



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Automotiva**

**APLICAÇÃO DE MÍNIMA QUANTIDADE DE
LUBRIFICANTE NO FRESAMENTO DO AÇO SAE
8640**

**Autor: Alexandre de Sousa Ribeiro
Orientador: Rhander Viana**

**Brasília, DF
2016**



ALEXANDRE DE SOUSA RIBEIRO

**APLICAÇÃO DE MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE NO FRESAMENTO
DO AÇO SAE 8640**

Monografia submetida ao curso de graduação em automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em engenharia automotiva.

Orientador: Dr. Rhander Viana

**Brasília, DF
2016**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Ribeiro, Alexandre de Sousa

Título da Monografia: Aplicação de Mínima Quantidade de Lubrificante no Fresamento do Aço SAE 8640 / Alexandre de Sousa Ribeiro. Brasília: UnB, 2016. 63 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Bacharel em Engenharia Automotiva) –
Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2016. Orientação: Rhander Viana.

1. Fresamento. 2. Mínima Quantidade de Lubrificante. 3. Desgaste. Viana, Rhander. II. Aplicação de Mínima Quantidade de Lubrificante no Fresamento do Aço SAE 8640.

CDU Classificação



APLICAÇÃO DE MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE NO FRESAMENTO DO AÇO SAE 8640

Alexandre de Sousa Ribeiro

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 06/07/2016 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. : Rhander Viana, UnB/ FGA
Orientador

Prof. : Mário de O. Andrade , UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. D. Sc.: Evandro L. Silva Teixeira, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família e minha namorada Thayanne Sales, que sempre está ao meu lado me incentivando nos momentos mais difíceis, à Deus por me dar forças, e ao meu orientador Rhander Viana, sem seu direcionamento e ajuda esse trabalho seria impossível.

*"I hated every minute of training, but I said. Don't quit. Suffer now and live the rest of your life as a champion."
Muhammad Ali*

RESUMO

Este trabalho consiste no fresamento do aço SAE 8640, utilizando critérios diferentes na aplicação de fluidos de corte durante a usinagem. Três parâmetros serão abordados: fresamento a seco, com aplicação de MQL (mínima quantidade de lubrificante), e utilização abundante de fluido, objetivando quantificar a qualidade de superfície usinada, desgaste de ferramenta e a força de usinagem associada a cada um deles. Comparando quantitativamente os resultados obtidos em cada critério da aplicação de fluido é possível obter o melhor parâmetro de usinagem no aço SAE 8640 com a ferramenta de corte composta por insertos de metal duro. A escolha deste aço está relacionado ao seu uso como composição de vários elementos mecânicos presentes em máquinas, como caixas de transmissão, engrenagens, eixos, virabrequins, entre outros. O fresamento é o principal processo de fabricação das engrenagens, logo a descoberta do melhor parâmetro para sua produção é importante a fim de se atingir uma boa qualidade com baixo custo.

Palavras-chave: Fresamento, MQL, Acabamento

ABSTRACT

This work is consisted in steel milling SAE 8640, with different criteria in the application of cutting fluids during machining. Three parameters are covered: dry milling, applying MQL (minimum quantity lubricant), and wet fluid, in order to quantify the quality of machined surface, tool wear and force associated with machining each of them. Quantitatively comparing the results obtained in each criterion the application of fluid it can get better machining parameter in steel SAE 8640 with the carbide-cutting tool inserts. The choice of steel related to its use as a composition of several elements in mechanical machinery such as gearboxes, gears, shafts, crankshafts, among others and also milling is the main process of gears manufacturing, so the discovery of the best parameter for its production is an important matter in order to achieve a good quality with low cost.

Keywords: Milling, MQL, Surface finishing

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	11
1.1 – Aspectos Gerais.....	11
1.2 - Objetivos	11
1.3 – Estrutura do Trabalho	12
2. REVISAO BIBLIOGRAFICA	13
2.1 Usinagem	13
2.2 PRINCIPAIS OPERAÇÕES DE FRESAMENTO	15
2.3 GRANDEZAS DE CORTE NO PORCESSO DE FRESAMENTO	18
2.3.1 Movimentos das Operações de Usinagem	18
2.3.2 Associação aos Movimentos de Usinagem	19
2.3.3 – Velocidades.....	20
2.3.4 – Conceitos Auxiliares	22
2.3.5 – Superfícies Sobre a Peça e Grandezas de Avanço	24
2.4 - GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE	26
2.4.1 - Elementos da Ferramenta	26
2.4.2 – Superfícies da ferramenta.....	27
2.4.3 – Sistemas de Referência da Ferramenta	28
2.5 FLUIDOS DE CORTE.....	31
2.5.1 Função dos Fluidos de Corte	31
2.5.2 – Classificação dos Fluidos de Corte.....	33
2.5.3 – Métodos de Aplicação.....	34
2.6 – MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO (MQF)	34
2.6.1 – MQL.....	34
2.6.2 – Funcionamento do MQL.....	36
2.6.3 – Sistema de Aplicação Externa de MQL.....	38
2.6.4 – Sistema de Aplicação Interna de MQL	39
2.6.5 – Estudos de MQL no Fresamento.....	41
2.7 – FORÇA E POTENCIA DE USINAGEM.....	42
2.7.1 – Determinação Teórica da Força de Corte	42
2.7.2 – Determinação Teórica da Pressão Específica de Corte no Fresamento	44
2.7.3 – Determinação Experimental da Força de Usinagem por Cristais Piezoelétricos .	44
2.8 – DESGASTE DE FERRAMENTA.....	45
2.9 – ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	46
2.9.1 – Rugosidade	47
2.9.2 - Cálculo Teórico da Rugosidade R_a , R_q e R_z para Fresamento Frontal	48

2.9.3 – Medição da Rugosidade	49
2.10 – CARACTERÍSTICAS AÇO SAE 8640.....	49
2.11 – PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	50
2.11.1 – Planejamento Fatorial.....	51
2.11.2 – Planejamento Fatorial Completo 2^k.....	52
2.11.2 – Análise de Significância dos Efeitos	53
3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	54
3.1. Aspectos Gerais.....	54
3.2. Ensaio de Força de Usinagem.....	54
3.3. Ensaio de Acabamento Superficial	54
3.4. Caracterização do Aço SAE 8640.....	54
3.2. Ensaio de Força de Usinagem.....	55
3.3. Ensaio de Acabamento Superficial	58
3.4. Caracterização do Aço SAE 8640.....	59
3.4.1. Ensaio Metalográfico do Aço SAE 8640	60
3.4.2. Ensaio de Microdureza do Aço SAE 8640.....	60
4. RESULTADOS ESPERADOS	61
5. CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO	62
BIBLIOGRAFIA	63

1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

1.1 – Aspectos Gerais

A usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados no mundo e está presente em praticamente todas as máquinas desenvolvidas pelo homem, portanto é de extrema importância que se tenha o máximo de informações a seu respeito. Para realização do estudo referente ao fresamento com mínima quantidade de lubrificante é necessário o entendimento mais profundo do fresamento e aplicação de fluidos lubrificantes bem como variáveis associadas a ele.

O capítulo apresentado tem a finalidade de proporcionar fundamento teórico relacionado ao processo de usinagem com foco em fresamento, definindo conceitos correspondentes aos planos de corte, ângulos significativos, tipos de ferramenta, velocidades de corte e sistemas de aplicação de fluidos de corte.

Como o mercado é extremamente competitivo, a redução de custos a fim de produzir produtos com qualidade melhorada é prioridade. O uso de MQL faz com que os gastos referentes aos sistemas de fluido de corte sejam reduzidos de forma drástica, portanto uma referência qualitativa de alguns parâmetros associados ao fresamento é tão importante.

Algumas indústrias como a Ford e Mercedes já utilizam a técnica de usinagem com MQL na produção de peças mecânicas automotivas, visto que esse processo está evoluindo cada vez mais no mercado, torna-se importante seu entendimento e desenvolvimento, portanto esse trabalho tem o intuito de expor mais informações a respeito dessa técnica em um material usado amplamente na indústria automotiva, SAE 8640, por um processo dominante na produção de engrenagens, principais componentes de caixas de transmissão.

1.2 - Objetivos

O experimento realizado nesse trabalho tem como objetivo determinar o melhor parâmetro para fresamento do Aço SAE 8640 com diferentes sistemas de aplicação de fluido de corte, em que esses parâmetros serão medidos de forma quantitativa, através de acabamento superficial, desgaste de ferramenta e força de usinagem.

1.3 – Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi dividido em quatro capítulos, a serem apresentados a seguir:

No capítulo 1 está a introdução do conteúdo no presente trabalho, abordando contexto, objetivo e estrutura.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica do trabalho, onde se encontram aspectos teóricos a respeito da usinagem, necessários para o entendimento da atividade proposto.

O capítulo 3 descreve os materiais e métodos que serão utilizados no desenvolvimento do trabalho proposto.

No capítulo 4 estão presentes os resultados esperados.

No capítulo 5 o cronograma para realização do experimento proposto

2. REVISAO BIBLIOGRAFICA

2.1. USINAGEM

2.2. PRINCIPAIS OPERAÇÕES DE FRESAMENTO

2.3. GRANDEZAS DE CORTE NO PROCESSO DE FRESAMENTO

2.4. GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE

2.5. FLUIDOS DE CORTE

2.6. MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO (MQF)

2.7. FORÇAS DE USINAGEM

2.8. DESGASTE DE FERRAMENTA

2.9. ACABAMENTO SUPERFICIAL

2.10. AÇO LIGA SAE 8640

2.11. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

2.1 Usinagem

Segundo FERRARESI (1977), um processo de fabricação, pode ocorrer com formação de cavaco, também chamado de usinagem, e sem formação de cavaco, como fundição, conformação mecânica, soldagem, entre outros. Cavaco é uma fração de material do elemento usinado que se expõe de forma assimétrica. A usinagem pode ser dividida em dois grupos, convencional e a não convencional.

Segundo SOUZA, (2011) em processos convencionais a remoção de material é realizada pelo contato direto da ferramenta com a peça em que a remoção do cavaco ocorre por cisalhamento, ou seja, deformação por energia mecânica. Os processos não convencionais utilizam outro tipo de energia, como laser (radiação), plasma, eletroquímica, entre outras.

A figura 2.1.1 ilustra alguns exemplos de usinagem convencional em ferramentas de geometria definida:

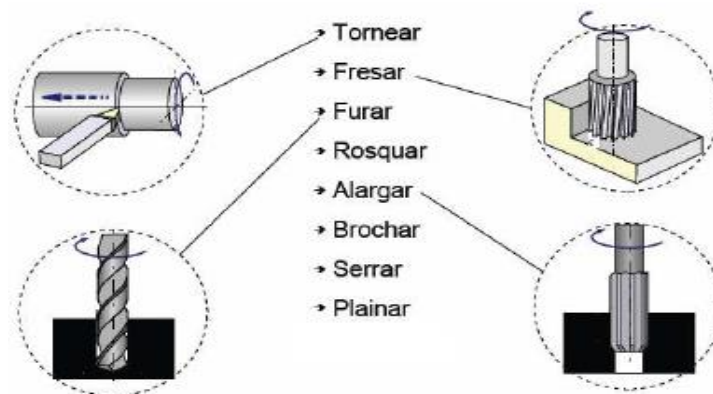


Figura 2.1.1 – Exemplos de usinagem convencional. Fonte: Instituto Federal de Santa Catarina, 2010.

Não convencional

- Plasma
- Laser
- Ultrassom
- Eletroquímica
- Entre outros

A usinagem apesar de ser um processo simples é ao mesmo tempo imprevisível, pois leva em consideração a deformação plástica do material em que a única limitação é concedida pela ferramenta de corte, além de estabelecer elevadas taxas de deformação durante o procedimento (Black, 1995).

As operações de usinagem são realizadas com ferramentas de geometrias definidas, expostos e associados conforme a máquina ferramenta utilizada. Em qualquer que seja o processo de usinagem pode-se ocorrer o desbaste e o acabamento. Desbaste é priorizado a alta quantidade de remoção de material, esta alta taxa de remoção é limitada pela potência da máquina ferramenta, já no acabamento o ponto central é a qualidade final do produto resultante da usinagem (Machado et al., 2009).

2.2 PRINCIPAIS OPERAÇÕES DE FRESAMENTO

O fresamento pode ser determinado como movimento das arestas cortantes em um sentido da rotação da fresa, geralmente, multi-cortante e o movimento da peça a ser usinada. Com evolução tecnológica atual deste processo, algumas fresadoras CNC possuem vários eixos de trabalho, ou seja, o conjunto máquina ferramenta pode realizar trabalhos em múltiplas direções, uma vez que a peça e a ferramenta de corte se movem em mais de um sentido com comportamentos autônomos (Sandvik, 2005).

O fresamento é um dos processos mais versáteis da usinagem, com grande eficiência para remoção de material devido as várias arestas de corte presentes na fresa. Além de ser o método predominante na produção de engrenagens. (Machado et al., 2009).

Nos últimos anos, a técnica de fresamento evoluiu juntamente com a progressão das máquinas-ferramentas, para um mecanismo de grande diversidade referente as suas configurações. No presente, a escolha dos procedimentos da máquina multiuso não é fechado apenas para propósitos convencionais, fresamento é uma possibilidade para se efetuar furos, abrir cavidades, fazer roscas, rasgo de chavetas, etc. O avanço tecnológico das ferramentas tem auxiliado com as novas possibilidades relacionado a variedade da utilização, confiabilidade, aumento de produtividade, aumento de qualidade obtido com a tecnologia de pastilhas intercambiáveis e fresas inteiriças de metal duro (Viana, 2009).

A aresta da fresa é capaz de apresentar várias configurações e alta produtividade. O fresamento, por ser um procedimento de corte interrompido, em que os vincos da fresa revezam contato com a peça a ser usinada durante cada movimento rotativo, cria um ciclo de força, impacto e choque térmico, sendo necessário à ferramenta suportar tais condições (Groover, 2010).

A figura 2.2.1. mostra alguns tipos de fresamento moderno segundo a trajetória da ferramenta de corte, classificados abaixo (Viana, 2009):

1. Faceamento
2. Fresamento de cantos a 90°
3. Fresamento de perfis
4. Fresamento de cavidades
5. Fresamento de canais
6. Tornofresamento
7. Fresamento de roscas

8. Cortes
9. Fresamento com altos avanços
10. Fresamento de mergulho
11. Fresamento em rampa
12. Interpolação helicoidal
13. Interpolação circular
14. Fresamento trocoidal

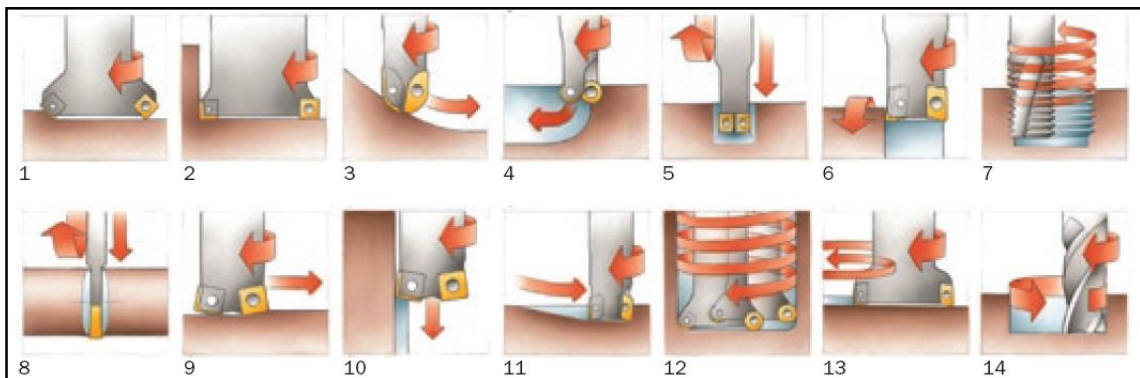


Figura 2.2.1 – processo de fresamento segundo movimento da ferramenta de corte. Fonte: Sandvik, 2009.

Uma das particularidades do fresamento é que arestas de corte possuem um movimento intermitente durante o corte da peça, isto é, cada ponta da fresa entra e sai em cada rotação da fresa, ou seja, qualquer dente usina menos de uma rotação completa. Todas as arestas estão submetidas a impactos constantes com a peça usinada. Desse modo são geradas grandes quantidades de calor enquanto sucede o movimento ativo de corte bem como ocorre o resfriamento da ferramenta na parcela inativa de corte, como em um processo de usinagem isso é repetido diversas vezes, proporciona-se um ambiente de grande fadiga térmica e mecânica (Trent e Wright, 2000).

Existem duas técnicas de fresamento, concordante e discordante, que são classificadas de acordo com o movimento de rotação relacionado ao avanço (Barbosa, 2014).

A figura 2.2.2 exemplifica um fresamento tangencial concordante, em que o sentido de avanço e velocidade de corte são, em geral, do mesmo valor. A espessura do cavaco é máxima no início do corte e mínima ao final, portanto a espessura do cavaco diminui após sua formação (Barbosa, 2014).

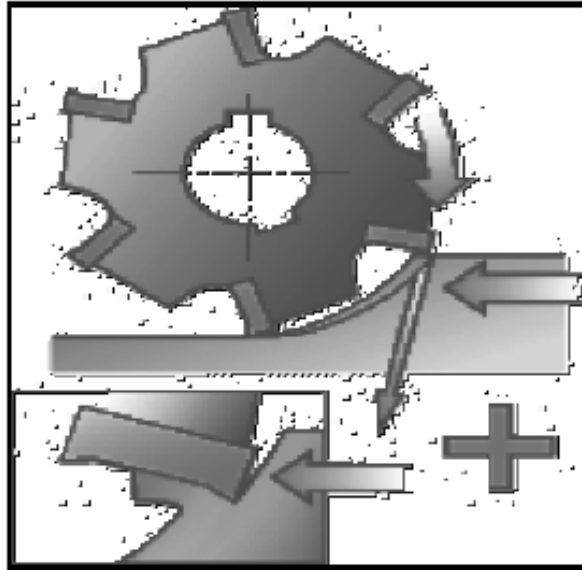


Figura 2.2.2 – fresamento concordante
Fonte: Barbosa, 2014.

A figura 2.2.3 demonstra um fresamento tangencial discordante, em que o sentido e avanço e velocidade de corte são opostos. O cavaco formado tem uma espessura mínima no começo do movimento cortante e máxima ao final dele (Barbosa,2014)

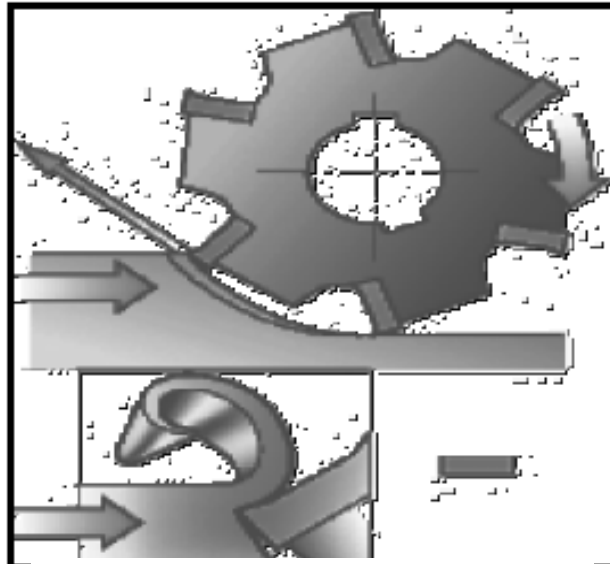


Figura 2.2.3 –fresamento discordante
Fonte: Barbosa, 2014.

2.3 GRANDEZAS DE CORTE NO PORCESSO DE FRESAMENTO

2.3.1 Movimentos das Operações de Usinagem

Existem dois tipos de movimento, um ocasiona a retirada de cavaco e um outro não. Ambos compõem os movimentos nas operações de usinagem que por sua vez são relacionados a aresta cortante e peça, considerada estática (Machado et al, 2009).

Movimento corte é o movimento entre a ferramenta e peça, em que uma evolução da ferramenta gera uma única remoção de material. O movimento de avanço possibilita a remoção contínua ou repetida de cavaco durante a revolução da ferramenta no movimento de corte e pode ser resultante de várias ações associadas entre si, ou seja, um movimento de avanço pode ser a soma de um vetor horizontal e vertical conforme mostrado na figura 2.3.1 (Ferraresi, 1977).

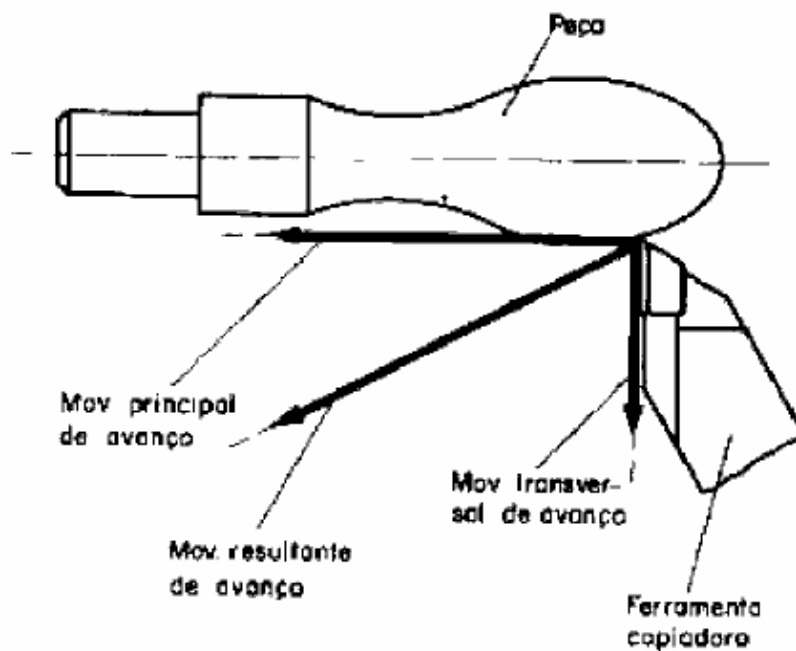


Figura 2.3.1 – demonstração dos movimentos que geram a formação direta de cavaco. Fonte: Machado et al, 1977.

O movimento efetivo de corte é composto pelo resultante do somatório entre os movimentos de avanço e de corte presentes na usinagem da peça, conforme apresentado na figura 2.3.2 (Ferraresi, 1977).

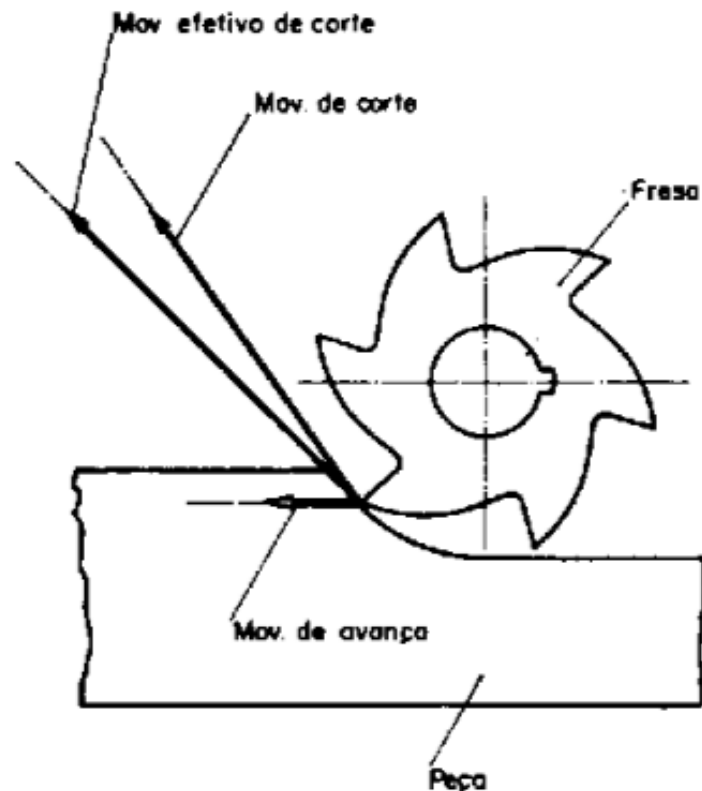


Figura 2.3.2 – movimento efetivo de corte Fonte: Ferraresi, 1977.

2.3.2 Associação aos Movimentos de Usinagem

A movimentação do processo de usinagem está associada a sentidos, direções, velocidades e percurso. No sentido é considerado a peça parada com a ferramenta efetuando todo o trabalho, direção do movimento é a direção imediata durante o procedimento, velocidade se refere a rapidez no qual se progride o movimento, e o percurso realizado é classificado de acordo com a direção dos movimentos ao longo da evolução da usinagem (Diniz, 2010).

O percurso de corte (L_c) é o espaço que a distância percorrida por um ponto da aresta cortante, conforme a direção de corte. O percurso de avanço (L_a) é a distância percorrida pela localização da aresta cortante em relação a peça conforme a direção de avanço. O percurso de avanço efetivo (L_e) é a distância percorrida pelo ponto de referência da aresta cortante, conforme a direção efetiva de corte. A figura 2.2.4 exemplifica os percursos da ferramenta durante um processo de fresamento discordante (Machado et al, 2009).

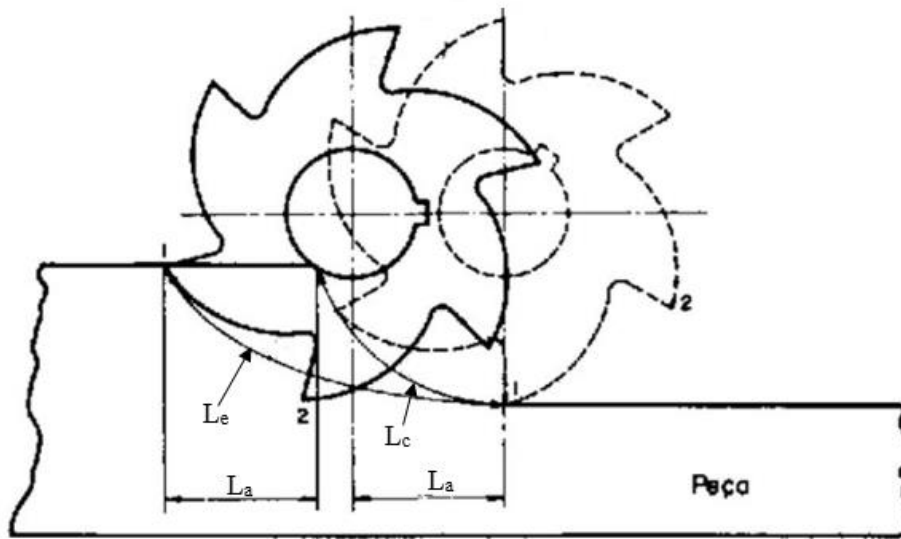


Figura 2.3.3 – Percurso de de corte L_c ; percurso de avanço L_a ; percurso efetivo de corte L_c . Os destes 1 e 2 demonstram a revolução da fresa. Fonte: Ferraresi, 1977 (modificada).

2.3.3 – Velocidades

As velocidades presentes na usinagem se distinguem umas das outras, portanto precisam ser conceituadas separadamente (Ferraresi, 1977).

Segundo Diniz (1999) a velocidade de corte (v_c) é resultante do deslocamento da ferramenta em relação a peça usinada, em que o movimento de corte e avanço não ocorrem de forma simultânea. A velocidade de corte é constituída pelo vetor tangencial imediato resultante da rotação da fresa em torno da peça. Como o processo de fresamento ocorre devido a um movimento de rotação, pode ser calculada de acordo com a Equação 2.1.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

Em que:

v_c = velocidade de corte [m/min]

d = diâmetro da peça ou da ferramenta [mm]

n = número de rotações por minuto (rpm)

A velocidade de avanço (v_f) no fresamento é a velocidade instantânea da aresta cortante de acordo com a direção e sentido do movimento de avanço, e pode ser calculada pela multiplicação entre a rotação da ferramenta e o avanço (f) conforme apresentado na equação 2.2 (Diniz, 1999).

$$v_f = f \cdot n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d} \cdot f \quad (2.2)$$

Onde:

v_f = velocidade de avanço [mm/min]

f = avanço [mm/volta]

A velocidade efetiva de corte (v_e) é a velocidade imediata de um ponto de referência no vinco de corte da ferramenta de acordo com o sentido e direção efetivo de corte. É calculada pela soma vetorial das velocidades de corte e de avanço, como mostrada na equação 2.3 (Machado et al, 2009).

$$v_e = v_c + v_f \quad (2.3)$$

A escolha das velocidades de corte e avanço de forma adequada depende muito dos materiais, tanto da peça quanto da ferramenta e qualidade final desejada, ou seja, vai depender dos requisitos de projeto. Em um fresamento por exemplo, a rotação da ferramenta pode ser mais elevada ou mais baixa, que por sua vez muda o resultado final da usinagem (Machado et al, 2009).

A figura 2.3.4 demonstra as velocidades relativas associadas ao processo de fresamento.

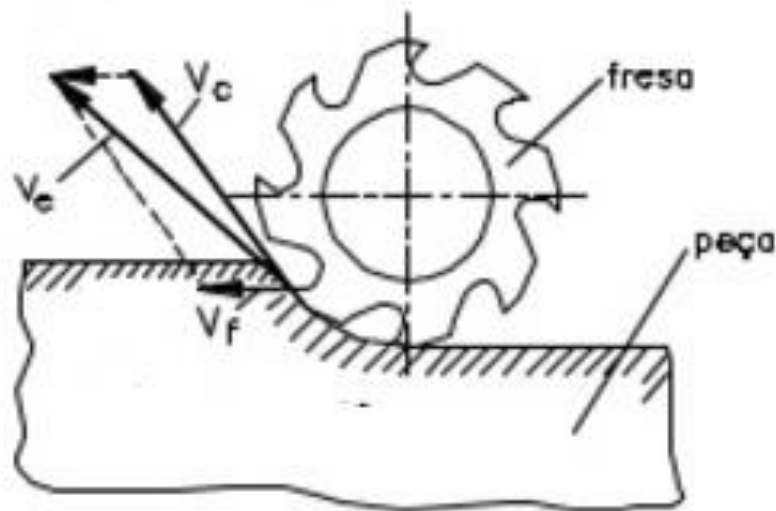


Figura 2.3.4 – Demonstração das velocidades de corte durante o fresamento discordinado fonte: Diniz, 1999 (modificada).

2.3.4 – Conceitos Auxiliares

A fim de se obter um melhor entendimento das operações de fresamento é preciso compreender conceitos referente ao plano de trabalho (P_{fe}). O plano de trabalho é um plano imaginário que contém as direções de corte e avanço, que passa por um ponto de corte escolhido, é nesse plano onde sucede a retirada efetiva de cavaco, ou seja, é o plano que se verifica os movimentos ativos de usinagem (Diniz, 1999).

Com o entendimento desse plano é possível identificar e definir ângulos relacionados ao processo de usinagem, como ângulo de da direção de avanço (φ) e ângulo da direção efetiva de corte (η) (Machado et al, 2009).

Segundo Ferraresi (1977), o ângulo da direção de avanço (φ) é formado entre os vetores que representam as direções de corte e avanço. Como no fresamento a peça fica estática e a ferramenta está em movimento rotativo, esse ângulo varia durante o processo conforme mostrado na figura 2.3.5.

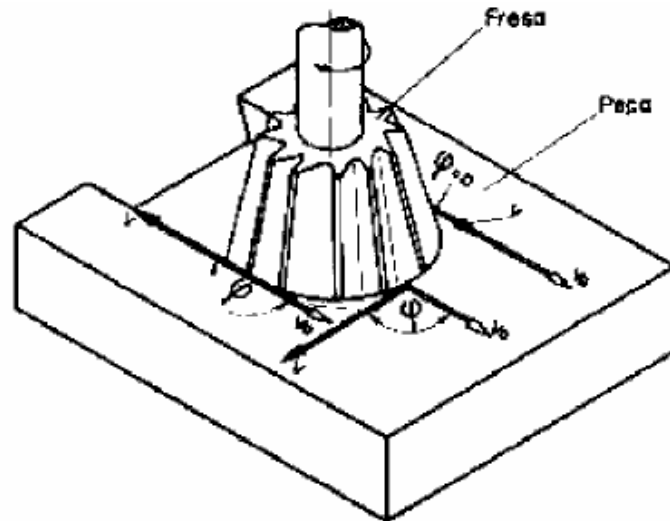


Figura 2.3.5 - Variação do ângulo da direção de avanço (ϕ) fonte: Ferraresi, 1977.

O ângulo da direção efetiva de corte (η) é o ângulo correspondente entre a direção de corte e efetiva de corte pode ser calculado pela equação 2.4 (Ferraresi, 1977).

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{vf \cdot \operatorname{sen} \phi}{vf \cdot \operatorname{cos} \phi + vc} = \frac{\operatorname{sen} \phi}{\operatorname{cos} \phi + \frac{vc}{vf}} \quad (2.4)$$

A figura 2.3.6 representa os ângulos ativos na remoção de cavaco no plano de trabalho durante um fresamento discordante.

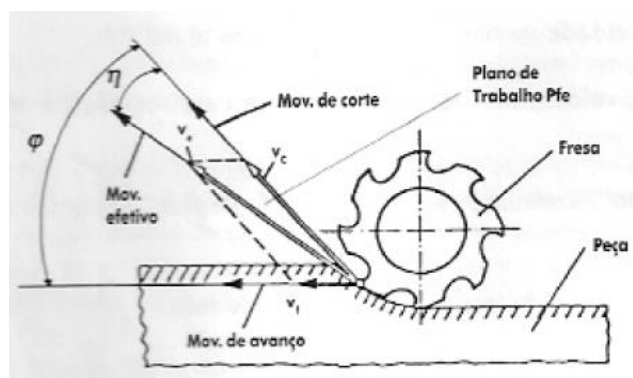


Figura 2.3.6 – ângulo da direção de corte (ϕ); ângulo da direção efetiva de corte (η); plano de trabalho. Fonte: Diniz, 1999.

2.3.5 – Superfícies Sobre a Peça e Grandezas de Avanço

Durante um processo de usinagem a retirada de material muda a superfície da peça, portanto a mesma precisa ser definida. A superfície a usinar é definida como a face exterior da peça antes de ser usinada. Superfície em usinagem é o que está sendo gerado pela ferramenta de corte durante o processo de usinagem, e superfície usinada é o resultado final do processo de usinagem (Diniz, 1999).

O avanço (f) é o trajeto de avanço por revolução, como no fresamento a ferramenta possui mais de um dente, torna-se necessário o distinguir o avanço por dente (f_z), que retrata a distância entre duas superfícies de usinagem subsequentes, conforme a direção de avanço do processo, essa relação está descrita na equação 2.5 (Machado et al, 2009).

$$f = f_z \cdot Z \quad (2.5)$$

Em que:

f_z = avanço por dente

z = número de dentes

A figura 2.3.7 representa as grandezas de avanço em uma revolução da fresa.

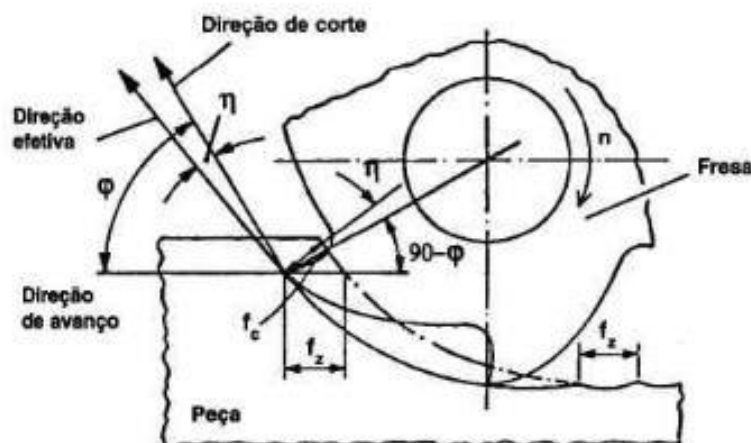


Figura 2.3.7 – Grandezas de avanço. Fonte Diniz,1999.

O avanço por dente ainda pode ser modificado no avanço de corte e avanço efetivo de corte, conforme exposto na figura 2.3.7, em função dos ângulos durante o processo. Avanço de corte (f_c) é a medida na direção perpendicular a direção de corte entre duas superfícies subsequentes, conforme a equação 2.6. O avanço efetivo de corte (f_e) é a dimensão entre superfícies subsequentes, formados entre as direções perpendicular e efetiva de corte no processo de usinagem, e pode ser calculado de acordo com a equação 2.7 (Machado et al, 2009)

$$f_c = f_z \cdot \text{sen } \varphi \quad (2.6)$$

$$f_e = f_z \cdot \text{sen } (\varphi - \eta) \quad (2.7)$$

Onde:

f_c = avanço de corte [mm/dente]

f_e = avanço efetivo de corte [mm/dente]

No fresamento, a penetração da ferramenta na peça possui três parâmetros, penetração de trabalho, penetração de avanço e penetração de profundidade ou largura de usinagem. A penetração de trabalho (a_c) é a medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço. Penetração de avanço (a_f) é a medida que a fresa percorre na direção de avanço. Já na profundidade ou largura de usinagem (a_p) é medida da profundidade de penetração da fresa na direção perpendicular ao plano de trabalho (Amorim, 2003), conforme demonstrado na figura 2.3.8 os parâmetros das grandezas de penetração em um fresamento tangencial.

É importante observar que no fresamento a profundidade de corte e largura de corte dependem muito do tamanho da fresa. Quanto maior a dimensão da mesma, maior será a quantidade material que é capaz de remover.

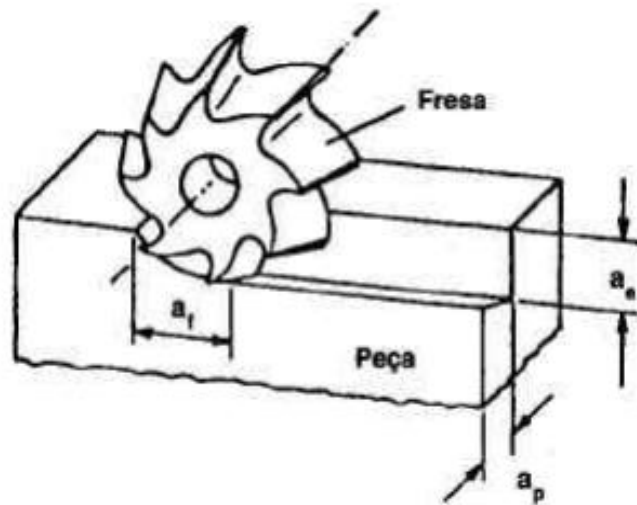


Figura 2.3.8 – Grandezas de penetração. Fonte: Diniz, 1999

2.4 - GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE

A ferramenta de corte é de extrema importância para o estudo de usinagem, porque acarreta em grande relevância no processo de usinagem. A preparação adequada da ferramenta determina o êxito na operação, pois não depende apenas do material da peça e da ferramenta, mas também dos parâmetros angulares da ferramenta durante o processo. (Machado et al, 2009).

2.4.1 - Elementos da Ferramenta

- Corpo – Parte que segura as pastilhas cortantes.
- Haste – Parte que segura a ferramenta.
- Furo da ferramenta – é o furo no qual a ferramenta pode ser fixada, um mandril no caso da fresadora.
- Eixo da ferramenta – É uma linha reta imaginária localizada no centro da haste da fresa
- Partes ativas – É composta pela parte funcional cortante da ferramenta como flancos, gumes cortantes. Na fresa cada dente é uma parte ativa.
- Base – superfície plana da haste da ferramenta.
- Cunha cortante ou gume de corte – É a porção da parte ativa da ferramenta na qual se origina o cavaco através do movimento relativo entre a peça e ferramenta. A cunha é delimitada pelas arestas de corte.

2.4.2 – Superfícies da ferramenta

As definições de superfície são importantes para o estudo do ângulo referente ao gume de corte em qualquer ferramenta de usinagem (Machado et all, 2009).

A superfície de saída ($A\gamma$) corresponde a superfície na qual o cavaco escorrega durante o processo de usinagem, tem grande importância no comportamento da formação de cavaco (Diniz, 1999).

Na superfície de folga se possui a superfície principal de folga ($A\alpha$) e a secundária de folga ($A'\alpha$). A principal corresponde a superfície onde se tem a aresta de corte principal, já na secundária a superfície contém a aresta de corte secundária (Diniz, 1999).

As arestas de corte são delimitadas pela intersecção das faces da ferramenta, ou seja, pela junção das superfícies de folga e saída da mesma. As arestas passam pelo mesmo processo de distinção que as superfícies de folga, na qual a aresta principal (S) é formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal e a aresta secundária (S') é formada pelo cruzamento entre a superfícies de folga secundária e de saída da ferramenta, conforme exposto na figura 2.4.1 (Machado et all, 2009).

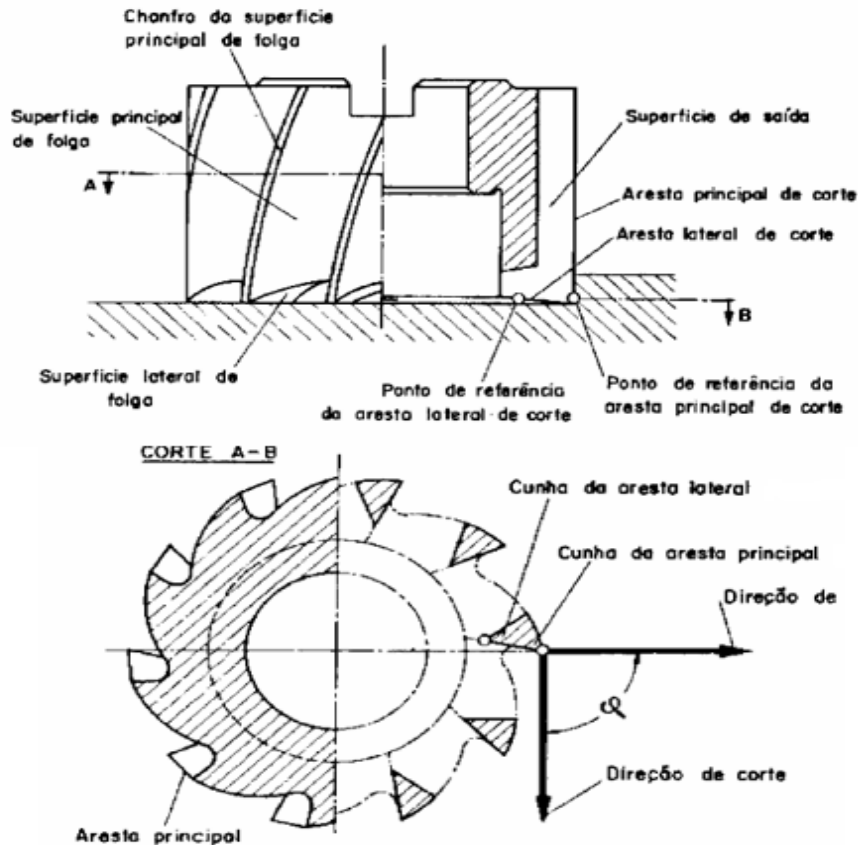


Figura 2.4.1 – Superfícies, arestas e ponta de corte em uma fresa. Fonte: Ferraresi, 1977.

2.4.3 – Sistemas de Referência da Ferramenta

Para definir os ângulos da cunha de corte é fundamental empregar um sistema de referência que seja possível localizar os planos que delimitam esses ângulos da ferramenta (Ferraresi, 1977).

O plano perpendicular à direção admitida de corte é chamado de plano de referência da ferramenta (P_r). Como no fresamento a ferramenta de corte opera de forma rotativa em torno de seu eixo e o plano de referência é perpendicular a direção de corte, isso significa que o mesmo inclui o eixo citado (Diniz, 1999).

O plano de corte da ferramenta ou plano efetivo de corte (P_s) contém à aresta de corte, ou passa de forma tangente a mesma quando possui uma forma curva, também é perpendicular ao plano de referência (Diniz, 1999).

O plano ortogonal ou plano de medida da ferramenta de corte (P_o) é formado pelo cruzamento entre os planos de referência e de corte (Diniz, 1999). A figura 2.4.2 mostra os planos explicados em uma fresa.

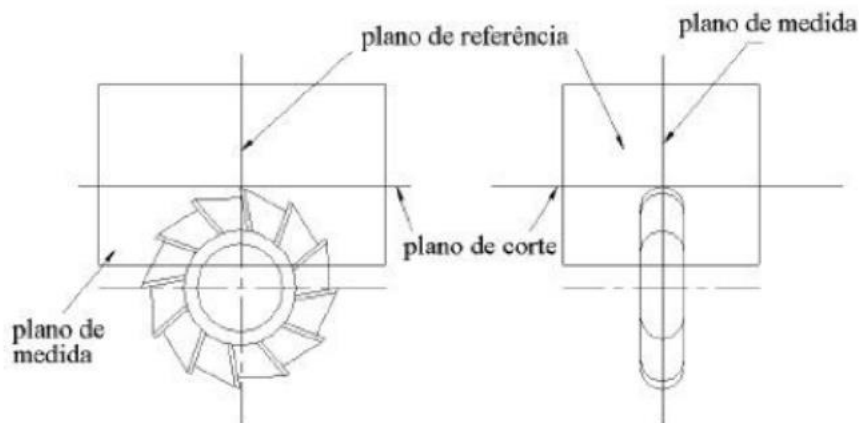


Figura 2.4.2 – Planos de referência da ferramenta. Fonte: Carla, 2013.

O plano admitido de trabalho (P_f) é um plano que passa por um ponto de corte escolhido, que é perpendicular ao plano de referência da ferramenta e paralela a direção admitida de avanço (Diniz, 1999).

Plano dorsal da ferramenta é o plano que passa pelo ponto de corte escolhido, e é ortogonal entre os planos de referência e admitido de trabalho da ferramenta (Diniz, 1999).

Os ângulos de corte estabelecem a forma da cunha de corte e são nomeados com letras gregas e recebem a classificação do plano e do sistema de referência sobre o qual são postos. Para facilitar a nomenclatura e o entendimento, todos os ângulos, planos, ângulos e faces que se relacionam à aresta secundária, terão o apóstrofo adicionados a sua simbologia.

Ângulo de posição da aresta de corte (κ_r ou χ) é encontrado devido ao cruzamento entre os planos de corte da ferramenta e admitido de trabalho, medido no plano de referência (Carla, 2013).

Ângulo de inclinação da ferramenta (λ_s) é compreendido entre o plano de referência da ferramenta e aresta de corte, medido no plano de corte da ferramenta (Carla, 2013).

Ângulo de ponta da ferramenta (ϵ_r) fica delimitado entre os planos principal de corte e secundário de corte, conforme exposto na figura .2.4.3 (Carla, 2013).

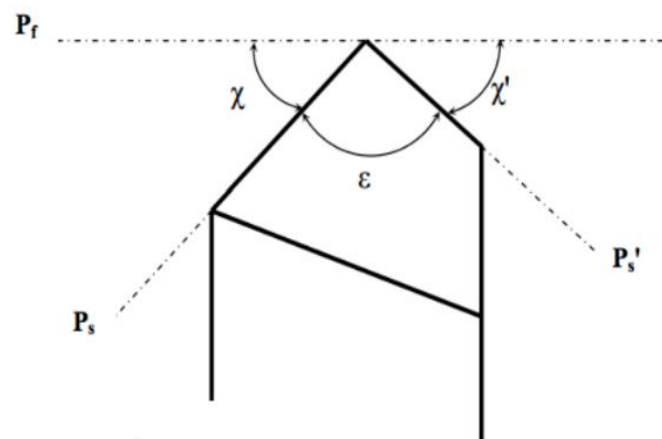


Figura 2.4.3 – ângulos e planos de uma ferramenta de corte . Fonte: Carla, 2015.

Segundo Ferraresi (1977) outros três ângulos importantes no sistema de referência da ferramenta são:

Ângulo de folga da ferramenta (α) que é formado pela interseção entre a superfície de folga (A_α) e plano de corte (P_s), e pode ser positivo ou negativo.

Ângulo de saída da ferramenta (γ_o), identificado entre o plano de referência da ferramenta (P_r) e superfície de saída (A_γ) e pode ser positivo ou negativo.

A figura 2.4.4 mostra essa relação angular positivo/negativo dos ângulos de saída e folga da ferramenta.

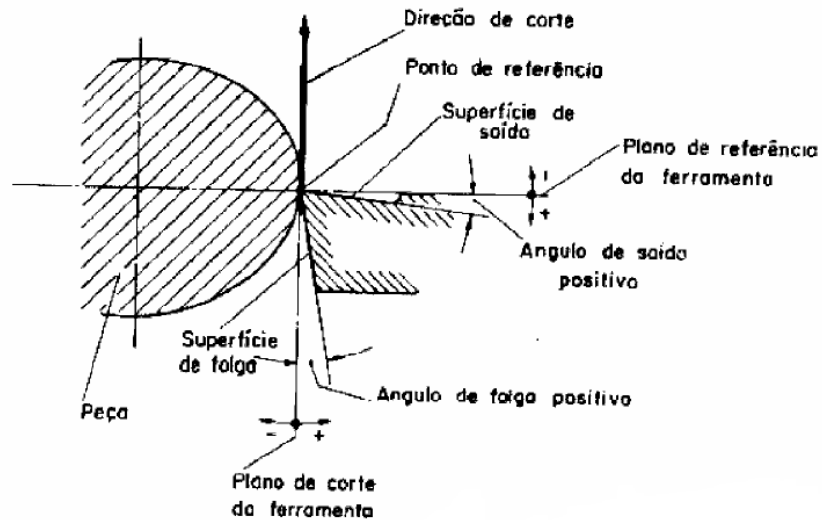


Figura 2.4.4 – demonstração dos ângulos de saída e folga da ferramenta. Fonte: Ferraresi, 1977.

Ângulo de cunha da ferramenta (β) é gerado pelo cruzamento entre as superfícies de saída (A_γ) e folga da ferramenta (A_α), conforme exposto na figura 2.4.5.

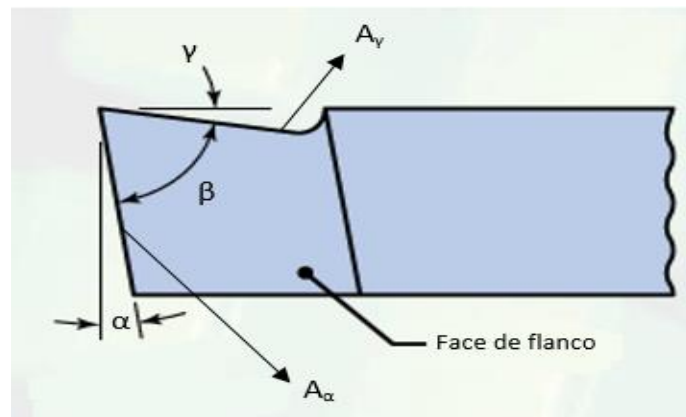


Figura 2.4.5 – ângulo da cunha cortante em uma vista lateral. Fonte: Kalpakjian Schmid, 2008 (Modificada).

2.5 FLUIDOS DE CORTE

Os fluidos de corte tem como objetivo conferir alguma melhoria no processo de usinagem, seja pela vantagem econômica (aumento de produtividade, baixar custo de ferramenta por peça usinada, diminuição da força na usinagem que proporciona uma economia de energia, entre outras), ou funcional (acabamento superficial, melhor desempenho de formação de cavaco, facilitar a usinabilidade, entre outras) (Ferraresi, 1977).

Historicamente o fluido de corte foi usado pela primeira vez em 1894 por um americano chamado Frederick Winslow Taylor, que utilizou água como fluido de corte para usinagem, e obteve uma melhora na velocidade de corte na usinagem em 33% sem prejudicar a vida da ferramenta. Como a usinagem envolve atrito entre a ferramenta e a peça, isso provoca um grande aumento de temperatura na ferramenta que prejudica o processo, a ideia foi de usar a água para resfriar a ferramenta, que propiciou aumento de produtividade que fez a demanda de fluidos crescer no mercado (Machado et al, 2009; Ferraresi, 1977; Diniz 2006).

Segundo Machado (2009), o avanço tecnológico de materiais e máquinas ferramenta aumentou a demanda de fluidos de corte, que por sua vez estimulou uma competitividade de mercado para esses fluidos, isso proporcionou desenvolvimento de novos fluidos que aumentou a qualidade dos mesmos. Outro motivo que levou a melhora desses fluidos, foi a pressão de Agências Reguladoras de proteção ao meio ambiente e saúde, para que sejam vendidos de forma segura.

Portanto os fluidos de corte vem sendo desenvolvidos, e cada tipo de fluido serve para uma atividade específica de usinagem. Alguns são melhores para trocar calor com boas propriedades refrigerantes, outros tem uma melhor capacidade lubrificante, por isso atualmente existem tanta variedade de fluidos de corte presentes no mercado. A maior dificuldade em selecionar um fluido de corte está presente na sensibilidade do processo de usinagem, em que uma pequena variação de parâmetro, pode provocar grandes alterações na usinagem (Sales et al).

2.5.1 Função dos Fluidos de Corte

A função geral de um fluido de corte é de melhorar o processo de usinagem como um todo, mas isso não significa que a usinagem com um fluido de corte será sempre a melhor opção no processo seja por uma melhora no acabamento superficial, desgaste de ferramenta, aumento da velocidade de corte, expulsar o cavaco, entre outros.

As funções específicas principais dos fluidos de corte são:

- Lubrificação a baixa velocidade de corte – A velocidade de corte está diretamente ligada a quantidade de calor gerado durante a usinagem, então em um processo com baixas velocidades de corte, a quantidade de calor gerado não possui grande relevância para o processo, logo a prioridade é de diminuir o atrito entre ferramenta e cavaco a fim de prevenir a formação de aresta postiça. Vale lembrar que um fluido lubrificante facilita o fluxo de cavaco, que por sua vez diminui o aquecimento gerado por atrito, mas não significa que o mesmo é um bom refrigerante, comparado a um específico para essa função. Portanto se deve utilizar um fluido de corte com uma boa característica lubrificante, sem grande importância para troca de calor gerada (Machado et al, 2009; Ferraresi, 1977; Diniz 2006).
- Refrigeração a altas velocidades – Em grandes velocidades de corte a quantidade de atrito é muito elevada, então a temperatura da ferramenta atinge níveis muito altos, isso causa alguns efeitos indesejados, como redução de vida da ferramenta, falseamento das medidas da peça de trabalho, entre outros. Na utilização de um fluido refrigerante a característica desejada consiste em obter uma boa quantidade de troca de calor a fim de reduzir a temperatura da peça e ferramenta, mas a própria utilização do refrigerante pode gerar alguns problemas como o trincamento da ferramenta devido a choques térmicos. Outra observação importante está ligada a penetração de fluido, em altas velocidades o fluido tem dificuldade em penetrar na interface cavaco ferramenta, isso representa a baixa necessidade de fluido lubrificante em altas velocidades. Portanto a utilização de um fluido refrigerante em altas velocidades se dá mais pela necessidade de resfriamento da ferramenta, não pela necessidade de lubrificação, pois em altas velocidades a penetração desse fluido se torna difícil e ineficaz (Machado et al, 2009; Ferraresi, 1977; Diniz 2006).
- Remoção de cavacos da zona de corte – Durante o processo de usinagem a formação de cavacos longos aumenta a geração de calor, pode machucar o operador, atrapalhar a visão que pode acarretar em erros na peça final e o caso mais importante na utilização do fluido para remoção de cavaco está presente na furação, em que o único meio de se retirar o cavaco é através de fluxo de fluido (Machado et al, 2009; Ferraresi, 1977; Diniz 2006).
- Proteção da máquina ferramenta contra oxidação – A água é um ótimo refrigerante, mas é ruim na máquina, pois aumenta a geração de ferrugem na mesma, os óleos são bons

para lubrificação e proteção da máquina ferramenta contra a oxidação (Machado et al, 2009; Ferraresi, 1977; Diniz 2006).

Geralmente as duas primeiras funções são prioritárias, pois na maior parte dos processos de usinagem a troca de calor e o aumento de lubrificação são os critérios mais críticos, mas durante uma furação profunda, a remoção de cavaco passa a ser crítica, pois pode haver engripamento dos cavacos, que prejudica a técnica. Portanto fica evidente que escolha do fluido de corte depende apenas do processo de usinagem, em que a função principal do fluido é de melhorar o seu resultado final, e cada parte do processo deve ser estudada a fim de se obter o melhor fluido de corte para tal trabalho (Machado et al, 2009; Ferraresi, 1977; Diniz 2006).

2.5.2 – Classificação dos Fluidos de Corte

Existem três tipos de fluido de corte, sólidos, gasosos e líquidos. Os sólidos tem propósito de diminuir o atrito entre ferramenta/cavaco e pode ser aplicado na ferramenta ou ser introduzido na estrutura cristalina do metal. Os gasosos são mais usados para expulsar cavacos da zona de usinagem, pois apesar de também funcionar como refrigerante, sua troca de calor não é tão eficaz como os líquidos. Já os fluidos líquidos são os mais utilizados na usinagem devido a facilidade de exercer funções de refrigeração e lubrificação de forma mais eficaz que seus concorrentes. Os fluidos líquidos são divididos em três grandes grupos: óleos, emulsões e soluções (Machado et al, 2009; Ferraresi, 1977; Diniz 2006).

- Emulsões – São compostos bifásicos, o emulsionante geralmente é composto de água e óleo. Os agentes emulsionantes dividem o óleo em partículas minúsculas, que ficam dispersas na água durante um período de tempo. Como as emulsões são compostas por água e óleo, esse fluido é amplamente usado quando se deseja combinar boa propriedade lubrificante e principalmente a refrigerante, ou seja, em grandes velocidades de corte com baixa pressão. A adição de óleo também ajuda na sua característica anticorrosiva. Então as emulsões tem uma característica predominantemente refrigerante sendo muito preferível em relação à água, devido a sua molhabilidade e presença de inibidores de corrosão (Machado et al, 2009; Ferraresi, 1977; Diniz 2006).
- Óleos – Sua característica de utilização está ligada a diminuição do atrito, portanto não são utilizados para se obter uma boa troca térmica, apesar de ocorrer um certo resfriamento com a aplicação do mesmo. Estes são divididos em três grupos, óleo vegetal e animal, mineral e integral. Vegetal e animal foram os primeiros a serem

utilizados, porém se tornou inviável devido ao custo e breve deterioração durante o processo, além de serem muito ruins para dispersão de calor. Os minerais são os hidrocarbonetos adquiridos do petróleo, suas propriedades dependem da cadeia e estrutura molecular. Já os óleos integrais podem ser minerais puros ou com aditivos, são usados para se melhorar a acabamento da peça, podem ser à base de cloro e enxofre, que são substâncias ruins para saúde do operador. Por possuir baixo ponto de fulgor, riscos à saúde, ineficiência em altas velocidades de corte e alto custo, os óleos integrais perderam espaço no mercado. Dessa forma o uso de óleos como fluido de corte deve ser usado a fim de se obter uma boa diminuição de atrito, e a escolha do óleo deve ser baseada na operação a ser realizada (Machado et al, 2009; Ferraresi, 1977; Diniz 2006).

- Soluções – As soluções, diferentemente das emulsões, são compostos monofásicos de óleos que se dissolvem na água, não necessitando de agentes emulsificantes. Compostos por água e isentas de óleo mineral. Possuem sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubrificação, biocidas, entre outras substâncias. Eles oferecem boa proteção anticorrosiva. Portanto, dependendo das suas características, pode ser que se tenha boa qualidade refrigerante e lubrificante, além da proteção contra a oxidação.

2.5.3 – Métodos de Aplicação

Existem tres métodos mais utilizados de aplicação (Machado et al, 2009):

- Jorro de baixa pressão – Mais comum e mais utilizado devido a facilidade implementação, não exige equipamento complexo.
- Sistema de alta pressão – É um sistema mais caro de ser implementado devido sua complexidade.
- Atomização (MQF) – Necessita de um reservatório com boa capacidade de encapsulamento. Tem sido pesquisado para se diminuir a quantidade de fluido de corte na usinagem, por uma preocupação ambiental e principalmente econômica. Essa técnica consiste na aplicação muito baixa de fluido, entre 5 ml/h até 200 ml/h, apesar de promissora ainda depende muito das condições de corte.

2.6 – MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO (MQF)

2.6.1 – MQL

A utilização da mínima quantidade de fluido também pode ser chamada de MQL (*minimum quantity lubrication*), nesse processo é aplicado a menor quantidade de fluido de corte durante um processo de usinagem. Como explicado anteriormente, a quantidade de fluido utilizado é de cerca de 5 ml/h até 50 ml/h, mas essa quantidade pode variar por um período de tempo curto dependendo do tamanho da ferramenta, diâmetros superiores a 40 mm, a quantidade pode ser superiores a 150ml/h. (DGUV, 2010).

Essa técnica de usinagem começou a ser pesquisada por volta dos anos 90 pela indústria automobilística com o intuito de diminuir o custo de produção na usinagem, já que parte dos mesmos são gerados pela aplicação em jorro de fluidos de corte. Dentre os custos principais relacionados a utilização do jorro, estão a manutenção, inspeção, preparação do fluido e descarte de cavaco (DGUV, 2010).

O MQL por usar uma quantidade muito pequena de fluido é quase uma técnica de usinagem a seco, logo a falta da necessidade de secagem torna descarte mais fácil e barato, pois elimina um custo que seria necessário, além de reduzir danos à saúde dos operadores, causados pela emissão de gases gerados durante o processo de usinagem, riscos de dermatites e proporciona uma área de trabalho mais limpa e organizada (DGUV, 2010).

A figura 2.6.1 mostra alguns custos gerados pela aplicação em jorro de fluidos de corte durante processo de usinagem.

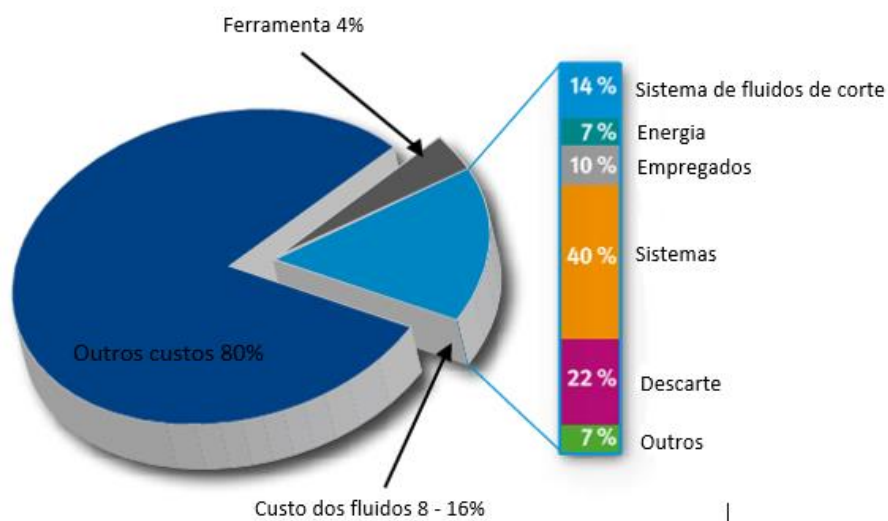


Figura 2.6.1 – Porcentagem média dos custos gerados pelo processo de usinagem em jorro. Fonte: DGUV, 2010 (modificado).

Como demonstrado na figura 2.6.1, parte do custo relacionado ao fluido de corte diminuiu, principalmente no descarte de cavacos, manutenção e preparação de fluido, problemas desprezados com uso de MQL (DGUV, 2010).

Devido à redução de custos, riscos ao operador, aumento de produtividade, e impacto ambiental mínimo, essa técnica passou a ser pesquisada e utilizada em algumas empresas. Nos Estados Unidos a empresa Ford Motor Company Powertrain Manufacturing iniciou um processo de manufatura em massa no ano de 2005 através do uso de MQL. Como a ideia de impacto mínimo ao meio ambiente e sustentabilidade está em alta no mundo, corpos de válvula e caixa de transmissão de torque vem sido produzidos por meio dessa técnica. Devido a todos benefícios citados, a produção com MQL se tornou o procedimento padrão de usinagem nas plantas da Ford em árvore de manivelas, furos passantes, transmissões, operações em ferro fundido cinzento, blocos do motor em alumínio, cabeçote em alumínio (Thai et al, 2014).

Sustentabilidade no processo de usinagem é totalmente ligado a quantidade de fluido de corte, com o método de inundação refrigerante, o fluxo de fluido de corte é de cerca de 20L/min, isso requer uma infraestrutura significativa da fábrica, pois ainda exige filtração do fluido, recuperação, tratamento de água que é misturada ao fluido e refrigeração. Além de todas essas características, o fluido necessita de uma monitoração constante a fim de prevenir crescimento de bactérias e fungos. Devido a quantidade de gastos em fluidos de corte, impactos ambientais e riscos à saúde do operador, as plantas de usinagem da Ford tem tido um interesse maior em processos de usinagem a seco ou quase secos, que por sua vez gerou um interesse no desenvolvimento dessa tecnologia e garantiu uma presença sólida no mercado (Thai *et al*, 2014).

2.6.2 – Funcionamento do MQL

Basicamente uma pequena quantidade de fluido é transportado por uma corrente de ar comprimido direcionado para zona de corte, como o ar tem uma pressão elevada o fluido se torna uma partícula muito pequena dispersa no ar, que forma um vapor que lubrifica o local de usinado (Correia, 2006).

O fluido de corte pode ser aplicado de duas formas no MQL, através de orifícios na ferramenta ou por fora da ferramenta em forma de aerosol, conforme demonstrado na figura 2.6.2.

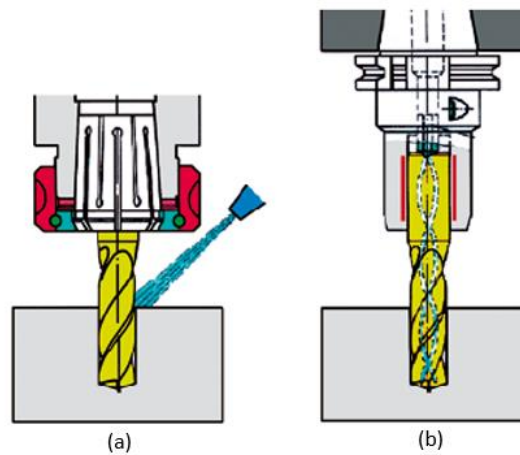


Figura 2.6.2 – (a) aplicação como aerosol (b) aplicação interna.
Fonte: Thai et al, 2014.

A aplicação externa de fluido em MQL é apropriado para máquinas que não possuem o sistema já implementado, ou seja, máquina que não vem com o acessório já instalado de fábrica, isso o torna mais versátil e fácil de ser implantado em sistemas de usinagem padrão, como torneamento, fresamento, furação e serramento. No entanto é um pouco limitado devido a dificuldade de acesso e tamanho da ferramenta. (Thai et al, 2014).

A tabela 2.6.1 enumera algumas vantagens e desvantagens da aplicação externa.

Vantagens	Desvantagens
Adaptação simples	Efeito de sombreamento do spray na usinagem
Baixo custo de investimento	Os ajustes são limitados devido a posição dos bicos injetores e tamanho das ferramentas utilizadas
Sem necessidade de ferramentas especiais	-
Pode ser implementado em qualquer máquina convencional	-

Tabela 2.6.1 – vantagens e desvantagens da aplicação de MQL externa

Durante a aplicação interna com uso de MQL, em que o fluido passa por dentro da ferramenta até a área de aplicação, ou seja, ocorre um contato direto entre o fluido lubrificante, material usinado e ferramenta, isso uma troca de calor e lubrificação mais consistente, logo outras operações podem ser realizadas, como furação profunda e altas velocidades de corte, apesar de ser um sistema bem mais caro de se implementar. Alguns sistemas podem ser controlados direto da máquina, então a mudança de ferramenta, parâmetros de corte e posição dos bicos aplicadores não precisam ser realizados manualmente (DGUV, 2010).

A tabela 2.6.2 expressa vantagens e desvantagens desse sistema de aplicação interno.

Vantagens	Desvantagens
Boa lubrificação no ponto de corte	Ferramentas especiais necessárias
Sem espalhamento ou perda de fluido	Elevado custo
Quantidade de lubrificante otimizada para cada ferramenta	Sustentabilidade da máquina é necessária

Tabela 2.6.2 – vantagens e desvantagens da aplicação interna de MQL.

2.6.3 – Sistema de Aplicação Externa de MQL

Aplicação externa tem uma facilidade grande de implementação, porém é mais usada em máquinas com baixa flexibilidade como fresamento, torneamento, serramento, entre outras. O sucesso da técnica está ligada diretamente a quantidade de fluido transportada para área de usinagem de forma eficiente, logo uma aplicação externa não é indicada nos procedimentos em que o acesso a ferramenta de corte é difícil, como furação profunda (DGUV, 2010).

Na aplicação externa existem duas tecnologias mais utilizadas:

- Dispositivos com bombas dosadoras – nas bombas dosadoras o lubrificante é transportado por uma minúscula bomba pneumática em que a dosagem é regulada pelo curso e frequência de golpe do atuador. As vantagens principais desse sistema são as definições exatas de volume de dosagem e uma montagem descentralizada dos elementos de bomba, as desvantagens são o fluxo pulsante e a quantidade de desgaste mecânico nas partes móveis (DGUV, 2010).
- Dispositivos com tanque de pressão – O tanque onde o fluido fica contido é pressurizado, de forma que o lubrificante é forçado a sair. O controle da quantidade de

fluido é feito com ajustes de pressão na alimentação e elementos de comando na tubulação para entrada de ar e líquido. A vantagem mais marcante desse sistema é o fluxo de lubrificação mais uniforme no vapor e falta de peças móveis sujeitas a desgastes mecânicos (DGUV, 2010).

A figura 2.6.3 mostra um esquemático dos dois sistemas de aplicação externa.

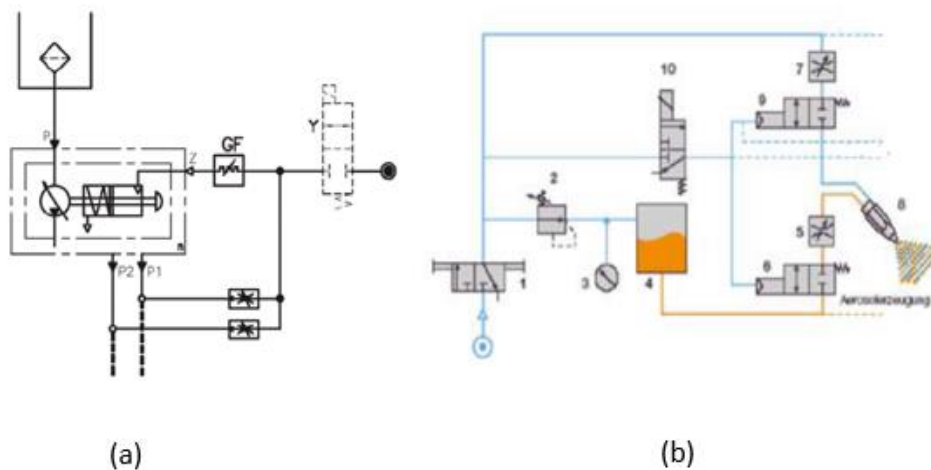


Figura 2.6.3 – Esquemático de sistemas MQL de aplicação externa (a) bombas dosadoras, (b) tanque de pressão. Fonte: DGUV, 2010 (modificado).

2.6.4 – Sistema de Aplicação Interna de MQL

Os dispositivos de aplicação interna, envia o fluido diretamente a zona de corte por dentro da ferramenta, através de canais de arrefecimento. O projeto dos componentes desse sistema tem uma influência enorme em sua avaliação, e as vezes é necessário uma otimização de todo sistema para se obter o resultado esperado (DGUV, 2010).

Sistema de aplicação interno é mais caro, porém mais eficiente que o externo e não precisa de ajuste manual dos bicos injetores. Esse método permite uma furação mais profunda e velocidades de corte mais elevadas, mas devido ao alto custo só é utilizada quando a externa não supre as necessidades exigidas. No mercado o sistema MQL de aplicação interna difere em número de canais no mandril e fusos em rotação. Existem dois modos comuns de mistura entre o líquido lubrificante e o ar comprimido (Thai et al, 2014; DGUV, 2010).

- Canal Único – O aerosol é gerado dentro de um tanque antes de entrar na ferramenta, ou seja, o lubrificante e o ar são misturados fora da máquina. Nesse sistema atomização é mais instável e produz gotas de tamanho maior, devido ao transporte longo até a área

usinada. Outra característica desse sistema está relacionada a qualidade da névoa, se torna mais baixa devido as forças centrífugas da ferramenta (Thai et al, 2014).

- Canal Duplo – Ar e lubrificante são misturados perto da ferramenta, em geral na base onde fica segurada (mandril), esse sistema é mais robusto, pois descarrega a névoa de forma bem uniforme. Por esses motivos, essa configuração permite uma lubrificação mais equilibrada, por consequência, velocidades maiores de corte. A Ford utiliza essa técnica para usinar caixas de transmissão de alumínio em suas plantas (Thai et al, 2014).

A figura 2.6.4 expressa a ideia entre canal simples e duplo.

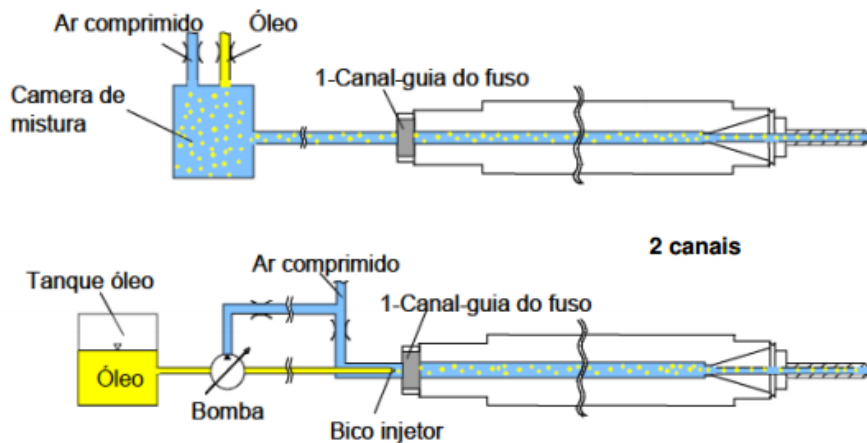


Figura 2.6.4 – canal simples e canal duplo Fonte: Zeilmann

A tabela 2.6.4 mostra as propriedades mais importantes dos sistemas de canal único e duplo (DGUV, 2010).

Canal Único	Canal Duplo
Alimentação de lubrificante depende do RPM da ferramenta	Alimentação de lubrificante independente do RPM da ferramenta
Quantidade de lubrificante depende do fluxo de ar	Quantidade de lubrificante quase independente do fluxo de ar
Operação do <i>by-pass</i> é praticamente a mesma nas duas técnicas	Tempo de reação é bem rápido
Pressão de ar necessária é maior que 4 bar	Pressão de ar necessária é maior que 4 bar
Alimentação através de canais complicados como cabeça da fresa é possível	Alimentação através de canais complicados como na cabeça da fresa é bem difícil

Não possui manutenção dos componentes	Há desgaste de componentes, logo manutenção dos mesmo, que acarreta custos
Viscosidade dos lubrificantes é de até 50 mm ² /s	Viscosidade dos lubrificantes é de até 100 mm ² /s
Condução simples do aerosol pelos caminhos múltiplos da ferramenta	Alimentação de vários caminhos da ferramenta a partir de uma unidade é complicado
Suporte da ferramenta é padronizado para aplicar esse sistema	Tubulação de plástico e bicos conectores são necessários

Tabela 2.6.4 – comparativo de características entre os dois tipos de canal

2.6.5 – Estudos de MQL no Fresamento

A utilização de MQL no processo de fresamento não é necessariamente a melhor opção, pois vai depender do tipo de sistema (aplicação interna ou externa), rugosidade superficial desejada, material da ferramenta, material usinado, dimensões da ferramenta, custo, entre outros (BRUNI, APOLITO, FORCELLESE, *et al*)

Mas um método simples de verificação da possibilidade de implementar MQL, é de comparar a rugosidade da peça e desgaste da ferramenta, usinando a seco em jorro e com sistema MQL. Se na usinagem a seco a qualidade superficial e desgaste da ferramenta forem praticamente as mesmas, significa que o processo não deve ser implementado, pois o MQL está associado a custos mais elevados e a usinagem a seco não. O MQL vale a implementação quando a qualidade superficial e desgaste de ferramentas são iguais ou melhores que uso de jorro e melhores que a seco (TOSUN e HUSEYINOGLU, 2010).

Segundo KEDARE, BORSE e SHAHANE(2014), em um fresamento de topo em aço doce de dureza Rockwell (HRc) igual a 15, foi utilizada uma fresa HSS não revestida com 5 mm de diâmetro. Foram construídos gráficos relacionando a profundidade de corte e qualidade superficial, com sistemas de jorro e MQL.

A figura 2.6.5 demonstra dois gráficos, um com velocidade de 160 Rpm e outro com 300 Rpm.

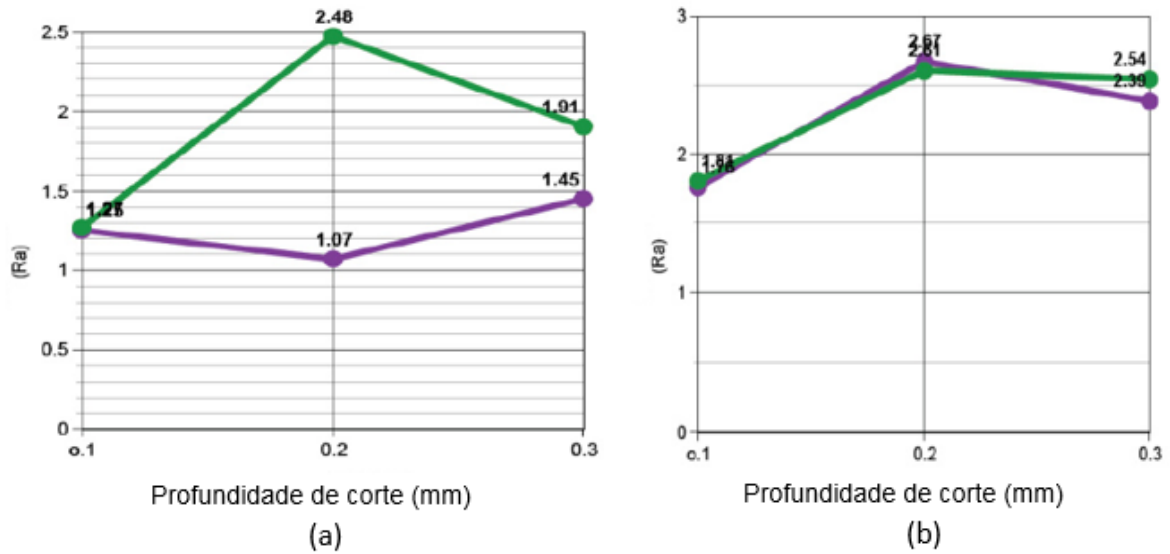


Figura 2.6.5 – fresamento de aço doce, (a) 160 Rpm (b) 300 Rpm - linha roxa corresponde aplicação em MQL e verde em jorro. Fonte: Kedare, Borse e Shahane, 2014 (modificado).

Esse estudo de caso demonstra que o sistema de jorro pode ser substituído pelo MQL com um ganho de qualidade de acabamento, redução de custos, riscos ao meio ambiente e operador, portanto é interessante a sua substituição (KEDARE, BORSE e SHAHANE, 2014).

Então um sistema MQL bem estudado pode diminuir muito custos de fluido de corte, bem como diminuir impactos ambientais e riscos à saúde do operador, mas devem ser bem compreendido a fim de se obter o melhor resultado possível.

2.7 – FORÇA E POTENCIA DE USINAGEM

A força de usinagem (F_u) é essencial para projetar uma máquina de usinagem, pois é a partir dela que se determina quantidade de potência necessária no sistema máquina ferramenta, ou seja, isso estabelece o dimensionamento do motor elétrico principal da máquina (MACHADO *et al*, 2009).

2.7.1 – Determinação Teórica da Força de Corte

A partir de experimentos realizados no século XX, foi observado pelos cientistas que a força de usinagem varia de forma praticamente linear de acordo com a seção do cavaco,

especialmente a força de corte (F_c), principal força no dimensionamento do motor elétrico da máquina, e pode ser calculada a partir da equação 2.8 (MACHADO *et al*, 2009).

$$F_c = k_s \cdot a_p \cdot f_c \quad (2.8)$$

Onde:

k_s = pressão específica de corte

a_p = profundidade ou largura de corte

f_c = avanço de corte = $f_z \cdot \text{sen}(\varphi)$

O coeficiente de pressão específica de corte (k_s) depende de vários fatores como:

- Material da peça – Quantidade de carbono, tratamento térmico, interface entre lubrificante e ferramenta, elementos específicos de ligas metálicas, entre outras. Logo tudo que promove mudança na qualidade mecânica do material usinado, também altera o coeficiente de pressão específico (k_s).
- Material e geometria da ferramenta – Do mesmo modo cada material da peça possui um coeficientes diferentes, materiais distintos da ferramenta de corte, interfaces entre fluidos de corte e ferramenta, também possuem pressões específicas de corte (k_s) desiguais. Outro fator importante está relacionado a geometria das ferramentas de corte e ângulos referentes a usinagem como, folga, cunha, etc. Todos esses fatores promovem diferentes coeficientes.
- Área de corte - O aumento da área da seção de corte, aumenta a pressão específica, mas com o aumento do avanço (f) a pressão específica de corte diminui. É importante observar que quanto maior a profundidade de corte, maior será a força de corte (F_c), e quando se aumenta o avanço (f) a força de corte também cresce mas em uma proporção diferente, já que o coeficiente k_s diminui.
- Velocidades de corte – Velocidades de corte mais elevadas tendem a diminuir levemente o k_s , mas se o material usinado for dúctil, e ocorrer a formação da aresta postiça de corte (APC), a geometria de corte muda, juntamente com o atrito entre ferramenta e cavaco, logo valores do k_s irão variar.

- Condições de lubrificação e refrigeração – Lubrificação e refrigeração, mudam o coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta, logo a pressão específica de corte (k_s) também se modifica.
- Desgaste da ferramenta – Desgastes de flanco aumentam o k_s pois o atrito entre ferramenta peça, já no desgaste referente a saída do cavaco não aumenta o coeficiente de forma tão aparente.

2.7.2 – Determinação Teórica da Pressão Específica de Corte no Fresamento

Na usinagem a espessura do cavaco não é constante, portanto calcula-se um média das espessuras retiradas de cavaco de acordo com a equação 2.9 (Machado et al, 2009).

$$k_s = k_{s1} \cdot \left(\frac{\text{sen}\chi \cdot 180 \cdot a \cdot f_z}{\pi \cdot D_c \cdot \arcsen\left(\frac{a}{D_c}\right)} \right)^z \quad (2.9)$$

Onde:

k_s = constante que depende do material

z = constante que depende do material

a = largura da usinagem

χ = ângulo de posição

f_z = avanço por dente

D_c = diâmetro do cortador

2.7.3 – Determinação Experimental da Força de Usinagem por Cristais Piezoelétricos

O efeito piezoelétrico acontece quando cristais específicos se polarizam eletricamente ao sofrer deformação elástica. Através desse efeito pode-se medir componentes da força de usinagem, devido a deformação desses cristais inseridos entre as partes metálicas do dinamômetro. Quanto maior a corrente gerada, maior a compressão do cristal, então significa que a força exercida sobre o cristal é cada vez mais elevada, como exemplificado no esquemático da figura 2.7.1 (Ferraresi, 1977; Machado et al, 2009).

Portanto as forças da usinagem, exercem uma pressão nos cristais que os deformam, por consequência uma corrente elétrica é gerada, de acordo com valor de corrente medido, a força de usinagem é calculada.

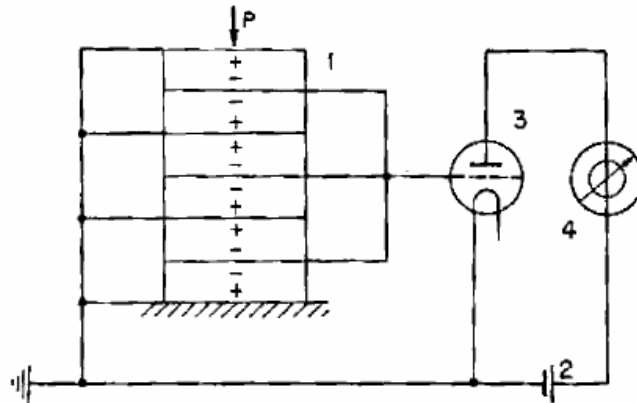


Figura 2.7.1 – esquemático do funcionamento de um medidor piezoelétrico com empilhamento de vários cristais. Fonte: Ferraresi, 1977.

2.8 – DESGASTE DE FERRAMENTA

A ferramenta de corte apesar de apresentar apenas uma pequena parcela do custo de produção por usinagem, necessita de um bom entendimento, pois se a ferramenta é gasta de forma prematura o custo de produção será mais elevado, por conta de paradas da máquina (MACHADO *et al*,2009).

Segundo DINIZ (1999), os dois fenômenos que levam a ferramenta de corte a perder sua capacidade de usinar de forma adequada, são: avaria e desgaste. Ambos promovem uma perda de material que modifica a geometria da aresta de corte da ferramenta.

- Avaria – Esse fenômeno ocorre de forma inusitada, geralmente por quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte. A quebra promove uma perda grande de material ou sua destruição total, é mais comum em ferramentas muito duras com baixa tenacidade. Lascamento também ocorre perda grande de material ou destruição da ferramenta, mas depende da tenacidade da mesma. A trinca não possui perda instantânea de material, mas pode comprometer o processo de usinagem, além poder evoluir para um lascamento ou quebra. A ocorrência de avaria é mais comum em processos de corte interrompido como fresamento, devido aos choques mecânicos e térmicos (MACHADO *et al*,2009).

- Desgaste – De acordo com a norma ISSO 3685 (1993) o desgaste é mudança da forma original da ferramenta resultante da perda de material. O desgaste se difere da avaria porque a perda de material não acontece de forma repentina, mas sim gradual e progressiva. Devido as grandes temperaturas de usinagem, o desgaste ocorre em qualquer que seja o material da ferramenta. A substituição da ferramenta de corte quando corre o desgaste, só é necessário quando o desgaste atinge níveis muito altos que comprometem a usinagem dentro das especificações de projeto (MACHADO *et al*,2009).

A figura 2.8.1 demonstra dois desgastes diferentes em ferramentas de corte.

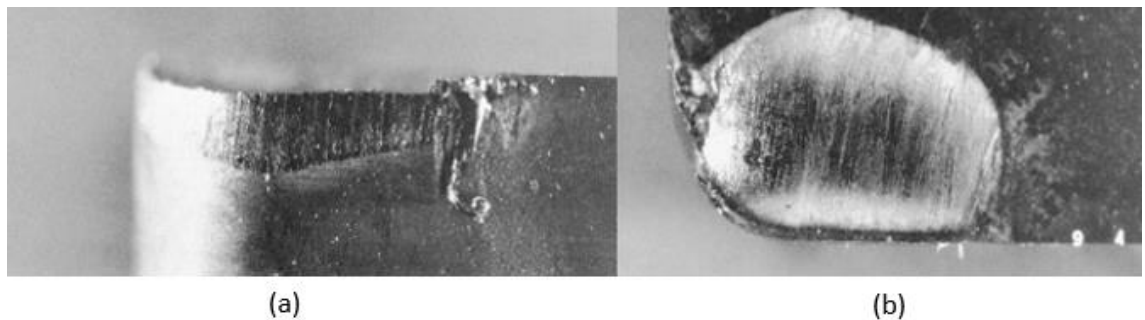


Figura 2.8.1 – desgaste de flanco (a) desgaste formando uma cratera na superfície de saída (b) em uma ferramenta de metal duro. Fonte: Groover, 2010.

2.9 – ACABAMENTO SUPERFICIAL

A superfície de uma peça usinada é resultado de um processo que evolui deformação plástica através da ruptura de material. Grandes quantidades de calor, vibração, e as vezes até mesmo reações químicas, ocorrem durante essa retirada de material. Todas essas variáveis associadas, englobam mudanças não só na superfície da peça, mas também em algumas camadas abaixo da mesma. (Machado et al,2009).

O acabamento superficial pode ser dividido em medida de rugosidade, ondulações e falhas. O acabamento de uma peça deve ser especificado de acordo com seu uso, ou seja, cada projeto precisa de uma qualidade de acabamento. Mancais e calibradores por exemplo, precisam ser bem lisos, a fim de se obter o mínimo de atrito possível, já em sistemas de freio seria uma superfície mais rugosa, pois se deseja maior atrito (Machado et al,2009).

Ondulações são irregularidades superficiais relacionam espaçamentos maiores que as irregularidades consideradas na rugosidade e podem ser causadas por vibrações, flexões da ferramenta, temperatura de corte, erros de fixação da ferramenta, entre outros. Já as falhas são descontinuações na superfície que acontecem de forma incomum e indesejada e pode ser causada por bolhas, inclusões, trincas ou mesmo pelo próprio processo (Machado et al,2009).

2.9.1 – Rugosidade

A rugosidade é composta por erros micro geométricos resultantes do processo de corte. A medida da rugosidade pode ser realizada por diversos parâmetros, que são examinados depois da usinagem, ou até mesmo durante, pois de acordo com o projeto, pode ser considerado uma variável crítica. A rugosidade é afetada por vários fatores e podem ser avaliados por alguns parâmetros como:

- Parâmetro de amplitude - É definido pelas alturas dos picos e vales provenientes do processo de usinagem, sem considerar a distância entre as irregularidades da superfície.
- Parâmetro de espaço – Delimitado pelos espaçamentos do desvio pela extensão longitudinal da superfície.
- Parâmetros híbridos – Utiliza a combinação das variações longitudinais e das alturas.

O parâmetro mais usado na indústria é o de amplitude R_a (desvio aritmético médio), conforme mostrado na figura 2.9.1. É bastante empregado como controle do processo de usinagem, pois alterações no seu valor representam uma forma de observar desgaste de ferramenta. A sua popularidade entre a indústria também está ligada simplicidade do funcionamento dos seus instrumentos de medição (Ferraresi, 1977).

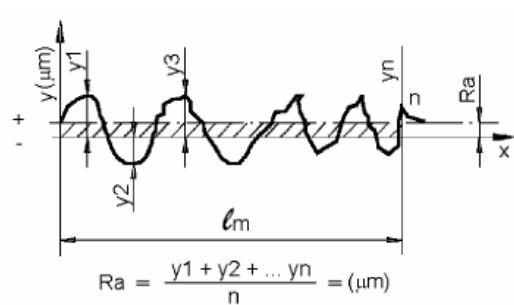


Figura 2.9.1 – Demonstração de parâmetro R_a . Fonte: Rosa (2009).

Outros parâmetros de amplitude usados para cálculo da rugosidade são R_z , altura média das 10 maiores distancias pico-vale da superfície usinada e R_q desvio quadrático médio da superfície face usinada.

2.9.2 - Cálculo Teórico da Rugosidade R_a , R_q e R_z para Fresamento Frontal

R_a é definido como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem e pode ser calculado pela equação 2.10 e R_q é definido pela equação (2.11).

$$R_a = \frac{re - \sqrt{re^2 - \left(\frac{f_z}{2}\right)^2}}{2} \quad (2.10)$$

$$R_q = \frac{\sqrt{\sum y_n^2}}{l} \quad (2.11)$$

Onde:

f_z = avanço por dente

r_e = raio de ponta

y_n = média das alturas

l = comprimento da amostragem

O R_z pode ser calculado a partir da média da soma entre as 10 maiores distancias entre pico vale. A soma pico vale pela distância pode ser mostrada na figura 2.9.2.

$$R_z = R_p + R_v$$

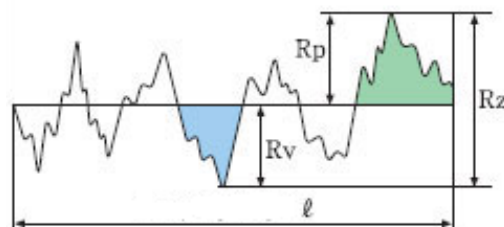


Figura 2.9.2 - Cálculo de um R_z para uma distância. Fonte: Olympus disponível em: http://www.olympus-ms.com/en/knowledge/metrology/roughness/2d_parameter/

2.9.3 – Medição da Rugosidade

O equipamento que mede a rugosidade, é o rugosímetro. Existem dois tipos de teste para realizar a medição, por contato ou sem contato. Na medição feita por contato existe um apalpador feito de diamante que percorre a superfície da peça em linha reta em um comprimento definido. O deslocamento vertical durante o comprimento estabelecido do apalpador envia sinais elétricos, que por sua vez são lidos e geram um gráfico ou números referente à altura dos picos, porém esse instrumento de medição possui alguns erros associados a ponta de diamante. O raio da ponta que exhibe o perfil de uma forma mais suave que a realidade, sofre desgaste medindo superfícies de materiais muito duros e causa danos na face de materiais moles (Machado et al,2009).

O rugosímetro sem contato funciona com dispersão de raios infravermelhos sobre o plano da peça, então uma matriz de fotodiodos as identifica e calcula a intensidade dessa dispersão que pode ser usada no cálculo dos parâmetros de rugosidade. Esse sistema é muito útil, pois não acarreta danos a superfície e ao aparelho, mas também possui alguns cuidados durante seu uso, pois qualquer vibração ou sujeira pode ser interpretado como parte da superfície (Machado et al,2009).

Portanto o cálculo do acabamento superficial depende dos parâmetros utilizados bem como algumas variáveis referentes ao raio da ferramenta de corte e avanço. A medição experimental da rugosidade depende do instrumento utilizado, bem como objetivo de análise em questão (Machado et al,2009).

2.10 – CARACTERÍSTICAS AÇO SAE 8640

O aço SAE 8640 é dito como baixa liga pois o somatório de seus componentes ligantes não ultrapassa 8% de sua massa total. Esse aço tem como característica boa usinabilidade e resistência mecânica, além de possuir boa temperabilidade (LIMA, 2007).

A aplicação desse material na indústria é bem ampla, pois compõe grande variedade na produção de elementos mecânicos, devido a sua alta resistência a fadiga. Isso o torna muito útil na composição de engrenagens, brocas, eixos hidráulicos, caixas de transmissão, porcas, virabrequins, pistões, entre outros (KIRCHNER, 2014; LIMA, 2007).

A figura 2.10.1 demonstra características da composição química do aço SAE 8640 de acordo com o catalogo da GGD metais.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,38	0,15	0,75	0,40	0,40	0,15
–	–	–	–	–	–
0,43	0,30	1,00	0,60	0,70	0,25

Figura 2.10.1 – Porcentagem em massa de elementos na liga do aço 8640. Fonte: Catálogo GGD metais

É um aço muito versátil para produção de elementos mecânicos automotivos, e tem ótima temperabilidade e usinabilidade, geralmente após sua usinagem, passa por processos de tratamento térmico, a fim de aumentar suas propriedades mecânicas. Após seu tratamento térmico é muito utilizado também como fabricação de parafusos, engrenagens, pinos, eixos e virabrequins (LIMA, 2007).

2.11 – PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Planejamento de experimentos é utilizado em todos segmentos onde se pretende investigar a relevância das variáveis envolvidas no processo. Essa metodologia é mais bem aproveitada ao utilizar muitas variáveis de entrada, isso permite salientar aquelas que representam maior influência no processo, de acordo com resultados na saída. Diversas vantagens na aplicação do planejamento de experimentos com interação entre duas ou mais variáveis podem ser atingidos, se a sistemática do planejamento for bem escolhido. A figura 2.11.1 demonstra um esquemático de planejamento de experimentos. (SILVA, 2011).

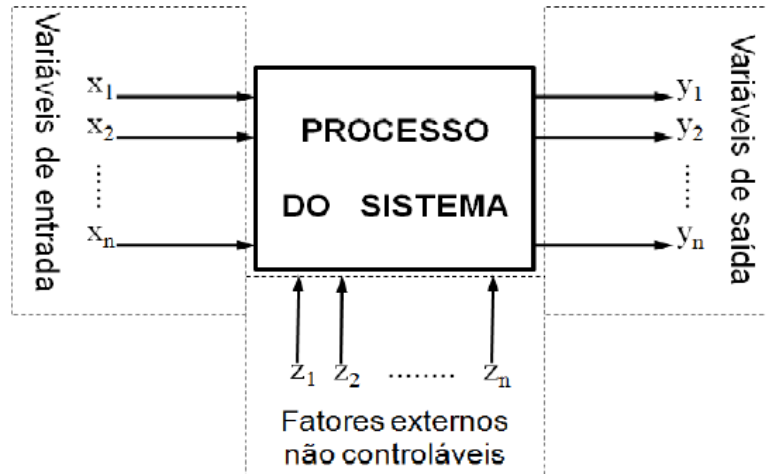


Figura 2.11.1 – Variáveis presentes em um sistema de planejamento de experimentos. Fonte: SILVA, 2011

As variáveis de saída do sistema, são as respostas que se obtém através do controle das variáveis de entrada juntamente com os fatores externos não controláveis, também chamados de ruídos. Os ruídos são perturbações indesejadas que ocorrem durante o teste, que é característico de cada processo (SILVA, 2011).

Existem três princípios básicos para se realizar um bom planejamento de experimentos:

- Replicação – Realização de ensaios com os mesmos atributos e especificidade da anterior. Esse procedimento permite estimar erros experimentais.
- Aleatoriedade – Permite independência dos erros e variáveis durante o estudo.
- Blocagem – Controlar o máximo possível a presença de fatores externos durante o experimento.

2.11.1 – Planejamento Fatorial

O planejamento fatorial é uma das técnicas mais utilizadas para realizar de experimentos, pois permite analisar comportamento de variáveis de entrada, também chamada de fatores, com suas respectivas influências sobre as variáveis de saída. Essa técnica é muito útil quando se pretende estudar a interação conjunta dos fatores, chamados de efeitos de interação entre as variáveis de entrada (SILVA, 2011).

Planejamento de experimentos fatorial proporciona alguns benefícios como:

- Resultados obtidos a partir de matemática simples;
- Número baixo de ensaios com boa resposta;
- Controle de ensaios por blocagem;
- Permite formar planejamentos compostos;
- Em um planejamento com dois níveis é possível seu fracionamento.

Os procedimentos devem ser cuidadosamente verificados na sua elaboração, como escolha dos fatores, seleção de níveis, escolha das variáveis de saída, seleção do modelo mais adequado para o planejamento, realização do experimento com replicação e interpretação adequada dos dados obtidos no experimento (SILVA, 2011).

2.11.2 – Planejamento Fatorial Completo 2^k

O planejamento fatorial completo é formado por “k” fatores presentes no processo, e para cada fator são utilizados dois níveis quantitativos ou qualitativos para análise. A quantidade de testes realizados depende da combinação entre níveis de entrada dos fatores, ou seja, são necessário uma quantidade de 2^k experimentos, resultado da combinação entre as variáveis de entrada levando em consideração apenas 2 níveis (SILVA, 2011).

Com utilização de 2 níveis para cada variável, são utilizados uma codificação dividida em nível superior (+1) e nível inferior (-1). A figura 2.11.2 demonstra uma matriz de comparação do planejamento juntamente com matriz resposta. A primeira coluna da matriz da figura, apresenta o sequenciamento do 2^k testes. A segunda coluna representa o valor médio das análises. Os valores destacados com negrito são as combinações possíveis dos “k” fatores de acordo com sua codificação. Valores em itálico são as interações dos fatores. A última coluna representam as saídas, para se obter uma matriz resposta (SILVA, 2011).

Nº Ens	M	Variáveis de entrada					Interação entre duas variáveis					Respostas			
		k_1	k_2	k_3	.....	k_n	k_1k_2	k_1k_3	k_2k_3$	.....	k_{(n-1)}k_n$	y_1	y_2	.....	y_n
1	+1	-1	-1	-1	.....	-1	<i>+1</i>	<i>+1</i>	<i>+1</i>	.....		y_{11}	y_{21}	.....	y_{n1}
2	+1	+1	-1	-1	.....	-1	<i>-1</i>	<i>-1</i>	<i>+1</i>	.....		y_{12}	y_{22}	.....	y_{n2}
3	+1	-1	+1	-1	.....	-1	<i>-1</i>	<i>+1</i>	<i>-1</i>	.....		y_{13}	y_{23}	.....	y_{n3}
4	+1	+1	+1	-1	.....	-1	<i>+1</i>	<i>-1</i>	<i>-1</i>	.....		y_{14}	y_{24}	.....	y_{n4}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
2^k	+1	+1	+1	+1	.....	+1	<i>+1</i>	<i>+1</i>	<i>+1</i>	.....		y_{12^k}	y_{22^k}	.....	y_{n2^k}

Figura 2.11.2 – Planejamento fatorial completo de k variáveis de entrada

2.11.2 – Análise de Significância dos Efeitos

A significância das variáveis de entrada nos resultados encontrados nas variáveis de saída, são chamadas de efeitos. A relevância desses efeitos decorrentes das interações dos fatores pode ser calculado de forma numérica através da equação matricial 2.12.

$$Y_n = X^t Y \quad (2.12)$$

Onde:

Y_n = é o valor da significância

X = matriz do coeficiente de contraste

Y = matriz dos resultados

O erro padrão dos efeitos (S_{efeito}) é determinado segundo a equação 2.13.

$$S_{\text{efeitos}} = \sqrt{\frac{S^2}{N_n}} \quad (2.13)$$

Onde:

S_{efeito} = erro padrão dos efeitos

S^2 = média aritmética das variância

N_n = número de repetições para cada ensaio

A média variância é calculada através da equação 2.14.

$$S^2 = \frac{v_1 S_1^2 + v_2 S_2^2 + \dots + v_N S_N^2}{v_1 + v_2 + \dots + v_N} \quad (2.14)$$

Onde:

v = número de graus de liberdade

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1. Aspectos Gerais

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais adotados para a realização dos ensaios propostos no trabalho de conclusão de curso. Os procedimentos são compostos pelas seguintes etapas:

3.2. Ensaio de Força de Usinagem

- Ensaio de Força de Usinagem a Seco
- Ensaio de Força de Usinagem com Aplicação de MQL

3.3. Ensaio de Acabamento Superficial

- Ensaio de Acabamento Superficial a Seco
- Ensaio de Acabamento Superficial com Aplicação de MQL

3.4. Caracterização do Aço SAE 8640

- 3.4.1. Ensaio Metalográfico do Aço SAE 8640
- 3.4.2. Ensaio de Microdureza do Aço SAE 8640

O organograma da Fig. 3.1 mostra a metodologia de trabalho proposta para atingir os objetivos informados no capítulo 1. Conforme a Fig. 3.1, o trabalho proposto inicia-se com a caracterização do aço SAE 8640, especificamente com os ensaios metalográfico e de microdureza, e posteriormente serão executados ensaios de usinagem no fresamento frontal do aço SAE 8640 com a obtenção do acabamento superficial e força de usinagem, tanto a seco, sem aplicação de fluido de corte, quanto com aplicação de mínima quantidade de lubrificante (MQL).

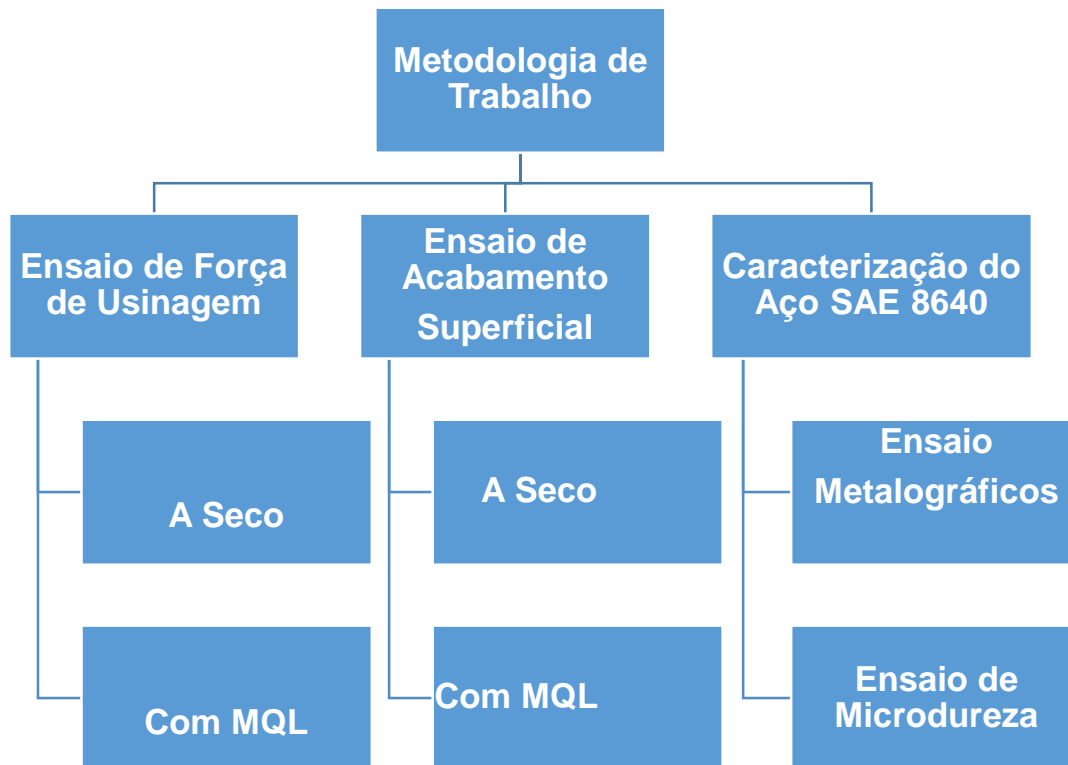


Figura 3.1 - Organograma da metodologia de trabalho proposta.

Os procedimentos adotados em cada uma das etapas são detalhados a seguir.

3.2. Ensaio de Força de Usinagem

A etapa seguinte tem como propósito obter as forças de usinagem nas direções X, Y e Z durante o fresamento frontal do aço SAE 8640, tanto a seco quanto com aplicação de mínima quantidade de lubrificante, de acordo com as seguintes condições de corte: $v_c= 80$ e 240 m/min, $f_z= 0,10$ e $0,20$ mm/dente, $a_p= 1,0$ e $2,0$ mm e penetração de trabalho constante, $a_e= 50$ mm. Essas condições de corte foram estabelecidas dentro da faixa de trabalho das ferramentas de corte, conforme as especificações do fabricante.

Nestas condições será realizado um planejamento estatístico a dois níveis (+1 e -1) e três variáveis de entrada (velocidade de corte (v_c), profundidade de corte (a_p) e avanço por dente (f_z)), conforme detalhado na tabela 3.1. O planejamento estatístico a dois níveis e três variáveis

de entrada (2^3) dará origem a oito combinações de usinagem, conforme matriz mostrada na tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Variáveis de interesse em dois níveis para o planejamento fatorial 2^3 .

Variáveis	Nível (+)	Nível (-)
Velocidade de corte : v_c (m/min)	240	80
Avanço por dente: f_z (mm/dente)	0,20	0,10
Profundidade de corte: a_p (mm)	2,0	1,0

Tabela 3.2 - Matriz das condições de corte para o planejamento fatorial 2^3 .

Ensaio	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_p (mm)
1	240	0,10	1,0
2	80	0,10	1,0
3	240	0,20	1,0
4	80	0,20	1,0
5	240	0,10	2,0
6	80	0,10	2,0
7	240	0,20	2,0
8	80	0,20	2,0

A força de usinagem será adquirida através de um dinamômetro da marca Kistler Instrument, modelo 9265B, que consiste de uma base piezoelétrica, montada sobre a mesa de um centro de usinagem Diplomat Petrus 50100, equipamentos pertencentes ao IFG Campus Goiânia, onde os ensaios serão realizados. O sistema de aquisição de força de usinagem contém ainda um amplificador de sinal ajustado de acordo com a sensibilidade dos cristais piezoelétricos, na direção correspondente de solicitação X, Y e Z. Os sinais provenientes do amplificador são recebidos, convertidos e armazenados em um computador que contém uma placa de aquisição da *National Instruments* e o *Software Labview*. A taxa de aquisição de dados utilizada será de 1000 pontos por segundo, serão realizadas três medições de força para cada condição de corte estabelecida na tabela 3.2. Os sinais de força adquiridos nas direções X, Y e Z serão tratados por meio de uma medida estatística, o valor quadrático médio do sinal (*RMS - Root Mean Square*), ou seja, a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores de força adquiridos na frequência de execução dos ensaios. Ainda para a análise estatística dos

resultados de força de usinagem obtidos na execução das condições de corte mostradas na tabela 3.2, será utilizado o *software Statistica 7*.

As ferramentas de corte utilizadas nos ensaios serão quatro insertos de metal duro da classe P revestidos de $Al_2O_3 + TiN$ por MTCVD com quatro arestas de corte fabricados pela Sandvik, especificação 490R-140408M-PM 4240. Para alojar os insertos de metal duro será utilizado um suporte porta-ferramentas de aço endurecido com diâmetro de 50 mm e quatro alojamentos fabricado pela Sandvik, especificação Coromill 490-050Q22-14M. Os insertos e o suporte porta-ferramentas pertencem ao Laboratório de Processos de Fabricação da UnB-FGA. A figura 3.2 mostra os insertos de metal duro que serão utilizados nos ensaios de força de usinagem, e o detalhe de um inserto montado no suporte porta-ferramentas.



Figura 3.2 - Insertos de metal duro da classe ISO P para fresamento de aços.
Fonte: Próprio Autor

Os corpos de prova de aço SAE 8640 que serão utilizados nos ensaios de força de usinagem são mostrados na figura 3.3, tendo como dimensões 50 x 100 x 150 mm, e foram apenas beneficiados pela Gerdau e doados pelo Senai-Ítalo Bologna de Goiânia, confeccionados por conformação mecânica através do processo de laminação, sem tratamento térmico posterior.



Figura 3.3 - Corpos de prova de aço SAE 8640. Fonte: Próprio Autor.

Nos ensaios de força de usinagem com aplicação do método de mínima quantidade de lubrificante será utilizado um nebulizador com dois bocais de aplicação, com variação de pressão de 0,5 a 6,0 bar, fabricado pela *Acculube*, equipamento pertencente ao IFG Campus Goiânia.

3.3. Ensaio de Acabamento Superficial

No ensaio de acabamento superficial o objetivo é obter a rugosidade da superfície fresada, tanto a seco quanto com aplicação de mínima quantidade de lubrificante, aplicando a mesma metodologia proposta no item 3.2, utilizando planejamento estatístico a dois níveis (+1 e -1) e três variáveis de entrada (v_c , a_p e f_z), gerando oito combinações de usinagem no fresamento frontal.

Após o fresamento frontal do corpo de prova de aço SAE 8640, para cada condição de corte mostrada na tabela 3.2, serão obtidos os parâmetros de rugosidade da superfície usinada, definidos como:

- Ra - desvio aritmético médio da superfície;
- Rq - desvio quadrático médio da superfície;
- Rz - altura média das 10 maiores distâncias pico-vale da superfície.

As medições dos parâmetros de rugosidade Ra, Rq e Rz serão executadas conforme recomendações da Norma NBR ISO 4287/2002 que define os termos para especificação da rugosidade. A norma utilizada na configuração do rugosímetro para aquisição dos parâmetros de rugosidade será a ISO 1997 com comprimento de amostragem de 0,8 mm. Serão realizadas três medições para cada parâmetro de rugosidade, na direção transversal as linhas de avanço deixadas pela ferramenta de corte sobre o corpo de prova.

Este ensaio será realizado no Laboratório de Processos de Fabricação da UnB-FGA utilizando um centro de usinagem Romi D600, como mostrado na figura 3.4. Na medição dos parâmetros de rugosidade será utilizado um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210 pertencente ao Senai-Gama Rosevarte Alves Souza.

No ensaio de acabamento superficial com aplicação do método de mínima quantidade de lubrificante será utilizado um nebulizador com dois bocais de aplicação, com variação de pressão de 0,5 a 4,0 bar, fabricado pela *Quimatic*, equipamento adquirido pelo Laboratório de Processos de Fabricação da UnB-FGA.



Figura 3.4 - Montagem do ensaio de acabamento superficial. Fonte: Próprio Autor.

3.4. Caracterização do Aço SAE 8640

Nesta etapa será realizada a caracterização microestrutural e mecânica do aço SAE 8640 de acordo com as metodologias descritas a seguir.

3.4.1. Ensaio Metalográfico do Aço SAE 8640

O objetivo desta etapa é caracterizar a microestrutura do aço SAE 8640 por meio de ensaio metalográfico. A caracterização microestrutural será efetuada em duas amostras retiradas dos corpos de prova utilizados nos ensaios de força de usinagem e acabamento superficial, conforme a figura 3.3.. A preparação das amostras, para análise metalográfico, consistirá no embutimento, lixamento com lixas na sequência de *mesh* 600, 1500 e 2000, e polimento com pasta de diamante de granulometria 0,25 μm . Posteriormente as amostras serão atacadas com Nital a 2 % com o intuito de revelar a microestrutura do material. O embutimento das amostras, lixamento, polimento, ataque químico com Nital e a análise metalográfica serão realizados no Laboratório de Materiais da UnB-FGA.

3.4.2. Ensaio de Microdureza do Aço SAE 8640

O objetivo desta etapa é obter a dureza do aço SAE 8640 por meio de ensaios de microdureza Vickers. O ensaio consiste na aplicação de uma carga de 0,1 kgf sobre uma amostra de aço SAE 8640 utilizando um microdurômetro Vickers com penetrador piramidal com ângulo de 120° no vértice e ponta esférica com raio de 0,002 mm. Serão realizadas dez medições de microdureza Vickers ao longo da seção da peça com distanciamento entre cada indentação de 100 μm . Este ensaio será realizado no Laboratório de Materiais da UnB-FGA utilizando um microdurômetro HMV 700.

4. RESULTADOS ESPERADOS

Os principais resultados esperados com a execução deste trabalho são apresentados a seguir:

- Conhecer com maior propriedade os fundamentos de usinagem, especificamente o processo de fresamento, muito utilizado pela indústria automotiva e metal mecânica em geral;
- Identificar claramente a influência dos principais parâmetros de corte (v_c , a_p e f_z) na vida da ferramenta e acabamento superficial de uma peça usinada;
- Espera-se que a aplicação da técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL) seja uma alternativa no fresamento de aços ligados de médio carbono como o aço SAE 8640 de difícil usinabilidade, permitindo o aumento da vida útil da ferramenta com a diminuição dos esforços de corte e ainda possibilitando uma melhora no acabamento da superfície usinada;
- Colaborar com novas investigações e fornecer dados que darão suporte técnico na viabilização do uso do MQL no processo de fresamento frontal;
- Capacitação profissional para atuação nas áreas automotiva e metal mecânica.
- Dominar o uso do *software* Statistica, como uma ferramenta para aplicação industrial;
- Publicação dos resultados do trabalho em congressos da área de engenharia automotiva e mecânica.

5. CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

O cronograma mostrado na tabela 5.1 estabelece como serão distribuídos em meses os ensaios previstos no capítulo 3 para o segundo semestre de 2016.

Tabela 5.1 - Cronograma de execução do trabalho proposto distribuído em meses no segundo semestre de 2016.

Atividade	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Correções do TCC1	X					
Revisão Bibliográfica	X	X	X	X	X	
Ensaio de Força de Usinagem a Seco		X				
Ensaio de Força de Usinagem com Aplicação de MQL		X				
Ensaio de Acabamento Superficial a Seco		X				
Ensaio de Acabamento Superficial com Aplicação de MQL			X			
Ensaio Metalográfico do Aço SAE 8640			X			
Ensaio de Microdureza do Aço SAE 8640				X		
Confecção de artigo para congresso - COBEF 2017		X	X	X	X	X
Confecção do TCC2		X	X	X	X	
Defesa do TCC2						X

BIBLIOGRAFIA

- BARBOSA, R. S. Avaliação dos esforços de corte no fresamento frontal da liga de Alumínio-Silício (A356) quando mantido constante a produção de peças. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica). Minas Gerais: Universidade Federal de São João del-Rei, 2014.
- BRUNI, C.; d'APOLITO; FORCELLESE, A.; GABRIELLI, F.; SIMONCINI, M. Surface roughness modelling in finish face milling under MQL and dry cutting conditions. Ancona, Italy, 2004.
- CARLA, A. *Usinagem I. Geometria da ferramenta*. Rio de Janeiro: 2013.
- CORREIA, A.E; DAVIM, J.P. Efeito da lubrificação mínima (MQL – Minimal quantity of lubricant) na maquinagem de uma liga de alumínio. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões – Mecânica Experimental*, Portugal, v. 13, 2006.
- DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG. *Minimum quantity lubrication for machining operations*. German: 2010.
- DINIZ, V. D. Projeto e confecção de molde para injeção de termoplástico. Trabalho (Graduação em Engenharia Mecânica). Goiás: Universidade Federal de Goiás.
- DINIZ, A. E; FERREIRA, J.R; SILVEIRA, J.F. Toroidal Milling of Hardened SAE H13 Steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Rio de Janeiro, v. 26, 2004.
- DINIZ, A. E.; NEVES, D. O fresamento de material endurecido com fresa de ponta esférica – análise da influência dos parâmetros de usinagem de desbaste na força de corte. In: 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2003, Minas Gerais.
- INSTITUTO FEDERAL SANTA CATARINA. *Apostila de Usinagem I*. Santa Catarina, 2003.
- KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. *Manufacturing Processes for Engineering Material*. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2008.
- KEDARE, S. B; BORSE, D. R; SHAHANE, P.T. Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Surface Roughness of Mild Steel of 15HRC on Universal Milling Machine. In: 3rd International Conference on Materials Processing and Characterization (ICMPC), 2014, India.
- SALES, W. F.; GUIMARÃES, G.; MACHADO, A. R. Avaliação do desempenho dos fluidos emulsionável e integral no torneamento do aço ABNT 8640. Minas Gerais.
- SILVA, L. C. Comportamento da rebarba no fresamento de faceamento do aço inoxidável PH 13 8Mo. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica). Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia.

- SOUZA, A. J. *Processos de Fabricação por Usinagem Parte 1*. Rio Grande do Sul: 2011.
- TAI, B. L.; STEPHENSON, D. A.; FURNESS, R. J.; SHIH, A. J. Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Automotive Powertrain Machining. In: 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, 2014, USA.
- TOLEDO, J. V. Estudo do acabamento superficial do fresamento de faceamento do aço ABNT 1045 utilizando pastilha com geometria alisadora. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica). Minas Gerais: Universidade Federal de Itajubá, 2015.
- TOLEDO, J. V.; FERREIRA, J. R.; JÚNIOR, S. S.; DINIZ, A. E. Fresamento de acabamento do aço ABNT 1045 com pastilha alisadora. In: 8º Brazilian Congress of Manufacturing Engineering, 2015, Salvador.
- TOSUN, N.; HUSEYINOGLU, M. Effect of MQL on Surface Roughness in Milling of AA7075-T6. *Materials and Manufacturing Processes*, Turkey, 2009.
- UYSAL, A.; DEMIREN, F.; ALTAN, E. Applying Minimum Quantity Lubrication (MQL) Method on Milling of Martensitic Stainless Steel by Using Nano MoS₂ Reinforced Vegetable Cutting Fluid. In: World Conference on Technology, Innovation and entrepreneurship, 2015, Istanbul.
- VIANA, R. Estudo da caracterização de ferramentas de corte texturizadas a laser e revestidas utilizadas no fresamento frontal de ferro fundido vermicular. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica). Minas Gerais: Universidade Federal de Uberlândia, 2009.
- ZEILMANN, R. P.; VACARO, T.; BORDIN, F. M.; SONDA, V. *Processos de usinagem e responsabilidade ambiental através da redução da utilização de fluidos de corte*. Rio Grande do Sul.
- ROSA, Luís Carlos. *Acabamento de Superfícies; Rugosidade Superficial*. São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2009.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. São Paulo: Blucher, 1977.
- SHAWN, M, C. *Metal cutting Principles*. Londres: Oxford University Press, 1984.
- MACHADO, R, A.; ABRÃO, M, A.; COELHO, T, R.; SILVA, B, M. *Teoria da Usinagem Dos Materiais*. São Paulo: Blucher, 2009.
- CATÁLOGO GGD metals disponível em: <http://www.ggdmetals.com.br/aco-construcao-mecanica/sae-8640/> acessado dia 22/04/2016
- SANDVIK COROMANT. Manual técnico de usinagem, torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de fixação. 2.ed. São Paulo: Elanders, 2010.
- DINIZ, ANSELMO EDUARDO, MARCONDES, FRANCISCO CARLOS E COPPINI, NIVALDO LEMOS. 2010. *Tecnologia de Usinagem dos Materiais*. São Paulo : Artliber, 2010.

BARBOSA, R, S. Avaliação dos Esforços de Corte no Fresamento Frontal da Liga de Alumínio-Silício (A356) Quando Mantido Constante a Produção de Peças. UFSJ, 2014.