

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS JARAGUA DO SUL - RAU

GUILHERME SOUZA EING

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA E DOS
PARÂMETROS DE CORTE NO ACABAMENTO SUPERFICIAL DA RESINA
POLIMÉRICA NECURON 620

Jaraguá do Sul
Junho de 2018

GUILHERME SOUZA EING

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA E DOS
PARÂMETROS DE CORTE NO ACABAMENTO SUPERFICIAL DA RESINA
POLIMÉRICA NECURON 620

Monografia apresentada ao
Curso de Tecnologia em
Fabricação Mecânica, do
Câmpus Jaraguá do Sul – Rau,
do Instituto Federal de Santa
Catarina para a obtenção do
diploma de Tecnólogo em
Fabricação Mecânica.
Orientador: Vanderlei Junkes
Prof. Me.

Jaraguá do Sul
Junho de 2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Eing, Guilherme

Análise da influência da geometria da ferramenta e dos parâmetros de corte no acabamento superficial da resina polimérica NECURON 620 / Guilherme Eing ; orientação de Vanderlei Junkes. Jaraguá do Sul, SC, 2018.

38 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul - Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. . Inclui Referências.

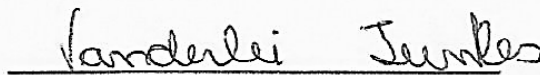
1. Fresamento. 2. Resina. 3. Rugosidade. 4. Lascamento. 5. Poliuretano. I. Junkes, Vanderlei. II. Instituto Federal de Santa Catarina. . III. Título.

GUILHERME SOUZA EING

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA E DOS
PARÂMETROS DE CORTE NO ACABAMENTO SUPERFICIAL DA RESINA
POLIMÉRICA NECURON 620

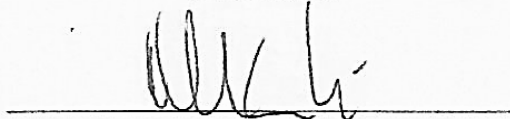
Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora
abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 20 de Junho de 2018.



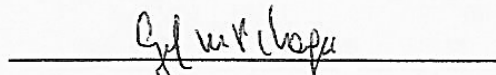
Prof. Vanderlei Junkes, Me.

Orientador



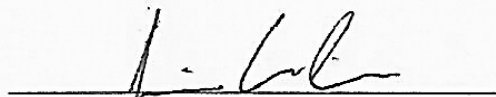
Prof. Delcio Luis Demarchi, Me.

Avaliador



Prof. Gil Magno Portal Chagas, Dr

Avaliador



Prof. Esp. Giovani Conrado Carlini,

Avaliador

RESUMO

Os materiais compósitos poliméricos estão se tornando cada dia mais presentes na indústria, sendo utilizados principalmente nas áreas de prototipagem rápida e modelos de fundição. Para essa aplicação um dos materiais utilizados com sucesso é a resina a base de poliuretano, que possui fácil usinabilidade, boa resistência mecânica e estabilidade dimensional. São escassos os estudos voltados a usinabilidade e a correta geometria de ferramenta a serem utilizados nesse tipo de material. Este estudo comparou através da usinagem por fresamento o comportamento de quatro perfis distintos de ferramentas. Também foram variadas a velocidade de corte e o avanço por dente. O material do corpo de prova utilizado é uma resina polimérica com o nome comercial "NECURON 620". As ferramentas utilizadas são fabricadas em metal duro, possuem canais polidos e são utilizadas normalmente na usinagem de ligas de alumínio. As avaliações realizadas compreenderam a análise da rugosidade e lascamento superficial da peça. Os resultados demonstraram que a velocidade de corte não influenciou de maneira significativa o acabamento superficial. Por outro lado, o perfil da ferramenta e o avanço por dente foram fatores determinantes na redução da rugosidade. Em relação ao lascamento a única ferramenta a não apresentar problema foi a fresa esférica.

Palavras-chave: Fresamento, Resina, Rugosidade, Lascamento, Poliuretano.

ABSTRACT

Polymer composite materials are becoming more and more present in the industry, mainly used in the areas of rapid prototyping and casting models. For this application one of the materials used successfully is the polyurethane-based resin, which has easy machinability, good mechanical resistance and dimensional stability. There are scarce studies geared to machinability and the correct tool geometry to be used in this type of material. This study compared through milling machining the behavior of four different profiles of tools. The cutting speed and the advance by tooth were also varied. The test body material used was a polymer resin with the trade name "NECURON 620". The tools used are manufactured in hard metal, have polished channels and are used normally in the machining of aluminium alloys. The evaluations carried out comprised the analysis of roughness and superficial chipping. The results showed that the cutting speed did not significantly influence the surface finishing. Elseway, the tool profile and the advance by tooth were determining factors in reducing roughness. With regard to chipping the only tool not present was the spherical milling cutter.

Key words: milling, resin, roughness, chipping, polyurethane.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparação entre usinagem de fresas de topo reto e esféricas	15
Figura 2 - Comparativo do sobremetal em superfícies complexas ao utilizar fresas diferentes.....	16
Figura 3 - Parâmetro de rugosidade Ra	23
Figura 4 - Fresas utilizadas nos corpos de prova	26
Figura 5 - Máquina utilizada na usinagem dos corpos	26
Figura 6 - Estereoscópio utilizado na análise de defeitos de usinagem	27
Figura 7 – Usinagem dos corpos de prova.....	28
Figura 8 – Medições realizadas.....	29
Figura 9 – Rugosímetro utilizado nas medições.....	29
Figura 10 - Gráfico da influência do avanço por dente na rugosidade	31
Figura 11 - Gráfico da influência da ferramenta na rugosidade	32
Figura 12 – Comportamento das ferramentas durante os ensaios.....	33
Figura 13 - Área onde ocorreram as análises dos lascamentos.....	34
Figura 14 - Lascamentos nos corpos de prova.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vida útil dos modelos de fundição de acordo com o material com que foi confeccionado	20
Tabela 2 – Comparativo de características entre resinas	25
Tabela 3 –Velocidade de corte e avanços por dente utilizados	28
Tabela 4 – Dados de entrada fornecidos ao Minitab	30
Tabela 5 – Resultado da análise de variância fornecidos pelo Minitab	30
Tabela 6 – Ferramentas com a ocorrência de defeitos.....	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	11
1.1.1 Objetivo geral	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 Fresamento	12
2.1.1 Fresamento de modelos de resina	12
2.2 Usinagem HSM (<i>High Speed Machining</i>).....	13
2.3 Metal Duro.....	14
2.4 Geometrias de corte das ferramentas	15
2.5 Seleção de ferramentas para usinagem de resinas	17
2.6 Ferramental rápido obtido por usinagem.....	17
2.7 Modelagem de fundição	18
2.8 Materiais para confecção de modelos de fundição	19
2.8.1 Poliuretano	21
2.9 Rugosidade	22
2.9.1 Parâmetro de Rugosidade.....	22
2.9.2 Cálculo teórico para rugosidade no fresamento	23
2.9.3 Efeitos dos parâmetros de usinagem na rugosidade	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Materiais.....	25
3.2 Ferramentas de corte	25
3.3 Equipamento utilizado no ensaio de usinagem	26
3.4 Equipamentos para análise	27
3.5 Métodos.....	27
4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	30
4.1 Análise das rugosidades.....	30
4.2 Análise das ferramentas	32
4.3 Análise dos lascamentos.....	33
5 CONCLUSÃO.....	36
REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

Com o advento da revolução tecnológica, as indústrias, de modo geral, se modernizaram, redefiniram suas estruturas, tanto de gestão como de processos, e passaram a investir na aquisição de máquinas e equipamentos, com o intuito de absorver e acompanhar as mudanças geradas pela globalização e pelas exigências do mercado consumidor, que busca constantemente produtos inovadores, com qualidade, preços baixos e em tempo hábil (SOUZA, 2005).

A criação de novos produtos e de novas técnicas de manipulação dos materiais é um dos caminhos que as empresas estão seguindo a fim de encontrar um equilíbrio competitivo. Essa questão repercute diretamente na fabricação dos modelos utilizados na geração de peças fundidas, cujas geometrias apresentam formas complexas, comprometendo a eficiência e eficácia dos processos, porém, na maioria das vezes, estes são frutos das necessidades dos clientes.

Em todos os processos produtivos busca-se produzir peças com qualidade e da forma correta. Para tanto deve-se encontrar a melhor ferramenta a ser utilizada nessa operação, buscando garantir uma boa produtividade no processo (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006).

Normalmente a usinagem de modelos de fundição não metálicos, como os materiais compósitos, é realizada utilizando-se ferramentas de metal duro, porém não se tem um amplo conhecimento sobre a influência dos variados perfis de ferramenta disponíveis no acabamento superficial da peça.

Na área de modelos para fundição, após a usinagem os modelos passam por processos manuais de acabamento, onde é imprescindível que a qualidade da peça usinada seja a melhor possível. Fatores como uma baixa rugosidade e a ausência de defeitos superficiais são importantes para que a quantidade de trabalho posterior seja reduzida.

Um dos materiais mais utilizados na confecção de modelos de fundição é a resina poliuretânica (SOUZA, 2005). Portanto para o presente estudo foi selecionada uma resina com essa formulação, de nome comercial NECURON 620.

A falta de estudos relacionados a usinagem de materiais compósitos principalmente as resinas, torna importante a realização de ensaios específicos como os realizados neste trabalho afim de identificar os melhores parâmetros de corte bem como as ferramentas que trazem maior qualidade no acabamento superficial e consequentemente um maior rendimento ao processo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a influência do perfil da ferramenta e dos parâmetros de corte na qualidade superficial da peça durante o fresamento de resinas a base de poliuretano.

1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar quatro perfis distintos de ferramenta, identificando qual melhor atende a qualidade superficial da peça;
- Analisar a rugosidade superficial obtida com diferentes parâmetros de usinagem utilizados;
- Avaliar a existência de lascamentos ao material ocasionados pela usinagem com os parâmetros testados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Fresamento

O fresamento, ainda que complexo, é um dos processos de usinagem com maior emprego na indústria atual, devido a aspectos como alta taxa de remoção de material e produção de formas com boa precisão dimensional e geométrica. Este processo possui elevada flexibilidade, sendo utilizado na fabricação de superfícies planas, contornos, ranhuras e cavidades, entre outras (MARCELINO et al., 2004).

Ferraresi (1970) lembra que o fresamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Neste processo a ferramenta gira e a peça e ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer. Para Diniz, Marcondes e Coppini (2006), boa parte das superfícies não planas de peças somente pode ser gerada por fresamento.

Dentre as operações de usinagem existentes, o fresamento é a mais versátil na geração de superfícies planas. Sua versatilidade é possível devido principalmente à grande variedade de geometrias que suas ferramentas podem apresentar, tornando possível, por consequência, a geração de um número igualmente vasto de superfícies (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006). Para Costa (2003) outra vantagem do fresamento em relação aos demais processos de usinagem, é o fato de se utilizar ferramentas que podem apresentar um número elevado de arestas de corte. Isto permite aliar a alta produtividade à capacidade de gerar superfícies com um ótimo acabamento superficial.

2.1.1 Fresamento de modelos de resina

Derenievicki (2007) realizou um trabalho voltado a usinagem de insertos confeccionados em resina para montagem de modelos de injeção, e demonstrou que esta apresenta algumas limitações em função das geometrias a serem usinadas. Estas limitações podem ocorrer devido à restrição de acesso da ferramenta em determinadas regiões do inserto. Geralmente, a usinagem exige o desenvolvimento de dispositivos de fixação para peças geometricamente complexas, ferramentas especiais, definições de processos de fabricação e de ferramentas de corte, geração do programa CNC (Comando Numérico Computadorizado) e o *set-up* da máquina.

Esse fato pode ser contornado em alguns casos, ao se utilizar ferramentas longas e de pequeno diâmetro. Em contraposição a isso Derenievicki (2007) lembra que a relação entre o comprimento da ferramenta e o seu diâmetro também pode influenciar decisivamente quanto à realização da usinagem. Ferramentas de pequeno diâmetro não suportam grandes balanços, isto é, grandes comprimentos. Ferramentas muito longas podem romper-se ao menor esforço.

Visando minimizar estas limitações, alguns estudos foram realizados. Podemos destacar uma análise desenvolvida por AMORIM (2006), onde se estudou as principais dificuldades do processo de fresamento e propôs alternativas para se obter os insertos para moldes-protótipo somente pelo processo de fresamento, oferecendo opções para o contorno destas limitações.

2.2 Usinagem HSM (*High Speed Machining*)

Também são encontrados atualmente no mercado equipamentos CNC, denominados de *High Speed Machining* (HSM), uma tecnologia emergente aplicada para usinagens em altas velocidades. Trata-se de uma tecnologia não convencional utilizada para a usinagem aplicando CNC, na qual alguns fatores, tais como: máquina, ferramenta de corte, material da peça e a forma da usinagem, são estudados para se realizar usinagens de uma maneira muito mais rápida. Ainda não foram claramente definidos os conceitos e limites a ser aplicados nesta tecnologia, que vem sendo aplicada em fresamento, torneamento, furação e em retificação (MARCONDES et al., 2003).

Segundo MARCONDES et al. (2003), HSM é reconhecida como a mais importante tecnologia de usinagem em desenvolvimento e implantação. Conforme os mesmos autores, esta tecnologia trata de usinagens com velocidades de corte de cinco a dez vezes maiores do que as velocidades de corte normalmente utilizadas. Adicionalmente, trata das variações dos parâmetros de corte aplicados, com atenção especial à redução de profundidade de corte e avanço por face. HSM pode ser aplicada para trabalhos de desbaste, porém sua principal aplicação está focada em semi-acabamento e acabamento.

A HSM é uma tecnologia emergente tanto para a fabricação de ferramentas de produção quanto para a confecção de moldes-protótipo usinados, pois permite a aplicação da usinagem de ferramentas e moldes com tempos significativamente

reduzidos, concorrendo com as outras tecnologias de prototipagem (MARCONDES et al., 2003).

2.3 Metal Duro

De acordo com Marcondes (1990), o desenvolvimento do metal duro teve início no ano de 1913. Segundo os historiadores, por acaso, introduziu-se um pouco de ferro no forno de sinterização. Observou-se que o ferro havia atuado como ligante para os carbonetos de Tungstênio, criando assim um material duro, resistente ao desgaste e com certa tenacidade.

O desenvolvimento decisivo aconteceu no início da década de 1920 quando Karl Schroeter uniu carboneto de Tungstênio (WC) com 6% de Cobalto (Co) como metal auxiliar. Essa liga tornou-se a composição básica, utilizada até os dias de hoje. A partir de 1930/31 a empresa Krupp deu início a comercialização da "Widia", contração das palavras alemãs Wie Diamant (como o diamante). Desde então uma grande quantidade de metais e carbonetos foram adicionados a liga padrão WC/Co, cada qual buscando otimizar alguma característica específica. Diante à infinidade de misturas diferentes, é válido lembrar as combinações mais relevantes, Carboneto de Titânio (TiC), Níquel (Ni), Molibidênio (Mo), Carboneto de Tântalo (TaC), Carboneto de Nióbio (NbC), Cromo (Cr). MARCONDES (1990).

De acordo com Machado et al (2009) a Norma ISO padronizou a classificação dos metais duros em classe: K, P, M.

- Classe K – são os que contêm somente WC + Co. Essa classe também é conhecida como "classe dos ferros fundidos" ou "classe aplicada a materiais que produzem cavacos curtos".
- Classe P - quando se adiciona ao WC TiC, TaO e/ou NbC. Essa classe também ficou conhecida como. "classe dos aços ou dos materiais que produzem cavacos longos".
- Classe M - é uma classe intermediária quando o WC possui adições de TiC, TaC e/ou NbC, mas em menores quantidades que as apresentadas pela classe P. A classe M também é conhecida como a "classe dos aços inoxidáveis", tendo em vista a sua maior aplicação na usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos.

A classe K também ficou conhecida como a "classe dos metais não ferrosos", devido ao fato de os carbonetos adicionados às classes P e M terem maiores

afinidades químicas com os metais não ferrosos que os carbonetos de tungstênio da classe K.

Machado et al (2009) ressalta, porém, que mais recentemente, a Norma ISO 513 (2004) apresenta uma nova classificação do grupo de ferramentas que não e exclusividade dos metais duros, ela abrange também, as cerâmicas e os materiais ultraduros:

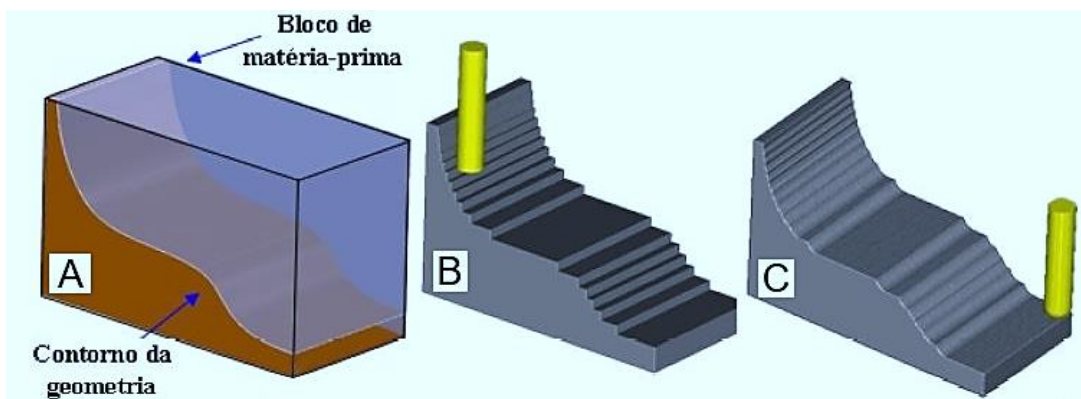
- Classe N, para os metais e ligas não ferrosos (principalmente cobre e alumínio).
- Classe S, para as superligas ou ligas resistentes ao calor (como ferro, titânio, níquel e cobalto).
- Classe H, para os aços endurecidos (aços fundidos e ferros fundidos temperados), que tem o cinza como coloração padrão.

Sendo assim, essa nova classificação retirou da classe K o antigo rótulo de classe dos materiais não ferrosos.

2.4 Geometrias de corte das ferramentas

Na Figura 1 é possível entender como a escolha do perfil da ferramenta impacta sobre o perfil usinado. Na imagem (A) está representado o perfil final esperado da peça, bem como a superfície de usinagem e o bloco do material bruto. A imagem (B) mostra a superfície desbastada utilizando uma fresa de topo reto e o efeito “escada” deixada por ela, representando a quantidade de sobremetal. Já a imagem (C) mostra a mesma superfície, porém agora usinada com uma fresa de ponta esférica. Nota-se que o acabamento é melhor, e o efeito “escada” foi atenuado devido à quantidade de material retirado ser bem superior comparado ao procedimento anterior.

Figura 1 – Comparação entre usinagem de fresas de topo reto e esféricas

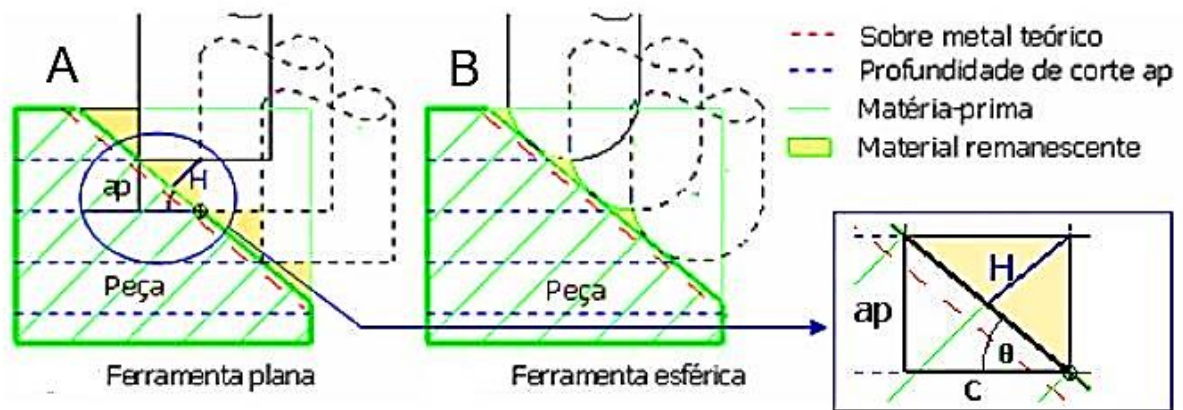


Fonte: SOUZA (2004).

Com base em seus estudos Souza (2004) afirmou que as fresas de ponta esférica permitem que se aproxime mais do perfil acabado da peça ao realizar o desbaste, a quantidade de material deixada para o acabamento é cerca de 80% menor que ao utilizar fresas de topo reto. Porém, lembra que o tempo de usinagem aumenta, pois, a velocidade de avanço deve ser reduzida em função do aumento da área de contato entre ferramenta/peça.

A Figura 2 torna bem evidente a diferença existente na usinagem de desbaste, ao comparar os tipos de ferramenta utilizada. Na figura 2 (A) é mostrado o desbaste de um perfil realizado utilizando uma fresa de topo reto. Já na figura 2 (B) tem-se o mesmo perfil, porém agora usinado utilizando uma fresa de ponta esférica.

Figura 2 - Comparativo do sobremetal em superfícies complexas ao utilizar fresas diferentes



Fonte: SOUZA (2004).

Para Fitzpatrick (2013) inserir raio de ponta nas ferramentas torna o corte mais suave e distribui o de cavaco por uma área maior do corte, melhora o acabamento e deixa a ferramenta mais resistente, menos propensa a quebra no ponto de intersecção das arestas cortantes.

Porém é preciso salientar que o aumento demasiado do raio de ponta pode causar vibrações indesejadas durante o processo de usinagem, pois aumenta muito a área de contato entre ferramenta e peça. Pode chegar o momento em que a vibração fique tão problemática que a única solução seja usar ferramentas de canto vivo (FITZPATRICK, 2013).

2.5 Seleção de ferramentas para usinagem de resinas

Fernandes et al. (2007) registrou que a qualidade do corte e o desprendimento de cavaco durante a usinagem são mais importantes que a natureza do metal da ferramenta, embora o metal duro seja preferível para a usinagem.

Um melhor acabamento superficial é obtido com uma ponta de corte arredondada. No que diz respeito às ferramentas, a usinagem de polímeros apresenta algumas vantagens em relação à usinagem de metais:

- Maior vida útil da ferramenta;
- Menor custo de aquisição;
- Possibilidade de utilização de ferramentas de aço rápido com bom desempenho;
- Utilização de ferramentas com perfis variados.

“Na usinagem dos polímeros normalmente utilizam-se ferramentas de aço rápido e de metal duro com as mesmas geometrias empregadas na usinagem de ligas de alumínio. Isso deve-se ao fato delas possuírem, ângulo de saída positivo, proporcionando maior controle na formação dos cavacos. Desta maneira garante-se um corte suave, baixas forças e menor temperatura no corte, gerando um melhor acabamento superficial, sendo esses fatores importantes para o bom desempenho na usinagem de polímeros” (FERNANDES et al, 2007).

Para Prinz et al. (1997), a velocidade de corte, avanço por dente, e profundidade de corte, são determinados em função do material e perfil geométrico a ser usinado. Além desses fatores, também são considerados o material e geometria da ferramenta. Os catálogos dos fabricantes de ferramentas informam estes parâmetros levando em consideração as variáveis citadas acima e, em alguns casos, estudos específicos podem ser realizados.

2.6 Ferramental rápido obtido por usinagem

A utilização de recursos para a obtenção de moldes-protótipo, sendo principalmente a RP (Prototipagem Rápida), deu origem a uma área denominada RT (Ferramental Rápido – do inglês *Rapid Tooling*), definida como um conjunto de processos de fabricação que tem como objetivo construir uma ferramenta a partir de materiais de baixo custo, em um curto intervalo de tempo (KING; TANSEY, 2002).

Amorim (2006) cita que apesar do nome RT estar diretamente relacionado ao

RP, não somente essas técnicas são utilizadas. Técnicas como a usinagem CNC vem sendo amplamente estudada e está em desenvolvimento acelerado no Brasil. Esta técnica recebe o nome de Ferramental Rápido obtido por Usinagem (RT Usinado).

Para que o molde-protótipo usinado seja obtido de forma rápida, é importante que os tempos envolvidos nas etapas de fabricação sejam os menores possíveis. A eliminação de processos como a eletroerosão tende a acelerar a obtenção do molde e diminuir o custo de fabricação. Geralmente, a fabricação de moldes-protótipo por usinagem está ligada ao uso de materiais de fácil usinabilidade (AMORIM, 2006).

Sobre esse ponto de vista Alves Junior (2003) reafirma que, com o advento da tecnologia CNC aplicada na confecção do ferramental rápido, tornou-se possível obter peças usinadas utilizando diretamente máquinas com comandos de três eixos. Neste processo normalmente utiliza-se materiais como ligas de alumínio, zinco, bronze ou resinas desenvolvidas para esta finalidade como epóxi e poliuretano.

Contudo, a usinagem desses protótipos se faz possível somente nas regiões da peça que a ferramenta de corte consegue alcançar efetivamente. Esta limitação ocorre devido a própria geometria da ferramenta em relação a peça a ser usinada. Canais contendo cantos retos ou com pequenas larguras e grandes profundidades não podem ser obtidos por usinagem (VOLPATO; AMORIM, 2004).

Estas dificuldades podem ser contornadas pelo uso de gavetas e do processo de eletroerosão, no caso de moldes feito com material metálico. No entanto, apenas com o emprego de resinas poliméricas na fabricação do molde se torna impossível o uso deste processo, tendo em vista que as resinas poliméricas não conduzem corrente elétrica.

2.7 Modelagem de fundição

Para Souza (2004) o ciclo de fabricação dos modelos de fundição é longo e envolve a aplicação de várias áreas do conhecimento técnico. Este ciclo pode ser dividido em três fases distintas: projeto do produto, projeto do modelo e manufatura.

No mercado atualmente há instalado e em expansão, um grande número de máquinas de usinagem, sobretudo CNC. Estas apresentam condições favoráveis para a fabricação de moldes protótipos e insertos (DERENIEVICKI, 2007).

Para tal, os processos de produção através de usinagem fazem uso integrado das tecnologias CAD (Desenho Assistido por Computador), CAM (Manufatura Assistida por Computador) e CNC. O sistema CAD refere-se à criação de modelos

geométricos tridimensionais das peças que se deseja fabricar. Com base na geometria gerada no CAD, o sistema CAM oferece a criação dos programas de CNC, possibilitando a análise das trajetórias e simulação gráfica da usinagem, necessitando de informações sobre as estratégias de usinagem, ferramentas e parâmetros de corte, fornecidas pelo operador do sistema (AMORIM, et al. 2006).

Dentro da fase da manufatura do molde a usinagem assume diferentes etapas no processo de composição das superfícies geométricas, as quais foram listadas por Souza (2004).

O desbaste parte de um material bruto, onde a usinagem é executada por níveis, o movimento da ferramenta em relação a peça pode ocorrer em movimentos simultâneos ou individuais dos eixos, realizando a remoção de material.

Durante o desbaste, existe a possibilidade de a ferramenta deixar material em excesso em regiões limitadas pela sua geometria. Quando isso ocorre faz-se necessário uma operação de redesbaste eliminando grandes volumes de material para um próximo acabamento.

O acabamento por fresamento tem o objetivo de deixar o melhor acabamento e dimensional possível. Essa operação remove todo o material em excesso deixado nas operações anteriores. Geralmente são utilizadas nestas operações máquinas CNC com 3, 4 ou 5 eixos de liberdade.

Ao fim do processo mecanizado faz-se necessárias operações manuais de acabamento, onde todas as imperfeições deixadas na superfície são eliminadas de forma manual, o que gera custos, tempo de produção e até imprecisão na forma final do produto. Considerado um “artesão”, o profissional que realiza esta operação utiliza-se de lixas, pedras, esmerilhadeiras manuais, entre outros, polindo a superfície usinada com sua habilidade manual (SOUZA, 2004).

2.8 Materiais para confecção de modelos de fundição

O processo de fundição consiste basicamente em vaziar metal líquido em um molde de areia, cuja cavidade corresponde ao negativo da peça que se deseja obter. Para a construção do molde em areia é necessário primeiramente fabricar o modelo, que pode ser produzido a partir de vários materiais (SOARES, 2000).

Para Baldam (2014), estes materiais diferem entre si quanto ao acabamento e a durabilidade que conferirão ao modelo. Portanto em primeiro lugar é preciso saber se o processo de moldagem selecionado apresenta alguma exigência em termos da

fabricação do modelo. Caso não haja restrição, a escolha dependerá basicamente do lote de peças a fabricar, da tolerância dimensional e acabamento requeridos para a peça fundida. É preciso lembrar também que o custo de um modelo se diluirá por todo o lote fabricado e assim a durabilidade do mesmo deve ser compatível com o número de peças a fabricar.

Alguns polímeros termofixos com ou sem carga, denominadas resinas poliméricas, comercializados na forma de pó ou de placas, podem ser utilizadas em diversas aplicações na área mecânica (ALVES JÚNIOR, 2003). Mais especificamente na área de protótipos, Volpato (2003) comenta que os fornecedores destes tipos de materiais indicam uma gama variada de opções que podem ser usados para se obter desde modelos visuais até ferramentas para conformação de chapas e moldes para injeção de plásticos. O uso de resinas pode diminuir tanto o custo como o tempo de fabricação das ferramentas em 25% e 50% respectivamente, se comparado com o uso de materiais metálicos (CHEAH et al., 2002).

O tempo de vida dos mesmos depende do material com que foi fabricado, da complexidade e do cuidado no armazenamento e manuseio, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Vida útil dos modelos de fundição de acordo com o material com que foi confeccionado

Material	Vida útil(n° de moldagens)
Madeira	100
Resina	500
Araldite	50000
Alumínio	80000
Ferro Fundido	300000
Aço Liga	800000

Fonte: Souza (2005).

A qualidade da peça fundida depende, antes de tudo, da qualidade e precisão com que o modelo é fabricado (SOARES, 2000).

Baldam (2014) comenta que modelos em material polimérico podem ser produzidos com menores custos do que os padrões equivalentes em metal. Estes têm sido utilizados com sucesso em máquinas de moldagem de alta pressão.

Entre os materiais utilizados destacam-se o poliuretano e a resina epóxi por possuírem as seguintes características:

- Maior resistência à compressão, flexão, abrasão e ao impacto, quando comparados a madeira;
- Resistência ao ataque químico;
- Fácil liberação das areias de moldagem.

Derenievicki (2007) destaca o uso das resinas poliméricas para a produção de insertos para moldes-protótipos. Os fornecedores procuram desenvolver uma grande diversidade de placas, normalmente em epóxi e poliuretano, buscando sua adaptação às exigências do mercado para diferentes aplicações. São escassas, as pesquisas relacionadas ao uso das resinas na injeção de plásticos, exceto as que têm indicações descritas para esse fim e isto abre espaço para novos estudos.

A Vantico (2001), uma conhecida fornecedora de polímeros, lembra que algumas resinas podem ser empregadas na modelação e na ferramentaria, por apresentarem facilidade à usinagem. Porém a recomendação é que os usuários façam testes práticos para completar os dados listados em seus catálogos técnicos.

Derenievicki (2007) também traz em seu estudo a alternativa de se utilizar materiais poliméricos na construção dos insertos, e lembra ainda que essa técnica é pouco estudada, sendo necessária a realização de pesquisas para identificar a viabilidade de uso das diversas resinas.

2.8.1 Poliuretano

O poliuretano pertence a um grupo de plásticos que aliam características de elastômero com possibilidade de transformação, devido à grande variação de durezas possíveis de se estabelecer na sua formulação (BERENGUEL, 2009). Vilar (2004) afirma que é possível obter infinitas variações de produtos pela combinação de diferentes tipos de matérias-primas como polióis, isocianatos e aditivos. O trabalho pioneiro em polímeros poliuretânicos foi conduzido por Otto Bayer junto a seus companheiros de trabalho em 1937 na Alemanha.

O Poliuretano possui um número elevado de vantagens, dentre as quais é válido salientar aquelas que se aplicam a fabricação de modelos de fundição, conforme Vilar (2004) exemplifica:

- Excelente resistência a óleos, solventes, gorduras, graxas e gasolinas.
- Capacidade de suportar cargas acima das borrachas convencionais.
- Alta resistência ao corte, entre 1800 a 9000 kg/m.

- Resistência à temperatura, podendo ser trabalhado entre -65°C e 105°C ;
- Possui durabilidade até 50 vezes maior que outros materiais, quando abrasão severa for um fator. Tais materiais se provaram superiores a borrachas ou metais em muitas aplicações.

A resina poliuretânica NECURON 620 é um exemplo de material facilmente usinável que possibilita o emprego de altas velocidades de corte e de avanço, reduzindo assim, os tempos de usinagem (VOLPATO; AMORIM, 2003).

Alves Junior (2003) levanta que a resina de poliuretano é uma alternativa interessante devido sua elevada resistência e boa usinabilidade.

2.9 Rugosidade

A fabricação de componentes por usinagem, devido ao modo de retirada de material da peça envolvendo cisalhamento, apresentam as superfícies usinadas com danos provocados pelo processo (SANTOS E SALES, 2005).

Em geral, uma peça usinada é examinada em termos macro geométricos (dimensões, forma e orientação) e micro geométricos (rugosidade). Ela é examinada depois da operação de usinagem, ou mesmo durante, de acordo com as tolerâncias e rugosidade especificadas no projeto. (MACHADO et al, 2009)

Machado et al (2009) ainda comenta que a rugosidade pode ser medida por vários parâmetros. Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar um processo de usinagem, e que métodos estatísticos aplicados ao resultado da medição da rugosidade de uma superfície podem identificar as contribuições relativas de cada um desses parâmetros.

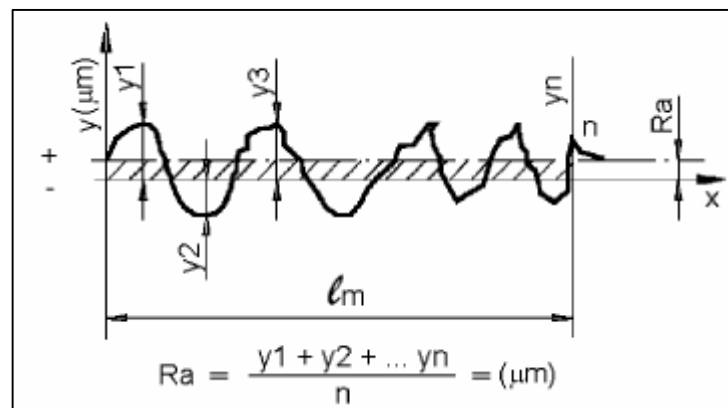
A qualidade da superfície obtida está relacionada com as características do processo de fabricação. Assim qualquer alteração nas variáveis do processo apresenta reflexos na textura da peça produzida. Em outras palavras, pode-se dizer que “a textura superficial é a impressão digital do processo de manufatura” (SANTOS e SALES, 2005).

2.9.1 Parâmetro de Rugosidade

Existem diversos parâmetros para quantificar rugosidade, Machado et al (2009) apresenta o desvio aritmético médio (R_a), o desvio médio quadrático (R_q), a altura total do perfil (R_t), entre outros.

Porém para Guimarães (2011) e Machado et al (2009), entre os parâmetros de amplitude, o mais utilizado é o “Ra” amplamente empregado como parâmetro de controle de processo, uma vez que alterações no seu valor representam alterações no processo, em especial no desgaste da ferramenta. Como representa um valor médio, é um parâmetro estável, que não recebe influência de efeitos ocasionais, assim como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Parâmetro de rugosidade Ra



Fonte: Rosa (2009).

2.9.2 Cálculo teórico para rugosidade no fresamento

Machado et al (2009), diz que para uma operação de fresamento a rugosidade pode ser teoricamente calculada, porém os valores obtidos servem apenas de indicativos, uma vez que são desconsiderados alguns fatores tais como, vibrações e desgaste de aresta ferramenta. A Equação (1) apresenta o cálculo de rugosidade para o fresamento:

$$R_a = \frac{re - \sqrt{re^2 - \left(\frac{f_z}{2}\right)^2}}{2}$$

(1)

Em que:

R_a = Rugosidade Ra teórica

r_e = raio da fresa

f_z = avanço por dente

2.9.3 Efeitos dos parâmetros de usinagem na rugosidade

O acabamento superficial sofre influência de vários parâmetros de usinagem, incluindo: a geometria da ferramenta de corte, geometria da peça, rigidez da máquina ferramenta, material da peça, condições de corte e material da ferramenta. Além destes pontos Santos e Sales (2005) e Shquckry (1982), lembram que a rugosidade sofre a influência de alguns fatores: a ferramenta não deve ter ponta aguda, os níveis de vibração devem ser os menores possíveis, a aresta de corte não deve apresentar defeitos, ausência de arestas postiças e ainda material da peça não deve conter defeitos em sua estrutura.

Uma ferramenta nova tem uma área de contato menor com a peça, portanto, gera menos vibração, reduz o aparecimento de aresta postiça, assim, a rugosidade será teoricamente resultante das marcas do avanço deixadas pela ferramenta (MACHADO et al, 2009).

Para Machado et al (2009), dentre os parâmetros de corte, o avanço é o que tem mais influência, já que a altura dos picos e dos vales tendem a aumentar em proporção quadrática ao avanço. Sob baixas velocidades de corte podem surgir arestas postiças e aumentar o avanço nessas condições geram superfícies ainda piores.

Bonifácio (1983) comentou que um raio maior pode gerar uma rugosidade maior. Isso deve-se a maior área de contato da ferramenta com a peça podendo gerar maior esforço de corte e vibrações.

Conforme se aumenta o raio de ponta da ferramenta há uma tendência de que a rugosidade diminua, porém, um aumento exagerado pode causar problemas de vibração. A vibração não é proporcional a redução da rugosidade, sendo assim mesmo com a ocorrência da vibração, ainda se nota uma melhora no acabamento, porém não como esperado (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006).

Entre as alternativas para a redução da rugosidade, estão: o aumento da velocidade de corte para reduzir as arestas postiças, a diminuição da profundidade de corte para reduzir flexões da ferramenta, o aumento do raio de ponta da ferramenta para valores iguais ou superiores ao dobro do avanço (MACHADO et al., 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse trabalho realizou um estudo a fim de identificar a influência de alguns perfis de ferramentas e parâmetros de corte na qualidade superficial da resina poliuretânica NECURON 620, utilizada normalmente na fabricação de modelos de fundição. Para isso foram avaliadas quatro ferramentas com perfis distintos bem como três velocidades de corte (V_c) e três avanços por dente (f_z).

Foram coletados os dados de rugosidade de todos os ensaios a fim de confrontar os mesmos e identificar qual melhor meio de se realizar as usinagens das resinas.

3.1 Materiais

Para a realização dos ensaios de usinagem foram confeccionados 18 corpos de prova com 24mm de largura, 24mm de altura e 100mm de comprimento confeccionados em resina Necuron 620 produzida pela Necumer. A Tabela 2 apresenta as características da resina utilizada nos ensaios.

Tabela 2 – Comparativo de características entre resinas

Característica	Unidade	NECURON 620
Cor		Marron claro
Aplicação		Modelos para cópia padrão e modelos para teste
Densidade	g/cm ³	0,62
Resistencia a compressão	N/mm ²	24
Resistência a Flexão	N/mm ²	27
Dureza Shore D	Unidades	57
Estabilidade Dimensional	°C	60

Fonte: Adaptado de Necumer (2018).

3.2 Ferramentas de corte

Para a realização do fresamento dos corpos de prova foram selecionadas quatro fresas com perfis variados: esférica (A), topo toroidal (B), topo chanfrada (C) e cônica (D), conforme apresenta a Figura 4. Todas são fresas para aplicação em alumínio, afiadas e com saída de cavacos polidas. Essas ferramentas são compostas de metal duro ISO “K40”.

Figura 4 - Fresas utilizadas nos corpos de prova



Fonte: O Autor (2018).

3.3 Equipamento utilizado no ensaio de usinagem

A máquina utilizada para a usinagem dos corpos de prova foi um centro de usinagem da marca AWEA, modelo AF-860 com rotação do eixo árvore máxima de 12000 rpm e avanço em G1 (avanço controlado) de 15000 mm/min, como mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Máquina utilizada na usinagem dos corpos



Fonte: O Autor (2018).

3.4 Equipamentos para análise

Para realizar a medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca TESA, modelo Rugosurf 20. O aparelho foi configurado com *cut-off* de 0,8 e percurso total de medição 4 milímetros. A rugosidade Ra foi medida em todos os canais usinados.

Para a análise de defeitos de usinagem como lascamentos no percurso da usinagem, foi utilizado um estereoscópio da fabricante Zeiss, modelo Stemi 2000-C, com uma câmera acoplada de marca AxioCam ER 5s com ampliação de 5x (Figura6).

Figura 6 - Estereoscópio utilizado na análise de defeitos de usinagem



Fonte: O Autor (2018).

3.5 Métodos

A preparação dos corpos de prova foi feita em uma fresadora ferramenteira convencional de marca Nardini, onde foram realizadas a retirada das imperfeições do processo de corte e a realização do esquadrejamento nas medidas especificadas.

Os corpos de prova foram presos no centro de usinagem através de uma morsa sobre a mesa da máquina e para auxiliar na usinagem houve injeção de ar comprimido a fim de forçar o cavaco para fora da região de corte, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Usinagem dos corpos de prova



Fonte: O Autor (2018).

Os parâmetros de usinagem foram definidos utilizando com base as velocidades de corte e avanços propostos pelo fabricante de resinas (VANTICO, 2001) e por estudos de alguns autores, entre eles Derenievicki (2007), Guimarães (2011) e Volpato (2006). A profundidade de corte máxima para o acabamento indicada pelo fabricante NECUMER é de 3mm, optou-se por realizar os ensaios com um valor ligeiramente maior, assim, foi determinada para a usinagem a profundidade de 4 mm.

Conforme descrito na Tabela 3, é possível ver que para cada velocidade de corte foram definidos três valores de avanço por dente.

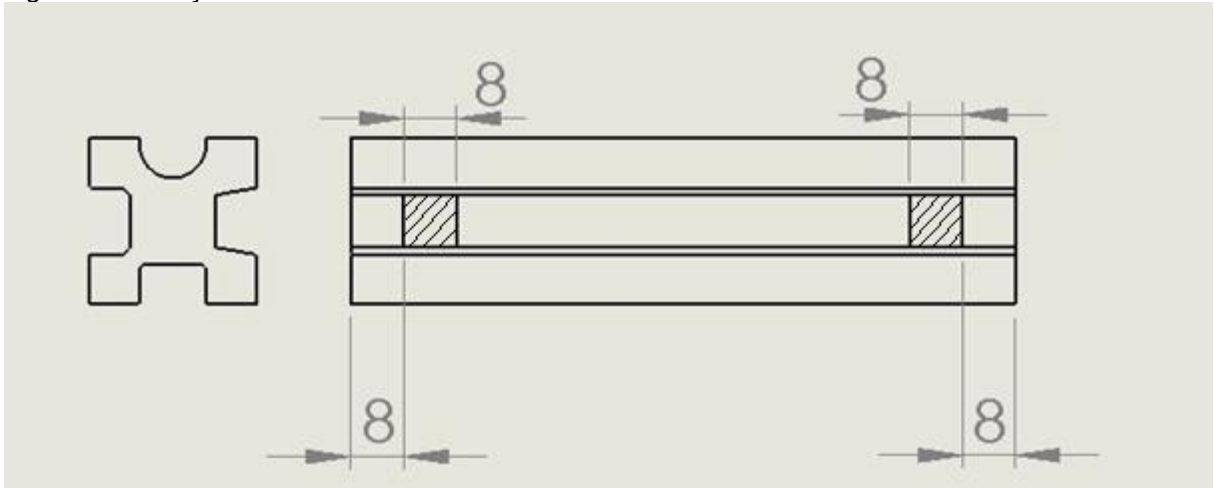
Tabela 3 –Velocidade de corte e avanços por dente utilizados

Número do ensaio	Velocidade de corte (Vc) em metros por minuto	Avanço por dente (fz) em milímetros	Profundidade de corte (ap) em milímetros
1	250	0,15	4
2	250	0,25	4
3	250	0,35	4
4	300	0,15	4
5	300	0,25	4
6	300	0,35	4
7	350	0,15	4
8	350	0,25	4
9	350	0,35	4

Fonte: O Autor (2018).

Para cada ensaio houve uma réplica, assim totalizando 18 corpos de prova. Em cada canal foram realizadas duas medições de rugosidade, totalizando assim para cada ferramenta 36 medições. Conforme a figura 8 mostra, as medições ocorreram no início e no fim dos canais, dentro de uma região com 8 mm de comprimento e à 8 mm da face. A figura 9 ilustra a leitura da rugosidade sendo realizada.

Figura 8 – Medições realizadas



Fonte: O Autor (2018).

Figura 9 – Rugosímetro utilizado nas medições



Fonte: O Autor (2018).

A compilação de todas as medidas de rugosidade dos ensaios foi utilizada para realizar uma análise de variância (ANOVA). Para tanto foi utilizado o *software* para estatística Minitab 18. Para que o *software* realizasse a análise, foram fornecidas a ele como dados de entrada as médias de rugosidade das duas repetições.

4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Análise das rugosidades

A Tabela 4 apresenta os dados de entrada do Minitab, nela constam todas as médias das medições de rugosidade para todas as ferramentas e parâmetros. Os valores estão em micrômetros (μm), e representam os valores de (Ra). Optou-se pelo valor Ra por ser o mais utilizado na indústria.

Tabela 4 – Dados de entrada fornecidos ao Minitab

Parâmetros Vc(m/min) x fz(mm)	Esférica Ra (μm)	Toroidal Ra (μm)	Topo chanfrado Ra (μm)	Cônica Ra (μm)
250 x 0,15	2,481	1,204	1,992	1,832
250 x 0,25	2,488	1,185	2,412	2,306
250 x 0,35	2,746	1,725	2,930	2,818
300 x 0,15	2,606	1,100	1,815	1,719
300 x 0,25	1,969	1,130	2,484	1,860
300 x 0,35	3,068	1,743	2,905	2,747
350 x 0,15	2,360	1,064	2,119	1,735
350 x 0,25	2,320	1,233	2,724	2,261
350 x 0,35	3,077	1,465	2,689	2,763

Fonte: O Autor (2018).

Esses valores foram utilizados para realizar a ANOVA (Análise de Variância), os valores dessa análise estão representados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado da análise de variância fornecidos pelo Minitab

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Vc	2	0,0825	0,04125	0,44	0,644
fz	2	6,6687	3,33434	35,96	0,000
Ferramenta	3	17,3918	5,79726	62,51	0,000
Vc*fz	4	0,3467	0,08667	0,93	0,455
Vc*Ferramenta	6	0,1386	0,02311	0,25	0,956
fz*Ferramenta	6	1,3317	0,22195	2,39	0,048
Vc*fz*Ferramenta	12	0,5748	0,04790	0,52	0,890
Erro	36	3,3384	0,09273		
Total	71	29,8732			

Fonte: Autor (2018).

O nível de significância utilizado foi de 0,05. Existem dessa forma duas hipóteses da ANOVA:

- H_0 : Todas as médias são iguais: $M_1 = M_2 = M_3 \dots M_n$;
- H_1 : Há pelo menos uma média diferente.

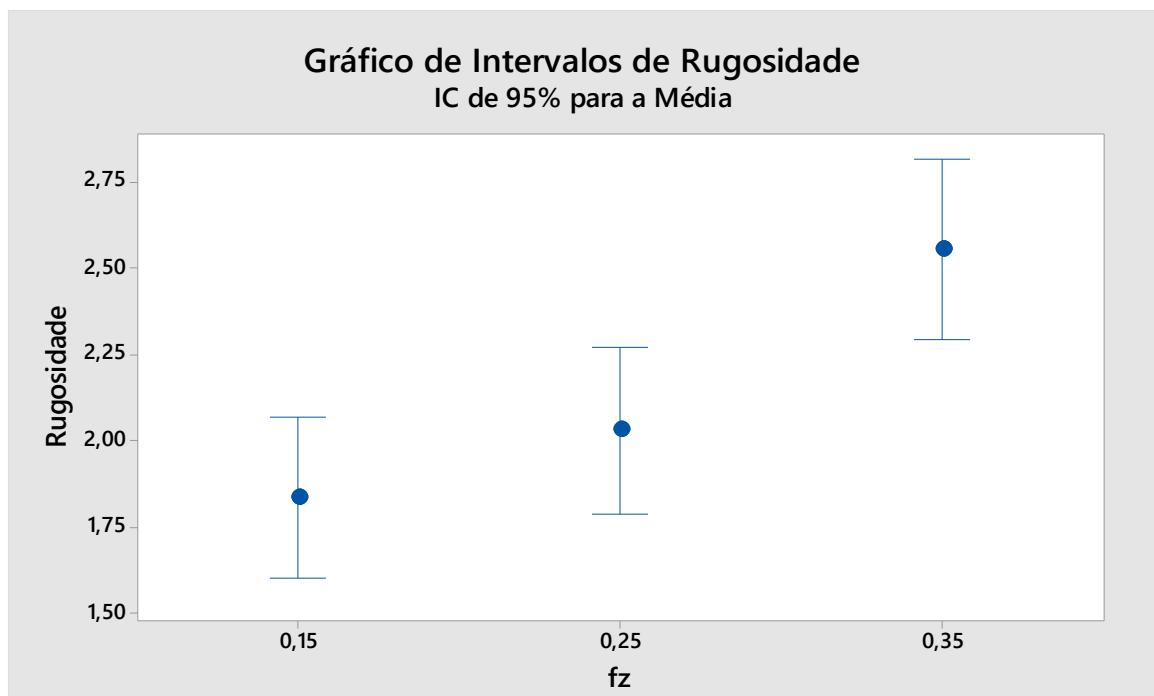
Para descobrir qual é a hipótese válida basta avaliar o valor de p . Se p for $<0,05$, rejeita-se H_0 , ou seja, há diferenças significativas.

Os resultados apresentados na Tabela 5 indicam valores para p inferiores a 0,05 em três situações, ao se analisar o “fz”, a ferramenta e a interação entre “fz” e ferramenta. Desta forma pode-se afirmar com 95% de confiança que nesses três casos esses fatores influenciam significativamente na rugosidade. Bem como pode-se afirmar com 95% de confiança que a “Vc” não interferiu nos valores de rugosidade pois o valor “p” foi superior a 0,05.

Para os dados de velocidade de corte e avanço por dente foram gerados gráficos, apresentados nas figuras 10 e 11. Através dos intervalos de variação apresentados é possível observar influência significativa na rugosidade quando alterados os parâmetros.

Na figura 10, podemos perceber que houve variação significativa na rugosidade quando o avanço por dente passa de 0,25 para 0,35mm.

Figura 10 - Gráfico da influência do avanço por dente na rugosidade



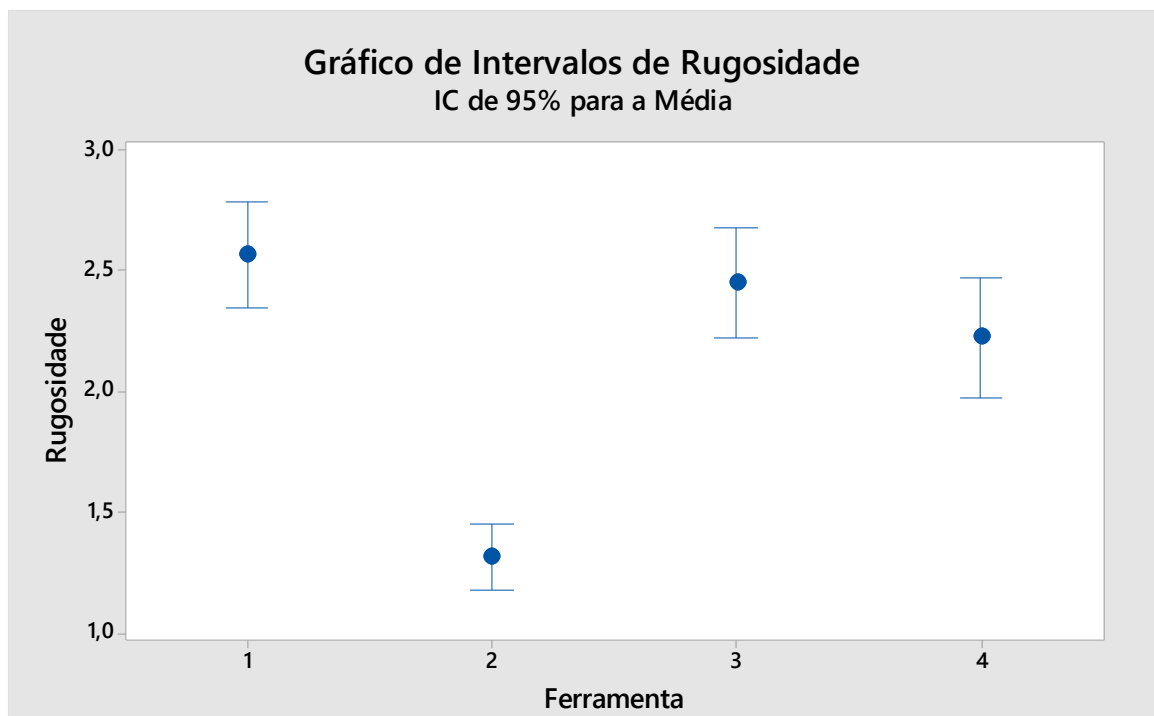
Segundo Machado et al (2009), Diniz, Marcondes e Coppini (2006), quanto maior o avanço maior tende a ser a rugosidade. Eles também comentam que a altura dos picos e profundidades dos vales são proporcionais ao quadrado do avanço.

Os resultados também demonstram que não houve mudança significativa da rugosidade ao alterar a velocidade de corte. Isso indica que provavelmente não ocorreu a formação de aresta postiça de corte (APC), que segundo Machado et al. (2009) e Santos e Sales (2005), influência diretamente na rugosidade superficial.

4.2 Análise das ferramentas

Com a análise dos valores das rugosidades, foi possível identificar qual geometria de corte das ferramentas apresenta melhor acabamento superficial com os parâmetros definidos por esse trabalho. As figuras 12 e 13 trazem gráficos demonstrando o comportamento de cada ferramenta durante os ensaios. Na figura 12 é possível afirmar com 95 % de confiança que a fresa toroidal apresentou uma rugosidade menor, as demais ferramentas tiveram uma rugosidade estatisticamente igual. A numeração das ferramentas (1,2,3,4) corresponde respectivamente a, fresa esférica, fresa toroidal, fresa de topo chanfrado e fresa cônica.

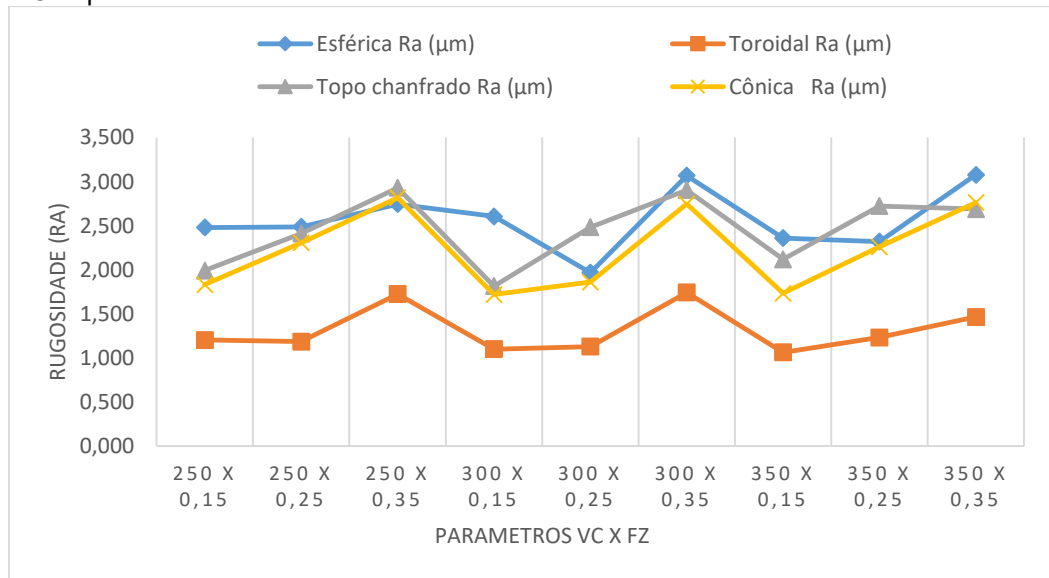
Figura 11 - Gráfico da influência da ferramenta na rugosidade



Fonte: Minitab (2018)

A figura 13 apresenta o comportamento das ferramentas durante os ensaios e apontam que a fresa toroidal é aquela com a qual se conseguiu o menor valor de rugosidade.

Figura 12 – Comportamento das ferramentas durante os ensaios



Fonte: O Autor (2018).

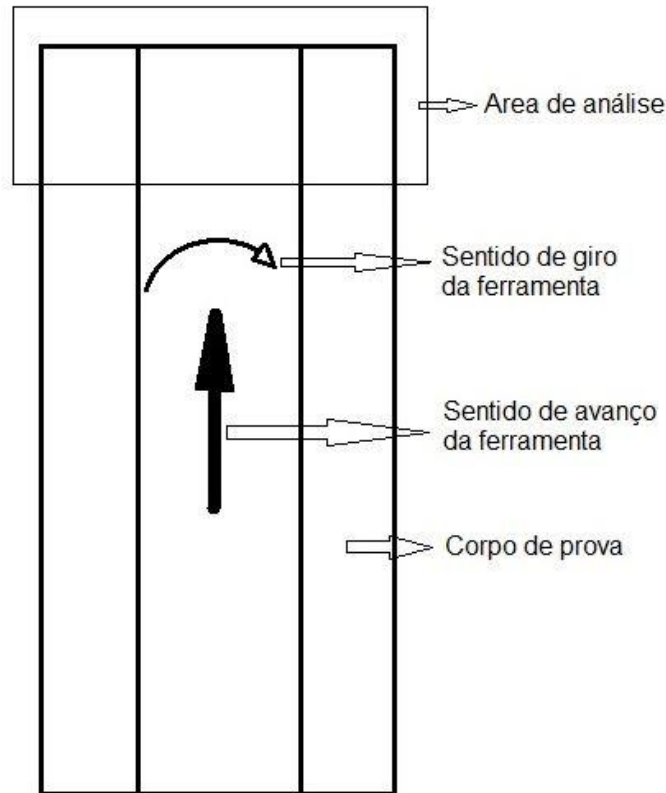
Os resultados encontrados estão de acordo com o que dizem Santos e Sales (2005), Machado et al (2009), Bonifácio (1983), Diniz, Marcondes e Coppini (2006), que comentam que o aumento do raio de ponta melhora o acabamento, porém o aumento demasiado acaba por prejudicar a usinagem e aumentar a rugosidade. Esse pode ser o motivo pelo qual a fresa esférica não demonstrou um bom resultado.

A fresa de topo chanfrado e a cônica não possuem arredondamento da aresta de corte o que provocou da mesma forma um aumento da rugosidade.

4.3 Análise dos lascamentos

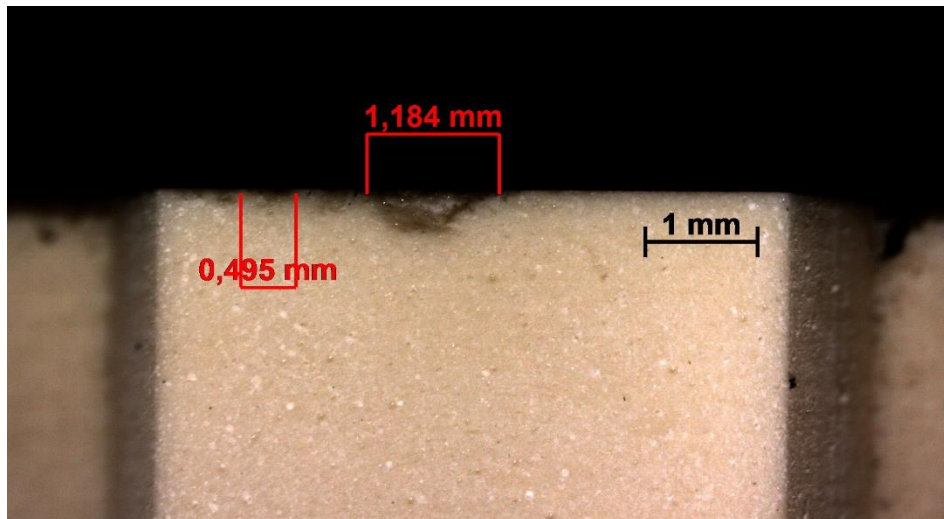
Após a realização dos ensaios foi possível identificar a ocorrência de lascamentos em alguns dos corpos de prova. A figura 14 apresenta de forma esquemática a região onde ocorreram as análises dos lascamentos. Após a medição desses defeitos ser realizada se constatou que o tamanho de todos foi aproximado, ficando entre 1 e 1,5 mm conforme representado na Figura 15.

Figura 13 - Área onde ocorreram as análises dos lascamentos.



Fonte: O autor (2018)

Figura 14 - Lascamentos nos corpos de prova.



Fonte: O Autor (2018).

Esses lascamentos aconteceram na saída da ferramenta e segundo Volpato e Derenievicki (200-), Oliveira et al (2010) e Derenievicki (2007), os principais fatores responsáveis por esses defeitos são o avanço, a profundidade de corte ou uma interação entre os dois parâmetros. Salientam também que dependendo dos

parâmetros, os lascamentos podem ocorrer em outros pontos da usinagem.

A Tabela 6 apresenta marcado com um “x” as ferramentas e os parâmetros em que houve a ocorrência de lascamentos durante os ensaios, os ensaios que não apresentaram lascamentos estão marcados com “o”.

Tabela 6 – Ferramentas com a ocorrência de defeitos

N° ensaio	Parâmetros Vc x fz	Fresa esférica	Fresa cônica	Fresa toroidal	Fresa topo chanfrado
1	250 x 0,15	o	x	o	o
2	250 x 0,25	o	x	x	x
3	250 x 0,35	o	x	x	x
4	300 x 0,15	o	x	o	o
5	300 x 0,25	o	x	o	x
6	300 x 0,35	o	x	x	x
7	350 x 0,15	o	x	o	o
8	350 x 0,25	o	x	o	o
9	350 x 0,35	o	x	x	x

Fonte: O Autor (2018).

Pode-se observar que a fresa esférica não apresentou falhas na usinagem, mesmo com uma maior pressão de corte ocasionada pelo aumento do raio de ponta, a saída da ferramenta da peça acontece de forma mais suave devido a profundidade de corte ser menor que o raio da fresa. Assim a última porção de material do canal é retirada gradativamente conforme a ferramenta avança.

A fresa cônica apresentou em todos os ensaios e as outras ferramentas de maneira geral só não apresentaram problemas quando o avanço de 0,15mm foi ensaiado. Com 0,25 e 0,35mm de avanço por dente problemas ocorreram.

5 CONCLUSÃO

Após a realização do presente estudo a respeito da influência da geometria da ferramenta e dos parâmetros de corte no acabamento superficial da resina NECURON 620, pode-se afirmar que:

- a) Nos ensaios realizados a velocidade de corte não interferiu de maneira significativa na rugosidade superficial da peça.
- b) O parâmetro de corte que influenciou decisivamente no acabamento superficial foi o avanço por dente. Quanto maior o avanço maior tende a ser a rugosidade assim como ocorre na usinagem dos metais.
- c) A geometria de corte da ferramenta mostrou-se determinante para se alcançar valores mais baixos de rugosidade.
- d) A combinação ensaiada que alcançou o menor valor médio de rugosidade ($1,064 \mu\text{m}$) foi a utilização da fresa toroidal com $350\text{m}/\text{min}$ de velocidade de corte e $0,15 \text{ mm}$ de avanço por dente.
- e) A fresa toroidal foi a que apresentou os melhores resultados de rugosidade superficial com um valor médio máximo de $1,743 \mu\text{m}$. As outras 3 ferramentas apresentaram valores similares entre si, porém os valores médios alcançados por essas três fresas não alcançaram os resultados obtidos pela fresa toroidal ficando entre $1,719 \mu\text{m}$ e $3,077 \mu\text{m}$,
- f) A única ferramenta que não ocasionou lascamentos na peça usinada foi a esférica.
- g) A fresa cônica apresentou lascamentos em todos os ensaios, já a fresa de topo chanfrado e a toroidal apresentaram em todas as velocidades de corte, porém somente quando o avanço foi de $0,25$ e $0,35\text{mm}/\text{dente}$.

REFERÊNCIAS

- ALVES JÚNIOR, V. **Aplicação de Ferramental Rápido para Conformação de Chapas Metálicas**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- AMORIM, J. R. de; DERENIEVICKI, O. F.; VOLPATO, N. **Um estudo sobre o emprego de protótipos no desenvolvimento de produtos**. Ferramental – Revista Brasileira da Indústria de Ferramentais, Joinville, Março/Abril, 2006, n. 5, pp. 37-44.
- AMORIM, J. R. **Sistemática para fresamento e montagem de posições em insertos poliméricos para moldes-protótipo** (Dissertação de Mestrado) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM. Curitiba, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 513: referências. Rio de Janeiro, 2015. 4 p.
- BERENGUEL, P. A. **Poliuretano**. Departamento de Mecânica de Precisão FATEC-SP, 2009
- BONIFÁCIO, M.E.R, **Monitoramento do processo de torneamento de acabamento via sinais de vibração**, tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp (1983)
- CHEAH, C. M., CHUA, C. K., ONG, H. S. **Rapid moulding using epoxy tooling resin. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. nº 20, p. 368-374, 2002. LEITE, E. A.; Avaliação dos riscos ocupacionais provocados pela resina epóxi aos trabalhadores do setor de mármore e granitos de Cachoeiro de Itapemirim-ES. Monografia (Curso de Especialização de Perícia Médica), Universidade Gama Filho e Fundação Unimed, Vitória- ES, [200-].
- COSTA, A. R. **Otimização do processo de fresamento de cavidades com fresas de insertos intercambiáveis**. 2003. 123f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas-Unicamp, Campinas 2003.
- DERENIEVICKI O. F. **Procedimento para Testar Resinas Poliméricas para a Fabricação de Moldes-Protótipo Usinados**. (Dissertação de Mestrado) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM. Curitiba, 2007.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 5.ed. São Paulo: Artliber, 2006. 255 p.
- FERNANDES, M.O., CORRÊA, M.M., LEITE, W., WIEBECK H., VALENZUELA-DIAZ F. R., TOFFOLI, S.M. **Usinagem de plásticos de engenharia. Uma opção de processamento**. 9º Congresso Brasileiro de Polímeros. 2007

FERRARESI, D. **Fundamento da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 754 p.

FITZPATRICK, Michael. **Introdução aos processos de usinagem**. Porto Alegre: Amgh, 2013.

GUIMARÃES, J. L. M; **Influência do acabamento superficial e de revestimentos em moldes de resina de poliuretano na injeção de “ABS”** (Dissertação de Mestrado) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM. Curitiba, 2011.

KING, D.; TANSEY T. **Alternative materials for rapid tooling**. *Journal of materials processing technology*, n. 121, p.313-317, 2002.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

MARCELINO, A. P.; DOMINGOS, D. C.; CAMPOS D. V.; SCHROETER R. B. **Medição e simulação dos esforços de usinagem no fresamento de topo reto de ligas de alumínio tratável termicamente 6061**. In: CONGRESSO ESTUDANTIL DE ENGENHARIA MECÂNICA - CREEM, 11., 2004, Nova Friburgo. **Anais...** Nova Friburgo: Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2004. Não paginado.

MARCONDES, C.M., NETTO, A. B., TANIO, F.H. (Organizadores). **Usinagem em altíssimas velocidades: como conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica**. São Paulo: Editora Érica, 2003.

MARCONDES, F. C. **A história do metal duro**: Sandvik Coromant, Ver Curiosidades, 1990. 234 p.

Ministério de Minas e Energia: **Anuário Estatístico do setor Metalúrgico (2017)**.

NECUMER, **Manual Técnico**. Disponível em: <<https://translate.google.com.br/translate?hl=ptBR&sl=de&u=http://www.necumer.com/&prev=search>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

OLIVEIRA C.A.M, VERONEZE T., ARAÚJO, M.A, DEL PINO, G.G: **Teste de usinabilidade de compósitos de epóxi e alumínio em cnc correlacionando parâmetros de corte a rugosidade superficial média ra e a defeitos por meio de superfície de resposta**. VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Paraíba, 2010

PIRES, M. **Histórico do Poliuretano**. Disponível em: <<http://poliuretano.wordpress.com/historia-do-poliuretano/>>. Acesso em: 28 mar. 2017.

PRINZ, F. B., ATWOOD, C.L., AUBIN, R.F., BEAMAN, J. J., FUSSELL, P. S., LIGHTMAN, A. J., SACHS, E., WEISS, L. E., WOZNY, M. J. **Rapid Prototyping in Europe and Japan**. *Rapid Prototyping Association of the Society of Manufacturing Engineers*. v.1, 1997.

RODA, D. T.; **Usinagem de Plásticos**. Tudo Sobre Plásticos. Disponível em: <http://www.tudosobreplasticos.com/processo/usinagem.asp>. Acesso em 01/12/2016.

ROSA, Luís Carlos. **Acabamento de Superfícies; Rugosidade Superficial**. São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2009.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006. 542p.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. Belo Horizonte: Artliber, 2005.

SHQUICKRY, A. S. "The effect of cutting conditions on dimensional accuracy", *Wear*, v. 80, p. 197-205, 1982.

SOARES, G. de A. **Fundição: Mercado, Processos e Metalurgia**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2000. BALDAM, Roquemar de Lima. **Fundição: Processos e Tecnologias correlatas**. São Paulo: Érica, 2014.

SOUZA, A. F. de. **Contribuições ao Fresamento de Geometrias Complexas Aplicando a Tecnologia de Usinagem com Altas Velocidades**. 2004. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2004.

SOUZA, W. **Utilização de matérias-primas alternativas na fabricação de modelos para fundição**. Monografia de conclusão de curso – Faculdade Metropolitana de Guarapiranga, Santa Catarina, 2005.

VANTICO Ltda. **Curso Básico de Resinas para Modelação, Ferramentaria e Prototipagem Peças em Minutos**. São Paulo, Brasil, p.11 a , 2001.

VILAR, W. **Química e Tecnologia dos Poliuretanos**. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2004.

VOLPATO, N.; AMORIM, J. R. **Limitações do processo de usinagem CNC para ferramental rápido**. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém, 2004.

VOLPATO, N.; AMORIM, J. R.; MANENTE, M. M. **The use of epóxi resins as inserts for injection mould**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São Paulo, 2003.

VOLPATO, N.; DERENIEVICKI O. F. **Uma análise da usinagem de resinas para ferramental rápido**. 200-.