

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE CORTE NO DESEMPENHO DA USINAGEM HSM
EM LIGA DE ALUMÍNIO-SILÍCIO HIPOEUTÉTICA

por

Luís Henrique Munitor

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2013.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE CORTE NO DESEMPENHO DA USINAGEM HSM
EM LIGA DE ALUMÍNIO-SILÍCIO HIPOEUTÉTICA

por

Luís Henrique Muniton

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Profa. Dra. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Dr. Flavio José Lorini

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Porto Alegre, 05 de dezembro de 2013.

MUNITOR, L. H. **Análise da influência do fluido de corte no desempenho da usinagem HSM em liga de alumínio-silício hipoeutética**. 2013. 20 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

A usinagem em altas velocidades de ligas de alumínio-silício hipoeutética, torna-se difícil em função da presença do silício, elemento este com alto ponto de fusão e extremamente duro, o que acaba por exigir bastante das ferramentas, que ficam expostas a uma operação abrasiva. O estudo trata da usinagem executada em um cilindro de motosserra. O fluxo de fabricação envolve fundição sob pressão em matriz metálica de molde permanente, usinagem, cromagem e brunimento. O foco está na usinagem, que hoje é realizada com a maioria das ferramentas confeccionadas em diamante policristalino, material duro o suficiente para que as ferramentas tenham uma longa vida sem falhar, com o uso de meio lubrificante-refrigerante na forma de emulsão com óleo mineral. O objetivo do trabalho é reduzir os tempos de usinagem através da alteração do tipo de óleo usado na emulsão. Para atingir este objetivo, foram testados dois fluidos de corte vegetais emulsionáveis em água de dois fornecedores e foram incrementados os parâmetros de corte. A fim de avaliar os resultados do processo de usinagem, um lote de peças foi medido para avaliar a aptidão do processo a cada acréscimo de parâmetros. A viscosidade e a molhabilidade dos fluidos sobre uma superfície de alumínio foram testadas a fim de determinar quais as características de cada fluido de corte influenciaram no processo de usinagem. Os principais resultados obtidos foram que diferentes tipos de emulsão permitem diferentes velocidades de corte no processo, que todos os fluidos de corte avaliados possuem viscosidade parecida e os que mostraram melhor desempenho em usinagem apresentaram piores resultados em relação à molhabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: fluido de corte, usinagem em altas velocidades, liga alumínio-silício.

MUNITOR, L. H. **Analysis of the cutting fluid influence on the HSM performance of the hypoeutectic aluminum-silicon alloy.** 2013. 20p. Monograph (Undergraduate Final Project in Mechanical Engineering) – Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

The high-speed machining of the hypoeutectic aluminum-silicon alloy, it becomes difficult because the silicon presence, an element with a high melting point and extremely hard, which expose the tools to an abrasive operation. The process studied in this work deals with the high-speed machining performed on a chainsaw cylinder. The production flow is the casting under pressure in metal permanent mold matrix, machining, plating and honing. The focus is on the machining, which one is now performed with most of the tools used in polycrystalline diamond, material hard enough to the tools have a long life without failure, using mineral cutting fluid. The objective is to reduce the machining times by changing the oil type used in the emulsion. To achieve this goal, tests have been making using two vegetable water emulsionable oils of two suppliers and were increased cutting parameters. In order to evaluate the results of the machining process, a lot of parts were measured to evaluate the capability of the process to each additional parameter. In order to determine the characteristics of each cutting fluid influence the machining process were tested viscosity and wettability of the fluid in an aluminum surface. The main results were that different cutting fluid types allow different cutting speeds in the process, all products have similar viscosity and even the best cutting fluid performance in machining showed worse results in terms of wettability.

KEYWORDS: cutting fluid, high-speed machining, aluminum-silicon alloy.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS	1
2.1	Geral	1
2.2	Específicos.....	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3.1	Usinagem de Ligas Alumínio-Silício (Al-Si).....	2
3.2	Usinagem com Ferramentas PCD	3
3.3	Influência do Fluido de Corte na Usinagem HSM em Alumínio.....	4
3.4	Indicadores de Aptidão de Processos.....	5
4	METODOLOGIA.....	5
4.1	Máquina-ferramenta	6
4.1.1	Sistema de Fixação da Peça.....	7
4.2	Fluidos de Corte	8
4.3	Testes com Parâmetros de Corte.....	8
4.4	Testes de Propriedades dos Fluidos	9
4.4.1	Teste de Viscosidade.....	9
4.4.2	Teste de Molhabilidade	10
4.5	Análise Estatística para Validação dos Testes	11
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	11
5.1	Avaliação de Desempenho das Operações de Corte	11
5.1.1	Desempenho das Operações com Fluido de Corte Vegetal do Fornecedor B.....	12
5.1.2	Desempenho das Operações com Fluido de Corte Vegetal do Fornecedor A.....	12
5.1.3	Desempenho das Operações com Fluido de Corte Mineral do Fornecedor A	12
5.2	Análise dos Fluidos de Corte.....	13
5.2.1	Teste de Viscosidade.....	13
5.2.2	Teste de Molhabilidade	13
6	CONCLUSÕES.....	15
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1 INTRODUÇÃO

No mercado atual uma empresa necessita ser competitiva. Para isto, todos os fatores envolvidos na produção devem ser avaliados a fim de cortar desperdício ou diminuir os custos de produção, seja em uma peça de alta produção que custe centavos, seja em um componente aeroespacial de alguns milhares de dólares. Para isso são necessários ganhos de produtividade, redução de refugos, automação de processos, desenvolvimento de novos produtos e matéria-prima, dentre outros.

Neste trabalho foi analisada uma das etapas do processo de fabricação de um cilindro de motosserra, fundido em liga alumínio-silício, usinado, cromado e brunido. Estudou-se a usinagem em altas velocidades HSM (*high-speed machining*) em algumas partes desta peça, executadas principalmente com ferramentas de diamante policristalino PCD (*polycrystalline diamond*). Este processo produz 51 peças por hora. Para atender à demanda mensal, o mesmo ocupa dois centros de usinagem 24 horas por dia, 6 dias por semana, além de uma terceira máquina que é utilizada durante parte do mês. Sendo assim, caso seja possível aumentar a produção das duas máquinas que estão 100% envolvidos no processo de fabricação, além do ganho em produtividade, é possível diminuir a quantidade de *setups* da terceira máquina, reduzindo os tempos improdutivos de fabricação. Na condição atual, todos os parâmetros de corte já se encontram otimizados com o fluido atualmente utilizado.

A fim de buscar por mais possibilidades de aperfeiçoamentos, foi estudada a influência que a substituição de um tipo de fluido de corte por outro traria para o processo de usinagem. O fluido é uma variável independente de entrada que atua amplamente no processo. Por estar presente em todas as etapas da produção, qualquer ganho que uma nova tecnologia aplicada a lubrificantes possa trazer é sempre válida. Considerando que este mercado encontra-se em expansão, existem alternativas interessantes, porém apenas duas delas irão receber a atenção deste estudo: os óleos emulsionáveis de base vegetal de dois fornecedores (A e B).

Existem grandes possibilidades de ganhos em caso de resultados positivos vinculados a este trabalho em função de a fábrica possuir 51 centros de usinagem produzindo variações de cilindros de motosserra, além de outras máquinas e equipamentos com outras concepções produzindo componentes usados nos mesmos.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Buscar a redução dos tempos de fabricação de um cilindro de motosserra, fundido em uma liga alumínio-silício hipoeutética, através do incremento na velocidade de corte e/ou na velocidade de avanço da ferramenta em diferentes processos de usinagem HSM através da alteração do fluido de corte.

2.2 Específicos

Investigar a influência do uso de três diferentes tipos de fluidos de corte (óleo vegetal dos fornecedores A e B e óleo mineral do fornecedor A) quanto ao desempenho do processo através da avaliação estatística da aptidão (capacidade e capacidade) dos processos de usinagem HSM. Testar comparativamente a viscosidade e a molhabilidade de cada fluido sobre superfície de alumínio (simulando a superfície da peça).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente considerada como o estado da arte em termos de usinagem, a tecnologia de altíssimas velocidades (HSC ou HSM) foi desenvolvida há mais de 80 anos. O método criado por C. Salomon e foi patenteado em 27 de abril de 1931, na Alemanha. A patente foi

concedida à Friedrich Krupp AG. Depois de décadas relegada ao esquecimento, a tecnologia ressurgiu nos anos 80 a partir de estudos realizados em vários países, especialmente na Alemanha. Nos anos 90, a tecnologia começou a chegar ao ambiente industrial. Hoje, pode-se dizer que a HSC/HSM já garantiu seu espaço na fabricação, especialmente nos segmentos de peças aeronáuticas, automobilísticas e de moldes e matrizes, com grande potencial ainda para ocupar outros nichos [Vieira, 2003].

Segundo o *Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen* (IPTW) da Universidade Técnica de Darmstadt, altas velocidades de corte se caracterizam por velocidades que excedem de 5 a 10 vezes as consideradas convencionais.

O emprego de HSC/HSM vem aumentando no mercado, já que estudos apontam uma relação de alta qualidade de acabamento superficial, o que pode em certos casos dispensar operações de acabamento subsequente. Essa economia de tempo gera consequentemente ganho em produtividade. Os principais campos de operação HSC/HSM se encontram na fabricação de moldes e matrizes e também indústrias automobilísticas e aeroespaciais. No primeiro campo visa-se a qualidade no acabamento superficial. Já no segundo, altas taxas de remoção de material são mais importantes.

Existe uma diferença entre HSC (*high speed cutting*) e HSM (*high-speed machining*). Nas usinagens em HSC, o importante é a alta rotação da ferramenta, aliado a relativamente pequenos avanços e profundidades de corte, visando bom acabamento com boa taxa de remoção de material. Quando HSM acontece, a capacidade de remoção de material é maior, pois a velocidade de avanço e a profundidade de usinagem são maiores que na HSC, objetivando ganho na produtividade [Santos *et al.*, 2003].

As tecnologias HSC e HSM necessitam de um controle capaz de aliar alta rotação e velocidade de avanço, evitando a ocorrência de vibrações, que são indesejadas nesse processo de fabricação. Dessa forma, o desempenho das ferramentas, máquinas e softwares limitam o emprego de velocidades de corte ainda maiores [Santos *et al.*, 2003]. Em alguns casos, na usinagem em HSC os ganhos em tempo no processo de fabricação não são significativos, já que mesmo operando com altíssimas rotações, o avanço por rotação é mínimo, assim como a profundidade de remoção de material. Logo, as vantagens nesse processo estão relacionadas à qualidade superficial da peça e à eliminação de processos posteriores de acabamento.

3.1 Usinagem de Ligas Alumínio-Silício (Al-Si)

As ligas Al-Si são divididas em três grupos segundo o teor de silício presente: ligas hipoeutéticas com 5-10% em peso de Si, ligas eutéticas com 11-13% de Si e ligas hipereutéticas com 14-20% de Si [Ferrarini, 2005]. As microestruturas obtidas por fundição destes três grupos de liga podem ser vistas na Figura 3.1.

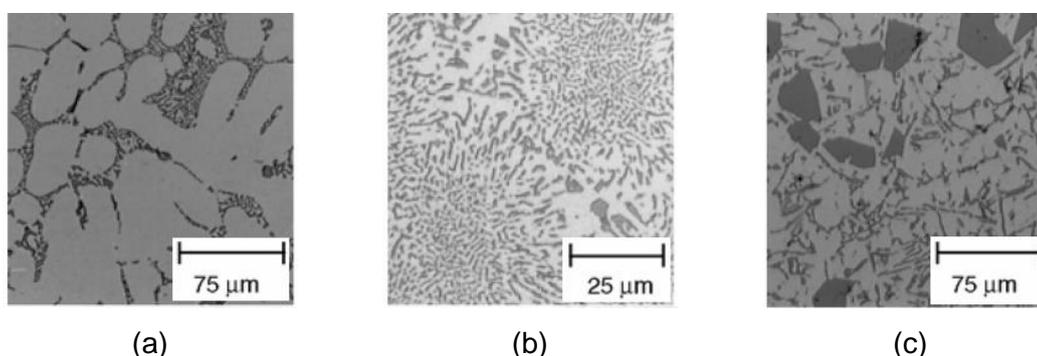


Figura 3.1 – Microestrutura bruta de fusão de uma liga Al-Si: (a) hipoeutética; (b) eutética; (c) hipereutética [Ferrarini, 2005].

As pesquisas na usinagem de alumínio estão restritas principalmente a ligas fundidas de alumínio-silício, entre 17 e 23% de silício, utilizadas hoje na indústria automobilística e aeronáutica. Os grãos grandes de silício aumentam demasiadamente o desgaste, até quando

se usa ferramentas de metal duro. Assim, a usinagem das ligas Al-Si hipereutéticas é uma das mais importantes aplicações para as ferramentas PCD [Trent e Wright, 2000], e só podem ser usinadas satisfatoriamente com estas ferramentas, sendo que a velocidade de corte deve ser diminuída com o aumento do teor de Si [Weingaertner e Schroeter, 1990].

Como as ligas fundidas de Al-Si hipoeutéticas contêm até 10% de silício em sua estrutura, pode-se aumentar a velocidade de corte até um valor considerado aceitável.

A usinagem do alumínio por si só não é prejudicial para as ferramentas, pois este apresenta baixo ponto de fusão (em torno de 650°C), possui baixa dureza e desliza bem sobre a superfície da ferramenta. Operações de corte com este material normalmente não necessitam de lubrificação/refrigeração. Porém, em alguns casos a utilização de fluido é fundamental, como será descrito em maiores detalhes na Seção 3.3.

Neste trabalho, a peça (cilindro de motosserra) é produzida em liga de alumínio-silício hipoeutética, com necessidade de grande precisão dimensional, em algumas operações na casa dos 10 µm de tolerância na sua medida. A usinagem das ligas Al-Si é complicada porque o alumínio é de fácil corte, porém o silício se apresenta na forma de partículas duras e de alto ponto de fusão (1420°C). Sendo assim, a usinagem desta liga se torna difícil pelo caráter abrasivo que o mesmo possui sobre a interface ferramenta-cavaco e tanto lubrificação quanto refrigeração é exigida do fluido de corte.

3.2 Usinagem com Ferramentas PCD

Novas ligas metálicas são descobertas com frequência, pois o seu interesse em determinadas áreas de aplicação é considerável em função das altas resistências aliadas a baixos pesos específicos. Para usinar estes materiais também há o desenvolvimento de ferramentas e insertos capazes de suportar as características dos processos de fabricação destes materiais. Entre estes materiais para as ferramentas está o diamante sintético policristalino, na forma de inserto, de camada protetora ou então de vapor, para deposição sobre ferramentas de metal duro. As ferramentas de diamante apresentam custo elevado; porém, devido à alta vida das mesmas em processos, elas são consideradas a melhor relação custo-benefício na usinagem dessas ligas.

Na prática, insertos totalmente desenvolvidos em diamante natural monocristalino são extremamente caros e não são viáveis comercialmente. Assim, o PCD (*polycrystalline diamond*) mostra-se viável, pois se trata de um inserto de metal duro que recebe uma cobertura de 0,5 mm a 2 mm de espessura de diamante soldada por brasagem, e o PVD (*physical vapor deposition*), onde o inserto recebe uma película de vapor de diamante [Andresawa *et al.*, 2000].

O PCD é bastante adequado para a usinagem HSM, em função de sua alta resistência aliada a uma vida extremamente longa entre trocas de insertos. Isto é fundamental para processos contínuos, pois evita paralisações para trocas de ferramentas ou, na falha do mecanismo que estima o tempo da troca, seja ele por medição dimensional seja por número de peças, evita produção de sucatas ou retrabalhos posteriores. Vale dizer que tanto tempo de máquina parada quanto retrabalho e/ou sucata são improdutivos e por isso não agregam valor ao produto ou geram produção.

Outra grande vantagem do PCD é transmitir muito pouco calor, o que evita aquecimento de porta-ferramenta, eixo-árvore e outros. Na prática, isto significa redução na variação dimensional da peça por aquecimento do sistema máquina/ferramenta/peça. Além disso, a ferramenta não sofre com os choques térmicos prejudiciais às ferramentas quando é usado meio refrigerante, e resiste a altíssimas temperaturas de processo [Santos *et al.*, 2003].

Para provar a sua eficácia, em um teste realizado por Andresawa *et al.*, 2000, foi realizada uma operação de torneamento a uma velocidade de corte de 190 m/min com ferramentas de PCD, PVD e CBN (*Cubic Boron Nitride*) em uma liga Duralcan (liga alumínio-silício hipoeutética) sem meio lubrificante e o resultado foi uma vida útil de 52 min de operação para a ferramenta de PCD e 19 min para a mesma em PVD, enquanto a ferramenta de CBN durou alguns segundos.

3.3 Influência do Fluido de Corte na Usinagem HSM em Alumínio

O estudo dos fluidos de corte é tão importante quanto o desenvolvimento de novos materiais e ferramentas. Este mercado sempre foi muito explorado, porém somente nos últimos anos é que chegaram ao Brasil as mais novas tecnologias nesta área.

Existem basicamente dois tipos de fluidos a serem usados na usinagem HSM de alumínio: *fluidos integrais* e *fluidos emulsionáveis*. Os primeiros são de mais fácil utilização, são mais resistentes às contaminações, são mais utilizados em máquinas em regime descontínuo de fabricação (como ferramentarias) e são mais caros. Os segundos usam emulgadores e podem ser misturados à água durante o abastecimento, contém aditivos, são mais utilizados em máquinas em regime contínuo de fabricação e são mais baratos [Santos *et al.*, 2003].

Em usinagem convencional, o meio lubrificante-refrigerante tem as funções de lubrificação e de refrigeração, sendo que a primeira é a mais importante neste caso em função da geração de calor não ser excessivamente alta. Como funções secundárias, tem-se a ajuda na remoção do cavaco da zona de corte e a proteção tanto da peça quanto da máquina-ferramenta contra a oxidação. Em processos convencionais, normalmente utiliza-se refrigeração em abundância.

Já em usinagem HSM normalmente não se utiliza refrigeração em função da dificuldade de penetração do fluido na interface cavaco-ferramenta e da geração de névoa, função das altíssimas velocidades e rotações atingidas pela ferramenta [Santos *et al.*, 2003]. Em alguns casos, considerando exceções, é necessário o uso do meio líquido no processo. Entre as vantagens da utilização de fluido de corte na usinagem HSM estão:

- aumento da vida da ferramenta pela refrigeração e/ou lubrificação;
- redução das forças de corte e, por consequência, potência necessária;
- melhora no acabamento superficial da peça;
- remoção do cavaco da zona de corte;
- diminuição da distorção da peça pela ação do calor.

Já entre as desvantagens da utilização de fluido de corte estão:

- promoção de choques térmicos que levam a avarias nas ferramentas de cerâmica;
- aceleração do aparecimento de sulcos em forma de dentes no fresamento com metal duro;
- geração de vapores de fluido de corte;
- possibilidade de dermatites quando em contato com a pele e pulmões do operador;
- elevação de custos no processo.

Alguns aspectos se aplicam a determinadas operações e outros não, cada caso deve ser analisado isoladamente.

A usinagem de alumínio geralmente não utiliza fluido de corte, pois o alumínio funde a baixas temperaturas, o que implica em baixas temperaturas na ferramenta, não demandando refrigeração e, por ser um metal de fácil corte, normalmente não precisa de lubrificação. Porém, de acordo com [Santos *et al.*, 2003], a usinagem de alumínio demanda meio lubrificante-refrigerante em algumas situações, tais como:

- peças com tolerâncias apertadas e geralmente com paredes estreitas, suscetíveis a dilatações térmicas;
- operações com cavacos longos, devido à alta área de contato;
- furações profundas e/ou cegas;
- usinagem de ligas alumínio-silício.

Todas as características citadas se enquadram de alguma forma nos processos envolvidos na fabricação do cilindro de motosserra. Pelo alumínio ser um excelente condutor de calor, as dilatações podem dificultar a obtenção de tolerâncias apertadas, e a peça em estudo possui paredes finas. Por se tratar de um processo que utiliza HSM, a geração de cavaco é elevada e o fluido de corte sob pressão faz-se necessário na extração de cavacos e outros resíduos a fim de que estes não retornem para a região de corte (estes resíduos podem danificar o acabamento), a peça possui furações (necessidade de remoção de cavacos) e ainda é executada em liga alumínio-silício.

3.4 Indicadores de Aptidão de Processos

Um processo industrial em produção contínua necessita ser estável para ser confiável. Ao mesmo tempo, este mesmo processo precisa atender a especificações dimensionais relativas à funcionalidade do componente.

O processo de fabricação é avaliado através da *aptidão* do processo ou da máquina em se fabricar determinados componentes dentro dos limites especificados. Convenciona-se que o processo ou o equipamento seja capaz de produzir peças, de tal forma que 99,73% das peças produzidas fiquem dentro das especificações, ou seja, estejam dentro do intervalo de valores mais ou menos três vezes o desvio padrão. Esta aptidão pode ser medida através dos índices de *Capacidade* (C_p) e *Capabilidade* (C_{pk}).

O índice de capacidade (C_p) é a aptidão que o processo tem de produzir peças em que apenas 0,27% destas sairão fora da tolerância delimitada pela diferença entre os limites superior e inferior de especificação (respectivamente LSE e LIE). Convenciona-se que um processo é totalmente capaz quando $LSE - LIE \geq 8 \cdot s$ (99,99%). Assim, $C_p \geq 8/6 = 1,33$ (Equação 3.1) [Cysi *et al.*, 2008].

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6 \cdot s} \geq 1 \quad (3.1)$$

Somente a determinação de C_p não é suficiente para definir o processo, pois não informa se o mesmo está em torno da média. Assim, define-se o índice de capabilidade do processo (C_{pk}) pela Equação 3.2 [Cysi *et al.*, 2008]:

$$C_{pk} = \min \left(\frac{LSE - \bar{X}}{3 \cdot s}; \frac{\bar{X} - LIE}{3 \cdot s} \right) \quad (3.2)$$

Onde: \bar{X} = média da amostra; s = desvio-padrão da amostra.

Capabilidade do processo é a habilidade da máquina em executar de maneira eficiente um trabalho com certo grau de exatidão, repetitividade, reprodutibilidade e estabilidade. O critério usado para se obter um processo capaz deve apresentar $C_{pk} \geq 1,33$. Isto significa dizer que o processo deve operar dentro de no máximo $1/1,33 = 75\%$ da tolerância.

Os índices de aptidão $C_p \geq 1,67$ e $C_{pk} \geq 1,33$ são usados pela empresa como limites mínimos de capacidade e capabilidade quando se trata da avaliação de um processo com um grupo pequeno de peças medidas (até 30 peças). Porém, estes valores limites podem ser maiores, quando a avaliação recai sobre a avaliação de uma máquina-ferramenta, ou menores, quando se trata da avaliação de um processo com um grupo grande de peças medidas. As empresas que usam esta metodologia para avaliar seus processos costumam estabelecer regras para que valores adotados para cada tipo de avaliação [Cysi *et al.*, 2008].

4 METODOLOGIA

A peça utilizada neste estudo é um cilindro de motosserra. Antes de chegar ao processo de usinagem, a peça é fabricada em liga alumínio-silício hipoeutética através de um processo de fundição sob pressão em uma matriz metálica de molde permanente. As rebarbas geradas no processo são removidas antes da usinagem, a fim de que as mesmas não influenciem na fixação e não causem ferimentos aos operadores dos processos posteriores. A Figura 4.1 mostra a foto da peça produzida antes e depois da usinagem.

A peça possui paredes finas a fim de diminuir a parcela de peso do componente no produto final. Isto traz um desafio para o processo de fabricação, pois o aquecimento da peça pode influenciar nas dimensões da mesma. Além disso, por mais que o alumínio seja de fácil corte, as ferramentas sejam capazes de suportar muito bem as altas velocidades de corte e o

centro de usinagem possua reserva de potência, a partir de certo momento, a força de usinagem pode deformar a mesma, transformando-a em sucata.

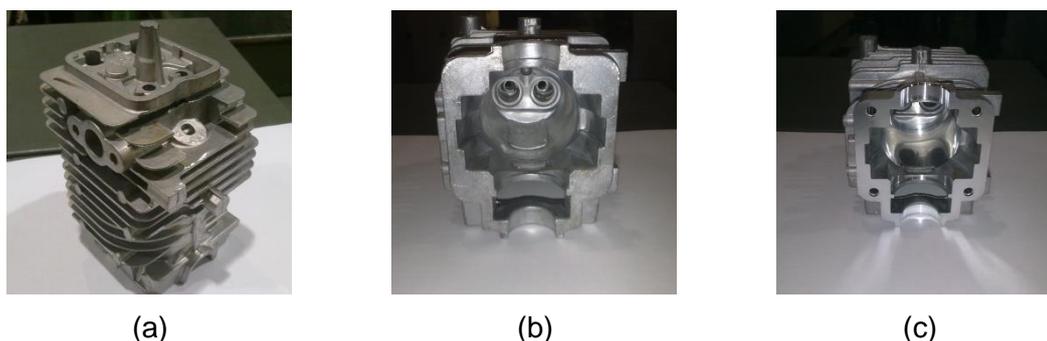


Figura 4.1 – O modelo de peça utilizado no estudo: (a), (b) antes da usinagem; (c) depois da usinagem.

O ciclo de usinagem da peça conta com diferentes operações de corte, numerados na Figura 4.2 conforme a ordem em que são executadas e descritas a seguir.

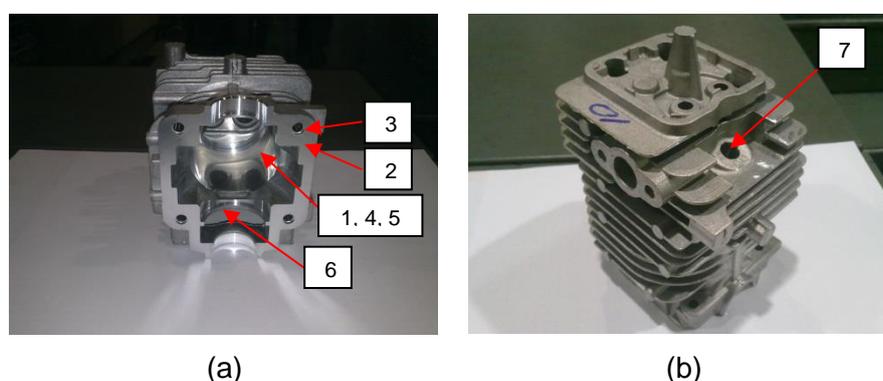


Figura 4.2 – Sequência da usinagem e localização na peça

1. **Alargamento de desbaste** da pista em que o pistão vai deslizar no produto acabado, executado com uma barra de mandrilhar contando com dois insertos em PCD. A Figura 4.3a ilustra a geometria desta ferramenta quando montada.
2. **Faceamento** da base da peça, feito com uma fresa de diâmetro 100 mm e munida de cinco insertos em PCD em um único passe (Fig. 4.3b).
3. **Furação passante com chanframento integrado**, executada com uma broca escalonada e geometria conforme Figura 4.3c.
4. **Alargamento de acabamento** da superfície onde desliza o pistão, feito com um alargador com seis insertos em PCD (Fig. 4.3d).
5. **Fresamento** de um rasgo no fundo da superfície onde corre o pistão, executado por interpolação circular com fresa de diâmetro 25 mm e dois insertos em PCD (Fig. 4.3e).
6. **Fresamento** de duas superfícies semicirculares, onde serão assentados rolamentos e retentores de vedação no produto final, executado com uma fresa de perfil (Fig. 4.3f).
7. **Furação passante** com uma broca escalonada com diâmetro final de 10 mm (Fig. 4.3g).

4.1 Máquina-ferramenta

A máquina-ferramenta utilizada nos testes foi o Centro de Usinagem CNC Chiron com comando Siemens 840 D (Fig. 4.4). Possui magazine para até 20 ferramentas que se desloca junto com o eixo-árvore a fim de tornar a troca das ferramentas mais rápida. Tem capacidade

para fixação de dois *pallets*, de imprimir giro de até 350° em ambos os *pallets* e de trocar o *pallet* quando um ciclo de usinagem é concluído. Isto permite a retirada das peças prontas e a preparação de novas peças enquanto um ciclo de usinagem é concluído.

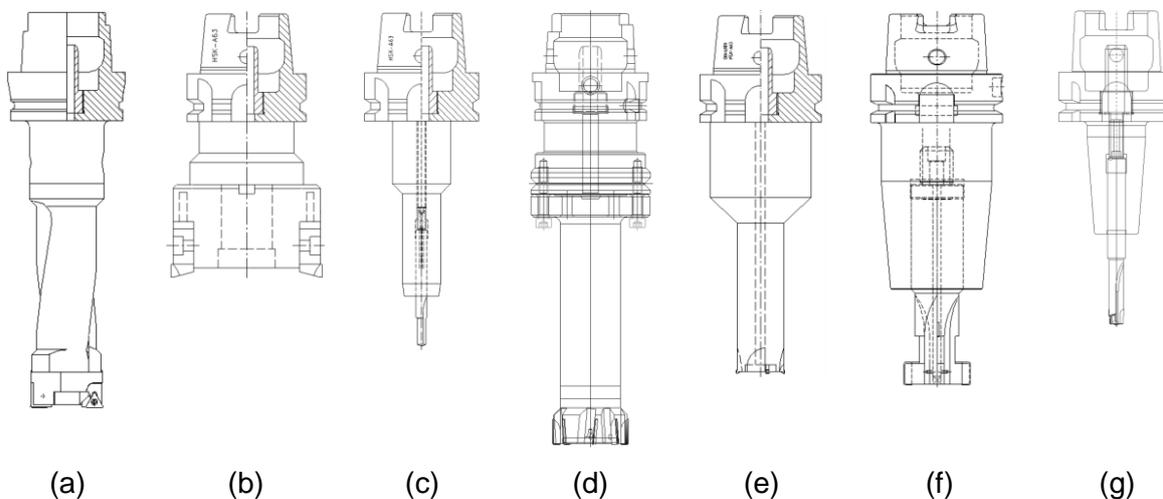


Figura 4.3 – Desenho das ferramentas utilizadas nas etapas de fabricação:
(a) 1ª; (b) 2ª; (c) 3ª; (d) 4ª; (e) 5ª; (f) 6ª; (g) 7ª.



Figura 4.4 – Centro de Usinagem CNC Chiron.

Esta máquina conta ainda com eixo principal capaz de girar até 20000 rpm, porém, convencionou-se na empresa a não ultrapassar a rotação de 19000 rpm a fim de poupar o mesmo. A refrigeração durante a usinagem se dá através de 3 a 4 jatos externos de lubrificador a uma pressão de 3 bar, focando diretamente na região da usinagem. Para as ferramentas que possuem canais internos de lubrificação, um jato de fluido a uma pressão de 30 bar é direcionado diretamente na região de corte.

O fluido usado no processo escoia até uma canaleta na parte inferior da máquina, caindo depois em uma esteira que separa os cavacos do óleo, levando os resíduos sólidos para uma caçamba e retornando o fluido para o tanque, a fim de ser mantido refrigerado a uma temperatura máxima de 25°C e novamente pressurizado para o processo. Para obter estabilidade na temperatura do fluido e evitar dilatação tanto na máquina quanto nas peças, o volume do tanque é de 1500 litros.

4.1.1 Sistema de Fixação da Peça

A fixação de uma peça oriunda de um processo anterior pode se tornar um problema quando as tolerâncias dimensionais exigidas são estreitas. O dispositivo de fixação (Fig. 4.5)

tem capacidade para três peças por vez. A fixação se dá através de pinos posicionadores de acionamento hidráulico na base da peça e por grampos, também de acionamento hidráulico, na parte superior da peça.



Figura 4.5 – Dispositivo de fixação das peças na máquina.

A maior dificuldade encontrada na fixação é que a peça não pode ser presa no dispositivo de maneira adequada, uma vez que esta não suporta alta rigidez de fixação. Quando se aumentam os parâmetros de corte, aumenta-se também esta rigidez necessária à fixação. Porém, chega-se a um limite em que os esforços acabam por causar deformações permanentes a esta peça, inutilizando-a. E ainda parâmetros de usinagem muito altos podem acabar deslocando-a na fixação durante a usinagem, prejudicando suas características dimensionais. O processo ideal é fixar a peça com o máximo de rigidez possível e usar os parâmetros os mais altos obtidos sem que a peça se desloque durante a usinagem.

4.2 Fluidos de Corte

O processo de usinagem em questão já utiliza fluido de corte mineral a uma concentração de 16%, e os parâmetros de usinagem utilizados já se encontram otimizados para este fluido fabricado pelo fornecedor A. Este produto é confiável e já está há bastante tempo no mercado; no entanto existem produtos tecnologicamente superiores. Para o caso da HSM em liga Al-Si, o fornecedor A foi consultado a respeito de um produto com características superiores. Este ofereceu à empresa em que foi desenvolvido o trabalho a solução de fluido de corte vegetal a uma concentração de 8%. É um produto ainda novo no mercado brasileiro, mas trabalhos feitos no exterior mostraram ganhos em parâmetros de corte na ordem de 20 a 30%, de acordo com o fornecedor.

A fim de buscar outras alternativas, também foi procurado o fornecedor B que, ao conhecer o processo, recomendou também o uso de um fluido de corte vegetal de sua linha, porém a uma concentração de 10%. Da mesma forma que o fornecedor A, o produto do fornecedor B é recém-chegado no Brasil, mas estudos feitos no exterior também mostraram ganhos na ordem de 30%. Como os fluidos vegetais dos fornecedores A e B são mais caros, custando em média o dobro do preço em relação ao fluido mineral semissintético atualmente em uso, uma análise de viabilidade econômica mostrou-se necessária.

4.3 Testes com Parâmetros de Corte

O aumento da velocidade de corte (v_c) reduz o esforço necessário ao corte, reduzindo também o esforço que tende a deslocar a peça no dispositivo de fixação (Fig. 4.5). Porém, o aumento da velocidade de corte também aumenta a velocidade de avanço da ferramenta (v_f) – pois a rotação (n) aumenta – se for mantido o avanço por volta da ferramenta (f) utilizado até agora, o que acaba por aumentar este esforço [Souza, 2011]. Considerando que os dois efeitos se anulem, é esperado que a força que pode deslocar a peça varie pouco. Porém, pode gerar vibrações durante a usinagem.

Sendo assim, a cada etapa de testes foi aumentada a velocidade de corte em 10% em relação ao que foi testado anteriormente, tendo como ponto de partida os parâmetros já

utilizados com o fluido de corte mineral semissintético usual. Este procedimento foi validado para as ferramentas maiores, pois estas geram forças que tendem a forçar a peça contra as partes móveis do dispositivo de fixação. Isto ocorre, por exemplo, no caso da fresa que faz o faceamento da base (vide Fig. 4.3b): ela força a peça contra os pinos da base; e no caso dos alargadores (vide Fig. 4.3a e Fig. 4.3d), que além de tenderem a torcer a peça na fixação, empurram a mesma contra os grampos superiores.

Para as ferramentas menores (brocas), este procedimento não foi utilizado, pois a máquina já está no limite máximo de n [rpm] utilizável e por isso, não é possível aumentar v_c [m/min]. Sendo assim, a metodologia adotada foi aumentar somente o avanço f da ferramenta em proporção igual ao aumento de v_c nas demais etapas, uma vez que o maior risco é a quebra da ferramenta e não o deslocamento/deformação da peça devido às forças geradas.

Em geral, a HSM dispensa o meio lubrificante, pois com a alta velocidade, o tempo de contato ferramenta/peça é tão pequeno que as partes pouco se aquecem, proporcionando um processo adiabático (no qual não há troca de calor). Quando muito, é utilizado apenas ar comprimido [Santos *et al.*, 2003]. Além disso, a eficiência do meio lubrificante dependerá da habilidade de penetrar nas interfaces ferramenta-peça e cavaco-ferramenta no curto período de tempo disponível durante a ação do corte e de formar um filme com resistência ao cisalhamento menor que a resistência do material da peça [Souza, 2011]. Como os fluidos de corte a serem testados têm a promessa de seus fornecedores de serem melhores lubrificantes espera-se que a alteração dos produtos propicie uma redução do coeficiente de atrito nas interfaces mesmo em altíssimas velocidades de corte, reduzindo as vibrações. A Tabela 4.1 resume os parâmetros de corte usados de acordo com cada teste.

Tabela 4.1 – Parâmetros de usinagem utilizados nos testes práticos.

Seq.	Nome da operação	Parâmetros orig.		Aumento 10%		Aumento 20%		Aumento 30%		Aumento 40%	
		RPM	f (mm/rot)	RPM	f (mm/rot)	RPM	f (mm/rot)	RPM	f (mm/rot)	RPM	f (mm/rot)
1	Desbastar Ø principal	6800	0,20	7480	0,20	8160	0,20	10608	0,20	13790	0,20
2	Facear base	14000	0,80	15400	0,80	16800	0,80	21840	0,80	28392	0,80
3	Furar base	19000	0,15	19000	0,17	19000	0,18	19000	0,20	19000	0,21
4	Usinar Acab. do Principal	1200	0,08	1320	0,08	1440	0,08	1872	0,08	2433,6	0,08
5	Usinar Ø do anel	10000	0,60	11000	0,60	12000	0,60	15600	0,60	20280	0,60
6	Usinar Mancais	7500	0,30	7500	0,30	7500	0,30	7500	0,30	7500	0,30
7	Furar Furo da Vela	19000	0,35	19000	0,39	19000	0,42	19000	0,46	19000	0,49

A tabela mostra a sequência das operações na usinagem, o nome da operação, os parâmetros originais utilizados no processo – rotações por minuto (n) e avanço por volta (f) – impostos a cada ferramenta e ainda as novas propostas de dados de corte que serão testadas nas etapas a seguir. As linhas em laranja representam os parâmetros que tiveram apenas f aumentado e a linha em amarelo a operação que não teve ajustados os parâmetros de corte por conta da sua criticidade no processo.

4.4 Testes de Propriedades dos Fluidos

4.4.1 Teste de Viscosidade

A viscosidade dos fluidos de corte é importante, pois quanto mais viscoso, mais o mesmo pode encontrar dificuldade em penetrar na aresta de corte. Portanto, esta característica deve ser avaliada a fim de procurar diferenças e/ou semelhanças entre os fluidos testados.

Existem diversas formas de medir a viscosidade de líquidos, uma delas é o viscosímetro de esfera (Fig. 4.6). Neste, faz-se cair em queda livre uma esfera através do fluido e, após esta desenvolver a velocidade terminal de queda livre, mede-se a velocidade que a mesma atingiu, medindo o tempo de passagem através de duas referências fixas [Potter *et al.*, 2004].

Após o teste é necessário aferir a aceleração gravitacional do local do teste (g) em m/s^2 , o diâmetro da esfera (D) em metros, a densidade da esfera (ρ_s) em kg/m^3 , a densidade do fluido (ρ_f) também em kg/m^3 e a velocidade terminal de queda livre do fluido (V) em m/s .

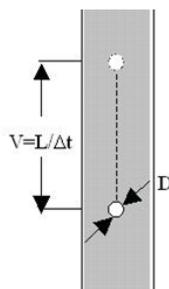


Figura 4.6 – Teste de viscosidade com viscosímetro de esfera.

De posse dos dados mencionados, define-se a viscosidade do fluido (μ) através da lei de Stokes, conforme Equação 4.1 [Potter *et al.*, 2004].

$$\mu = \frac{1}{18} \cdot \frac{g \cdot D^2 \cdot (\rho_s - \rho_f)}{V} \quad (4.1)$$

Não existem estudos específicos que determinem se o fluido é melhor ou pior para um processo que associem o mesmo à sua viscosidade, e muito menos se esta relação viscosidade/qualidade é linear. Portanto, o resultado deste teste será apenas comparativo.

4.4.2 Teste de Molhabilidade

A molhabilidade, ou seja, capacidade do fluido de molhar a superfície das peças e/ou ferramentas, é tão importante quanto o próprio fluido em questão. Juntamente com a viscosidade, pode revelar diferenças e/ou semelhanças existentes entre os fluidos e ajudar a explicar alguns dos resultados obtidos com parâmetros de corte.

De acordo com Luz *et al.*, 2008, a molhabilidade pode ser medida através da medição do ângulo θ que a linha tangente à projeção da gota do líquido na interface com o sólido. Na Figura 4.7 podem ser vistos três exemplos de como a molhabilidade afeta θ . Quando $\theta > 90^\circ$ diz-se que não houve molhamento; quando $0^\circ < \theta < 90^\circ$ houve molhamento; e quando $\theta = 0^\circ$ o líquido se espalhou completamente pela superfície, isto é, houve molhamento total. Assim, quanto menor θ , maior a molhabilidade do líquido sobre o sólido.

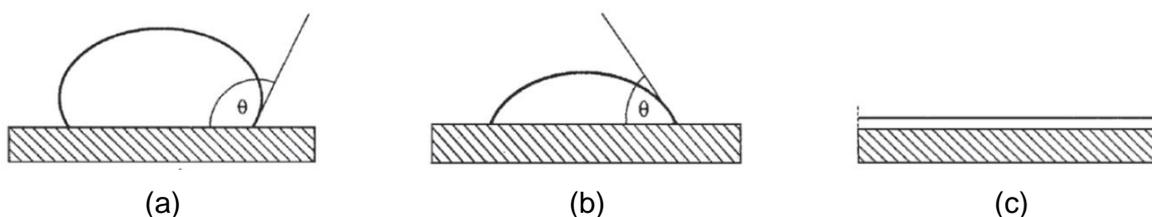


Figura 4.7 – Ângulo θ do teste de molhabilidade: (a) não-molhabilidade; (b) molhabilidade parcial; (c) molhabilidade total.

Outros fatores que afetam θ , além do tipo do sólido e do líquido, são [Luz *et al.*, 2008]:

- **Qualidade:** a superfície do meio sólido deve ser lisa, plana, horizontal, quimicamente homogênea, inerte e estável em altas temperaturas na atmosfera de teste.
- **Compatibilidade:** não podem ocorrer reações entre os dois meios durante o teste.
- **Atmosfera:** a atmosfera pode acabar por reagir com os meios de teste, afetando o resultado.
- **Tempo:** em altas temperaturas, o meio líquido pode evaporar ou penetrar no meio sólido em um determinado intervalo de tempo.
- **Temperatura:** em altas temperaturas, o meio líquido pode evaporar ou ter sua viscosidade diminuída, afetando o resultado.

Considerando-se que o objetivo era comparar as emulsões, a molhabilidade não foi calculada, sendo apenas medido o ângulo θ de modo a verificar quais os óleos molhavam melhor. O teste foi realizado sobre uma superfície de alumínio, para simular a peça, polida com lixa 400 (diminuir as irregularidades da superfície) e à temperatura de 25°C (valor que o sistema de resfriamento mantém a emulsão no tanque).

Da mesma forma que na viscosidade, não existem estudos que mostrem faixas de valores ideais para a molhabilidade de fluidos de corte, sendo assim os valores obtidos servirão para comparação entre os produtos.

4.5 Análise Estatística para Validação dos Testes

Com o intuito de validar os aumentos realizados nos parâmetros de corte, a metodologia adotada foi a usinagem de seis peças, ou seja, uma etapa completa com cada um dos dois dispositivos de usinagem que estão na máquina após um aumento nos parâmetros. Estas peças foram medidas em uma máquina de medição por coordenadas (MMC) para verificar se elas tinham as características dimensionais e geométricas dentro das especificações.

A rugosidade não foi avaliada. Ela é importante para a peça; porém, historicamente, verificou-se que as peças que não possuíam rugosidade adequada não atendiam às tolerâncias exigidas pelo projeto – algumas inclusive na ordem de 10 μm (como no caso do alargamento de acabamento). Quando as peças atenderam às dimensões exigidas nessa pequena amostra, um lote de 300 peças foi usinado e uma amostragem de 30 unidades foi novamente medida, visando verificar os índices de capacidade ($C_p \geq 1,67$) e capacidade ($C_{pk} \geq 1,33$) do processo.

Deve-se ressaltar que as 300 peças não foram mensuradas por conta do tempo que este procedimento tomaria; então foi tomada apenas a amostra de 30 peças deste lote para a medição. Durante este período de medição, o centro de usinagem permaneceu em operação com os parâmetros que já se encontravam aprovados no teste anterior para melhor observar os efeitos por um maior período de tempo. Quando o lote de 30 peças encontrava-se dentro da faixa de especificação, foi testada a próxima coluna com novos parâmetros até que o processo deixasse de apresentar os índices exigidos ($C_p < 1,67$ e/ou $C_{pk} < 1,33$), ou quebrasse alguma ferramenta ou ainda pudesse surgir outra causa especial.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Avaliação de Desempenho das Operações de Corte

Os três fluidos de corte testados tiveram as peças fabricadas com os aumentos de parâmetros conforme a Tabela 4.1 e avaliados conforme a Seção 4.3, sendo que a ordem de execução dos testes foi: (1) testes com o fluido de corte vegetal do fornecedor B; (2) testes com o fluido de corte vegetal do fornecedor A; (3) testes com o fluido de corte mineral do fornecedor A – atualmente em uso na maioria da fábrica. Estes seguiram esta ordem por conta da disponibilidade de tempo para troca de todo o volume do fluido.

Para os cálculos dos índices de capacidade (C_p) e capacidade (C_{pk}) foi usado o Software QS-Stat, disponível na empresa em que foram realizados os testes. A vantagem de sua utilização é que este possui muitas outras ferramentas estatísticas que auxiliam na identificação de problemas no processo e também permite identificar pontos que não pertencem a uma determinada sequência de medição, atribuindo a estes a caracterização de “causa especial” e excluindo do estudo.

A Tabela 5.1 mostra os valores dos índices C_p e C_{pk} obtidos para as amostras de 30 peças dentre as 300 fabricadas utilizando os três fluidos de corte mencionados.

Durante os testes com o fluido de corte vegetal do fornecedor B verificou-se que havia uma causa especial afetando o resultado da usinagem com parâmetros aumentados: a vibração na fresa que realiza a usinagem do anel (vide Fig. 4.3e) por ser relativamente longa em relação ao seu diâmetro.

Tabela 5.1 – Parâmetros de corte utilizados nos testes.

Característica dimensional	Mineral fornecedor A				Vegetal fornecedor A						Vegetal fornecedor B							
	Original		Aumento 10%		Original		Aumento 10%		Aumento 20%		Original		Aumento 10%		Aumento 20%		Aumento 30%	
	Cp	Cpk	Cp	Cpk	Cp	Cpk	Cp	Cpk	Cp	Cpk	Cp	Cpk	Cp	Cpk	Cp	Cpk	Cp	Cpk
Planicidade da base	4,35	5,54	4,09	3,37	7,04	20,59	7,15	6,44	6,32	9,47	6,3	6,4	6,07	5,42	5,33	10,70	4,74	7,43
Diâmetro furo 1	9,03	5,79	8,53	7,65	5,05	3,92	4,92	3,87	6,91	4,52	2,9	2,32	6,52	4,12	5,42	3,68	4,34	3,27
Perpendicularismo do cilindro	1,12	1,31	0,33	0,25	1,88	1,54	1,71	1,54	0,68	0,53	1,46	1,94	2,33	1,94	1,78	1,45	0,54	0,47
Concentricidade do anel	1,56	1,39	0,44	0,27	2,36	1,93	1,95	1,81	1,14	0,79	1,16	0,78	2,34	1,62	1,97	1,4	0,56	0,95
Posição X vela	2,77	2,74	1,72	1,31	2,29	2,26	2,03	1,84	1,76	1,4	3,87	2,54	3,54	2,01	3,04	1,99	2,46	1,81
Posição Y vela	2,62	2,43	2,3	2,29	4,57	4,03	3,56	2,73	2,54	2,38	2,43	1,94	2,28	1,73	2,16	1,68	6,71	5,40
Posição Z vela	1,33	1,31	0,87	0,69	2,11	1,85	1,69	1,57	0,92	0,9	1,36	1,21	1,79	1,65	1,64	1,2	0,70	0,66

O problema com a fresa que realiza a operação de corte nº 5 se mostrou com fluido de corte vegetal do fornecedor B por ter sido o primeiro a receber os acréscimos nos parâmetros de corte. A solução veio em mudar a forma como os parâmetros foram aumentados com a mesma, passando de aumentos na velocidade de corte (v_c) para aumentos no avanço por volta (f) da mesma sem aumentar a rotação (n) – mesma metodologia adotada para as ferramentas pequenas como as brocas. Este método foi adotado também para os outros fluidos considerados no estudo para essa ferramenta.

5.1.1 Desempenho das Operações com Fluido de Corte Vegetal do Fornecedor B

Conforme orientação do fornecedor B, o fluido de corte vegetal foi usado a uma concentração de 10%. O mesmo mostrou melhoria na aptidão do processo quando usados os parâmetros iniciais de corte (fluido de corte mineral do fornecedor A). Os indicadores de aptidão do processo com este fluido estão baixos por conta de uma ferramenta que estava com a vida útil além do limite, e a mesma foi trocada antes dos testes de aumento dos parâmetros.

À medida que se aumentavam os parâmetros de corte, a aptidão do processo caía, o que era esperado em função da maior exigência que o processo impôs. Porém, este produto conseguiu aumento de 20% nos parâmetros, sendo que apenas a característica “Posição Z da Vela” ficou um pouco abaixo da aptidão estipulada para o teste. No entanto, com um lote de 250 peças, a exigência (valores limites) sobre Cp e Cpk se torna mais baixa ($\geq 1,33$ e $\geq 1,00$ respectivamente). Esta quantidade é medida nas inspeções de rotina do processo de fabricação ao longo de um mês.

Quando testado o aumento de 30% nos parâmetros, outras características como o perpendicularismo do cilindro e a concentricidade do anel também ficaram com os indicadores muito baixos, mostrando que os parâmetros estavam muito elevados. Com o aumento de 20%, a produção passou de 51 para 55 peças por hora.

5.1.2 Desempenho das Operações com Fluido de Corte Vegetal do Fornecedor A

Por recomendação do fornecedor A, o fluido de corte vegetal foi testado a uma concentração de 8%. Assim como o fluido vegetal do fornecedor B, também apresentou melhoria nos índices de aptidão do processo quando foi feita a troca do produto em relação ao fluido mineral. Este fluido de corte atingiu aptidão até os testes com aumento de 10% nos parâmetros. Talvez pudesse atingir aptidão com parâmetros maiores aumentando-se a concentração de trabalho do produto, porém este procedimento não foi testado em função do prazo a ser cumprido. Com os aumentos que este fluido de corte possibilitou a produção ficar em aproximadamente 53 peças por hora.

5.1.3 Desempenho das Operações com Fluido de Corte Mineral do Fornecedor A

O fluido de corte mineral do fornecedor A é usado há 10 anos no processo. Por isso os parâmetros que são utilizados para este fluido são os parâmetros de partida para todos os

testes, uma vez que o processo de usinagem já se encontra otimizado para este. Portanto, o resultado obtido na usinagem com aumento de 10% já era esperado, pois como os parâmetros já estavam no máximo possível, diferentes características não atingiram aptidão. Vale lembrar que um processo não capaz não se trata de um processo que não atende à especificação de projeto, e sim um processo que não é estável, exigindo maiores supervisões e ajustes.

5.2 Análise dos Fluidos de Corte

A fim de auxiliar na análise de como a alteração do óleo de corte afetou o processo de usinagem, foram realizados os testes de viscosidade com viscosímetro de esfera e o teste de molhabilidade, conforme foi definido na Seção 4.4.

5.2.1 Teste de Viscosidade

Para a realização do teste de viscosidade foi utilizada uma proveta de um litro de capacidade (Fig.5.2a) e aproximadamente 40 cm de altura total, com marcação através de uma fita vermelha para controlar a altura (30 cm) entre o ponto superior e o fundo. Esta altura definiu a distância para a cronometragem do tempo e determinação da velocidade de queda livre do fluido da Equação 4.1.

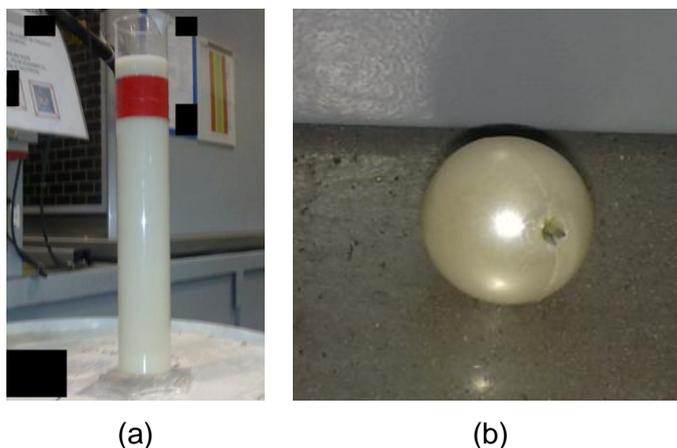


Figura 5.2 – Sistema de teste de viscosidade: (a) proveta com marcação; (b) esfera.

A esfera utilizada é um polímero com 15 mm de diâmetro e furo central (Fig. 5.2b). Como a densidade do material deste era aproximadamente a mesma da água, apresentando tendência em não afundar caso ficasse retido ar no interior do furo central, foram introduzidas e fixadas pequenas barras metálicas no furo, tornando assim a densidade final da mesma (1001 kg/m^3) adequada para o teste.

O mesmo foi realizado a uma temperatura dos fluidos de 25°C . Por se tratarem de emulsões leitosas semitranslúcidas, a visualização da esfera foi difícil, demandando a colocação de uma fonte luminosa atrás da proveta para se tornar possível visualizar a esfera em queda. O tempo de cronometragem se iniciou quando a esfera passou pela parte inferior da fita vermelha e terminou quando a mesma tocou o fundo da proveta. O mesmo procedimento foi feito para a água. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 5.2.

Dos testes, verificou-se que os fluidos de corte possuíam viscosidades muito parecidas entre si e diferiram apenas para a água. Portanto, conclui-se que qualquer diferença entre os óleos não pode ser atribuída às suas viscosidades. O resultado de tempo de queda mostrado na Tabela 5.2 representa a média de 3 medições, a fim de reduzir erros de cronometragem.

5.2.2 Teste de Molhabilidade

Para a realização deste teste foi utilizada uma peça em alumínio com superfície polida por uma lixa gramatura 400. Para a captura da imagem a ser utilizada no comparativo foi usada

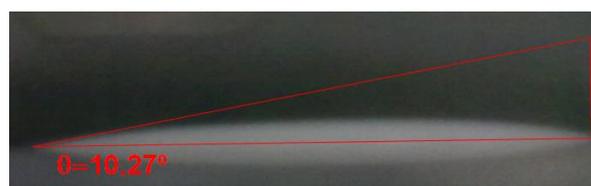
uma câmera fotográfica digital Sony modelo W50. Para isso, a superfície foi encostada em torno da lente da câmera (de formato retangular) na parede lateral da peça. Para minimizar a influência do alto brilho do alumínio (que prejudicava a qualidade das fotos), utilizou-se um fundo negro. O resultado pode ser visto na Figura 5.3.

Tabela 5.2 – Resultado do teste de viscosidade.

	Gravidade (m/s^2)	Diâm. da esfera (m)	Dens. da esfera (kg/m^3)	Dens. do fluido (kg/m^3)	Tempo de queda (s)	Vel. Term. da esfera (m/s)	Viscosidade calculada (Pa.s)
Água	9,81	0,015	1001	1000	2,95	0,102	0,0012
Emulsão a 16% óleo mineral forn. A	9,81	0,015	1001	999	5,02	0,060	0,0041
Emulsão a 8% óleo vegetal forn. A	9,81	0,015	1001	999	5,14	0,058	0,0042
Emulsão a 10% óleo vegetal forn. B	9,81	0,015	1001	999	5,25	0,057	0,0043



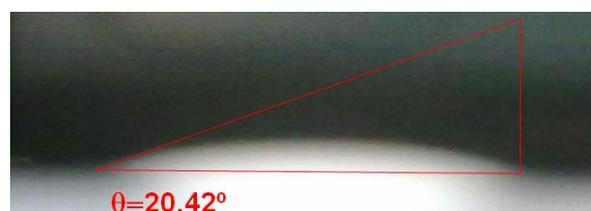
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.3 – Teste de molhabilidade da sobre o alumínio: (a) água; (b) fluido mineral do fornecedor A; (c) fluido vegetal do fornecedor A; (d) fluido vegetal do fornecedor B.

- **Água** – Apresentou boa molhabilidade, com ângulo de inclinação da linha tangente à forma da gota (θ) igual a $7,13^\circ$ (Fig. 5.3a).
- **Emulsão de óleo mineral do fornecedor A** – Esta apresentou boa molhabilidade, porém inferior à da água. O ângulo de inclinação θ foi igual a $10,27^\circ$ (Fig. 5.3b).
- **Emulsão de óleo vegetal do fornecedor A** – Esta apresentou boa molhabilidade, porém inferior à da água e do óleo mineral do mesmo fornecedor. O ângulo θ foi $15,51^\circ$ (Fig. 5.3c).
- **Emulsão de óleo vegetal do fornecedor B** – Esta apresentou boa molhabilidade, porém inferior aos demais. O ângulo θ foi $20,42^\circ$ (Fig. 5.3d).

Verificou-se que todos os produtos apresentaram boa molhabilidade. Porém, as emulsões de óleo vegetal apresentaram resultados de molhabilidade inferior à água pura e ao fluido de corte mineral semissintético. Com base no que foi analisado, pode-se afirmar que um fluido de corte precisa molhar a superfície do material, porém a existência de molhabilidade total não é adequada, porém mais testes são necessários.

6 CONCLUSÕES

De acordo com o resultado dos testes realizados com parâmetros de corte, foi possível verificar que a alteração do fluido de corte possibilitou aumentos em parâmetros de corte na ordem de 20% para o fluido vegetal do fornecedor B. Assim, o fluido de corte tem fundamental importância na usinagem HSC de ligas hipoeutéticas de Al-Si com ferramentas PCD.

A característica de viscosidade da emulsão não é o fator determinante na influência que o meio lubrificante possui sobre o processo, pois os testes realizados mostraram que as emulsões testadas possuem viscosidades muito parecidas.

Quanto ao estudo da molhabilidade, há uma correlação inversa com o desempenho das operações de corte, uma vez que os fluidos que geraram o melhor resultado de aptidão de processo (capacidade e capacidade) obtiveram os piores resultados no teste que aferiu esta característica. Uma explicação que poderia justificar este fenômeno seria que uma molhabilidade muito alta leva a uma rápida dispersão do fluido na superfície, levando a película do meio líquido a se tornar mais fina na região anterior ao corte. Uma sugestão para próximos trabalhos seria realizar mais testes para comprovar esta possibilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andresawa, C., Fenga, H., Laub, W.M. **“Machining of an aluminum/SiC composite using diamond inserts”**, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 102, p. 25-29, 2000.

Cygi, C., Williams, B., Decarlo, N. **“Seis Sigma para Leigos”**. 1ª ed. Rio de Janeiro : Alta Books, 2008. 336p.

Ferrarini, C. F. **“Microestrutura e propriedades mecânicas de ligas Al-Si hipoeutéticas conformadas por spray”**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, CCET, UFSCar, 2005, 130p.

Luz, A., Ribeiro, S., Pandolfelli, V. **“Uso da molhabilidade na investigação do comportamento de corrosão de materiais refratários”**, Cerâmica vol. 54, p. 174-183, 2008.

Potter, M., Wiggert, D., Hondzo, M., Shih, T. **“Mecânica dos Fluidos”**, Cengage Learning, 3.ed., 2004.

Santos, *et al.* **“Usinagem em Altíssimas Velocidades: Como os Conceitos HSM/HSC Podem Revolucionar a Indústria Metal-Mecânica”**. 2 ed. São Paulo: Érica, 2003. 214p.

Souza, A. J. **“ENG03343 - Processos de Fabricação por Usinagem, Parte 1: Fundamentos da Usinagem dos Materiais”**. GPFAI-DEMEC-UFRGS, 2011 /Apostila/, Disponível em: www.chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem_Parte1.pdf. Acesso em: 10/09/2013.

Trent, E. M., Wright, P. K., **“Metal Cutting”**, 4.ed., Butterworth-Heinemann, Boston, 2000, 446p.

Vieira, S. **“HSM/HBC: O estado da arte em usinagem”**. Mecatrônica Atual, Ano 2, N. 12, 2003, p.10.

Weingaertner, W. L., Schroeter, R. B., **“Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas Ligas”**, Alcan Alumínio do Brasil, São Paulo, 1990, 77p.