Fundação Oswaldo Aranha

PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA E EXTENSÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

LEOPOLDO FERREIRA DE SOUSA

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS CERÂMICAS DE ALUMINA-ÍTRIA PARA APLICAÇÃO EM TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO NODULAR

VOLTA REDONDA - RJ
2013

Fundação Oswaldo Aranha

PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA E EXTENSÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS CERÂMICAS DE ALUMINA-ÍTRIA PARA APLICAÇÃO EM TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO NODULAR

Dissertação apresentada ao curso de mestrado profissional em materiais do UniFOA como requisito para obtenção do título de mestre em materiais

Aluno:
Leopoldo Ferreira de Sousa

Orientador:
José Vítor Cândido de Souza

VOLTA REDONDA - RJ
2013

FICHA CATALOGRÁFICA
Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

S725d Sousa, Leopoldo Ferreira de.
Desenvolvimento de ferramentas cerâmica de alumina-ítria para aplicação em torneamento do ferro fundido nodular. /Leopoldo Ferreira de Sousa. – Volta Redonda: UniFOA, 2013.

110 p. : Il

Orientador: José Vítor Cândido de Souza
Dissertação (mestrado) – UniFOA / Mestrado profissional em materiais, 2013.

1. Usinagem-dissertação. 2. Ferramentas de alumina. 3. Ferro fundido. I. Souza, José Vítor Cândido de. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 670

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Leopoldo Ferreira de Sousa

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS CERÂMICAS DE ALUMINA-ÍTRIA PARA APLICAÇÃO EM TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO NODULAR

Orientador:

Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza

Banca Examinadora

Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza

Prof. Dr. Claudinei dos Santos

Prof. Dr. Jalon de Morais Vieira

Dedico este trabalho a Deus,
à minha esposa Samantha,
aos meus pais Frederico e Marli, a
o meu irmão Emmanuel
e a todos que me ajudaram nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar a força e iluminar meu caminho nesta trajetória;

Ao professor Dr. José Vitor Candido pela oportunidade, orientação, colaboração e acima de tudo companheirismo;

Ao professor Dr. Claudinei dos Santos, que não somente coordena o curso, mas também nos encoraja diante dos desafios;

Ao Dr. Olivério Moreira de Macedo Silva, pelo apoio a este trabalho;

Aos amigos e companheiros de trabalho professor Francisco Clarete e professor Dr. Renato Françoso de Ávila que foram um grande suporte nos experimentos;

Ao amigo Tiago Oliveira pela grande ajuda disponibilizada;

Ao IFSudeste MG por ter cedido o laboratório utilizado na realização dos testes deste trabalho;

A CAPES, pelo apoio concebido na montagem do mestrado profissional;

À Sandvik pelo apoio e suporte técnico;

À fundição TUPY pelo fornecimento dos corpos de prova utilizados neste experimento;

Aos colegas e amigos do MEMAT pelo apoio e companheirismo; nesta caminhada juntos ao mesmo objetivo

A minha esposa, meus pais, irmão e amigos pela compreensão e apoio incondicional.

RESUMO

A necessidade de melhoria dos materiais para ferramentas de corte, redução de custos nos processos de usinagem e o avanço no desenvolvimento de novas ferramentas, estão diretamente relacionadas à competição do mercado, e aos avanços da engenharia de materiais, que a cada dia desenvolve novas ligas com propriedades especificas a uma determinada aplicação. Com objetivo de atender as necessidades das empresas que utilizam ferramentas cerâmicas em seus processos de usinagem, esse trabalho apresentou um caminho específico na caracterização da ferramenta cerâmica a base de alumina, com potencial de aplicação nas ligas de ferros fundido, com um baixo custo de aquisição, pois as ligas de ferramentas similares existentes no mercado apresentam altos preços de compra. As ferramentas foram caracterizadas quanto à dureza Vickers, tenacidade, densidade relativa e resistência à flexão e posteriormente submetida aos processos afiação e lapidação de acordo com a norma ISO 1832 (12,76 x 12,76 x 4,76 mm). As ferramentas foram submetidas aos testes de torneamento no ferro fundido nodular com dureza de 205 HB, com dimensões de ø105 × 300 mm, utilizando as velocidades de corte (V_c) de 200, 300, 400, 500 e 600 m/min., avanço (f) 0.25 e 0.10 mm/rot e profundidade de corte (a_p) de 0.50 mm. Os resultados dos testes foram demonstrados em forma de desgaste de flanco (V_b), rugosidade superficial (R_a e R_y) em função do comprimento de corte (Lc). Os resultados das caracterizações das ferramentas mostraram dureza de 12,10± 0,12 GPa, K_{ic} =8,6 MPa.m$^{1/2}$ e densidade relativa de 98,35±0,15%. Os resultados dos testes de torneamento mostraram que a ferramenta apresentou excelentes resultados nos testes de semi-desbaste e acabamento. Para V_c= 500 m/min., f= 0.25 mm/rot. e a_p= 0.50 mm. Com Lc=3500m, e V_c= 500 m/min., f= 0.10 mm/rot. e a_p= 0.50 mm, Lc=4300m. Em ambas as condições as rugosidades superficial (R_a e R_y) foram inferiores as demais condições utilizadas. Os resultados mostraram que essa ferramenta apresenta alto potencial para aplicação no torneamento do ferro fundido nodular.

Palavra Chave: Ferramentas de alumina, usinagem, itria, ferro fundido.

ABSTRACT

The advance in materials for cutting tools makes it necessary with objective to present cost reduction in the machining processes which are directly related to market competition, and new advancement in materials properties. Among materials the cast iron presents important application in automotives industry due to its high temperatures resistance and recent advance in mechanical properties. The objective this research is achieved to expectation of the industry that has been used ceramic cutting tools in machining processes. This work presented the specific rote of development, characterization and application of an alumina cutting tool on ductile cast iron, with a low cost because the alloys similar tools on the market have high purchase prices.The characterization were promoted in function of the hardness Vickers, fracture toughness and relative density with subsequent grinding and polishing processes of according to ISO 1832 (12.76 x 12.76 x 4.76 mm). The dry machining tests were performed on specimens of pearlitic-ferritic nodular (spheroidal) with hardness of 205HB, with dimensions of 300 × ø105 mm under varying cutting speeds of (V_c) 200, 300, 400, 500 and 600 m / min., feed rate (f) 0.25 and 0.10 mm/rev and constant depth of cut of (a_p) 0.50 mm. All experiments were conducted with replica. The sintered specimens presented 97.23 % of the theoretical density, mechanical properties like hardness and fracture toughness of 12.10 GPa and 8.6 MPa.m$^{1/2}$, respectively. The dry machining results were observed by light optical microscopy (LOM) in function of flank wear (V_b), cutting length (Lc) and surface finish (R_a and R_y). The dry machining tests showed that the alumina cutting tool presented higher performance of flank wear and surface roughness in function of cut length to V_c = 500 m / min., f = 0:25 mm / rev. and a_p = 0.50mm. With Lc = 3500m, and Vc = 500 m / min., f = 0:10 mm / rev. and ap = 0.50mm. with Lc = 4300m. The results showed that this cutting tool presented high potential in the dry turning of nodular cast iron, mainly at high cutting speeds with predominant abrasion ware.

Keyword: tools alumina, yttria, machining, cast iron

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE SIMBOLOS 15
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS 16
CAPÍTULO 1 17
1.1 Introdução 17
1.2 Motivação 19
1.3 Justificativas 19
1.4 Objetivo 20
1.5 Estrutura da dissertação 20
CAPÍTULO 2 22
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22
2.1 Materiais Cerâmicos 22
2.2 Propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos 23
2.3 Cerâmicas a base de alumina 26
2.4 Cerâmicas a base de ítria 26
2.5 Cerâmicas a base de Al_2O_3-Y_2O_3 26
2.6 Ferros Fundidos 27
2.7 Materiais para ferramentas de corte 28
2.7.1 Descrição dos materiais para ferramentas de corte 29
2.7.2 Ferramentas de corte de materiais cerâmicos 31
2.8 Aplicações de ferramentas de corte cerâmicas 32
2.8.1 Recomendações para aplicação de ferramentas de corte cerâmicas 33
2.9 Processos de usinagem 33
2.10 Máquinas operatrizes para usinagem 35
2.11 Torneamento 36
2.12 Vida útil da ferramenta de corte 37
2.13 Temperatura de usinagem 38
2.14 Forças de corte na usinagem 40
2.15 Principais Mecanismos de Desgaste 41
2.16 Desgaste nas ferramentas de corte 42
2.16.1 Desgaste de Cratera 42

2.16.2 Desgaste de flanco 43
2.16.3 Desgaste de entalhe 44
2.16.4 Lascamento 45
2.17 Usinabilidade dos materiais 45
2.18 Influência da velocidade de corte 46
2.18.1 Cálculo da velocidade de corte 47
2.18.2 Avanço da ferramenta 47
2.19 Geometrias das ferramentas de corte 47
2.20 Formatos das pastilhas 49
2.21 Classificação dos suportes porta pastilha 50
2.22 Rugosidade da superfície 50
2.22.1 Parâmetros Funcionais do Perfil de Rugosidade 53
2.23 Tolerância geométrica 54
2.23.1 Circularidade 55
2.24 Metodologias de Planejamento e Análise de Experimentos 56
2.25 Analise da regressão 58
2.25 Métodos de superfície de resposta (MSR) 59
CAPÍTULO 3 61
MATERIAIS E MÉTODOS 61
3.1 Fabricação e Caracterização da Ferramenta Desenvolvida 61
3.1.1 Matérias Primas 62
3.1.2 Preparação das Misturas 62
3.1.3 Compactação 62
3.1.3.1 Prensagem Uniaxial a Frio 62
3.1.3.2 Prensagem Isostática a Frio 63
3.1.4 Sinterização 64
3.1.5 Densidade Relativa 65
3.1.6 Preparação para Determinação da Tenacidade a Fratura 66
3.1.7 Microdureza Vickers (HV) 67
3.1.8 Tenacidade a Fratura (K_{IC}) 68
3.1.9 Microestrura 69
3.2 Testes de Usinagem 69
3.2.1 Ferro Fundido Nodular 70
3.2.2 Máquina Ferramenta 71

3.2.3 Porta Ferramenta 72
3.2.4 Inserto Cerâmico 72
3.2.5 Parâmetros de Usinagem..... 73
3.2.6 Medidas dos Desgastes das Ferramentas 74
3.2.7 Medida da Rugosidade..... 74
3.2.8 Determinação de Medidas de Circularidade 75
3.2.9 Análise Estatística dos Dados 76
CAPÍTULO 4 77
4. Resultados e Discussões..... 77
4.1 Microestrutura da Ferramenta Cerâmica 77
4.2 Microdureza Vickers 78
4.3 Tenacidade à Fratura (K_{1C}) 78
4.4 Densidade Relativa..... 78
4.5 Desgaste da Ferramenta..... 78
4.6 Análises dos Desgastes nas Micrografias das Ferramentas 80
4.7 Análises das Rugosidades Superficial (R_A, R_Y, e R_z)..... 82
4.8 Análises das Circularidades das Peças Após Torneamento..... 86
4.9 Análise Estatística dos Resultados 88
4.10 Análise dos Testes de Acabamento 92
CONCLUSÕES 100
SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS..... 102
Referências Bibliográficas..... 103

LISTA DE FIGURAS

Figura 01-Defeitos em materiais cerâmicos: 1. Riscos na superfície (externos); 2. Poros de sinterização, 3. Inclusões e 4. Contornos de grãos quebrados (internos) (Hübner, 1978)..... 25

Figura 02- Diagrama de fases Al2O3-Y2O3 (Parthasaranthy,2004).....27

Figura 03-Processo de Usinagem (Sandvik,2012)..... 34

Figura 04-Divisão dos custos de produção na usinagem (Kopac,1998) 35

Figura 05-Operação de torneamento (Souza,2005) 37

Figura 06-Distribuição de calor na ponta da ferramenta (Silva,2000).....39

Figura 07-Forças atuantes na usinagem (Ferraresi, 1977)..... 41

Figura 08-Desgaste de cratera de uma ferramenta de corte (Sandvik, 2012 e Almeida, 2010) 43

Figura 09-Desgaste de flanco de uma ferramenta de corte (Sandvik, 2012 e Almeida, 2010) 43

Figura 10-Desgaste de entalhe em uma ferramenta de corte (Sandvik, 2012 e Almeida, 2010) 44

Figura 11-Lascamento de uma ferramenta de corte (Sandvik, 2012 e Almeida, 2010)..... 45

Figura 12-Detalhes geométricos da ferramenta de torneamento (Diniz, 2013).....48

Figura 13-Detalhes da aresta de corte das ferramentas de torneamento. (Diniz, 2013) 49

Figura 14-Formato da ferramenta Fonte (Sandvik,2012) 49

Figura 15-Porta ferramenta com especificação PCLNR 2020 K 12 (Sandvik,2012).....50

Figura 16-Rugosidade média (Ra)..... 51

Figura 17-Rugosidade máxima (Ry)..... 51

Figura 18-Rugosidade total (Rz)..... 52

Figura 19-Curva de Abbott-Firestone e parâmetros da série Rk. (Almeida, 2010)..... 54

Figura 20(a)-Especificação do desenho (NBR 4287/2002)..... 55

Figura 20(b)-Interpretação da tolerância (NBR 4287/2002)..... 55

Figura 21-Planejamento fatorial 2^2 (Sacarpel, 2012)..... 57

Figura 22-Mostra o exemplo de gráfico de MSR. (Oliveira, 2012)..... 60

Figura 23-Plotagem do gráfico de curvas de nível do MSR. (Oliveira, 2012)..... 60

Figura 24- Etapas de fabricação e testes da ferramenta desenvolvida 61

Figura 25 - Vista geral da prensa hidráulica uniaxial utilizada na compactação a frio 63

Figura 26-Vista geral da prensa isostática KIP 100 E, marca Paul Weber. Observa-se a câmara de prensagem (à esquerda) e o painel de controle (à direita) 64

Figura 27 - Forno de sinterização, F1650 – MAITEC 65

Figura 28 - Vista geral da balança analítica eletrônica utilizada na pesagem dos corpos-de-prova para determinação da massa específica aparente 66

Figura 29 - Politriz automática utilizada na preparação dos corpos de prova 67

Figura 30-Vista geral do equipamento utilizado para determinação de microdureza Vickers 67

Figura 31 - Método e trinca para determinação da tenacidade 68

Figura 32 – Microdurômetro utilizado no experimento 68

Figura 33 - Microscópio eletrônico de varredura – MEV 69

Figura 34-Microestrutura típica no ferro fundido nodular (FUCO FE45012) 70

Figura 35-Corpo de prova nas dimensões de usinagem 71

Figura 36-(a)Torno CNC utilizado nos testes e (b) corpo de prova preso entre placa e ponta.71

Figura 37-Porta ferramentas marca Sandvick modelo DSBNR 2020K 12 72

Figura 38-(a)Vista frontal e lateral do inserto cerâmico e (b) utilização do inserto 73

Figura 39-Estereomicroscópio utilizado na medição do desgaste da ferramenta 74

Figura 40- (a) Rugosímetro utilizado nos testes e (b) três regiões de medida da rugosidade ..75

Figura 41-Medidas de circularidade com relógio comparador 75

Figura 42-Máquina Tridimensional utilizada para medidas de circularidade nos testes de acabamento 76

Figura 43 – Microestrutura da ferramenta desenvolvida com ampliação de 5000x 77

Figuras 44 (A) e (B) - Mostra a variações dos desgastes de flanco x comprimento de corte 80

Figuras 45 a - Desgaste de flanco na Vc 200m/min e b - desgaste de flanco na Vc 300m/min, ambas com avanço de 0,25mm/rot 81

Figuras 46 a - Desgaste de flanco na Vc 400m/min e b-desgaste de flanco na Vc 500m/min, ambas com avanço de 0,25mm/rot 81

Figuras 47 a - Desgaste de flanco Vc 500m/min e avanço de 0,1mm/rot e b-desgaste de flanco Vc 600m/min e avanço de 0,25mm/rot 82

Figura 48-desgaste de flanco Vc 600m/min e avanço de 0,1mm/rot.....82

Figura 49 (A) e (B) Rugosidade Ra em função do comprimento de corte 83

Figura 50 (A) e (B) Rugosidade Ry em função do comprimento de corte 84

Figuras 51 (A) e 44 (B) Rugosidade Rz em função do comprimento de corte 85

Figura 52 (A) e (B) – Circularidade em função do comprimento de corte 87

Figura 53-Gráfico Resíduos x Desgaste de Flanco Estimado 90

Figura 54-Superfície de resposta ao comprimento de corte 92

Figura 55-Rugosidade Ra em cada condição de usinagem 94

Figura 56-Rugosidade Rz em cada condição de usinagem 94

Figura 57-Rugosidade R_k em cada condição de usinagem 95

Figura 58-Rugosidade R_{pk} em cada condição de usinagem 96

Figura 59-Rugosidade R_{pk} em cada condição de usinagem 96

Figura 60-Rugosidade V_0 em cada condição de usinagem 97

Figura 61-Rugosidade M_{r1} em cada condição de usinagem 97

Figura 62-Rugosidade M_{r2} em cada condição de usinagem 98

Figura 63-comportamento da circularidade em cada teste realizado 99

LISTA DE TABELAS

Tabela 01- Indicação de estado de superfície e seus respectivos símbolos (NBR 4287/2002). 52

Tabela 02-Associação do Processo de Fabricação com sua Respectiva Rugosidade (Agostinho,1981).....53

Tabela 03-Técnicas de planejamento e análise de experimentos.....56

Tabela 04-Dimensões do porta ferramenta utilizado 72

Tabela 05-Mostra dos Parâmetros de corte utilizados nos testes de usinagem.....73

Tabela 06 - Mostra dos comprimento de corte alcançado.....79

Tabela 07- Dados estatísticos do comprimento de corte 88

Tabela 08-Modelo Estatístico Anova 89

Tabela 09-Mostra os resíduos estatísticos da análise 90

Tabela 10-Estimativa dos coeficientes 90

Tabela 11- Valor de R^2 e R^2 ajustado para a regressão linear 91

Tabela 12-Parâmetros de corte utilizados nos testes de acabamento.....93

LISTA DE SIMBOLOS

χ_r - ângulo de posição

β_0 - média global de todas as observações;

β_1 - metade do coeficiente global de A;

β_2 - metade do coeficiente global de B;

β_{12} - metade do coeficiente global da interação AB;

x_1 e x_2 - são as vaiáveis denotadas respectivamente de -1 e +1;

x_1x_2 - termo do produto cruzado, que representa a interação entre estas variáveis.

ε - termo aleatório;

σ_f - resistência à fratura

γ_i - energia específica de fratura

E - módulo de elasticidade

c - tamanho de defeito crítico

Y - fator geométrico

Fc - força de corte.

Ft - força de avanço.

Fp - força de profundidade.

Fu - força de usinagem.

Vc - velocidade de corte.

d - diâmetro torneado.

n - número de rotações por minuto.

f - avanço em mm/rot.

ap - profundidade de corte.

Ra - rugosidade média.

Ry - rugosidade pico-a-vale.

Rz - média das distâncias pico-a-vale de cinco cumprimentos de amostragem.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Standard for Testing Materials
ISO	International Standards Organization
DIN	Deutsches Institute fur Normung
MSR	Método de Superfície de Resposta
HSC	Usinagem a Altas Velocidades

CAPÍTULO 1

1.1 Introdução

O desenvolvimento de novos materiais para as mais diversas aplicações vem sendo objeto de importantes pesquisas realizadas em todo mundo, com o objetivo de atender as mais novas implicações do mercado consumidor. A crescente evolução tecnológica e o recente desequilíbrio na natureza trouxeram aos olhos do mundo a necessidade de novos desafios que permitam novos caminhos, aprimorando técnicas, produzindo novos materiais e novos conceitos de aplicação e caracterização.

Esses fatores já podem ser observados nas indústrias automobilísticas, que a cada dia buscam melhorias de desempenho de seus produtos (motores), redução de emissão de poluentes na atmosfera, redução de custo e outros. Portanto, isso está relacionado com as melhorias das propriedades dos materiais utilizados, que tem como consequência a dificuldade de manufatura, o qual eleva o custo de fabricação, principalmente nos processos de usinagem. Entre os materiais que apresentam dificuldade de usinagem nas indústrias automobilísticas estão os ferros fundidos, ligas de níquel, aços endurecidos e outros.

De modo geral todos os materiais vêm sofrendo certa evolução, e vale destacar, que os materiais cerâmicos mostram-se como importantes materiais no mundo moderno. Eles também são os mais antigos, mas as cerâmicas avançadas tiveram seu marco de evolução na década de 70 tendo alcançado resultados promissores de suas propriedades, sendo verificada inclusive, uma contínua evolução de sua aplicação em diversos segmentos. Isso fez com que os materiais cerâmicos passassem a fazer parte de uma tecnologia viabilizadora de produtos e equipamentos de ponta, promovendo um grande efeito multiplicador na economia com alto índice de alavancagem, ou seja, cada unidade monetária investida nesses materiais viabiliza ou exerce forte influência em um mercado de produtos onze vezes maior (Lanna et al, 2004).

Em pesquisa feita nos Estados Unidos, concluiu-se que o uso de materiais cerâmicos avançados cresceu 7 % anualmente até 2010, com significativo aumento de suas aplicações nas indústrias de segurança (blindagem balística), aeroespacial (revestimento de naves) automotivas (freios, filtros, sensores e outros), nas indústrias de manufaturas (ferramentas de

corte), etc. Essa pesquisa também relata os estudos realizados em 1995, 2000 e 2005, onde constatou que mais de 8.6 bilhões de dólares foi gasto pelas indústrias nesses tipos de cerâmicas, sendo previsto crescimentos ainda maiores para 2010 a 2015.

Os materiais cerâmicos compõem a moderna ciência e engenharia dos materiais. No Brasil uma geração de novos materiais com novas propriedades e desempenho é considerada a solução para obter produtos de alta qualidade e baixo custo, sendo, portanto, um determinante crucial de produtividade industrial e, consequentemente, da competitividade internacional (Souza, 2005). Guardadas as devidas proporções quando comparado com os países desenvolvidos, o Brasil possui uma razoável base científica e tecnológica no campo da ciência e engenharia de materiais (Santos, 2008). Porém, faz-se da ausência de ações previamente planejadas e de programas articulados envolvendo as universidades, centros de pesquisas e indústrias: o conjunto das atividades de P&D, em sua maioria, tem-se restringido aos elementos estruturais, composição e propriedades, não se fechando todo o ciclo de desenvolvimento e aplicação dos materiais (Lanna et al,2004).

Dentre os mais importantes processos de fabricação, destaca-se a usinagem que possui uma parcela considerável do custo final dos produtos, sendo de grande importância o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte que possibilitem trabalhar com velocidades cada vez maiores e a um custo cada vez mais reduzido. Vale destacar, que nos processos de usinagem, o sinergismo entre o desenvolvimento tecnológico, fatores econômicos e ambientais vêm proporcionando grandes necessidades de mudanças nos processos de fabricação. Estas mudanças não estão somente nos processos de manufatura dos materiais, mas também no surgimento de novas ferramentas que tenham um desempenho melhor, a um custo menor (Johnson,1981).

As vantagens prescritas das ferramentas cerâmicas em comparação com as de aços rápidos, metal duro e outras existentes no mercado são: a estabilidade térmica e química em altas temperaturas, e a excelente resistência ao desgaste (Larson,1990). Entretanto, as propriedades das ferramentas cerâmicas permitem a produção de peças usinadas dentro de baixas tolerâncias dimensionais, com menor tempo de parada e uma longa vida. Por outro lado, as ferramentas cerâmicas quando submetidas às intensas solicitações mecânicas, podem sofrer fratura sem aviso prévio (Larson,1991).

A seleção do material a ser usinado com ferramentas cerâmicas não é baseada somente no comportamento tribológico, mas requer uma avaliação prévia do seu desempenho, físico, químico e mecânico. Mas, isso ainda é um fantasma na aplicação das mesmas, sendo fator determinante nas aplicações dessas ferramentas pelas indústrias de manufatura brasileira (Vyas,1995).

Considerável esforço tem sido realizado pelos pesquisadores para popularização dessas ferramentas nos processos de manufatura, concentrando-se no desenvolvimento, caracterização e revestimento de novas ferramentas e teste de usinagem (Souza, 2011). As aplicações dessas ferramentas nos processos de usinagem podem resultar em significativos avanços nos processos de fabricação por usinagem, promovendo a viabilidade técnica e financeira desses processos.

1.2 Motivação

Recentemente, o desenvolvimento de novos materiais que possam reduzir o consumo de energia, poluição ar e resíduos industriais, têm despertado especial atenção por parte das autoridades públicas. Entre os recentes desenvolvimentos de materiais tem se destacado as cerâmicas estruturais que possuem grande aplicabilidade no meio industrial. Entres estas cerâmicas se destacam aquelas que podem ser utilizadas como ferramenta de corte a seco, reduzido os danos ao meio ambiente, a saúde humana e apresentando importante redução de custos. Todos estes fatores citados acima podem aliviar as empresas de possíveis pressões dos órgãos ambientais, e atenderão a vigente legislação de acordo com a ISO 1400. Esse trabalho tem como motivação o desenvolvimento de uma ferramenta de alumina-ítria para usinagem a seco atendendo às especificações legislativas e a nacionalização da tecnologia de fabricação de ferramentas de corte.

1.3 Justificativas

Do exposto no tópico motivação, e de existir um mercado em plena expansão no campo da usinagem com ferramentas cerâmicas e, pelo fato, de no Brasil ainda existir poucos estudos relacionados sobre o desenvolvimento e fabricação de ferramentas cerâmicas

limitando-se somente a aplicação das mesmas com informações de catálogos. Atualmente, as ferramentas cerâmicas são produzidas em sua quase totalidade no exterior, sendo estrategicamente interessante a nacionalização da tecnologia de fabricação desses produtos no Brasil.

Desta forma, espera-se que esse trabalho promova avanços no desenvolvimento de ferramentas de corte de materiais cerâmicos, com consequente melhoria da resistência mecânica (boa dureza, resistência e tenacidade à fratura) e ganhos na confiabilidade desses materiais, podendo assim evitar, ou reduzir, a sua importação, favorecendo o custo final destes produtos e dos materiais usinados, além de promover processos de usinagem saudáveis.

1.4 Objetivo

Esse trabalho pretende identificar a possibilidade de uso da ferramenta desenvolvida na usinagem por torneamento do ferro fundido nodular FUCO FE 45012 sem o uso de fluidos de corte, contribuindo para uma tecnologia ambientalmente correta.

Para isto este trabalho tem por objetivos a caracterização das propriedades de uma ferramenta de corte cerâmica a base de alumina yag desenvolvida em laboratório, e a realização de testes de usinagem por torneamento no ferro fundido nodular sem o uso de fluido refrigerante, para determinar quais os parâmetros de corte são ideais para a ferramenta desenvolvida.

1.5 Estrutura da dissertação

O presente trabalho foi planejado para ser executado de forma sistemática, constituindo das seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica.
- Seleção dos materiais.
- Caracterização dos materiais.
  - Propriedades físicas.
  - Propriedades mecânicas.

- Ensaios de usinagem.
- Aplicação do modelo estatístico de superfície de resposta.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Cerâmicos

Os materiais cerâmicos avançados são inorgânicos, não metálicos, com combinações de microestrutura fina, pureza e complexa combinação de estruturas cristalinas, controlada pelos aditivos. Esses materiais requerem um alto nível de processamento e excelência na engenharia de aplicação, diferenciando-se dos materiais cerâmicos convencionais.

De acordo com o centro de pesquisas estratégicas (2010), as cerâmicas avançadas destacam-se por sua resistência ao desgaste, resistência à corrosão, inércia química, estabilidade em altas temperaturas e leveza, promovendo propriedades superiores a muitos materiais e atualmente apresentam grande importância na aplicação das indústrias estratégicas. A combinação de propriedades oferecidas por esses materiais apresentam potencial especial para solução de inúmeros problemas de processos que envolvem transição de temperaturas durante o trabalho.

Acredita-se que o domínio do desenvolvimento em conjunto com a aplicação tecnológica, possa solucionar diversos problemas encontrados nas indústrias aeroespacial, aeronáutica, automobilística, petroquímica, etc. (Souza,2005).

De acordo com a agência de pesquisa BCC Research, que estuda vários tipos de materiais, produção técnica e aplicações emergentes, o desenvolvimento e aplicações de cerâmicas estruturais terão uma constante e emergente aplicação nas indústrias de vários segmentos. Estima-se para cerâmicas estruturais um grande mercado atual e que o crescimento será ainda mais acelerado do que o observado em 2010. Entre as cerâmicas estruturais pode se destacar as cerâmicas a base de alumina que são consideradas materiais avançados e de baixo custo, sendo considerada como um material que constitui uma tecnologia em processo de amadurecimento com grande base em vigentes aplicações de alto potencial e com crescimento promissor em diversas áreas (Okada, 2007).

2.2 Propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos

Embora o comportamento mecânico das cerâmicas seja de uma forma geral, superior ao dos outros materiais, eles apresentam características negativas em dois aspectos: (1) há uma grande dispersão nos valores da resistência à fratura, existindo uma probabilidade de falha mesmo sob tensões relativamente pequenas; (2) há a possibilidade de fadiga estática quando sob carga, o que significa uma queda considerável da resistência de uma peça que ficou submetida a uma carga constante durante o serviço (Kainess,2004).

Isso quer dizer que o nível de tensão que uma peça cerâmica consegue sustentar durante um longo tempo, por exemplo, 01 ano, é muito menor do que a tensão que provocaria a fratura em um ensaio rápido.

Estas duas implicações do comportamento mecânico prejudicam seriamente o desempenho dos materiais cerâmicos em serviço. Além dessas características, as propriedades mecânicas das cerâmicas são influenciadas pela composição de fases, alotropia e parâmetros micro estruturais, porosidade, tamanho e distribuição de grãos.

Atualmente pode ser considerado que as propriedades mecânicas são determinadas através de micro defeitos internos, (poros, micro trincas, inclusões, contornos de fases) e defeitos introduzidos durante o processo de fabricação. As pesquisas em materiais cerâmicos vêm se desenvolvendo com o emprego da mecânica da fratura, métodos tanto analíticos, quanto experimentais, que proporcionam aos engenheiros um critério seguro para avaliar o comportamento de peças cerâmicas em aplicações práticas

2.2.1 Modelo de comportamento mecânico

O comportamento mecânico dos materiais cerâmicos à temperatura ambiente é frágil, e a tensão de fratura pode ser expressa através da Equação 01 (Hübner, 1978):

$$\sigma_f = \frac{1}{Y}\left(\frac{2.\gamma_i.E}{c}\right)^{1/2} \qquad \text{Equação (1)}$$

Onde:

- σ_f : resistência à fratura
- γ_i : energia específica de fratura
- E: módulo de elasticidade
- c: tamanho de defeito crítico
- Y: fator geométrico, o qual depende da geometria da amostra e da trinca.

A energia de fratura (γ_i) é relacionada com a tenacidade à fratura, K_{IC}, pela equação de Irwin ($K_{IC}^2 = 2.\gamma_i.E$), que substituindo na Equação 2, obtém-se a relação da tenacidade com a resistência à fratura dada pela Equação 02 (Hübner, 1978):

$$K_{IC} = Y.\sigma_f.c^{1/2} \qquad \text{Equação (2)}$$

Observando a Equação 2, verifica-se que a resistência à fratura (σ_f) é controlada pela energia de fratura (γ_i), a qual representa a resistência do material contra a propagação de trincas, e é uma propriedade intrínseca do material sem defeitos (hipotético). Essa resistência à fratura depende de parâmetros micro estruturais, tais como morfologia e tamanho de grão. Porém, como indica a quantidade de energia consumida pelo processo de fratura, pode ser aumentada, através da adição de outras fases que dificultem a propagação de trincas.

No caso dos materiais reais, as propriedades mecânicas são extremamente influenciadas pela presença de defeitos, os quais podem ser introduzidos durante o processo de fabricação ou de acabamento. A Figura 01 apresenta possíveis defeitos que podem surgir durante as etapas de processamento destes materiais.

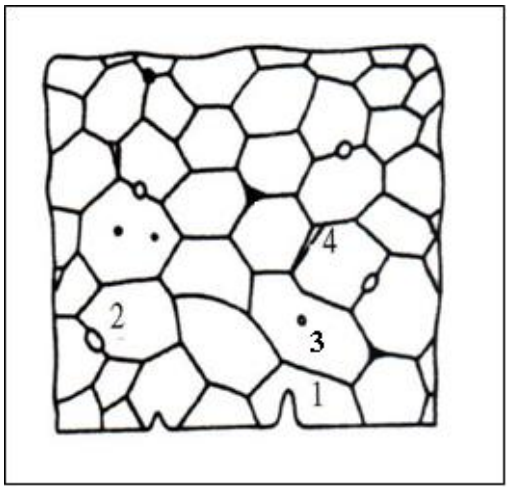


Figura 01- Defeitos em materiais cerâmicos: 1. Riscos na superfície (externos); 2. Poros de sinterização, 3. Inclusões e 4. Contornos de grãos quebrados (internos) (Hübner, 1978).

Sob uma determinada tensão aplicada existe um fator de intensidade de tensão atuando em cada micro defeito, o qual é altamente dependente das características intrínsecas do material, sendo a falha do material caracterizada quando o fator de intensidade de tensão crítico (K_{IC}), característico de cada material é atingido e denominado tenacidade à fratura do material. Partindo do que foi exposto, fica evidenciado que para aplicações estruturais o objetivo é a redução do tamanho e quantidade de defeitos para o menor valor possível e aumentar a energia consumida no processo de fratura.

Em baixas temperaturas (abaixo da temperatura de amolecimento da fase intergranular), as propriedades mecânicas são controladas pela presença de defeitos provenientes do processamento do corpo cerâmico, o qual é também controlado pelo arranjo dos grãos, pela presença de defeitos internos e defeitos introduzidos durante o processo de fabricação. Pela Equação 2 pode-se notar que a resistência à fratura (σ_f) é diretamente proporcional a tenacidade à fratura (K_{IC}) e inversamente proporcional ao tamanho dos defeitos.

Outro fator que altera essas propriedades é a composição dos pós de partida. Pesquisadores reportaram que a utilização de pós-obtidos através de diferentes sínteses (diferentes composição química, morfologia, tamanho médio de partículas, etc.) conduziram a diferentes densidades relativas e microestruturas e, por consequência, diferentes valores de resistência.

2.3 Cerâmicas a base de alumina

O óxido de alumínio (Al_2O_3) é um dos materiais cerâmicos especiais mais antigos utilizados de forma sinterizada. A primeira notícia do uso comercial foi em 1907, quando uma patente descreveu a produção de um material cerâmico de alta alumina. Entretanto, o uso em larga escala teve inicio só no final dos anos 20 e começo dos anos 30. O Óxido de Alumínio (Al_2O_3) é um dos mais utilizados mundialmente, onde algumas das suas características levam a essas preferências (Souza et all,2010), tais como: alta dureza, boa resistência ao desgaste, excelente estabilidade contra ataque químico e oxidação e boa estabilidade térmica. Estas propriedades permitem a utilização da alumina como material abrasivo, revestimento de fornos, componentes para implantes ortopédicos e odontológicos, pedras preciosas e aplicações nas áreas espaciais e aeroespaciais (Inácio, 2010 e Fonseca, 2010). Outro fator importante está na disponibilidade futura, onde se estima que as reservas ocidentais assegurem o fornecimento de pelo menos 200 anos (Souza et al,2010).

2.4 Cerâmicas a base de ítria

Nos últimos anos o óxido de ítrio vem ganhando espaço em diversas aplicações tecnológicas como fósforos para displays, lasers de estado sólido, televisores de alta definição, displays de plasma, tubos de raios catódicos, também como estabilizante estrutural da zircônia (ZrO_2). Estas aplicações são devidas tanto à evolução dos processos de purificação de óxidos cerâmicos, como também às suas características químicas e físicas: estrutura cristalina cúbica, elevado índice de refração (1,9), alta condutividade térmica em seu estado de alta pureza, elevado ponto de fusão (2400ºC), entre outros (Santos, 2008). Porém, existem outras aplicações que faz da ítria um material de destaque, tendo eficiência como aditivos de materiais cerâmicos covalentes e como dopantes de cerâmicas oxidas.

2.5 Cerâmicas a base de Al_2O_3-Y_2O_3

As cerâmicas de liga Al_2O_3-Y_2O_3 apresentam como vantagem em relação às outras cerâmicas uma alta resistência à oxidação, à corrosão em ambientes agressivos, e em elevadas temperaturas (Mizutani,2002). Estudos realizados na década de 90 (Li, 1999 e

Parthasaranthy,2004) mostraram que este óxido possui maior resistência a fluência dentre os cerâmicos. Este material é um componente em materiais compósitos, tanto como matriz como reforço. Sendo assim, a produção de compósitos Al_2O_3-Y_2O_3 tornam-se bastante atrativas para o mercado. A pesquisa mostrou a manutenção da temperatura deste material em temperaturas acima de 1500^0C. (Li, 1999)

A Figura 2 apresenta o diagrama de fases do sistema Al_2O_3-Y_2O_3, as linhas cheias representam o diagrama de equilíbrio eutético estável com composição eutética de 20,5 e 79,5 em percentual molar de Y_2O_3 e Al_2O_3. Nesta composição ocorre a formação do compósito Al_2O_3-YAG que possui ponto de fusão de 1824^0C

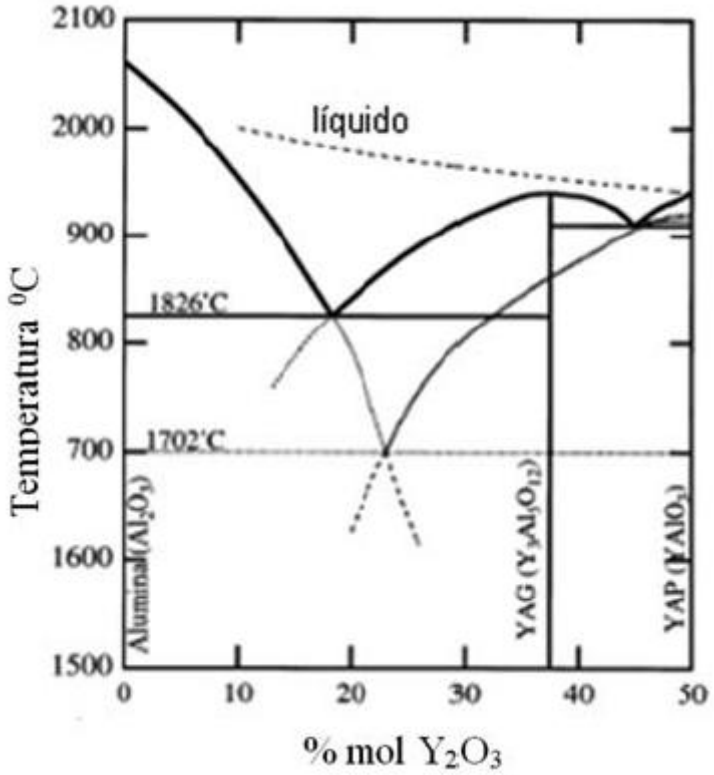


Figura 02- Diagrama de fases Al_2O_3-Y_2O_3 (Parthasaranthy,2004)

2.6 Ferros Fundidos

As ligas ferro-carbono com teor de carbono superior a 2% correspondem aos ferros fundidos. Porém o elevado teor de carbono dessas ligas e a presença sempre obrigatória do

elemento silício torna-se necessário considerá-las como uma liga ternária Fe-C-Si. Pode citar como exemplo os ferros fundidos branco, maleável, nodular e o cinzento.

O ferro fundido nodular é conhecido por sua ductilidade, mas, a vantagem mais importante tem sido seu alto módulo de elasticidade e resistência mecânica, em combinação com resistência a corrosão, fácil fundição e usinabilidade.

Esse material apresenta uma microestrutura típica caracterizada por nódulos, ou esferas de grafita. A matriz metálica, que envolve estas partículas pode ser ferrítica ou perlítica, ou ainda uma mistura destes dois, dependendo do tratamento térmico nele aplicado (Doré,2007). O ferro fundido nodular pode chegar a ter alongamento cerca de 20% dos aços fundidos, essa ductilidade elevada confere igualmente ao referido material razoável resistência ao choque e usinabilidade boa comparada ao ferro fundido cinzento (Chiaverini,2007).

2.7 Materiais para ferramentas de corte

O processo de usinagem utiliza como ferramenta um material mais duro que o da peça, é a operação mais comum entre os processos de fabricação existentes. Baseado no princípio da dureza relativa é óbvio que o surgimento de novos materiais, ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribuiu para o aparecimento de materiais de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem. Neste processo, as ferramentas de corte exercem importância fundamental, tanto no aspecto econômico quanto no resultado final das peças (Ferraresi,1977).

Por outro lado, a usinagem de materiais frágeis ou em operações de cortes interrompidos requer materiais de ferramentas tenazes o suficiente para suportar os choques e os impactos inerentes a tais processos (Machado,2009).

Como dureza e tenacidade são propriedades opostas, em uma análise superficial, alta dureza significa baixa tenacidade e assim se torna necessário um balanço entre estas duas propriedades dos materiais de ferramentas, o que se tornou um grande desafio aos pesquisadores e fabricantes de ferramentas. No mercado encontramos uma infinidade de ferramentas com variados valores de tenacidade e dureza. Essas variedades são obtidas

através de diferentes composições químicas, tamanhos de grão, controle dos processos de fabricação e tratamento térmico, o que lhes confere graus compatíveis de pureza e qualidade (Machado, 2009).

As ferramentas devem apresentar requisitos de maior ou menor importância dependendo de sua aplicação (Diniz,2006). As principais propriedades desejáveis em uma ferramenta de corte estão listadas nas literaturas, e de acordo com Machado, (2009), devem apresentar: alta dureza; tenacidade suficiente para evitar falha por fratura; alta resistência ao desgaste por abrasão; alta resistência à compressão; alta resistência ao cisalhamento; boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas; alta resistência ao choque térmico; alta resistência ao impacto e ser inerte quimicamente.

Porém, nenhum dos inúmeros materiais de ferramentas de corte disponível contempla todas as qualidades no mais alto grau. Deste modo, em cada trabalho específico devem-se verificar quais as exigências primordiais, de modo a se escolher o material mais adequado para cada caso.

Não existe uma classificação geral de materiais para ferramentas. No entanto, com base nas suas características químicas, dureza a alta temperatura e resistência ao desgaste por abrasão, os materiais podem ser agrupadas da seguinte maneira (Diniz,2006 e Ferraresi,1977);

- Aços-rápidos;
- Aços-rápidos com cobertura;
- Metal duro;
- Metal duro com cobertura;
- Material cerâmico;
- Nitreto de boro cúbico;
- Diamante.

2.7.1 Descrição dos materiais para ferramentas de corte

a) Aços Rápidos – é uma ferramenta de alta liga de tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio, cobalto e nióbio, assim designado, pois quando do seu desenvolvimento

em 1905, era o material de ferramenta que suportava as maiores velocidades de corte (Diniz,2006 e Ferraresi,1977).

b) Aços Rápidos com Cobertura – o desenvolvimento destas ferramentas tem caminhado no sentido de melhoria das condições do próprio aço rápido, através principalmente da aplicação de uma camada de cobertura de um material mais resistente ao desgaste como o nitreto de titânio e o carbonitreto de titânio (Diniz,2006).

c) Metal Duro – O metal duro é um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto) formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão. As partículas duras são carbonetos de tungstênio, usualmente em combinação com outros carbonetos, como de titânio, tântalo e nióbio (Diniz,2006 e Ferraresi,1977).

d) Metal Duro com Cobertura - Metal duro com cobertura de carboneto de titânio e/ou óxido de alumínio, nitreto de titânio e carbonitreto de titânio. A principal finalidade desta cobertura é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com a peça. (Diniz,2006 e Machado,2009)

e) Cerâmicas – apresenta algumas propriedades que são muito interessantes para uma ferramenta de usinagem, tais como dureza a quente e resistência ao desgaste, o que é muito importante quando se usina a altas velocidades e temperaturas, podem ser classificadas como a base de óxido de alumínio (AL_2O_3 – alumina) e a base de nitreto de silício (Si_3N_4) (Diniz, 2006 e Machado, 2009).

f) Nitreto de Boro Cúbico (Borazon, CBN, ou PCB) - é um material sintético obtido pela reação química:

$$BCI_4+NH_3=BN+3HCI$$

Onde o composto BN tem estrutura de grafite hexagonal com aproximadamente um número igual de átomos de boro e nitrogênio arranjados alternadamente. (Diniz,2006)

g) Diamante – Os diamantes naturais (monocristalinos) são dentre os materiais encontrados na natureza, os de maior dureza. Seriam ótimos materiais para ferramentas de corte se não fosse seu elevado preço. A partir da dificuldade de se utilizar o diamante natural como ferramenta de corte, partiu-se para uma obtenção artificial do diamante (Diniz, 2006).

2.7.2 Ferramentas de corte de materiais cerâmicos

Os materiais utilizados na fabricação de ferramentas cerâmicas requerem importantes propriedades como: (a) alta dureza (dureza maior ao material a ser usinado), (b) ausência de reação química com o material a ser usinado, (c) propriedades em altas temperaturas, (d) ausência de falha durante o processo de usinagem e outros. As ferramentas cerâmicas geralmente apresentam propriedades superiores nos itens de (a) a (c), e sua fragilidade durante a usinagem pode ser melhorada com adição de aditivos.

Melhorias das propriedades das ferramentas cerâmicas, certamente irão representar grandes avanços nos processos de usinagem. Até 1980, o mercado das ferramentas cerâmicas permaneceu quase estagnado, prevalecendo somente crescimento de outras ferramentas, tais como metal duro, aço rápido, cermets, etc. (Okada,2005).

O pouco uso das ferramentas cerâmicas estava relacionado com pequenos avanços no desenvolvimento de novas ferramentas cerâmicas, na modernidade das máquinas ferramentas, e possivelmente com o conservadorismo das equipes técnicas nas indústrias entre outros. Os pequenos avanços, pouca sensibilidade técnica e a falta de modernização das máquinas ferramentas quase sempre, levavam as ferramentas cerâmicas a sofrerem fratura em partes de suas arestas (Malère, 2006).

No Brasil parte dessas dificuldades começaram a ser resolvidas com trabalho de Silva, na década de 90 e tem seguido até o momento. Com os avanços alcançados nos desenvolvimento de materiais cerâmicos estruturais, as ferramentas cerâmicas passaram a integrar-se a família das mais importantes ferramentas nos processos de manufatura, se

destacando principalmente pela possibilidade de usinar a seco (sem o uso de fluidos refrigerante-lubrificantes).

Recentemente, os revestimentos vieram agregar ainda mais melhorias as ferramentas cerâmicas, aumentando seu desempenho e reduzindo sua fragilidade (Souza, 2011 e Doré, 2007). Nos dias de hoje as ferramentas cerâmicas são utilizadas nos processo de usinagem de altas velocidades, sendo as mais utilizadas de: Al_2O_3, Al_2O_3+TiC, SiAlON, β-Si_3N_4, Si_3N_4+SiC, CBN e outras cerâmicas (Yeckley, 2005).

Entre essas ferramentas, as de Al_2O_3 apresentam alto potencial para usinagem de ligas de ferro fundido e aços endurecidos, além de apresentar custo reduzido pela possibilidade de produção no Brasil, reduzindo assim a importação (Sousa, 2012 e Bhattacharyya *et al.*, 1989).

2.8 Aplicações de ferramentas de corte cerâmicas

As aplicações das ferramentas cerâmicas envolvendo alta temperatura é uma realidade. Enquanto as ferramentas de metal duro, aço rápido, cermets atingiram o limite em seu potencial de aplicação em função da temperatura de fusão. Em função disso, as ferramentas cerâmicas vêm ganhando espaços devido às poucas opções de materiais que suportam utilização em altas temperaturas de serviço, e que apresente baixa densidade, inércia química, alta resistência à abrasão e alta dureza, potencial recomendado para atender as necessidades dos processos atuais.

Outro fator importante que justifica o emprego de ferramentas cerâmicas e novas ferramentas revestidas diz respeito à redução na utilização de fluidos de corte. Essas ferramentas podem proporcionar uma adicional resistividade ao calor, mas não contemplam todos os outros benefícios do fluido de corte, tais como, remoção do calor gerado durante o processo e que pode afetar a peça de trabalho, redução da fricção, remoção do cavaco da região de corte, proteção da peça contra a oxidação e outras reações indesejáveis (Lanna, et all, 2004). Os custos com usinagem somente nos EUA são estimados em U$300 bilhões/ano (Souza, 2011). Os custos com o uso de fluidos de corte é estimado em aproximadamente 17% dos custos de manufatura. Consequentemente, a eliminação do uso de fluidos de corte, se possível, pode ser um significante incentivo (Ezugwu,2005 e Popke, 1999).

Os principais benefícios da usinagem a seco com cerâmicas e outras ferramentas é mais do que apenas a redução de custos, dizem respeito também a um ambiente de manufatura saudável, segurança do trabalhador, proteção dos efeitos adversos das químicas e proteção do nosso meio ambiente (Sousa et all, 2012). Por um longo tempo, em função das limitações dos materiais para ferramentas disponíveis, o uso de fluidos de corte foi considerado parte integral essencial do sistema máquina/ferramenta.

2.8.1 Recomendações para aplicação de ferramentas de corte cerâmicas

O desempenho das ferramentas cerâmicas está sujeito ao uso correto das técnicas de usinagem, escolha do material a ser usinado, sistema maquina/ferramenta e escolha do tipo de material cerâmico adequado para cada operação em particular. Alguns pré-requisitos devem ser considerados para garantir a obtenção de resultados satisfatórios da ferramenta:

- Seleção correta do material da pastilha e sua geometria, bem como portas-ferramenta, de acordo com o material a ser usinado e seu estado, e as condições de estabilidade do conjunto máquina-peça-ferramenta.

- Verificação das condições geométricas e dimensionais da peça, escolhendo corretamente a sequência operacional. Todas as informações acima mostram que a experiência do operador é fundamental para o sucesso desses tipos de ferramentas. Em recente trabalho (Souza, 2008) demonstrou a importância da escolha correta dos parâmetros de usinagem a serem utilizados no ferro fundido cinzento e ferro fundido vermicular.

2.9 Processos de usinagem

A usinagem pode ser entendida como sendo um processo de fabricação com remoção de cavaco, conferindo forma à peça, ou as dimensões ou acabamento necessário, baseado no movimento relativo entre a ferramenta de corte e a peça (Ferraresi,1977). A Figura 03 mostra o processo de usinagem.

Figura 03-Processo de usinagem (Sandvik,2012)

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10 % da produção mundial de metais, empregando milhões de pessoas. Apesar de toda essa popularidade, trata-se de um processo ainda bastante imprevisível (Machado, 2004). A usinagem possui ainda a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático, mas envolvendo um número bastante grande de variáveis, tornando muito difícil fazer uma previsão do que ocorre durante o andamento do processo.

Assim, tornam-se necessários estudos para que se tenha um aumento do desempenho das operações de usinagem, através da vida da ferramenta, forças de corte, potência consumida e superfície final da peça, para uma melhoria do desempenho econômico das operações de usinagem (Huang, 2007).

Os fabricantes de máquinas, por sua vez, acompanham essa evolução com máquinas cada vez mais rápidas e eficientes, assim como há atualmente a disponibilidade de programas de desenho auxiliado pelo computador (Computer Aided Desing)/ manufatura auxiliada por computador (Computer Aided Manufacturing) - CAD/CAM, para acompanhar a evolução dos novos materiais para ferramentas de corte, como o diamante sintético policristalino (PCD), nitreto cúbico de boro (CBN). Além de as ferramentas cerâmicas abrirem novas possibilidades de usinagem. Com essa evolução, surgiu recentemente a Usinagem a Altas Velocidades (HSC), que utiliza velocidades de corte bem acima das anteriormente utilizadas (Witting, 2002).

Os custos envolvidos no processo de usinagem são divididos entre ferramentas, equipamento, fluidos de corte (quando utilizado) entre outros. A Figura 04 mostra a parcela do custo de usinagem que cabe a cada parte.

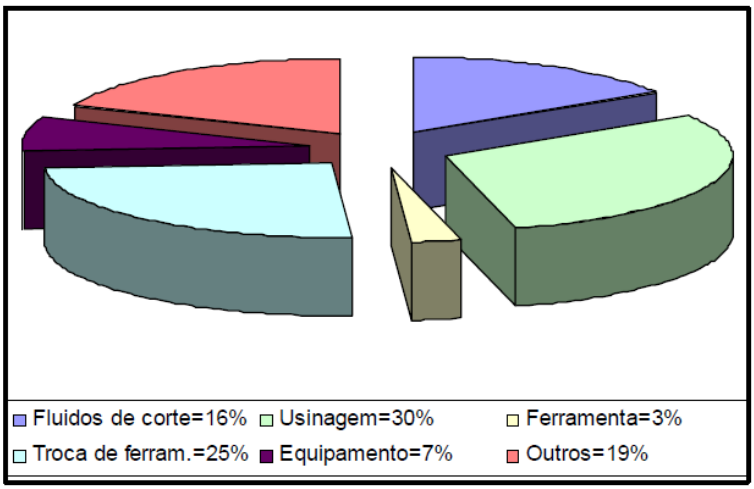


Figura 04-Divisão dos custos de produção na usinagem (Kopac,1998).

Apesar do custo com ferramentas ser apenas 3 % do custo total de produção, indiretamente a ferramenta tem grande influência nos custos de usinagem. Dentre estas ferramentas destacam-se as ferramentas cerâmicas como sendo um seguimento promissor na usinagem de varias ligas, somando de 5 a 7% em volume total de insertos (Lanna et al,2004).

As literaturas especializadas em ferramentas de corte de materiais cerâmicos citam como ponto positivo à utilização dessas sem a presença de fluido refrigerante e em altas velocidades, se destacando nos processos torneamento, fresamento, furação e retificação e etc. (Kitagawa, et all 1997).

2.10 Máquinas operatrizes para usinagem

Para utilização de ferramentas cerâmicas são recomendadas máquinas operatrizes que oferecem condições de rigidez e potência, que permitam trabalhar em altas velocidades sem se comprometer o processo. Entretanto, as máquinas operatrizes indicadas para utilização de ferramentas cerâmicas são as que possuem comando numérico. Portanto, em processos de usinagem por torneamento, o torno universal mecânico é descartado, embora possua grande versatilidade, não oferece grandes possibilidades de fabricação em série (Souza, 2005).

O uso de ferramentas cerâmicas não é complicado nesse tipo de equipamento 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. Para tanto no processo de usinagem com ferramentas cerâmicas, o torno automático com comando numérico (CNC) é indicado.

As principais virtudes do trabalho executado com o comando numérico são o dinamismo, a qualidade (precisão e acabamento), a racionalidade e a facilidade na solução de problemas complexos de usinagem, sem a necessidade de adoção de equipamentos ou dispositivos especiais.

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 (Romi,2008).

Os tornos automáticos com comando numérico têm grande capacidade de remoção de cavaco e executam todas as funções possíveis de torneamento (tornear, roscar, fresar, etc.). São máquinas de 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 (Souza,2005).

2.11 Torneamento

O torneamento é um processo de fabricação por usinagem destinada à obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas de corte. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória co-planar com o referido eixo. A Figura 05 mostra a ferramenta e a peça durante o processo de torneamento, Apud, Souza, (2005).

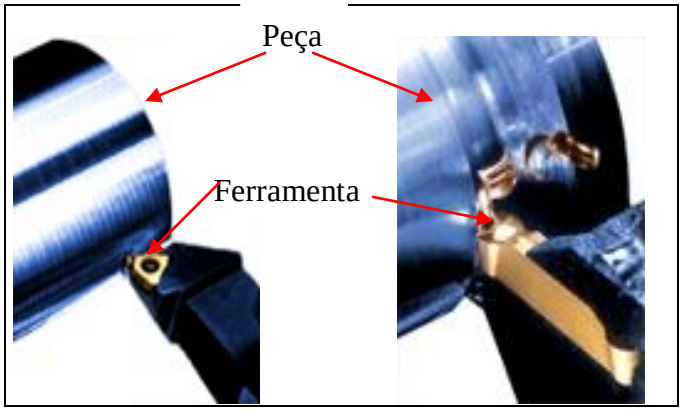


Figura 05- Operação de torneamento (Souza,2005)

Quanto à finalidade, o torneamento pode ser classificado como torneamento de desbaste e torneamento de acabamento. Entende-se como operação de acabamento, a operação de usinagem destinada a obter a peça em suas dimensões finais, ou acabamento superficial indicado no projeto, e a operação de desbaste é a operação anterior a de acabamento visando obtenção da peça em suas dimensões próximas das finais (Silva, 2009).

2.12 Vida útil da ferramenta de corte

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 de uma ferramenta de corte será definido pelo grau de desbaste estabelecido (Machado et all, 2004). Os fatores que determinam a fixação de um determinado valor limite de desgaste para o fim da vida da ferramenta são vários. A ferramenta deve ser substituída quando:

- Os desgastes atingirem proporções tão elevadas que se receia a quebra da aresta de corte. Isto é crítico em operações de desbaste onde, por não ser necessários a obtenção de tolerâncias apertadas e bons acabamentos superficiais, permite-se que o desgaste chega a valores altos.

- Quando o desgaste da superfície de folga da ferramenta, não ser mais possível à obtenção de tolerâncias apertadas e ou bons acabamentos superficiais. Isto é crítico em operações de acabamento.

- O desgaste cresce muito, fazendo com que a temperatura da aresta de corte ultrapasse a temperatura que ferramenta pode resistir.

- O aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interferindo no funcionamento do equipamento.

Através do controle desses fatores numa operação de usinagem, pode se saber quando a ferramenta deve ser substituída ou reafiada. Nas ferramentas cerâmicas verifica-se geralmente a quebra de pequenos fragmentos da aresta de corte (lascamento) antes que os desgastes de flanco e cratera atinjam valores acentuados (Diniz et al, 2013). A condição de usinagem tem grande influência na vida da ferramenta. A progressão do desgaste da ferramenta é influenciada principalmente pela velocidade de corte, seguida pelo avanço da ferramenta e por último pela profundidade de corte (Diniz et all, 2013, Ferraresi, 1977 e Machado, 2011).

A velocidade de corte é o parâmetro que mais influência no desgaste da ferramenta, devido ao aumento de energia (calor) que é imputada ao processo, sem o aumento da área da ferramenta que recebe esse calor (ponta da ferramenta). O aumento do avanço também aumenta a quantidade de calor imputada ao processo, porém, também aumenta a área da ferramenta que recebe esse calor. A influência da profundidade de corte é menor, já que ao ser aumentado, a profundidade de corte não mexe com a energia destinada ao corte por unidade de área, nem com a velocidade de retirada do cavaco, mas somente faz com que um volume maior seja retirado (Diniz et al, 2013). Outros fatores também influenciam na vida da ferramenta como: geometria, composição e dureza da ferramenta, fatores metalúrgicos e processo de obtenção do material da peça e características da máquina ferramenta.

2.13 Temperatura de usinagem

Praticamente toda a energia mecânica associada à formação do cavaco se transforma em energia térmica, ou seja, calor. As fontes de geração de calor no processo de usinagem são a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento, o atrito do cavaco com a ferramenta e o atrito da ferramenta com a peça (Diniz, 2013).

Somente uma pequena porcentagem (1 a 3%) não é convertida em energia térmica. Parte desta pequena porção fica retida no sistema como energia elástica, e outra parte está associada com a geração de novas superfícies (peça e cavaco) (Machado, 1996).

A distribuição do calor total devido a cada uma das fontes citadas acima depende do tipo de usinagem, do material da peça, da ferramenta, das condições de usinagem e da geometria da ferramenta. Porém, numa primeira aproximação, pode se dizer que a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento são as principais fontes geradoras de calor, seguidas pelo atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta e depois pelo atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta. (Souza, 2005) A Figura 06 mostra a distribuição do calor ao longo da ferramenta de corte.

Esse calor é dissipado através do cavaco, da peça, da ferramenta e do equipamento. O percentual de calor que é dissipado por cada um dos meios citados, depende dos parâmetros de usinagem e dos materiais da peça e da ferramenta. Apesar de apenas uma pequena parcela do calor gerado pode ser absorvido pela ferramenta, o aumento da temperatura associado com esse calor é significativo, chegando a 1200 °C, o que pode comprometer a resistência da ferramenta. (Silva,2000) A Figura 06 mostra a distribuição de temperatura na interface cavaco-ferramenta-peça.

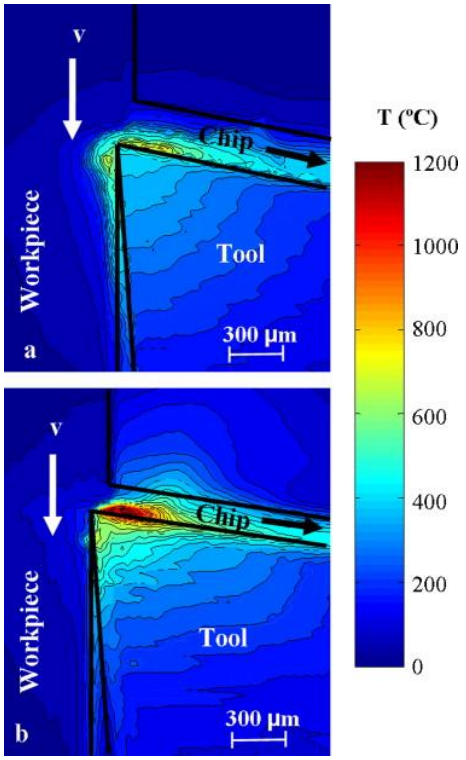


Figura 06 - Distribuição de calor na ponta da ferramenta. (Silva,2000)

O calor que vai para a peça pode resultar em dilatação térmica, causando variação dimensional das mesmas, além de correr o risco de danos microestruturais. A porcentagem de calor dissipado pelo cavaco cresce com o aumento da velocidade de corte. Em velocidades de corte muito altas, a maior parte do calor gerado é carregado pelo cavaco. Com relação à influência do material da peça na dissipação de calor por cada meio, quanto maior for à condutividade térmica do material, maior será a quantidade de calor dissipado pela peça.

O aumento na geração de calor acelera o desgaste da ferramenta, o qual aumenta o coeficiente de atrito e consequentemente as forças de corte. A temperatura na zona de corte também é influenciada pelo comprimento de contato entre o cavaco e a ferramenta e pelas forças de corte. Entretanto, para aumentar a produtividade do processo deve-se aumentar a velocidade de corte, o avanço e a profundidade do mesmo. Daí surge à necessidade do desenvolvimento de materiais para ferramentas de corte com maior resistência ao calor e consequentemente maior dureza a quente. (Lanna, 2004) Dentre eles estão o metal duro com cobertura, os materiais cerâmicos e o diamante.

2.14 Forças de corte na usinagem

É de suma importância o conhecimento dos esforços atuantes na aresta de corte durante o processo de usinagem, pois afetam a potência de corte, a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta. A força de usinagem pode ser a responsável direta pelo colapso da ferramenta de corte por deformação plástica aresta, além de influenciar no desenvolvimento de outros mecanismos de desgaste. (Diniz, 2013).

A força total resultante que atua na cunha de corte durante a usinagem é chamada de força de usinagem (F). Como nem a direção, nem o sentido da força de usinagem são conhecidos, tornando impossível medi-la e conhecer melhor as influências de diversos parâmetros no seu valor, trabalha-se com suas componentes segundo direções conhecidas. Assim, a força de usinagem é decomposta em três outras forças, força de corte (Fc), força de avanço (Ft) e força de profundidade (Fp) (Ferraresi,1977). Essas forças são dependentes de dois fatores principais: a área de contato cavaco-ferramenta e a resistência ao cisalhamento do

material da peça no plano de cisalhamento. A Figura 07 abaixo ilustra as direções das forças de corte durante o torneamento.

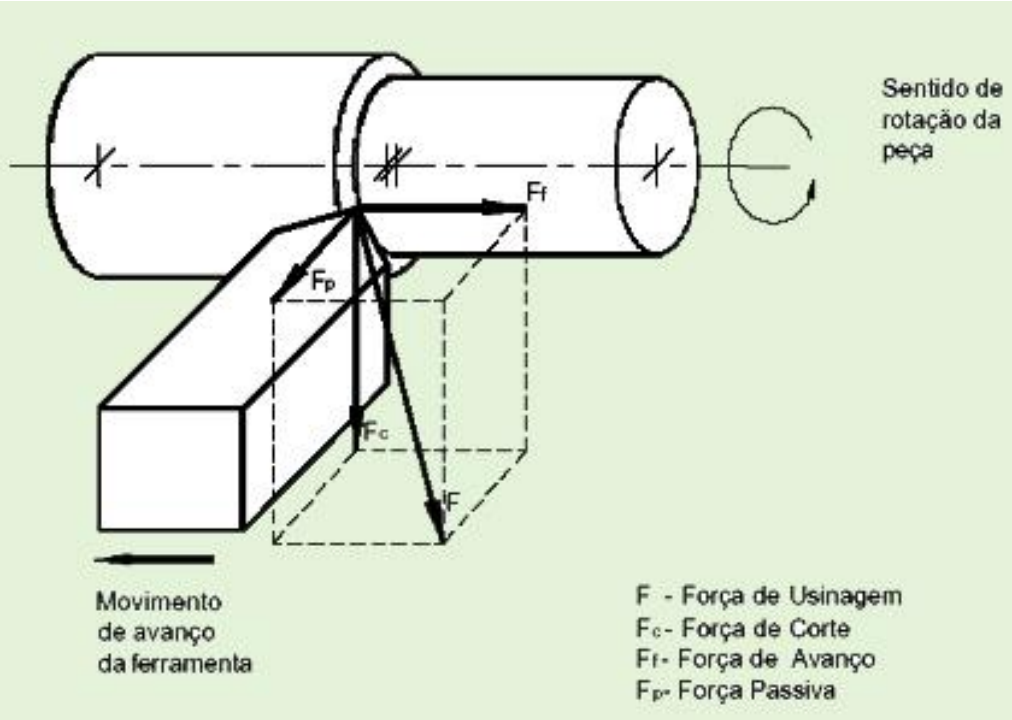


Figura 07- Forças atuantes na usinagem (Ferraresi,1977)

2.15 Principais Mecanismos de Desgaste

Em processos de corte em usinagem, uma ou mais formas de desgaste irá prevalecer, e eles se desenvolvem através de vários mecanismos de desgaste. Nas literaturas encontram-se várias classificações de mecanismos de desgaste.

Os mecanismos de desgaste não têm sido claramente estabelecidos, onde varias versões são apresentadas nas tentativas de explicá-los. Nenhuma delas é aceita plenamente por todos proponentes, mas todos concordam que uma superfície plana é constituída de asperezas com formas e distribuição irregulares. Então, quando dois corpos são colocados sobre o outro, ocorrem deformações plásticas e elásticas destas asperezas até que a área real de contato seja suficiente para suportar a carga. Entretanto, se uma força tangencial é aplicada a estes dois corpos ocorrem um processo de remoção de material, que pode ser maior ou menor dependendo das propriedades metalúrgicas destes corpos, solicitações térmicas, mecânicas, químicas e outras (Rodrigues,2004).

2.16 Desgaste nas ferramentas de corte

Durante o processo de usinagem a ação do corte muda a forma geométrica original da ferramenta de corte, ocorre um desgaste progressivo nas ferramentas, tanto na superfície de folga como na superfície de saída da ferramenta. Antes que algum destes desgastes atinja grandes proporções, de forma que coloque o processo em risco, a ferramenta deverá ser afiada ou substituída. A norma ISO 3685/1993, ("Tool life testing with single point turning tools") define os parâmetros que quantificam esses desgastes. Os principais são KT (profundidade de cratera), VB (desgaste de flanco médio), Vbmax (desgaste de flanco máximo) e VN (desgaste de entalhe).

O tempo que uma ferramenta de corte trabalha efetivamente antes de ser afiada ou substituída é denominado de "vida da ferramenta de corte". O fim da vida é determinado por um critério, de forma a manter o processo produtivo em condições econômicas. Os critérios determinados pela norma ISO para ferramentas de aço rápido, metal duro e cerâmica são:

Desgaste de flanco médio, VB_B=0,3 mm.

Desgaste de flanco máximo, VBmáx=0,6 mm.

Profundidade da cratera, KT=0,06+0,3f, sendo f o avanço em mm/rotação.

Falha catastrófica.

O desgaste nas ferramentas pode ocorrer de diversas formas, pelo menos três e/ou quatro formas principais podem ser identificadas:

2.16.1 Desgaste de Cratera

É o tipo de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco. Pode não ocorrer em alguns processos de usinagem, principalmente quando de utilizam ferramentas de metal duro recoberto, (a cobertura de alumina é a mais eficiente contra a caracterização), ferramentas cerâmicas quando o material da peça é frágil (gera cavacos curtos). O crescimento do desgaste de cratera resulta na quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste frontal. Diversos pesquisadores afirmam ser o mecanismo de difusão o principal causador do desgaste de

cratera (Almeida, 2010). A Figura 08 mostra o desgaste de cratera na superfície de saída da ferramenta.

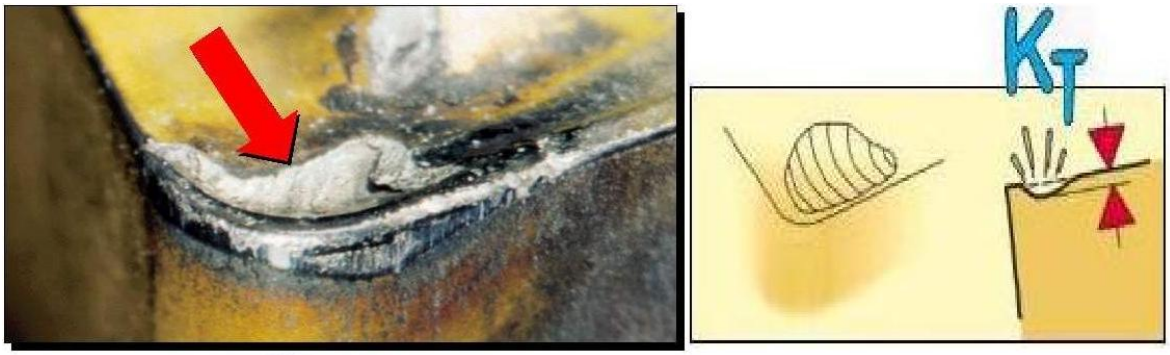


Figura 08-Desgaste de cratera de uma ferramenta de corte (Sandvik, 2012 e Almeida, 2010).

2.16.2 Desgaste de flanco

O Desgaste de Flanco ou Frontal ocorre na superfície de folga da ferramenta causado pelo contato entre a ferramenta e a peça, sendo o tipo de desgaste mais comum nas ferramentas de corte. Todo processo de usinagem causa desgaste frontal. Este tipo de desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, faz com que ocorram mudanças dimensionais na peça, podendo sair da faixa de tolerância. Este tipo de desgaste aumenta com o aumento da velocidade de corte (Almeida, 2010 e Sandvik, 2012). A Figura 09 apresenta detalhes do desgaste de flanco.

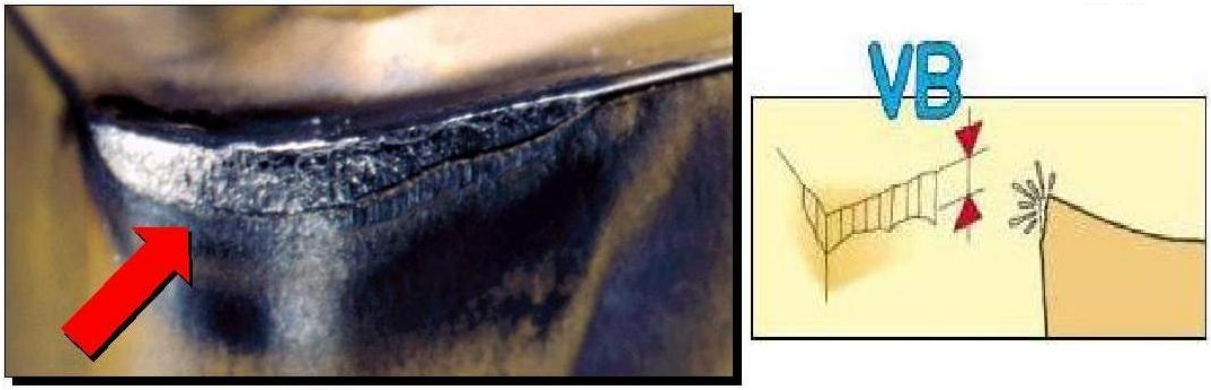


Figura 09-Desgaste de flanco de uma ferramenta de corte (Sandvik, 2012 e Almeida, 2010).

2.16.3 Desgaste de entalhe

Ainda não existe na literatura um consenso que explique exatamente o mecanismo que provoca o desgaste de entalhe. Por essa razão, é comum tratar esta forma de desgaste como um mecanismo. Ele ocorre principalmente na usinagem de materiais a altas temperaturas (ligas de níquel, titânio, cobalto e aço inoxidável). Geralmente, nas regiões ocorrem estes tipos de desgastes, as condições de escorregamento prevalecem e o mecanismo de desgaste, provavelmente envolve abrasão e transferência de material (difusão e arrancamento) e eles são bastante influenciados pelas interações com a atmosfera. Existem evidências para sugerir que óxidos se formam continuamente e aderem na ferramenta naquelas regiões, e quebra das junções de aderência entre óxidos e a ferramenta pode, ocasionalmente, remover material da superfície desta última. Segundo (RICHARDS and ASPINWAL, 1989), este tipo de entalhe é formado pelas rebarbas produzidas nas superfícies laterais do cavaco que produzem este desgaste devido ao mecanismo de aderência e arrancamento. Em 2002 Moreira observou na usinagem do Ti6Al4V que esse tipo de desgaste pode ocorrer tanto na superfície principal de folga como na superfície secundaria de folga da ferramenta, (MOREIRA 2002 e Sandvik, 2012). A Figura 10 apresenta o desgaste de entalhe.

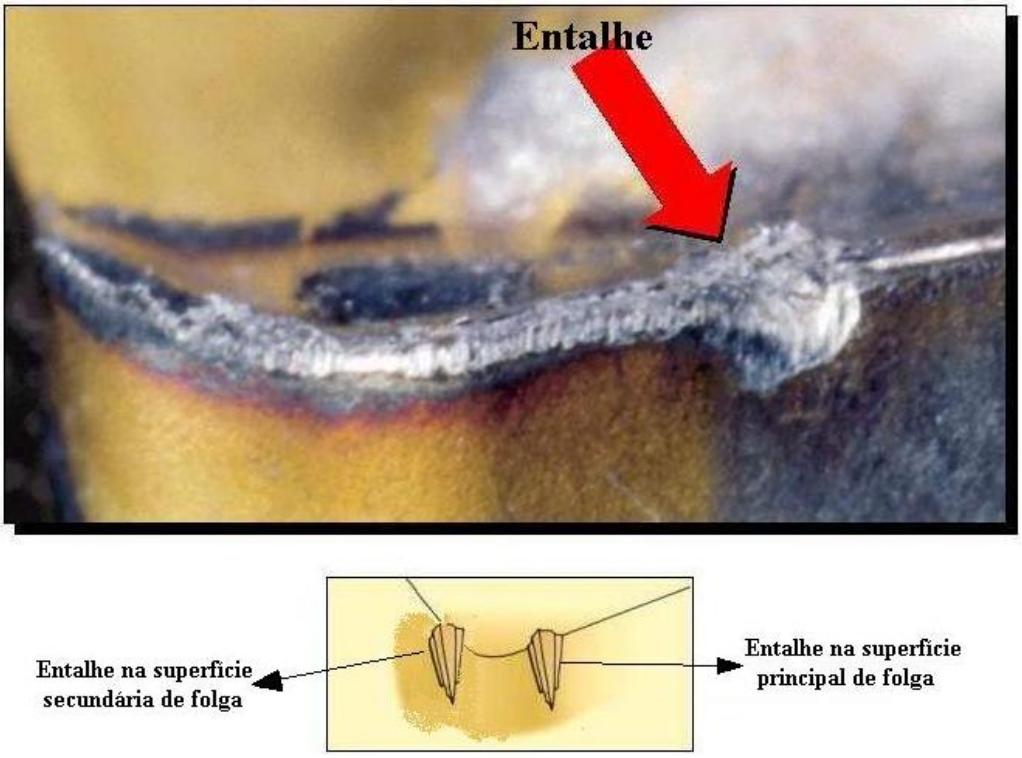


Figura 10-Desgaste de entalhe em uma ferramenta de corte (Sandvik, 2012 e Almeida, 2010).

2.16.4 Lascamento

Ao contrário do desgaste frontal e de cratera, que retiram continuamente partículas muito pequenas da ferramenta, no lascamento, Figura 11, partículas maiores são retiradas de uma só vez, podendo levar até a quebra da ferramenta. Ocorrem principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada (Sandvik, 2012).

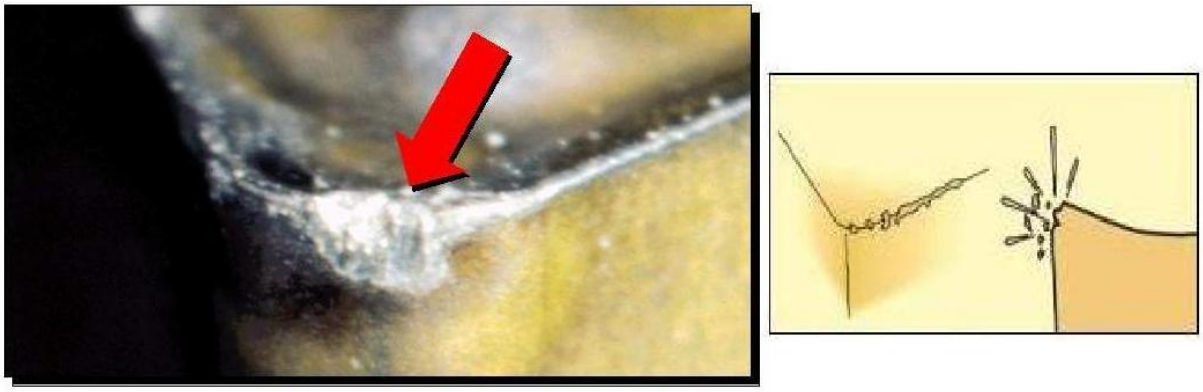


Figura 11-Lascamento de uma ferramenta de corte (Sandvik, 2012 e Almeida, 2010).

2.17 Usinabilidade dos materiais

A usinabilidade pode ser definida como uma grandeza que expressa por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão. Em outras palavras, pode se entender usinabilidade como o grau de dificuldade de se usinar o material. Entendem-se como propriedades de usinagem de um material, aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem, tais como vida da ferramenta, o acabamento superficial da peça, os esforços de corte, a temperatura de corte, a produtividade e as características do cavaco (Diniz et al, 2000).

A usinabilidade depende do estado metalúrgico da peça, da dureza, das propriedades mecânicas do material, de sua composição química, das operações efetuadas anteriormente e do encruamento. Além das condições do material, a usinabilidade também depende das condições de usinagem, das características da ferramenta, das condições de refrigeração, da

rigidez do sistema e pelo tipo de operação empregada. Assim, um material pode ter um valor de usinabilidade baixo em certas condições e um valor maior em outras.

Embora a dureza e a resistência mecânica sejam fatores importantes na usinabilidade dos materiais, outros fatores também são bastante importantes, como a quantidade de inclusões e de aditivos para melhorar a usinabilidade, a quantidade de partículas duras, a microestrutura, etc. Valores baixos de dureza e resistência mecânica normalmente favorecem a usinabilidade. Porém, quando se têm materiais muito dúcteis (materiais que se deformam muito plasticamente antes de se romperem), a baixa dureza pode causar problemas, pois favorece a formação de aresta postiça de corte. Bons valores de usinabilidade são obtidos com um conjugado entre dureza e tenacidade.

Materiais com boa condutividade térmica favorecem a usinagem, pois permite que o calor gerado durante o processo seja rapidamente retirado da região de corte, evitando um aquecimento excessivo da ferramenta, reduzindo assim seu desgaste. Se o material possui alta taxa de encruamento, ele requer uma maior energia para a formação do cavaco reduzindo sua usinabilidade, causando ainda uma camada endurecida na superfície da peça (Souza,2011).

2.18 Influência da velocidade de corte

O processo de corte gera calor por deformação e por atrito, aquecendo a peça, o cavaco e a ferramenta. E, quanto mais severas as condições impostas para a usinagem, como, por exemplo, aumento das velocidades de corte, maiores serão as temperaturas, que por sua vez influenciam nos tipos e mecanismos de desgaste.

A maior influência do aumento da velocidade é sentida no crescimento do desgaste de cratera, pois é na superfície de saída onde as temperaturas são máximas. Então, o desgaste de cratera geralmente terá um papel importante, quando da utilização de velocidades de corte elevadas. Outro fator influenciável é o acabamento superficial da peça usinada, ou seja, este é melhorado com o aumento da velocidade de corte. Segundo Ferraresi, isto ocorre em função da diminuição do coeficiente de atrito entre o material de trabalho e as superfícies da ferramenta (Ferraresi, 1977).

2.18.1 Cálculo da velocidade de corte

A velocidade de corte é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte. Para processos com movimentos de rotação a velocidade de corte na usinagem é dada pela velocidade tangencial ou periférica através da Equação 3, (Machado, 2009).

$$Vc = \frac{\pi.d.n}{1000} \qquad \text{Equação 3}$$

Sendo: Vc = velocidade de corte (m/min).

D = diâmetro torneado (mm).

N = número de rotações por minuto (RPM).

2.18.2 Avanço da ferramenta

É o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta, o qual é dada pela seguinte equação (Diniz, 2013):

$$vf = f.n \qquad \text{Equação 4}$$

Sendo: f = avanço em mm/rot. (mm por rotação)

n = número de rotações por minuto (RPM)

2.19 Geometrias das ferramentas de corte

A escolha da geometria depende principalmente das propriedades do material a ser trabalhado e do material da ferramenta. Todos os detalhes geométricos de uma ferramenta são importantes, mas serão ressaltados apenas os fundamentais para o entendimento do desenvolvimento desse trabalho.

a - superfície de folga – o aumento de sua inclinação, ou seja , quanto maior o ângulo **"α_o"**, maior será o volume de material removido da ferramenta para o mesmo valor medido

do desgaste de flanco. Este aumento é limitado pelo consequente enfraquecimento da cunha corte.

b – superfície de saída à indicação do ângulo positivo **"γ_o"** é a determinação da inclinação da superfície de saída. O aumento deste ângulo diminui a pressão e a temperatura de corte, prolongando a vida da ferramenta. Entretanto, este acréscimo diminui a resistência da cunha de corte.

c – aresta principal de corte ou aresta de corte – intersecção das superfícies de saída e de incidência é determinada pelo ângulo de posição **"χ_r"**. Quanto menor for este ângulo, maior será o contato da aresta com o material de trabalho, proporcionando uma distribuição melhor da temperatura de corte, com uma dissipação do calor mais eficiente.

d – Aresta secundaria de corte – localizada na superfície de saída e determinada pelo ângulo secundário de posição "χ_r". Quando este ângulo é muito pequeno há o contato por completo desta aresta com a superfície usinada, concentrando o calor com resíduos de corte prejudicam o acabamento da peça.

e – Raio de ponta - raio de concordância entre as arestas principal e secundária. O seu aumento proporciona a diminuição da pressão de corte melhorando o acabamento da rugosidade superficial da peça usinada, porém este aumento é limitado por prejudicar o acabamento (Diniz, 2006).

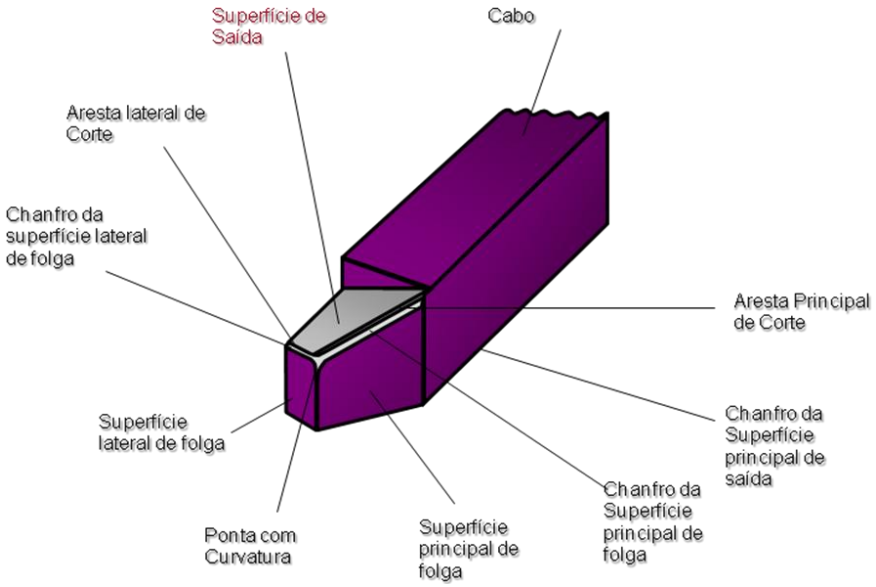


Figura 12: Detalhes geométricos da ferramenta de torneamento. (Diniz,2013)

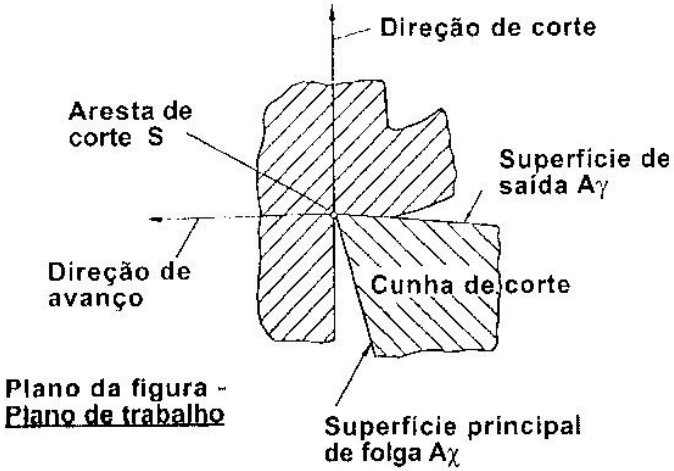


Figura 13: Detalhes da aresta de corte das ferramentas de torneamento. (Diniz,2013)

2.20 Formatos das pastilhas

A norma ISO 1832-1992 estabelece que o código para pastilhas intercambiáveis seja composto de nove símbolos, representados por letras e números, que definem formas, tipos e parâmetros dimensionais das mesmas. O oitavo e nono símbolos são usados somente quando necessário, e o fabricante ainda pode adicionar um décimo símbolo opcional, que separado por um hífen pode ser usado por opções de simbologia própria, ou seja, especificações do fabricante (Sandvik,2012).

Na Figura 14 podem ser observadas as relações de resistência da aresta, ângulo de ponta, tendência à vibração e potência. Escala 1, indica a relação à resistência da aresta de corte (S), quanto maior o ângulo de ponta à esquerda, maior a resistência. Com relação à versatilidade e acessibilidade (A), as pastilhas da direita são superiores. Escala 2, indica que a tendência à vibração (V) aumenta para a esquerda a exigência de potência (P) é mais baixa para a direita.

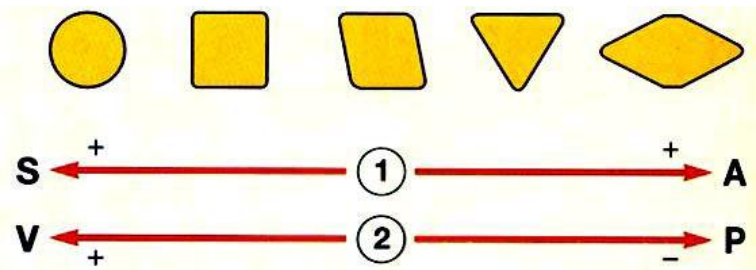


Figura 14- Formato da ferramenta (Sandvik,2012)

2.21 Classificação dos suportes porta pastilha

A norma ISO 5608-2012 especifica os suportes porta pastilhas externo, o qual inclui 10 símbolos representados por letras e números que definem formas, tipos e parâmetros dimensionais dos mesmos. O fabricante pode ainda adicionar um décimo primeiro símbolo opcional, separado por um hífen, no qual pode fazer uso de opções de simbologia própria, ou seja, especificação do fabricante (Sandvik,2012). A Figura 15 mostra um suporte de ferramentas comercial, como por exemplo, de especificação PCLNR 2020 K 12.

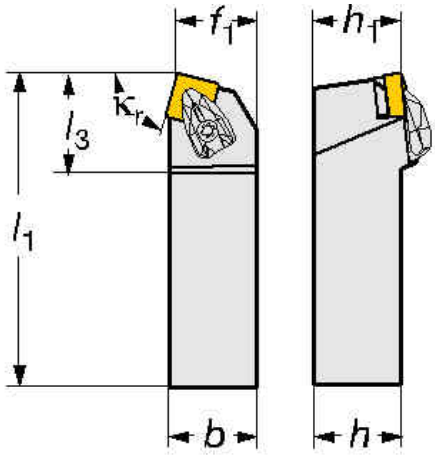


Figura 15-Porta ferramenta com especificação PCLNR 2020 K 12 (Sandvick,2012)

2.22 Rugosidade da superfície

Na análise do desgaste das ferramentas de corte a rugosidade tem um papel importante, pois através dela é possível determinar a substituição ou reafiação de uma ferramenta de corte.

As rugosidades podem ser consideradas como irregularidades finas que geralmente resultam da ação inerente do processo de usinagem. Segundo König (1997) e Bet (1999), estas podem ser divididas em: rugosidade cinemática e de processo. A rugosidade cinemática é decorrente da forma da quina da ferramenta e do movimento relativo entre a peça e a ferramenta. No torneamento, é influenciada pela forma do gume e pelo avanço. Quanto à rugosidade de processo, sua causa está associada aos fenômenos que ocorrem no gume da

ferramenta, estando assim, diretamente correlacionada ao comportamento do material usinado.

Como parâmetros para determinação da rugosidade da superfície, pode-se citar os parâmetros verticais como R_a, R_y, R_z, entre outros.

O R_a representa a rugosidade média das amplitudes entre picos e vales, entretanto, como este representa uma média, o aparecimento de um pico ou de um vale não típico pode deturpar significativamente o seu valor, fazendo com que este não represente mais o valor médio. Quanto ao R_y, sua característica é de máxima e mais rígida, pois avalia a maior distância pico-a-vale dentro do percurso de medição. É um parâmetro utilizado para determinar as condições do pré-acabamento necessárias para operações de acabamento subsequentes como a lapidação. Ele indica a quantidade de material que pode ser removida antes de atingir a dimensão limite da peça (Xavier, 2003). Já o R_z é calculado pela média das distâncias pico-a-vale de cinco comprimentos de amostragem, sendo, assim, mais sensível a picos ou vales locais. É utilizado para o monitoramento de processos de fabricação, principalmente em superfícies de apoio, deslizamento e de ajustes mecânicos, nas quais os cilindros de motores estão incluídos. As Figuras 16,17 e 18, mostram as características das rugosidades R_a, R_y e R_z.

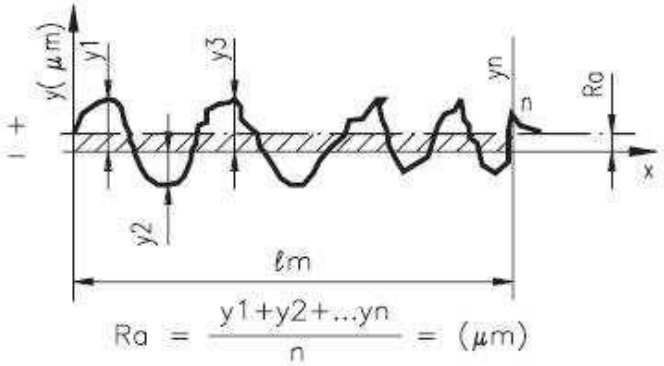


Figura 16-Rugosidade média (R_a) (Xavier,2003)

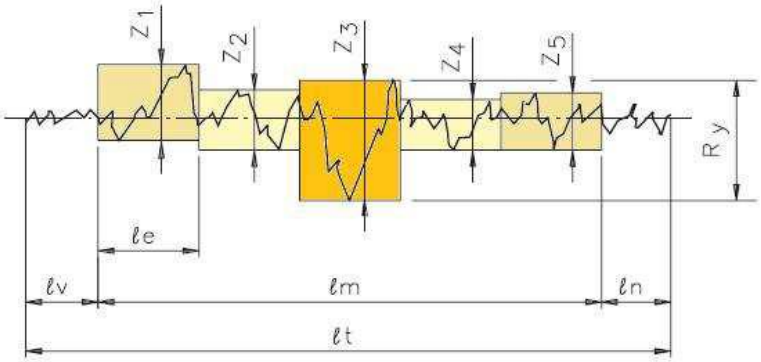


Figura 17-Rugosidade máxima (R_y) (Xavier,2003)

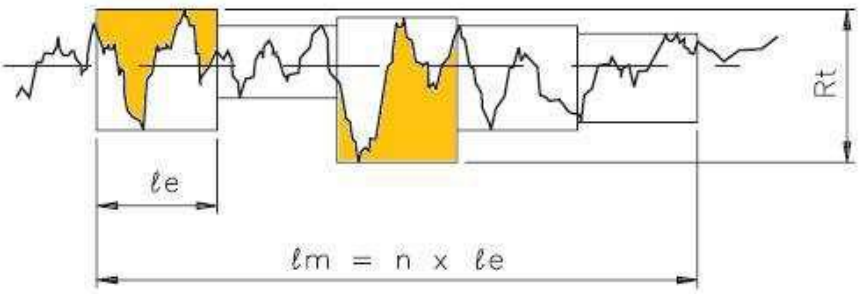


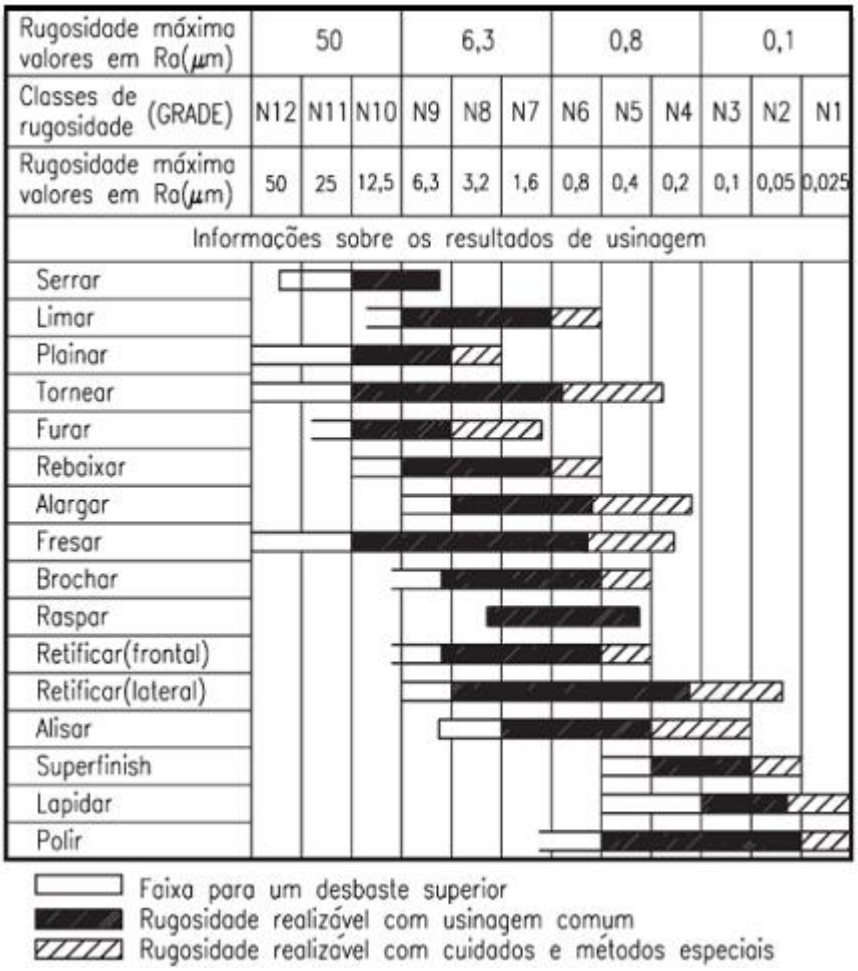
Figura 18-Rugosidade total (R_z) (Xavier,2003)

A norma NBR 8404\1984 indica o estado de superfície em desenhos técnicos, e esclarece que a característica principal (o valor) da rugosidade R_a pode ser indicada pelos números da classe de rugosidade. A Tabela 01 mostra a indicação o estado da superfície, e seus respectivos símbolos (Agostinho,1981).

Tabela 01- indicação de estado de superfície e seus respectivos símbolos (Agostinho,1981).

Classe de Rugosidade	Rugosidade Ra (μm)
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

Tabela 02: Associação do Processo de Fabricação com sua Respectiva Rugosidade (Agostinho,1981).



2.22.1 Parâmetros Funcionais do Perfil de Rugosidade

Esses parâmetros são obtidos a partir da curva de fração de contato, de acordo com a norma DIN 4776. O perfil do núcleo são os valores de rugosidades excluídas; os maiores picos e os maiores vales, os quais se caracterizam como $R_k = R_{pk} - R_{vk}$, no intervalo M_{r1} e M_{r2}.

Onde:

- R_k é o valor da rugosidade do núcleo do perfil.
- R_{pk} é o valor da rugosidade média dos picos que estão acima da área de contato mínima do perfil, excluindo picos exagerados.
- R_{vk} é o valor da rugosidade média dos vales que estão abaixo da área de contato do perfil; excluídos eventuais vales excessivamente profundos.

- M_{r1} quantidade de material (%) é um parâmetro que determina a fração de contato mínimo do núcleo do perfil de rugosidade.
- M_{r2} quantidade de material (%) é um parâmetro que determina a maior fração de contato do núcleo do perfil de rugosidade. A Figura 19 abaixo representa os parâmetros obtidos a partir de uma curva de fração de contato (Almeida, 2010). Além dos parâmetros obtidos, outros coeficientes são estudados:
- R_p/R_t é o coeficiente vazio, R_p é a distância do pico mais elevado até a linha média do perfil, R_t é a distância do pico mais elevado e o vale mais profundo.
- R_k/R_t é a profundidade central normalizada.
- R_{tm} é o parâmetro de altura.
- V_o capacidade de armazenamento de óleo.

A Figura 19, apresenta os parâmetros obtidos a partir da curva de fração de contato (Curva de "ABBOTT") que indica a quantidade de material "Mr", em relação ao nível de corte "C".

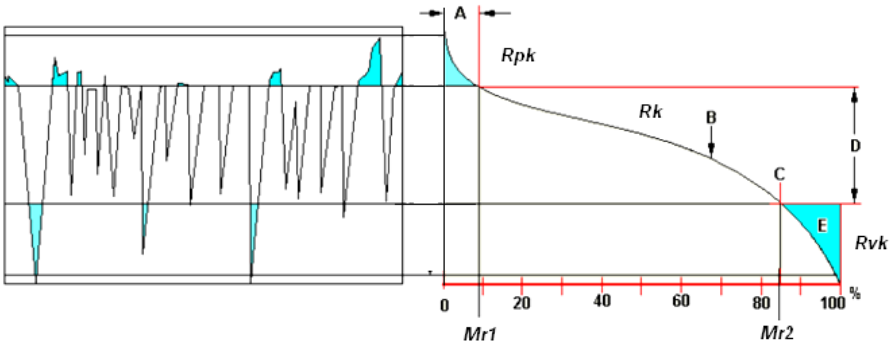


Figura 19- Curva de Abbott-Firestone e parâmetros da série Rk. (Almeida, 2010)

2.23 Tolerância geométrica

Apesar do alto nível de desenvolvimento tecnológico, ainda é impossível obter superfícies perfeitamente exatas. Por isso, sempre se mantém um limite de tolerância nas medições. Mesmo assim é comum aparecerem peças com superfícies fora dos limites de tolerância, devido a várias falhas no processo de usinagem, nos instrumentos ou nos procedimentos de medição, o que chamamos de erros de forma (Mocrosky, 2007).

As tolerâncias de forma são os desvios que elementos podem apresentar em relação à sua forma geométrica ideal, conforme norma NBR 4287/2002, onde temos:

- Superfície geométrica: superfície ideal, prescrita nos desenhos e isenta de erros. (Exemplos: superfícies planas, cilíndrica e esférica).

- Superfície efetiva: Superfície levantada pelo instrumento de medição. É a superfície real, deformada pelo instrumento.

Dentro da tolerância geométrica elas são divididas em tolerâncias de forma para elementos isolados, sendo elas de retilineidade, planeza, circularidade, cilindricidade, forma de linha qualquer e forma de superfície qualquer. Em tolerâncias para elementos associados sendo elas: paralelismo, perpendicularidade, inclinação, localização, concentricidade e simetria (NBR 4287/2002).

2.23.1 Circularidade

É a condição pela qual qualquer círculo deve estar dentro de uma faixa definida por dois círculos concêntricos, distantes no valor da tolerância especificada. A Figura 20 (a) mostra a especificação do desenho e a Figura 20 (b) à interpretação. O campo de tolerância em qualquer seção transversal é limitado por dois círculos concêntricos distantes 0,5mm (Mocrosky, 2007).

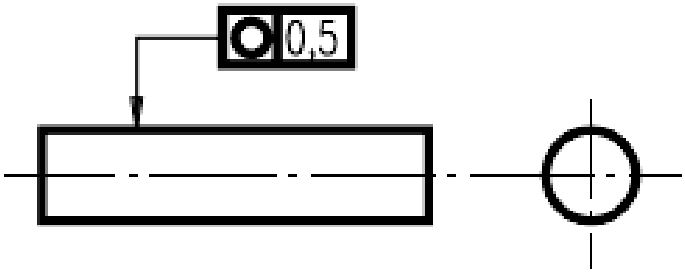


Figura 20(a)-Especificação do desenho (NBR 4287/2002)

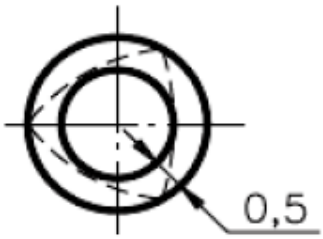


Figura 20(b)-Interpretação da tolerância (NBR 4287/2002)

2.24 Metodologias de Planejamento e Análise de Experimentos

As técnicas de planejamento e análise de experimentos são utilizadas para melhorar a qualidade dos produtos e processos de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar o uso dos recursos das empresas (material, tempo dos funcionários, disponibilidade dos equipamentos, etc.). Com a finalidade de melhorar a qualidade industrial, a produtividade, o desempenho do produto final, os custos da operação, entre outras características as empresas realizam vários experimentos para encontrar níveis ótimos dos seus parâmetros que regulam seus processos de fabricação (Galdamez, 2004).

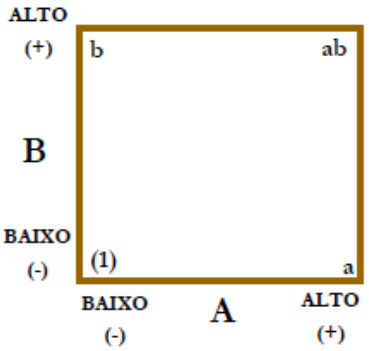
A Tabela 03, apresenta uma descrição das técnicas de planejamento e análise de experimentos.

Tabela 03- Técnicas de planejamento e análise de experimentos

Ferramenta	**Características**
Planejamento Fatorial	Utilizado quando todas as combinações dos níveis dos fatores de controle são realizadas.
Planejamento Fatorial 2^k	Técnicas com dois níveis e 2^k número de combinações de k fatores
Planejamento Fatorial 2^{k-p} Fracionado	Utilizado quando há vários fatores de controle e não é viável economicamente para as empresas realizar todas as combinações dos experimentos.
Metodologia de Superfície de Resposta	Response Surface Methodology (MSR) é um conjunto de planejamento e análise de experimentos usados na modelagem matemática de respostas. Ou seja, procura-se identificar o relacionamento que existe entre os parâmetros, representada por variáveis quantitativas, como tempo, velocidade, pressão, temperatura, etc. E as respostas do sistema analisado.
Planejamento Fatorial 2^k com pontos centrais	Este método consiste em adicionar um ponto de experimentação no nível intermediário aos níveis investigados para os K fatores de controle.
Análise da Variância	Analysis of variance (ANOVA), é uma ferramenta que permite estudar se há diferenças significativas entre as respostas experimentais.

Gráficos	Os gráficos de efeitos principais ilustram a variação da média das respostas, em função da mudança do nível de um fator, mantendo os outros fatores constantes.
	Os gráficos dos efeitos de interação descrevem a variação média de um fator em função dos níveis de outros fatores.
	O gráfico de probabilidade normal é utilizado nas situações em que não é possível repetir um experimento e é importante obter uma estimativa independente do erro experimental para julgar a importância dos efeitos principais e de interação

Um fatorial é completo quando todas as possíveis combinações entre os fatores são experimentadas. O número de experimentos é igual ao número de níveis experimentais elevados ao número de fatores (Oliveira, 2012). O tipo mais simples de planejamento 2^k é o 2^2, ou seja, dois fatores A e B, cada um com dois níveis. Geralmente, pensamos nestes níveis como baixo e alto fator. O planejamento 2^2 é mostrado na Figura 21. No planejamento é fato denotar os fatores baixo e alto dos fatores A e B pelos sinais – e + respectivamente. Isso algumas vezes é chamado de notação geométrica para o planejamento (Montgomery, 2004).



Tratamento	A	B	AB
(1)	–	–	+
a	+	–	–
b	–	+	–
ab	+	+	+

Figura 21- Planejamento fatorial 2^2 (Scarpel, 2012)

Em planejamento fatorial 2^2 o importante é avaliar os efeitos principais de A e B e também a interação de segunda ordem AB, as letras (1), a, b e ab, devem representar o total das observações extraídas no projeto com o total n de réplicas feitas no experimento (Scarpel, 2012 e Montgomery, 2004). Para avaliar os efeitos principais e a interação devemos utilizar as fórmulas abaixo:

Efeito principal de A

$$A = \frac{a+ab}{2n} - \frac{b+(1)}{2n} = \frac{1}{2n}\left[a+ab-b-(-1)\right] \qquad \text{Equação 5}$$

Efeito principal de B

$$B = \frac{b+ab}{2n} - \frac{a+(1)}{2n} = \frac{1}{2n}\left[b+ab-a-(-1)\right] \qquad \text{Equação 6}$$

Efeito de interação AB

$$A = \frac{ab+1}{2n} - \frac{a+b}{2n} = \frac{1}{2n}\left[ab+(1)-a-b\right] \qquad \text{Equação 7}$$

2.25 ANÁLISE DA REGRESSÃO

Em qualquer experimento planejado é importante examinar um modelo para prever respostas. Além disso, há uma relação forte entre a análise de um experimento planejado e uma análise de regressão que pode facilmente ser usado para obter as previsões em um experimento 2k (Montgomery, 2004). Um modelo inicial de regressão é dado pela equação 8.

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \qquad \text{Equação 8}$$

Onde:

β_0 =é a média global de todas as observações;

β_1 =é a metade do coeficiente global de A;

β_2 =é a metade do coeficiente global de B;

β_{12} =é a metade do coeficiente global da interação AB;

x_1 e x_2 = são as vaiáveis denotadas respectivamente de -1 e +1;

$x_1 x_2$ = termo do produto cruzado, que representa a interação entre estas variáveis.

ε = termo aleatório;

Em planejamento fatorial faz-se necessário investigar se a hipótese de erro normal e independente distribuídos com média zero e variância constante, não é violada. Estas

violações são investigadas examinando os resíduos (Filho, 2006). O cálculo dos resíduos é feito através da Equação 9.

$$e = y - \hat{y} \qquad \text{Equação 9}$$

2.25 Métodos de superfície de resposta (MSR)

A metodologia da superfície de resposta consiste em uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são úteis para modelagem e análise das aplicações em que a resposta de interesse seja influenciada para modelagem e análise das aplicações, em que a resposta de interesse seja influenciada por várias variáveis e o objetivo seja otimizar esta resposta (Montgomery, 2004).

A primeira etapa é encontrar uma aproximação adequada para a verdadeira relação entre a resposta (Y) e as variáveis independentes. De um modo geral, polinômios de baixo grau são empregados para modelar alguma região das variáveis independentes. Esses polinômios podem, por exemplo, ser uma função linear das variáveis independentes, então a função de aproximação será o modelo primeira ordem da equação 10, (Montgomery,2004).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon \qquad \text{Equação 10}$$

Caso haja curvatura na superfície de resposta do sistema, pode-se usar um modelo de segunda ordem com a função de aproximação dada pela função quadrática da Equação 11.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i \\ i<j}} \sum_{j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad \text{Equação 11}$$

As Figuras 22 e 23 abaixo mostram exemplos de gráficos de superfície de resposta

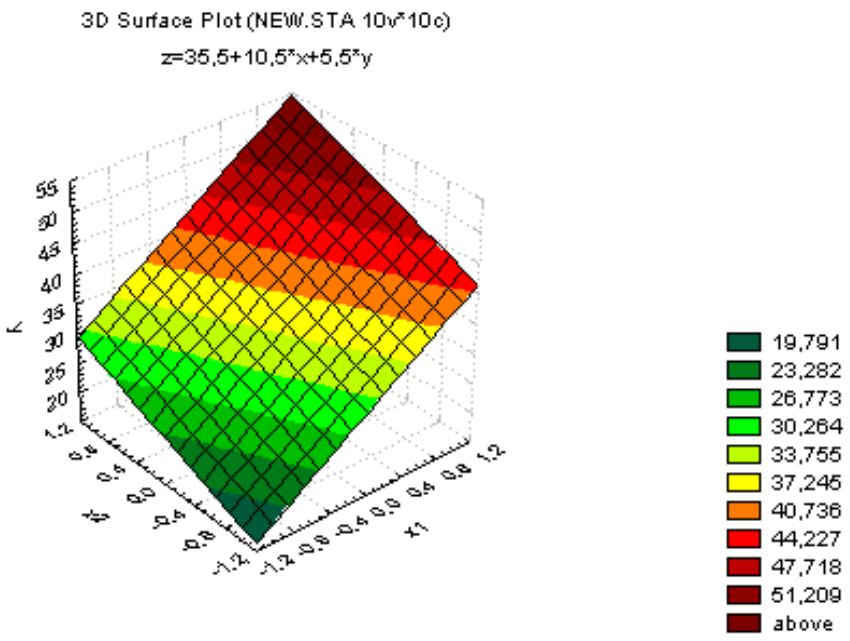


Figura 22- Exemplo de gráfico de MSR (Oliveira, 2012).

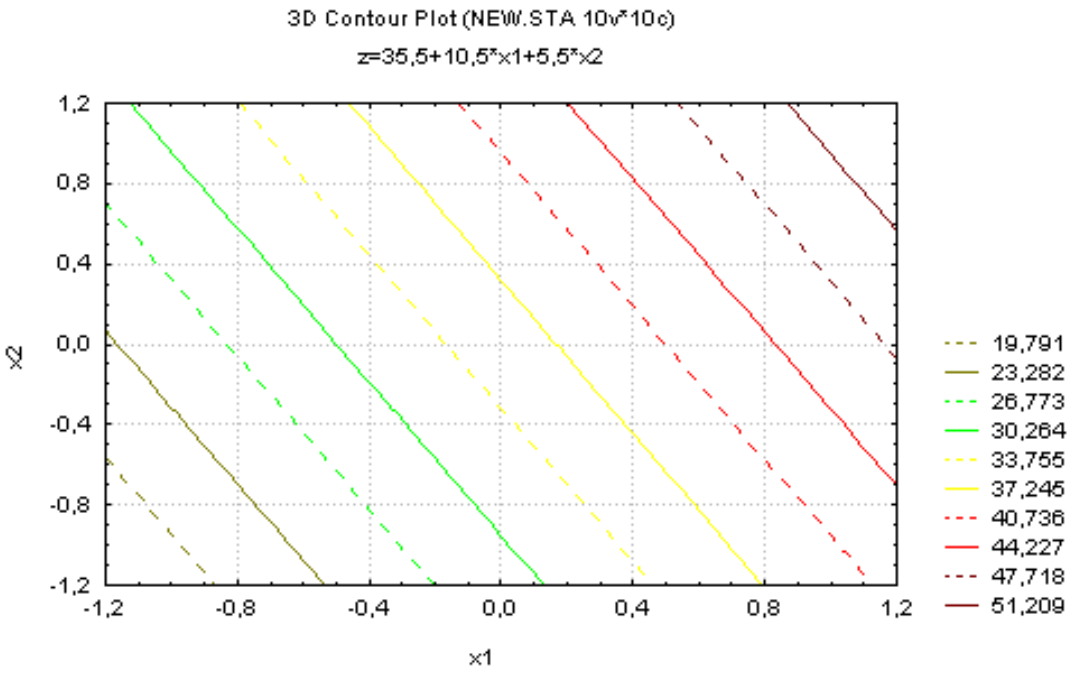


Figura 23-Plotagem do gráfico de curvas de nível do MSR (Oliveira, 2012).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve as etapas envolvidas na execução dos experimentos. A Figura 24 apresenta o fluxograma das etapas de fabricação e testes da ferramenta desenvolvida:

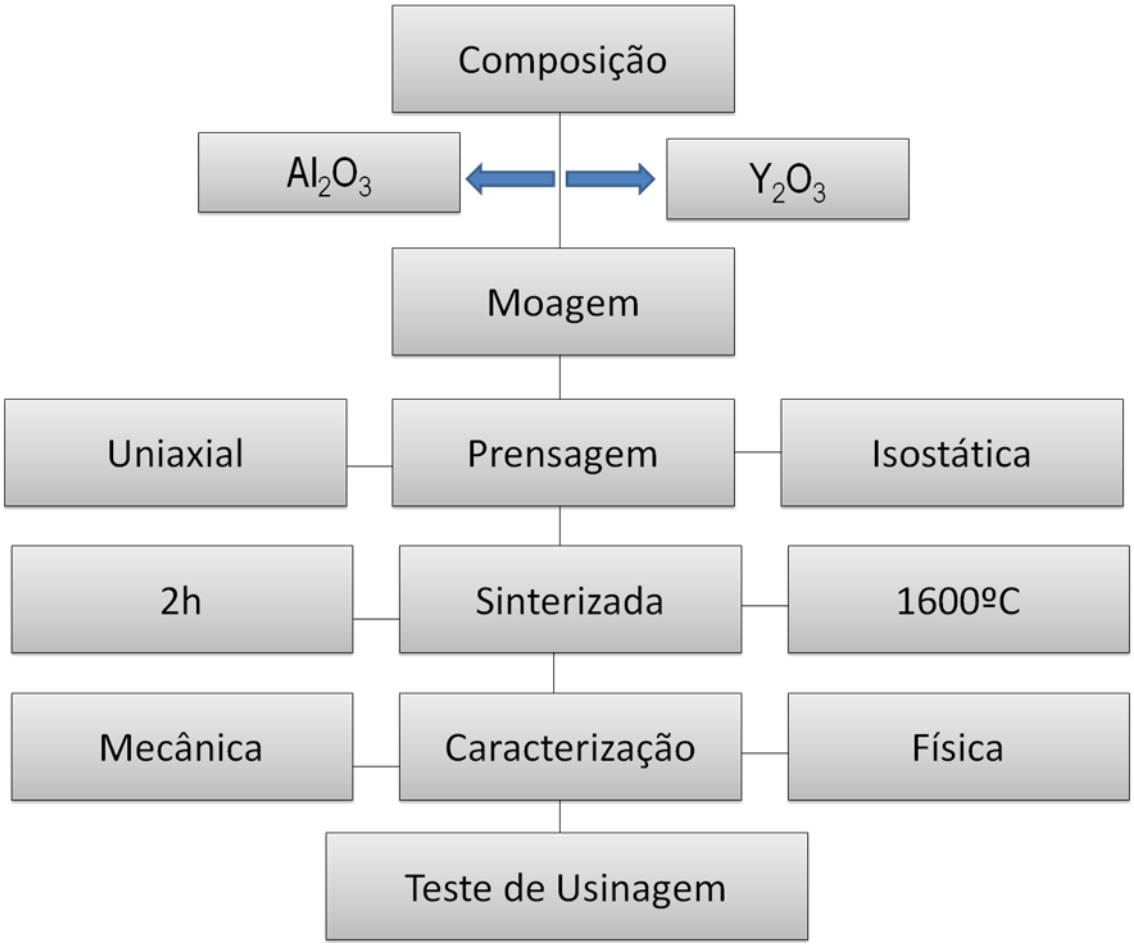


Figura 24-Etapas de fabricação e testes da ferramenta desenvolvida

3.1 Fabricação e Caracterização da Ferramenta Desenvolvida

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

3.1.1 Matérias Primas

A ferramenta cerâmica foi produzida usando pós de alumina α (α-Al_2O_3 da Alcoa do Brasil) e oxido de ítrio (Y_2O_3 da HCST da Alemanha), com uma composição de 95% em peso Al_2O_3 e 5% em peso Y_2O_3, com tamanho de partículas de 0,40 - 0,70 µm. Com o objetivo de obter estequiometria do YAG.

3.1.2 Preparação das Misturas

Primeiramente, os pós foram pesados em balança analítica com precisão de duas casas decimais, logo após a composição foi moída e homogeneizada em meio liquido por 24 horas utilizando moinho de bolas rotativo com potes e esferas de alumina. Após a homogeneização, foram analisados os pesos das esferas um e do copo do moinho para observar uma possível contaminação nas misturas de pós. Em seguida, o pó foi secado em estufa a 120 ^{o}C por 24 horas, em seguida foi desagregado e submetida ao peneiramento em malhas de 100 mesh (0,15mm) para desaglorameração.

3.1.3 Compactação

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

3.1.3.1 Prensagem Uniaxial a Frio

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

Figura 25 - Vista geral da prensa hidráulica uniaxial utilizada na compactação a frio.

3.1.3.2 Prensagem Isostática a Frio

Após a compactação por prensagem uniaxial a frio, os corpos de prova foram prensados isostaticamente a frio, com o objetivo de obter maiores resultados de densidade a verde, para a eliminação quase que total dos problemas relacionados ao gradiente de pressão de compactação ao longo do corpo de prova, facilitando assim seu manuseio. Inicialmente os corpos de prova foram encapsulados a vácuo, em moldes de látex flexível, sendo imersos em óleo, na câmara de prensagem, com velocidade de compactação de 15MPa/s e pressão de 300MPa por 2 minutos. Para realizar tal tarefa foi utilizada uma prensa isostática tipo KIP 100E, Marca Paul Weber.

Figura 26 - Vista geral da prensa isostática KIP 100 E, marca Paul Weber. Observa-se a câmara de prensagem (à esquerda) e o painel de controle (à direita).

3.1.4 Sinterização

A sinterização das amostras foi realizada em forno com atmosfera controlada modelo F1650-MAITEC com elemento resistivo de $MoSi_2$.

Os corpos a verde foram acomodados sobre um cadinho de alumina, protegido por uma cama de alumina, seguido da sinterização nas temperaturas de 1600 °C por 2 h, com taxas de aquecimento de 15 °C/min até 1200 °C, 10 °C/min até 1400 °C e 5 °C/ min até a temperatura final. Após o aquecimento, o resfriamento das amostras se deu na inércia do próprio forno.

Figura 27 - Forno de sinterização, F1650 – MAITEC.

3.1.5 Densidade Relativa

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

Para a determinação da massa imersa (Mi), os corpos-de-prova, imersos em um volume de água destilada, foram apoiados por um suporte adaptado a balança. Pesou-se primeiro o suporte vazio e, em seguida, o suporte com os corpos-de-prova. A massa imersa (Mi) é a diferença entre estas duas leituras.

Após a determinação da massa imersa (Mi), os corpos-de-prova foram retirados e envolvidos em um papel toalha para a remoção de partículas de água que se encontravam na superfície, sendo então, levados para uma estufa à 100 ^{o}C durante 2 horas. Em seguida, os corpos-de-prova foram resfriados em um dissecador por um período de 30 minutos e pesados para a determinação da massa seca (Ms).

O cálculo para a determinação da massa específica aparente é dada por:

massa específica aparente = Ms / Ms – Mi Equação 12

As pesagens foram realizadas em uma balança analítica eletrônica, com precisão de 10-5 g, mostrado pela Figura 28.

Figura 28 - Vista geral da balança analítica eletrônica utilizada na pesagem dos corpos-de-prova para determinação da massa específica aparente.

3.1.6 Preparação para Determinação da Tenacidade a Fratura

Após a sinterização dos corpos de prova, os mesmos foram lixados em lixadeira e politriz automática para eliminação de defeitos superficiais que possam alterar os resultados de tenacidade a fratura obtida no experimento.

Figura 29 - Politriz automática utilizada na preparação dos corpos de prova.

3.1.7 Microdureza Vickers (HV)

Esta determinação é baseada no tamanho da deformação permanente provocada no material pelo penetrador piramidal de diamante com seção quadrada a dureza vickers dada pela equação. Os resultados de microdureza vickers em kgf/cm^2 foram convertidos em GPa, Utilizando a equação 12.

$$1GPa = 1{,}02x10^{-2}\, kgf / mm^2 \qquad \text{Equação 13}$$

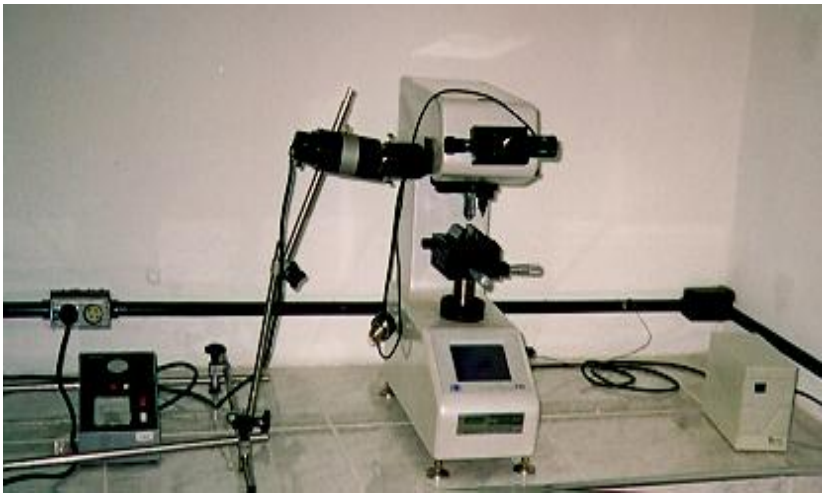


Figura 30 - Vista geral do equipamento utilizado para determinação de microdureza Vickers.

3.1.8 Tenacidade a Fratura (K_{IC})

A tenacidade a fratura foi determinada pelo método de indentação vickers, onde foi calculada a partir das trincas geradas nos ensaios de dureza, medindo-se o comprimento de trinca em cada vértice das indentações piramidais. Neste trabalho foram adotados os métodos de impressão por indentação Vickers, com carga de 50N, obedecendo às normas ASTM-C-1327-99 e ASTM-C-1421-99, respectivamente.

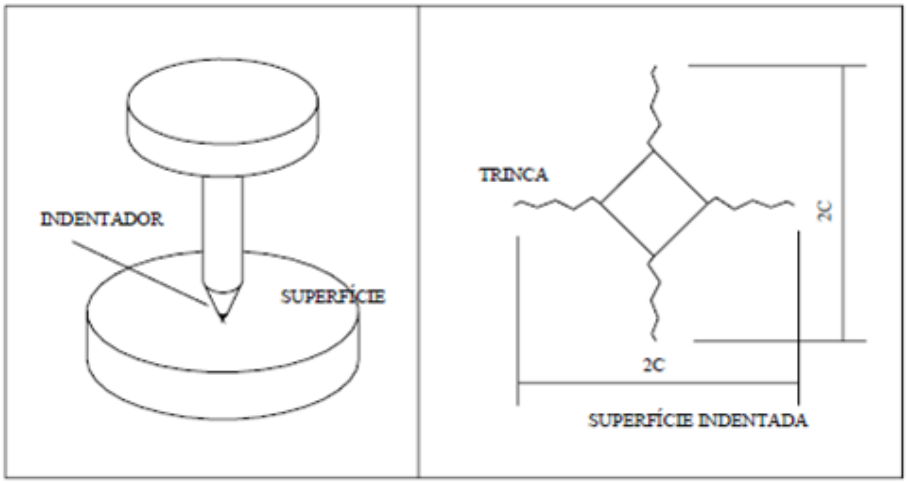


Figura 31 - Método e trinca para determinação da tenacidade.

Figura 32 – Microdurômetro utilizado no experimento

3.1.9 Microestrura

A análise da microestrutura foi feita utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo LEO 1450VP com WDS, acoplado para observar a microestrutura das amostras sinterizadas no laboratório de Microscopia do DEMAR-EEL-USP. Para isto, foram cortadas amostras nas seções transversais e longitudinais e submetidas a preparo ceramográfico da superfície. As amostras cortadas foram retificadas, lixadas e polidas com pasta de diamante de até 1µm, para revelar a microestrutura. Antes ainda da observação no microscópio as amostras foram fraturadas e metalizadas com a aplicação de uma fina camada de ouro.

Figura 33 - Microscópio eletrônico de varredura – MEV.

3.2 Testes de Usinagem

Os testes de usinagem têm como objetivo avaliar o desempenho da ferramenta de alumina desenvolvida em laboratório nas condições de semi-desbaste e acabamento, especificando os melhores parâmetros de uso para essa ferramenta, além de validar o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte de baixo custo, desenvolvidos no Brasil.

3.2.1 Ferro Fundido Nodular

Os testes de usinagem por torneamento foram realizados no ferro fundido nodular (FUCO FE45012) com grafita nodular em uma matriz ferritica/perlitica. A estrutura ferrítica proporciona melhorias de usinabilidade, possibilitando um bom acabamento superficial, ótimas resistências ao impacto, fadigas, condutividade elétrica e alta permeabilidade magnética, fazendo com que esse material possua resistência e escoamento similar ao aço 1020 laminados a quente.

A microestrutura do FUCO FE45012 é constituída de grafita nodular esférica, forma I e II, de acordo com a norma ASTM A247. Esse material possui dureza aproximadamente de 205 HB e composição química média de 2,99-3,30% de C, 2,2-2,73% de Si, 0,40% de Mn, 0,044-0,056% de P, 0,065-1,09% de S, 0,05% de Cr, 0,08-0,10% de Cu e o restante de Fe. A Figura 33 abaixo apresenta a microestrutura típica deste material utilizando um aparelho estereomicroscópio trinocular (mod. SZ-6145 TR) da marca olympus com aumento da imagem em 45 vezes, e o software de captura de imagens foi utilizado (AnalySis), pertencente ao núcleo de pesquisas NUPAM do IF Sudeste MG.

Os corpos de prova para os testes foram pré-usinados em torno mecânico universal marca Nardini Mascote para obtenção de um rebaixo no diâmetro de 50 mm para a fixação na placa do torno onde seriam realizados os testes e com diâmetro de 104 mm por 300 mm de comprimento útil, Figura 34. Também realizado um furo de centro obedecendo à norma NBR 12288 para uma melhor fixação do contra ponta do torno.

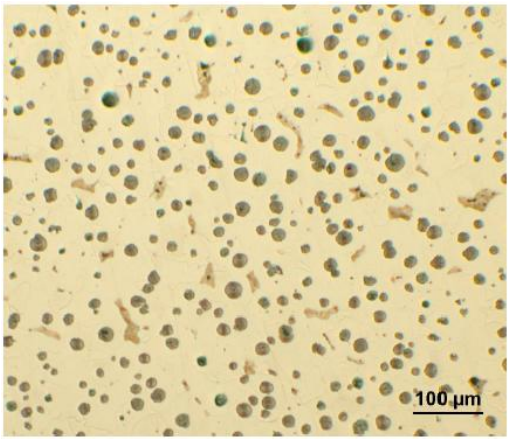


Figura 34-Microestrutura típica no ferro fundido nodular (FUCO FE45012)

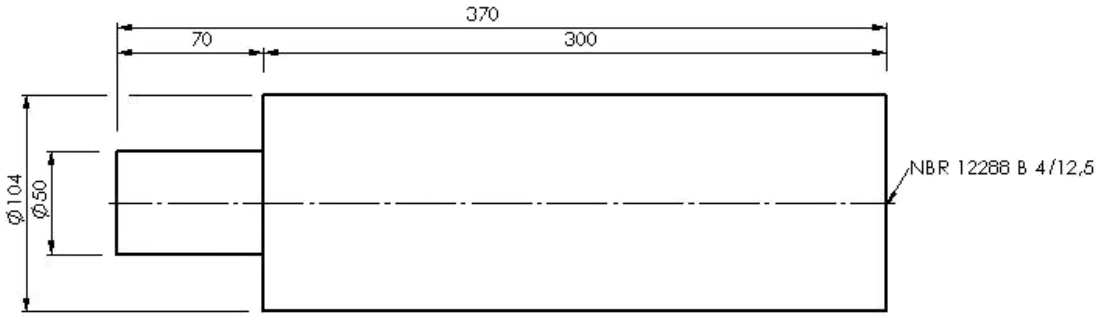


Figura 35-Corpo de prova nas dimensões de usinagem

3.2.2 Máquina Ferramenta

Para execução dos ensaios de torneamento foi utilizado um torno CNC marca Romi modelo Centur 30D, com rotação máxima de 4500 RPM e potência de 7,5KW pertencente ao núcleo de pesquisas NUPAM do IF Sudeste MG, Figura 36. Para a realização dos testes de torneamento os corpos de prova foram fixados pelo rebaixo na placa universal de três castanhas e o furo de centro apoiado na contra ponta do cabeçote móvel do equipamento para uma melhor fixação e diminuição de vibrações. Todos os corpos de provas para os testes foram preparados com remoção da camada de carepa proveniente do seu processo de fundição, que apresenta grandes variações de dureza.

Figura 36-(a)Torno CNC utilizado nos testes e (b) corpo de prova preso entre placa e ponta

3.2.3 Porta Ferramenta

A porta ferramenta utilizada foi escolhida em função do tamanho e geometria do inserto, e também da correta fixação do suporte na torre elétrica para que o inserto estivesse na altura correta para a realização do experimento. O modelo escolhido foi o suporte de modelo DSBNR 2020K 12, da marca Sandvik, Figura 37, apropriado para insertos cerâmicos, com ângulo de posição K_r 75^0, ângulo de saída -6^0, e ângulo de inclinação -6^0, e as dimensões do porta ferramenta com seus valores estão representado na Tabela 04.

Figura 37-Porta ferramentas marca Sandvik modelo DSBNR 2020K 12

Tabela 04 - Apresenta as dimensões do porta ferramenta utilizado.

DIMENSÃO	**b**	**f1**	**h**	**h1**	**l1**	**h_{5r}**	**l3**	**k_r**
Valor (mm)	20	17	20	20	125	2,5	34,2	75°

3.2.4 Inserto Cerâmico

As ferramentas utilizadas nos testes foram desenvolvidas em laboratório. Os insertos são constituídos de uma composição de 95% em peso Al_2O_3 e 5% em peso Y_2O_3. As ferramentas foram retificadas e lapidadas de acordo com a norma ISO 1832. O formato e dimensões foram definidos em função da resistência mecânica, das dimensões da porta ferramenta e das condições de utilização da ferramenta. A Figura 38 mostra o desenho do inserto utilizado neste experimento e o mesmo durante o teste de usinagem.

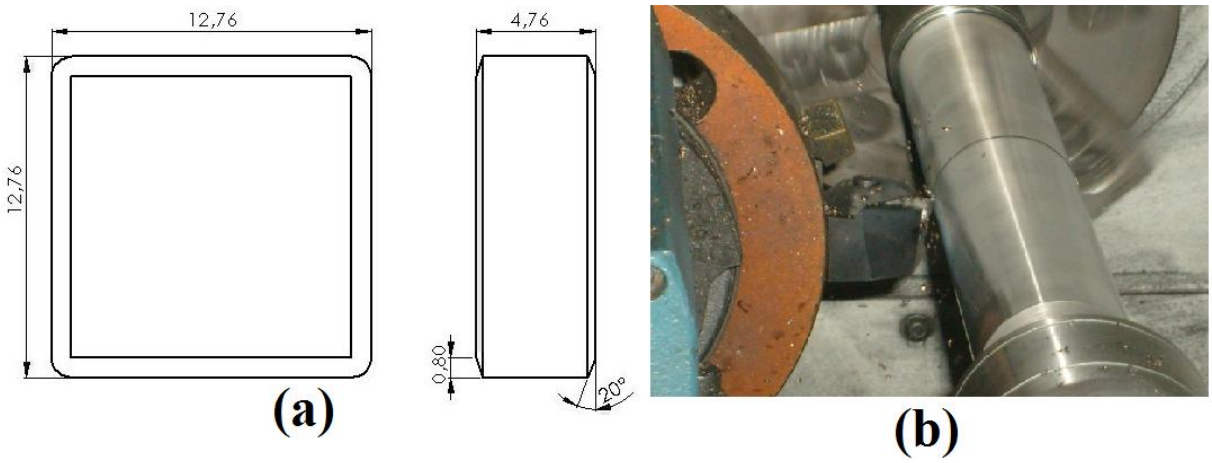


Figura 38-(a)Vista frontal e lateral do inserto cerâmico e (b) utilização do inserto.

3.2.5 Parâmetros de Usinagem

Os parâmetros de usinagem foram selecionados de acordo com os dados existentes na literatura (Souza, 2005 e Teles, 2007), testes preliminares e posterior dados contidos em catálogos de fabricantes de ferramentas de corte. Para determinação dos parâmetros de corte da ferramenta de alumina desenvolvida, as velocidades de corte foram as que sofreram maiores variações em função dos dados da literaturas, seguida pelos avanços e por último profundidade de corte. Esses parâmetros tiveram como objetivo fornecer informações para uma avaliação do desempenho da ferramenta nas diversas condições de usinagem, analisando o desgaste de flanco e comparando seus resultados de rugosidade, de acordo com os parâmetros de amplitude (JIS 2001) e funcional (DIN 4776) e a tolerância geométrica de circularidade. Para melhor dinâmica do trabalho, os dados foram especificados na Tabela 05.

Tabela 05 - Mostra dos parâmetros de corte utilizados nos testes de usinagem

Condição	**Velocidade de corte (m/min)**	**Avanço (mm/rot)**	**Profundidade de corte (mm)**
1	200	0,25	0,5
2	300	0,25	0,5
3	400	0,25	0,5
4	500	0,1	0,5
		0,25	0,5
5	600	0,1	0,5
		0,25	0,5

3.2.6 Medidas dos Desgastes das Ferramentas

As medidas dos desgastes da ferramenta na condição de semi-desbaste foram realizadas a cada passe. Nessa circunstância, o teste era interrompido para obtenção da imagem da superfície principal de folga da ferramenta e posterior medição do desgaste máximo de flanco. Para tal, foi utilizado um aparelho estereomicroscópio trinocular, (mod. SZ-6145 TR) da marca Olympus, com aumento da imagem em 45 vezes, e um software de captura de imagens foi utilizado (AnalySis), pertencente ao núcleo de pesquisas NUPAM do IF Sudeste MG. A análise do desgaste de flanco máximo para determinação do fim de vida da ferramenta segue as recomendações da norma ISO 3685/1993, que fixa o desgaste de flanco máximo com um valor igual a 0,6mm. Na Figura 39, pode ser observado o processo de obtenção de imagem no estereomicroscópio.

Figura 39 - Estereomicroscópio utilizado para determinar a vida da ferramenta.

3.2.7 Medida da Rugosidade

Para a avaliação das rugosidades nos testes, foi utilizado um rugosímetro, marca Mitutoyo SJ-301, pertencente ao núcleo de pesquisas NUPAM do IF Sudeste MG, onde a peça foi dividida em três regiões, especificadas como regiões R1, R2 e R3, defasadas 120 graus uma da outra. As análises foram realizadas utilizando o filtro GAUSS e cut off de 0,08mm, de acordo com as normas DIN 4768 e ISO 4288. A Figura 40, mostra o rugosimetro e sua aplicação na medida de rugosidade.

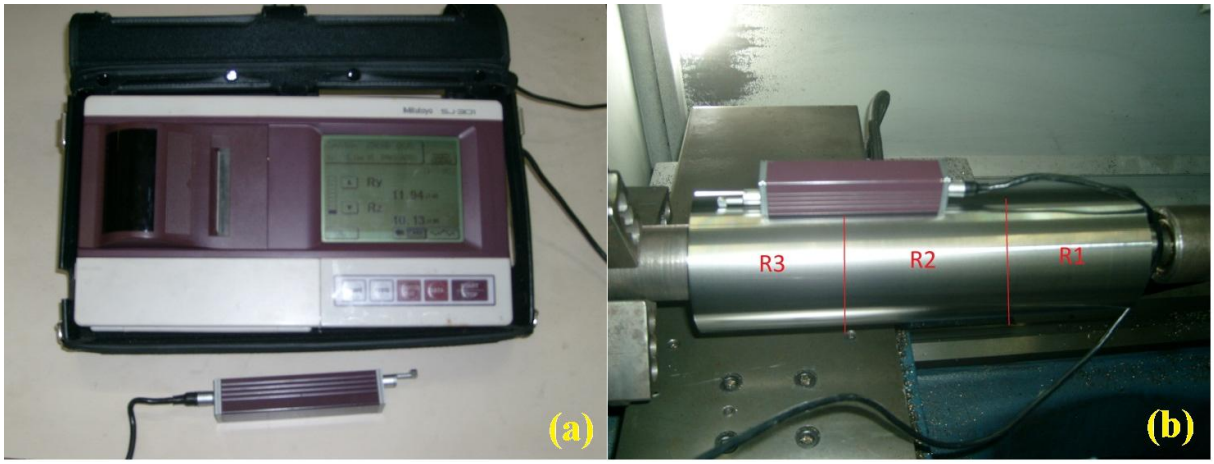


Figura 40- (a) Rugosímetro utilizado nos testes e (b) três regiões de medida da rugosidade.

3.2.8 Determinação de Medidas de Circularidade

As medidas de circularidade foram realizadas, de acordo com a norma NBR ISO 2768, utilizando um relógio comparador, marca Mitutoyo 2046S com curso de 10 mm, Figura 41, preso em base magnética, mesa tridimensional MARCA Mitutoyo B 5 04 B, Figura 42, para os testes de acabamento, ambos pertencentes ao núcleo de pesquisas NUPAM do IF Sudeste MG.

Figura 41 - Medidas de circularidade com relógio comparador.

Figura 42 - Máquina Tridimensional utilizada para medidas de circularidade nos testes de acabamento.

3.2.9 Análise Estatística dos Dados

Os resultados obtidos neste trabalho foram submetidos ao modelo estatístico utilizando a ferramenta do fatorial 2^k, seguida pelo método de superfície de resposta, onde através da determinação de uma equação que representa de forma aproximada como a influência das variáveis velocidades de corte e avanço interferem no comprimento de corte, e poder estimar resultado com parâmetros de corte intermediários aos utilizados nos testes, e, assim, poder estimar o ponto ótimo da ferramenta desenvolvida.

CAPÍTULO 4

4. Resultados e Discussões

Neste capítulo, serão demonstrados os principais resultados das propriedades da ferramenta**.** Os resultados do desgaste na aresta de corte da ferramenta, rugosidade superficial da peça e a circularidade obtida durante a realização dos testes de torneamento, se darão em forma de gráficos, tabelas, micrografias das ferramentas e dados estatísticos que terão como finalidade a determinação das melhores condições de usinagem dessa ferramenta nos processos de usinagem do ferro fundido nodular.

4.1 Microestrutura da Ferramenta Cerâmica

Na análise da Figura 43, podemos observar que os grãos crescem de forma irregular apresentando diferentes raios de aspectos, além de poder ser observado pequenos vazios entre os grãos. Isso pode ocorrer em função de concentrações diferentes do óxido de ítria. Isso pode acarretar na redução das propriedades mecânicas da ferramenta cerâmica que podem ser identificada como porosidade em função dos resultados de densidade relativa obtida. Para aplicação como ferramenta de corte a literatura normalmente relata que as ferramentas cerâmicas devem possuir a menor quantidade de poros possíveis.

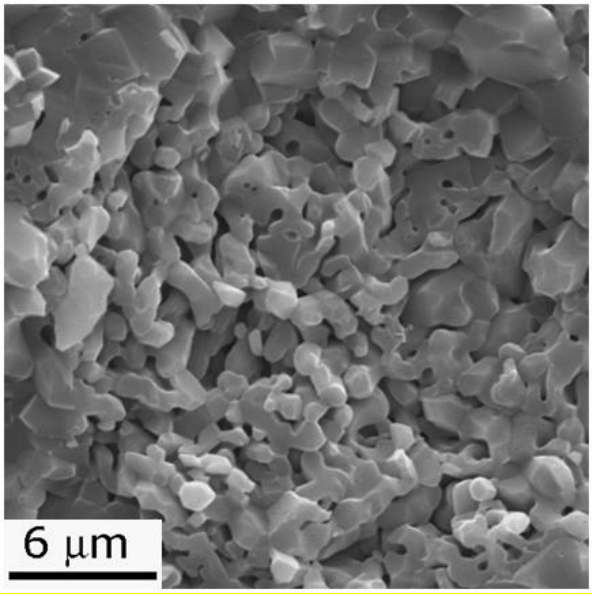


Figura 43 – Microestrutura da ferramenta desenvolvida com ampliação de 5000x

4.2 Microdureza Vickers

Os valores médios e o respectivo desvio padrão de microdureza vickers, obtidos pelo método de indentação para a ferramenta de alumia foram de 12,10 ± 0,12 GPa, estes valores estão próximos aos encontrados com um fabricante de ferramentas cerâmicas a base de alumina (Sandvik,2013). Os corpos de prova foram submetidos a vinte indentações com carregamento de 50N, sendo a primeira no centro e as demais em direção à periferia, caracterizando um perfil de dureza. Sendo estes praticamente constantes em todos os pontos analisados, devido ao baixo desvio padrão encontrado em todas as indentações realizadas.

4.3 Tenacidade à Fratura (K_{1C})

Os valores de tenacidade, a fratura obtidos este trabalho e o respectivo desvio padrão das amostras das ferramentas foram de 8,6 ± 0,20 $MPa.m^{1/2}$, valores estes próximos aos encontrados por Miguel, 2010 em pesquisas com ferramentas de corte, obtidos pelo método de indentação, sendo tomadas vinte indentações, determinando o valor médio do comprimento das trincas que se originaram do vértice da diagonal de impressão Vickers.

4.4 Densidade Relativa

Utilizando o ciclo de sinterização proposto neste trabalho as ferramentas apresentaram uma densidade relativa de 97,23 ± 0,12%, esta alta densidade se deve ao fato da prensagem e sinterização utilizadas neste trabalho. Estes valores estão próximos aos encontrados no trabalho de Souza, 2008.

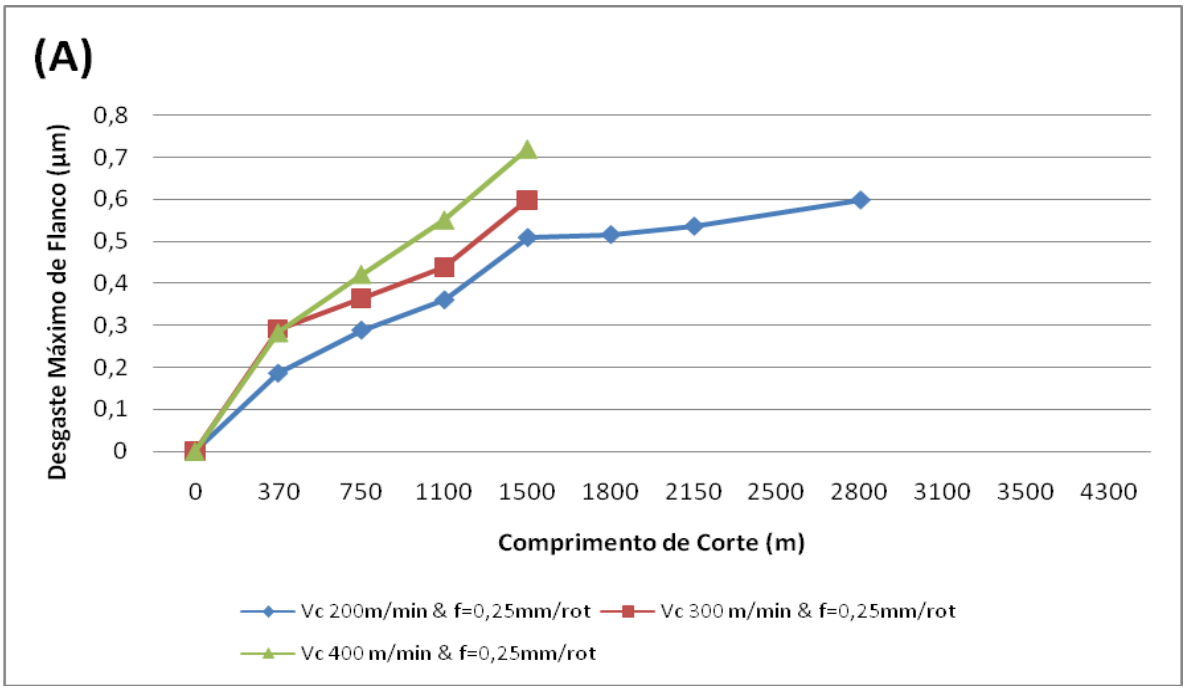
4.5 Desgaste da Ferramenta

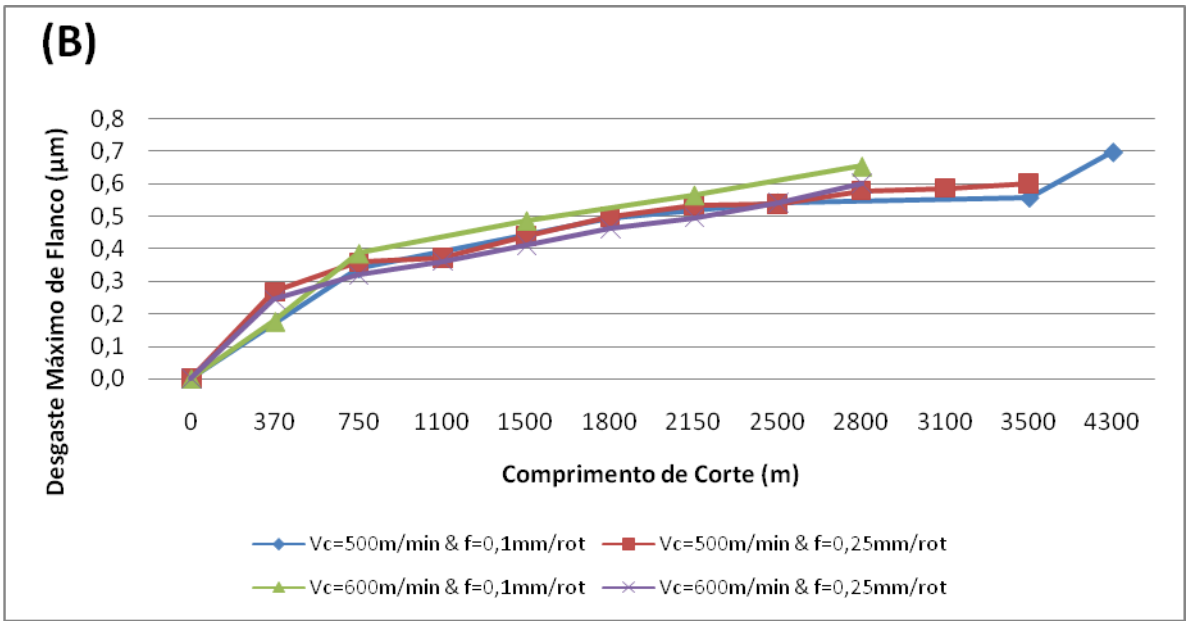
A Figura 44 descreve o comportamento do desgaste da ferramenta cerâmica de alumina produzida em laboratório em função do desgaste de flanco, utilizando diferentes velocidades de corte e avanços com profundidade de corte fixa. A Tabela 6, mostra os parâmetros de corte, comprimento de corte, e os resultados das replicas realizadas nos testes de usinagem por torneamento no ferro fundido nodular.

Tabela 06 - Mostra dos comprimento de corte alcançado

Condição	Velocidade de Corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Comprimento de corte(m)	Réplica comprimento de corte(m)
1	200	0,25	2943	-
2	300	0,25	1503	-
3	400	0,25	1329	-
4	500	0,1	4333	4288
		0,25	3493	3493
5	600	0,1	2883	2781
		0,25	2815	3001

Na Figura 44 (A) e (B) pode ser observado os desgastes da ferramenta em função do comprimento de corte quando do uso de diferentes velocidades de corte.





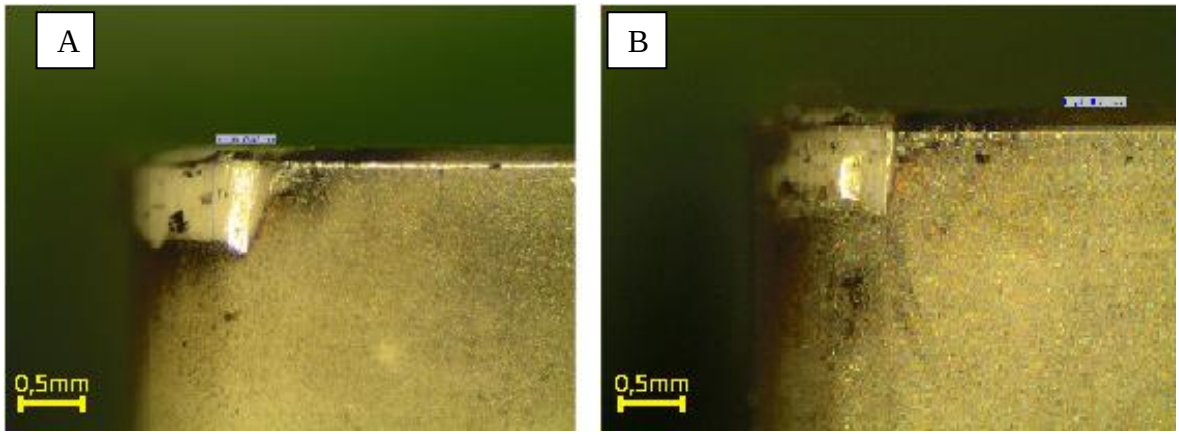
Figuras 44 (A) e (B) - Variações dos desgastes de flanco x comprimento de corte

Os resultados dos testes de desbaste mostraram que a ferramenta apresentou bons resultados, não sendo observada a ocorrência de trincas oriundas da fadiga mecânica, lascamentos, ou colapso de nenhuma das arestas de corte. Nas condições utilizadas nos testes, a ferramenta mostrou melhor desempenho com aumento da velocidade de corte. Na Figura 44 b) pode ser observado que para as velocidades de corte de 500 m/min promoveu um aumento no comprimento de corte em função dos desgaste de flanco, alcançando o comprimento de 4333m para o avanço de 0,1 mm/rot, seguido do comprimento de corte de 3493m para o avanço de 0,25 mm/rot. Os resultados das velocidades de corte de 500 e 600m/min. foram submetidos à replica, conforme Tabela 5, e as replicas mostraram resultados similares de comprimentos de corte e desgaste de flanco, de acordo com norma ISO 3685/1977.

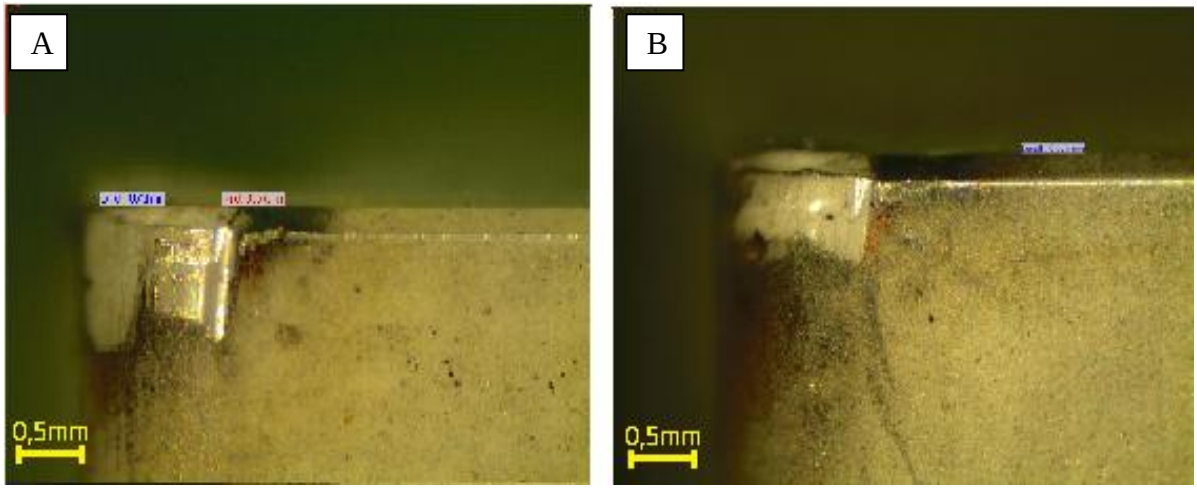
4.6 Análises dos Desgastes nas Micrografias das Ferramentas

Analisando Figuras 45 a 48 das ferramentas para todas as condições de corte utilizadas podemos observar que o mecanismo de desgaste predominante foi abrasão, o qual promoveu um desgaste linear para todas as condições. Porém, na velocidade de corte de 200, 300 e 400 m/min., os desgastes foram mais atuantes em função do tempo, o que caracteriza que em velocidades de corte maiores a ferramenta apresenta melhor desempenho, como é característico das ferramentas de materiais cerâmicos. A menor ação de desgaste na

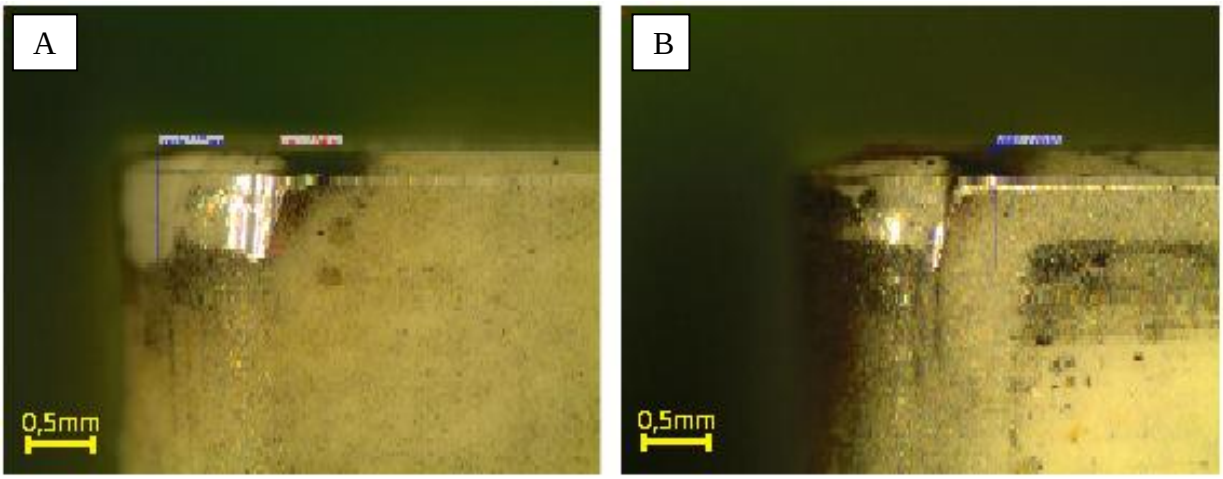
ferramenta em alta velocidade de corte pode estar relacionada com o aumento da temperatura de usinagem, a qual tende a diminuir a resistência do material, além de auxiliar na quebra de moléculas da fase grafita levando a dissolução, que posteriormente se transforma em fluido pastoso, e dessa maneira protege a aresta de corte com diminuição do atrito entre a ferramenta e a peça.



Figuras 45 a - Desgaste de flanco na Vc 200m/min e b - desgaste de flanco na Vc 300m/min, ambas com avanço de 0,25mm/rot.



Figuras 46 a-Desgaste de flanco na Vc 400m/min e b-desgaste de flanco na Vc 500m/min, ambas com avanço de 0,25mm/rot.



Figuras 47 a-Desgaste de flanco Vc 500m/min e avanço de 0,1mm/rot e b-desgaste de flanco Vc 600m/min e avanço de 0,25mm/rot.

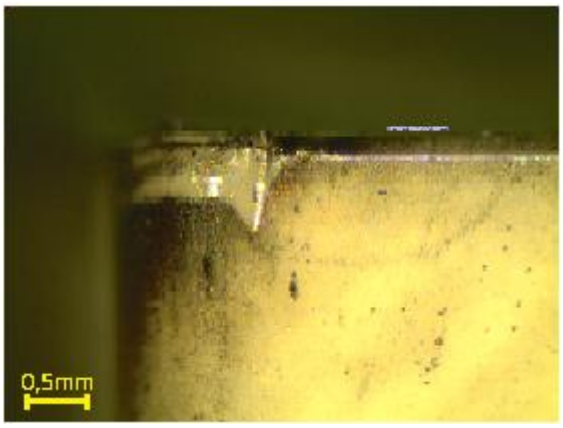
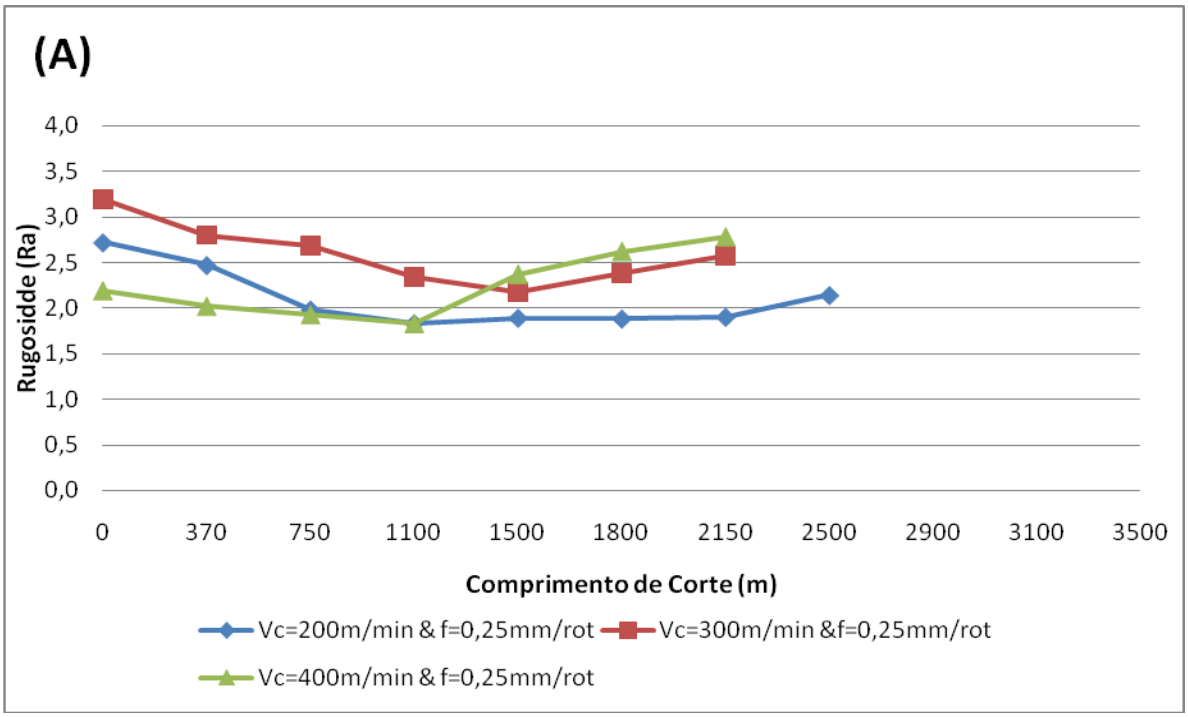


Figura 48-Desgaste de flanco Vc 600m/min e avanço de 0,1mm/rot.

Portanto, a evidência dessa ação na interface ferramenta/peça pode ser confirmada nas medidas de rugosidades superficial, a qual irá tender a diminuir em função da ação do fluido pastoso e também da redução do avanço.

4.7 Análises das Rugosidades Superficial (R_A, R_Y, e R_z)

Em uma análise geral das condições utilizadas na usinagem do ferro fundido nodular, pode ser observado que os testes de torneamento utilizando ferramenta de alumina produzida em laboratório produziram importantes valores de rugosidades superficiais mostrados abaixo nas Figuras 49 até 51.



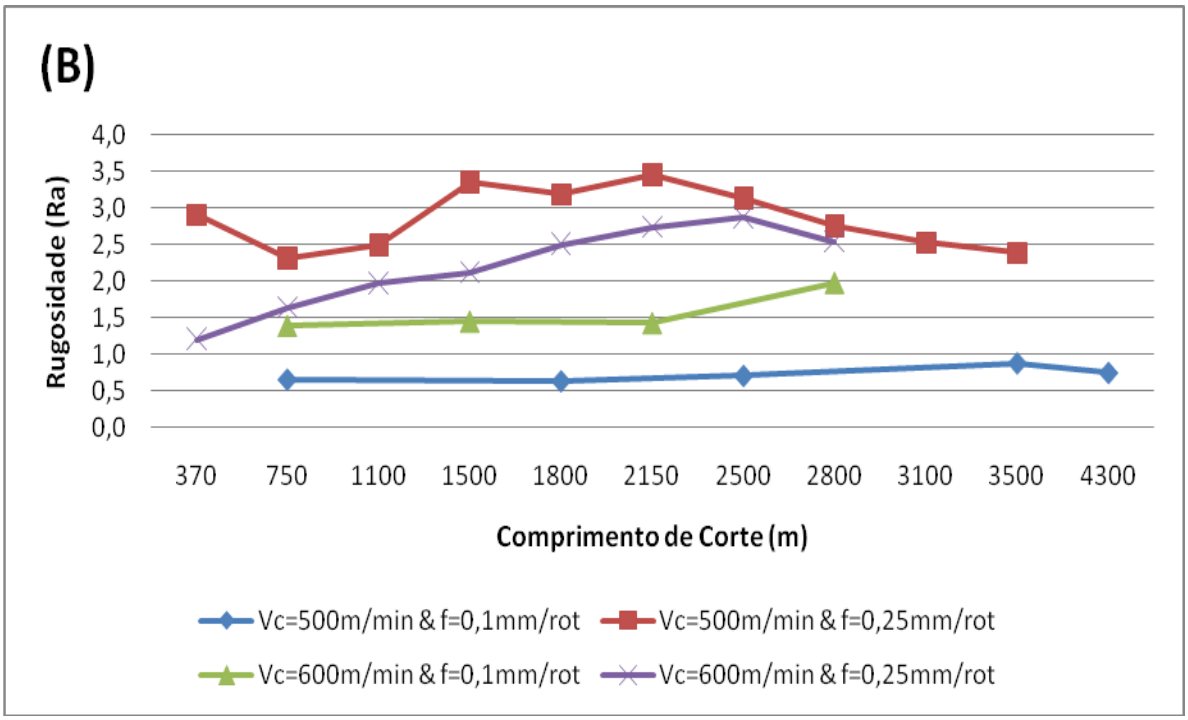
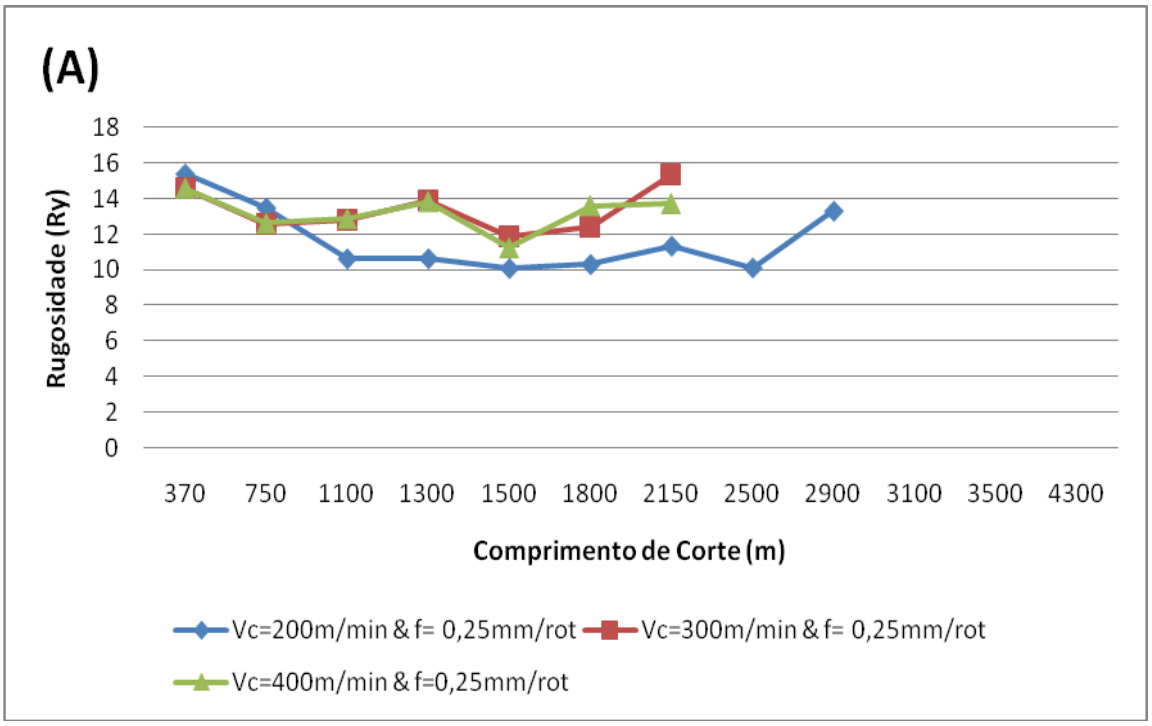


Figura 49(A) e (B) Rugosidade Ra em função do comprimento de corte



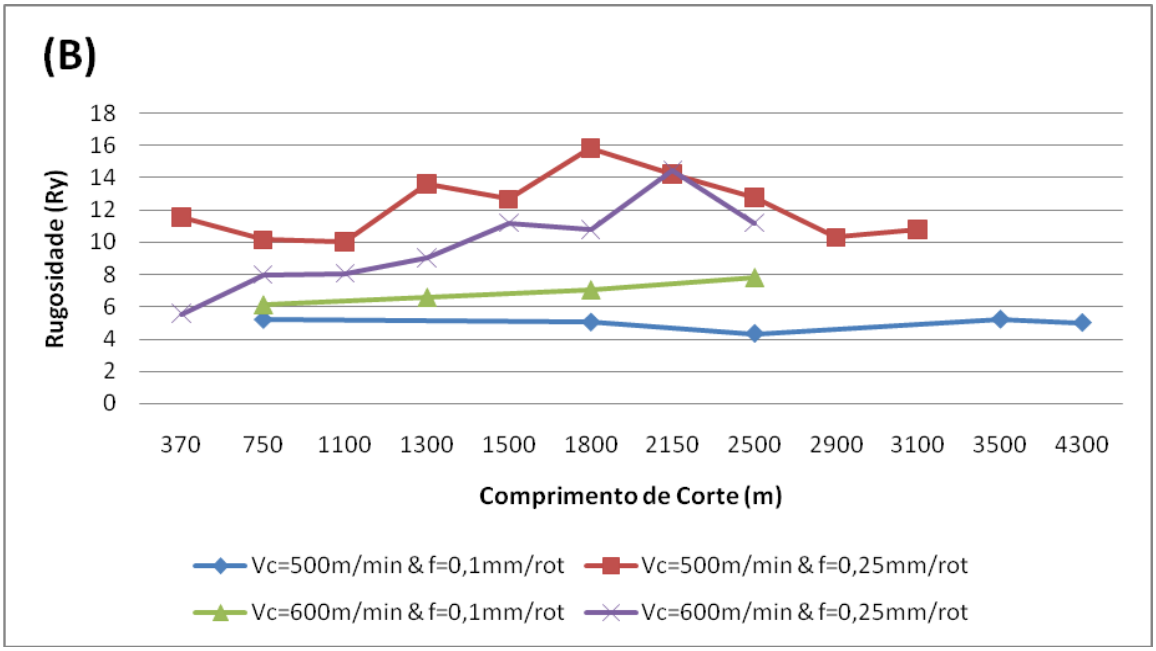
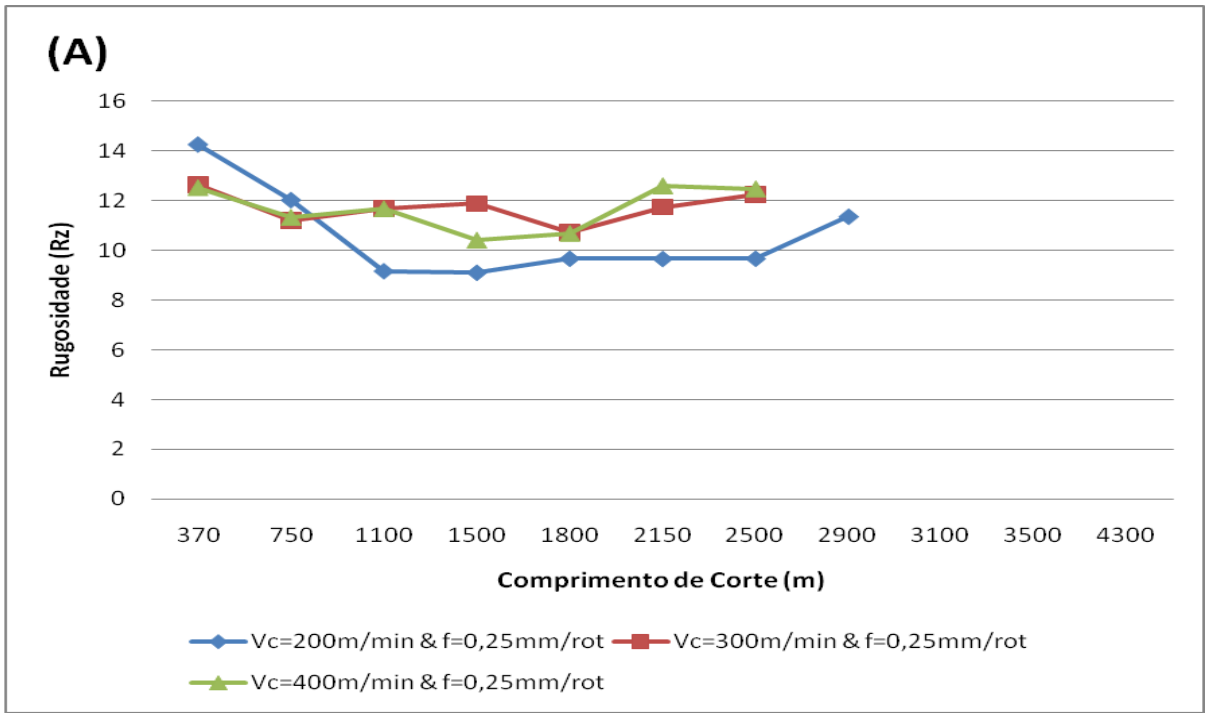
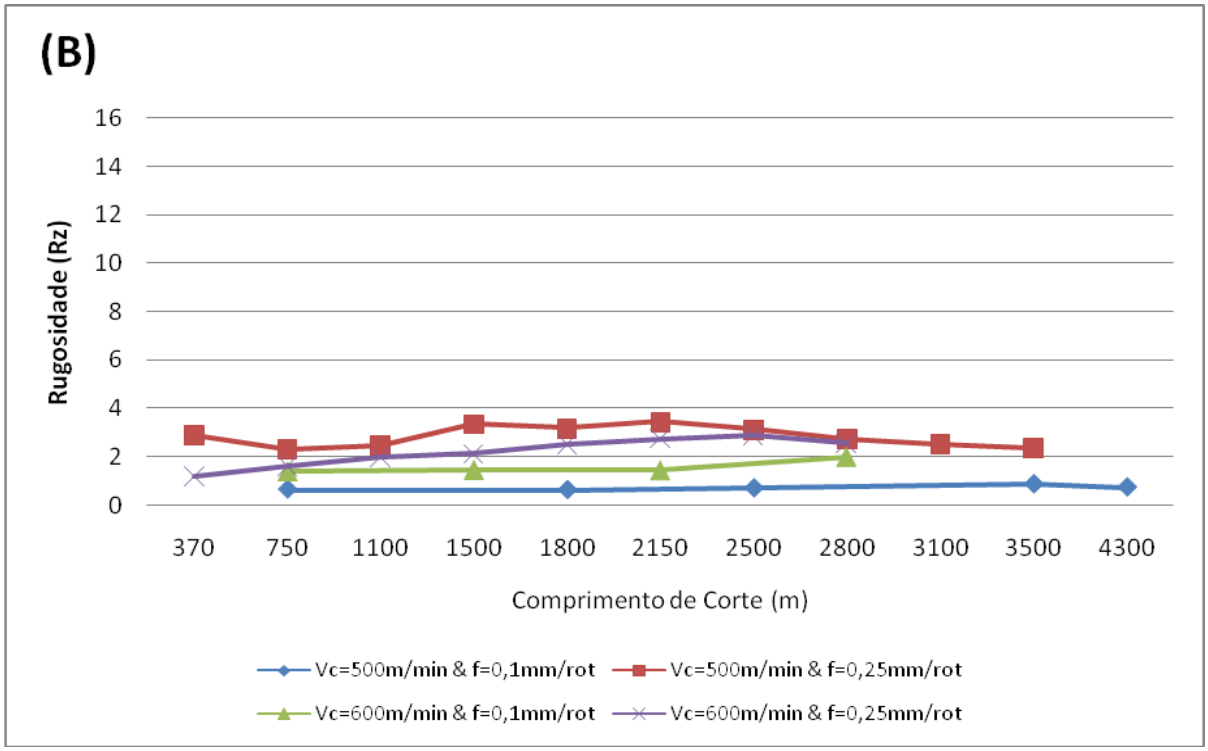


Figura 50 (A) e (B) Rugosidade Ry em função do comprimento de corte





Figuras 51 (a) e (b) Rugosidade Rz em função do comprimento de corte

Os valores de rugosidades (R_a, R_y e R_z) foram obtidos de acordo com os números de passos dados nos testes, sendo que a cada passo foram realizadas três medições ao longo da

peça defasadas de 120° uma da outra. Portanto, os resultados demonstraram tendências de acomodação para as velocidades de corte 500 e 600m/min, sendo que nas demais condições as rugosidades são superiores.

De maneira geral, podemos observar que a ferramenta apresenta uma acomodação ferramenta/peça na maioria dos testes, logo após o inicio, mostrando que inicialmente as rugosidades aumentam, e posteriormente reduz em função do comprimento de corte. Portanto, para as velocidades de corte 200 e 600m/min no gráfico de R_a a rugosidade é descendente, evidenciando uma perfeita acomodação ferramenta/peça. Isso fica mais evidente na observação da rugosidade R_a, quando da velocidade de corte de 500m/min. e avanço de 0,1mm/rot., o valor variou ao longo do comprimento de corte entre 0,62 e 0,87 µm. Se analisarmos em função do gráfico R_y e R_z esse fato ocorre somente na velocidade de corte de 500 e 600m/min. e avanço de 0,1mm/rot.

Esses resultados podem estar e/ou ser em função da dissolução da gráfica na interface ferramenta/peça, devido a possível ação da temperatura na dissolução da mesma pode promover menor atrito. Provavelmente, o menor avanço permite uma melhor homogeneidade topográfica da peça usinada.

4.8 Análises das Circularidades das Peças Após Torneamento

A circularidade é dos parâmetros mais importantes na usinagem por torneamento, pois permite uma caracterização perfeita do perfil de uma peça quando suas condições de trabalho exige condições extremas de concentricidade.

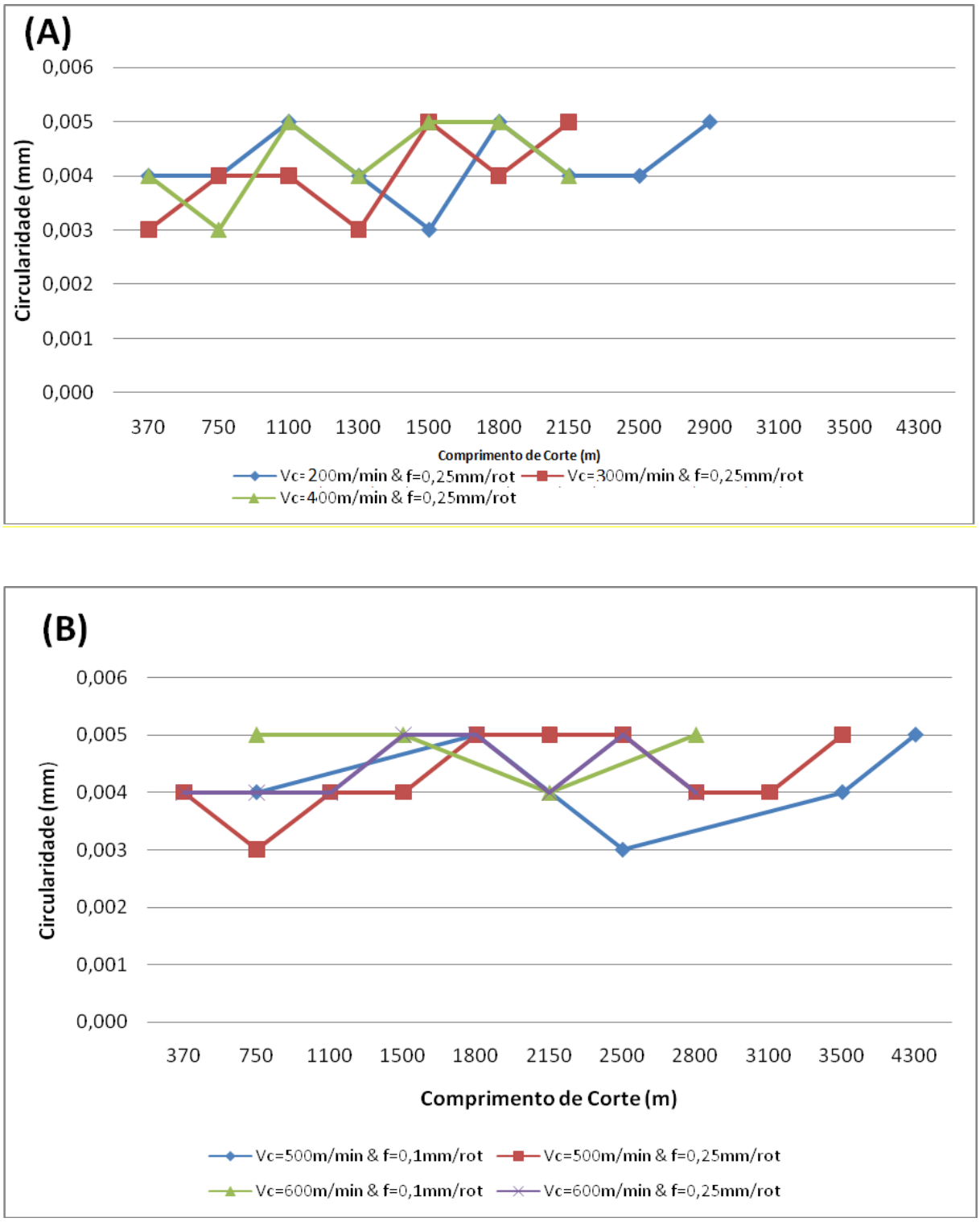


Figura 52 (A) e (B) – Circularidade em função do comprimento de corte

Durante os testes foram observados que para todas as condições que a circularidade apresentou uma variação de 0,003 a 0,005mm, mas nas condições de velocidade de corte de 200, 300 e 400m/min, o aspecto foi de zig zag em função do comprimento de corte. Quando do aumento da velocidade de corte de 500 e 600m/min., as variações ocorreram, mas de

maneira mais suave, e como mostrado anteriormente as velocidade de corte de velocidade de corte de 500 a 600m/min podem ser as melhores. Esses resultados confirmam que essa ferramenta apresenta resultados promissores para aplicação em testes específicos de acabamento.

4.9 Análise Estatística dos Resultados

Analisando os resultados apresentados acima, pode-se destacar que as melhores condições de trabalho foram obtidas nas velocidades de corte de 500 a 600m/min e avanços de 0,1 a 0,25mm/rot. A consolidação desses resultados, deu-se aplicando a técnica de fatorial 2^k juntamente com uma análise da regressão linear, a fim de poder aplicar o método de superfície de resposta, e identificar como as velocidades de corte e os avanços podem influenciar no comprimento de corte.

Na Tabela 7 pode-se observar os resultados dos testes, e suas réplicas, e os respectivos dados de média e desvio padrão. Essa tabela mostra os dados estatísticos obtidos nos testes de usinagem.

Tabela 07 – Dados estatísticos do comprimento de corte

Combinação dos Tratamentos	Comprimento de corte (m)		Total	Média	Desvio padrão	Diferença percentual (%)
	Teste 1	Teste 2				
V_c=500m/min e f=0,1mm/rot	4333	4288	8621	4311	31,82	0,45
V_c=600m/min e f=0,1mm/rot	2883	2781	5664	2832	72,12	1,02
V_c=500m/min e f=0,25mm/rot	3493	3668	7161	3581	123,74	1,75
V_c=600m/min e f=0,25mm/rot	2815	3001	5816	2908	131,52	1,86

Analisando os dados obtidos na Tabela 07 pode se deduzir que a ferramenta apresentou reprodutibilidade de seus resultados com as réplicas se aproximando dos resultados dos primeiros testes. As réplicas mostraram uma diferença percentual máxima de 1,86%, mostrando que a ferramenta apresenta desempenho confiável, o que pode ser comprovado pela análise do desvio padrão que não apresentou grande variação nos resultados de comprimento de corte.

Após esta primeira observação, passou-se para uma observação da análise da significância do comprimento de corte em relação às variáveis de entrada velocidade de corte (A) e o avanço (B), também foi verificado a possibilidade de interação entre as variáveis de entrada do planejamento fatorial 2^2 executado em dois níveis cada.

Para o cálculo do planejamento fatorial, foi utilizado o *Software Excel 2010*, os dados foram calculados com um intervalo de confiabilidade de 95%. A Tabela 08 apresenta os resultados da anova para o referido teste.

Como a pergunta em questão refere-se a duas variáveis velocidade de corte e avanço, foi utilizado o modelo fatorial 2^k no seu tipo mais simples o 2^2 , onde tais variáveis são chamadas de A para velocidade de corte e B para o avanço.

Tabela 08-Modelo Estatístico Anova

Fatores	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
A (Vc)	1	2313400,5	2313400,5	238,3413265	0,000102731
B(f)	1	213858	213858	22,03301996	0,009350389
A(Vc):B(f)	1	324818	324818	33,46482936	0,004436655
Residuals	4	38825	9706,25		

Como podemos observar na Tabela 08, o P-valor em todas as variáveis foi menor que 0,05, mostrando que todas as variáveis de entrada sob investigação, bem como a interação entre elas são representativas e influenciam de forma significativa sobre a resposta, com destaque especial para a velocidade de corte onde já é conhecida a influência destas variáveis de entrada (Vc e f) sobre os indicativos de usinabilidade de ferramentas de corte (desgaste e vida de ferramenta, acabamento superficial, força de usinagem, dentre outras) (Ferraresi,1977;Diniz, 2006)

Como o P-valor encontrado foi muito baixo (maior P-valor obtido foi de 0,009), ou seja estes testes com esta ferramenta forem repetidos nas mesmas condições, teria 0,9% de chances de se encontrar um resultado diferente dos obtidos nestes testes, para a ferramenta desenvolvida em laboratório.

A Tabela 09 seguinte apresenta uma breve descrição dos resíduos estatísticos

Tabela 09 - Resíduos estatísticos da análise

Mínimo	1Q	Média	Mediana	3Q	Máximo
-93	-60	$-1{,}78 \times 10^{-15}$	$-4{,}00 \times 10^{-15}$	60,12	93

A média dos resíduos apresentou-se em um valor muito próximo a zero, o gráfico da Figura 53 abaixo mostra como os resíduos se distribuem aleatoriamente ao redor da média próxima de zero mostrando que o modelo de regressão linear é adequado.

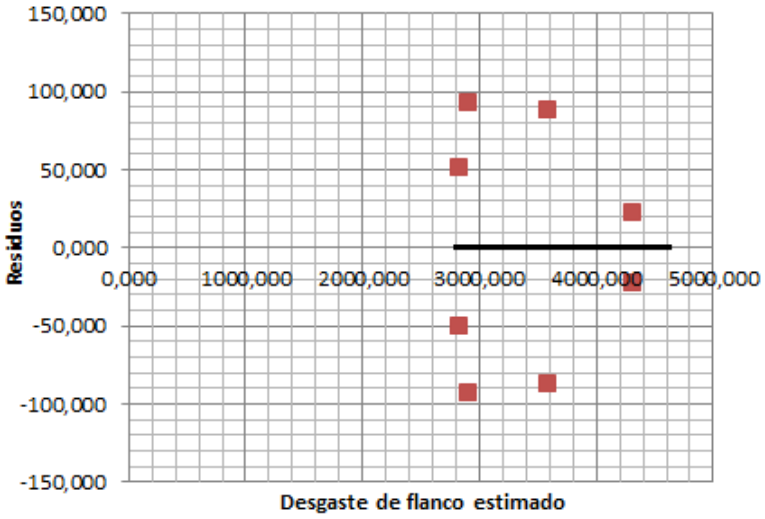


Figura 53-Gráfico Resíduos x Desgaste de Flanco Estimado

A Tabela 10 seguinte temos as estimativas do intercepto (β_0) e dos coeficientes de entrada em relação à variável de entrada.

Tabela 10-Estimativa dos coeficientes da equação do método de superfície de resposta.

Preditor	Efeitos	Estimativa	Desvio Padrão	Estat. T	P-valor
Intercepto (β_0)		3407,75	34,832	97,83336	$6{,}54 \times 10^{-08}$
A (Vc)	1075,5	-537,75	34,832	-15,43831	0,000103
B(f)	-327	-163,5	34,832	-4,693934	0,00935
A(Vc):B(f)	403	201,5	34,832	5,784879	0,004437

Como a estimativa dos coeficientes das variáveis de entrada é negativa, podemos concluir que no intervalo da análise, tendo o aumento da velocidade de corte e do avanço, estes provocariam uma diminuição no comprimento de corte da ferramenta. Na Tabela 10 podemos também observar os p-valores para cada coeficiente. Como estes valores são muito pequenos (muito próximos à zero), a hipótese dos coeficientes não apresentarem significância

foi descartada, pois todos os coeficientes e a interação entre eles são relevantes para o estudo em questão.

A Tabela 11 abaixo nos traz o valor de R^2 e R^2 ajustado, como este valor está próximo a um, temos uma ideia da qualidade da precisão do ajuste, com o valor obtido de R^2 ajustado temos fortes indícios de que o modelo linear está bem ajustado ao conjunto de dados analisados.

Tabela 11- Valor de R^2 e R^2 ajustado para a regressão linear

Desvio Padrão dos Resíduos	Graus de Liberdade	R^2	R^2Ajustado
98,52030248	4	0,986569933	0,976497383

Para o modelo de comprimento de corte o modelo de regressão é descrito de acordo com a equação abaixo:

$$\hat{Y} = 3407{,}75 - 537{,}75x_1 - 163{,}5x_2 + 201{,}5x_1x_2$$

Equação 13: Equação de regressão do comprimento de corte

Onde:

$\hat{Y}$ = Modelo de regressão linear para o comportamento do comprimento de corte em função da variação da velocidade de corte e do avanço;

x_1 = Velocidade de corte denotada de -1 para o menor valor da velocidade de corte utilizada nos testes e +1 para o maior valor da velocidade de corte utilizada nos testes;

x_2 = Avanço denotado de -1 para o menor valor do avanço utilizado nos testes e +1 para o maior valor utilizado nos testes;

A Figura 54 abaixo mostra a superfície de resposta para o problema proposto

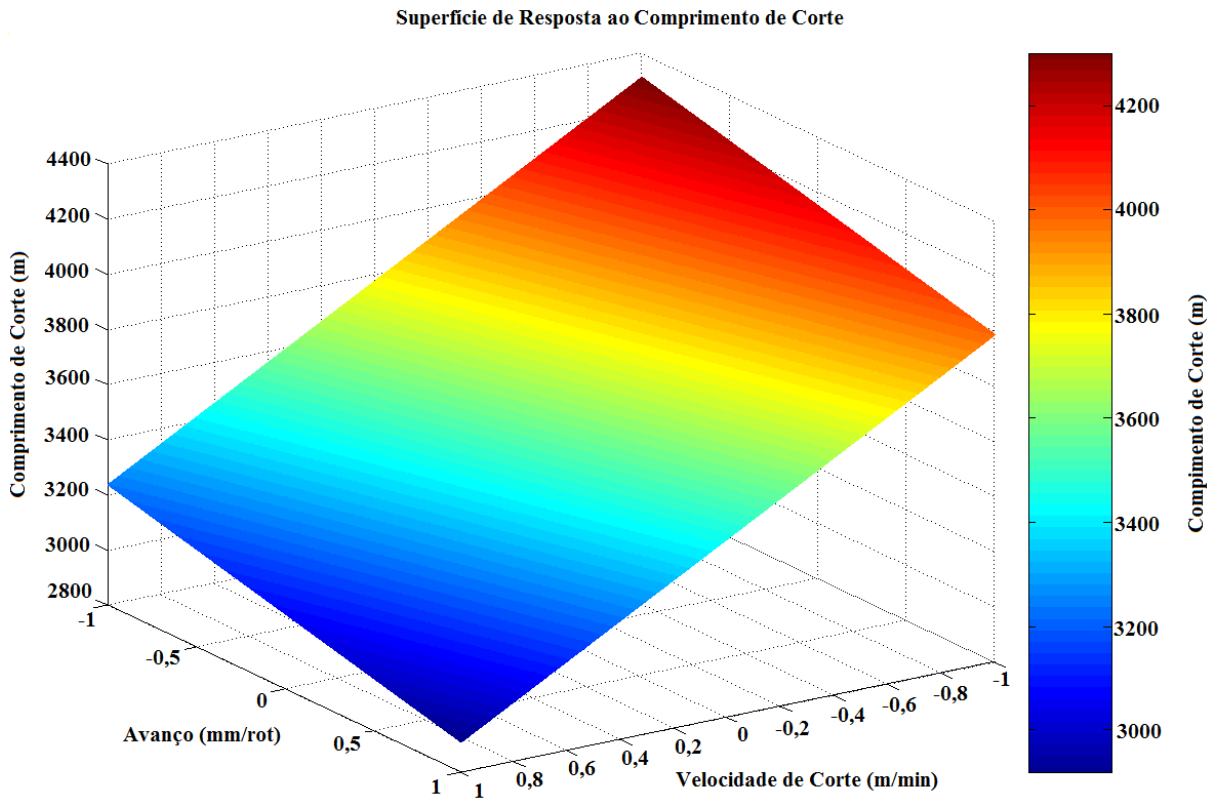


Figura 54-Superfície de resposta ao comprimento de corte

Através da análise da Figura 54, podemos afirmar que se a ferramenta for testada em uma condição onde a velocidade de corte for igual a 500m/min, sendo representada no eixo da velocidade de corte como -1 (menor velocidade de corte considerada no cálculo) e o avanço de 0,175mm/rot (não utilizado nos testes, mas médio aos valores considerados nos cálculos) sendo representado no eixo do avanço pelo número 0, podemos afirmar com 95% de chances de encontrarmos um comprimento de corte próximo a 4180m.

4.10 Análise dos Testes de Acabamento

Como a melhor faixa de velocidade de corte encontrada nos testes de semi-desbaste foi de 500 a 600m/min, estes parâmetros foram adotados para os testes de acabamento, combinando-se estas velocidades de corte com avanços e profundidade de corte reduzidos, para se reduzir o atrito existente entre a peça e a ferramenta e consequentemente diminuir as vibrações decorrentes do processo de usinagem e consequente redução da rugosidade. Estes parâmetros estão descritos na Tabela 12 a seguir:

Tabela 12-Parâmetros de corte utilizados nos testes de acabamento.

Condição	Vc (m/min)	F (mm/rot)	Ap (mm)
1	500	0,04	0,25
2		0,08	0,25
3	600	0,04	0,25
4		0,08	0,25

Nos testes de acabamento foi contemplado avaliação da rugosidade não somente dos parâmetros de amplitude (JIS 2001) mas também dos parâmetros operacionais (DIN 4776), para avaliar quais as caracteristicas de acabamento superficial que a ferramenta desenvolvida traria, também foi avaliado a tolerância geométrica de circularidade do corpo de prova, para investigar possíveis deformações no corpo de prova oriundas dos esforços de corte da ferramenta sobre o ferro fundido nodular FUCO FE45012. Nesta etapa a mesa tridimensional Mitutoyo B 5 04 B foi fundamental, devido sua alta precisão na obtenção das medições, por isto, este equipamento foi adotado somente nos testes de acabamento, pois com esforço menor da ferramenta temos uma tendência de encontrarmos uma circularidade mais próxima de zero.

Outro fator determinante para esta investigação mais minuciosa e precisa é o fato de que o momento do acabamento na usinagem é fundamental para garantir a precisão deste processo, onde qualquer falha pode acarretar na perda de horas de trabalho da operação de desbaste dos mais diversos materiais usináveis.

Para estes testes foram dados apenas um passe com a ferramenta desenvolvida e no final de cada passe foram avaliados a rugosidade nos parâmetros de amplitude e funcionais, também foi monitorado a circularidade da peça.

Os resultados da rugosidade nos parâmetros de amplitude estão apresentados nas Figuras 55 e 56.

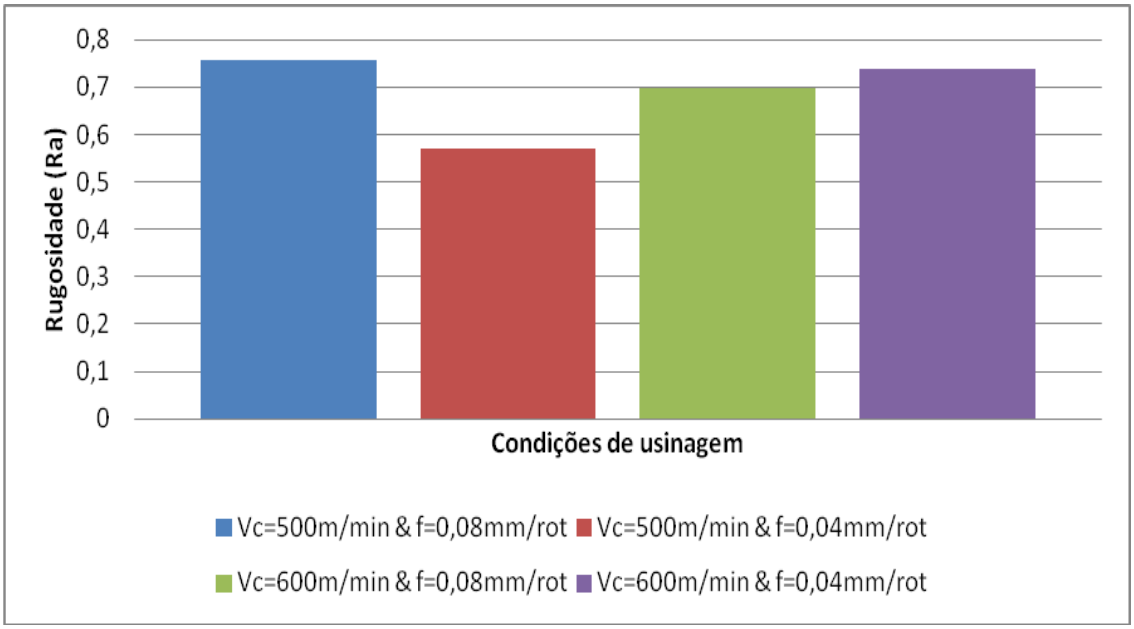


Figura 55-Rugosidade Ra em cada condição de usinagem

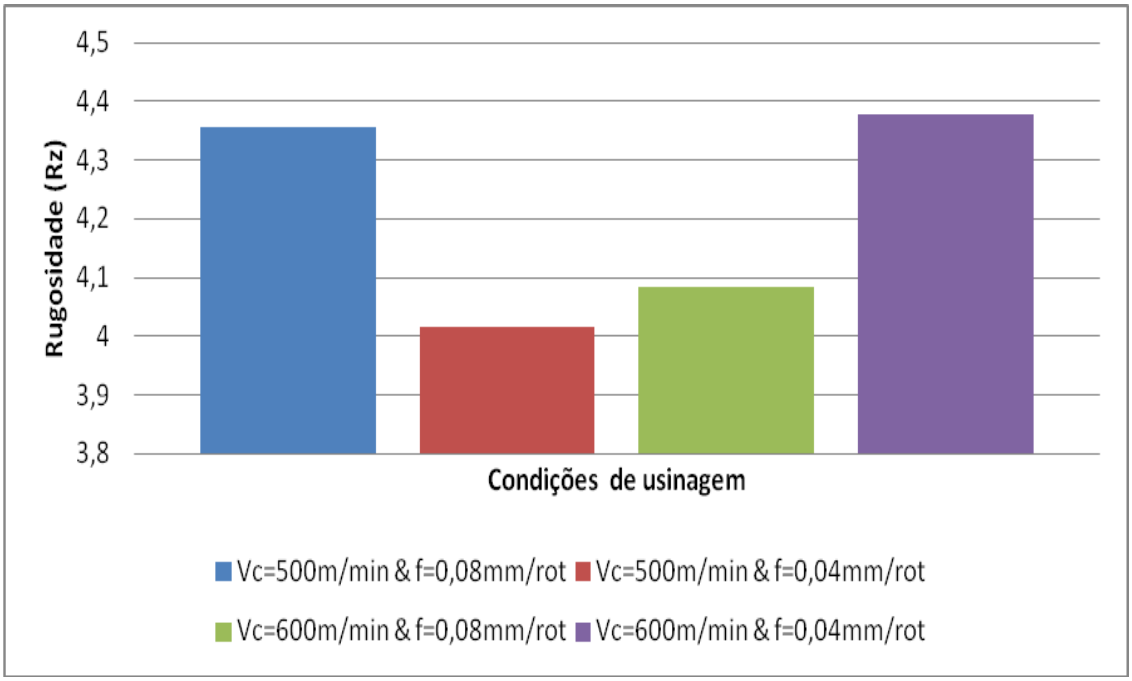


Figura 56-Rugosidade Rz em cada condição de usinagem

Como podemos observar estes gráficos dos parâmetros de amplitude (JIS2001) mostram que a ferramenta apresenta bons resultados de acabamento, com baixas rugosidades superficiais principalmente quando utilizada no avanço de 0,04mm/rot. Principalmente pelo Ra baixo obtido nos testes fica evidente que o acabamento da peça fica em uma condição de polimento ou de super polimento dependendo dos parâmetros utilizados, e de acordo com a Agostinho,1981, esta faixa de rugosidade só pode ser alcançada se fosse utilizando alguns cuidados ou métodos especiais durante o processo do torneamento.

De acordo com Agostinho 1981, estes valores de Ra encontrados seriam ideais para aplicações mecânicas do tipo válvula de esfera, tambores de freio, superfície de guia de elementos de precisão, pistas de assento de agulhas de cruzetas de cardãs.

O parâmetro Rz alcançou valores mais altos de rugosidade devidos sua maior sensibilidade que o parâmetro Ra, pois somente as alturas máximas dos perfis são consideradas e não suas médias são comparadas e analisadas.

Além dos testes nos parâmetros de amplitude, também foi realizado medições de rugosidade nos parâmetros funcionais DIN 4776, e os resultados estão mostrados nas figuras 57 a 62.

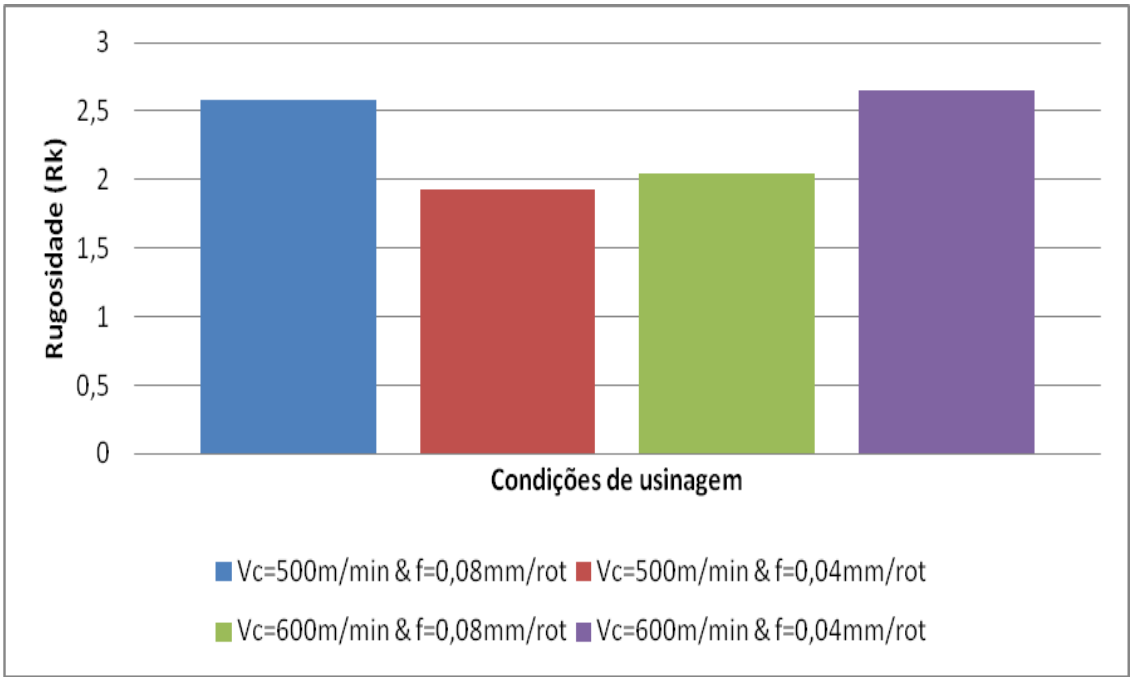


Figura 57-Rugosidade R_k em cada condição de usinagem.

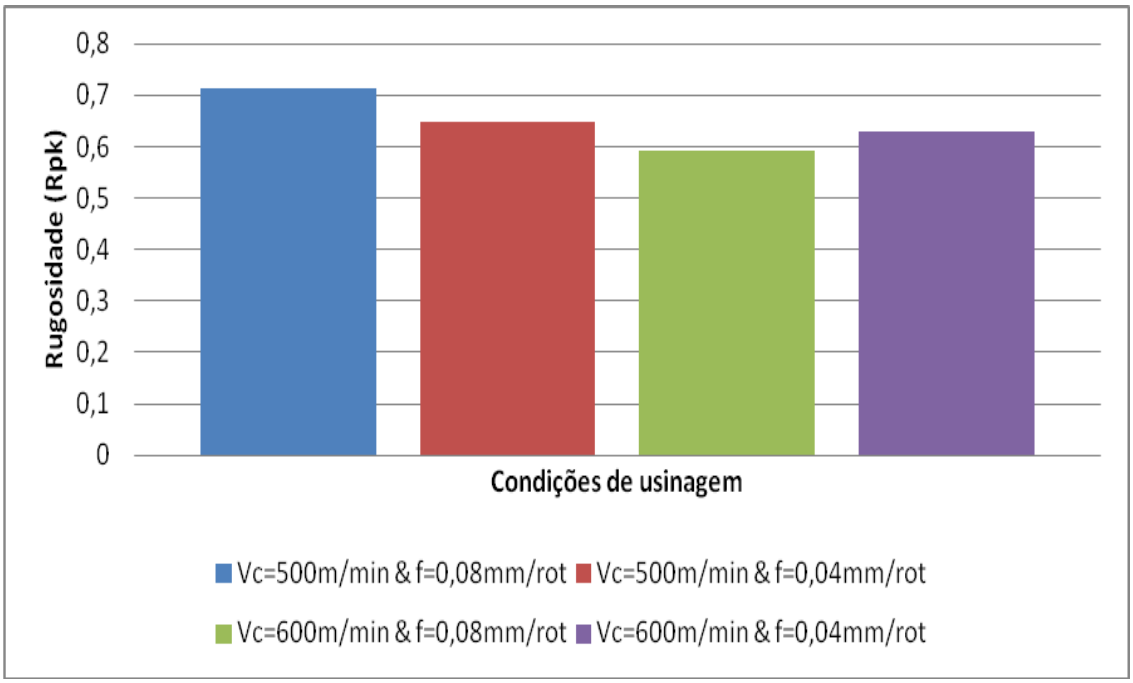


Figura 58-Rugosidade R_{pk} em cada condição de usinagem.

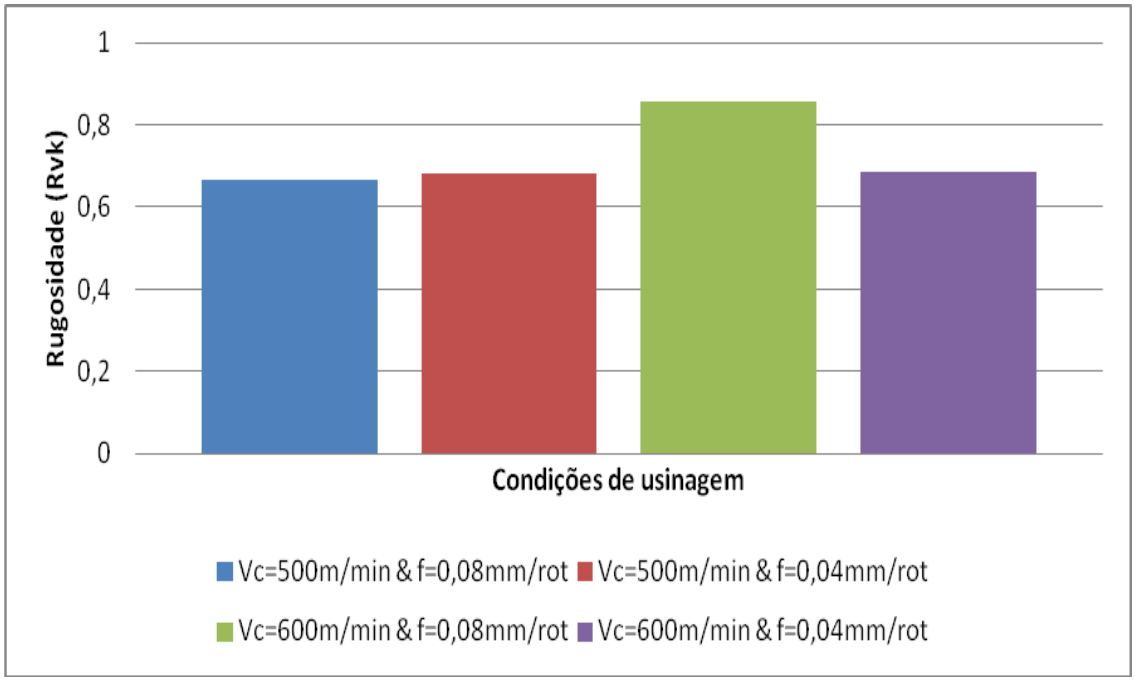


Figura 59-Rugosidade R_{pk} em cada condição de usinagem.

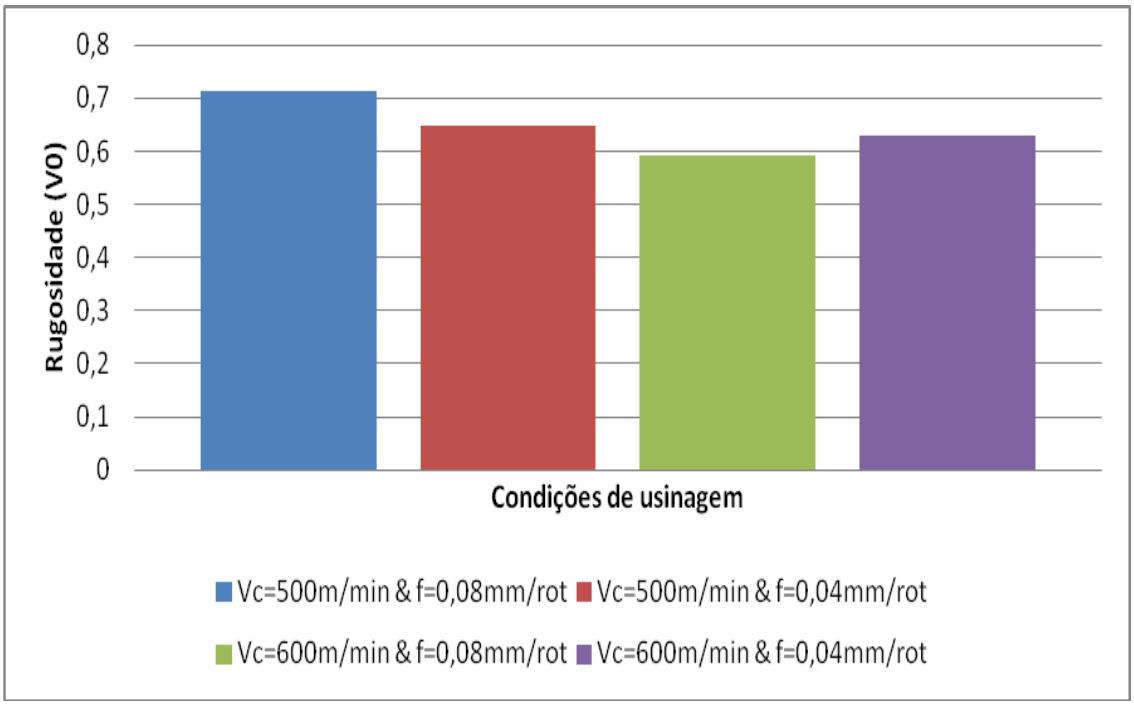


Figura 60-Rugosidade V_0 em cada condição de usinagem

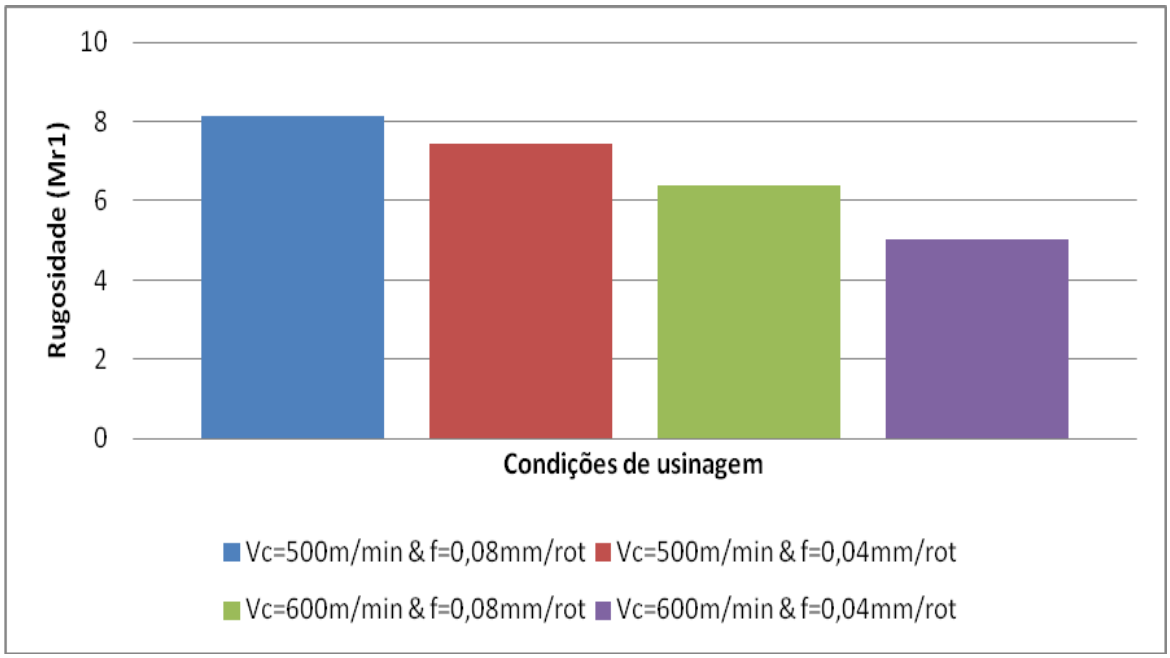


Figura 61-Rugosidade M_{r1} em cada condição de usinagem.

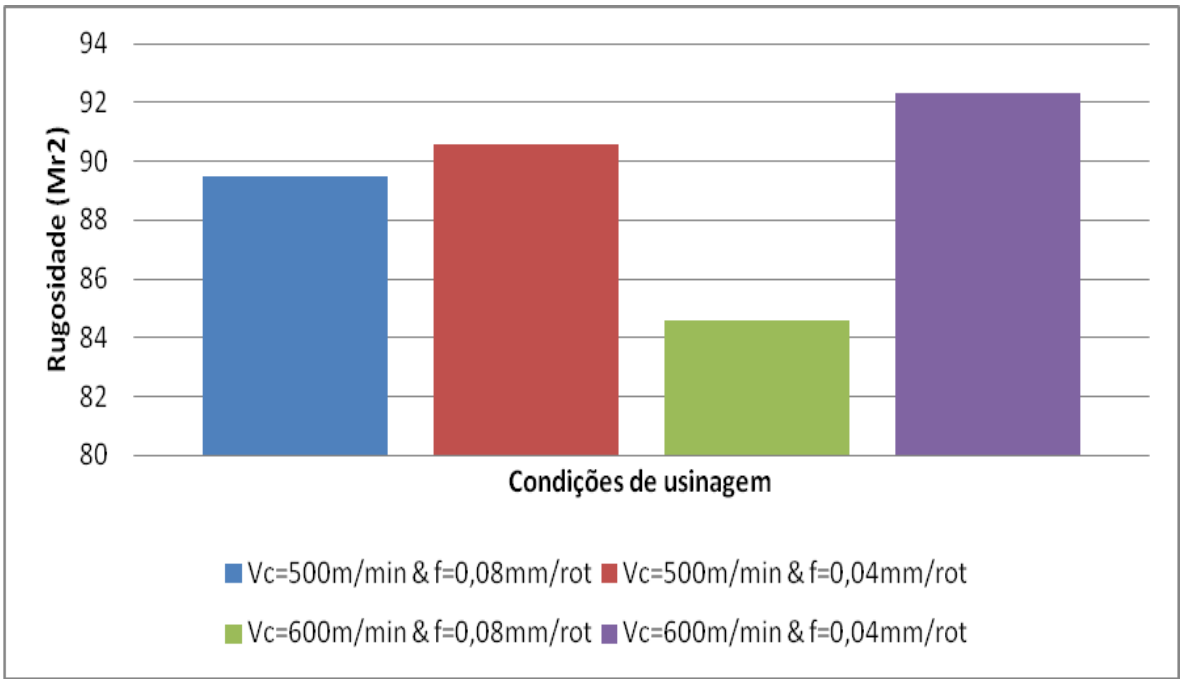


Figura 62-Rugosidade M_{r2} em cada condição de usinagem.

Através da análise do parâmetro R_{pk}, podemos observar que este parâmetro mede a região que apresenta picos, os quais são os primeiros a se desgastar no momento do uso, devido ao atrito com as demais peças do conjunto mecânico a qual a peça foi submetida, este desgaste se dá por meio da quebra dos picos ou simplesente pela deformação plástica do mesmo. Esta região apresenta um valor de rugosidade muito baixa, como o menor valor encontrado de 0,59µm para a velocidade de corte de 600m/min com avanço de 0,08mm/rot e o maior valor de 0,75µm para a velocidade de corte de 500m/min e avanço de 0,08mm/rot, análogamente a este parâmetro o M_{r1} avalia a porcentagem da área que esta região ocupa, que para a mesma velocidade de corte mostrada no parâmetro R_{pk} a porcentagem do comprimento da amostra analisada é de 6,4 e 8,13%.

O Parâmetro R_k traz a região de máximo contato, é o parâmetro que é associado à parte intermediária da rugosidade, influenciando no desempenho de algumas superfícies. Para as duas condições de usinagem já citadas, estes valores representam respectivamente 2,04 e 2,58µm, juntamente a este dado,uma breve análise dos marâmetros M_{r1} e M_{r2} mostra que esta região ocupa valores de 85,2 e 81,3% do comprimento analisado.

Analisando o parâmetro R_{vk} fica nitido que abaixo da região de máximo contato, também apresentou valores de rugosidade muito baixo, na velocidade de corte de 600 m/mim

e avanço de 0,08mm/rot e na velocidade de corte de 500m/min e avanço de 0,08mm/rot, este parâmetro alcançou respectivamente 0,85 e 0,66µm e com uma breve análise do parâmetro M_{r2} estes valores ocupam uma porcentagem de 8,4 e 10,5 da area analisada.

Observando o parâmetro de rugosidade V_0 em todas as condições do teste apresentaram valores muito pequenos de rugosidade o que indica que para qualquer condição de acabamento testada com a ferramenta desenvolvida a superfície originada terá como característica uma mínima retenção de fluidos, fluidos estes provenientes da ação de lubrificantes utilizados para reduzir atrito entre peças de um conjunto mecânico.

A ferramenta também foi avaliada quando a tolerância geométrica de circularidade, o quadro da Figura 63 mostra o comprotameto da circularidade durante os testes.

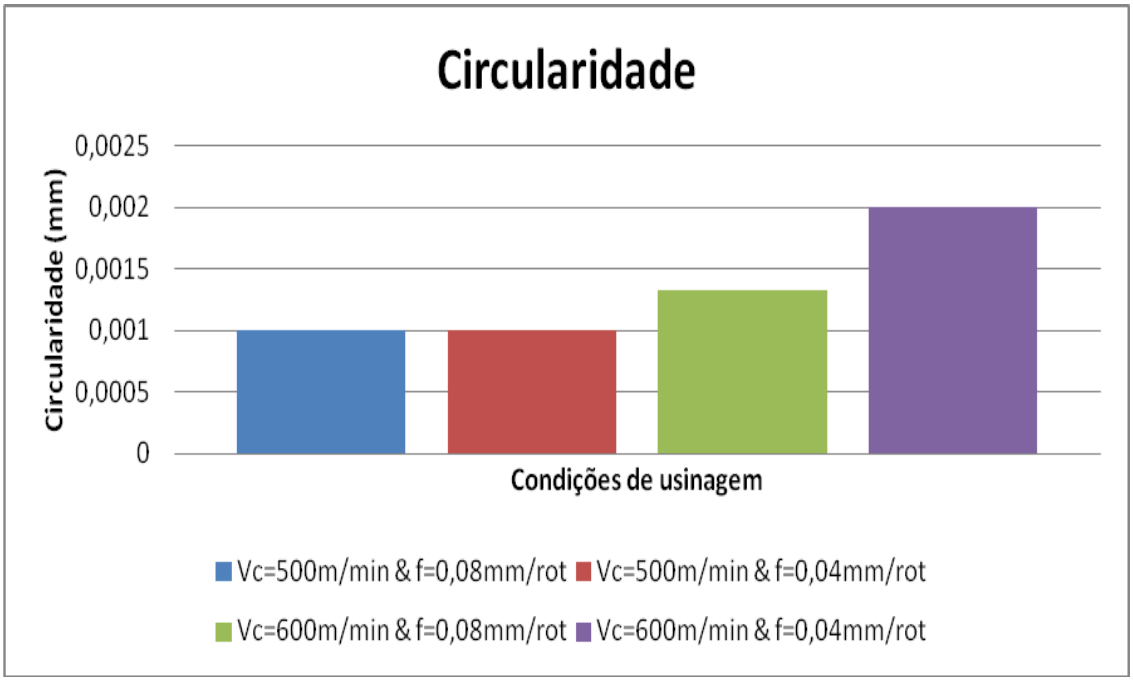


Figura 63-comportamento da circularidade em cada teste realizado

Após uma análise do Figura 63 a circularidade não teve nenhuma associação com a velocidade de corte ou com o avanço, onde não foi encontrada grandes discrepâncias no seu valor para cada condição testada, a maior variação da circularidade observada foi de 0,001mm.

CONCLUSÕES

A ferramenta desenvolvida apresentou bons resultados no torneamento a seco do ferro fundido FUCO FE45012, sendo alcançado o maior comprimento de corte de 4333 metros no teste de semi-desbaste com altas velocidades de corte, para um desgaste de flanco igual a 0,6mm e não apresentaram a ocorrência de trincas oriundas de fadiga mecânica, lascamentos, ou colapso de nenhuma das arestas de corte, nos diversos testes executados. Indicando que a ferramenta é eficaz na usinagem com velocidades de corte altas de até 600m/min.

Com a evolução do desgaste de flanco da ferramenta indica que ela é promissora na usinagem de longos comprimentos de corte.

Com o método da superfície de resposta aplicado, permitiu a redução do número considerável do número de experimentos, sem que tivesse perda na qualidade dos resultados, e também confirmou o que Ferraresi e o Diniz, já mostraram em seus estudos sobre a influência dos parâmetros de corte sobre as condições de usinagem. E mesmo a ferramenta não sendo utilizada em condições de corte intermediaria ela permitiu que fosse estimado com qual seria o comprimento de corte alcançado se a ferramenta fosse testada em qualquer parâmetro dentro das condições analisadas pela superfície de resposta.

Nos testes de acabamento a ferramenta de corte apresentou excelentes resultados, pois em todas as condições de acabamento com a ferramenta citada valores de Ra encontrados seriam ideais para aplicações mecânicas do tipo válvula de esfera, tambores de freio, superfície de guia de elementos de precisão, pistas de assento de agulhas de cruzetas de cardãs.

A análise dos resultados dos testes de acabamento pelos parâmetros de rugosidade JIS 2001 apresentaram bons resultados pois em todas as condições utilizadas a ferramenta obteve uma condição de polimento ou de super polimento que só seria possível atingir se fossem utilizados técnicas ou equipamentos especiais de usinagem que não foi utilizado em nenhum dos testes.

Na análise dos parâmetros operacionais DIN 4776, a região de máximo contato, do corpo de prova (parte intermediária da rugosidade), que é a região que influencia diretamente

no desemprenho de uma superfície usinada mostra que esta região ocupa valores em torno 85,2 e 81,3% do comprimento analisado, e a ferramenta apresentou resultados de uma mínima retenção de fluido na superfície do ferro fundido FUCO FE45012.

A tolerância geométrica de circularidade nos testes de acabamento ficou com valores muito próximos à zero em todas as condições analisadas no experimento, afirmando as qualidade da ferramenta quando aplicada a trabalhos de precisão dimensional.

Os resultados dos testes de acabamento mostram que a ferramenta apresenta resultados promissores na usinagem de acabamento e de precisão de elementos mecânicos.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Testes comparativos da ferramenta desenvolvida com ferramentas comerciais o torneamento do ferro fundido nodular.
2. Usinagem com velocidades de corte acima das testadas neste trabalho.
3. Aplicação no torneamento do ferro fundido cinzento.
4. Testes da ferramenta com outros metais ferrosos.
5. Desenvolvimento de ferramentas com outras geometrias.
6. Testes no fresamento do ferro fundido cinzento.

Referências Bibliográficas

Agostinho, L. O. Rodrigues, S. C. A, Lirani, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Blucher, 1981.

Almeida, C.M.; **Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT 4140 laminado a quente e temperado/revenido**. Dissertação mestrado. Pontifica Universidade Católica de Minas Gerais, 2010.

AMERICAN SOCIETY OF TEST MATERIALS ASTM A247 **Standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron castings**.

AMERICAN SOCIETY OF TEST MATERIALS ASTM C1327-99, **Standard test method for vickers indentation hardness of advanced ceramics**, pp. 1-8, 1999.

AMERICAN SOCIETY OF TEST MATERIALS ASTM C-1421-99, **Standard test method for determination of fracture toughness of advanced ceramics at ambient temperature**, pp. 1-32, 1999.

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR ISO2768/2001 **Tolerâncias para dimensões lineares e angulares sem indicação de tolerância individual**, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR ISSO 14001/2004 **Sistemas de gestão ambiental - requisitos com orientações para uso**, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR12288 **Representação simplificada de furos de centro em desenho técnico**, 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT 2768/2001 **Tolerância para dimensões lineares e angulares sem indicação de tolerância individual**, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT 4287/2002 **Especificações geométricas do produto(GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade**, 2002.

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT 8404/1983 **Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos**, 2002.

Bet, L. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

Bccresearch. Disponível em < http://www.bccresearch.com>. Acessado em 30/05/2012

Bhattacharyya , S.; Ezugwu, E.O.; Jawaid, A. **The performance of ceramic tool materials for the machining of cast iron,** Wear **135** (1989), pp. 147–159.

Candido, F.S; **Origens do estiramento de estampagem dos aços inoxidáveis ferríticos tipo AISI 420** . Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2003.

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, **Materiais Avançados 2010-2022.** Disponível em < http://lnnano.cnpem.br/wpcontent/uploads/2012/01/Livro_Materiais_Avancados_2010_CGEE.pdf >Acessado em 15/08/2013.

Chell, C.O; McCLUNG, **Significant issues in poof testing**. A Crittical Appraisal. NASA, Contractor Report 4628, 1994

Chiaverini, V.; Aços **e ferro fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007

Diniz, A. E; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L**.** **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: M.M., 2013.

Diniz, A. E.; *Usinagem* **limpa: cada vez mais uma realidade em mercado empresarial**, 2008. Disponível em < http://www.123achei.com.br/feiras/downloads/2008/usinagem.pdf > consultado em janeiro 2013.

Doré, C.; Bagetti, J. H.; Boehs, L. ; Guesser, W. L.; Bressiani, A. H. A. **Avaliação do desempenho de ferramenta de cerâmica Al_2O_3+Y_2O_3+NbC na usinagem de ferro fundido vermicular**, anais COBEF 2007.

EZUGWU, E. O., *Key* **improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys**. Internacional Journal of Machine Tools and Manufacture, 45, p1353-1367, 2005.

Ferraresi, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 5 ed. São Paulo: Blucher, 1977.

Filho, R.G.A. **Planejamentos fatoriais planejados para análise de sensibilidade de modelos de simulação de eventos discretos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Itajubá, 2006.

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.

Galdamez, E.V.C., Carpinetti, L.C.R. **Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos no Processo de Inserção Plástica**, 2004 Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/gp/v11n1/a11v11n1.pdf > consultado em agosto 2012.

Huang, H.H. **Simulação da Formação de Cavacos Usando FEM (Finite Element Method) Temperatura Força**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, 2007.

Hübner, H.W. **Mecânica da fratura e a resistência mecânica de materiais cerâmicos**. CBECIMAT,3,1978

Inácio, M.A. **Desenvolvimento de compósitos cerâmicos de Al_2O_3 e ZrO_2**. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2010.

INTERNATIONAL STANDARD ISO 3685/1993 **Tool Life Testing Whit Single-Point Tuming tools**, 1993.

INTERNATIONAL STANDARD ISO 1832/1992 **Indexable Inserts for Cutting Tools -- Designation**, 1993.

INTERNATIONAL STANDARD ISO 5608/2012 **Turning and copying tool holders and cartridges for indexable inserts -- Designation**, 1993.

Johnson, L. R.; Teoria A. P. S.; Hill L. G. **A Structural ceramic research program**. A Preliminary Economic Analysis, Argonne National Laboratory Report ANL/CNVS-38, 1983.

Kainess, C.; Sedagães, A. M.; Kuhnen, N. C.; Riella, H.G.; Hotza, D.; Acchar, W. **Influencia da adição de cinzas pesadas de carvão mineral nas propriedades mecânicas e físicas de materiais cerâmicos**. Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica 15-18 junho, 2003.

Kitagawa, T.; Kubo, A.; Maekawa, K**. Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn.** Wear, V. 202, n.2, p. 142-148, 1997

Konig, W.; Klocke, F. . **Fertingungsverfahren** 1: Drehen, Frësen, Bohren. 5. Auflage. Aachen, 1997

Kopac, J. **Influence of cutting material and coating on tool quality and Tool Life**, Journal of Materials Processing Technology 78 (1998) 95-103.

Lanna, M. A.; Souza, J.V.C.; Santos, C.; Silva, C.R.M.; Silva, O.M.M.; **Otimização de custos de produção de ferramentas utilizando sinterização normal**. Anais do 48º Congresso Brasileiro de Cerâmicas, 2004.

Larson, R. P.; Vyas, A. D.; Teoria, A. P. S.; Johnson, L. R. **Outlook for Ceramics in Heat Engines**, 1990–2010. A Technical and Economic Assessment Based on a Worldwide Delphi Survay, Argonne National Laboratory Report ANL/ESD-5, 1990.

Larson, R. P.; Vyas, A. D. **Update on the Prospects for Ceramic Engine Components**. Presented in 1st International Conference on Heat-Resistant Materials, Lake Geneva, WI, September 22–26, 1991, Argonne National Laboratory Technical Report ANL/CP-73571.

Li, W. Q.; Gao, L. **Processing, Microstruture and mechanical properties of 25% vol YAG-Al_2O_3 nanocomposites**, Nano Structured materials, 1999, 11, 1073.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. O. **Usinagem dos Metais**. 2009 Apostila (Faculdade de Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia

Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, M. O. **Teoria da Usinagem dos Materiais**, São Paulo: Blucher, 2011.

Machado, A. R.,Silva, M.B. **Usinagem dos Metais**, Universidade Federal de Uberlândia, 1996.

Malère, E. P. **Análise comparativa de ferramentas cerâmicas na usinagem de ferros fundidos e aços endurecidos.** Dissertação mestrado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2006.

Mizutani, Y., Maeda N., Ohnaka, I., Waku, Y., Yasuda, H, **Coupled growth of unidirectionally solidified Al_2O_3-YAG eutectic ceramics**, Journal of Crystal Growth, 2002, 242, 384

Mochizuki, S.S. **Análise das forças no torneamento do ferro fundido cinzento visando à aplicação em modelos do processo de fresamento frontal**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

Mocrosky, J.F.; Borges, J.B. **Mecânica**, Apostila Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, unidade Chapecó, 2007. Disponível em <http://pt.scribd.com/doc/24089647/28/Cilindricidade > consultado em agosto 2012

Montgomery, D. C., Runger, G. C., Hubele, N. V. **Estatística Aplicada à Engenharia**, Rio de Janeiro, LTC, 2004.

Moreira, M.R.V., Estudo da **usinagem por torneamento da liga Ti-6Al-4V**, Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Química de Lorena- FAENQUIL, Lorena-SP, 2002.

Okada, A. **Automotive and industrial applications of structural ceramics in Japan**. Nissan Research Center. Nissan Motor Co., Ltd., Yokosuka 237-8523, Japan, 2007.

Okada, A.; **Challenges of ceramics for structural application**. Bull. Ceram. Soc. Jpn. 40 (2005), pp. 259–275 .

Oliveira C. J. **Interação dinâmica entre irregularidades dimensionais em componentes mecânicos que trabalham em movimento de rotação**. Tese Doutorado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2010.

Parthasarathy, T. A.; Mah, T.; Matson, L. E., **Processing, structure and properties of alumina-YAG eutetic composites**, Journal of Ceramic Processing Research, 2004, 5, 380.

Popke, H.; Emmer, T.; Steffenhagen, J**. Environmentally clean metal cutting processes machining on the way to dry cutting**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 213 Part B (1999), pp. 329–332.

Richards, N., Aspinwall**,** D**. Use of ceramic tools for machining nickel basead alloys.** Internacional Journal Machine Tools Manufacturing, v.29, n.4, p.575-588, 1989.

Rodrigues, H. L. ; SILVA, D. F.; Ribeiro, R. B.; Crnkovic, S. J. ; Pereira, M. S. **Caracterização Microestrutural de Pastilha de Metal Duro com Recobrimento Aplicada no Acabamento em Operações de Torneamento** . 59º CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 2004, SÃO PAULO. 2004.

Romi. **Catálogos Gerais de Máquinas-Ferramenta.** 2008. Disponível em < http://www.romi.com.br/index.php?id=catalogosgerais > consultado em setembro de 2012.

Sandvick. **Ferramentas de corte**. Catálogo Sweden: Sandvick Coromant., in Portuguese.2012

Santos, S.C. **Caracterização Físico-química de Pós de Óxido de Ítrio**, Artigo Cbcimat, 2008. Disponível em http://www.ipen.br/biblioteca/2008/cbecimat/13257.pdf consultado em setembro 2012.

Scarpel, R. A. **Projeto e análise de experimentos**, Notas de aula, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2012. Disponível em http://www.mec.ita.br/~rodrigo/MOQ14.htm consultado em agosto 2012.

Silva, O.M.M. **Desenvolvimento e caracterização de ferramentas de corte nacionais de nitreto de silício.** Dissertação de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1996.

Souza, A. J.; **Processos de fabricação por usinagem**, 2011. Disponível em <http://www.chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem_Parte1.pdf > Acessado em novembro 2012

Sousa, L. F.; Souza, J.V.C.; Silva, O. M. M.; Ávila, R. F.; Santos, C.; Machado, J. P.B. **Influência da velocidade de corte na usinagem do ferro fundido nodular utilizando ferramentas cerâmicas de alumina**. Revista Cadernos UNIFOA, p 45-51, 2012

Souza, J.V.C.; Cunha, E.A.; Moreira, M.R.V.; Martins, G.V.; Raymundo, E. A.; Kelly, C. A. **Usinagem de Ferro Fundido Vermicular com Pastilhas Cerâmicas a Base de Nitreto de Silício**. Máquinas e Metais, v. 470, p. 140-152, 2005.

Souza, J.V.C, **Desenvolvimento de Pastilhas Cerâmicas à Base de Si3N4 para Aplicações Tribológicas**, Tese Doutorado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita. Tese de Doutorado, 2005

Souza, J. V. C.; Ribeiro, M. V.; Crnkovic, S. J.; Silva, O. M. M.; **O desenvolvimento nacional de ferramentas cerâmicas para usinagem**. Maquinas e Metais, São Paulo, vol 44, p. 236-251, 2008

Teles, M.T; **Torneamento do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizando ferramentas de metal duro**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Itajubá, 2007.

Vyas, A.; Stodolsky, F.; Hanson, D. **Future Market for Ceramics in Vehicle Engines and Their Impacts**. Proceedings of 2nd World Car Conference, Riverside, CA, January 22–24, 1995, 154–176, Argonne National Laboratory Technical Report ANL/ES/CP-84456.

Witting, H. **Torneamento de Superligas**. Máquinas e Metais, n. 440, p.156-165, 2002

Xavier, F. A. **Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal duro, cerâmica e CBN**. Dissertação mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

Yeckley, R. **Ceramic grade design**, Kennametal Comprehensive Application Engineering Guide, vol. 12, Kennametal University, Latrobe, PA (2005) pp. 2–12.