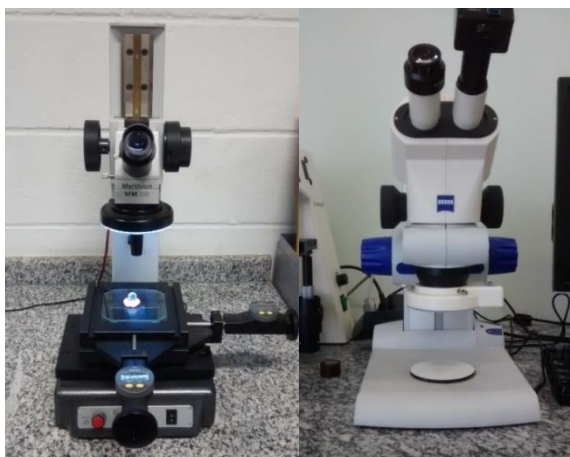
A temperatura média foi obtida pela medida a cada três passes coletando sempre acima de nove (9) medidas foram em condições de corte estável usando um pirômetro infravermelho sem contato (Raytek MI3, Fluke Company-Brasil) com pontual mira a laser na interface ferramenta e a peça fixado no carro contra ponta usando suporte de fixável à uma distância de 200 mm, conforme descrito em Souza et al. (2009) [51].

4.5.4 Medidas de Desgastes (VB)

A avaliação dos desgastes foi realizada levando em consideração o maior desgaste encontrado em cada aresta de corte da ferramenta controlando o valor ao parametrizado de VB, de acordo com a norma ISO 3685 [62]. Os ensaios foram acompanhados pelo uso de um sistema composto de uma lupa e medições a cada três passos usando um microscópio Mar Vision MM 200, ilustrado na Figura 6a. As imagens da aresta de corte da ferramenta após 21 passos foram

obtidas em um microscópio Zeiss modelo Stemi 2000 equipado com uma câmera digital e software de processamento de imagens, conforme ilustrado na Figura 6b.

Figura 7a e 7b - Microscópio Mar Vision MM 200 e Zeiss modelo Stemi 2000.



Fonte: Próprio autor.

5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item será abordado um pequeno comentário sobre as propriedades da ferramenta cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ e em seguida uma discussão dos resultados obtidos na usinagem do ferro fundido cinzento.

5.1 Análise dos resultados de propriedades da ferramenta de corte

Abaixo na Tabela 2 estão os valores obtidos das propriedades da ferramenta utilizando o procedimento experimental descrito nos itens.

Tabela 2 – Valores obtidos das propriedades da ferramenta de corte.

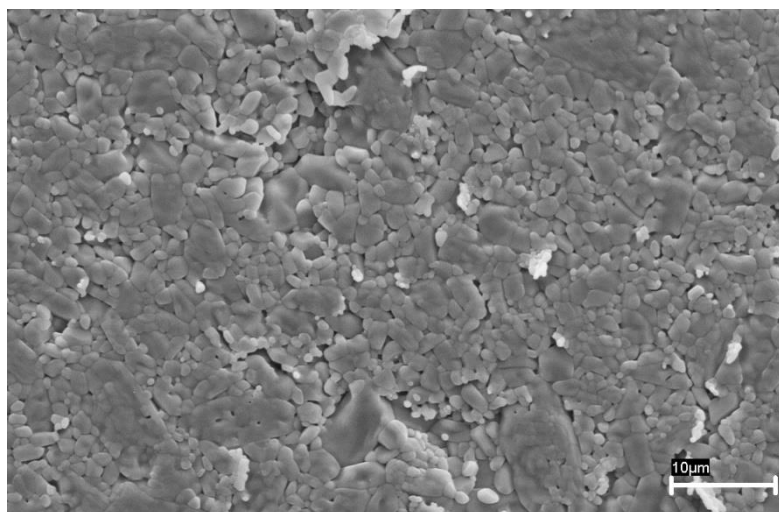
Propriedades	Valores
Densidade relativa (%)	$98,14 \pm 0,13 \%$
Dureza (GPa)	$20,94 \pm 0,08 \%$
Tenacidade à fratura ($\text{MPa.m}^{1/2}$)	$3,25 \pm 0,22 \%$
Retração linear	$19,80 \pm 0,15 \%$

Fonte: Próprio autor.

O lote de ferramenta de corte $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ apresentou densidade relativa de $98,14 \pm 0,13$ % e retração linear de $19,80 \pm 0,15$ % indicando uma boa densificação durante a sinterização, comprovando a eficiência dos estudos preliminares adotados neste trabalho. Os resultados de dureza Vickers e tenacidade à fratura obtidos para esta ferramenta de corte foram $20,94 \pm 0,08$ % GPa e $3,25 \pm 0,22$ %, respectivamente. Os valores de dureza obtidos são em função da adição de 1 % de Cr_2O_3 na composição, uma vez que o Cr_2O_3 permite a obtenção de grãos menores. Os resultados obtidos se comparados à alumina monolítica em condições de processamento semelhante conforme a literatura são superiores e são considerados adequados para uso como ferramenta de usinagem [51].

A Figura 7 mostra a microestrutura obtida pelo microscópio eletrônico de varredura, onde é possível observar uma microestrutura duplex composta por pequena quantidade de grãos grandes de alumina (Al_2O_3), e uma maior predominância de grãos com tamanhos médios de $1,5 - 2,5\mu\text{m}$. Esta diferença pode estar associada ao processo de moagem e/ou homogeneização.

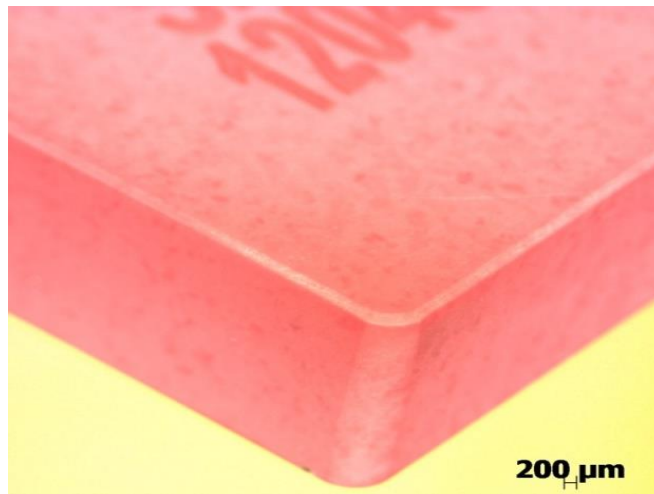
Figura 8 - Microestrutura da ferramenta de corte.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 8 podem ser observados os detalhes da ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ nas dimensões $12,76 \times 12,76 \times 4,76$ mm conforme codificação SNGN120408-T0220 ($r_e=0,8$ mm, $b_{\gamma n}=0,20$ mm, $\gamma_{nc}=-20^\circ$).

Figura 9 - Detalhe da Aresta da ferramenta de corte no estereoscópio.



Fonte: Próprio autor.

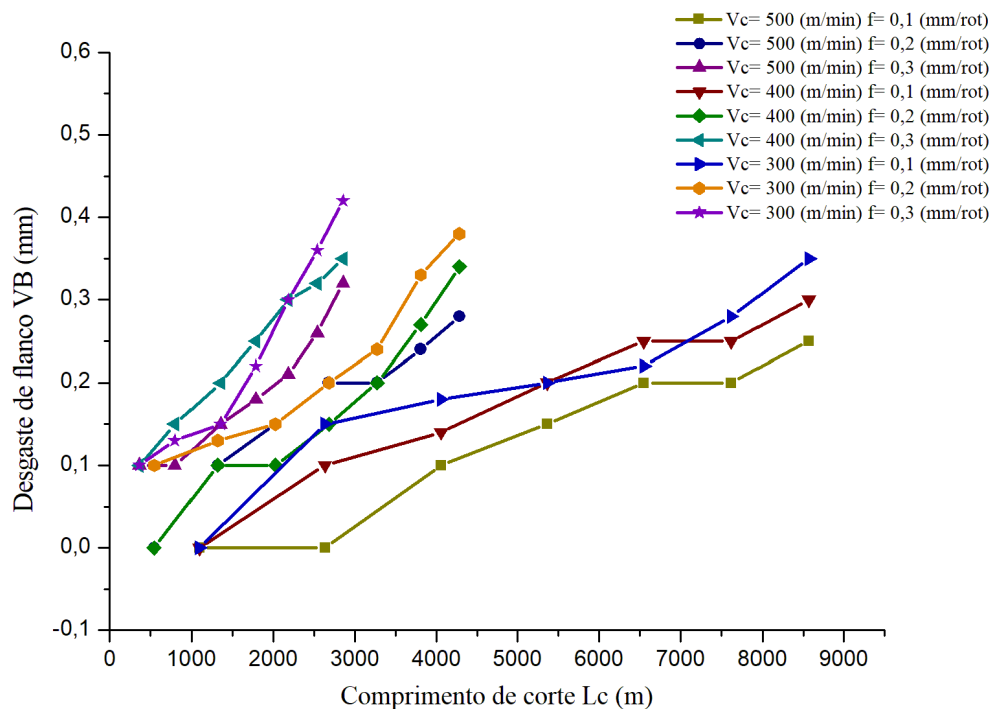
5.2 Análise dos resultados dos testes de usinagem

No processo de usinagem utilizando ferramentas cerâmicas uma das análises mais importante é a observação de sua integridade. A primeira observação realizada nas ferramentas de corte foi visual, onde observou-se que em todas as condições a ferramenta de corte não apresentou fratura durante o torneamento. Isso sugere que as propriedades das ferramentas são promissoras e os parâmetros de corte utilizados foram adequados para o torneamento do ferro fundido cinzento. Sendo assim os resultados obtidos durante os testes de usinagem são demonstrados em forma de Gráficos e Figuras após réplicas dos testes. Os resultados obtidos são em função dos desgastes ocorridos nas ferramentas, temperatura de usinagem, forças de corte e rugosidades. De uma maneira geral todos os resultados demonstram que a ferramenta de corte possui potencial para usinagem em altas velocidades de corte.

5.2.1 Desgaste do Flanco da Ferramenta VB (mm)

Na Figura 9 é possível observar o desgaste do flanco médio (VB) em milímetros, de acordo com a Norma ISO 3685 [52]. O gráfico demonstra as variações de desgaste de flanco em função do comprimento de corte (Lc) em metros.

Figura 10 - Relação do desgaste do flanco (VB) versus comprimento de corte (Lc).



Fonte: Próprio autor.

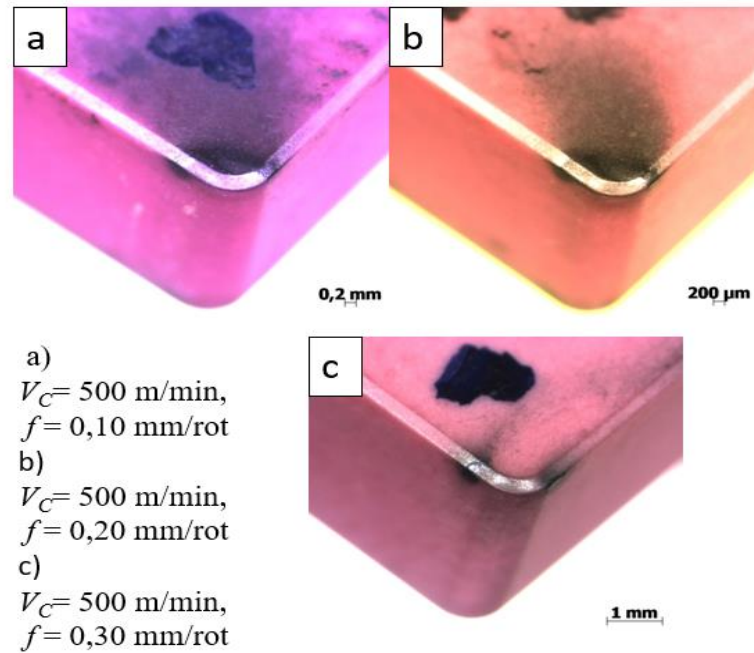
Analisando a Figura 9, pode-se observar que a velocidade de corte possui influência positiva na usinagem utilizando-se a ferramenta de corte de $Al_2O_3 + Cr_2O_3$. Pode ser observado que com o aumento da velocidade de corte e redução do avanço a ferramenta de corte promoveu maior comprimento de corte e menor tendência ao desgaste de flanco. Isso pode estar relacionado com uma melhor acomodação da ferramenta na peça devido aos parâmetros utilizados e a possível ação da temperatura de usinagem. Na Figura 9, pode ser observado que utilizando $V_c = 500$ m/min e avanço $f = 0,1$ mm/rot, o desgaste do flanco foi menor. Entretanto em velocidades de corte menores e avanços de $f = 0,2$ e $0,3$ mm/rot, pode ser observado que a tendência do desgaste foi aumentar com a redução da velocidade de corte e o aumento do avanço. É importante ressaltar que os comprimentos de corte foram diferentes em função das variações de avanços, mas no estudo foram utilizados 21 passes para todas as condições.

5.2.2 Desgaste da ferramenta de corte

Neste item são demonstrados os desgastes ocorridos na face da ferramenta de $Al_2O_3-Cr_2O_3$ aplicada no torneamento do ferro fundido cinzento. Na Figura 10, pode ser observado o desgaste de flanco medido após 21 passos utilizando $V_c = 300, 400$ e 500 m/min com avanço variando

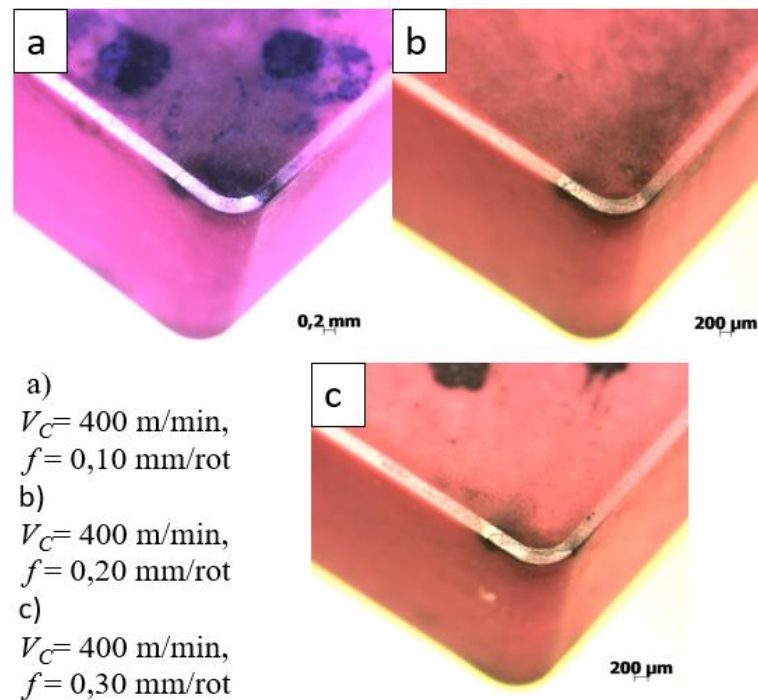
de 0,1, 0,2 e 0,3 mm/rotação e profundidade de corte constante de 1,00 mm.

Figura 11 - Desgaste de flanco para velocidade de corte de $V_c=500$ m/min variando o avanço f .



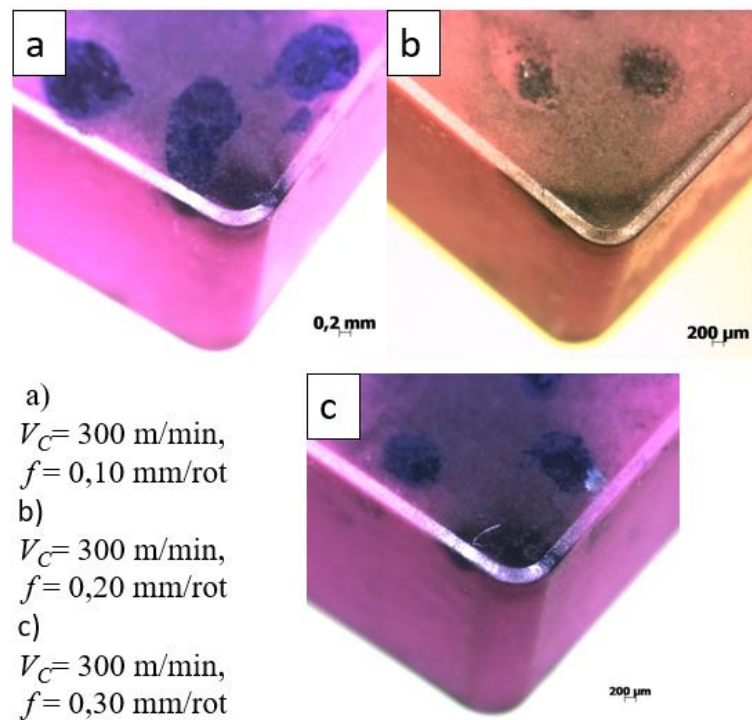
Fonte: Próprio autor.

Figura 12 - Desgaste de flanco para velocidade de corte de $V_c=400$ m/min variando o avanço f .



Fonte: Próprio autor.

Figura 13 - Desgaste de flanco para velocidade de corte de $V_c=300$ m/min variando o avanço f .



Fonte: Próprio autor.

Os resultados observados nas Figuras 10, 11 e 12 estão em concordância com os obtidos na Figura 9. Quando é feita a análise das figuras obtidas no microscópio Zeiss, pode ser observado que os desgastes de flanco possuem variações médias de 0,2 a 0,4 mm dependendo das condições de usinagem. Fato importante a ressaltar é que nas condições de avanço de 0,10 mm/rot. os desgastes foram inferiores quando do uso de 0,20 e 0,3mm/rot. Pode-se destacar que o melhor desempenho ocorreu na $V_c= 500$ m/min. Isso está associado à melhor estabilização entre a ferramenta de corte e o ferro fundido cinzento, quando utilizamos o avanço de 0,10mm/rot.

Observando as características da superfície das ferramentas de corte podem ser observados traços do contato da ferramenta com a peça usinada e também a saída de cavacos.

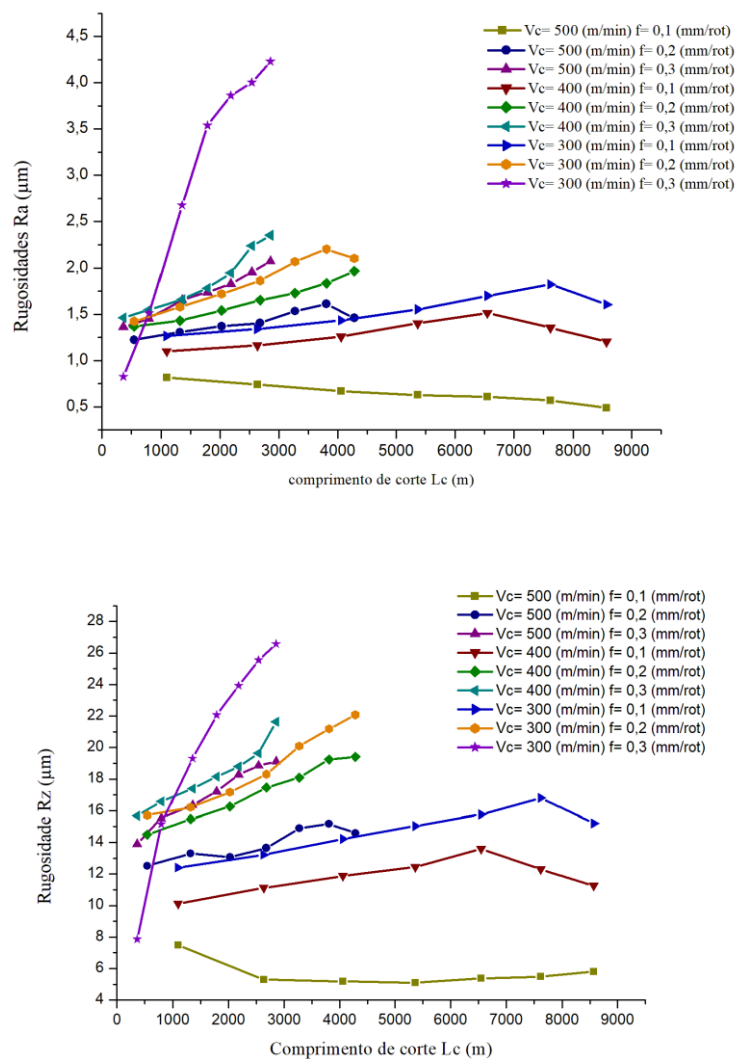
Na usinagem do ferro fundido cinzento, quando há um aumento da temperatura de corte, a tendência é melhorar o desempenho da ferramenta. Há uma ação do grafite em proteger a aresta de corte, reduzindo vibrações, diminuindo as forças de corte e melhorando o acabamento superficial das peças, conforme observado por Souza (2009) [51]. As condições de corte utilizadas neste trabalho demonstram através da cor escura (preto grafite) traços das variações na saída dos cavacos sobre a superfície das ferramentas quando se deram variações nos avanços

e nas velocidades de corte.

5.2.3 Análises das rugosidades R_a e R_z das peças usinadas

Na Figura 13 são demonstrados os valores de rugosidades R_a e R_z (μm) obtidos nas condições utilizadas.

Figura 14 – a) Rugosidades R_a (μm) e b) Rugosidades R_z (μm) em relação ao comprimento de corte L_c (mm).



Fonte: Próprio autor.

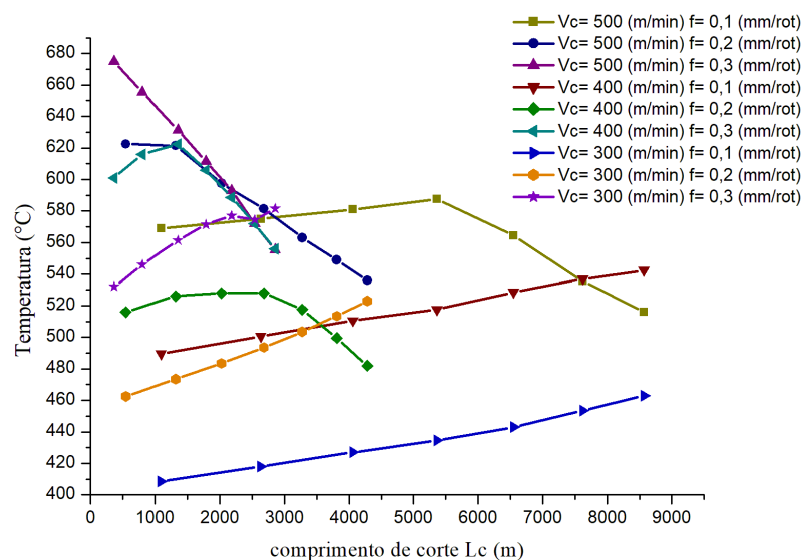
Nas Figuras 13 a) e b) podem ser observados as variações de rugosidades R_a e R_z em função dos comprimentos de corte para cada condição. Nestas Figuras foi observado que os avanços possuem influência predominante nos valores de rugosidades das peças. Conforme Diniz

(2013) [46] o avanço é o que mais influência na rugosidade de peça, sendo que o maior avanço promove maior rugosidade. Entretanto, foi observado neste trabalho que a $V_c = 500 \text{ m/min}$ promoveu menores valores de rugosidades para ambos R_a e R_z , tanto para $f = 0,10 \text{ mm/rot}$ quanto para $f = 0,20 \text{ mm/rot}$. Esses resultados podem ser atribuídos às propriedades obtidas da ferramenta de corte também aos parâmetros de usinagem utilizados. Porém, estes resultados foram obtidos em alta velocidade de corte, é visto que com a redução da velocidade de corte e aumento de avanços de $0,10 \text{ mm/rot}$ para $0,30 \text{ mm/rot}$, os valores de rugosidades aumentaram de maneira significativa. Possivelmente, os resultados positivos obtidos em maiores velocidades são em função de uma melhor estabilização entre a ferramenta de corte e a peça além da influência do cavaco pela estabilização da temperatura de usinagem em uma pequena região, promovendo uma condição mais suave do processo de usinagem.

5.2.4 Temperatura durante a usinagem

Na Figura 14 é demonstrada a ação da temperatura de usinagem ($^{\circ}\text{C}$) em função do comprimento de corte (m).

Figura 15 - Temperatura de usinagem ($^{\circ}\text{C}$) versus comprimento de corte L_c (m).



Fonte: Próprio autor.

Nos processos de usinagem utilizando ferramentas de corte de materiais cerâmicos a temperatura de corte tem grande importância em seus resultados. Na usinagem de ferro fundido cinzento utilizando ferramentas cerâmicas a temperatura na interface entre a ferramenta e a peça

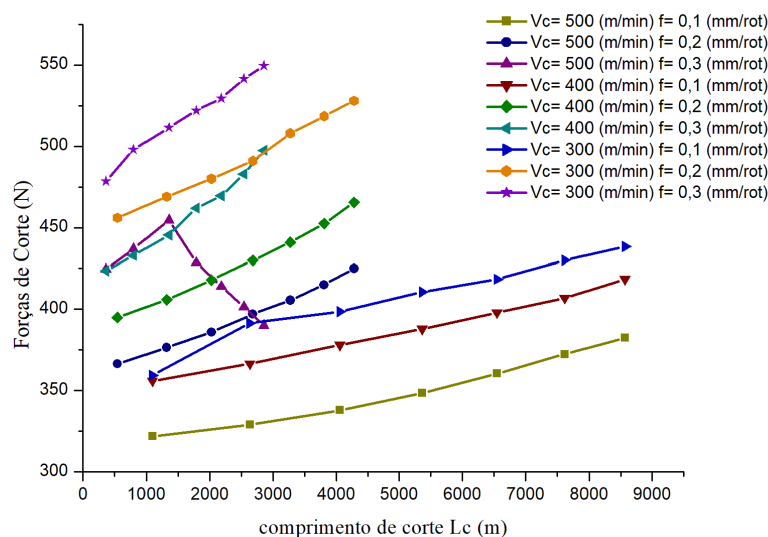
possui efeitos benéficos dependendo dos parâmetros de usinagem. Em concordância com resultados obtidos por Souza (2009) [51], pode ser observado nas $V_c=400$ e 500 m/min e avanço $0,10$ mm/rot. um campo de temperatura que expressa maior estabilidade no processo de usinagem. Entretanto, na $V_c=500$ m/min as variações ao longo do comprimento de corte são evidentes e com tendência a redução. Isso pode estar relacionado com a fluência do grafite do material da peça para a interface da ferramenta e a peça reduzindo o atrito e melhorando a acomodação da ferramenta de corte. Se esta condição promove um melhor desempenho pode-se afirmar que a relação ferramenta de corte e a peça são estáveis e o desgaste tende a ser menor nesta condição.

Nas $V_c=300$ e 400 m/min as variações de temperaturas são grandes durante o comprimento de corte, o que demonstra uma não estabilidade entre a ferramenta de corte e a peça, o que normalmente causa maiores rugosidades e variações dos desgastes.

5.2.5 Análise das forças de corte

Na Figura 15 é possível observar as variações das forças de corte (N) em função do comprimento de corte (m).

Figura 16 - Forças de Corte (N) em função do comprimento de corte (m).



Fonte: Próprio autor.

As forças de corte em um processo de usinagem têm como finalidade demonstrar a estabilidade do processo. Na Figura 15, pode ser observado que as forças de corte foram

menores para os menores avanços. Isso está relacionado com a área de corte da ferramenta. Entretanto, nota-se que quanto maiores as velocidades de corte maior a tendência das forças de corte diminuírem. A associação desses parâmetros de corte promoveu uma redução da dureza na superfície da peça que sofreu compressão e a ação da temperatura de corte que juntamente com a presença de grafite reduz o atrito, expulsa os cavacos e promove menores forças de corte. Neste trabalho a menor força de corte foi obtida na $V_c = 500\text{m/min}$ e avanço $0,10\text{ mm/rot.}$, o que sugere que na usinagem do ferro fundido cinzento utilizando ferramentas cerâmicas a alta velocidade de corte em congruência com menores avanços reduz as forças de corte e melhora o desempenho da ferramenta. Isso sugere que as ferramentas cerâmicas são apropriadas para realização de usinagem de acabamento sem a utilização de fluidos de corte.

6- CONCLUSÃO

As conclusões obtidas neste trabalho ainda não estão finalizadas devido ao momento atípico. Inicialmente foi feito um planejamento experimental que abrangia mais testes e análises em que seriam explorados maiores comprimentos de corte a cada condição. Porém os testes preliminares, compostos de réplicas, que foram realizados já foram suficientes para estabelecer as afirmações que estão descritas a seguir.

Dos resultados obtidos pode-se observar uma forte correlação entre as propriedades físicas e mecânicas da ferramenta de corte e o desempenho. A melhor condição de usinagem observada neste trabalho foi a $V_c = 500\text{m/min}$ e avanço $0,10\text{mm/rot.}$ com menor força de corte, menores rugosidades (R_a e R_z) e temperatura de corte estável, o que pode ser considerado um campo ideal de temperatura na usinagem do ferro fundido cinzento. Isso demonstra que a ferramenta possui potencial para usinagem do ferro fundido em altas velocidades de corte.

Os resultados nos indicam que a ferramenta de corte pode apresentar importante redução de custo no processo de usinagem em função da maior velocidade de corte, menor tempo de usinagem, sem necessidade de realização de processos secundários. Cabe ainda salientar que a não utilização de fluido de corte resulta em maior sustentabilidade ao processo, requisito este imprescindível aos projetos desenvolvidos atualmente.

REFERÊNCIAS

- [1] WHITNEY, D. Ceramic Cutting Tools, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Comprehensive Hard Materials, v.2, p. 49105, 2015.
- [2] Perfil da indústria brasileira. <https://industriabrasileira.portaldaindustria.com.br/grafico/total/producao/#!/industria-total>. Acesso em 02/07/2021.
- [3] MINTON, T.; GHANI, S.; SAMMLER, F.; BATEMAN, R.; FURSTMANN, P.; ROEDER, M. Temperature of internally-cooled diamond-coated tools for dry-cutting titanium. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 75, p. 27–35, 2013.
- [4] YIGIT, R.; CELIK, E.; FINDIK, F.; KOKSAL, S. Tool life performance of multilayer hard coatings produced by HTCVD for machining of nodular cast iron. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 26, p. 514–524, 2008.
- [5] Associação Brasileira de Fundição. <https://www.abifa.org.br/industria-de-fundicao-inicia-2021-com-crescimento-da-producao-e-do-consumo-interno/>. Acesso 02/07/2021.
- [6] CHIAVERINI, V. “Aços e Ferros fundidos”. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7ª ed., 1996.
- [7] CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais. LTC - Livros Técnicos e Científicos S/A., 7ª ed., 2014.
- [8] ASHBY, M.F.; JONES, D.R.H. Engenharia de Materiais, Elsevier Editora, 2007.
- [9] VANVLACK, L.H. Princípios de Ciência e Tecnologia de Materiais, 4ª ed., Campus, 1984.
- [10] SERBINO, E. M. Um estudo dos mecanismos de desgaste em discos de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar. Tese de mestrado - Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [11] WHITE, C. V. ASM Handbook 9th Ed, ASM international, v. 1, p.12, 1998.
- [12] American Society for Testing and Materials. ASTM A48 / A48M-03(2016) - Standard Specification for Gray Iron Castings, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [13] MACHADO, A. R. et al. Usinagem dos Metais. São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, 2009.
- [14] AFS. Iron Casting Handbook. American Foundry Society, p. 420, 2003.
- [15] ACCHAR, W. Materiais Cerâmicos: Ciência e Tecnologia. EDUFRN, Rio Grande do Norte, v. 111, p. 13-14, 2000.

- [16] OKADA, A. Automotive and industrial applications of structural ceramics in Japan. Nissan Research Center. Nissan Motor Co. Japan, Ltd., Yokosuka, p. 237-8523, 2007.
- [17] FAN, K.; PASTOR, J. Y.; RUIZ-HERVIAS, J.; GURAUSKIS, J.; BAUDIN, C. Determination of mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y-TZP}$ ceramic composites: Influence of testing method and residual stresses. *Ceramics International*, v. 42, p. 18700–18710, 2016.
- [18] KONDO, M. Y.; PINHEIRO, C.; PAULA, M. A.; SOUZA, T. A.; SOUZA, J.V.C.; RIBEIRO, M.V.; ALVES, M. C. S. Cutting parameters influence investigations on cutting consumed power, surface roughness and tool wear during turning of superalloy VAT 32 with PVD coated carbide tools using Taguchi method. *Mater. Res. Express*, v.6, 066543, 2019.
- [19] GONÇALVES, D. P. Análise e investigação de impactos em blindagem composta cerâmica/metal. Dissertação de mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2000.
- [20] INÁCIO, M.A. Desenvolvimento de compósitos cerâmicos de Al_2O_3 e ZrO_2 . Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2010.
- [21] AZHAR, A. Z. A.; MOHAMED, H.; CHOONG, C. L.; RATNAM, M. M.; AHMAD, A. Z. Effects of Cr_2O_3 addition on the mechanical properties, microstructure and wear performance of zirconia-toughened–alumina (ZTA) cutting inserts. *J. Alloy. Compd.* v. 513 p. 91–96, 2012.
- [22] FONSECA, S.T. Processamento e Caracterização de Pós e de Cerâmicas de Alumina Total e Parcialmente Nanoestruturadas. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2010.
- [23] SASSERON, et al; Sinterização de cerâmicas a base de alumina, zircônia e titânio. Anais do 50º congresso brasileiro de cerâmica, 2007.
- [24] XAVIER, C.; COSTA, C. R. C. Study on mechanical behavior of alumina plates under ballistic impact. *Ceramic Brazilian Congress*, v. 28, p. 161–168, 1984.
- [25] EIGHERY, A. J.; IRVINE, J. T. S. Effect of alumina additions upon electrical properties of 8% mol yttria-stabilised zirconia. *Solid Stat Ionics*, v.121, p. 209-216, 1999.
- [26] COSTA, B.J. Importância das Características do Pó no Processamento das Cerâmicas Avançadas. 38º Congresso Brasileiro de Cerâmica, p. 416, 1994.
- [27] PICON, F. C. et al. Síntese de pigmentos de Al_2O_3 dopado com cromo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais CBCIMAT Natal, 2002, Natal. Anais .Natsl,2002. Disponível em: https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2002/arqs_pdf/pdf_100/tc109-090.pdf
- [28] FRANÇA, Edilon. **Usinagem do ferro fundido vermicular com ferramenta de metal duro e cerâmicas de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$** . Orientador: Dr. Manoel Cléber de

Sampaio Alves Guaratinguetá-SP 2020. 2020. Doutorado (Engenharia Mecânica) - UNESP - FEG, [S. l.], 2020.

[29] R. ASKELAND, Donald. **The science and Engineering of Materials**. 6. ed. [S. l.]: Cengage Learning, 2010.

[30] Technical Ceramics Market. <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-technical-ceramics-market>. Acesso em 03/03/2021.

[31] Advanced Ceramics Market: Global Industry Perspective, Comprehensive Analysis And Forecast, 2018-2025. <https://www.zionmarketresearch.com/inquiry/advanced-ceramics-market>. Acesso em 03/03/2021.

[32] BRANDT, G. Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials, 1991.

[33] Ceramic Materials In Cutting Tools. <https://www.ukessays.com/essays/engineering/the-ceramic-materials-used-in-cutting-tools-engineering-essay.php#aluminium-oxide-based-ceramics>. Acesso em 25/05/2021.

[34] RIZZO, A.; GOEL, S.; GRILLI, M.L.; IGLESIAS, R.; JAWORSKA, L., LAPKOVSKIS, V., NOVAK, P.; POSTOLNYI, B.O.; VALERINI, D. The critical raw materials in cutting tools for machining applications: a review. *Materials*, v. 13, 10.3390/ma13061377, 2020.

[35] GOGOTSI, Y.G. Particulate silicon nitride-based composites. *J. Mater. Sci.*, v. 29, p. 2541-2556, 1994.

[36] LIU, C.C.; HUANG, J.L. Effect of the electrical discharge machining on strength and reliability of TiN/Si₃N₄ composites. *Ceram. Int.*, v. 29, p. 679-687, 2003.

[37] TOKITA, M.; BLDG, E.; SC. K., KSP, P. Mechanism of spark plasma sintering Ceramics. 2011.

[38] LI, L.; LI, Y. Development and trend of ceramic cutting tools from the perspective of mechanical processing. *Earth and Environmental Science*, v. 94, 012062, 2017.

[39] BOSIO, F.; BASSINI, E.; SALAZAR, C. G. O.; UGUES, D.; PEILA, D. The influence of microstructure on abrasive wear resistance of selected cemented carbide grades operating as cutting tools in dry and foam conditioned soil. *Wear*, v. 394–395, p. 203-216, 2018.

[40] TAN, D.; CHEN, Z.; WEI, W.; SONG, B.; WANG, C. Wear behavior and mechanism of TiB₂-based ceramic inserts in high-speed cutting of Ti₆-Al₄V alloy. *Ceramics international*, v. 46, p. 8135-8144, 2020.

[41] WANG, X.; ZHAO, J.; CUI, E.; SONG, S.; LIU, H.; SONG, W. Microstructure, mechanical properties and toughening mechanisms of graphene reinforced Al₂O₃-WC-TiC composite ceramic tool material. *Ceramics international*, v. 45, p. 10321-10329, 2019.

- [42] RENZ, A.; KHADER, Y.; KAILER, A. Tribochemical wear of cutting-tool ceramics in sliding contact against a nickel-base alloy. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 36, p. 705-717, 2016.
- [43] NI, X.; ZHAO, J.; WANG, F.; GONG, F.; ZHONG, X.; TAO, H. Failure analysis of ceramic tool in intermittent turning of hardened steel. *Journal of Engineering Manufacture* <https://doi.org/10.1177/0954405416684156>, 2017.
- [44] MOLAIEKIYA, F.; ARAMESH, M.; VELDHUIS, S. C. Chip formation and tribological behavior in high-speed milling of IN718 with ceramic tools. *Wear*, v. 446–447, 203191, 2020.
- [45] MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. O. *Teoria da Usinagem dos Materiais*, São Paulo: Blucher, 2011.
- [46] DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. São Paulo: M.M., 2013.
- [47] Cision PR Newswire. <https://www.prnewswire.com/news-releases/machining-market-to-reach-414-17-billion-by-2022--says-beroe-inc-300939464.html>. Acesso em 05/06/2021.
- [48] WANG, B.; LIU, Z.; CAI, Y.; LUO, X; MA, H.; SONG, Q.; XIONG, Z. Advancements in material removal mechanism and surface integrity of high speed metal cutting: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v 166, 2021.
- [49] FIORINI, P.; BYRNE, G. The influence of built-up layer formation on cutting performance of GG25 grey cast iron. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 65, p. 93–96, 2016.
- [50] TELES, M.T. Torneamento do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizando ferramentas de metal duro. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Itajubá, 2007.
- [51] SOUZA, J. V. C.; NONO, M. C. A.; RIBEIRO, M. V.; MACHADO, J. P. B.; SILVA, O. M. M. Cutting forces in turning of gray cast iron using silicon nitride based cutting tool. *Materials & Design*, v. 30, p. 2715-2720, 2009.
- [52] International Organization for Standardization. ISO 3685. Tool life testing with single point turning tools, p. 47, 1993.
- [53] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 1832: Pastilhas intercambiáveis para ferramentas de corte – Designação, 2016.
- [54] LIMA, F. F. **Estudo do desgaste de ferramentas de metal duro e cerâmicas no torneamento do Inconel751 e Inconel 718**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.
- [55] SOUSA, T.A. *et al.* Investigation of the performance of ceramic tools of alumina doped with magnesium oxide in the dry machining of compacted graphite iron. **Materials Research Express**, London, v. 6, n. 4, p.12, 2019.

- [56] FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2014. 671 p.
- [57] MOTA, P. R. **Estudo do processo de rosqueamento com macho de corte de metal duro em ferro fundido vermicular**. 2019. 106 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.
- [58] American Society for Testing and Materials. ASTM C1327-99- Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics, West Conshohocken, PA, 1999.
- [59] BAR-ON, I.; QUINN, G.; SALEM, J.; JENKINS, M. Development of ASTM C 1421-99 Standard Test Methods for Determination of Fracture Toughness of Advanced Ceramics, Fatigue and Fracture Mechanics, v. 32, p. 315-335, 2002.
- [60] ANSTIS, G., CHANTIKUL, P., LAWN, B. and MARSHALL, D. A. Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I, Direct Crack Measurements. Journal of the American Ceramic Society, v. 64, p. 533-538, 198.
- [61] SIST EN ISO 4288:2000 - Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture (ISO 4288:1996)
- [62] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 3685:2017; Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento, 2017.