

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA VIABILIDADE DA USINAGEM DE COMPÓSITO DE MATRIZ DE EPÓXI  
COM CARGAS DE FERRO VISANDO A SUA UTILIZAÇÃO EM MOLDES DE INJEÇÃO

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

**FERNANDO LEMONJE WESTRUPP**

Florianópolis, dezembro de 2008.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA VIABILIDADE DA USINAGEM DE COMPÓSITO DE MATRIZ DE EPÓXI  
COM CARGAS DE FERRO VISANDO A SUA UTILIZAÇÃO EM MOLDES DE INJEÇÃO

**FERNANDO LEMONJE WESTRUPP**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA  
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA  
sendo aprovado em sua forma final.

---

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph D. – Orientador

---

Prof. Gean Vitor Salmoria, Dr. – Co-orientador

---

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D.Sc. – Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng. – Presidente da Banca

---

Prof. Guilherme M Barra, Dr. Sc.

---

Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng.

“Necessitamos sempre de ambicionar  
alguma coisa que, alcançada, não nos  
torna sem ambição.”

*Carlos Drummond de Andrade*

À Vanessa, minha vida, pela paciência, estímulo e amor.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar toda a minha gratidão ao meu orientador o professor João Carlos Espíndola Ferreira, pela oportunidade, colaboração, orientação e paciência, que foram importantíssimas para realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador o professor Gean Vitor Salmoria, pelas trocas de idéias e elucidações de algumas dúvidas, que foram fundamentais para o progresso do presente trabalho.

Aos colegas e amigos do GRIMA, Izabel Cristina Zattar, Paulo Antonio Reaes, Walter Luís Mikos, Júlio Cesar Ticona Benavente e Kleber Ristof. Sem esquecer os bolsistas Carlos Roberto, Gabriel, Paulo, Fabbio e Roman. E em especial ao professor Noel que foi essencial para concretização do trabalho, tanto para o seu planejamento, quanto as análises dos resultados.

Aos membros do USICON, do LABMAT, e do CIMJECT pela disponibilização dos equipamentos e informações, em especial ao Fernando Souza Pereira.

À minha mãe, Sonia Lemonje Westrupp, pelo apoio incondicional nos momentos difíceis, carinho e incentivo.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro.

À Sandvik Coromant Brasil, pela doação das ferramentas.

Por fim, a todos aqueles que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Justificativa.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo Geral.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Estrutura da Dissertação.....	5
CAPÍTULO 2.....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Materiais Compósitos.....	7
2.1.1 Resina epóxi.....	9
2.1.2 Cargas particuladas.....	11
2.2 Fundamentos do processo de usinagem.....	13
2.2.1 Ferramenta de corte de geometria definida.....	13
2.2.2 Torneamento.....	16
2.2.3 Processo de corte.....	17
2.2.4 Formas dos cavacos.....	18
2.2.5 Usinagem de polímeros.....	20
2.3 Materiais para ferramenta de corte.....	22
2.3.1 Metal duro.....	24
2.4 Desgaste da ferramenta.....	27
2.5 Rugosidade da superfície.....	28
2.5.1 Efeitos das variáveis de usinagem na rugosidade.....	32

CAPÍTULO 3.....	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1 Metodologia da Pesquisa.....	34
3.2 Aparato Experimental .....	35
3.2.1 Material de Ensaio .....	35
3.2.2 Máquina-ferramenta.....	40
3.2.3 Ferramentas de corte.....	40
3.2.4 Sistema de medição do desgaste.....	41
3.2.5 Sistema de medição da rugosidade da superfície.....	42
3.2.6 Análise da Temperatura .....	42
3.2.7 Análise da microestrutura dos corpos de prova .....	43
3.3 Planejamento dos Experimentos .....	43
3.3.1 Primeira fase dos experimentos .....	45
3.3.2 Segunda fase dos experimentos .....	46
CAPÍTULO 4.....	48
4 Resultados e Análise dos Resultados.....	48
4.1 Rugosidade .....	48
4.1.1 Influência do Avanço sobre a Rugosidade.....	48
4.1.2 Influência da Velocidade de Corte sobre a Rugosidade .....	51
4.1.3 Influência da Quantidade de Ferro no Material sobre a Rugosidade.....	53
4.2 Avaliação da Microestrutura .....	54
4.2.1 Distribuição da carga de ferro na matriz polimérica.....	59
4.3 Análise dos Cavacos.....	60
4.3.1 Cavaco do compósito com 5% de carga de ferro.....	60
4.3.2 Cavaco do compósito com 20% de carga de ferro.....	63
4.4 Temperatura .....	66
4.5 Desgaste da Ferramenta de Corte.....	67
CAPÍTULO 5.....	68
5 CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS .....	68
5.1 Conclusões .....	68
5.2 Recomendações para trabalhos futuros .....	70

REFERÊNCIAS.....	72
APÊNDICES.....	78



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação de materiais compósitos.....	8
Figura 2 – Monômero Epóxi.....	9
Figura 3 – Resina epóxi derivada do bisfenol A.....	10
Figura 4 – Representação de uma ferramenta de geometria definida.....	14
Figura 5 – Principais raios e ângulos de uma ferramenta de geometria definida.....	15
Figura 6 – Torneamento longitudinal.....	17
Figura 7 – Regiões de deformação plástica durante o processo de corte.....	18
Figura 8 – Diversas formas de cavacos.....	19
Figura 9 – Materiais para ferramenta de corte e suas características.....	23
Figura 10 – Micrografia de um metal duro de WC/Co.....	25
Figura 11 – Desgaste de flanco e de cratera.....	27
Figura 12 – Ilustração dos parâmetros de rugosidade $R_a$ e $R_q$ .....	31
Figura 13 – Ilustração dos parâmetros de rugosidade $R_y$ e $R_z$ .....	31
Figura 14 – Imagem das partículas de pó de ferro (aumento de 50x).....	37
Figura 15 – Distribuição do tamanho médio do diâmetro das partículas.....	37
Figura 16 – Ilustração da geometria do inserto de metal-duro utilizado neste trabalho.....	41
Figura 17 - Ilustração do porta-ferramenta utilizado nos ensaios.....	41
Figura 18 - Rugosidade x Avanço ( $r_e = 0,8\text{mm}$ ).....	49
Figura 19 - Rugosidade x Avanço ( $r_e = 0,4\text{mm}$ ).....	50
Figura 20 – Microestrutura do compósito com 20% de ferro com aumento de 35x e $r_e$ 0,4mm..	51
Figura 21 - Rugosidade x Velocidade de corte ( $r_e = 0,8\text{mm}$ ).....	52
Figura 22 - Rugosidade x % de ferro no material ( $r_e = 0,8\text{mm}$ ).....	54
Figura 23 – Microestrutura da resina epóxi.....	55
Figura 24 – Microestrutura do compósito com 5% de ferro.....	56
Figura 25 – Microestrutura do compósito com 10% de ferro.....	57
Figura 26 – Microestrutura do compósito com 20% de ferro.....	58
Figura 27 – Microestrutura do compósito com aumento de 50x BSE.....	60
Figura 28 – Cavaco 5% $V_c=100\text{m/min}$ $f= 0,05\text{mm/rev}$ .....	61
Figura 29 – Cavaco 5% $V_c=100\text{m/min}$ $f= 0,1\text{mm/rev}$ .....	61
Figura 30 – Cavaco 5% $V_c=100\text{m/min}$ $f= 0,15\text{mm/rev}$ .....	62
Figura 31 – Cavaco 5% $V_c=100\text{m/min}$ $f= 0,2\text{mm/rev}$ .....	62
Figura 32 – Cavaco 5% $V_c=200\text{m/min}$ $f= 0,05\text{mm/rev}$ .....	62
Figura 33 – Cavaco 5% $V_c=200\text{m/min}$ $f= 0,1\text{mm/rev}$ .....	62
Figura 34 – Cavaco 5% $V_c=200\text{m/min}$ $f= 0,15\text{mm/rev}$ .....	62
Figura 35 – Cavaco 5% $V_c=200\text{m/min}$ $f= 0,2\text{mm/rev}$ .....	62
Figura 36 – Cavaco 5% $V_c=400\text{m/min}$ $f= 0,05\text{mm/rev}$ .....	63
Figura 37 – Cavaco 5% $V_c=400\text{m/min}$ $f= 0,1\text{mm/rev}$ .....	63

Figura 38 – Cavaco 5% $V_c=400\text{m/min}$ $f=0,15\text{mm/rev}$ .....	63
Figura 39 – Cavaco 5% $V_c=400\text{m/min}$ $f= 0,2\text{mm/rev}$ .....	63
Figura 40 – Cavaco 20% $V_c=100\text{m/min}$ $f= 0,05\text{mm/rev}$ .....	64
Figura 41 – Cavaco 20% $V_c=100\text{m/min}$ $f= 0,1\text{mm/rev}$ .....	64
Figura 42 – Cavaco 20% $V_c=100\text{m/min}$ $f= 0,15\text{mm/rev}$ .....	64
Figura 43 – Cavaco 20% $V_c=100\text{m/min}$ $f= 0,2\text{mm/rev}$ .....	64
Figura 44 – Cavaco 20% $V_c=200\text{m/min}$ $f= 0,05\text{mm/rev}$ .....	65
Figura 45 – Cavaco 20% $V_c=200\text{m/min}$ $f= 0,1\text{mm/rev}$ .....	65
Figura 46 – Cavaco 20% $V_c=200\text{m/min}$ $f= 0,15\text{mm/rev}$ .....	65
Figura 47 – Cavaco 20% $V_c=200\text{m/min}$ $f= 0,2\text{mm/rev}$ .....	65
Figura 48 – Cavaco 20% $V_c=400\text{m/min}$ $f= 0,05\text{mm/rev}$ .....	65
Figura 49 – Cavaco 20% $V_c=400\text{m/min}$ $f= 0,1\text{mm/rev}$ .....	65
Figura 50 – Cavaco 20% $V_c=400\text{m/min}$ $f= 0,15\text{mm/rev}$ .....	66
Figura 51 – Cavaco 20% $V_c=400\text{m/min}$ $f= 0,2\text{mm/rev}$ .....	66
Figura 52 – Temperatura do material na usinagem com passar do tempo.....	67
Figura 53 – Corpo de prova após o vazamento.....	79
Figura 54 – Corpo de prova final.....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de $T_g$ em função da quantidade de agente de cura.....	36
Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados .....	38
Tabela 3 – Condutividade Térmica dos corpos de prova.....	39
Tabela 4 – Características do torno CNC .....	40
Tabela 5 – Especificações do microscópio de ferramentaria.....	42
Tabela 6 – Especificações do termômetro .....	43
Tabela 7 – Parâmetros de corte utilizados nos experimentos .....	45
Tabela 8 – Valores dos parâmetros de corte utilizados na segunda etapa dos experimentos .....	47

## RESUMO

Os materiais compósitos vêm a cada dia ganhando mais espaço dentro das indústrias, principalmente na aeronáutica e automobilística. O aumento da utilização destes materiais está diretamente relacionado à melhoria de algumas propriedades (mecânicas, térmicas e elétricas), bem como a redução de peso e de custo. Além do mais, estes materiais possibilitam a fabricação de moldes de injeção de plásticos de maneira rápida e com custos reduzidos. No âmbito da obtenção de moldes de injeção de maneira rápida, é muito importante o conhecimento da usinabilidade do material compósito a ser utilizado, pois na maioria dos casos este material necessitará de algum processo de usinagem após o seu vazamento. Para que o material possa ser utilizado comercialmente é necessário observar como ele se comporta submetido a diferentes condições de usinagem. Também é necessário ter-se o conhecimento da qualidade da superfície do material após a usinagem para verificar se é adequado o seu uso como molde de injeção, visto que em alguns casos os moldes necessitam de uma reduzida rugosidade da superfície. Dentro deste contexto, esta dissertação propõe um estudo sobre a influência das condições de usinagem de um compósito de matriz polimérica (resina epóxi) com cargas metálicas (ferro), a fim de avaliar a possibilidade de construção de moldes de injeção com este tipo de material. Nos ensaios foi utilizada uma profundidade de corte constante, tendo como variáveis o avanço, a velocidade de corte e a quantidade de carga metálica no compósito. A ferramenta de corte utilizada nos experimentos foi metal-duro sem revestimento. Para a realização dos ensaios de usinagem (processo de torneamento), foram utilizados três valores diferentes de velocidade de corte e quatro de avanço, além de quatro variações de materiais da peça, com o intuito de identificar qual combinação destes parâmetros de usinagem e materiais fornecem os melhores resultados, do ponto de vista de rugosidade da superfície da peça e vida da ferramenta. Para isso, durante a realização dos ensaios, foram monitoradas as marcas de desgaste das ferramentas de corte, a temperatura das peças, bem como a qualidade da superfície das mesmas. Com os experimentos pode-se verificar que a usinagem do compósito é viável, pois a temperatura de transição vítrea da resina não foi atingida, além de não terem sido encontradas marcas de desgaste nas ferramentas de corte.

**Palavras-chave:** Materiais Compósitos, Resina Epóxi, Usinagem, Rugosidade, Vida da Ferramenta.

## ABSTRACT

Composites materials are every day gaining more space within the industry, especially in aircraft and automobilist. Increased use of these materials is directly related to gain the improvement of some properties (mechanical, electrical and thermal) as well as reducing the weight and cost. Furthermore, these materials enable the manufacture of molds for plastic injection quickly and with reduced costs. As part of obtaining of injection molds for fast, is very important to know the machinability of composite material to be used, because in most cases this material will need some machining process after its casting. So that the material can be used commercially is necessary to observe how it behaves under different conditions of machining. It is also necessary to have knowledge of the quality of the material surface after machining to see whether it is appropriate to its use as injection molding, since in some cases the molds need a low roughness of the surface. Within this context, this thesis proposes a study on the influence of the conditions of machining of a composite of polymer matrix (epoxy resin) with loads metal (iron), to assess the possibility of building injection molds with this type of material. In the tests we used a constant depth of cut, with the variable-forward, cut-off speed and amount of load metal in composites. The cutting tool used in the experiments was hard metal coating with no coating. For the testing of machining (process of turning), we used three different values of cutting speed and four of feeds, besides four variations of materials of the piece, in order to identify which combination of these parameters for machining and material supply the best results, in terms of roughness of the surface of the piece and tool life. For this reason, during the tests, were monitored the marks of wear of cutting tools, the temperature of workpiece, and the quality of the surface of them. In the experiments shows that the machining of the composite is feasible, because the glass transition temperature of the material has not been reached, and failure to find marks of wear on cutting tools.

Keywords: Composites materials, epoxy resin, machining, roughness, life of tool.

## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

#### 1.1 Contexto

A globalização e o desenvolvimento de novas tecnologias têm diminuído as barreiras entre as nações, levando nas últimas décadas a uma disputa cada vez maior pelo mercado global. Deste modo, o mercado vem exigindo o desenvolvimento de novos produtos com excelente qualidade de maneira rápida e barata (LIMA, 2003). Devido a essa alta competitividade, é determinante que as empresas atuem no desenvolvimento de novos materiais, bem como na otimização dos métodos de fabricação e dos sistemas de manufatura, a fim de entregar um produto de melhor qualidade num menor tempo e com menor custo.

Cada vez mais as indústrias adotam novos materiais que possam oferecer algum diferencial competitivo, que pode ser proporcionado pelas boas propriedades do material, e pela redução de custos resultante do uso de processos de fabricação mais baratos. Com a finalidade de agregar estes diferenciais competitivos em seus produtos, várias indústrias dos mais variados setores (automobilístico, comunicação, aeroespacial, de artigos esportivos e eletro-eletrônico) estão adotando materiais poliméricos como parte integrante de seus componentes. Através destes materiais, é possível aliar propriedades como baixo peso, capacidade de absorção de deformação com um baixo custo, este último possibilitado pela fabricação em massa de peças injetadas.

Ainda, para atender algumas das exigências do mercado atual, de maneira a serem diferenciadas, algumas indústrias vislumbraram a necessidade de reduzir o ciclo de vida dos produtos, assim como aumentar a variedade dos mesmos. Essas exigências vêm forçando as empresas a reduzir os tempos de desenvolvimento do projeto, bem como o tempo de lançamento do produto no mercado. Também é necessário que as empresas tornem-se mais flexíveis a ponto de fabricar mais peças de lotes diferentes, além de estarem preparadas para mudanças em um curto espaço de tempo, sendo que a fabricação poderá ser até mesmo em lotes de uma só peça.

Tendo em vista a fabricação em lotes pequenos e a redução do tempo de lançamento de um produto no mercado tornam-se cada vez mais essenciais para aumentar a competitividade das empresas, é indispensável que as indústrias de materiais poliméricos também adotem estratégias para competir no mercado global. No entanto, a fabricação tradicional de peças de materiais poliméricos por injeção em moldes metálicos não atende por completo essas exigências, por necessitar de um grande volume de fabricação para compensar o alto valor do molde metálico. Desta forma, é necessário buscar formas alternativas para a fabricação destas peças, sendo que existem basicamente duas correntes fundamentais visando atender as novas exigências:

- Fabricação de peças sem o uso do molde, onde a peça é projetada em um software de CAD, e posteriormente ela é produzida geralmente por adição de material;
- Utilização de ferramental rápido para confecção do molde de injeção.

No primeiro caso insere-se um grande grupo de processos de prototipagem rápida, que é uma tecnologia que possibilita produzir modelos e protótipos diretamente a partir do modelo 3D da peça, que pode ser obtido por: (a) um sistema CAD, (b) por digitalização, ou (c) por Tomografia Computadorizada.

Diversas tecnologias são utilizadas na prototipagem rápida, tais como a Estereolitografia (SL - *Stereolithography*), a Sinterização Seletiva a Laser (SLS - *Selective Laser Sintering*), a Manufatura de Objetos Laminados (LOM - *Laminated Object Manufacturing*) e a Modelagem por Fusão e Deposição (FDM - *Fused Deposition Modeling*) (Badotti, 2001).

No entanto, esses processos ainda são relativamente caros, se comparados à injeção de polímero, principalmente se o número de peças a serem fabricadas for significativo. De modo geral, uma peça fabricada por prototipagem rápida é cerca de 100 vezes mais cara do que uma fabricada por injeção. Por estas razões, somente é viável utilizar métodos tradicionais de prototipagem rápida para fabricar peças poliméricas quando o número destas for significativamente pequeno. Além disso, segundo Vandressen (2003), em muitos casos não é possível utilizar a prototipagem rápida utilizando o material real da peça desejada, além da presença de problemas no acabamento da superfície das peças.

Já a segunda alternativa, que utiliza a construção de novos moldes, mas de maneira rápida, é conhecida como ferramental rápido. Esta é uma tecnologia que adota técnicas de prototipagem rápida para fabricar matrizes e moldes, sejam metálicos ou não-metálicos.

Segundo Volpato (2007), a classificação da fabricação rápida de moldes é dividida em direta e indireta:

- Fabricação direta - O molde ou ferramenta é construído diretamente usando técnicas de fabricação rápida como estereolitografia (SL), modelagem por fusão e deposição (FDM) e sinterização seletiva a laser (SLS).
- Fabricação indireta - Um modelo da peça que se deseja fabricar por injeção é construído, usando-se técnicas de fabricação rápida, para ser usado na fabricação do molde. Como exemplo pode-se citar os moldes fabricados por vazamento de silicone ou resina epóxi, e posteriormente usinados para adquirir formas não conseguidas no vazamento.

Na fabricação direta, o molde é criado a partir da adição de finas camadas de material. Essas ferramentas fabricadas em camadas apresentam superfícies curvas e inclinadas com pequenos degraus que geram imperfeições nas ferramentas produzidas, problema este conhecido como “efeito escada”.

Um problema particular da utilização de moldes de fabricação direta em materiais poliméricos é a baixa condutividade térmica destes materiais, que pode chegar a valores proibitivos em alguns casos. A dissipação de calor influi diretamente na durabilidade dos moldes e nas propriedades da peça injetada, além de poder afetar a microestrutura do componente injetado. Como os tempos de ciclo de injeção, para moldes rápidos não metálicos, são muito longos, é necessário que os moldes possuam uma boa condutividade térmica para que estes sejam utilizados comercialmente de maneira rentável.



A condutividade térmica em moldes de injeção fabricados de materiais poliméricos pode ser melhorada adicionando-se cargas metálicas ao polímero, e este procedimento só pode ser aplicado no caso da fabricação indireta.

## **1.2 Justificativa**

Com o intuito de buscar uma solução para estes problemas, estão sendo desenvolvidos no laboratório CIMJECT/EMC/UFSC materiais compósitos com carga metálica que possam ser utilizados como moldes de injeção em ferramental rápido obtido por fabricação indireta, ou seja, vazamento e a seguir usinagem se necessário.

No trabalho de JESUS (2005) foi desenvolvido um compósito de resina epóxi com carga de pó de ferro para ser utilizado como molde de injeção de materiais poliméricos. Nesse trabalho foi comprovada a possibilidade da utilização deste material como molde de injeção, no que refere às suas propriedades térmicas e mecânicas. No entanto, estudos sobre a fabricabilidade deste material através de usinagem não foram realizados.

O conhecimento a respeito da usinabilidade do material compósito (polímero + metal) a ser utilizado como molde de injeção fabricado por ferramental rápido de maneira indireta é de fundamental importância, pois na maioria dos casos este material necessitará de algum processo de usinagem após o seu vazamento. Para que o material possa ser utilizado comercialmente é necessário observar como ele se comporta com altas taxas de remoção de material e também a altas velocidades de corte. Também é necessário ter-se o conhecimento da qualidade da superfície do material após a usinagem para verificar se é adequado o seu uso como molde de injeção, visto que em alguns casos os moldes necessitam de uma reduzida rugosidade da superfície.

Por estas razões vislumbrou-se a necessidade de um estudo sobre os efeitos dos parâmetros de usinagem sobre este material.

### 1.3 Objetivos

Esta dissertação está fundamentada no estudo do comportamento de um material compósito, utilizado como molde de injeção, durante e após sua usinagem.

#### 1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho de pesquisa tem com objetivo investigar o comportamento do compósito de resina epóxi com partículas de pó de ferro no processo de torneamento, material esse que deverá ser utilizado como molde de injeção de polímero.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para se atingir o objetivo geral do trabalho, estabeleceu-se os seguintes objetivos específicos:

- Verificar como o material compósito, para diferentes cargas de ferro (0%, 5%, 10%, 20% em volume), é afetado pelo processo de torneamento, sob diferentes parâmetros de usinagem;
- Definir os parâmetros de usinagem (velocidade de corte e avanço) mais adequados para este material no torneamento, tendo em vista a sua utilização como molde de injeção de polímeros;
- Avaliar as mudanças da rugosidade para diferentes porcentagens de ferro e de parâmetros de corte.

### 1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada nos seguintes capítulos:

**Capítulo 1 – Introdução:** apresenta-se uma visão geral da presente pesquisa, descrevendo-se o contexto e a justificativa, além dos objetivos e a estrutura da dissertação.

**Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica:** apresenta o referencial teórico da pesquisa, tratando dos conceitos teóricos relacionados à usinagem, com maior ênfase no torneamento, ferramentas de

corte e sobre materiais compósitos, mais especificamente sobre resinas epóxis com cargas metálicas.

**Capítulo 3 – Materiais e Métodos:** apresenta o planejamento do trabalho, bem como as características dos materiais utilizados e dos equipamentos necessários para realização da presente pesquisa.

**Capítulo 4 – Resultados e Análise dos Resultados:** descreve os resultados obtidos neste trabalho, como: rugosidade da superfície, temperatura de corte, desgaste da ferramenta e tipos e formas dos cavacos, além das discussões sobre estes resultados.

**Capítulo 5 – Considerações Finais:** apresenta as conclusões dos estudos realizados e aponta algumas recomendações para futuros trabalhos.

## CAPÍTULO 2

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir apresenta-se uma breve descrição dos conceitos relacionados aos elementos que compõem o presente trabalho de pesquisa. Inicialmente faz-se uma breve descrição de materiais compósitos, e então detalha-se a resina epóxi e cargas particuladas. Posteriormente, descreve-se os diferentes assuntos relativos a processos de usinagem, como geometria e materiais de ferramentas, formação do cavaco, desgaste de ferramenta e os efeitos das variáveis de usinagem na rugosidade da superfície.

#### 2.1 Materiais Compósitos

Muitas das tecnologias modernas exigem materiais com combinações incomuns de propriedades que não podem ser atendidas pelas ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais. O desenvolvimento de materiais compósitos reforçados, ocorrido acentuadamente nos últimos anos, tem propiciado aos projetistas novas alternativas para solucionar tais problemas, fornecendo-lhes um novo leque de possibilidades para utilização em novos produtos.

Um material compósito consiste em um material multifásico cuja fabricação deve ser efetuada de tal forma que as fases que o constituem devem ser quimicamente diferentes, e devem estar separadas por uma fase distinta, exibindo uma combinação de propriedades que o torna superior a cada fase de sua composição (CALLISTER, 2000).

De acordo com esse princípio de ação combinada, procura-se moldar os melhores arranjos de propriedades por uma combinação criteriosa de dois ou mais materiais distintos. Esses materiais que formam o compósito podem ser classificados como aglomerante (fase contínua ou matriz) e reforçante (fase dispersa ou carga). A matriz tem como função manter os reforçantes unidos, transmitindo a estes o carregamento aplicado. As cargas têm diversas funções, como suportar os carregamentos transmitidos pela matriz e transmitir calor ou eletricidade.

Um esquema para classificação dos materiais compósitos pode ser observado na figura 1. Segundo Callister (2000), os materiais compósitos são divididos em reforçados por partículas, por fibras e estruturais.

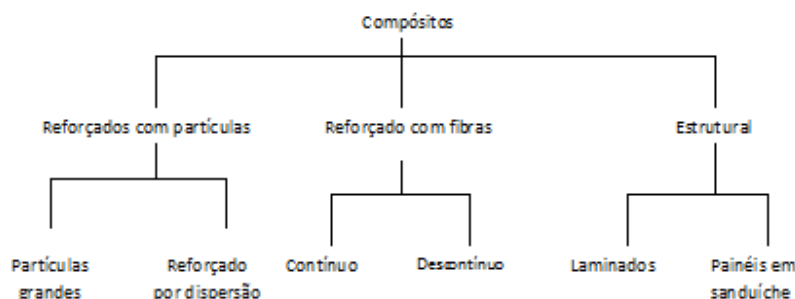


Figura 1 - Classificação de materiais compósitos  
Fonte: Callister (2000)

Um material compósito de matriz polimérica pode ser reforçado por partículas ou fibras. Os reforços, ou cargas, disponíveis variam bastante conforme a sua finalidade, podendo ser obtidos de diferentes formas. As cargas podem modificar praticamente todas as propriedades do material, permitindo a disseminação do uso dos materiais poliméricos nas indústrias (WYPYCH, 2000).

A quantidade de carga influencia diretamente as propriedades mecânicas do compósito. A presença de carga aumenta a viscosidade do material, o que dificulta o processamento, no entanto é observada uma melhora substancial da estabilidade dimensional, diminuindo a contração no resfriamento ou na cura. Conforme observado em estudos desenvolvidos por Jesus (2005), dificilmente trabalha-se com quantidade de carga acima de 40% de volume.

Como matrizes poliméricas podem ser utilizados polímeros termoplásticos ou termorrígidos. Os termoplásticos sofrem deformações com o aumento da temperatura, e por essa razão são largamente utilizados em processos de injeção polimérica. Já os termorrígidos entram num regime chamado de cura (endurecimento) quando aquecidos, sendo essa uma reação irreversível. A cura torna os polímeros termorrígidos mais resistentes por interligar quimicamente as suas cadeias moleculares.

No presente trabalho utilizou-se como matriz polimérica a resina epóxi, que é um tipo de polímero termorrígido. Dado o foco neste tipo de material, a seguir serão apresentadas algumas características deste polímero.

### 2.1.1 Resina epóxi

Atualmente, a resina epóxi é utilizada industrialmente como adesivo, componente de moldagem e como matriz para compósitos usados em aplicações estruturais. Esta grande variedade de utilizações é devido à grande variedade de formulações permitidas, admitindo um grande número de requisitos, tanto de processo quanto referente ao desempenho do material.

As resinas epóxi são polímeros termorrígidos com dois ou mais grupos epóxi, que apresentam um anel com três membros, representado na figura 2. Na figura, o *R* pode representar uma cadeia alifática, aromática ou cicloalifática.

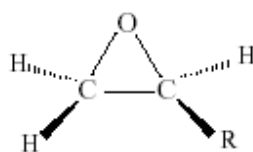


Figura 2 – Monômero Epóxi  
Fonte: Alcântara (2004)

Esta resina é um tipo especial de poliéter primeiramente sintetizado como oligômero. A capacidade do anel epóxi formar ligações cruzadas com uma grande variedade de substratos leva à formação de uma rede tridimensional, constituindo um material insolúvel e infusível, denominado de material termorrígido (STEVENS, 1999).

De acordo com Stevens (1999), o termo resina epóxi é designado para o sistema formulado que tenha passado por um processo de cura ou não. As resinas epóxis mais comuns são produtos de uma reação de polimerização entre um bisfenol A e um composto que contenha epóxi, na presença de uma base. Normalmente o co-monômero utilizado é a epícloridrina. O produto desta reação é a resina epóxi derivada do bisfenol A, com a estrutura molecular mostrada na figura 3.

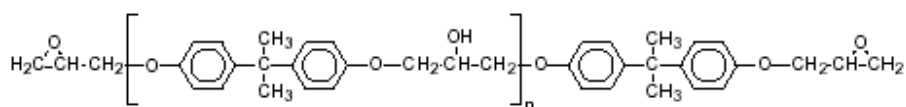


Figura 3 – Resina epóxi derivada do bisfenol A.

Fonte: Alcântara (2004)

Conforme mencionado anteriormente, a resina epóxi sofre um processo de cura para adquirir as propriedades de um termorrígido, já que as moléculas epóxi, no estado puro à temperatura ambiente, normalmente não reagem umas com as outras, e podem ficar armazenadas durante anos num recipiente seco sem que haja reação entre elas. Para isto, é necessária a incorporação de agentes de cura ou catalisadores, obtendo-se assim uma estrutura tridimensional estável, insolúvel e infusível.

Os agentes de cura, por vezes chamados de endurecedores, são adicionados em quantidades significativas para reagirem com o epóxi e se tornarem parte da rede. Estes agentes podem ser aminas alifáticas, aminas aromáticas ou anidridos. Por outro lado, os catalisadores são adicionados em quantidades extremamente pequenas para diminuir a energia de ativação da reação de cura, aumentando a velocidade de reação (JESUS, 2005).

A densidade de ligações cruzadas influencia diretamente a resistência química da resina. Quanto maior a densidade, maior será a resistência química, devido à maior dificuldade de um produto potencialmente agressivo penetrar na superfície. A temperatura de transição vítrea e a resistência mecânica também aumentam com maiores densidades de ligações cruzadas.

Segundo JESUS (2005), atuando como matriz em compósitos com cargas, as resinas epóxis apresentam diversas vantagens, como:

- Natureza polar que confere excelente adesão a uma grande variedade de cargas;
- Contração na cura relativamente baixa, facilitando assim a precisão dimensional na fabricação de estruturas e evitando tensões residuais;
- Ausência de produtos voláteis resultantes da reação de cura, o que evita a formação indesejada de bolhas;

- Estrutura reticulada que confere uma excelente resistência em ambientes quimicamente agressivos, tanto aquosos como não aquosos.

Além de apresentarem alto módulo de elasticidade, boa compressão e baixa viscosidade, o que facilita a moldagem.

No entanto, as resinas epóxis apresentam algumas características negativas, como uma aderência indesejável nas paredes do molde em que estão sendo processadas, além de não serem recicláveis, pois pertencem ao grupo das resinas termorrígidas (BLASS, 1985). Apesar destas características negativas apresentadas pelas resinas epóxis, elas são utilizadas em grande escala para o desenvolvimento de projetos estruturais, justificando sua utilização neste trabalho.

De acordo com Mano (1991), as resinas epóxis são compatíveis com todas as fibras e partículas disponíveis no mercado, sendo as mais comumente empregadas em compósitos que exigem alto desempenho, como nas indústrias aeronáutica e automobilística.

As resinas epóxis permitem também construir moldes de durabilidade triplicada se comparadas a moldes de poliéster, outro polímero também muito utilizado como molde de injeção, e resistem a temperaturas próximas a 200 °C sob serviço constante (LONGHI, 2002).

### 2.1.2 Cargas particuladas

Como citado anteriormente, um material compósito pode ser reforçado por cargas (partículas ou fibras) ou ser estrutural (laminado ou em sanduíche). Devido à utilização neste trabalho de um compósito reforçado por cargas particuladas, será abordado com mais profundidade este tipo de reforço.

As cargas particuladas possuem uma grande variedade de utilização, apresentando uma grande gama de propriedades e formas, variando desde partículas esféricas, cúbicas, irregulares e em flocos, encontrando-se também misturas entre estas diferentes formas. Possuem diversos tamanhos, sendo o seu tamanho mínimo de apenas alguns nanômetros (CALLISTER, 2000).



As cargas particuladas metálicas influenciam fortemente as propriedades mecânicas e térmicas em compostos de matriz polimérica. Com o aumento da quantidade de carga metálica, verifica-se uma melhora na precisão dimensional, na condutividade térmica e em muitos os casos as propriedades mecânicas. Outras características das partículas, que influenciam as propriedades de um material compósito, são a sua cor, índice de refração, e propriedades elétricas e magnéticas (WYPYCH, 2000).

Da mesma maneira que o tamanho das partículas, a forma destas também influencia as propriedades do composto. Partículas esféricas apresentam uma razão mínima entre superfície e volume, limitando a área de adsorção de resina, com isso modificando menos a viscosidade da resina. O formato esférico das partículas proporciona uma distribuição uniforme de tensões (Goyanes, 2003). As partículas com um formato flocular, quando comparadas com partículas esféricas, apresentam melhores resultados de transferência de tensões da matriz polimérica para a partícula de carga. Este fato deve-se à razão entre o diâmetro médio do floco e a sua espessura. Quanto maior essa razão, mais efetiva será essa transferência de tensões. Já partículas com formas irregulares, que possuem arestas afiadas, apresentam pontos que levam à concentração de tensões que podem resultar na falha prematura do compósito. No entanto, partículas de forma irregular ou lamelar apresentam melhor resultado quando o material é sujeito a forças de tração (JESUS, 2005).

Segundo NAKAMURA (1991), existe um aumento da tenacidade do compósito com cargas de tamanho maior que 50  $\mu\text{m}$ , e quanto maior o tamanho das partículas maior a probabilidade de aparecerem trincas divergentes, fato que impede a propagação de trincas.

De modo geral, as propriedades térmicas de compósitos de matriz polimérica possuem uma melhora acentuada quando existe alguma interconectividade entre as cargas, ou seja, a transferência de calor está diretamente relacionada ao tamanho da área de contato das partículas. Observa-se que partículas com alta condutividade térmica podem formar um compósito com baixa transferência de calor, caso possuam baixa área de contato entre elas (WEIDENFELLER, 2004).

## 2.2 Fundamentos do processo de usinagem

Eles estão presentes nas etapas de fabricação de praticamente todos os produtos das indústrias de transformação mecânica e representa aproximadamente 50% do custo final de uma peça acabada (APPLE, 1989).

Usinagem é um processo de fabricação no qual uma ferramenta remove material a partir de sua superfície, através de movimentos relativos e aplicação de força. O material removido, chamado de cavaco, escorrega sobre a face da ferramenta que é submetida a uma alta tensão normal e cisalhante, além de alto coeficiente de atrito durante a formação do cavaco (DHAR, 2006).

A usinagem é também considerada uma operação que, ao conferir à peça forma, dimensões e acabamento ou ainda uma combinação qualquer desses três itens, produza cavaco. O cavaco é a porção de material que é removida pela ferramenta, e que se caracteriza por apresentar forma geométrica irregular (KÖNIG, 1997).

Os movimentos existentes nos processos de usinagem ocorrem entre o gume da ferramenta e a peça a ser usinada, podendo ser divididos em dois grupos:

- Os que causam remoção de cavaco: corte, avanço e efetivo de corte.
- Os que não causam remoção de cavaco: aproximação, correção, ajuste e recuo.

Os processos de usinagem podem ser classificados em três grandes grupos: com ferramenta de geometria definida, com ferramenta de geometria não definida e os processos não convencionais de usinagem. Os principais processos de usinagem com geometria definida são: torneamento, fresamento, furação, aplainamento e brochamento. Já os de geometria não definida são: retificação, brunimento, lapidação e tamboreamento. Os processos não convencionais de usinagem mais utilizados são: eletroerosão, ultra-som, remoção química, remoção eletroquímica e jatos d'água.

### 2.2.1 Ferramenta de corte de geometria definida

Como neste trabalho foram utilizadas apenas ferramentas de corte com geometrias definidas, a revisão bibliográfica está focada apenas neste tipo de ferramenta.

O corte do material através de ferramentas de geometria definida ocorre pela penetração do gume da ferramenta na superfície da peça. Quando a tensão de cisalhamento do material for ultrapassada, este começa a escoar. O material que foi deformado, agora chamado de cavaco, desliza então sobre a face da ferramenta.

Os processos de usinagem de modo geral apresentam características como: formação de cavacos, saída de cavacos, forças de corte, que são influenciados consideravelmente pela geometria da ferramenta. Por isso, a geometria da ferramenta deve ser planejada de acordo com o material da peça, o material da ferramenta e as condições particulares do processo (KÖNIG, 2002). Na figura 4 é mostrada uma ferramenta de corte para torneamento, onde são especificadas superfícies, gumes, chanfros e quinas.

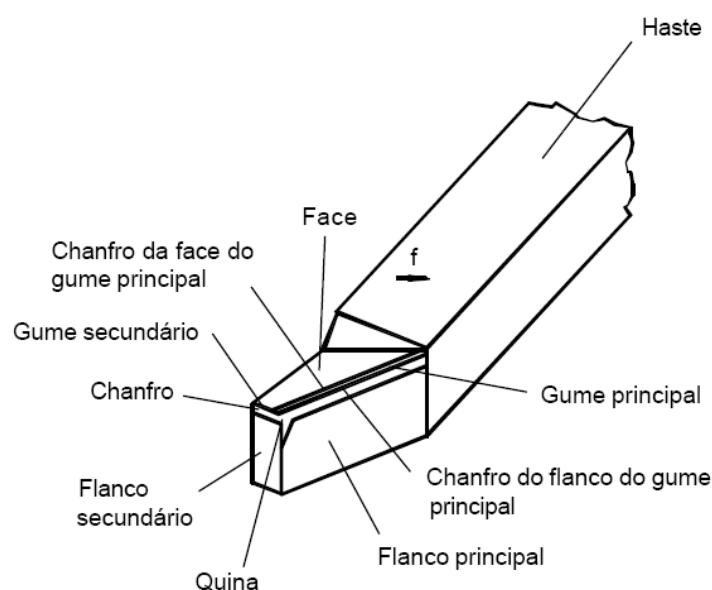


Figura 4 – Representação de uma ferramenta de geometria definida  
Fonte: Kratochvil (2004)

A parte cortante da ferramenta é formada por raios e ângulos, que são ilustrados na figura 5.

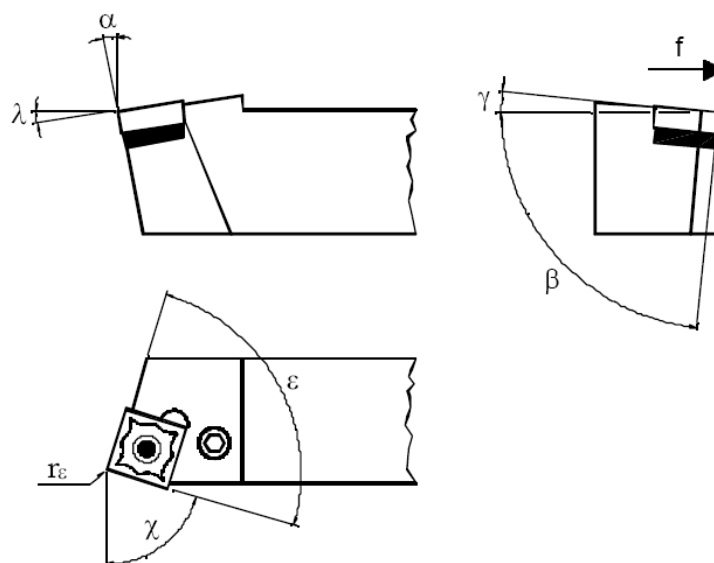


Figura 5 – Principais raios e ângulos de uma ferramenta de geometria definida  
Fonte: Markus (2001)

As definições dos principais ângulos e raios da figura 5 são apresentadas a seguir:

- Ângulo de incidência  $\alpha$ : sua função é evitar o atrito entre a superfície transitória da peça e o flanco da ferramenta, permitindo que o gume penetre no material e corte livremente. Quando o seu valor é elevado, a cunha é enfraquecida e pode ocorrer acúmulo de calor, podendo causar lascamento e quebra da ferramenta. Por outro lado, se o seu valor tende a zero, podem ocorrer caldeamentos, o que pode proporcionar o desgaste do flanco da ferramenta (STEMMER, 1995).
- Ângulo de saída  $\gamma$ : é o ângulo entre o flanco e a superfície de corte, sendo o responsável pela saída do cavaco e o corte deste. Quando o seu valor é positivo a força de corte e a força de avanço são menores, o que melhora a qualidade da superfície. Entretanto, ângulos negativos são recomendados para usinar materiais com difícil usinabilidade, protegendo a ferramenta de impactos e diminuindo o calor do seu gume.
- Ângulo de cunha  $\beta$ : é a soma dos valores dos ângulos de incidência e de saída diminuídos de  $90^\circ$  (XAVIER, 2003).
- Ângulo de direção  $\chi$ : é o ângulo entre a superfície de corte e a superfície de trabalho. Com a variação deste ângulo, tem-se uma maior ou menor largura de usinagem, que por sua vez influencia diretamente na dissipação do calor no gume da ferramenta. Quando utiliza-se um valor de  $\chi$  menor que  $90^\circ$ , isto faz com que o corte inicie afastado da quina da ferramenta,

incidindo os esforços de corte em um lugar mais resistente, apto a absorver o impacto inicial. Se o valor de  $\chi$  for igual a  $90^\circ$ , o corte se inicia subitamente em toda a extensão do gume principal, podendo provocar quebra ou lascamento do gume (KÖNIG, 1997; XAVIER, 2003).

- Ângulo de quina  $\epsilon$ : é o ângulo entre a superfície do gume principal e do gume secundário, responsável pela estabilização da cunha de corte e por direcionar a saída de cavaco. Ele protege a quina da ferramenta contra impactos e atenua vibrações (STEMMER, 1995).
- Ângulo de inclinação  $\lambda$ : é o ângulo entre o gume e a superfície de referência, medidos na superfície de corte. Ele controla a saída do cavaco e protege a quina da ferramenta contra impactos (KÖNIG, 1997).
- Raio de quina  $r_\epsilon$ : está localizado entre o gume principal e o secundário. Em conjunto com o avanço define a rugosidade cinemática do material usinado (KRATOCHVIL, 2004).

### 2.2.2 Torneamento

Torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obter superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes (FERRARESI, 1995). Este processo de usinagem é amplamente utilizado nas indústrias de modo geral, por ser relativamente simples de operar e um dos mais economicamente viáveis.

Segundo FERRARESI (1995) o torneamento pode ser classificado por sua finalidade:

- Torneamento de acabamento: é uma operação de usinagem destinada a obter as dimensões finais da peça, ou um acabamento da superfície especificado, ou ambos. As condições de acabamento são leves, com profundidade de corte e avanços bem reduzidos para obtenção da especificação da peça.
- Torneamento de desbaste: operação de usinagem anterior à de acabamento, visando obter na peça a forma e dimensões próximas das finais. A condição de desbaste deve ser tão severa quanto permitirem os seguintes fatores: a capacidade da ferramenta, a potência do motor da máquina, a forma de fixação, a própria peça (que inclui a sua geometria e material), e a espessura do cavaco.

Quanto à sua trajetória, o torneamento está classificado, segundo KÖNIG (1997):

- Torneamento longitudinal;
- Faceamento;
- Torneamento de perfis;
- Torneamento de roscas;
- Torneamento de geração;
- Torneamento de forma.

Neste presente trabalho utilizou-se o torneamento longitudinal externo, no qual a ferramenta desloca-se de forma paralela ao eixo principal de rotação da máquina, como ilustrado na figura 6.

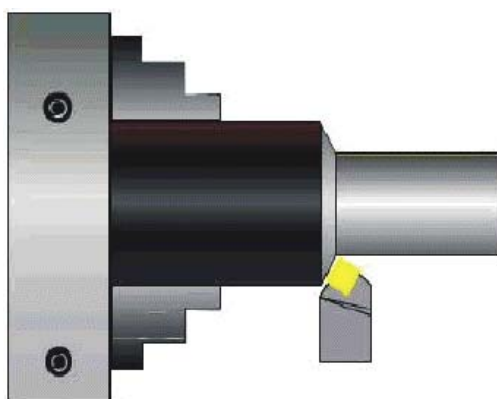


Figura 6 – Torneamento longitudinal  
Fonte: CIMM (2005)

### 2.2.3 Processo de corte

O processo de corte no torneamento inicia-se quando a ferramenta penetra na peça, fazendo com que uma pequena porção do material seja deformada elástica e plasticamente, aumentando as tensões até que ocorra o cisalhamento do material e este escoe sobre a superfície de saída da ferramenta, formando o cavaco (XAVIER, 2003). A deformação plástica na região de formação de cavaco pode ser dividida em três regiões, como é mostrado na figura 7.

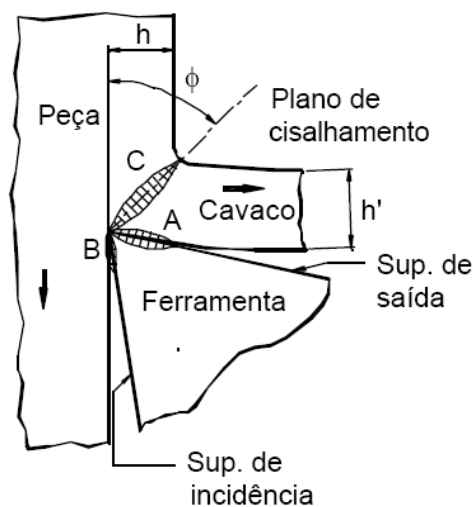


Figura 7 – Regiões de deformação plástica durante o processo de corte  
Fonte: Markus (2001)

A região A é a interface entre ferramenta e cavaco, sendo esta a região que atinge as maiores temperaturas. A região B compreende a superfície usinada com o flanco da ferramenta, e esta região define a qualidade da superfície da peça. Já a região C localiza-se entre a região deformada e a não deformada, ocorrendo nesta região a maior transformação de energia (KRATOCHVIL, 2004).

De modo geral é observado nas superfícies de peças usinadas um aumento da dureza, além destas apresentarem tensões residuais, ocasionadas pelo efeito combinado de calor e deformação plástica sob a ação da ferramenta de corte. Isto pode até, em casos extremos, causar a ruptura do material da peça (com o aparecimento de trincas), reduzindo a resistência à fadiga do material usinado (STEMMER, 1995).

#### 2.2.4 Formas dos cavacos

A observação da forma e o tamanho dos cavacos são importantes no torneamento e também nos demais processos de usinagem, pois dependendo da forma que o cavaco assume, ele pode facilitar ou não a remoção de calor. Além disso, ele pode emaranhar na máquina, e em casos extremos pode causar acidentes ao operador.

Os cavacos produzidos em um torno apresentam aspectos distintos dependendo do avanço, profundidade de corte, geometria da ferramenta, material da peça e fluido de corte (STEMMER, 1995). Os cavacos podem apresentar-se em diversas formas, conforme pode-se observar na figura 8, os quais são divididos em: (1) fitas retas; (2) fitas retorcidas; (3) fitas helicoidais longas; (4) fitas helicoidais curtas; (5) fitas espiraladas; (6) fitas espiraladas cônicas; (7) vírgula.

Para os materiais mais frágeis, os cavacos geralmente apresentam formas de lascas de pequena dimensão, enquanto os materiais dúcteis, que é o tipo de material utilizado neste trabalho, os cavacos apresentam formas de fitas.

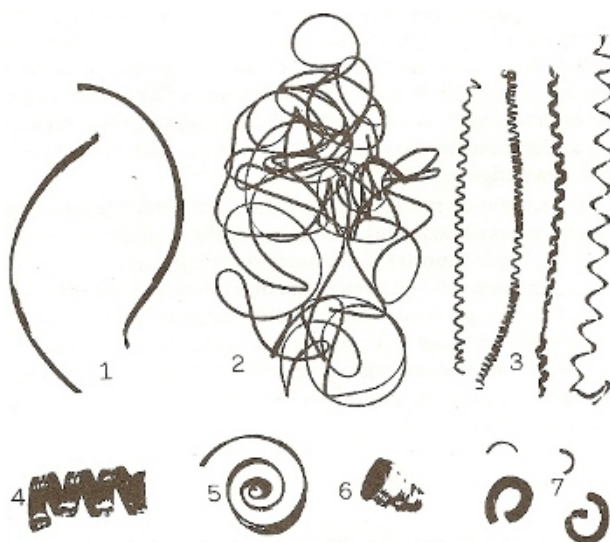


Figura 8 – Diversas formas de cavacos  
Fonte: Stemmer (1995)

Segundo a sua formação e considerando os aspectos tecnológicos, os cavacos podem ser divididos em:

- Cavaco contínuo: o material é deformado diante da presença da ferramenta até que escorregue do gume da ferramenta até a superfície da peça, passando sem romper e deslizando suave e uniformemente. Este tipo de cavaco é o mais desejável do ponto de vista de acabamento da superfície usinada, da durabilidade da ferramenta e da energia



consumida. No entanto, a remoção deste tipo de cavaco é muito complicada (STEMMER, 1995).

- Cavaco arrancado: característico de materiais frágeis com estrutura irregular, apresentando pequenos fragmentos ocasionados por ruptura, pela ação de tensões de tração-compressão. Pode-se obter superfícies lisas com ferramentas afiadas e avanços pequenos (KÖNIG, 2002).
- Cavaco cisalhado: o material ao escorregar ao longo do plano de cisalhamento é fissurado no ponto mais solicitado, está fissura progride até a ruptura total ou parcial do cavaco. Este tipo de cavaco apresenta uma forma de fita contínua, pois efeitos de pressão e temperatura provocam uma solda dos diversos fragmentos. A força de corte cresce progressivamente até ruptura do material e então cai bruscamente. A qualidade da superfície é inferior pelo aparecimento de ondulações e pela forte tendência para aparecimento de vibrações neste tipo de cavaco (STEMMER, 1995).

### 2.2.5 Usinagem de polímeros

Pelo fato de 80 a 100% do volume do compósito estudado ser de um material polimérico, se faz necessário um conhecimento mais aprofundado das peculiaridades da usinagem desta classe de material.

Quando a superfície usinada de um material polimérico é examinada detalhadamente, nota-se que, na maioria dos casos, esta superfície apresenta uma alta rugosidade e a presença de algumas trincas, assim como também se observam, em alguns casos, marcas indesejadas de avanço na superfície (KOBAYASHI, 1984).

Os problemas na qualidade da superfície usinada de um polímero podem ocorrer por excesso de calor gerado pela usinagem, causando uma “queima” da superfície usinada, demandando um processo de acabamento posterior. Estes problemas também podem ser ocasionados por desgaste na aresta de corte da ferramenta. Estes ocorrem, geralmente, quando não são consideradas na usinagem características reológicas e térmicas dos polímeros como: calor específico, condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica (LEE, 2000).

### 2.2.5.1 Propriedades mecânicas

Segundo Kobayashi (1967), as deformações e as fraturas, nos metais, ocorrem ao longo dos planos cristalinos, já nos polímeros a fratura pode ocorrer entre as áreas cristalinas e amorfas.

### 2.2.5.2 Características térmicas

Durante o processo de usinagem, o calor é gerado pela deformação e o atrito nos sistemas cavaco/ferramenta e ferramenta/peça. Nos metais, o calor é removido da área de corte pelo cavaco, já com os polímeros, por apresentarem baixa condutividade térmica, grande parte do calor é removido pela ferramenta de corte. Este aumento da temperatura de usinagem pode gerar um incremento no desgaste da ferramenta, além de produzir peças com superfície de baixa qualidade (SALLES, 2003).

Como a relação entre tensão e deformação varia com a temperatura, o tipo de cavaco formado varia com a faixa de temperatura em que ocorre a usinagem. A temperatura de degradação e principalmente a de transição térmica precisam ser monitoradas durante a usinagem, pois estas podem ser atingidas pelo material durante o processo de usinagem. Geralmente a temperatura é controlada por fluidos lubri-refrigerantes, mas como em grande parte estes podem degradar o material, o ar e água são mais comumente utilizados para reduzir a temperatura de corte (KOBAYASHI, 1984).

### 2.2.5.3 Mecanismos de formação de cavaco

Os tipos de cavacos produzidos durante a usinagem podem dar informações importantes sobre como ela foi processada e sobre o material. No caso peculiar dos polímeros, existem dois tipos de cavacos, os contínuos e descontínuos.

Os cavacos contínuos podem ser produzidos por uma grande deformação elástica ou por uma ruptura ao longo do plano de cisalhamento, ocorrendo quando pequenas velocidades de corte são utilizadas e/ou o material possui grande módulo de elasticidade. O plano de cisalhamento está na

direção na qual o mínimo trabalho é demandado para a formação do cavaco, então os cavacos são contínuos porque os intervalos destes planos de cisalhamento são pequenos. Usinagens que apresentam este tipo de cavaco podem gerar superfícies com qualidade inferiores (KOBAYASHI, 1984; GRANADO, 2006).

De acordo com Kobayashi (1967), quando elevadas tensões compressivas estão presentes na usinagem ou utiliza-se um material frágil, o cavaco produzido é descontínuo. Também ocorre quando um polímero termoplástico é usinado com uma ferramenta de corte com alto ângulo de saída ou elevados valores de profundidade de corte. Ele resulta de uma trinca que se propaga pelo material, resultado do encontro da ferramenta com o material, até a quebra, gerando o cavaco. Isto geralmente não é observado no corte de materiais metálicos, exceto para alguns tipos de ferro fundido.

### **2.3 Materiais para ferramenta de corte**

Os estudos e as pesquisas com os materiais para ferramentas de corte procuram melhorar as características dos já existentes, além de desenvolver novos materiais. As propriedades esperadas em ferramentas de corte são (KÖNIG, 2002):

- Resistência à compressão;
- Dureza;
- Resistência à flexão;
- Tenacidade;
- Resistência do gume;
- Resistência interna de ligação;
- Resistência à quente;
- Resistência à oxidação;
- Pequena tendência a difusão;
- Baixa probabilidade de caldeamento;
- Condutividade térmica (calor específico e expansão térmica adequados).

No entanto, nenhuma ferramenta possui todas essas propriedades, sendo que a escolha da ferramenta depende de diversos fatores como: econômicos, máquina-ferramenta, material a ser usinado e a qualidade exigida da superfície.

Os principais materiais de ferramentas de usinagem utilizados atualmente nas indústrias são:

- Aços rápidos;
- Stelite;
- metal-duro;
- Cerâmica;
- Cermet;
- Nitreto de boro cúbico (CBN);
- Diamantes.

A Figura 9 ilustra estes materiais, utilizados como ferramentas de corte, fornecendo uma idéia qualitativa de suas propriedades.

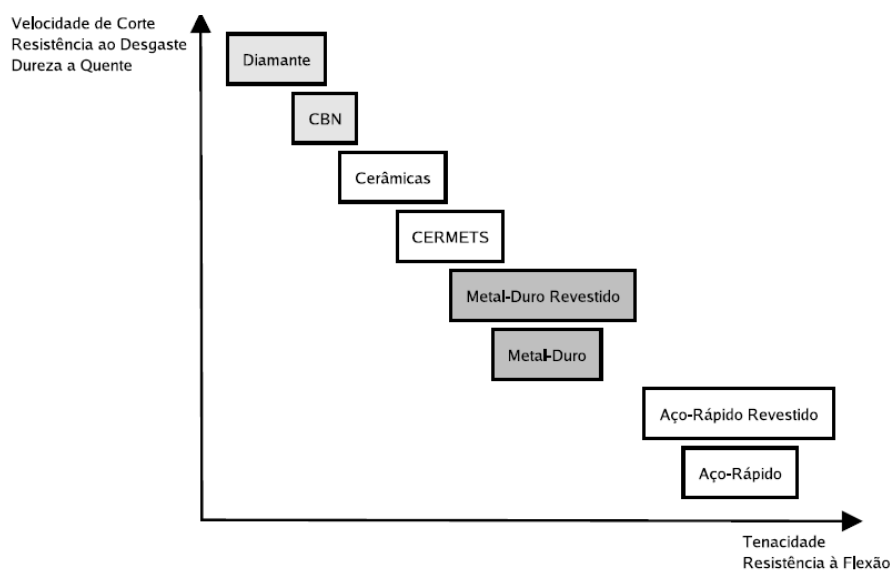


Figura 9 – Materiais para ferramenta de corte e suas características  
Fonte: KÖNIG (2002)

Como o material de ferramenta utilizado neste trabalho foi o metal-duro, apenas este material terá um estudo mais aprofundado.

### 2.3.1 Metal duro

Atualmente, o metal-duro é o material de ferramenta de usinagem mais utilizado nas indústrias de modo geral, destacando-se principalmente a automobilística. Isto se deve principalmente pela excelente relação de custo/benefício encontrada na usinagem com esse material, podendo-se obter diversas variedades de metal-duro com a adição de elementos de liga e diversos tipos de revestimentos, possibilitando adquirir propriedades mais apropriadas em distintas condições de usinagem.

O metal-duro é obtido por meio da metalurgia do pó, que compreende uma mistura de pós elementares, que posteriormente são compactados e sinterizados por uma fase líquida. Eles são constituídos por partículas duras (carbonetos) e um ligante sinterizado. As partículas duras fornecem ao material uma alta dureza, resistência ao desgaste e à compressão, enquanto o ligante tem como função constituir a ligação dos carbonetos frágeis, obtendo-se um corpo resistente.

Pode-se classificar os metais-duros como materiais compósitos, pois são constituídos de carbonetos embutidos em um ligante metálico. A região mais dura é formada por carbonetos de metais de transição, como tungstênio, titânio, tântalo e nióbio, sendo mais comum o uso de tungstênio. Já os metais mais comuns utilizados como ligantes no metal-duro são o níquel e o cobalto.

Na figura 10 pode ser vista uma micrografia do metal-duro, com suas partes distintas de carboneto de tungstênio (WC) e cobalto (Co) como ligante.

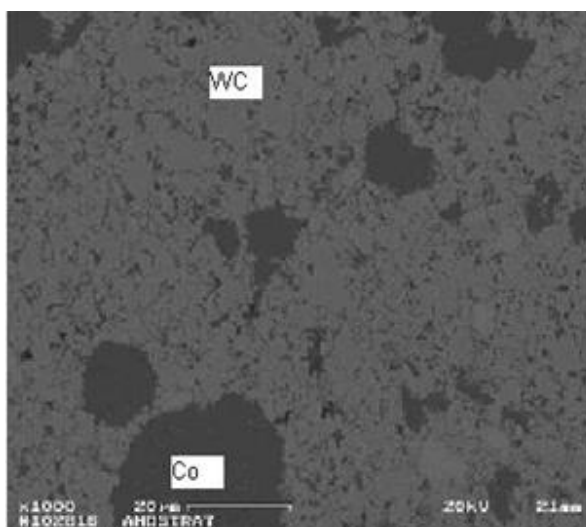


Figura 10 – Micrografia de um metal duro de WC/Co  
Fonte: Rodrigues (2002)

Segundo Stemmer (1995), a composição original de um metal-duro foi constituída somente por carboneto de tungstênio, tendo como ligante o cobalto. Uma composição típica é de 81% de tungstênio, 6% de carbono e 13% de cobalto.

O Cobalto é o ligante mais utilizado em metais-duros devido às suas elevadas molhabilidade e solubilidade para com o WC, aliado às boas propriedades mecânicas. O teor de Cobalto no metal-duro pode variar, dependendo da aplicação, mas é em geral inferior a 15% em peso (RODRIGUES, 2006).

Para KÖNIG (2002), as principais vantagens dos metais-duros utilizados como ferramenta de corte são:

- Boa distribuição da estrutura;
- Dureza elevada;
- Resistência à compressão;
- Resistência ao desgaste;
- Resistência à quente;
- Possibilidade de obtenção de propriedades distintas.

Para melhorar as propriedades dos metais-duros utilizados como ferramenta de corte, principalmente propriedades mecânicas e físicas, adiciona-se a eles elementos de liga, que conferem à ferramenta uma maior durabilidade, diminuindo problemas como difusão e dissolução. Os principais elementos adicionados ao metal-duro são:

- Carboneto de Titânio (TiC);
- Nitreto de Titânio (TiN);
- Carboneto de Nióbio (NbC);
- Carboneto de Tântalo (TaC).

Outro fator que contribui para a melhoria do desempenho das ferramentas de metal-duro é a aplicação de revestimentos duros sobre o substrato. Isto proporciona uma significativa redução do desgaste das ferramentas, com conseqüente aumento da produtividade nas linhas de produção da indústria (XAVIER, 2003).

Estes revestimentos são compostos por uma base de metal-duro relativamente tenaz, sobre a qual se aplica uma ou mais camadas finas, duras e resistentes à abrasão. O aumento do tempo de vida deste tipo de ferramenta é muito grande se comparado com o metal-duro convencional. Sua utilização proporciona a redução do coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta, redução do fator de recalque do cavaco e do calor gerado no flanco e na face da ferramenta (BORK, 1995).

Atualmente, os tipos de revestimentos mais usados industrialmente são:

- Carboneto de Titânio (TiC);
- Nitreto de Titânio (TiN);
- Óxido de Alumínio ( $Al_2O_3$ );
- Carbonitreto de Titânio (TiCN);
- Nitreto de Titânio-alumínio (TiAlN).

## 2.4 Desgaste da ferramenta

A perda da capacidade de corte é creditada, geralmente, a um determinado grau de desgaste. Durante a usinagem a ferramenta é solicitada mecânica, química e termicamente, e tais solicitações geralmente ocasionam avarias e desgastes na ferramenta. Para proporcionar um maior tempo de vida da ferramenta, é necessário estudar estes desgastes e definir limites para os mesmos.

O desgaste pode ocorrer na face da ferramenta, chamado de desgaste de cratera, ou na face e no flanco da ferramenta, conhecido como desgaste de flanco. O desgaste de flanco ocorre pelo atrito entre a ferramenta e a peça, enquanto o desgaste de cratera ocorre pelo atrito da ferramenta com o cavaco. A figura 11 ilustra esses dois tipos de desgaste.

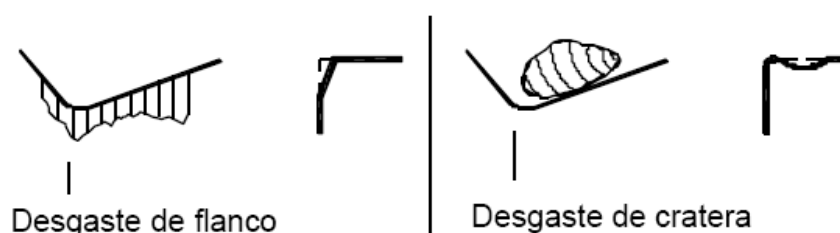


Figura 11 – Desgaste de flanco e de cratera  
Fonte: Sandvik (2000)

Outro tipo comum de desgaste é o lascamento do gume, que ocorre pela quebra de pedaços da ferramenta e produz superfícies ásperas e irregulares. O aparecimento deste tipo de desgaste está relacionado a grandes solicitações térmicas e/ou mecânicas no gume da ferramenta.

As formações de marcas de desgastes, como as citadas acima, ocorrem devido a tipos de mecanismos de desgaste que podem agir de forma simultânea, de maneira que tanto sua origem e o efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si. Segundo König (2002), os principais mecanismos de desgaste são os seguintes:

- **Adesão:** ocorre pela afinidade do material da peça e da ferramenta, na presença de altos valores de temperatura e pressão. Há a possibilidade de ocorrer gume postiço devido à adesão em materiais com alto grau de encruamento.



- Abrasão: é caracterizada pelo arrancamento de partículas do material da ferramenta, pelo escorregamento do material sob alta pressão e temperatura entre a peça e a ferramenta (XAVIER, 2003).
- Difusão: consiste na transferência de átomos pertencentes à rede cristalina de um material para a rede cristalina de outro material, constituída de elementos que apresentam afinidade entre si a uma temperatura elevada (cerca de dois terços da temperatura de fusão dos materiais envolvidos) (KRATOCHVIL, 2004; XAVIER, 2003).
- Oxidação: sob altas temperaturas, caso o material da ferramenta apresente afinidade com o oxigênio, pode ocorrer à formação de filmes de óxidos em certas regiões da ferramenta, que são facilmente removidos pelo atrito, gerando desgaste. Podem ser observadas cores de revenimento na região de contato entre o cavaco e a ferramenta (DINIZ, 1999; KÖNIG, 1997).
- Solicitações térmicas e mecânicas: são danificações no gume como pequenas quebras, fissuras transversais e longitudinais, bem como deformação plástica, causadas por solicitações térmicas e mecânicas excessivas (KÖNIG, 2002).

Tendo em vista que estes mecanismos descritos anteriormente são maléficos às ferramentas de corte, faz-se necessário o seu controle, e uma das maneiras de se buscar evitá-los é através da seleção adequada das condições de usinagem, especialmente a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte. Também pode-se controlar os desgastes com o uso de ferramentas revestidas e com a escolha do tipo do material da ferramenta mais apropriado para o material a ser usinado.

## **2.5 Rugosidade da superfície**

As superfícies que sofrem algum tipo de processo de fabricação, num aspecto macroscópico, parecem perfeitamente lisas. Entretanto, se observadas ao microscópio, tais superfícies são dotadas de regiões com maiores ou menores rugosidades (KÖNIG, 2002).

Os problemas de uma peça referentes à sua rugosidade são restritos à sua camada externa. Os estudos sobre a rugosidade da superfície tiveram início na década de 1920, e em 1929 foi

montada a primeira máquina de apalpamento de superfícies, que foi desenvolvida por Schmaltz (BET, 1999).

A rugosidade é uma irregularidade que é inerente ao processo de usinagem, e divide-se em dois tipos de causas durante a usinagem:

- Rugosidade cinemática: decorrente da forma da quina da ferramenta e do movimento relativo entre a peça e a ferramenta. No torneamento, ela é influenciada pela forma do gume e pelo avanço (XAVIER, 2003).
- Rugosidade do processo: está associado aos fenômenos que ocorrem no gume da ferramenta, estando, assim, diretamente correlacionada ao comportamento do material usinado (XAVIER, 2003).

A superfície de um componente mecânico, em muitos casos, deve cumprir funções muito mais complexas que apenas a de apresentar um bom aspecto visual. A qualidade das superfícies geradas pode definir suas propriedades de funcionamento, vida, aparência, desempenho e outras funções mecânicas desejadas.

Os parâmetros de rugosidades existentes são valores numéricos resultantes de integrações ou de operações matemáticas simples, de perfis amostrais de superfícies. Logo, são representações sujeitas a diversos erros de medição e interpretação.

Contudo, é extremamente útil dispor de valores numéricos para comparação e análise de superfícies, seja para resumir diversas informações contidas em uma superfície tridimensional, ou mesmo para separar e classificar superfícies distintas, geradas por diferentes processos de fabricação.

Geralmente os perfis de rugosidade analisados em operações de engenharia são obtidos por contato direto, através de um apalpador de um perfilômetro ou de um rugosímetro. Também pode-se obter os perfis sem o contato físico, de maneira ótica, com microscópios de varredura eletrônica, com interferometria ótica e com rugosímetros com apalpador ótico.

Os parâmetros de rugosidade da superfície mais comuns são:  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_y$  e  $R_z$ , sendo todos esses parâmetros com características verticais, e definidos por normas como ABNT 6405, DIN/ISO 4287 e DIN 4762. As definições desses parâmetros são apresentadas a seguir.

- **$R_a$**  - Desvio médio aritmético de rugosidade, representando a rugosidade média das amplitudes entre picos e vales dentro de um percurso medido ( $l_m$ ). É o método mais utilizado e também o conceito mais antigo de rugosidade ainda em uso. Sua disseminação pode ser atribuída à facilidade de cálculo, mesmo com aparelhos analógicos simples. Ele pode ser observado na figura 12 e é representado matematicamente pela equação (1):

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad 2.1$$

- **$R_q$**  – Desvio médio quadrático de rugosidade, que representa o valor médio quadrático das ordenadas do perfil de rugosidade dentro do percurso de medição  $l_m$ . Ou seja, raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil de rugosidade em relação à linha média (BET, 1999). Ele também pode ser observado na figura 12, e é expresso matematicamente na equação (2):

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} y^2(x) dx} \quad 2.2$$

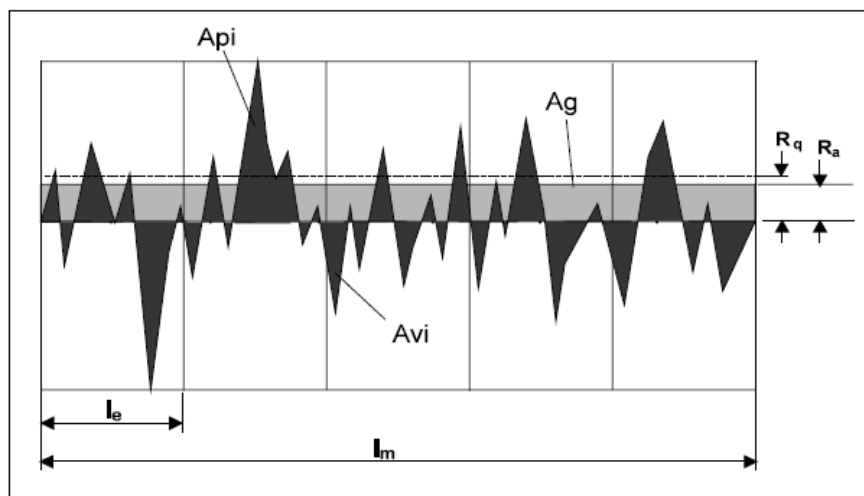


Figura 12 – Ilustração dos parâmetros de rugosidade  $R_a$  e  $R_q$   
Fonte: Bet (1999)

- $R_y$  – Altura máxima do perfil, definida como a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo dentro do percurso de medição (BET, 1999), conforme pode ser observado na figura 13.

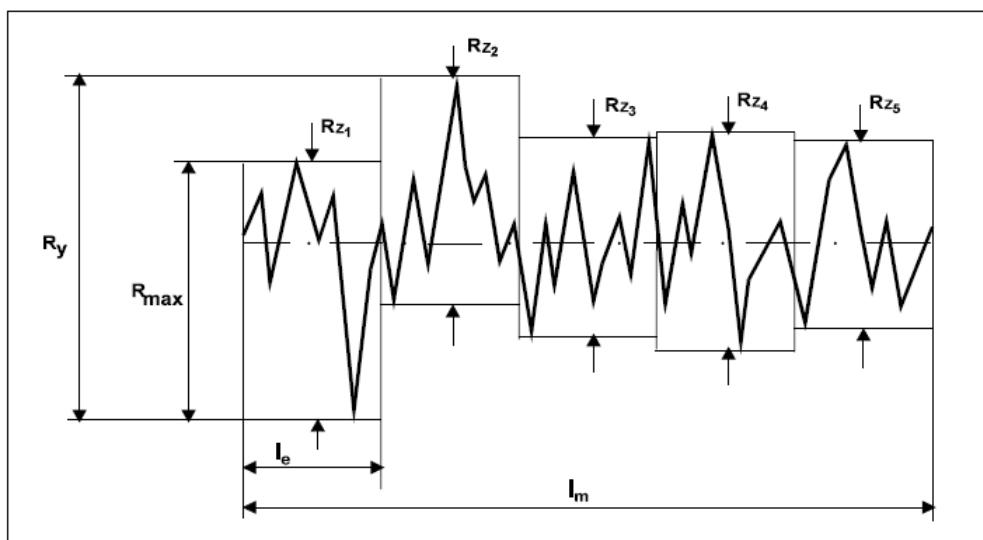


Figura 13 – Ilustração dos parâmetros de rugosidade  $R_y$  e  $R_z$   
Fonte: Bet (1999)

- $R_z$  – Profundidade média de rugosidade, definida com a média aritmética das profundidades isoladas de rugosidade ( $Z_i$ ) dos cinco comprimentos de amostragem ( $l_e$ ),

contidos no percurso de medição ( $l_m$ ) (BET, 1999), de acordo com a figura 13. Este parâmetro é mais sensível a picos e vales locais e é representado pela equação (3).

$$R_z = \frac{1}{5} \sum (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}) \quad 2.3$$

### 2.5.1 Efeitos das variáveis de usinagem na rugosidade

O acabamento da superfície de uma peça usinada pode ser controlado se alguns fatores forem observados, como: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, uso de fluido lubrificante e material da peça. Por outro lado, a perda de qualidade da superfície usinada está geralmente relacionada ao aparecimento de raias ou marcas de avanço, ocasionadas pela ferramenta, e a presença de gume postiço durante a formação do cavaco.

De modo geral, o aumento da velocidade de corte melhora o acabamento da superfície, sendo que a melhora é rápida até uma determinada velocidade crítica, devido a contínua redução das dimensões do gume postiço. A partir do desaparecimento do gume postiço, pouca melhora é observada na qualidade da superfície com aumentos da velocidade de corte (STEMMER, 1995).

Para a obtenção de um bom acabamento é necessário um pequeno avanço e baixo valor de profundidade de corte. No entanto, o avanço tem efeito mais significativo na qualidade da superfície de uma peça usinada do que a profundidade de corte (STEMMER, 1995). Como industrialmente é imprescindível aliar produtividade com qualidade, a usinagem é dividida em duas etapas: desbaste e acabamento. Na primeira retira-se o máximo de material possível, e na segunda utiliza-se valores pequenos de avanço e profundidade de corte, além de altas velocidades de corte.

Os ângulos e raios da ferramenta de corte também influenciam o acabamento da superfície, sendo que na prática alterações destes são as mais utilizadas para corrigir problemas na qualidade da superfície usinada. Segundo STEMMER (1995):

- O aumento do ângulo de saída melhora consideravelmente o acabamento, pois dificulta a formação de gume postiço;
- O aumento exagerado do ângulo de incidência piora levemente o acabamento;
- Altos valores do ângulo de direção do gume principal geram raias de usinagem de grande altura, piorando a qualidade da superfície;
- Grandes raios de quina melhoram a forma das raias, com isso melhorando o acabamento da superfície.

Não existe mudança significativa no grau de acabamento de uma superfície usinada quando altera-se o material da ferramenta de corte. Entretanto, quando a ferramenta for de diamante, ela produzirá uma melhor qualidade da superfície acabada, isto porque o pequeno atrito entre a ferramenta e o material da peça não gera gume postiço.

No caso do material a ser usinado possuir uma elevada dureza e resistência, de modo geral resulta em um bom acabamento da superfície. A composição química também pode influenciar em alguns casos, como na adição de enxofre no aço, que melhora a usinabilidade e a qualidade da superfície (STEMMER, 1995).

## CAPÍTULO 3

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Metodologia da Pesquisa

Este capítulo apresenta a forma como foi desenvolvida a pesquisa, a metodologia adotada e os equipamentos utilizados. Todo planejamento de uma pesquisa deve seguir os procedimentos metodológicos visando: dar respostas aos problemas apresentados; validar as justificativas; e atingir os objetivos geral e específicos propostos.

A presente pesquisa é classificada, sob o ponto de vista de sua natureza, como pesquisa aplicada, uma vez que objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos (SILVA & MENEZES, 2005). A pesquisa aplicada tem por objetivo a fundamentação do desenvolvimento da pesquisa tecnológica, de maneira tal que os seus resultados situam-se no contexto de urgência da solução de problemas da civilização industrial (OLIVEIRA NETTO, 2005).

Do ponto de vista da abordagem, este trabalho é classificado como quantitativo, uma vez que a pesquisa quantitativa requer que o pesquisador possa manipular o objeto de estudo de forma a selecionar variáveis independentes de variáveis dependentes e isolar certas interferências no experimento, tornando-o mais confiável e previsível. Os métodos mais comuns para a coleta de dados na pesquisa quantitativa são a pesquisa de avaliação, o experimento de campo e o experimento de laboratório, sendo que este último foi o utilizado nesta pesquisa.

Já sob o ponto de vista de seus objetivos esta pesquisa pode ser classificada como uma pesquisa explicativa, que visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos, aprofunda o conhecimento da realidade, porque explica a razão. Ela visa identificar os fatores que contribuem para a ocorrência dos fenômenos ou variáveis que afetam o processo,

explicando o “porquê” das coisas (JUNG, 2004). Registra fatos, analisa-os, interpreta-os e identifica suas causas (OLIVEIRA NETTO, 2005).

Sob a ótica dos procedimentos técnicos, esta pesquisa é considerada experimental, uma vez que ao determinar-se o objeto de estudo, foram selecionadas as variáveis que seriam capazes de influenciar os resultados, além de definirem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que cada variável considerada produz no objeto (JUNG, 2004).

O procedimento experimental requer uma detalhada, sistemática e imparcial manipulação de variáveis e coleta de dados sobre o fenômeno de interesse. Este tipo de pesquisa viabiliza a descoberta de novos materiais, componentes, métodos, técnicas, etc (JUNG, 2004).

A metodologia empregada neste trabalho consiste basicamente na execução de ensaios sistemáticos em laboratório. Os experimentos foram planejados a fim de se verificar a influência dos parâmetros de corte no comportamento das diferentes composições do compósito de matriz de resina epóxi com carga de ferro.

O planejamento dos ensaios de acordo com a metodologia sistematizada é apresentado a seguir.

## **3.2 Aparato Experimental**

### **3.2.1 Material de Ensaio**

Os materiais de ensaios, ou corpos de prova, utilizados neste trabalho são cilindros de resina epóxi com 5%, 10% e 20% de carga de ferro em volume, além da resina sem adição de ferro. Estes corpos de prova possuem 60 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento.

Neste trabalho, utilizou-se a resina epóxi TCR 550 e o endurecedor XR – 435, ambos fornecidos pela empresa Central Fiber Glass. A escolha desta resina para este trabalho deve-se à sua relativamente alta temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) (acima de 100°C), o que facilita a sua confecção por usinagem, viabilizando o seu uso em moldes de injeção.



A escolha da quantidade de agente de cura na resina foi determinada pela  $T_g$  de cada mistura. Segundo JESUS (2005) quanto maior a quantidade de agente de cura na resina, maior será a sua  $T_g$ . No entanto, se a quantidade de agente de cura for acima de 50%, obtém-se um material muito frágil. Segundo o fornecedor deste material, valores acima de 50% de agente de cura já comprometem a qualidade do termoplástico. A tabela 1 apresenta a relação entre a quantidade de agente de cura na resina e a sua  $T_g$ .

Tabela 1 – Valores de  $T_g$  em função da quantidade de agente de cura

<i>% de agente de cura</i>	<i>Temperatura de transição vítrea <math>T_g</math> (<math>^{\circ}C</math>)</i>
30	73
35	86
40	117
45	127

Fonte: (JESUS, 2005)

Por possuir uma  $T_g$  relativamente alta, porém não ultrapassando a faixa de 50%, foi escolhida a porcentagem de 45% de agente de cura para a confecção da resina epóxi utilizada neste trabalho. Desta forma, pode-se trabalhar com o compósito até a temperatura de 127  $^{\circ}C$  sem que a matriz polimérica atinja a sua  $T_g$ .

A carga metálica particulada utilizada neste trabalho foi de pó de ferro HD 177, fabricado pela empresa Belgo Brasileira, cedida pelo laboratório CIMJECT – UFSC. A sua escolha está diretamente relacionada à boa condutividade térmica, permitindo assim controlar o comportamento do compósito, tanto mecanicamente quanto termicamente, aumentando-se a quantidade de carga de ferro empregada. Como este pó metálico é composto por partículas de ferro com muito poucas impurezas, considera-se neste trabalho a densidade do pó de ferro a mesma do ferro, que é de 7,8 g/m<sup>3</sup>.

Na figura 14 observa-se a imagem da distribuição granulométrica das partículas de pó de ferro para um aumento de 50x, apresentando uma grande distribuição de tamanho de partículas e uma

certa quantidade de pós aglomerados. A distribuição granulométrica pode ser observada na figura 15, que apresenta a curva da frequência da distribuição do diâmetro médio das partículas.

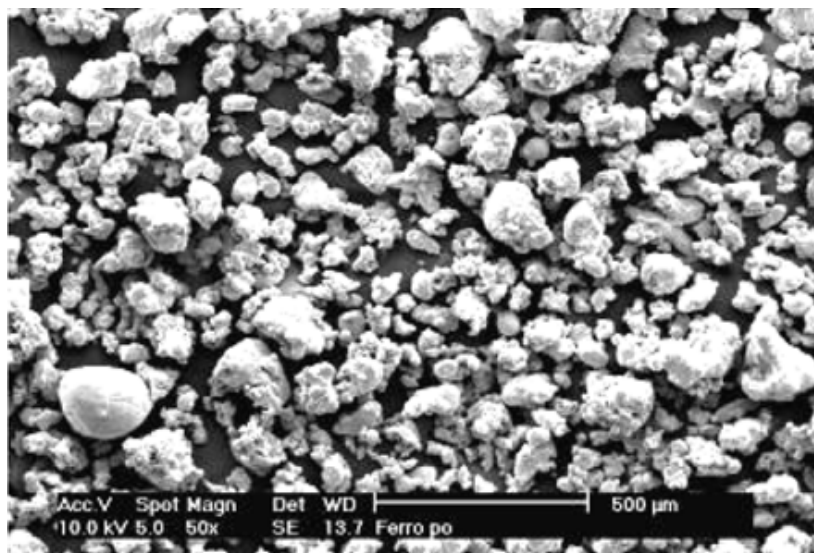


Figura 14 – Imagem das partículas de pó de ferro (aumento de 50x)  
Fonte: (JESUS, 2005)

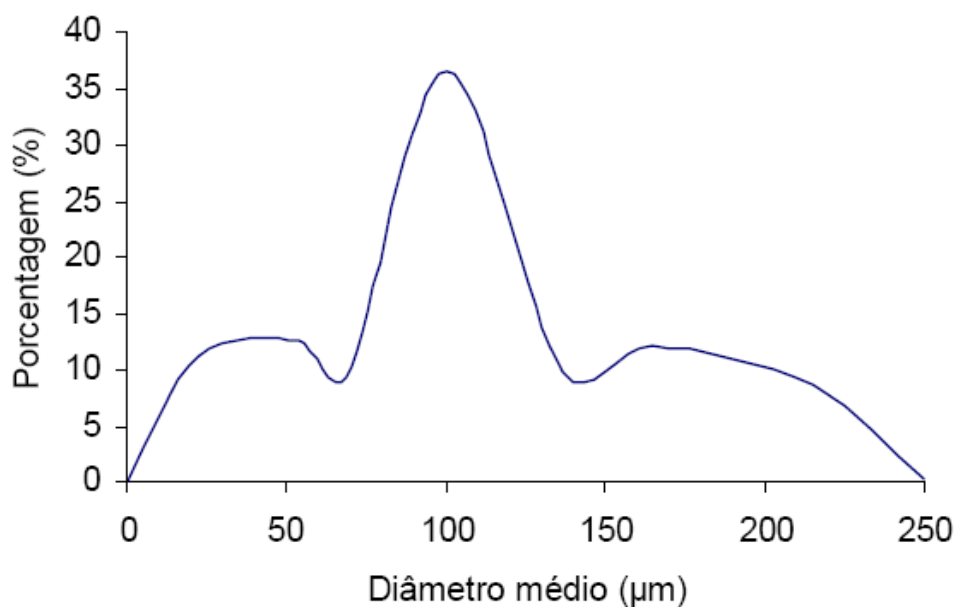


Figura 15 – Distribuição do tamanho médio do diâmetro das partículas  
Fonte: (JESUS, 2005)

Como constatado na figura 16, grande parte das partículas metálicas possui um diâmetro médio em torno de 100 µm, o que pode facilitar significativamente a condução do calor pelo material,

como estudado em outros trabalhos (Mamunya, 2002; Goyanes, 2000; Shengzu, 1997). Contudo, observa-se também que cerca da metade dos diâmetros das partículas são maiores que 100  $\mu\text{m}$ , e esses valores altos de diâmetro comprometem a qualidade da superfície do material, considerando que estes serão usinados para adquirir a forma de molde de injeção.

Como nota-se na tabela 2, o módulo de elasticidade do compósito aumenta na medida em que se acrescenta carga de ferro na composição, ou seja, a rigidez do material aumenta com o acréscimo de carga de ferro. No entanto, a tensão máxima decresce com a adição da carga metálica, isto ocorre porque as partículas de ferro presentes na matriz polimérica concentram tensões no interior do material.

Já os valores de dureza apresentam um relativo aumento quando comparado-se a resina epóxi sem adição de carga metálica com o compósito com 5% de carga de ferro, mas a partir de 5% de ferro a dureza começa a se estabilizar, permanecendo em 85 Shore D nos compósitos com 10 e 20% de carga metálica..

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados

<i>Material</i>	<i>Tensão Máxima (MPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>Dureza (Shore D)</i>
0%	59	2,88	76
5%	50	3,85	82
10%	47	4,48	85
20%	35	6,30	85

Fonte: (JESUS, 2005)

Na tabela 3 são comparados os valores da condutividade térmica dos diferentes compósitos utilizados neste trabalho, onde se observa que com o aumento da quantidade de ferro, a condutividade térmica do material compósito aumenta.

Tabela 3 – Condutividade Térmica dos corpos de prova

<i>Amostra</i>	<i>Condutividade Térmica (W/mK)</i>
0%	0,157
5%	0,188
10%	0,218
20%	0,321

Fonte: (JESUS, 2005)

Avaliando-se as propriedades da resina utilizada como matriz do compósito e da carga metálica apresentadas nas tabelas e figuras anteriores, e levando-se em conta o conhecimento teórico e experimental de usinagem, considera-se que os seguintes comportamentos do compósito estudado são relevantes:

- A natureza polar da resina permite uma boa adesão com as partículas de pó de ferro, o que garante que em grande parte estas partículas não se desprendem da matriz;
- Todos os materiais utilizados possuem uma rigidez suficiente alta para não permitir que apareçam deformações significativas nos corpos de prova durante a usinagem;
- A utilização de pó de ferro evita que estas partículas desgarrem da matriz, fato usual quando se utiliza fibras;
- As partículas de ferro de tamanho relativamente grande (100  $\mu\text{m}$ ) ocasionam, em seu desprendimento da matriz, rugosidades elevadas da superfície, devido à criação de crateras;
- O aumento da concentração de carga de ferro no material resulta num incremento na condutividade do compósito (tabela 3), com isso facilitando a eliminação do calor gerado durante a usinagem dos corpos de prova;
- A ausência de produtos voláteis, resultantes da reação de cura, diminui o aparecimento de porosidade nos corpos de prova;
- A transparência da resina permite observar a distribuição das cargas metálicas na matriz polimérica;
- É necessário um controle da temperatura do corpo de prova durante o torneamento, pois sua temperatura não deve ultrapassar a temperatura de transição vítrea da resina epóxi ( $T_g = 127\text{ }^\circ\text{C}$ );

No Anexo 1 pode-se encontrar o processo de confecção destes corpos de prova mais detalhado.

### 3.2.2 Máquina-ferramenta

Utilizou-se para os ensaios um torno CNC, cedido pelo laboratório USICON – UFSC, que atendia todas as necessidades do experimento. Algumas características do torno são apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Características do torno CNC

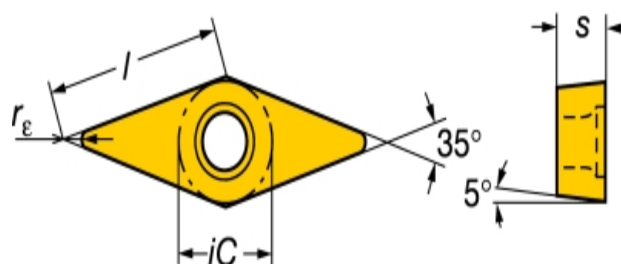
<b>Máquina</b>	Torno CNC
<b>Modelo</b>	Romi Cosmos 10U
<b>Fabricante</b>	Indústrias Romi S.A.
<b>Diâmetro máximo permitido sobre o barramento</b>	300 mm
<b>Potência do motor</b>	10 cv

Fonte: Manual da Romi

Outras especificações técnicas deste torno seguem no Anexo 2.

### 3.2.3 Ferramentas de corte

Para a realização dos experimentos, foram utilizados como ferramentas de corte, insertos de metal-duro com especificação VMBT 160408 - KM 3210 (figura 16). Optou-se por utilizar ferramentas de metal-duro sem cobertura, em razão deste material já ter sido utilizado em estudos anteriores de materiais compósitos similares ao estudado neste trabalho (CABRERA, 2005).



$l$	16 mm
$S$	4,76 mm
$iC$	9,52 mm
$r_{\epsilon}$	0,8 mm

Figura 16 – Ilustração da geometria do inserto de metal-duro utilizado neste trabalho  
Fonte: SANDVIK (2000)

O porta-ferramenta utilizado nos ensaios deste trabalho foi o SVJBR 2020 K16, conforme ilustrado na figura 17.

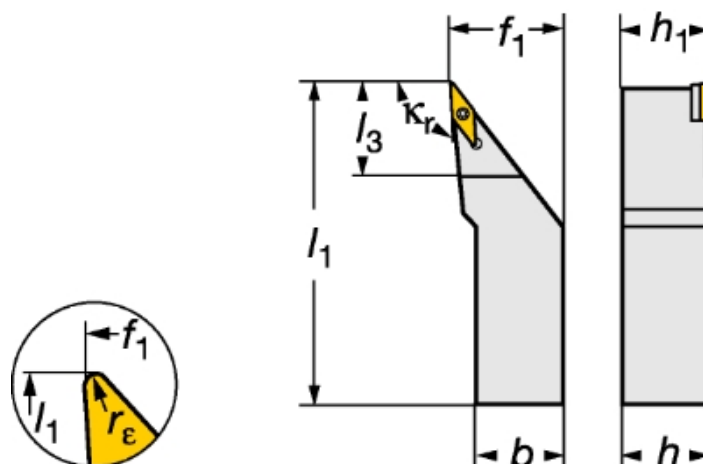


Figura 17 - Ilustração do porta-ferramenta utilizado nos ensaios  
Fonte: SANDVIK (2000)

### 3.2.4 Sistema de medição do desgaste

Para verificar se ocorreu ou não desgaste na ferramenta de corte, e para medi-lo caso o mesmo tenha ocorrido, foi utilizado um microscópio de ferramentaria localizado no laboratório USICON - UFSC, com suas especificações apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 – Especificações do microscópio de ferramentaria

<b>Máquina</b>	Microscópio de ferramentaria
<b>Fabricante</b>	Nikon
<b>Modelo</b>	Measurescope
<b>Mesa micrométrica com campo de medição</b>	50mm x 100 mm
<b>Resolução da mesa micrométrica</b>	0,001 mm
<b>Aumento</b>	30x

### 3.2.5 Sistema de medição da rugosidade da superfície

Para a medição da rugosidade da superfície dos corpos de prova usinados, utilizou-se um rugosímetro de bancada, da marca Mahr, com auxílio de uma sonda mecânica cujo raio do apalpador é igual a 5  $\mu\text{m}$  e ângulo de 90°, pertencente ao laboratório USICON – UFSC. Informações técnicas mais detalhadas sobre este rugosímetro encontram-se no Anexo 3.

### 3.2.6 Análise da Temperatura

Durante o processo de usinagem, uma quantidade significativa de energia é transferida em forma de calor, que é causado pela deformação plástica da superfície da peça, o atrito entre o cavaco e a face da ferramenta, e o atrito entre a ferramenta e a peça (Longbottom e Lanham, 2005).

Segundo (MANO, 1991), a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) de materiais compósitos representa a temperatura em que a mobilidade das cadeias moleculares se torna restrita pela coesão intermolecular, devido à rotação de grupos laterais em torno de ligações primárias. Assim, em temperaturas abaixo da  $T_g$ , a mobilidade das cadeias macromoleculares desaparece, e o material torna-se mais rígido, e em temperaturas acima da  $T_g$  o material é menos rígido. Por isso, fez-se necessário conhecer a temperatura do material compósito durante a usinagem, para verificar se a  $T_g$  do material foi atingida ou não.

A temperatura do material compósito foi medida por um termômetro digital infravermelho, fabricado pela Minipa, modelo MT 350, localizado no laboratório CIMJECT – UFSC. Algumas características do referido termômetro são apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 – Especificações do termômetro

<b>Faixa de medida</b>	-50 <sup>0</sup> C a 550 <sup>0</sup> C
<b>Resposta espacial</b>	6 a 14 $\mu$ m
<b>Resolução</b>	0,5 <sup>0</sup> C
<b>Precisão</b>	$\pm 2^0$ C
<b>Emissividade fixa</b>	0,95

### 3.2.7 Análise da microestrutura dos corpos de prova

Para auxiliar na análise dos resultados referentes à rugosidade da superfície dos corpos de prova usinados, realizou-se um estudo da microestrutura da superfície usinada com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

O microscópio utilizado neste trabalho localiza-se no LABMAT – UFSC, o qual foi fabricado pela empresa Philips, modelo XL 30. Para tornar as amostras condutoras, já que a porcentagem de matriz polimérica no compósito varia de 80 a 100% do volume das amostras, estas foram recobertas por uma fina camada de ouro. Para este recobrimento foi utilizado um metalizador, modelo D2 Diod Sputtering System, fabricado pela ISI (International Scientific Instruments), também localizado no LABMAT – UFSC.

## 3.3 Planejamento dos Experimentos

Neste trabalho realizaram-se diversos ensaios de torneamento com diferentes parâmetros de corte, em corpos de prova cilíndricos do compósito de matriz de resina epóxi com diferentes cargas metálicas de pó de ferro.

De modo geral a usinagem de materiais compósitos, compostos por uma matriz polimérica e cargas metálicas, não pode ser considerada como uma usinagem de um material polimérico ou metálico, uma vez que os conhecimentos teóricos e experimentais a respeito destes materiais não são todos aplicados diretamente a tais materiais compósitos. Como um material compósito possui pelo menos duas fases distintas, suas propriedades mecânicas e térmicas normalmente diferem das propriedades dos materiais que o compõem, traduzindo-se em interações complexas entre a matriz e o reforço durante o processo de usinagem. Então, é necessário estabelecer



diretrizes para garantir que os resultados do processo de usinagem sejam satisfatórios, em particular relações que permitam associar os parâmetros funcionais do processo de usinagem com a qualidade da superfície do material, uma vez que a qualidade é um elemento bastante importante para as indústrias (El-Sonbatyet et al, 2004; Krishnamurthy, 1992; Groover, 1996).

O processo de corte com formação de cavaco é multifatorial, do qual participam diversas variáveis, as quais podem ser divididas em dependentes e independentes.

Como variáveis dependentes considera-se:

- Forças de corte;
- Rugosidade da superfície usinada;
- Desgaste da ferramenta de corte;
- Grau de usinabilidade.

Já como variáveis independentes:

- Profundidade de corte ( $a_p$ ).
- Avanço ( $f$ );
- Velocidade de corte ( $V_c$ );
- Material das ferramentas de corte e suas geometrias;
- Uso de líquidos lubri-refrigerantes;
- Tipo e Modelo das máquinas ferramentas;
- Material da peça.

No presente trabalho, os ensaios de usinagem foram divididos em duas etapas. Na primeira etapa foi adotado um valor de profundidade de corte ( $a_p$ ) pequeno, ou seja, foi realizada uma passada de acabamento com o intuito de analisar em detalhes a superfície do material usinado, mas também monitorando a temperatura e o desgaste da ferramenta. Já na segunda etapa dos ensaios o valor da profundidade de corte utilizada foi maior, e nesta parte dos experimentos buscou-se

principalmente verificar se ocorria desgaste da ferramenta ou se a  $T_g$  da resina era atingida, em um processo contínuo de usinagem.

Os parâmetros de corte escolhidos para os ensaios basearam-se em outros estudos realizados anteriormente, com materiais similares ao utilizado neste experimento (CABRERA, 2005; PALANIKUMAR et al, 2006; ). No entanto, o valor máximo da velocidade de corte foi limitado pela potência do torno utilizado, mas a velocidade de corte foi adequada para as necessidades e requisitos desta pesquisa. O conjunto de ensaios de torneamento foi efetuado sem a utilização de meios lubri-refrigerantes.

### 3.3.1 Primeira fase dos experimentos

Na primeira etapa dos experimentos totalizaram-se 48 combinações diferentes de ensaios, obtidas com 4 valores de avanços, 3 de velocidade de corte e 4 composições diferentes de materiais, como pode-se ver na tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de corte utilizados nos experimentos

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
<b>Profundidade de corte (ap)</b>	0,5 mm
<b>Velocidade de corte</b>	100 m/min.
	200 m/min.
	400 m/min.
<b>Avanço</b>	0,05 mm/rev.
	0,1 mm/rev.
	0,15 mm/rev.
	0,2 mm/rev.

Nesta etapa, os ensaios de torneamento começaram com a resina epóxi pura e com os valores mínimos de velocidade de corte (100 m/min.) e avanço (0,05 mm/rev.). Foi realizada apenas uma passada da ferramenta pelo corpo de prova em cada ensaio, de modo a reduzir o custo e o tempo dos experimentos. Posteriormente as velocidades e os avanços foram aumentados até que todas as doze combinações de parâmetros de usinagem para o material fossem executadas. Este mesmo procedimento foi adotado para os outros materiais (resina epóxi com 5%, 10% e 20% de carga de ferro).

Durante a realização dos ensaios, a cada mudança na combinação de parâmetro de corte e/ou material, foi medida a rugosidade da superfície torneada com um rugosímetro de bancada, e monitorou-se o aparecimento, ou não, de marcas de desgaste na ferramenta de corte, com o auxílio do microscópio de ferramentaria.

Os valores da rugosidade da superfície e a ocorrência ou não do desgaste da ferramenta foram anotados em uma planilha de controle, que se encontra no anexo 4.

A temperatura de todos os corpos de prova foi monitorada durante os ensaios de usinagem de forma contínua, e foram anotados apenas os valores máximos das temperaturas do corpo de prova para cada passada da ferramenta no material.

### 3.3.2 Segunda fase dos experimentos

Esta etapa do experimento foi efetuada para avaliar o desgaste da ferramenta e a temperatura do corpo de prova na usinagem em desbaste. Para tanto foram empregados parâmetros de corte que exijam mais da ferramenta de corte e que possam causar um aumento maior da temperatura do corpo de prova. Na tabela 8 pode-se observar os valores dos parâmetros de corte escolhidos para esta etapa dos experimentos.

Tabela 8 – Valores dos parâmetros de corte utilizados na segunda etapa dos experimentos

<b>Parâmetros de corte</b>	<b>Valor</b>
<b>Profundidade de corte (ap)</b>	2 mm
<b>Velocidade de corte</b>	400 m/min.
<b>Avanço</b>	0,05 mm/rev. e 0,2 mm/rev.

A escolha da velocidade de corte de 400 m/min. também está relacionada ao processo de fabricação dos moldes, pois para torná-los rentáveis é necessário velocidades de corte maiores no desbaste. Este ensaio permite ainda avaliar como diferentes valores de avanço influenciam a temperatura do corpo de prova durante o torneamento.

Os materiais selecionados para esta etapa foram: resina de epóxi sem adição de carga metálica e o compósito com 20% de carga de pó de ferro. Isto possibilitou a comparação do desgaste da ferramenta e da temperatura do corpo de prova, com a presença ou não de carga metálica no material.

Os ensaios tiveram aproximadamente 2 minutos de duração cada. A temperatura foi monitorada constantemente e anotada de dez em dez segundos. Já as marcas de desgaste da ferramenta de corte foram analisadas após cada ensaio de torneamento.

## CAPÍTULO 4

### 4 RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos durante a realização dos ensaios de torneamento, com relação à rugosidade gerada na superfície da peça e o aparecimento ou não de desgaste de quina na ferramenta de corte.

A apresentação dos resultados ocorrerá na forma de gráficos, mostrando, também, documentação fotográfica dos cavacos gerados nos ensaios e das microestruturas das superfícies usinadas.

#### 4.1 Rugosidade

As medições das rugosidades nos corpos de prova foram realizadas através de um rugosímetro manual. As figuras que serão apresentadas neste capítulo mostram os acabamentos das superfícies dos corpos de prova com os respectivos valores de  $R_a$  em função da velocidade de corte, do avanço e da quantidade de carga de ferro no material, onde foram efetuadas três medições para cada corpo de prova.

Todos os resultados apresentados a seguir são referentes à primeira etapa dos experimentos, descrita na seção 3.3.1.

##### 4.1.1 Influência do Avanço sobre a Rugosidade

Na figura 18 pode-se observar as alterações da rugosidade da superfície dos corpos de prova em função do avanço, permanecendo a quantidade de carga de ferro inalterada. As figuras apresentam também três curvas para as velocidades de corte utilizadas neste trabalho, estas são 100, 200 e 400 m/min. Sendo a figura 18 (a) a resina sem carga de ferro, a figura 18 (b) o compósito com 5% de carga de ferro, a figura 18 (c) o compósito com 10% de carga de ferro e a figura (d) o compósito com 20% de carga de ferro.

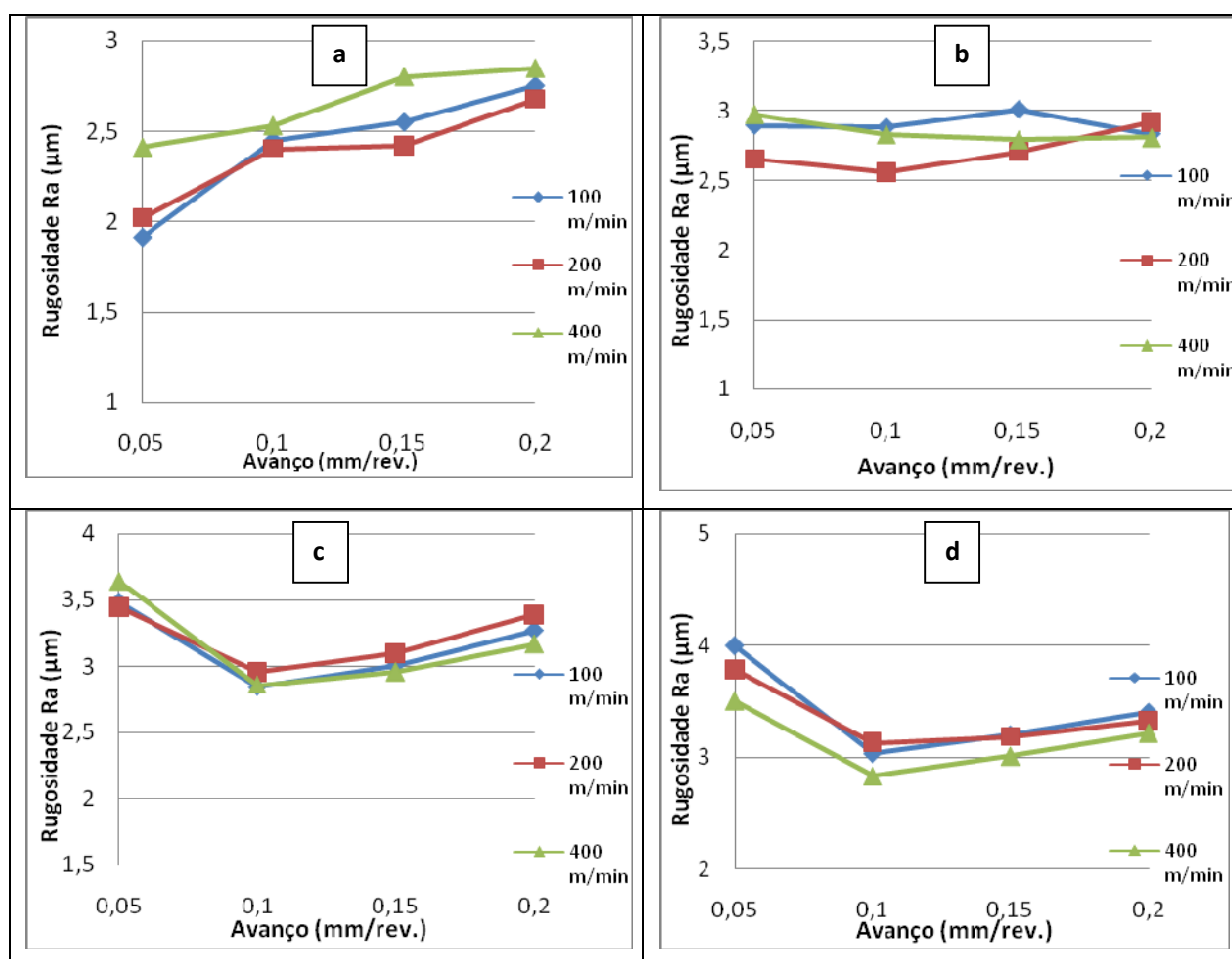


Figura 18 - Rugosidade x Avanço ( $r_\epsilon = 0,8\text{mm}$ )

Pode-se constatar na figura 18 que o comportamento deste material na usinagem é muito semelhante ao dos metais, pois do mesmo modo que nos metais, existe um leve aumento da rugosidade da superfície com o crescimento do avanço, exceto para os compósitos com 10% e 20% de carga de ferro e com avanço de 0,05 mm/rev. (figuras 18 (c) e 18 (d)).

Esta alteração da qualidade da superfície para o avanço de 0,05 mm/rev. provavelmente ocorreu porque nestes experimentos se empregaram simultaneamente uma ferramenta com um raio de quina grande (0,8 mm), um avanço pequeno (0,05 mm/rev.) e uma pequena profundidade de corte (0,5 mm). Todos esses fatores somados podem fazer com que a ferramenta de corte, devido ao contato com o material durante o torneamento, arraste as partículas de ferro que são cortadas ou arrancadas através do material, originando possivelmente riscos, que podem ser observados

nas figuras 18 (a) e 18 (b). Estes riscos diminuem a qualidade da superfície do material, aumentando sensivelmente a rugosidade destes, como observado nas figuras 18 (c) e 18 (d).

Para verificar se o raio de quina elevado, em conjunto com a profundidade de corte e o avanço pequenos foram os causadores da má qualidade da superfície usinada, foram realizados novos ensaios de usinagem com o mesmo material, mas com uma ferramenta de raio de quina menor (0,4 mm). Conservou-se a profundidade de corte e o avanço anteriores, para os compósitos com 10% e 20% de carga de ferro e velocidade de corte de 400 m/min. Optou-se por estes dois materiais, por estes terem apresentado os maiores valores da rugosidade da superfície quando o avanço foi de 0,05 mm/rev.

Na figura 19 pode-se ver a alteração da rugosidade da superfície variando-se o avanço, sendo que na figura 19 (a) tem-se o compósito com 10% e na figura 19 (b) o compósito com 20% de carga de ferro respectivamente, com raio de quina de 0,4 mm.

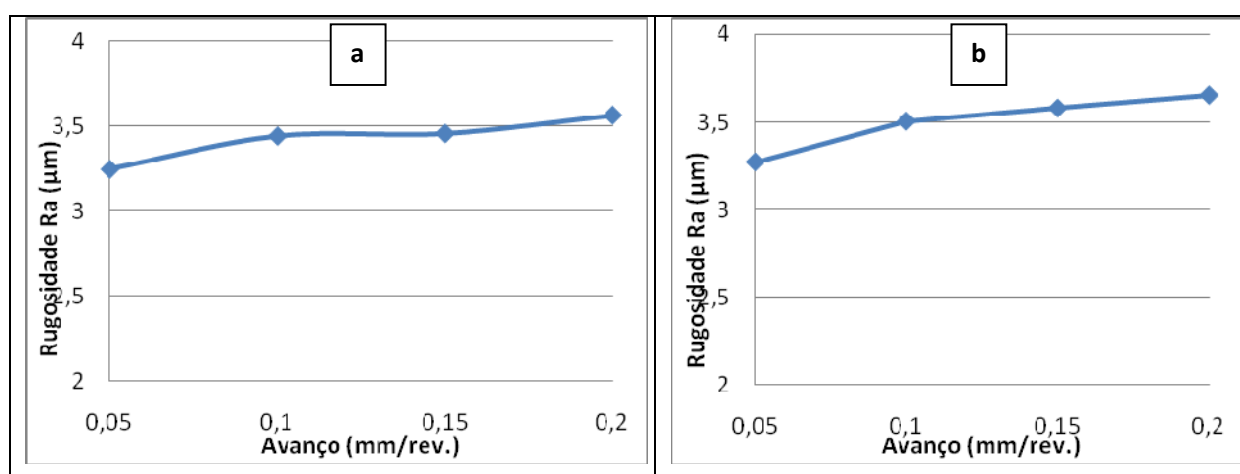


Figura 19 - Rugosidade x Avanço ( $r_e = 0,4\text{mm}$ )

Nas figuras 19 (a) e 19 (b) percebe-se que as rugosidades das superfícies usinadas, para o avanço de 0,05 mm/rev., não apresentam valores altos em relação aos outros avanços (0,1; 0,15 e 0,2 mm/rev.), tanto para o compósito com 10% de carga de ferro quanto para o compósito com 20% de carga de ferro. Constata-se também, que os valores da rugosidade da superfície usinada por uma ferramenta com  $r_e$  igual a 0,8 mm são superiores quando comparada ao emprego de uma ferramenta com  $r_e$  de 0,4 mm, com mesmos parâmetros de corte (figuras 18 (c) e 18 (d)).

O não aparecimento de um elevado valor de rugosidade para avanços pequenos e raio de quina de 0,4 mm está diretamente relacionado ao não surgimento de riscos no material, como pode ser observado na figura 20. Estes riscos, provavelmente não apareceram para o ensaio com  $r_e$  igual a 0,4mm porque, com a utilização de um raio de quina menor, a maioria das partículas de ferro ao serem cortadas no torneamento pela ferramenta de corte não são mais arrastadas pelo material, devendo sair com o cavaco com maior facilidade.

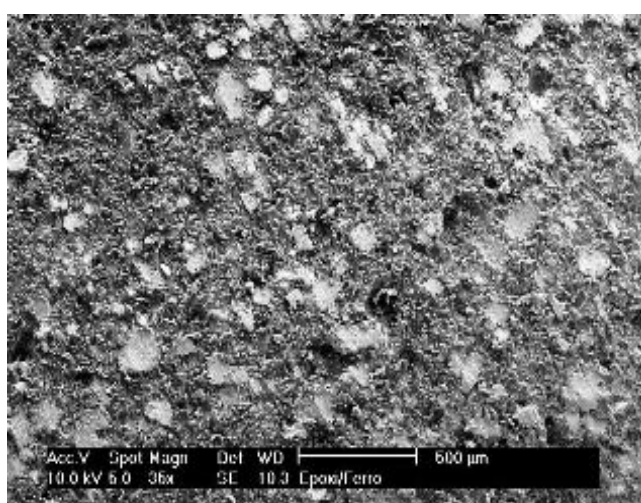


Figura 20 – Microestrutura do compósito com 20% de ferro com aumento de 35x e  $r_e$  0,4mm

#### 4.1.2 Influência da Velocidade de Corte sobre a Rugosidade

Na figuras 21, pode-se observar a variação da rugosidade da superfície do material em função da velocidade de corte. Nestas figuras, a quantidade de carga de ferro permanece constante e as curvas representam os quatro avanços utilizados, isto é, 0,05 mm/rev., 0,1 mm/rev., 0,15 mm/rev. e 0,2 mm/rev. O  $r_e$  utilizado foi de 0,8 mm. Onde a figura 21 (a) é da resina sem adição de carga de ferro, a figura 21 (b) é o compósito com 5% de carga de ferro, a figura 21 (c) é o compósito com 10% de carga de ferro e a figura 21 (d) é o compósito com 20% de carga de ferro.

A velocidade de corte influenciou de modo diferente a qualidade da superfície usinada destes materiais, se comparada com a influência exercida nos metais em geral, no qual o



aumento da velocidade de corte melhora o acabamento da superfície, devido ao desaparecimento do gume postiço com o aumento da velocidade de corte. No entanto, para os compósitos com 10% e 20% de ferro (figuras 34 e 35), essa tendência se altera, visto que o compósito começa a possuir mais propriedades dos materiais metálicos.

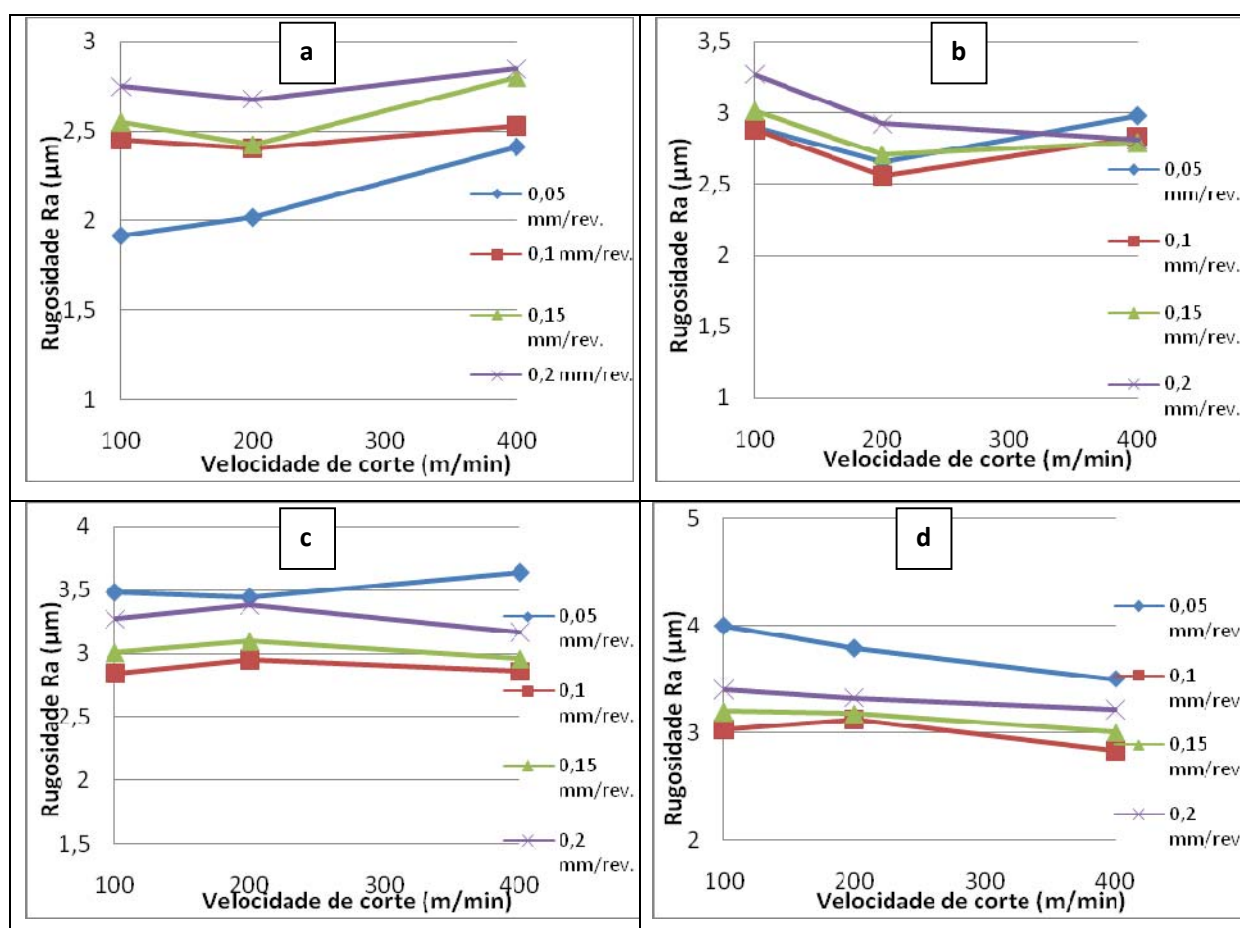


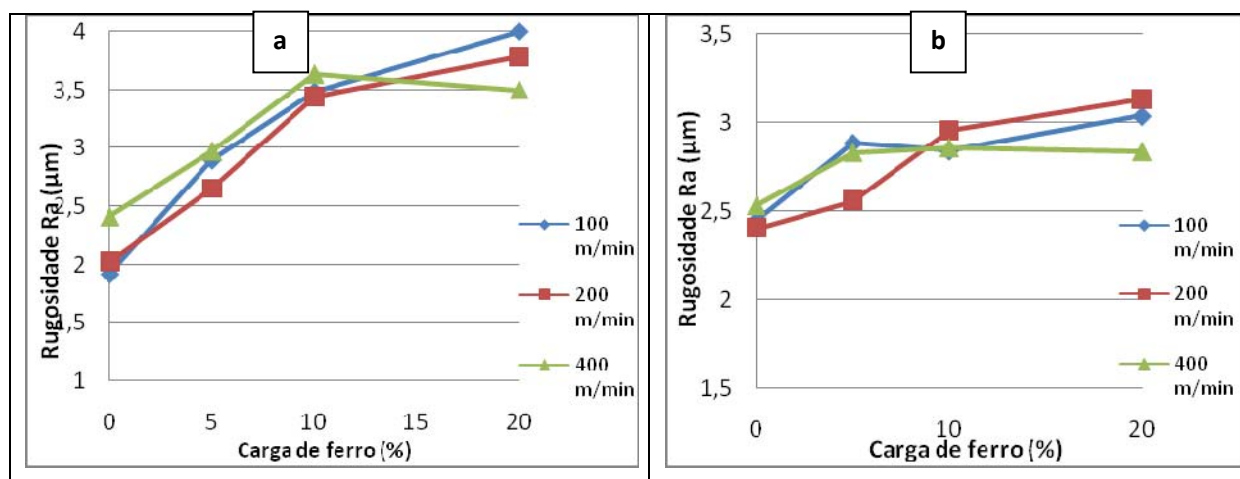
Figura 21 - Rugosidade x Velocidade de corte ( $r_e = 0,8\text{mm}$ )

Na figura 21 (a), na resina epóxi sem adição de carga de ferro, os menores avanços e as menores velocidades de corte apresentam os melhores resultados de rugosidade da superfície quando comparados a valores maiores de avanços e de velocidades de corte. Apresentando a combinação de avanço de 0,05 mm/rev. e velocidade de corte de 100 m/min. como a que demonstra ter o melhor acabamento da superfície. Para o compósito com 5% de carga de ferro (figura 21 (b)), os melhores resultados de qualidade da superfície foram encontrados para a velocidade de corte de 200 m/min. e o avanço de 0,1 mm/rev.

Já os compósitos com 10 % e 20% de carga de ferro, figuras 21 (c) e (d) respectivamente, apresentaram a mesma tendência de rugosidade da superfície para a variação do avanço, se comparada com os outros dois materiais (0% e 5% de carga de ferro), menos para o avanço de 0,05 mm/rev., fato já discutido anteriormente. Observa-se também uma melhora na qualidade da superfície dos compósitos com o aumento da velocidade de corte, principalmente para o compósito com 20% de carga de ferro. A combinação de parâmetros de corte que apresentaram melhores acabamentos da superfície para estes dois materiais foram: velocidade de corte de 400 m/min. e avanço de 0,1 mm/rev.

#### 4.1.3 Influência da Quantidade de Ferro no Material sobre a Rugosidade

A figura 22 apresenta a rugosidade das superfícies dos corpos de prova em função da quantidade de carga de ferro no corpo de prova. Para isso os avanços permanecem constantes, enquanto são traçadas curvas para três velocidades de corte (100 m/min., 200 m/min. e 400 m/min.). Onde na figura 22 (a) tem-se o avanço de 0,05 mm/ver., na figura 22 (b) o avanço de 0,1 mm/ver., na figura 22 (c) o avanço de 0,15 mm/ver. e na figura 22 (d) o avanço de 0,2 mm/ver.



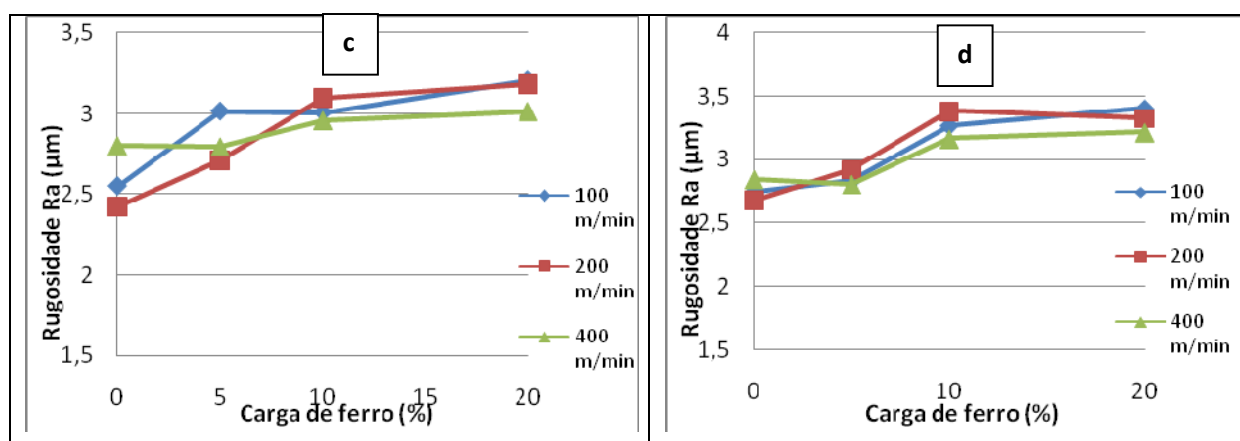


Figura 22 - Rugosidade x % de ferro no material ( $r_e = 0,8\text{mm}$ )

Para um avanço de  $0,05\text{ mm/rev.}$ , o aumento da quantidade de carga de ferro no compósito interfere diretamente na qualidade da superfície usinada, como pode-se visualizar na figura 22 (a). Isto ocorre, pois para este avanço o aumento da quantidade de ferro no material possibilita o maior surgimento de riscos no material.

Já para os outros avanços, cujos resultados estão mostrados nas figuras 22 (b), (c) e (d), existe uma alteração na rugosidade da superfície usinada com o acréscimo de quantidade de carga de ferro no compósito, mas de maneira não muito significativa.

## 4.2 Avaliação da Microestrutura

Nas figuras a seguir são apresentadas as microestruturas das superfícies usinadas, para os quatro tipos de materiais estudados (0% de ferro, 5% de ferro, 10% de ferro e 20% de ferro) e diferentes velocidades e avanços. Também são mostradas as micrografias com contraste BSE, onde observa-se a distribuição da carga de ferro na matriz polimérica.

Na figura 23 observa-se a microestrutura da resina epóxi sem a adição de carga de ferro, com uma velocidade de  $400\text{ m/min}$  e um avanço de  $0,1\text{ mm/rev.}$ , para um aumento de 35x (figura 23 (a)), 50x (figura 23 (b)), 120x (figura 23 (c)) e 240x (figura 23 (d)).

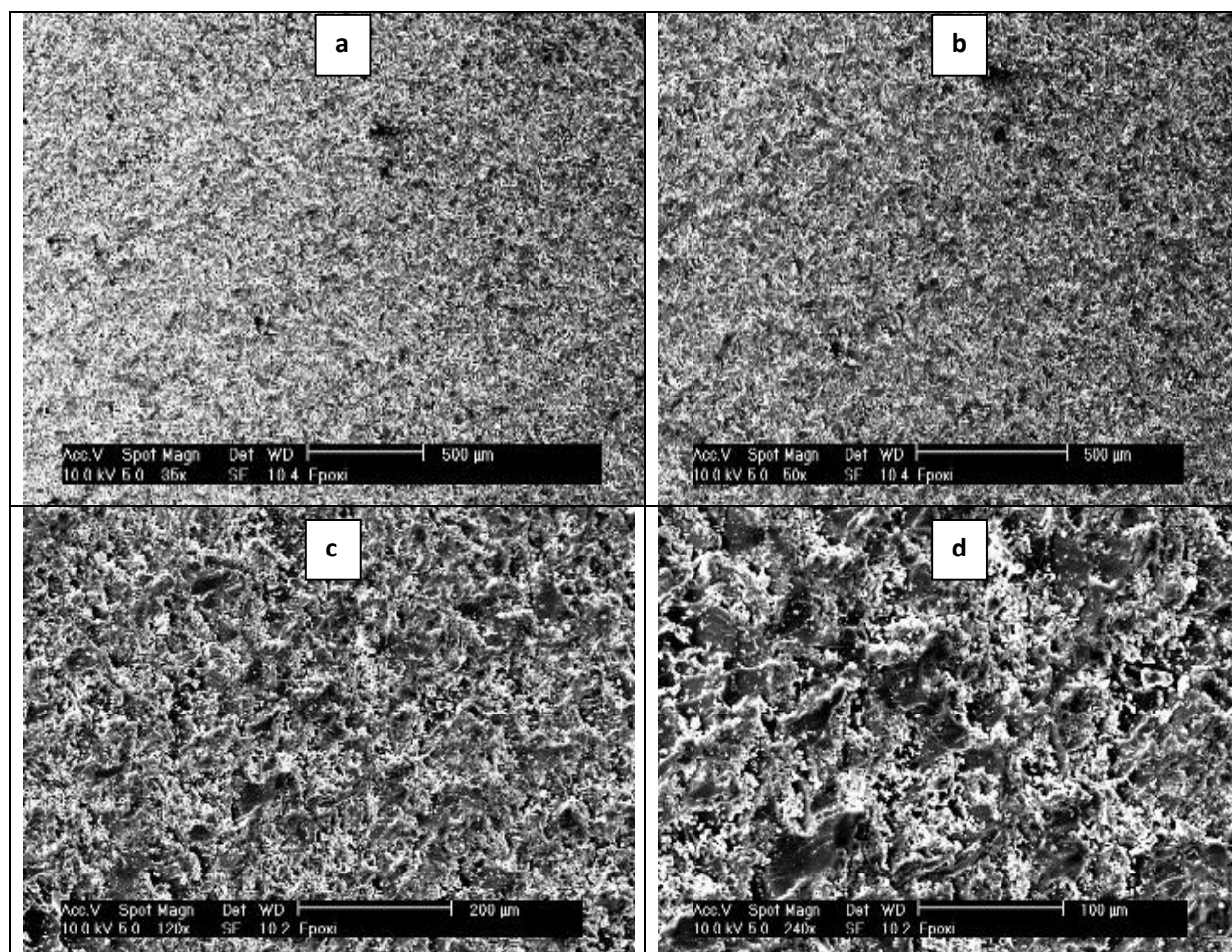


Figura 23 – Microestrutura da resina epóxi

Quando o compósito de resina epóxi com 5% de carga de ferro é torneado a uma velocidade de corte de 400 m/min. e com avanço de 0,05 mm/rev. (figura 24), as partículas de ferro podem ser arrancadas ou cortadas pela ferramenta de corte. Com observa-se nas figuras 24 (a) (aumento de 35x), 24 (b) (aumento de 50x), 24 (c) (aumento de 120x) e 24 (d) (aumento de 240x). Quando a partícula de ferro é arrancada do compósito pela ferramenta de corte é aberta uma cratera no material que prejudica a qualidade da superfície do material (ver figura 24 (c)). Deste modo, para manter um bom acabamento da superfície, o ideal seria que nenhuma partícula de ferro fosse arrancada. Também podem ser observados riscos provenientes do corte ou arrancamento das partículas de ferro pela ferramenta de corte, como na figura 24 (a).

No entanto, se existe uma boa aderência entre as partículas de ferro e a resina, quando a ferramenta de corte usina o material, as partículas de ferro não se desprendem do compósito, ao serem cortadas pela ferramenta (ver figura 24 (d)).

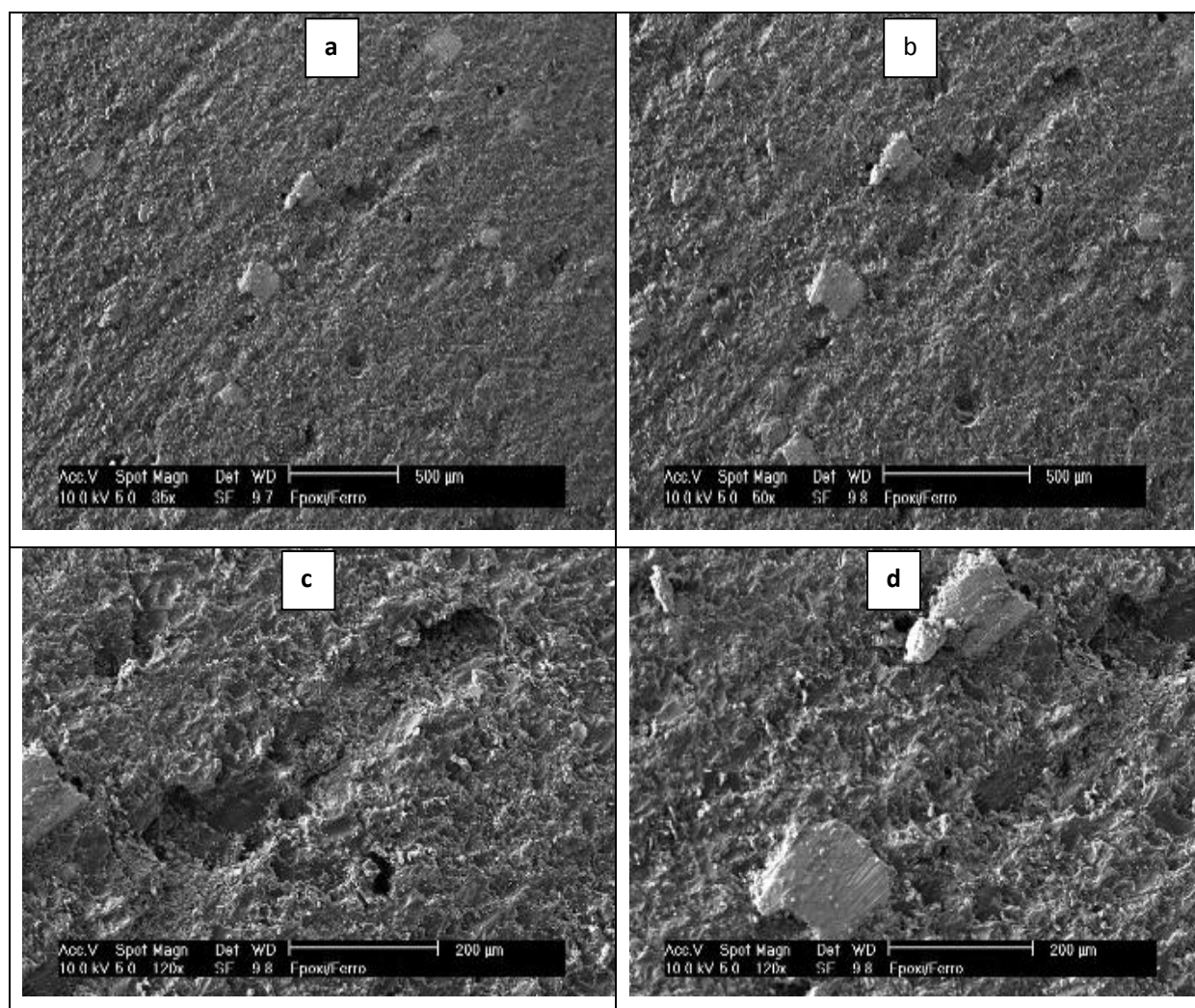


Figura 24 – Microestrutura do compósito com 5% de ferro

Na figura 25 tem-se a microestrutura da superfície usinada do compósito com 10% de carga de ferro para uma velocidade de corte de 400 m/min. e um avanço de 0,05 mm/rev., para um aumento de 35x (figura 23 (a)), 50x (figura 23 (b)), 120x (figura 23 (c)) e 240x (figura 23 (d)).

Quando aumenta-se a quantidade de carga ferro de 5% para 10%, e mantém-se o mesmo avanço de 0,05 mm/rev., o número de riscos na superfície do material também aumenta, como pode-se verificar nas figuras 25 (a) e (b).



Com um aumento de 50x, pode-se ver o risco na superfície usinada do material quando são utilizados uma ferramenta com ângulo de corte de 0,8 mm, um avanço de 0,05 mm/rev. e uma profundidade de corte de 0,5 mm, como ilustrado na figura 25 (b). Na figura 25 (c), com aumento de 120 x, visualizam-se duas partículas de ferro que foram cortadas pela ferramenta, e uma que foi arrancada pela mesma. Já na figura 25 (d) observa-se, a um aumento de 240x, o espaço deixado pela partícula de ferro quando arrancada pela ferramenta.

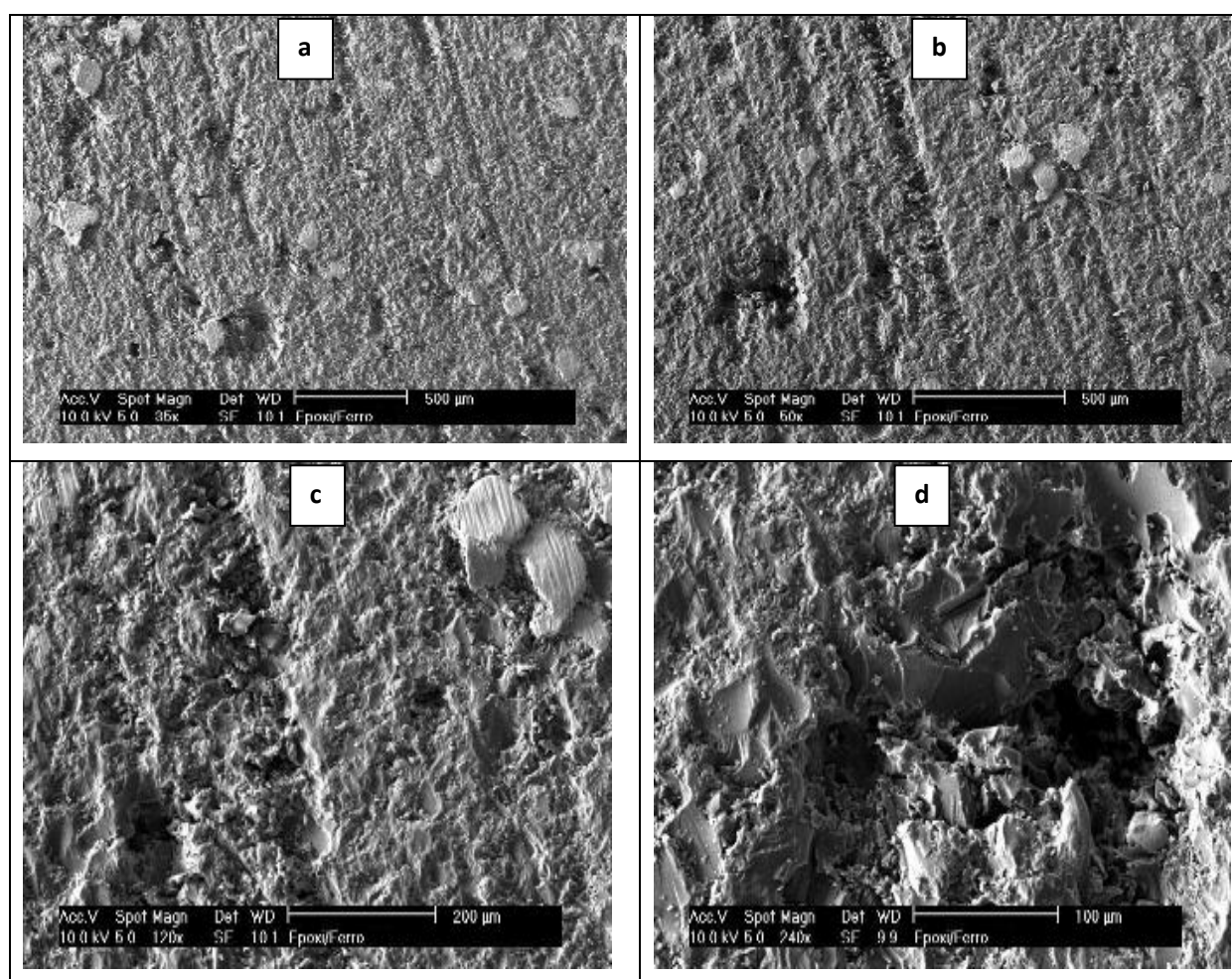


Figura 25 – Microestrutura do composto com 10% de ferro

Já quando o avanço utilizado é de 0,2 mm/rev., os riscos sob a superfície usinada desaparecem, como pode ser observado na figura 26, onde foi utilizada uma velocidade de corte de 400 m/min. em um composto com carga de ferro de 20%.

Observa-se também, que o número de partículas que são desprendidas da matriz polimérica é bem menor do que as que permanecem no compósito após a usinagem. Isto significa que existe uma aderência maior entre as partículas de metal e a matriz polimérica de resina epóxi, comparado com o compósito com carga de ferro igual a 10%.

Na figura 26 (c) com aumento de 120x, visualiza-se as linhas de corte nas partículas de ferro e uma cavidade gerada pelo desprendimento de uma partícula, cavidade essa que também pode ser observada na figura 26 (d) com um aumento de 240x.

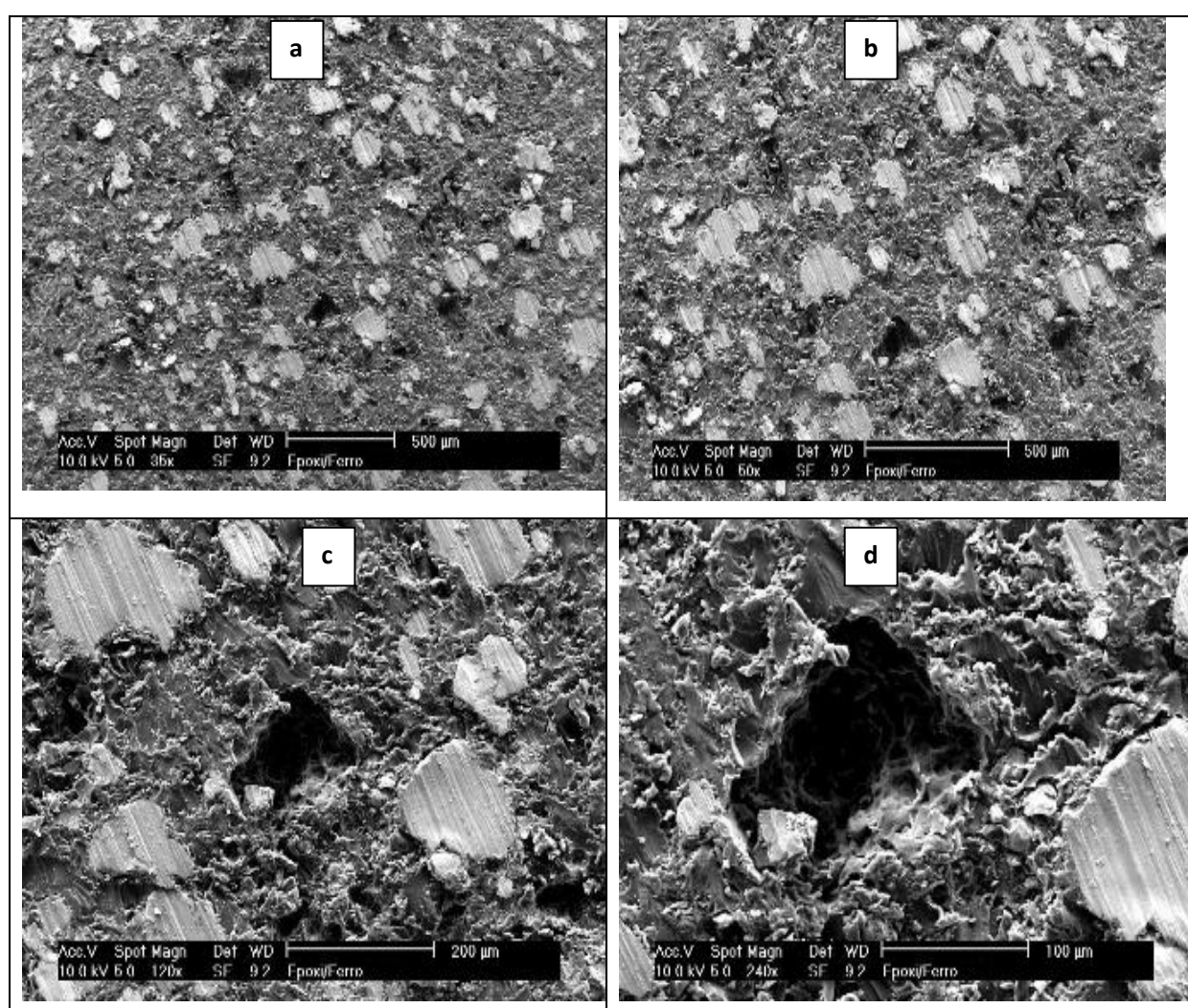


Figura 26 – Microestrutura do compósito com 20% de ferro

Observa-se em todas as micrografias que não houve, em nenhum caso, o aparecimento de porosidades no material, fato que comprova que as técnicas utilizadas para a confecção dos corpos de prova foi eficiente. O aparecimento de bolhas poderia piorar consideravelmente a qualidade da superfície do material, aumentando a sua rugosidade.

#### 4.2.1 Distribuição da carga de ferro na matriz polimérica

Para avaliar se as partículas de ferro estão bem distribuídas na matriz polimérica de resina epóxi, utilizaram-se imagens das microestruturas com contrastes de BSE, que facilitam a visualização das diferenças entre a matriz polimérica e as partículas metálicas com suas formas e tamanhos.

Tanto para o compósito com 5% de ferro, figura 27 (a), quanto para o compósito com de 20% de ferro, figura 27 (b), existe uma boa distribuição das partículas de ferro através da matriz polimérica. Esta boa distribuição indica uma relativa homogeneidade no material, no que tange principalmente às propriedades mecânicas e térmicas.

Uma boa distribuição também atesta que houve uma confecção apropriada dos corpos de prova, descartando a possibilidade de decantação das partículas de ferro em grandes quantidades, fato que prejudicaria enormemente a realização deste trabalho.

Nas figuras 56 e 57, além da distribuição das partículas de ferro, pode-se perceber que essas partículas assumem diversas formas e tamanhos. As partículas com tamanhos maiores acabam sendo mais prejudiciais à qualidade da superfície quando desprendidas da matriz, pois elas deixam crateras de maior tamanho.



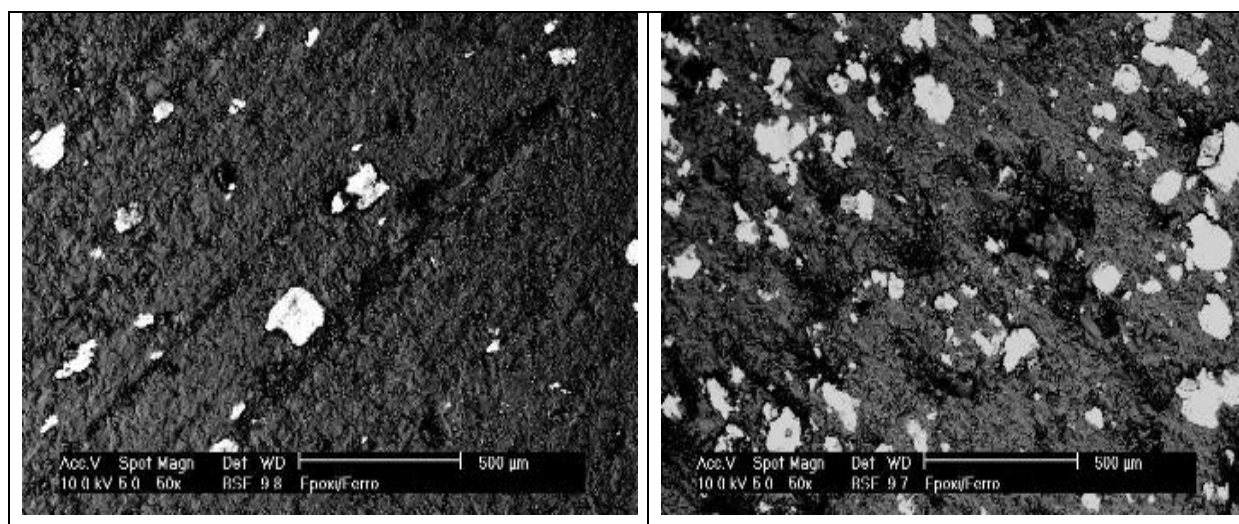


Figura 27 – Microestrutura do compósito com aumento de 50x BSE

### 4.3 Análise dos Cavacos

O estudo da forma e tamanho do cavaco produzido pela usinagem de materiais metálicos é muito importante, pois através deste pode-se avaliar se a usinagem está sendo feita de maneira adequada ou não. Com relação ao material compósito estudado neste trabalho, considera-se também que é necessário conhecer a forma e o tamanho dos cavacos produzidos nos ensaios.

Os cavacos foram recolhidos após a usinagem dos corpos de prova, para os materiais com 5% e 20% de carga de ferro. As figuras que serão apresentadas a seguir mostram esses cavacos para as velocidades de corte (100 m/min., 200 m/min. e 400 m/min.) e avanços (0,05 mm/rev., 0,1 mm/rev., 0,15 mm/rev. e 0,2 mm/rev.) utilizados nos ensaios.

#### 4.3.1 Cavaco do compósito com 5% de carga de ferro

Nas figuras 28 a 39 são apresentados os cavacos gerados na usinagem do compósito com 5% de carga de ferro com os parâmetros de corte citados anteriormente. Nota-se nas figuras 28, 32 e 36 que os cavacos com avanços menores (0,05 mm/rev.) apresentam formas de fitas e são mais compridos. A partir do avanço de 0,1 mm/rev., os cavacos começam a assumir uma forma de

hélice, como pode ser visto nas figuras 29, 33 e 37. Também pode-se observar que à medida que o avanço aumenta, o tamanho dos cavacos diminui.

Segundo König (2002), os cavacos mais desfavoráveis para usinagem são os mais longos. Desta forma, quanto maior o avanço utilizado na usinagem do compósito de matriz polimérica de resina epóxi com 5% de carga de ferro, mais favorável é o tipo de cavaco gerado na usinagem deste material.

Os cavacos em forma de hélice, apesar de serem desfavoráveis para a usinagem, são menos prejudiciais do que os cavacos em forma de fita, pois estes têm maior facilidade de enroscar com o material no momento da usinagem. Este é mais um fator que atesta a melhor formação de cavacos com avanços maiores.

Nota-se também que a velocidade de corte não influencia na forma do cavaco, e que o tamanho do cavaco é pouco influenciado pela velocidade, diminuindo um pouco com o aumento da velocidade de corte.



Figura 28 – Cavaco 5%  $V_c=100\text{m/min}$   $f= 0,05\text{mm/rev}$ .



Figura 29 – Cavaco 5%  $V_c=100\text{m/min}$   $f= 0,1\text{mm/rev}$ .



Figura 30 – Cavaco 5%  $V_c=100\text{m/min}$   $f= 0,15\text{mm/rev.}$



Figura 31 – Cavaco 5%  $V_c=100\text{m/min}$   $f= 0,2\text{mm/rev.}$



Figura 32 – Cavaco 5%  $V_c=200\text{m/min}$   $f= 0,05\text{mm/rev.}$



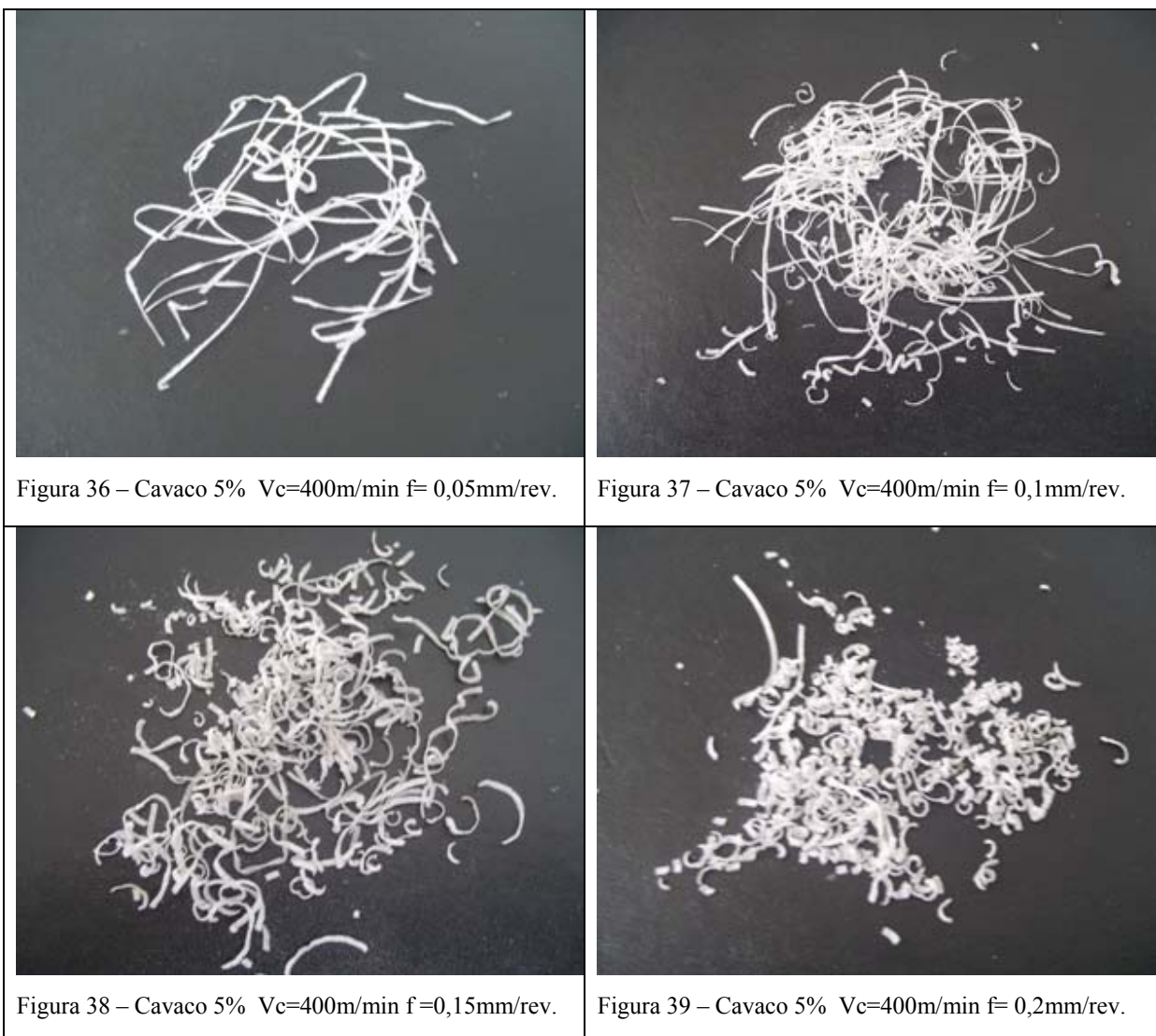
Figura 33 – Cavaco 5%  $V_c=200\text{m/min}$   $f=0,1\text{mm/rev.}$



Figura 34 – Cavaco 5%  $V_c=200\text{m/min}$   $f= 0,15\text{mm/rev.}$



Figura 35 – Cavaco 5%  $V_c=200\text{m/min}$   $f= 0,2\text{mm/rev.}$



#### 4.3.2 Cavaco do compósito com 20% de carga de ferro

Da mesma maneira que para os compósitos com 5% de carga de ferro, os cavacos obtidos pela usinagem dos compósitos com 20% de carga de ferro, para um avanço de 0,05 mm/rev., apresentam uma forma de fita e são compridos, como pode ser visto nas figuras 40 a 51. À medida que o avanço aumenta, os cavacos deste material tornam-se cada vez mais curtos, deste modo, tornando-se mais favoráveis, fato já observado no compósito com 5% de ferro.



Comparando-se os cavacos produzidos após o torneamento dos compósitos com 5% e 20% de carga de ferro com mesmos parâmetros de corte, constata-se que o compósito com maior quantidade de ferro apresenta cavacos mais curtos do que o compósito com menor carga de ferro. Isto provavelmente ocorreu porque os compósitos com maior quantidade de ferro possuem uma maior dureza, facilitando a quebra do cavaco. Além da partícula de ferro proporcionar uma descontinuidade na matriz promovendo também uma mais fácil quebra do cavaco.



Figura 40 – Cavaco 20%  $V_c=100\text{m/min}$   $f=0,05\text{mm/rev}$ .



Figura 41 – Cavaco 20%  $V_c=100\text{m/min}$   $f=0,1\text{mm/rev}$ .



Figura 42 – Cavaco 20%  $V_c=100\text{m/min}$   $f=0,15\text{mm/rev}$ .



Figura 43 – Cavaco 20%  $V_c=100\text{m/min}$   $f=0,2\text{mm/rev}$ .



Figura 44– Cavaco 20% Vc=200m/min f = 0,05mm/rev.



Figura 45 – Cavaco 20% Vc=200m/min f= 0,1mm/rev.



Figura 46 – Cavaco 20% Vc=200m/min f= 0,15mm/rev.



Figura 47 – Cavaco 20% Vc=200m/min f= 0,2mm/rev.



Figura 48 – Cavaco 20% Vc=400m/min f= 0,05mm/rev.



Figura 49 – Cavaco 20% Vc=400m/min f= 0,1mm/rev.





Figura 50 – Cavaco 20% Vc=400m/min f= 0,15mm/rev.



Figura 51 – Cavaco 20% Vc=400m/min f= 0,2mm/rev.

#### 4.4 Temperatura

Para assegurar que a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) não é atingida durante o torneamento do material, a temperatura deste foi monitorada durante todos os ensaios de usinagem realizados (primeira fase dos experimentos). Além disso, foram efetuados outros ensaios, caracterizando a segunda fase dos experimentos, que visou exigir mais da ferramenta e um maior monitoramento da temperatura de usinagem. Esse ensaio foi realizado com a resina sem adição de carga de ferro e com 20% de carga de ferro.

Em nenhuma das usinagens monitoradas, tanto para os ensaios da primeira fase de usinagem quanto nos ensaios específicos (segunda fase), as temperaturas dos materiais atingiram o valor da  $T_g$  da resina epóxi, que é de 127 °C. Para o compósito com 20% de ferro, quando utilizou-se 45% de agente de cura na resina, a temperatura não atingiu a metade do valor da  $T_g$ , como constata-se na figura 52.

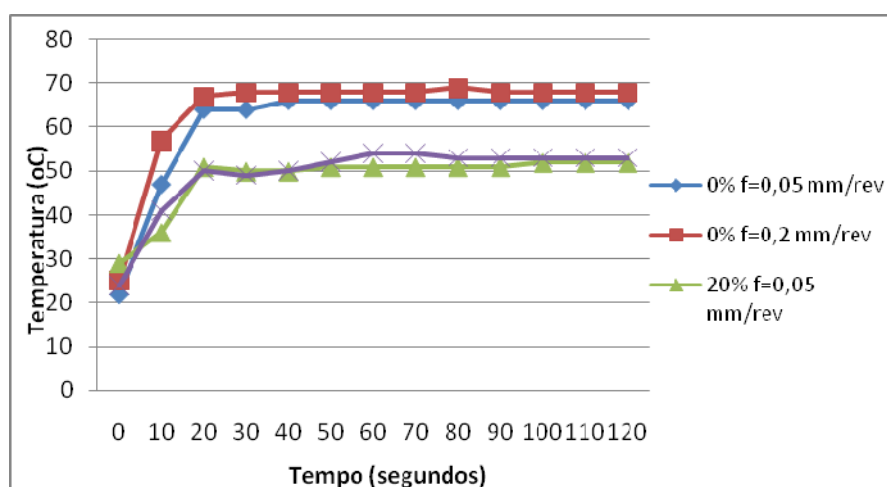


Figura 52 – Temperatura do material na usinagem com passar do tempo

Como já era previsto, a presença do ferro diminui a temperatura do material quando usinado. Isto decorre da melhora da condutividade térmica com a inclusão do ferro, ou seja, quanto mais quantidade de ferro no material mais facilmente o calor é dissipado.

Observa-se também que o incremento de ferro no material tem influência mais significativa na temperatura do material durante a usinagem do que a diminuição do avanço. Como visto na figura 57, o aumento do avanço influencia muito pouco na temperatura do material.

#### 4.5 Desgaste da Ferramenta de Corte

Não foi encontrado nenhum vestígio de desgaste nas ferramentas durante todos os ensaios de usinagem, tanto na primeira quanto na segunda fase de experimento. Mesmo para as condições de usinagem mais severas, não detectou-se nenhuma marca de desgaste nas ferramentas.

Cada ferramenta foi utilizada por cerca de 2 horas e o não surgimento de marcas de desgaste deve-se a qualidade da ferramenta selecionada (metal-duro) e a baixa dureza do compósito estudado. Devido ao não aparecimento de marcas de desgaste, que de fato já era esperado, e juntamente pelo material não atingir a sua temperatura de  $T_g$ , constata-se que este compósito é perfeitamente usinável.



## CAPÍTULO 5

### 5 CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

#### 5.1 Conclusões

O comportamento dos materiais estudados, considerando-se o processo de torneamento, se assemelha ao comportamento de diversos materiais metálicos, como por exemplo: ferro, aço e cobre, principalmente quando o material compósito é constituído por uma maior quantidade de ferro. Este fato ajudou na análise dos resultados obtidos neste trabalho, pois pôde-se prever os comportamentos destes materiais compósitos alterando-se algum parâmetro de usinagem. Porém, para uma quantidade reduzida de ferro no material compósito, como não há uma quantidade significativa de publicações apresentando o comportamento deste material ao ser usinado, os resultados obtidos podem ser considerados como dados importantes deste trabalho.

O aumento da temperatura não foi problema para os ensaios, pois a mesma não ultrapassou os 70 °C no material quando a resina epóxi sem adição de carga de ferro foi usinada, e não chegou a 60 °C para o compósito com 20% de carga metálica. Portanto, a temperatura na usinagem não superou a metade da Tg da resina epóxi com 45% de agente de cura (que é igual a 127 °C).

Os cavacos mais desfavoráveis encontrados neste estudo foram aqueles com valores reduzidos de avanço. Por outro lado, mudanças na velocidade de corte não influenciaram significativamente nas formas do cavaco, mas quanto menor a velocidade de corte mais desfavoráveis são os cavacos. Quando se compara os cavacos de mesma velocidade de corte e avanço para os compósitos de 5% e 20% de ferro percebe-se que os cavacos do material com 5% de ferro são ligeiramente mais contínuos, ou seja, um pouco mais desfavoráveis.

Para avanços de 0,05 mm/rev. foram encontrados problemas na qualidade da superfície do material, e acredita-se que isto ocorreu porque foi empregado nos ensaios um elevado valor do raio de quina da ferramenta (0,8mm) em conjunto com a pequena profundidade de corte (0,5 mm). Esta combinação fez com que as partículas de ferro cortadas ou arrancadas pela ferramenta

riscassem a peça, e com isso piorando consideravelmente a qualidade da superfície de todos os compósitos considerados, fato agravado com o aumento da quantidade de ferro no material.

Nos compósitos, quando utilizou-se valores de avanço mais elevadas (por exemplo, 0,1, 0,15 e 0,2 mm/rev.), a alta rugosidade observada foi decorrência do arrancamento de partículas de ferro com tamanho de grão elevado, visto que cerca de 50% dos grãos possuem mais de 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro, o que gerou diversas crateras. Esse problema poderia ser evitado com a diminuição do tamanho do grão.

A rugosidade da superfície dos materiais estudados de modo geral é maior se comparada com os requisitos de alguns moldes de injeção, principalmente quando se trata de injeção produtos com excelente qualidade de superfície, com Ra menor que 3  $\mu\text{m}$ . No entanto, quando o projeto de um produto injetado não exigir uma alta qualidade da superfície, ou seja, que o produto possua uma superfície mais áspera, estes materiais podem ser indicados para fabricação de moldes de injeção, como por exemplo monitores de computador, pára-choques de carro e carcaças de cortadores de grama.

Como o compósito com 20% de carga de ferro possui as melhores propriedades mecânicas e térmicas em relação aos outros materiais estudados neste trabalho, poderia haver uma tendência inicial para que esse material fosse selecionado para ser utilizado como molde de injeção. Se comparado com os outros materiais estudados, a rugosidade da superfície deste compósito, após a usinagem, apresenta uma piora significativa apenas para o avanço de 0,05 mm/rev., justificado pelo aparecimento de mais riscos no material, uma vez que ele possui mais partículas de ferro. Já para os avanços maiores, observa-se o aparecimento de algumas falhas macroscópicas no material decorridas do arrancamento de partículas de ferro durante a usinagem. No entanto, o aparecimento destas crateras não impossibilita a utilização deste material, visto que existe a possibilidade de aumentar a interação das partículas com a matriz pela adição de agentes compatibilizantes.

Uma das principais motivações deste trabalho é a possibilidade de reduzir o custo resultante da troca de um molde de injeção fabricado de metal por outro de material compósito, além da possibilidade de reduzir o tempo na fabricação deste último tipo de molde, através da utilização

de maiores avanços e velocidades de corte. Para o material com 20% de carga de ferro, verificou-se que as maiores velocidades resultaram nas melhores rugosidades de superfície, já os avanços intermediários é que apresentaram menores rugosidades da superfície, mas não muito menores do que o maior avanço (de 0,2 mm/rev.).

Por tudo o que foi exposto anteriormente, conclui-se que os melhores resultados obtidos no presente trabalho foram os seguintes: o compósito com 20% de carga de ferro usinado com os seguintes parâmetros de corte: velocidade de corte de 400 m/min. e avanço de 0,2 mm/rev. Tal material pode ser utilizado como molde de injeção de plástico, desde que as especificações do produto final estabeleçam valores de rugosidade da superfície acima de 3  $\mu\text{m}$ .

Não foram utilizados neste trabalho compósitos com 30% e 40% de carga de ferro, pois a melhora da condutividade térmica e das propriedades mecânicas não é tão acentuada comparado com os compósitos de 5%, 10% e 20%. Ou seja, ocorre uma pequena melhora nas propriedades do material compósito, mas tal melhora não compensaria a sua utilização, pois quanto maior a quantidade de ferro, maior a probabilidade de aparecerem crateras no material após a usinagem, e com isso diminuir a qualidade da superfície.

## **5.2 Recomendações para trabalhos futuros**

Tendo em vista o contexto das atividades desenvolvidas neste trabalho, bem como os resultados obtidos, são propostos os seguintes trabalhos futuros:

- Realizar um estudo sobre o comportamento do compósito com partículas de ferro de diâmetros pequenos, menores do que 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro, quanto ao acabamento da superfície usinada (por exemplo, o aparecimento de crateras e riscos na superfície), bem como a influência desta alteração nas propriedades térmicas e mecânicas.
- Investigar a possibilidade de incremento de agentes compatibilizantes no compósito, para aumentar as interações entre a matriz de resina epóxi e as partículas de pó de ferro. Este

fato poderia melhorar a qualidade da superfície, pois reduziria a quantidade de partículas arrancadas durante a usinagem.

- Pesquisar outras formas de partículas de ferro, ou outro metal, que possam vir a fim de proporcionar boas propriedades térmicas aliadas a uma qualidade apropriada da superfície apropriada. Ou seja, recomenda-se pesquisar formas diferentes de partículas que transmitam tão bem o calor como partículas de diâmetro grande, mas que não comprometam a qualidade da superfície.
- Realizar experimentos de fresamento e furação nestes mesmos materiais, pois estes processos de usinagem também poderão ser utilizados para confeccionar os moldes de injeção.
- Estudar as forças de corte durante a usinagem.

## REFERÊNCIAS

- APPLE, C.A. **Relationship between Inclusions and the Machinability of Steel, Mechanical Working and Steel Processing Proceedings**, 1989 pp. 415-426.
- ALCANTARA, R. M. **Estudo das Propriedades Micro e Macroscópicas de pseudo Redes Poliméricas Interpenetrantes (pseudo-RPIs) à Base de Resina Epóxi para Aplicações na Área Odontológica**. 2004. Tese de Doutorado em Química – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis.
- BADOTTI, A. V. B. **Avaliação do processo de metalização superficial aplicado à peças obtidas por estereolitografia**. 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis.
- BASAVARAJAPPA, S., CHANDRAMOHAN, G. and DAVIM, J. P. **Some studies on drilling of hybrid metal matrix composites based on Taguchi techniques**. Journal of Materials Processing Technology, 2007. 6 p.
- BET, L. **Estudo da Medição da Textura de Superfícies com Sondas Mecânicas e com Sondas ópticas tipo seguidor**. 1999. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis.
- BLASS, A. **Processamento de Polímeros**. 1985. 2 ed., Editora da UFSC, Florianópolis.
- BORILLE, A. V. **Análise do Alargamento de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Ferramenta de Metal Duro**. 2005. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis.
- BORK, C. A. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**. 1995. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis.

- CABRERA, F. M. **Aportación al maquinado de los plásticos reforzados**. presentado en el XVI Congreso Nacional de Ingeniería Mecânica, V.4, León, 2004.
- CALLISTER, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª ed., Editora LCT – 2000.
- CIMM – Centro de Informação Metal Mecânica, <<http://www.cimm.com.br>> Acesso em: Julho de 2005.
- DHAR, N. R., Kamruzzaman, M., **Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition**. International Journal of Machine Tools & Manufacture V. 47, 2006. pp. 754-759.
- DAVIM, J. P., Reis, P. and CONCEIÇÃO, A. C. **A study on milling of glass fiber reinforced plastics manufactured by hand-lay up using statistical analysis (ANOVA)**. Composite Structures V.64, 2004. pp. 493-500.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Metais**. São Paulo: MM Editora, 1999.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 9ª edição, São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1995.
- Goyanes, S., Marzocca, A.G.R., Salgueiro, W., Somoza, A., Consolati, G., Mondragon, I. **Yield and internal stresses in aluminium filled epoxy resin. A compression test and positron annihilation analysis**. Polymer, 44, 2003. pp. 3193-3199.
- GRANADO, R.M. **Avaliação da Integridade Superficial do Polimetilmetacrilato (PMMA) no Torneamento com Ferramenta de Diamante**. 2006. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade de São Paulo – USP, São Carlos.

- JESUS, M. S. **Desenvolvimento de um Compósito Polímero-Metal à Base de Resina Epóxi para Aplicações em Moldes Rápidos**. 2005. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis.
- JUNG, C. F. **Metodologia para Pesquisa & Desenvolvimento: Aplicada a Novas Tecnologias**. Produtos e Processos. 1. ed. Rio de Janeiro: Axcel Books do Brasil Ltda, 2004. v. 1. 328 p.
- KOBAYASHI, A., HIRAKAWA, K. **Ultraprecision Machining of Plastics, part 1, polymethyl methacrylate**. Polymer- Plastic. Technology. Engineering V. 1, 1984. p. 15-25.
- KOBAYASHI, A. **Ultraprecision Machining of Plastics**. New York: McGraw-Hill, 1967.
- KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren** 5. Auflage. Aachen, 1997.
- KÖNIG, W. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida – Parte I**. Traduzido por Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner e Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter do livro “Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen”. Florianópolis: UFSC, 2002. 352p.
- KRATOCHVIL, R. **Fresamento de Acabamento em Altas Velocidades de Corte para Eletrodos de Grafita Industrial**. 2004. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis.
- LAKATOS, E.; MARCONI, M. **Fundamentos em metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2001
- LIMA, C.B., Engenharia **Reversa e Prototipagem Rápida – Estudo de Casos**. 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas.

- LEE, D. G., KIM, P. J., CHOI, J. K. **Temperature Rise and Surface Roughness of Carbon Fiber Epoxy Composites During Cut-Off Grinding**. Journal of Composite Materials V. 34, 2000. pp. 2061-2080.
- LONGBOTTOM, J.M. and LANHAM J.D. **Cutting temperature measurement while machining – a review**. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, V. 77, 2005. pp. 122-130.
- LONGHI, J. **Desenvolvimento de moldes em plástico reforçado com fibra de vidro utilizando a tecnologia de ferramental rápido por estereolitografia**. 2002. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis.
- MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. Editora Edgard Blucher, São Paulo. 1991.
- MARKUS, W. **Aspectos Tecnológicos da Minimização e Eliminação de Fluido de Corte no Processo de Torneamento com Insetos de Metal-duro Revestido com TiN**. 2001, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis.
- MOHAN, N. S., RAMACHANDRA, A. and KULKARNI, S. M. **Machining of Fiber-reinforced Thermoplastics: Influence of Feed and Drill Size on Thrust Force and Torque during Drilling**. Journal of Reinforced Plastics and Composites, V.24, 2005. pp. 1247-1257.
- MAMUNYA, Y. P., PISSIS V.V.D., P., LEBEDEV E. V. **Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders**. European polymer journal, 38, 2002. pp. 1887-1897.
- NAKAMURA, Y. M.Y., OKUBO, M., MATSUMOTO, T. **Effect of particle size on the fracture toughness of epoxy resin filled with spherical silica**. Polymer, 33, 1991. pp. 3415-3426.
- OLIVEIRA NETTO, A.A.. **Metodologia da Pesquisa Científica: Guia Prático para Apresentação de Trabalhos Acadêmicos**. Florianópolis: VisualBooks, 2005.



- OTTEMER, X. and COLTON, J. S. **Effects of aging on epoxy-based rapid tooling materials.** Rapid Prototyping V. 8, 2002. pp. 215-223.
- PALANIKUMAR, K., KARUNAMOORTHY L. and MANOHARAN N. **Mathematical Model to Predict the Surface Roughness on the Machining of Glass Fiber Reinforced Polymer Composites.** Journal of Reinforced Plastics and COMPOSITES, V. 25, 2006. pp. 407-419.
- PEREIRA, L. E. C. **Análises por sistemas CAE de pontos de injeção de seção retangular para moldes fabricados em resina termofixa.** 2007, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis.
- SALLES, J.L.C, GONÇALVES, M.T.T. **Effects of Machining Parameters on Surface Quality of the Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE).** Revista Matéria V.8, 2003. pp. 1-10.
- SANDVIK-COROMANT. **Tools for Die and Mold Makers.** Estocolmo, 2000. 258 p.
- SHENGZU, W.S.A., JANG, B.Z. **Mechanical and thermo-mechanical failure mechanism analysis of fiber/filler reinforced phenolic matrix composites.** Composites part B, 28, 1997. pp. 215-231.
- SILVA, E., MENEZES, E. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação.** 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. 139 p.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I.** 4º Edição. Editora da UFSC. 1995.
- STEVENS, M. P. **Polymer Chemistry - An Introduction.** Third edition. Oxford University Press, Inc. 1999.
- THOMAS, M., BEAUCHAMP, Y., YOUSSEF, A. and MASOUNAVE, J. **An experimental design for surface roughness and built-up edge formation in lathe dry turning.** International Journal of Quality Science V. 2, 1997. pp. 167-180.

- VANDRESEN, M. **Aplicação da técnica de núcleo perdido na injeção de peças complexas, em moldes de ferramental rápido, a partir da estereolitografia.** 2003, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis.
- VOLPATO, N. and CHILDS, T. H.C. **Shelling strategies to save time in a rapid tooling process.** Rapid Prototyping Journal V. 9, 2003, pp. 79-87.
- VOLPATO, N., et al. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e aplicações,** Editora Edgard Blucher, 1 edição. 2007.
- WANG, Y., HOA, S. V. and OSMAN, M.O.M. **Cutting Behavior of Composites Prepregs.** Journal of Reinforced Plastics and Composites V. 17, 1998. pp. 1119-1134.
- WEIDENFELLER, B. M.H., SCHILLING, F. R. **Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat capacity of particle filled polypropylene.** Composites Part A: applied science and manufacturing, 35, 2004. pp. 423 – 429.
- WYPYCH, G. **Handbook of fillers.** ChemTec Publishing, Second edition ed. 2000.
- XAVIER, F. A. **Aspectos Tecnológicos do Torneamento de Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal Duro, Cerâmica e CBN.** 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis.

## APÊNDICES

### Apêndice A – Processo de Confeção dos Corpos de Prova

Os corpos de prova são confeccionados por vazamento em um molde de plástico, após a retirada do molde são torneados para adquirir a forma e dimensões necessárias para ser utilizado como corpo de prova nos ensaios de torneamento.

#### **1. Vazamento**

Neste trabalho utiliza-se uma mistura de resina epóxi (TCR 550) e pó de ferro (HD 177), com agente de cura XR – 435. A proporção de agente de cura é de 40% do volume da resina. Como já se sabia de antemão as densidades da resina, do agente de cura e do ferro, as quantidades a serem utilizadas foram medidas em uma balança.

Após a pesagem, os materiais são colocados em um recipiente para mistura dos mesmos, para isto utiliza-se um misturador a vácuo, para minimizar o aparecimento de bolhas nos corpos de prova. Inicialmente é realizado um vácuo de aproximadamente -700 mmHg, bomba de vácuo J/B Industries - modelo DV- 200N-250, após dois minutos de vácuo começa-se a misturar com o um agitador mecânico, Fisatom - Modelo 713A. Utiliza-se uma baixa rotação do misturador para evitar o surgimento de bolhas e dura 5 minutos.

Após a mistura o material é vazado nos moldes, para adquirir a forma desejada, com muito cuidado, a fim de minimizar a presença de bolhas. Antes de vaziar o material foi pincelado no molde para evitar que bolhas ficassem ancoradas na superfície do molde.

Após o vazamento os moldes são colocados em uma bacia de água, para manter a temperatura baixa, pois a reação de polimerização é exotérmica, sendo que o calor gerado pode comprometer

as dimensões dos corpos de prova, gerar bolhas e até pode causar pequenas explosões. Eles ficam 48 horas no molde e depois são desmoldados e assumem a forma da figura 53.



Figura 53 – Corpo de prova após o vazamento

## 2. Torneamento

Para os corpos de prova adquirir suas dimensões finais é realizado o torneamento destas, com auxílio de um torno convencional. Após o torneamento os corpos de prova assumem a forma igual à figura 54, na qual a área que irá ser usinada é um cilindro de 60 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, além de um cilindro na parte superior deste corpo de prova com 50 mm de diâmetro e 40 mm de comprimento, que servirá para fixar a peça na máquina-ferramenta.



Figura 54 – Corpo de prova final

## Apêndice B – Especificações Técnicas do Torno CNC

### **Máquina: Romi – Cosmos 10U**

- Diâmetro máximo admissível: 300 mm
- Diâmetro recomendável: 80mm
- Comprimento máximo: 250mm
- Faixa de velocidade: 45 – 4500 rpm
- Tipo de Torre: Rotativa
- Motor principal: 10cv
- Potência instalada: 26 KVA
- Peso: 2800 kg
- Interpolações: Lineares e Circulares
- Incremento mínimo: Eixos X, Z 0,0001 mm
- Capacidade de memória: 64 Kbytes (para programas)
- Vídeo: 12”

## Apêndice C – Especificações Técnicas do Rugosímetro e da Sonda Mecânica

### **Rugosímetro – Perthometer S8P da Mohr-Perthen GmbH**

- Tipo de bancada.
- Campo de medição vertical (VB,  $\mu\text{m}$ ):  $\pm 12,5$ ;  $\pm 62,5$ ;  $\pm 125$ ;  $\pm 250$ ;  $\pm 625$ ;  $\pm 2500$ .
- Percursos de medição padrão (lm, mm): 0,4 – 1,25 – 4,0 – 12,5 – 40.
- Cut-off ( $\lambda_c$ , mm): 0,025 – 0,08 – 0,25 – 0,8 – 2,5 – 8,0.
- Parâmetros:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{\text{max}}$ ,  $R_q$ ,  $R_{\text{pm}}$ ,  $R_p$ ,  $R_t$ ,  $P_t$ ,  $W_t$ ,  $T_p$ ,  $S_m$ .

- Campo de medição / Resolução:  $\pm 25 \mu\text{m} / 0,8 \text{ nm}$   
 $\pm 250 \mu\text{m} / 8 \text{ nm}$   
 $\pm 2500 \mu\text{m} / 80 \text{ nm}$

### **Sonda mecânica PERTHEN**

- Modelo: RHT 6-50
- Patins de apoio com raio de 25 mm na direção de medição.
- Campo vertical de  $\pm 50 \mu\text{m}$ .
- Ponta do estilete com raio de  $5 \mu\text{m}$  e ângulo de  $90^\circ$ .
- Forças de medição 0,8 a 1,2 mN.