

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA

KEDSON PINHEIRO DE MENDONÇA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:
**ANÁLISE DO DESGASTE FERRAMENTAL NA USINABILIDADE DO FERRO
FUNDIDO NODULAR**

MANAUS

2018

KEDSON PINHEIRO DE MENDONÇA

**ANÁLISE DO DESGASTE FERRAMENTAL NA USINABILIDADE DO FERRO
FUNDIDO NODULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Estado do Amazonas como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. M.Sc. Bruno Mello de Freitas

MANAUS

2018

KEDSON PINHEIRO DE MENDONÇA

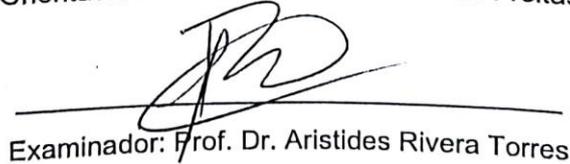
**ANÁLISE DO DESGASTE FERRAMENTAL NA USINABILIDADE DO FERRO
FUNDIDO NODULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao curso de Engenharia
Mecânica da Universidade do Estado do
Amazonas como requisito para a
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Mecânica.

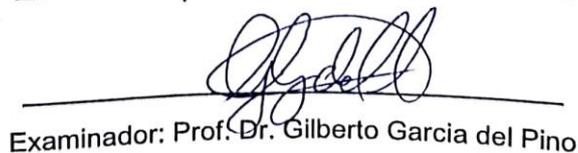
MANAUS, 11 DE JUNHO DE 2018



Orientador: Prof. M.Sc. Bruno Mello de Freitas



Examinador: Prof. Dr. Aristides Rivera Torres



Examinador: Prof. Dr. Gilberto Garcia del Pino

Dedico este trabalho de conclusão de curso primeiramente a Deus. Dedico a minha grande amiga, companheira, minha rainha, minha Mãe. Dedico também ao meu irmão pelo seu apoio, por ser um dos grandes motivos para eu chegar até aqui. Dedico ao meu Pai, por sempre me incentivar a seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por estar sempre comigo me dando forças para seguir, por sempre está comigo nas horas mais difíceis, por me guiar, por me ajudar a chegar onde estou.

Agradeço a minha Mãe, por nunca deixar eu desistir, por inúmeras noites de conversas que ajudaram a clarear minha mente e meu caminho, por sempre me apoiar, por sempre me ajudar, por tudo.

Agradeço ao meu irmão, por me aliviar nos momentos mais tensos com suas conversas descontraídas. Ao meu pai, pelo seu companheirismo, principalmente por ter dado início a minha jornada de estudos, por me apoiar em cada escolha, por sempre estar comigo.

Agradeço ao meu orientador e amigo Bruno Freitas, por ter me apoiado desde o início da nossa primeira reunião, por me incentivar a estudar, pelas dicas, pelos aprendizados, conversas, por tudo, por ter sido meu pai acadêmico nesse período de aprendizado.

Agradeço aos colegas do LabMatPro pela ajuda nos experimentos, pelos ensinamentos e histórias compartilhadas, em especial, ao Guilherme Moreira pela grande força e ajuda, no decorrer desse percurso.

Agradeço ao Sr. Adiel da Niartech e seu Raimundo da Usifal, pela sua paciência e disposição ao me ensinar e, por me ter me ajudado na parte técnica e experimental. Thiago, Melina, Professor Arlindo, todos os envolvidos que me ajudaram a sair do papel até a prática.

Agradeço aos meus amigos, pelo apoio. Não importa o que você faça ou conquiste, sem seus amigos, não vai ter graça, obrigado a todos.

Agradeço a minha grande companheira na graduação, minha namorada, onde me ajudou, me apoiou nas horas difíceis dessa jornada, obrigado pelas dicas e conselhos, por tudo.

“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer.”

(Mahatma Gandhi)

RESUMO

No geral, Fornecedores de materiais de usinagem informam apenas uma média de tempo da durabilidade ou da vida útil da ferramenta de corte, onde a mesma pode ser utilizada em vários tipos de materiais que sejam de acordo com sua aplicação. O material estudado foi o ferro fundido nodular, com 3.80% p C, e foi analisado devido a sua alta taxa de usinabilidade, boa resistência a carga e flexibilidade e, são bastantes resistentes a óleos e graxas. Foi utilizado um torno mecânico manual, com Rotação igual a 900 rpm, avanço de 0.15 mm/rot e profundidade para cada passe de 0.5 mm, onde analisou-se passes sem a aplicação do fluido de corte em uma ferramenta de metal duro recoberta com CVD (Deposição por Vapor Químico). Após os ensaios foi verificado um desgaste e calculado a vida útil da ferramenta, segundo Taylor. O tempo de corte total do desgaste foi de 22.2 minutos com altura de 1.4 mm. O desgaste encontrado na ferramenta foi o de Flanco.

Palavras-chave: Ferro Fundido, Ferro Fundido Nodular, Desgaste de Ferramenta, Equação de Taylor, Metalografia, Torneamento.

ABSTRACT

In general, suppliers of machining materials inform only an average of time of durability or life of the cutting tool, where it can be used in various types of materials that are according to its application. The material studied was the nodular cast iron, with 3.80% p C, and was analyzed due to its high machinability rate, good load resistance and flexibility and, are quite resistant to oils and greases. A manual lathe was used, with rotation equal to 900 rpm, 0.15 mm/rot advance and depth for each pass of 0.5 mm, where passes were analyzed without the application of the cutting fluid in a hard metal tool covered with CVD (chemical vapour deposition) . After the tests it was verified a wear and calculated tool life, according to Taylor. The total wear cut time was 22.2 minutes with a height of 1.4 mm. The wear found in the tool was the flank.

Keywords: Cast Iron, Nodular Cast Iron, Tool Wear, Taylor's Equation, Metallography, Turning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Amostras referentes ao seis tipos de partículas de grafite de acordo com a norma ISO-945.....	05
Figura 2 – Microestrutura típica do núcleo e na periferia, respectivamente.....	10
Figura 3 – Áreas de desgastes na ferramenta de corte.....	29
Figura 4 – Desgaste por entalhe.....	30
Figura 5 – Formação aresta postiça.....	31
Figura 6 – Desgaste por fratura.....	32
Figura 7 – Desgaste por trincas termicas.....	32
Figura 8 – Desgaste por deformação plastica.....	33
Figura 9 – Esquema do desgaste por difusão.....	34
Figura 10 – Desgaste por craterização.....	34
Figura 11 – Desgaste de flanco.....	35
Figura 12 – Torno Mecânico Manual.....	42
Figura 13 – Tarugo.....	43
Figura 14 – Representação da Pastilha de Corte.....	43
Figura 15 – Porta Ferramenta.....	44
Figura 16 – Microscópio Utilizado no Experimento.....	44
Figura 17 – Demonstrando o Corpo de Prova.....	45
Figura 18 – Embutidora.....	46
Figura 19 – Amostra do Embutimento do Fe.....	46
Figura 20 – Operação Manual do.....	47
Figura 21 – Politriz.....	48
Figura 22 – Analise da amostra.....	49
Figura 23 – Amostra Microscópica.....	49
Figura 24 – Amostra do Ferro Fundido Nodular.....	50
Figura 25 – Amostra microscópica do ferro fundido nodular na lente de 4x.....	50
Figura 26 – Resultado da curva da vida útil da ferramenta.....	52
Figura 27 – Representação do fim da vida útil da ferramenta.....	53
Figura 29 – Cronograma de atividades.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades de ferros fundidos nodulares de acordo com a norma tecnica ABNT (NBR 6916/1981)	08
Tabela 2 – Composições de diferentes tipos de ferros fundidos nodulares de acordo com a norma NBR 8650/1984.....	09
Tabela 3 – Aplicações industriais de diferentes classes de ferros fundidos nodulares.	09
Tabela 4 – Propriedades do FoFo nodular FUCO.....	11
Tabela 5 – Composição química do FoFo nodular FUCO.....	11
Tabela 6 – Propriedade e classificação dos fluidos de corte.....	21
Tabela 7 – Operação de usinagem segundo.....	23
Tabela 8 – Tabela de Ensaios.....	47
Tabela 9 – Dados do Torno.....	42
Tabela 10 – Dados do Pastilha de Corte.....	43
Tabela 11 – Controle de Passes.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

INMETRO Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

GPS Global Positioning System

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IGC Instituto Geográfico e Cartográfico

OMT Organização Mundial do Trabalho

SEC Secretário Estadual de Cultura

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Problematização e Hipóteses.....	2
1.1.1	Problematização.....	2
1.1.2	Hipóteses.....	2
1.2	Delimitação do Estudo.....	2
1.3	Objetivo.....	2
1.3.1	Objetivo Geral.....	3
1.3.2	Objetivos Específicos.....	3
1.3.3	Justificativa.....	3
2	Fundamentação Teórica.....	4
2.1	Ferro Fundido.....	4
2.1.1	Ferro Fundido Nodular.....	7
2.1.2	Estrutura do Ferro Fundido Nodular.....	8
2.1.3	Ferro Fundido Nodular Perlítico / Ferrítico (FE 55006).....	10
2.1.3.1	Microestrutura.....	11
2.2	Torneamento.....	12
2.2.1	Usinagem.....	12
2.2.2	Comando Numérico Computadorizado - CNC.....	13
2.2.3	Sistemas CNC.....	14
2.2.4	Máquina de Operação por CNC.....	14
2.2.5	Torno Mecânico.....	15
2.2.6	Torno CNC.....	18
2.3	Fluido de Corte.....	19
2.3.1	Classificação.....	21
2.3.2	Seleção do Fluido de Corte.....	22
2.3.3	Condição de Usinagem.....	22
2.3.4	Material da Ferramenta e da Peça.....	22
2.3.5	Operação de Usinagem.....	23
2.3.6	Máquina-Ferramenta e Produção.....	24
2.3.7	Aspectos Ecológicos.....	24
2.3.8	Análise Econômica.....	25
2.3.9	Manutenção.....	25
2.3.10	Óleos de Corte.....	25
2.3.11	Óleos Emulsionáveis e Fluidos Químicos.....	25

2.3.12	Aplicação dos Fluidos de Corte.....	26
2.3.13	Tendências Tecnológicas.....	27
2.3.14	Usinagem a Seco	27
2.3.15	Usinagem com Técnica de Resfriamento Criogênico.....	27
2.3.16	Usinagem com Quantidade Mínima de Fluido de Corte (MQF).....	28
2.4	Desgaste Ferramental.....	28
2.4.1	Desgaste por Entalhe	29
2.4.1.1	Aresta Postiça	30
2.4.2	Desgaste Mecânico.....	31
2.4.2.1	Desgaste por Lascamento ou Fratura.....	31
2.4.3	Desgaste Térmico	32
2.4.3.1	Desgaste por trincas térmicas	32
2.4.3.2	Desgaste por Deformação Plástica	32
2.4.3.3	Desgaste por difusão	33
2.4.4	Desgaste Químico	34
2.4.4.1	Desgaste por Craterização	34
2.4.5	Desgaste Abrasivo	34
2.4.5.1	Desgaste de Flanco	34
2.5	Equação de Taylor.....	35
2.5.1	Tempo de Corte.....	37
2.5.2	Tempo Devido a Ferramenta	38
2.5.3	Tempo Improdutivo.....	39
2.5.4	Tempo Total	39
3.0	Metodologia	40
3.1	Métodos	40
3.1.1	Processo Experimental I.....	41
3.1.2	Processo Experimental II	41
3.2	Equipamentos e Materiais	41
3.2.1	Equipamentos e Materiais para Usinagem.	41
3.2.1	Equipamentos e Materiais para Microscopia e Metalografia.....	44
3.3	Técnica.....	47
3.4	Procedimentos	47
4.0	Discussões e Resultados.....	49
5.0	Cronograma.....	54
6.0	Conclusão	55

7.0 Referências Bibliograficas	56
--------------------------------------	----

1 Introdução

O ferro fundido é um material de fácil acesso, alta taxa de usinabilidade e de baixo custo. Uma pesquisa realizada em 2010 pelo BNDES, demonstrou estatisticamente que o Brasil possui 72,5% de fundidos, e São Paulo é o maior produtor de fundidos, respondendo por 36% da produção nacional. As regiões Norte e Nordeste em conjunto representam 2,5% do total de fundidos. Segundo a mesma pesquisa, o setor automotivo é o que necessita de mais demanda de fundidos, se tornando o principal consumidor de fundidos nacional. O ferro fundido possui várias aplicações, como por exemplo, o ferro fundido cinzento é aplicado em buchas, polias, anéis, mesas e bases de máquinas, flanges, mancais.

A maioria dos fornecedores de ferramentas não informam com precisão qual o tempo de vida útil da ferramenta, e muitas vezes é estimado apenas uma média de tempo em que a ferramenta durará, uma informação precisa é sempre melhor, pois o cliente terá total certeza do quanto ele vai poder produzir.

O estudo do desgaste, permite a obtenção de dados precisos da ferramenta. Testes, experimentos, parâmetros, são apenas um dos principais processos que é necessário para obter um resultado relevante e sólido para uma pastilha. No Brasil, geralmente é feito estudo com apenas um parâmetro, o de corte. Entretanto, uma pesquisa mais detalhada, com mais parâmetros, mais de um teste, resulta em mais dados, e conseqüentemente melhora a compreensão e importância dos resultados. A diferença entre um valor exato e um valor estimado é extremamente grande e, visto de uma maneira geral, a informação correta e exata desse dado pode mudar positivamente o processo de usinagem do cliente. O tarugo pode ser indicado para diversas aplicações, isso é possível pois os mesmos combinam resistência a carga e flexibilidade e, são resistentes a óleos e graxas. Devido as aplicações do tarugo e do ferro fundido, a obtenção de dados ficará mais rica e importante para a presente pesquisa.

Esse estudo tem finalidade de expor os resultados que serão obtidos através dos testes realizados no material selecionado, a pastilha. O teste contará com passadas sem fluido de corte, a serem executados, essa análise proporcionará ao acadêmico um melhor conhecimento na área de metalurgia e na área de materiais que não são possíveis de conseguir com o acompanhamento de um professor em um

semestre regular, também abrirá portas para novas pesquisas que envolvam os assuntos estudados e também, uma busca para aplicações nas áreas abordadas

1.1 Problematização e Hipóteses

1.1.1 Problematização

A usinagem é um forte aliado nas indústrias, desde um parafuso comercial até um eixo de um motor acontece materialmente graças a esse processo. As vezes um eixo pode estar ruim devido ao acabamento, gerando vibração na hora do torneamento e, um dos fatores a se levar em consideração é a vida útil da pastilha de corte utilizada nesse processo, tendo em vista que a mesma já vem com um tempo de vida determinado. O operador tem que estar ciente do tipo de material que está sendo usinado, se a pastilha de corte é própria pra esse tipo de material, se o uso de fluido de corte está sendo aplicado corretamente, fatores que influenciam diretamente na hora do processo e caso não seja seguido corretamente, a vida da pastilha reduz e assim chegando precocemente ao seu desgaste e quebra.

1.1.2 Hipóteses

H0: Os parâmetros de corte influenciam diretamente na vida útil da ferramenta.

H1: A aplicação de fluido de corte influencia na condição de usinagem e conseqüentemente aumenta a vida útil da ferramenta e melhora o acabamento do tarugo quando for torneado.

1.2 Delimitação do Estudo

Estudar o desgaste ferramental juntamente com o ferro fundido nodular, com aplicação de fluido de corte com parâmetros de corte já definido .

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar o desgaste gerado na ferramenta de corte, segundo Taylor, sem aplicação de fluido de corte e determinar o tempo e a curva da vida útil da ferramenta de corte.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar a curva da vida útil da ferramenta de corte;
- Verificar tipo de desgaste gerado;
- Determinar o tempo de vida útil da ferramenta de corte.;
- Analisar a usinagem do ferro fundido nodular.

1.3.3 Justificativa

Muitas são as ferramentas que podem ser selecionadas para o material, e as mesmas já vem com um critério de fim de vida estabelecido, às vezes o medo da quebra da ferramenta pode acelerar esse processo. O estudo de vida útil e desgaste de uma ferramenta proporciona maior conhecimento de modo a saber qual a melhor usar, qual comprar ou até mesmo, qual deve evitar. A vida útil da ferramenta pode pronlongar se os parâmetros de corte e condições de usinagem forem selecionados e usados corretamente.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Ferro Fundido

O ferro fundido foi descoberto no ano 500 (D.C) e foi comercializado somente em 1388. Desde então, ele tem sido a liga metálica mais comum utilizada em aplicações tribológicas. Os ferros fundidos são ligas com grande aplicação na engenharia mecânica, destaque para área automobilística, onde é um dos principais mercados de fundidos, por exemplo, na fabricação de blocos de motores de combustão interna, peças de motores em geral. Em 2005, de 60% dos metais ferrosos produzidos na Alemanha (4 milhões de toneladas), 2,5 milhões correspondiam a produção de fundido cinzento, seguido pelo ferro fundido nodular, com quase 35% (1,4 milhão de tonelada). Essas ligas oferecem custos de produção baixos, boas propriedades mecânicas e, elevada resistência a corrosão em altas temperaturas, (CHIAVERINI, 1990).

O ferro fundido pode ser definido como uma liga de FE-C contendo aproximadamente 2% de carbono, muitas vezes resultando em carbono livre na forma de partículas de grafita, é um material composto de partículas de grafite dispersas em uma matriz metálica.

Existem seis tipos de ferros fundidos:

- Tipo I: ferro fundido cinzento;
- Tipo II: ferro fundido branco;
- Tipo III: ferro fundido mesclado;
- Tipo IV: ferro fundido maleável;
- Tipo V: ferro fundido de grafita compactada;
- Tipo VI: ferro fundido nodular.

Existe um padrão, os ferros fundidos são classificados de acordo com a cor de sua fratura, como:

- Cinzento;
- Branco;
- Mesclado.

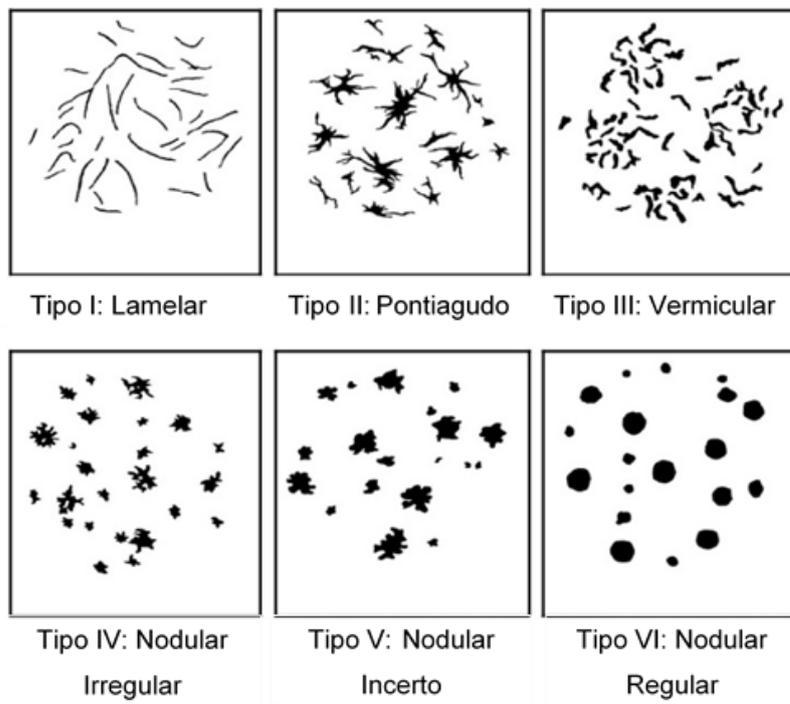
De acordo com a análise microestrutural, os ferros fundidos cinzentos apresentam a grafita (C) em sua constituição, os ferros fundidos brancos apresentam carbonetos (Fe_3C , M_3C ou M_7C_3) e os mesclados, uma mistura dessas duas fases. A grafita pode se apresentar sob a forma compacta, de veios ou nódulos, entre outras, dependendo da presença de pequenas quantidades de elementos, dos quais os mais importantes são o magnésio e o cério adicionados no processo conhecido por nodulização.

No geral, o ferro fundido apresenta partículas de diferentes formas que afetam diretamente nas suas estruturas termo-mecânicas. A dureza e a ductilidade são fortemente dependentes da forma da partícula de grafite. As partículas com formas nodulares aumentam essas propriedades, enquanto as partículas mais alongadas, com contornos irregulares são prejudiciais devido a concentração de pontos de tensão. Desta forma, o ferro fundido pode ser classificado de acordo com a forma das suas partículas de grafite, (CHIAVERINI, 1990).

A figura 1, demonstra as diferentes formas das partículas de grafite, encontradas em ferros fundido, a mesma referência os 6 tipos de partículas de grafite de acordo com a Norma ISO-945.

Figura 1 – Amostras referentes para os seis tipos de partículas de grafite de acordo com a

Figura1 - Norma ISO-945.



Fonte: ISO-945.

O tipo I é denominada de laminar devido as características da forma de suas partículas observadas na seção plana. As lamelas estão interconectadas, formando colônias que somente podem ser observadas em três dimensões. As partículas de grafite do tipo I são típicos de ferro cinzento.

O tipo II é chamado de pontiagudo devido a sua forma com ramificações afiadas que lembram “pernas de siri” e representa uma forma de partícula de grafite que não corresponde a nenhum tipo de ferro fundido. As partículas desse tipo aparecem devido a degeneração das partículas do tipo VI na produção de ferro fundido quanto estão presentes as: impurezas ou presença de excessos de elementos nodulizantes. As partículas desse tipo também podem se formar no resfriamento rápido de ferro cinzento hipereutético.

O tipo III é composto de ferro fundido vermicular que também é conhecido como ferro fundido gráfico compacto (Compacted Graphite Iron), foi descoberto por acaso durante a fabricação de ferro fundido nodular. O ferro fundido vermicular tem sido produzido em componentes de geometria relativamente simples há mais de trinta anos, no entanto, apenas nos últimos anos as fundições tem empregado essa tecnologia em componentes mais complexos. O material é denominado vermicular quando 80% das partículas de grafite estão no tipo III e também contém partículas do Tipo V e VI. O mesmo apresenta boas características de resistência mecânica, amortecimento, tenacidade, resistência a choque térmicos, condutividade térmica e, ductilidade, (GUESSER, 1999).

A junção de características tão importantes, do ferro fundido cinzento e do ferro fundido nodular, atribui ao ferro fundido vermicular uma grande importância para aplicação industrial. Atualmente ele vem sendo matéria-prima na fabricação de protótipos e blocos de motores de carros de corrida, na fabricação de motores a diesel substituindo o ferro fundido cinzento que antes era o mais utilizado.

As propriedades mecânicas do vermicular são superiores e possibilitam a fabricação de motores mais potentes com a mesma cilindrada ou até mais compactos. Outro fator seria o desenvolvimento do ferro fundido vermicular que se deve as rígidas normas europeias e norte-americanas de controle de poluentes. A combustão mais eficiente é umas características dos blocos de motor fabricados com este material. A composição do ferro fundido vermicular é similar à do cinzento, a diferença está na quantidade de magnésio.

No tradicional, geralmente não contem magnésio. No vermicular, o elemento químico tem que ser mantido em uma faixa bastante estreita, entre 0,010% e 0,012%. Se houver mais do que isso, o ferro deixa de ser vermicular e perde as características. Outrora tem o ferro nodular que tem outras propriedades, bastante utilizado na fabricação de virabrequins, e, poder entre 0,035% e 0,060% de magnésio em sua composição.

Vale a pena ressaltar que a presença de magnésio na quantidade exata faz com que se formem estrias grossas de grafita que originou o nome vermicular. No fundido cinzento, a grafita aparece em forma de veios finos e, no nodular, como bolinhas ou nódulos. Essa microestrutura que determina a resistência do material. No cinzento, o limite de resistência é de 250 MPa; no vermicular, de 450 MPa; e no nodular, de 700 MPa.

O tipo III apresenta partículas de grafite com formas intermediarias entre o tipo I e VI e, também pode formar colônias. Similarmente, o ferro fundido vermicular é um intermediário entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular, suas propriedades térmicas são similares ao do ferro fundido cinzento e as propriedades mecânicas similares ao do ferro fundido nodular.

Os tipos IV, V, VI denominados de nodular irregular, nodular incerto, nodular regular (esferoidal), são os que correspondem a ferros fundidos maleáveis (IV e V) e nodulares (V e VI). O ferro fundido nodular é geralmente caracterizado pela presença de pelo menos 80% das partículas de grafite nas classes V e VI e pela ausência de partículas do tipo I e II.

Tradicionalmente, a classificação de ferro fundido é feita pela comparação visual de micrografias óticas com cartões de referências da norma ISO-945. Obviamente, uma comparação visual simples é subjetiva e não pode ser automatizado em um ambiente industrial. Com isso, GOMES e PACIORNIK (2005) desenvolveram um método automático para classificação de formas de partículas de grafita.

2.1.1 Ferro Fundido Nodular

De todos os ferros fundidos existentes e citados até então, o ferro fundido nodular que será objeto de estudo, tendo em vista que o tarugo selecionado é do mesmo material, com isso, delimitando a linha de estudo.

O ferro fundido nodular nada mais é que uma liga composta de carbono e silício, com o carbono livre na matriz metálica, em forma esferoidal. Passou a ser empregado industrialmente a partir da década de 70, assim ampliando o campo de aplicação dos ferros fundidos, o fato disso ter acontecido é o devido a combinação de propriedades de elevada tenacidade, resistência a tração, ductilidade, resistência ao desgaste, fadiga, todas essas características tornam o fundido nodular, um dos materiais mais cobiçados no mundo da engenharia, principalmente, na engenharia automotiva, pois o mesmo combina propriedades que antes, existia somente nos aços, (CALLISTER, 2003).

A composição química, a velocidade do resfriamento e o estado de nucleação do banho fundido requer uma atenção cuidadosa. Para uma determinada geometria de uma peça fundida com grandes variações na parede, uma enorme variação de velocidade de resfriamento é obtida, essa variação não pode ser influenciada pela fundição, as mesmas só podem ser evitadas no estágio de projeto da peça fundida.

Uma das soluções para reduzir a dispersão da dureza é produzir um material que seja menos suscetível as variações de velocidade. O ferro fundido nodular com matriz de fase única é menos passível de sofrer com a variação da espessura de parede, com a composição química e com o estado de nucleação.

A busca pela melhoria é constante, a adição de elementos, como silício, magnésio, cromo, molibdênio e o cobre, outra melhoria também é a aplicação de tratamentos térmicos, que melhora a rigidez, ductilidade. Um fato positivo para tais melhorias é que esse material se torna viável em certas aplicações que até então, eram exclusivas dos aços médio teor de carbono.

2.1.2 Estrutura do Ferro Fundido Nodular

Quando a grafita está na forma de nódulos, os ferros fundidos são chamados de nodulares ou esferoidais, definidos por FE segundo a Norma NBR 6916/1981, tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades de ferros fundidos nodulares de acordo com a Norma Técnica ABNT (NBR 6916/1981).

Classe	Limite de Resistencia (LR)(Mpa)	Limite de Escoamento (LE)(Mpa)	Alongamento (A)(%)	Dureza Brinell (HB)	Microestrutura Predominante
FE 38012	380	240	17	140-180	Ferrítica
FE 42012	420	280	12	150-200	Ferrítica-Perlítica
FE 50007	500	350	7	170-240	Ferrítica-Perlítica
FE 60003	600	400	3	210-280	Perlítica
FE 70002	700	450	2	230-300	Perlítica
FE 80002	800	550	2	240-312	Perlítica
FE 38017 RI	380	240	17	140-180	Ferrítica

Fonte: ABNT-NBR(6916/1981), Adaptado.

Segundo a Norma NBR 8650/1984 (Tabela 2), estes ferros fundidos são aplicados em flanges, engrenagens, pinhões, etc, teores de carbono variam entre 3,40% e 3,80%, manganês 0,30% e 1,00%, silício entre 2,10% e 2,80%, fósforo e enxofre são menores que 0,09% e 0,02%, respectivamente, com magnésio residual entre 0,04% e 0,06%. O níquel, cobre, estanho e o cromo são os elementos de liga que possui uma facilidade para elevar as propriedades da resistência mecânica.

Tabela 2 - Composições de diferentes tipos de ferros fundidos nodulares de acordo com a Norma NBR 8650/1984.

Elemento	Classe de Ferro Fundido Nodulares					
	FE 38017	FE 42012	FE 50007	FE 60003	FE 70002	FE 80002
C	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8	3,4 a 3,8
Si	2,1 a 2,8	2,1 a 2,5	2,8	3,4 a 3,8	2,3 a 2,8	2,1 a 2,8
Mn(Máx)	0,3	0,3	0,5	0,5	1	1
P(Máx)	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
S(Máx)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Cu	-	-	0,2 a 0,7	0,5 a 1	0,5 a 1	0,5 a 1
Mg	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06	0,04 a 0,06

Fonte: NBR 8650/1984.

A seguir a tabela 3 irá mostrar diferentes aplicações industriais para diferentes classes de ferro fundido.

Tabela 3 - Aplicações industriais de diferentes classes de ferros fundidos nodulares

Classe	Aplicação
FE 38017	Fundidos submetidos à pressão, corpos de válvulas e de bombas, mecanismos de direção, flanges
FE 42012	Fundidos para máquinas submetidas a carga de choque e fadiga, discos de freio
FE 50007	Girabrequin e Engrenagem
FE 60003	Engrenagens de alta resitencia, componentes de máquinas, peças automitivas
FE 70002	Engrenagens de alta resitencia, componentes de máquinas, peças automitivas
FE 80002	Pinhões. Engrenagens, trilhos

Fonte: Fonte: ABNT-NBR(6916/1981), Adaptado.

Para a produção de ferro fundido nodular é de extrema importância o estrito controle da constituição do metal líquido. Um dos fatores metalúrgicos mais importantes que permitem dar início ao objetivo de solidificar peças adequadas com microestruturas que garantam as melhores combinações das propriedades em uso. Outros fatores que afetam a microestrutura do material são as velocidades de resfriamento e sub-resfriamento e, o tempo de solidificação. Na fabricação de ferro nodular, o líquido de base fica severamente restrito às vezes, em pequenas quantidades de elementos minoritários que interferem na formação de grafite esferoidal.

Geralmente o nodulizante mais comum empregado é o magnésio que possui elevada afinidade para interagir com o enxofre juntamente com o oxigênio, para a formação de compostos estáveis. Na prática, essa mistura obriga a necessidade de realizar operações de dessulfurização e de refino do líquido e adições prévias de elementos nodulizantes

2.1.3 Ferro Fundido Nodular Perlítico / Ferrítico (FE 55006)

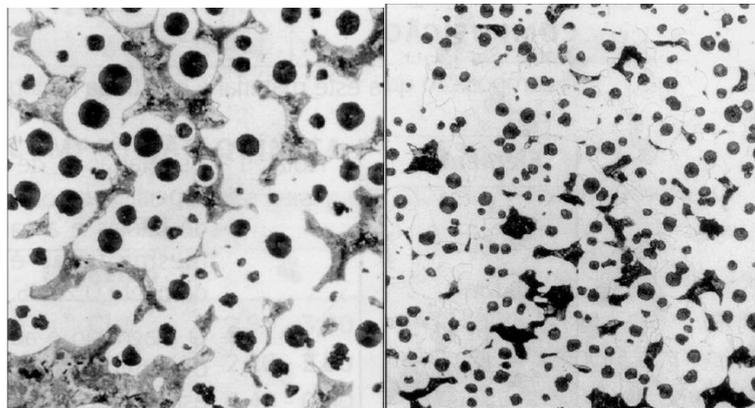
O FE55006 é o fundido que será usado nesse estudo, ele tem grafita tipo I e II, na matriz totalmente perlítica / ferrítica. Esse tipo de matriz proporciona elevadas propriedades mecânicas, ótimo acabamento superficial e boa temperabilidade, permitindo assim, uma variedade de utilização em peças que necessitam alta

resistência à tração e desgaste. Esse material possui limite de resistência à tração e escoamento similares aos aços SAE 1040 laminados a quente, em condição bruta de fusão, essa especificação é similar à ABNT NBR 6919, classe FE 50007.

2.1.3.1 Microestrutura

A figura 2 representa a microestrutura típica do FUCO FE 55006 que é constituída de grafite em forma de nódulos (esferas), Forma I e II, tamanho 6 e 8, avaliada de acordo com ASTM A 247. A matriz é perlítica / ferrítica, com aproximadamente 50% de perlita, podendo ter no máximo 5% de carbonetos dispersos.

Figura 2 – Microestrutura típica do núcleo e na periferia, respectivamente.



Fonte: Perfis de Fundição contínua FUCO, adaptado.

A tabela 4 apresenta as propriedades do FoFo Nodular FUCO, onde contem a dureza e dimensões própria do FoFo da FUCO.

Tabela 4: Propriedades do FoFo Nodular FUCO

Dimensões (mm)	Dureza (HB)
27,6 - 75,8	217 - 269
75,9 - 195,3	207 - 255
195,4 - 476,6	187 - 255

Fonte: Perfis de Fundição contínua FUCO, adaptado.

A tabela 5 mostra a composição química do mesmo material.

Tabela 5: Composição Química do FoFo Nodular FUCO

Elemento	%
C ¹	3,30 - 3,80
Si	2,60 - 3,00
Mn	0,20 - 0,65
S	0,02 Máx
P	0,10 - 0,25
Cu	0,10 - 0,25
Mg ²	0,04 - 0,07

Fonte: Perfis de Fundição contínua FUCO, adaptado.

Os limites de resistência, escoamento e alongamento são:

- Limite de Resistência à Tração (MPa) = 550 min.
- Limite de Escoamento (MPa) = 380 min
- Alongamento (%) = 6 min.

2.2 Torneamento

2.2.1 Usinagem

Peças produzidas pelos processos de fundição, conformação e soldagem, podem ser fabricadas com o dimensional próximo as medidas finais, entretanto, precisam de operações complementares para alcançar o dimensional especificado para determinadas aplicações. Operações de acabamento na peça para alcançar baixas tolerâncias dimensionais de produtos através de remoção de excesso de material causado pelos processos de formação do produto chamam-se operações de usinagem (DINIZ *et al*, 2003). Estes processos de usinagem são divididos em três categorias de acordo com STEMMER (1992):

- Processos de usinagem por corte, torneamento e o fresamento;
- Processos de usinagem por abrasão, geralmente materiais abrasivos para a retirada de materiais, como por exemplo: retificação e lapidação;
- Processos de usinagem não convencionais, processo elétrico, químico, térmico, hidrodinâmico e laser.

As vantagens de usar tais processos de usinagem são:

- Maior precisão que processos de conformação e fundição;
- Podem ser trabalhados para correções posteriores e tratamento térmico;
- Podem gerar superfícies com geometrias especiais;
- Não altera a estrutura mecânica da peça e propriedades.

Desvantagens:

- Gasto maior de matéria-prima e energia;
- Maior tempo de fabricação.

Desde as primeiras máquinas de usinagem em 1700, estes processos são indispensáveis para a produção de produtos variados. Segundo Diniz *et al.* (2003), nos dias atuais, máquinas com comandos computadorizados de altíssimas velocidades de remoção de cavaco já são produzidas e industrializadas no mundo inteiro.

No geral, o processo de usinagem é composto pelos seguintes sistemas: ferramenta, máquina, e, peça a ser usinada. O conhecimento profundo de cada um desses sistemas e o conhecimento da interação entre os mesmos, podem otimizar muito o tempo envolvido e o dinheiro gasto com a usinagem de um produto qualquer. O processo mais utilizado de usinagem é o comando numérico computadorizado – CNC (DINIZ *et al.* 2003).

2.2.2 Comando Numérico Computadorizado - CNC

O comando numérico é um equipamento eletrônico que é capaz de receber informações por meio de entrada própria, compilar estas informações e transmiti-las em forma de comando para a máquina, de modo que a mesma, sem intervenção do operador possa realizar as operações na sequência programada. O comando numérico é composto de unidade de recepção de informações que pode ser leitora de fitas, cartões, unidades de disco ou alimentação direta de um computador. Uma unidade calculadora onde os dados são processados e transmitidos as unidades de força do circuito da máquina.

Esse sistema integrado ligado a máquina de usinagem, forma os centros de torneamento e os centros de usinagem, e ainda pode formar máquinas simples com

funções específicas, como por exemplo, puncionadoras e soldadoras (MACHADO, 1990). É um controlador numérico que permite o controle de máquinas, permitindo o controle simultâneo de vários eixos, através de uma lista de movimentos escritos num código específico (código G) (GASPAR, 2009).

2.2.3 Sistemas CNC

As máquinas de comando numérico podem ser separadas em dois grupos no que diz respeito ao sistema de controle utilizado. Os controles adotados podem ser de malha aberta ou fechada. A precisão da máquina é definida pelo tipo de malha utilizada (RUBIO, 1999).

Sistema de malha aberta, a unidade controladora não monitora em tempo real a posição da ferramenta. Como não há realimentação, não é possível detectar se existe um deslocamento de posição, a máquina não reconhece o posicionamento da ferramenta em função do seu ponto de origem. A posição vai depender exclusivamente dos pulsos enviados aos motores de passo. Como não há utilização de transdutores para fazer a medição da posição, o controle por malha aberta torna-se mais barato tendo somente como desvantagem a dificuldade em se detectar erros de posição (RUBIO, 1999).

Sistema de malha fechada, o movimento da ferramenta é monitorado e essa informação é realimentada para o sistema permitindo que as correções necessárias sejam feitas. O movimento é detectado por meio de transdutores e encoders que são dispositivos utilizados para se obter uma leitura da velocidade de rotação que enviam sinais para central. O sistema de malha fechada permite uma maior precisão no posicionamento da ferramenta, a desvantagem é ter um custo de aquisição maior que o sistema de malha aberta. Esse tipo de sistema é muito usado em servo motores que não possuem uma movimentação tão precisa quanto os motores de passo (RUBIO, 1999).

2.2.4 Máquina de Operação por CNC

Uma máquina CNC é composta da unidade de comando (onde todo é armazenado o software e processado todas as informações do sistema), estrutura e cadeia cinemática e os acionamentos responsáveis pelos movimentos dos eixos. De

acordo com Simon (2001), inicialmente os comandos das máquinas eram apenas de NC. Com a evolução e o passar do tempo, puderam ser incorporadas a estas máquinas, recursos computacionais, passando de NC pra CNC. Em 1967 a tecnologia CN chegou ao Brasil. Nos anos 70, um fabricante nacional produziu sua primeira máquina CN. Mas em 1977, onde surgiu os processadores, fabricou-se o CNC que hoje estão bastante difundidos nas indústrias (CASSANIGA, 2002).

Atualmente os comandos para as máquinas são constituídos em quase sua totalidade por sistemas CNC. Expressões como “máquinas NC”, “programas NC”, “tecnologia NC”, continuam sendo utilizadas, no entanto, as mesmas devem ser entendidas como máquinas/programas/tecnologia CNC. O sistema NC e CNC não diferem na linguagem de programação usada ou no sistema existente na máquina (SIMOM, 2001).

Santos (2002, p.18) afirma que nos dias de hoje um dos comandos numéricos computadorizados mais notoriamente conhecidos é o padrão Fanuc. Estes comandos são definidos pelas normas DIN 66025, ISO 6983 e EIA 358-B. Estas normas definem a configuração dos diversos comandos e campos de aplicação. Porém, estas normas dão grande abertura a aplicações não tão padronizadas, permitindo algumas pequenas diferenças na definição de alguns comandos, em especial dos ciclos complexos.

A CNC trabalha com três comandos básicos bem definidos. No primeiro passo, o computador lê o programa e transforma para o código binário que é a linguagem da máquina. Em seguida, o operador inicia ao ciclo de trabalho, e o computador lê os códigos e transforma o mesmo em pulsos elétricos que serão analisados pela unidade controlada da máquina e enviada a unidade alimentadora. A unidade acionadora recebe esse pulso e o transforma em movimento (CASSANIGA, 2005).

Atualmente as máquinas CNC armazenam os programas na memória quando estão lendo o programa pela primeira vez. Isso garante uma economia de tempo quando se produz lotes maiores de peças idênticas, uma vez que o programa não necessita de uma nova leitura. As máquinas CNC possuem um computador acoplado que permite a realização das tarefas de leitura, análise e edição das informações do programa. O que difere as máquinas CN das CNC é o computador (RUBIO, 1992).

2.2.5 Torno Mecânico

Segundo Tanaka (2009), o torno mecânico é responsável pela operação onde um sólido indefinido gira ao redor do seu eixo executando o trabalho de usinagem por retirada do material através de uma ferramenta de corte. O torno é composto, principalmente, por: Base; cabeçote fixo; árvore, caixa de câmbio; avental; carro porta ferramenta; cabeçote móvel; placas de castanhas. O tipo mais comum de torno pode ser chamado de torno mecânico, torno paralelo ou torno universal. Outros tipos de tornos encontrados são os: Tornos automáticos e sem automáticos; tornos-revolver; tornos copiadores; tornos verticais (TANAKA, 2009).

Torno de placa: Conhecido como torno de platô e é principalmente utilizado para a usinagem de pelas curtas e grande dimensão, um exemplo é a produção de rodas locomotivas e peças para caldeiraria. Não precisa de barramento.

Torno paralelo: Dentre os mais comuns empregados na indústria, mesmo não sendo ideais para produção em série, apresenta diversas dificuldades na troca de ferramenta imprimindo um maior tempo de produção da peça.

Torno revólver: Um torno relativamente simples com o qual é possível executar processos de usinagem com rapidez, em peças pequenas com buchos. Esse torno apresenta uma característica fundamental que é a possibilidade de utilização de várias ferramentas dispostas e preparadas para realizar as operações de forma ordenada e sucessiva, é necessária a utilização de dispositivos especiais como o porta-ferramenta múltiplos, torre revolver.

Torno vertical: Surgiram para suprir a dificuldade que havia de torneiar peças com diâmetros grandes e espessura fina, devido a vários fatores, como por exemplo, a vibração e a maneira de prender uma peça de uma determinada geometria, como por exemplo, polias e volantes.

Torno copiador: Permite a obtenção de peças com forma de sólidos de revolução de perfil qualquer. Para poder realizar estes trabalhos, é necessário que a ferramenta seja provida de dois movimentos simultâneos: um de translação, longitudinal e outro de translação, transversal, de acordo com a peça trabalhada no momento.

Torno automático: São máquinas nas quais todas as operações são realizadas sucessivamente, uma após outra, automaticamente, possuem mudança automática de alimentação tanto de material como de ferramenta. Em produção em série, o material da peça a ser torneado possui um movimento de rotação e avanço

de alimentação automático tais como, movimento de avanços que são comandados a partir de CAMES ou ações hidráulicas.

Torno semiautomático: Surgiu a partir de uma necessidade que não existia no torno paralelo, que era a produção em série de peças. Dotado por dois carros longitudinais, um com castelo giratório porta-ferramenta de seis posições, cumprindo assim várias fases de trabalho numa mesma peça, sem precisar retirá-la da máquina. Os tornos semiautomáticos constituem um escalão intermediário entre os tornos revólver e os tornos automáticos. A operação a cargo do operário é exclusivamente a retirada da peça acabada e a fixação da nova peça em bruto.

Torno de produção: Conhecido como torno de corte múltiplo, surgiram para aumentar a quantidade de peças usinadas e diminuir o custo de produção das mesmas, provido de dois carros, um anterior com o movimento longitudinal e outro posterior, com movimento transversal, trabalham simultaneamente, através de um avanço automático.

O processo de torneamento permite a criação de formas de revolução interiores e exteriores utilizando de uma ferramenta de um único gume. Essas operações de torneamento podem ser cilíndricas, cônica, de forma ou rosqueamento. Stoeterau (2007) define o processo de torneamento a partir do movimento de corte rotativo da peça e o movimento translativo de avanço da ferramenta, processo de fabricação utilizado, principalmente para peças simétricas de revolução.

Além dos movimentos de corte e de avanço da ferramenta, há o movimento de penetração, que determina a profundidade de corte ao empurrar a ferramenta em direção ao interior da peça e, permitindo regular a profundidade do passe e a espessura do cavaco. O torno é uma máquina-ferramenta muito versátil, tendo em vista que além das operações de torneamento, é capaz de executar outras que são feitas por outras máquinas, como por exemplo, furadeira, fresadora e retificadora.

As principais operações que podem ser feitas por meio do torneamento são: torneamento externo e interno, sangramento, faceamento, rosqueamento e recartilhamento. Tipos de tornos existentes são os: paralelo, semiautomático de torre, automático, platô, vertical e CNC, que são controladas por computador, são compostos por:

- Corpo da máquina: barramento, cabeçote fixo e móvel, caixas de mudança de velocidade;
- Sistema de transmissão de movimento do eixo: motor, polia, engrenagens, redutores;
- Sistema de deslocamento da ferramenta e de movimentação da peça em diferentes velocidades: engrenagens, caixa de câmbio, inversores de marcha, fusos, vara;
- Sistemas de fixação da ferramenta: torre, carro porta-ferramenta, carro transversal, carro principal ou longitudinal e da peça: placas, cabeçote móvel;
- Comandos dos movimentos e das velocidades: manivelas e alavancas.

Segundo Stoeterau (2007), os fatores que definem a escolha de um torno são: Geometria e material da peça, tamanho e prazo do lote, grau de complexidade e de desbalanceamento, quantidade de operações e de ferramentas necessárias e dispositivos e acessórios disponíveis.

2.2.6 Torno CNC

A primeira máquina-ferramenta controlada por computador foi uma fresadora, surgiu em 1952 e destinava-se a usinar peças de geometria complicadas utilizadas em aviões e helicópteros. Tratava-se de uma fresadora já existente fabricada por uma empresa americana chamada Cincinnati que sofreu modificações em seus componentes mecânicos e recebeu um controlador eletrônico. A redução progressiva dos custos e o aumento da capacidade de cálculo dos controladores eletrônicos, a tecnologia CNC popularizou-se entre indústrias pequenas e médias. Hoje é praticamente impossível imaginar a indústria, principalmente o setor metalúrgico e mecânico, sem a presença de uma máquina CNC. Segundo Tanaka (2009), as principais vantagens do uso do torno CNC são:

- Rápida preparação da máquina, principalmente quando o programa CNC já estiver otimizado e o ferramental de corte disponível e os meios de fixação disponíveis;

- Alta flexibilidade no trabalho. Em função da rápida preparação da máquina, torna-se econômica a produção, também, de pequenas e médias séries;
- Fácil e rápida alteração do programa CNC. Alterações de dimensões da peça de trabalho e parâmetros de corte, como avanços e velocidades de corte, são realizadas rapidamente mesmo durante a produção;
- Correção de medidas durante o processo. As correções de medidas, devido ao desgaste das ferramentas de corte, são feitas rapidamente pela introdução dos incrementos, deixando as peças dentro das suas tolerâncias;
- Trabalho com parâmetros de corte otimizados. Como avanços dos carros porta-ferramentas e a rotação do fuso principal e das ferramentas acionadas são programáveis de forma contínua e sem escalonamentos, é possível de se trabalhar nas suas condições ideais em função do material que está sendo usinado, das tolerâncias e do grau de acabamento superficial;
- Altas rotações do fuso principal. Esta condição faz que se atinja tempos de ciclo mais rápidos e acabamentos superficiais ideais, além de permitir a usinagem de aços endurecidos;
- Altas velocidades de avanço rápido. Esta característica é fundamental para se diminuir os tempos mortos nas aproximações e retrocessos das ferramentas de corte;
- Aplicação de ferramentas de corte de alto rendimento, como metal duro, cerâmica, CBN e outras de última geração;
- Conforto operacional, tanto na preparação da máquina, como em sua manutenção;
- Menor necessidade de manutenção mecânica. Como os acionamentos são feitos através de spindle-motors e servo motores de alto rendimento, fica dispensado o uso de caixas de câmbio, trens de engrenagens, embreagens e outros elementos de máquinas.

2.3 Fluido de Corte

A grande quantidade de calor gerado em certas operações de corte é devido a energia que precisa ter para conseguir retirar o cavaco, a energia que deriva do atrito entre o cavaco-ferramenta e a ferramenta-peça, provoca resultados indesejáveis na

superfície de trabalho na ferramenta, assim influenciando na qualidade e no custo do produto final. Com essa necessidade, surgiu os fluidos de corte, líquidos e gases aplicados na ferramenta com material que está sendo usinado no determinado momento, com intuito de facilitar a operação de corte (AVALLONE *et al.*, 1978 APUD CIMM), suas principais funções são:

- Refrigerar a região que será cortada;
- Lubrificar áreas em atrito
- Retirar o cavaco da zona de corte;
- Proteger a ferramenta, peça, máquina da corrosão e oxidação.

Para poder desempenhar suas funções, os fluidos de corte necessitam de algumas propriedades. Um fluido de corte tem que ter como um refrigerante razoável as seguintes características (DINIZ, 1999):

- Baixa viscosidade para poder fluir facilmente;
- Capacidade de lubrificação para estabelecer um bom contato térmico;
- Alto calor específico e alta condutividade térmica.

As características citadas a cima facilitam a dissipação do calor. O refrigerante é necessário pois garante as “qualidades dimensionais, geométricas e de superfície” da peça (DINIZ, 1999). Mesmo se o material da ferramenta for resistente ao desgaste. Um lubrificante, tradicionalmente deve ter as seguintes características (DINIZ, 1999):

- Ter resistência a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar;
- Boas propriedades de anti fricção e antissoldantes;
- Viscosidade adequada – a viscosidade deve ser suficientemente baixa para permitir uma fácil circulação do fluido e suficientemente alta de modo a permitir uma boa aderência do fluido às superfícies da ferramenta.

Essas propriedades permitem que o fluido consiga chegar a região de corte, diminuindo o seu coeficiente de atrito, mesmo que sejam submetidos em altas velocidades.

Além de refrigerar e lubrificar, outras propriedades são necessárias para o fluido de corte, como por exemplo, ausência de odores desagradáveis, antiespumante, compatibilidade para o meio ambiente. Não existe um fluido que atenda a todas as necessidades, por isso os fluidos são modificados com aditivos que melhorar as características próprias do fluido ou lhe atribuem novas qualidades. Entretanto, deve notar-se que a melhoria de certas características pode influenciar de forma negativa outras, e as qualidades desejáveis variam de acordo com aplicação. Nesse caso é necessário um estudo de cada caso para definir o fluido mais adequado para determinado tipo de processo.

2.3.1 Classificação

Não tem um padrão para classificação dos fluidos de corte. Ferraresi (1997) classifica os fluidos em três grupos: sólidos, líquidos e gasosos. Diniz (1999), menciona a seguinte classificação: Ar, tipos aquosos e óleos. A tabela 6 mostra que os fluidos se dividem em dois grupos: os não emulsíveis em água e os miscíveis em água (DIN 51385, 1991 APUD STOETERAU, 2007). Unindo todas as classificações existentes, na tabela abaixo destaca-se as principais composições e propriedades dos fluidos de corte.

Tabela 6: Propriedade e Classificação dos Fluidos de Corte.

Classificação dos fluidos de corte	Sólido	Líquido			Gasoso
		Óleos Puros	Óleos emulsionáveis	Fluidos Químicos	
Principais composições	Grafite e bissulfeto de molibidênio	Óleo mineral e/ou óleo graxo(Agentes EP: cloro, enxofre e fosforo)	Óleos, água e emulsificadores(Agente EP: antioxidantes e umectantes)	Água, sais orgânicos e inorgânicos(Agentes EP: anticorrosivos, antioxidantes, biocidas e umectantes)	Ar, dióxido de carbono, nitrogênio e vapor
Principais Propriedades	Lubrificação	Lubrificação, extrema pressão e anticorrosão	Boa refrigeração, boa oxidação, baixa lubrificação, baixa anticorrosão, extrema-pressão	Excelente refrigeração, baixa lubrificação, boa anticorrosão e oxidação, fácil remoção e extrema pressão	Refrigeração

Fonte: Adaptado de Ferraresi (1977) e Diniz (1999).

2.3.2 Seleção do Fluido de Corte

Para selecionar o fluido de corte adequado para determinada operação de usinagem é, necessário ter todos os dados e metas a serem alcançadas com a utilização do fluido de corte e levar em conta os seguintes fatores.

2.3.3 Condição de Usinagem

Em usinagem de condições de alto nível, com forças elevadas, é usado como fluido de corte lubrificante o óleo puro, que é aplicado nas partes em contato. Já na usinagem branca ou leve, onde há velocidade de corte alta, usa-se a emulsão, pois é necessária principalmente a refrigeração. (DINIZ, 1999).

2.3.4 Material da Ferramenta e da Peça

A escolha de materiais para as ferramentas usadas nos processos de usinagem é muito importante para poder ter sucesso na operação. Aço rápido, metal duro, cerâmica diamante, são exemplos de materiais e devem conter as seguintes propriedades, segundo Ferraresi (1977) e Diniz (1999):

- Elevada dureza a quente;
- Elevada dureza a frio;
- Tenacidade;
- Resistência à abrasão;
- Estabilidade química;
- Facilidade de obtenção a preços econômicos.

Ferraresi (1977) afirma que conhecer o material da peça a ser usinada e o seu comportamento é decisivo para uma escolha correta do fluido de corte. Desse modo, surge o conceito de usinabilidade, que nada mais é do que a propriedade que os materiais têm de se deixarem ser usinados. Muitos fatores exercem influência na usinabilidade dos materiais como: variação da composição do material da peça, o quanto deformou a frio, as propriedades mecânicas, entre outros. Os materiais da

peça podem ser: aço; ferro fundido; alumínio e suas ligas; magnésio e suas ligas; cobre e suas ligas; e níquel e suas ligas.

2.3.5 Operação de Usinagem

Cada operação de corte tem objetivos e parâmetros de usinagem diferentes entre si. Sendo assim, cada processo tem o fluido de corte que mais se adequa a ele, levando-se em conta a finalidade da operação e o material da peça a ser usinada (Tabela 7).

Tabela 7 - Operação de usinagem segundo.

Material da peça	Operação de usinagem		
	Brochamento	Roscamento	Furação Profunda
Aços	Óleos emulsionáveis e óleos graxos-mineirais cloro-sulfurados	Óleos graxos-mineirais sulfurados ou cloro-sulfurados	Óleos emulsionáveis, óleos minerais sulfurados e óleos graxos-mineirais sulfurados
Aços inoxidáveis	Óleos emulsionáveis e óleos graxos-mineirais cloro-sulfurados	Óleos graxos -mineirais cloro-sulfurados	Óleos emulsionáveis, óleos minerais sulfurados e óleos graxos-mineirais sulfurados
Ferro Fundido	Óleos emulsionáveis e óleos graxos-minerais sulfurados ou a seco	Óleos graxos-mineirais cloro-sulfurados e óleos emulsionáveis	Óleos emulsionáveis, ou a seco
Monel, níquel	Óleos graxos-mineirais cloro-sulfurados e óleos graxos-mineirais	Óleos graxos-minerais cloro-sulfurados e óleos emulsionáveis	Óleos minerais sulfurados e óleos emulsionáveis
Cobre	Óleos graxos-minerais inativos, óleos graxos-minerais cloro-sulfurados e óleos emulsionáveis	Óleos graxos-minerais inativos, óleos graxos-minerais cloro-sulfurados, óleos emulsionáveis e óleos graxos-minerais sulfurados	Óleos emulsionáveis e óleos graxos minerais inativos
Latão, bronze	Óleos graxos-minerais sulfurados inativos e óleos emulsionáveis	-	Óleos emulsionáveis, óleos graxos-minerais inativos ou a seco
Alumínio e suas ligas	Óleos graxos-minerais sulfurados inativos e óleos emulsionáveis	Óleos graxos-minerais sulfurados inativos e óleos emulsionáveis	Óleos emulsionáveis, óleos graxos-minerais inativos, compostos de querosene e o óleo de tocinho
Magnésio e suas ligas	Óleos graxos-minerais inativos	Óleos graxos-minerais inativos	Óleos graxos-minerais inativos

Fonte: Adaptado de Ferraresi (1977).

2.3.6 Máquina-Ferramenta e Produção

Para se chegar ao produto final, um corpo/peça passa por diversas transformações físicas. A complexidade dessas sucessivas transformações, ou ciclo de fabricação, aliada ao tipo de produção (variedade de produtos e volume de produção) influenciam na determinação da máquina-ferramenta adequada ao processo e, conseqüentemente, o fluido de corte adequado.

- Operações específicas e exigentes podem ser facilmente realizadas por máquinas-ferramentas clássicas, utilizando-se fluidos especiais aditivados. Ex: brochadeiras, rosqueadeiras, superacabadoras, etc;
- Operações variadas e perfis mais complexos podem ser obtidos por máquinas-ferramentas de reprodução, empregando-se fluidos de uso geral, de grande compatibilidade. Ex: centros de usinagem.

2.3.7 Aspectos Ecológicos

Os fluidos de corte contêm em sua composição óleos e agentes químicos que podem causar danos ao solo, água e ar. Portanto, devem ser descartados adequadamente segundo a legislação ambiental existente.

Os óleos de corte puros ou integrais podem ser vendidos para refinação; podem ser regenerados pelo fabricante ou empresas especializadas; podem ser queimados para aproveitamento energético (caldeiras) ou incinerado de forma adequada. Quanto aos óleos emulsionáveis, o processo de descarte pode ser dividido em: físico (filtração e quebra térmica), químico (adição de sais) e físico-químico (quebra ácida com adsorção a quente) (GONÇALVES, 2010).

Grande parte dos fluidos possui componentes que podem causar, além do impacto ambiental, doenças ao ser humano. O contato do fluido com o operário pode ser direto ou através de vapores, névoa ou subprodutos formados durante a usinagem, podem causar problemas de pele, câncer, ou doenças pulmonares. Portanto, algumas medidas preventivas como uso de cremes protetores e a adoção de EPIs adequados podem minimizar ou eliminar o risco de contaminação do operador (GONÇALVES, 2010; SOUZA 2011).

2.3.8 Análise Econômica

Relação custo-benefício relacionada à: aquisição, armazenamento, preparo, controle em serviço e o descarte do fluido de corte. Estas despesas correspondem a cerca de 16% do custo de produção por peça (SOUZA, 2011).

2.3.9 Manutenção

Os mesmos cuidados que se tem com máquinas, deve-se ter com os fluidos de corte, a fim de evitar a degradação prematura dos mesmos. Os cuidados devem partir desde o armazenamento até o ponto de aplicação do fluido na região de corte.

2.3.10 Óleos de Corte

Os óleos devem ser removidos periodicamente para operações de limpeza (filtração, centrifugação ou similares) caso, quando em trabalho, se contaminem rapidamente com cavacos e impurezas diversas. Estas operações de limpeza podem ser realizadas na própria máquina operatriz, contanto que o grau de impurezas permita a limpeza e que contenha tubulações e espaços indispensáveis a uma adequada filtração do fluido de corte. Após a remoção do óleo de corte e da limpeza das tubulações e unidades, o sistema é preenchido com o óleo limpo ou então óleo novo (FERRARESI, 1997).

2.3.11 Óleos Emulsionáveis e Fluidos Químicos

Toda emulsão deve ser preparada misturando-se o óleo na água. A emulsão invertida (água em óleo) resultará em uma mistura instável. Ressaltando-se que, a introdução do óleo no tanque acontece ao mesmo tempo que a agitação da água para se proceder à emulsão. Devido a água dessa preparação ser de suma importância para os fins esperados da emulsão, deve-se ter alguns cuidados. O indicado é que a água usada na operação deve ser sempre sem dureza alguma e no caso de existência da dureza é necessário que a água sofra tratamento antes de ser usada na preparação do fluido de corte. Além disso, deve-se ter cuidado com o pH da água que, para

emulsão recém preparada, deve ficar entre pH 8,5 e 10,0 (FERRARESI, 1997; SÁ, 2010).

Em processos de usinagem onde há grande geração de calor, a concentração da emulsão precisa ser observada, pois tal calor excessivo pode provocar a evaporação da água. Em processos como a retificação, por exemplo, o que pode ocorrer é o consumo rápido do óleo da emulsão, tornando-a mais diluída. Segundo Ferraresi (1977), “a vida das emulsões pode variar de uma semana a seis meses”. Mas cuidados ao se refrigerar as emulsões podem melhorar a vida desses fluidos.

Na composição dos óleos solúveis é comum incluir agentes bactericidas, devido a uma possível presença de microrganismos (bactérias, fungos e algas) na água, que podem desestabilizar e provocar mau cheiro do fluido de corte por causa do ataque das bactérias aos sulfatos inorgânicos encontrados na água natural. Para se dizer que o fluido de corte é de boa qualidade ele precisa ter grande resistência a este estado de emulsão rançosa. Geralmente os fluidos de corte são submetidos a processos de purificação com os seguintes objetivos:

- a) Redução da mão de obra na limpeza de reservatórios;
- b) Controle das propriedades dos fluidos, para que sejam garantidas as concentrações corretas para cada máquina (nos sistemas centralizados);
- c) Redução do descarte com possibilidade de remoção de metálicos finos, resíduos de rebolo e outros contaminantes;
- d) Melhoria da qualidade das peças fabricadas;
- e) Aumento da vida útil do fluido de corte.

O processo de purificação pode ser feito através de procedimentos simples como a decantação (escumação) e filtração ou através de dispositivos especiais.

2.3.12 Aplicação dos Fluidos de Corte

Os fluidos sólidos podem ser aplicados “diretamente na superfície de saída da ferramenta, antes da operação de usinagem”, ou como “aditivo metalúrgico”. Os fluidos de corte líquidos e gasosos “são aplicados diretamente sobre região de corte” (FERRARESI, 1977).

De modo geral, para que o fluido de corte desempenhe suas funções deve ser aplicado próximo da aresta de corte, nas interfaces peça/ferramenta/cavaco. Não há um consenso em relação à melhor direção de aplicação de fluido. Ao definir a forma de aplicação deve-se considerar, além do tipo do fluido de corte empregado e as direções do jato, o tipo de operação de usinagem, a pressão e o volume do fluido.

2.3.13 Tendências Tecnológicas

Aspectos produtivos, econômicos e ambientais, apresentados no tópico sobre seleção do fluido de corte, têm levado a pesquisas e desenvolvimentos de técnicas que visam reduzir ou eliminar o uso de lubri-refrigerantes nos processos de usinagem. Em consonância com essa tendência surgem as técnicas de aplicação de mínima quantidade de fluido de corte (MQF), o resfriamento criogênico e a usinagem a seco (LAWAL, 2012).

2.3.14 Usinagem a Seco

O processo de usinagem a seco implica em abrir mão dos benefícios do fluido de corte. No entanto, resulta, também, na eliminação de custos de aquisição e manutenção dos fluidos, bem como dos impactos negativos ao meio ambiente e à saúde do operador. Resultados positivos têm sido obtidos, empregando esta técnica em operações de torneamento e fresamento, utilizando-se ferramentas de metal-duro revestido, de cerâmica e de nitreto de boro cúbico. A aplicação desta técnica, entretanto, exige a adaptação de todos os fatores influentes no processo: sistema de refrigeração da máquina-ferramenta, sistema de remoção do cavaco, parâmetros de corte, entre outros.

2.3.15 Usinagem com Técnica de Resfriamento Criogênico

Essa técnica consiste na aplicação de nitrogênio líquido para redução da temperatura durante o processo de usinagem. É uma alternativa ambientalmente correta, uma vez que não há fluido de corte para se descartar, pois o nitrogênio evapora inofensivamente no ar. Além do mais, o cavaco gerado por esta técnica está livre de contaminantes, podendo ser reciclado.

2.3.16 Usinagem com Quantidade Mínima de Fluido de Corte (MQF)

Quando não é possível eliminar o uso do fluido refrigerante, utiliza-se a técnica de mínima quantidade de fluido de corte. Nesta técnica, o fluido, contendo pequena quantidade de óleo, é pulverizado na região de corte, normalmente, na saída do cavaco ou entre a superfície de folga da ferramenta e a peça. As vazões de fluido utilizando o MQF (10 a 20 ml/h) são bem menores que na usinagem convencional com lubrificação abundante (300 a 4000 ml/min). O controle sobre a quantidade de fluido é importante, uma vez que os diferentes processos de usinagem necessitam de quantidades diferentes de lubrificidade.

A ação lubrificante do fluido reduz o atrito e as componentes das forças empregadas devido a maior penetrabilidade do óleo sob a forma de vapor. Além disso, as pequenas partículas de fluido permitem sua rápida absorção e, conseqüentemente, a redução da temperatura. No entanto, a usinagem com MQF gera um aumento na emissão de vapor, névoa e fumaça de óleo, o que implica na necessidade de um maior controle das emissões, por meio do encapsulamento da máquina-ferramenta ou de sistema de exaustão eficiente.

A usinagem a seco e a técnica MQL baseiam-se no desenvolvimento reduzido de calor, exigindo ferramentas otimizadas, com revestimentos e geometrias que auxiliem na remoção do cavado e combatem o superaquecimento. Esta técnica pode ser agrupada em dois sistemas de alimentação:

- Interno - fornecimento por meio de canais embutidos na ferramenta. O ar pressurizado e o fluido de corte são misturados no bocal por meio de um dispositivo. Neste fornecimento o fluido está constantemente disponível nos pontos críticos. Indicado para operações de furação e alargamento;
- Externo – fornecimento no qual o bocal é montado separadamente, na zona da máquina. A mistura (ar e fluido) é obtida por um dispositivo colocado em um tanque específico. Indicado para operações de fresamento e torneamento.

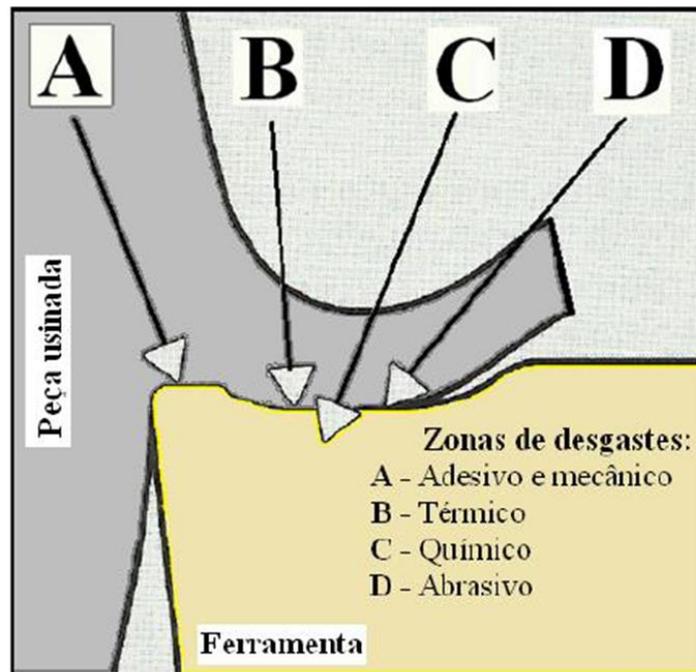
2.4 Desgaste Ferramental

Em um processo de usinagem, existe duas causas fortes para que ocorra a substituição da ferramenta de corte:

- Avarias ou falhas grotescas, como lascamento, trincamento e quebra da ferramenta;
- Desgaste excessivo, de modo que a condição de corte seja comprometida assim comprometendo também a qualidade da peça.

Na prática, avarias e falhas grotescas costumam ocorrer em processos de corte interrompido, fresamento é um exemplo, devido aos diversos choques térmicos e mecânicos envolvidos nestes processos. No processo de corte contínuo, como o torneamento, essa situação é rara, exceto em condições de corte que excedam as recomendadas, ou, caso a ferramenta venha com algum defeito de fabricação. O desgaste de ferramenta é observado tanto nos processos de corte contínuo quanto nos de corte interrompido. Os desgastes em ferramentas de corte podem ser divididos em cinco categorias principais: adesivo, mecânico, térmico, químico e abrasivo, a figura 3 ilustra as categorias citadas.

Figura 3 – Áreas de desgastes na ferramenta de corte.



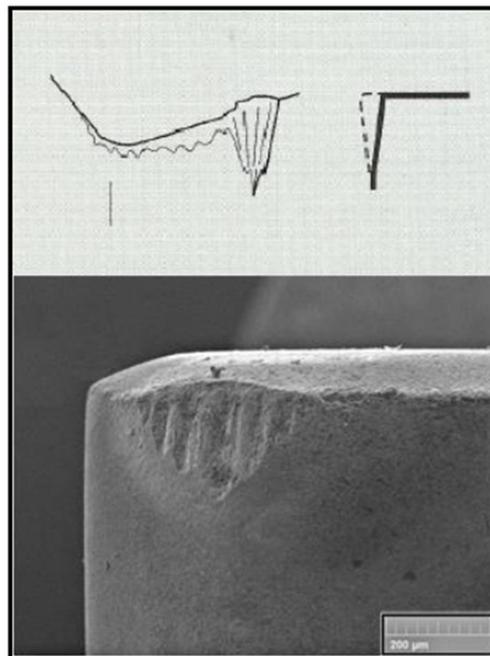
Fonte: Adaptada de Modern metall cutting (COROMANT, S FIRM. 1994).

2.4.1 Desgastes Adesivos

2.4.1 Desgaste por Entalhe

O desgaste por entalhe é definido como um dano excessivo formado na superfície de saída da ferramenta e em sua lateral na direção da profundidade de corte, é um desgaste adesivo que pode ser observado na figura 4 é causado por uma oxidação. Uma solda do material da peça no material da ferramenta de corte através da pressão do cavaco, em seguida a deformação da superfície desgastada. Isso ocorre devido ao desgaste ser localizado na extremidade da aresta da ferramenta, onde contem a presença do oxigênio na zona de corte. A superfície da aresta de corte é afetada e conseqüentemente influenciando no acabamento superficial da peça usinada, na figura abaixo está exemplificado o desgaste do tipo entalhe. Vale ressaltar que é comum o desgaste de flanco ser mais pronunciado na região onde ocorre o contato com a superfície externa da peça do que nas demais regiões, o que pode ocorrer devido a várias causas, como o corte de uma camada de material endurecido pelo passe anterior da ferramenta ou ainda oxidado devido as altas temperaturas, exposição ao ar ou fluido de corte.

Figura 4 – Desgaste por entalhe



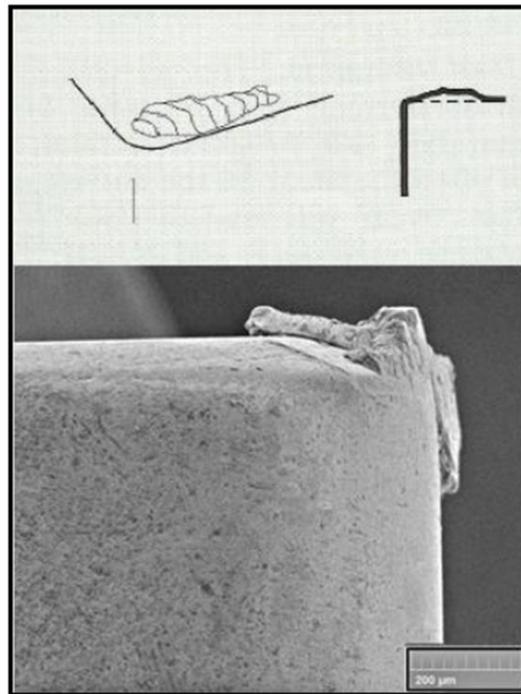
Fonte: Adaptada de Modern metall cutting(COROMANT, S FIRM. 1994).

2.4.1.1 Aresta Postiça

Esta avaria envolve o mecanismo onde os grãos da aresta de corte da ferramenta são arrancados pelo material da peça durante o atrito do momento da

usinagem. Geralmente esse problema é mais preocupante quando as interfaces entre as diferentes fases da ferramenta cerâmica são fracas. Com o atrito, partículas do material da peça são aderidas de forma permanente na aresta de corte da ferramenta, formando a aresta postiça de corte representada na figura 5. A rugosidade da superfície desgastada da ferramenta, onde o desgaste por adesão produz superfícies ásperas, (KUMAR, 2003).

Figura 5 – Formação Aresta Postiça.



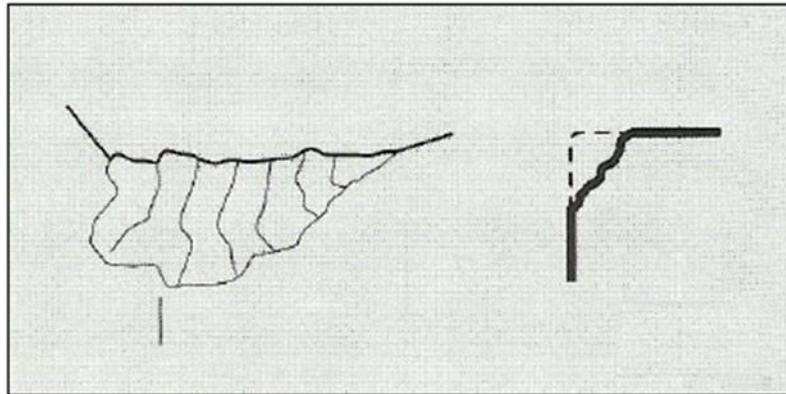
Fonte: Adaptada de Modern metall cutting(COROMANT, S FIRM. 1994).

2.4.2 Desgaste Mecânico

2.4.2.1 Desgaste por Lascamento ou Fratura

Na figura 6 é mostrada a fratura da aresta de corte que é o resultado da ação de uma sobrecarga de tensões mecânicas, causando uma falha catastrófica. O surgimento de fraturas pode ser o resultado de várias razões: estresse do material da ferramenta, desgaste excessivos de outros tipos na ferramenta, parâmetros de corte insuficientes, aresta postiça de corte, vibrações da máquina. Ferramentas de matérias frágeis são mais suscetíveis a este tipo de desgaste, originando fraturas repentinas, principalmente em matérias de dureza altas (COROMANT, 1994).

Figura 6 – Desgaste por fratura



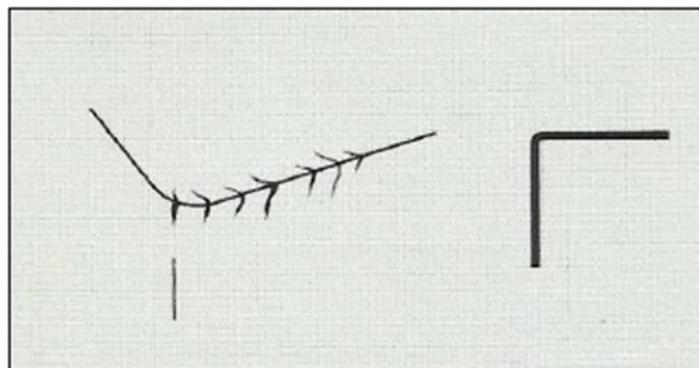
Fonte: Adaptada de Modern metall cutting (COROMANT, 1994).

2.4.3 Desgaste Térmico

2.4.3.1 Desgaste por trincas térmicas

O surgimento de trincas na aresta de corte da ferramenta é ocasionado por choque térmico sofrido pela ferramenta, onde a temperatura muda repentinamente de quente pra frio. O desgaste presente na figura 7 ocorre em usinagens onde é feito o uso de fluidos refrigerantes, com a finalidade de diminuir a temperatura na zona de corte, principalmente em processos de fresamento (COROMANT, 1994).

Figura 7 – Desgaste por trincas térmicas



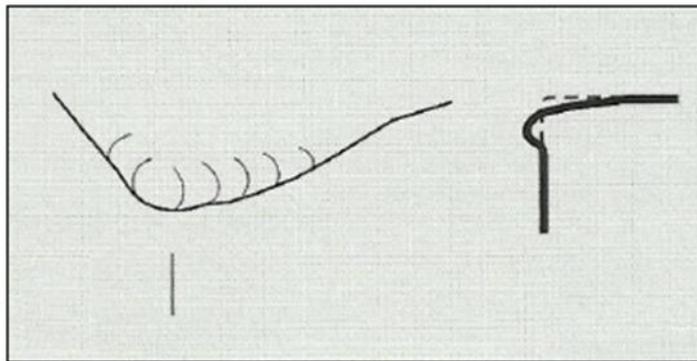
Fonte: Adaptada de Modern metall cutting (COROMANT, 1994).

2.4.3.2 Desgaste por Deformação Plástica

Com a temperatura aumentada e a pressão na zona de corte, o material da ferramenta pode amolecer, dando início a um desgaste por deformação plástica. Ocorre principalmente em usinagem de materiais de dureza elevada e com uso de

valores alto de velocidades de corte e avanço. Pode se observa que na figura 8 a superfície da aresta de corte apresenta uma deformação em seu formato, prejudicando a vida útil da ferramenta e o acabamento superficial da peça usinada. Para evitar o desgaste é necessário que o material da ferramenta tenha características de dureza elevada e, que mantenha sua resistência mecânica em temperaturas altas de usinagem (COROMANT, 1994).

Figura 8 – Desgaste por deformação plástica

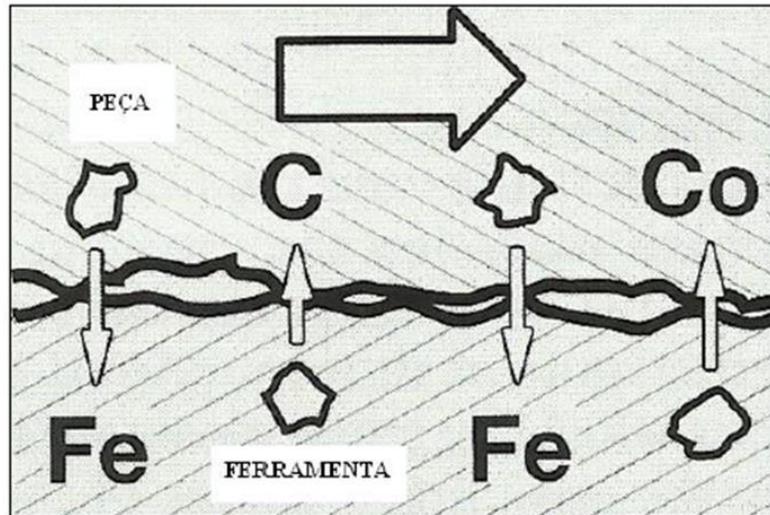


Fonte: Adaptada de Modern metall cutting(COROMANT, 1994)

2.4.3.3 Desgaste por difusão

Este desgaste ocorre através de uma reação química entre o material da peça e a ferramenta de corte, sendo o processo ativado por altas temperaturas. Principalmente na interface “ferramenta-cavaco” na superfície de saída da ferramenta. Este tipo de desgaste presente na figura 9 é o mais acentuado em usinagens com altas velocidades de corte e com altas temperaturas na interface da ferramenta-cavaco, podendo ser acelerado através da afinidade química entre o material da peça e o material da ferramenta. A razão que causa este tipo de problema é a solubilidade do determinado material da peça em conjunto com o material da ferramenta. Em velocidades de corte altas, ocorre o aumento de temperatura na zona de corte, causando a transferência de partículas entre o material da peça e da ferramenta. O Desgaste por difusão resulta em superfícies menos rugosas na aresta de corte. KUMAR, A. S.; DURAI, A. R.; SORNAKUMAR, T. (2003).

Figura 9 – Esquema do desgaste por difusão.



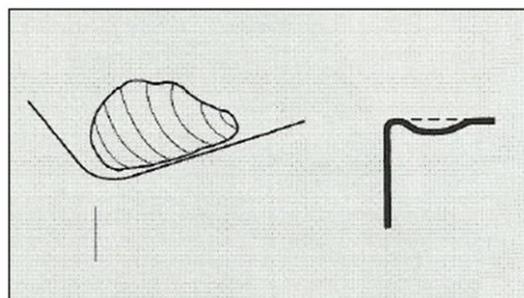
Fonte: Adaptada de Modern metall cutting (COROMANT, 1994).

2.4.4 Desgaste Químico

2.4.4.1 Desgaste por Craterização

As crateras formadas na ferramenta de corte ocorrem devido a uma reação química entre o material da ferramenta e o da peça usinada. Esta reação química está relacionada ao aumento de temperatura e pressão na zona de corte. O desenvolvimento deste desgaste também pode ser provocado pelo atrito entre o cavaco sendo removido e a ferramenta de corte. Deste modo, este desgaste é estabelecido pela remoção de material da superfície de saída da ferramenta, podendo ser notado na figura 10 (COROMANT, 1994).

Figura 10 – Desgaste por Craterização.



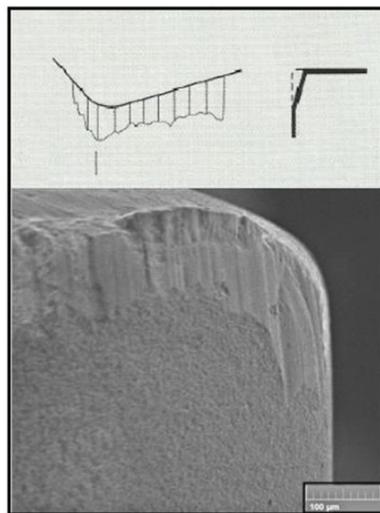
Fonte: Adaptada de Modern metall cutting (COROMANT, 1994).

2.4.5 Desgaste Abrasivo

2.4.5.1 Desgaste de Flanco

O desgaste de flanco, representado na figura 11, ocorre nas superfícies que possuem folga, atingindo na aresta principal de corte juntamente com a secundária, as vezes até mesmo nas duas. Quando atinge essa aresta principal de corte, resulta no aumento das temperaturas e forças envolvidas no corte, além disso, pode causar vibrações tanto na ferramenta como na peça. Na aresta secundária, que dependem o controle dimensional e qualidade do acabamento superficial da peça usinada, um desgaste excessivo. Resultado numa superfície mal-acabada e peças fora da especificação pretendida. Nas condições normais de usinagem, o desgaste de flanco é o tipo de falha que apresenta o maior risco de danos a peça, exige mais potência de corte, motivo pelo qual costuma ser o mais usado na determinação de critérios de fim de vida de ferramenta (COROMANT, 1994).

Figura 11 – Desgaste de Flanco.



Fonte: Adaptada de Modern metall cutting (COROMANT, 1994).

Em geral, os desgastes por abrasão ocorrem em materiais de ferramentas com características de tenacidade à fratura baixa e dureza alta, como os materiais cerâmicos. A resistência ao desgaste por abrasão do material cerâmico é diretamente proporcional ao produto da tenacidade à fratura pela dureza do material da ferramenta de corte. Tal parâmetro pode ser utilizado para prever a resistência da ferramenta no processo de usinagem, onde a abrasão é um mecanismo dominante (COROMANT, 1994).

2.5 Equação de Taylor

Segundo Shabtay e Kaspi (2002) a vida da ferramenta tem sido há muito tempo reconhecida como um fator que tem que ser tomado em consideração para a operação de usinagem. Em operações de desbaste ou acabamento, as diferentes velocidades de corte, avanços e ângulos da ferramenta são escolhidas geralmente de acordo com critérios que irão proporcionar uma vida útil econômica à ferramenta.

A vida da ferramenta é o tempo de corte necessário (deduzindo os tempos passivos) para a ferramenta atingir um critério de vida útil previamente estabelecido, até perder a sua capacidade de corte. Atingindo esse tempo se recomenda a afiação ou a substituição da ferramenta (Diniz *et al.*, 2010).

A função de vida $T = f(v)$, conhecida como curva da vida da ferramenta foi deduzida pela primeira vez por Taylor em 1906 e é expressa através da equação (Ferraresi, 2009):

$$T = K \cdot V^{-x} \quad (1)$$

A representação da curva da vida da ferramenta em escala logarítmica possui a característica de uma reta. Nesse caso a equação pode ser expressa na forma da equação 2.

$$\text{Log}T = \text{Log}K - x \cdot \text{Log}V \quad (2)$$

A constante K pode ser interpretada como a vida da ferramenta para uma velocidade de corte de 1 m/min, V é a velocidade de corte [m/min], o expoente x é o coeficiente angular da reta no diagrama bi-logarítmico. A equação (1) pode ser aplicada em outros materiais de corte além das pastilhas de metal duro. Shabtay e Kaspi (2002) expressam a equação de Taylor sob a forma da equação 3.

$$V \cdot T^n = C \quad (3)$$

Onde T é a vida útil da ferramenta [min], n é coeficiente angular da reta da função $\log * \log$ e C é uma constante. O índice n depende principalmente do material da ferramenta, equação 4.

$$y = \frac{1}{x} e K^{\frac{1}{x}} = C \quad (4)$$

As velocidades de corte dadas por equações desse tipo, isto é, definidas para uma determinada vida da ferramenta, são denominadas velocidades ótimas de corte. Caso a vida T da ferramenta seja calculada pelas condições econômicas, a velocidade ótima de corte recebe o nome de velocidade econômica de corte, isto é, velocidade da qual o custo de produção é o mínimo.

2.5.1 Tempo de Corte

Segundo Sullivan e Cotterell (2002) os custos com usinagem são determinados principalmente pelo tempo de corte, onde as demandas de uma maior produtividade levam a uma combinação de parâmetros de usinagem próximo ao ideal.

O tempo efetivo de corte da ferramenta para a usinagem de uma peça é dado por:

$$T_c = \frac{la}{V_a} \quad (5)$$

sendo:

$$V_a = a \cdot n \quad (6)$$

e

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{d \cdot \pi} \quad (7)$$

então:

$$T_c = \frac{\pi \cdot d \cdot la}{V_c \cdot a \cdot 1000} \quad (8)$$

onde:

t_c : Tempo de corte [min].

l_a : Percurso de avanço [mm].

V_a : Velocidade de avanço [mm/min].

a : Avanço [mm/volta].

n : Rotação [rpm].

V_c : Velocidade de corte [m/min].

d : Diâmetro da peça [mm].

2.5.2 Tempo Devido a Ferramenta

É o tempo consumido com a troca e afiação da ferramenta para todo o lote, que é expresso por:

$$nt \dots tf \quad (9)$$

sendo

$$nt = Z \cdot \frac{T_c}{T} \quad (10)$$

e

$$tf = (tft + tfa) \quad (11)$$

Substituindo nt e tf na expressão do tempo gasto com a ferramenta, equação (8) e substituindo a equação (1) para a vida da ferramenta T e a equação (7) para o tempo de corte t_c , se obtém:

$$nt \cdot tf = Z \cdot \frac{\pi \cdot d \cdot l \cdot a \cdot V_c^{x-1}}{K \cdot a \cdot 1000} \cdot (tft + tfa) \quad (12)$$

onde:

nt : Número de trocas da ferramenta durante a fabricação do lote

tft : Tempo consumido com a ferramenta [min].

Z : Número de peças do lote.

tft : Tempo de troca da ferramenta [min].

tfa: Tempo de afiação da ferramenta [min].

2.5.3 Tempo Improdutível

Os tempos improdutivos são os tempos que não agregam valor para a produtividade e é a soma dos tempos:

T_s : Tempo secundário, em minutos, em cada peça, onde se leva em consideração a fixação e retirada da peça, aproximação da ferramenta, inspeção (caso necessário), entre outros.

T_{pr} : Tempo de preparação, em minutos, de todo o lote para iniciar a usinagem, preenchimento de procedimentos, alimentação da matéria prima, ferramentas, gabaritos, desenhos, limpeza da máquina, entre outros.

2.5.4 Tempo Total

É calculado para a execução de uma peça, através dos tempos que envolvem o processo. O tempo necessário para produção do lote é:

$$Z \cdot T_t = Z \cdot T_c + nt \cdot tf + Z \cdot T_s + T_{pr} \quad (13)$$

logo, o tempo total de produção por peça será:

$$T_t = tc + \frac{nt \cdot tf}{Z} + ts + \frac{tpr}{Z} \quad (14)$$

3.0 Metodologia

Esse estudo tem como foco adquirir conhecimentos necessários para analisar o tipo adequado de pastilha em cima de um tarugo de ferro fundido nodular. Até então, foram apresentados conceitos, dados consolidados, um passo-a-passo de qual material usar de acordo com sua necessidade, além disso, foi mostrado que existem dados pré-estabelecidos que auxiliam na hora da escolha dos materiais para usinagem. A revisão foi capaz de mostrar que além desses critérios já estabelecidos, pode ser feito também, um cálculo e uma avaliação de desgaste ferramental para ferro fundido nodular. Feito isso, será feito vários testes em cima dos resultados para que se obtenha uma resposta progressiva e satisfatória

3.1 Métodos

Método é o conjunto de atividades sistemáticas que, com maior segurança e economia, permite alcançar o objeto, conhecimentos válidos e verdadeiros, traçando o caminho a ser seguido, detectando erros e auxiliando as decisões do cientista. (LAKATOS e MARCONI, 2007).

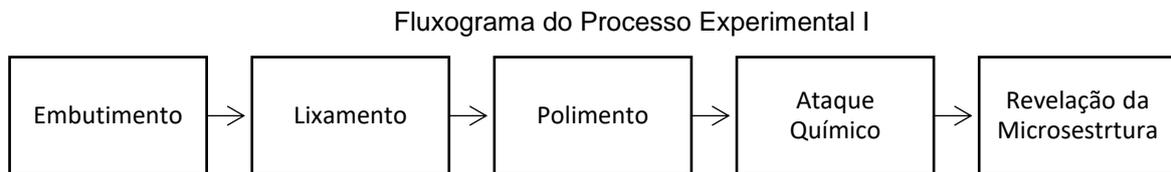
O objetivo desse trabalho é avaliar o desgaste ferramental em cima da usinabilidade do ferro fundido nodular, para que esse teste em geral seja feito, é necessária uma escolha de um método que seja capaz de guiar o desenvolvimento do estudo de uma forma clara e eficiente. Será usado o método dedutivo e quali-quantitativo. Método dedutivo é o caminho das consequências, pois uma cadeia de raciocínio em conexão descendente, isto é, do geral para o particular, leva à conclusão. Em base a esse método, partindo-se de teorias e leis gerais, pode-se chegar à determinação ou previsão de fenômenos particulares. (ANDRADE, 2006).

O método dedutivo parte das teorias e leis consideradas gerais e universais buscando explicar a ocorrência de fenômenos particulares. O exercício metódico da dedução parte de enunciados gerais (leis universais) que supostos constituem as premissas do pensamento racional e deduzida chegam a conclusões. O exercício do pensamento pela razão cria uma operação na qual são formuladas premissas e regras de conclusão que se denominam demonstração (DINIZ e SILVA, 2008).

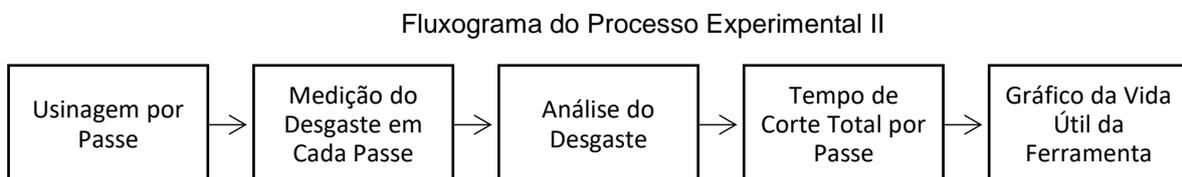
A pesquisa quantitativa se centra na objetividade. Influenciada pelo positivismo, considera que a realidade só pode ser compreendida com base na análise de dados brutos, recolhidos com o auxílio de instrumentos padronizados e neutros. A pesquisa quantitativa recorre à linguagem matemática para descrever as causas de um fenômeno, as relações entre variáveis, etc. (ENGEL, TOLFO, 2009, p.33).

Os métodos selecionados permitem uma análise física matemática do comportamento equacional dos parâmetros de corte, desgaste ferramental e, fazer as avaliações necessárias.

3.1.1 Processo Experimental I



3.1.2 Processo Experimental II



3.2 Equipamentos e Materiais

3.2.1 Equipamentos e Materiais para Usinagem.

Os experimentos foram realizados no laboratório “Laboratório de Materiais e Processamento (LabMatPro)”, na escola superior de tecnologia – EST/UEA.

A seguir na tabela 8 contém a relação da velocidade onde variou de acordo com o diâmetro do tarugo, com a velocidade inicial de 143.92 m/min, o avanço foi fixado em 0.15 mm/rot e a profundidade de corte em 0.5 mm para analisar a vida da ferramenta. Tendo em vista que o torno não possui velocidade de corte controlada por CNC então de acordo com a equação 7 foi calculada a velocidade de corte.

Tabela 8: Tabela de Ensaios

Ensaios	Diâmetro do Tarugo (mm)	Velocidade de Corte(m/min)	Avanço (mm/rot)	Profundidade de Corte (mm)
1	50,9	143,92	0.15	0.5
2	51,85	146,60	0.15	0.5
3	51,8	146,46	0.15	0.5
4	44	124,41	0.15	0.5
5	43,95	124,27	0.15	0.5
6	43,9	124,12	0.15	0.5
7	43,85	123,98	0.15	0.5
8	43,8	123,84	0.15	0.5
9	34,5	97,55	0.15	0.5
10	34,45	97,41	0.15	0.5
11	34,4	97,26	0.15	0.5
12	34,35	97,12	0.15	0.5
13	24,6	69,55	0.15	0.5
14	24,55	69,41	0.15	0.5
15	19,15	54,15	0.15	0.5
16	19,1	54,00	0.15	0.5
17	16	45,24	0.15	0.5

Fonte: Autor, 2018.

Os ensaios foram realizados em um Torno mecânico manual da marca Manrod, como mostra a Figura 12 possuindo especificações técnicas conforme a tabela 9.

Figura 12 – Torno Mecânico Manual Manrod



Fonte: Autor, 2018.

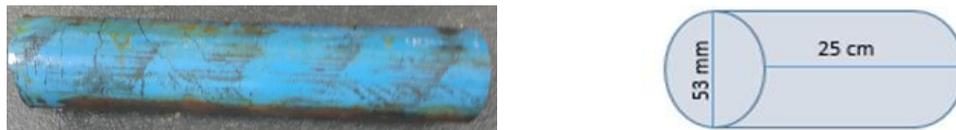
Tabela 9: Dados do Torno

Parâmetro	Valores
Distância máxima entre centros	550 mm
Diâmetro máximo sobre o barramento	250 mm
Largura do barramento	135 mm
Diâmetro de passagem do eixo-árvore	20 mm
Potência	550 W
Rotação Máxima	900 rpm

Fonte: Autor, 2018.

O corpo de prova selecionado foi o tarugo com diâmetro de 53mm e comprimento de 1 m, para realização do teste, o corpo de prova foi dividido em 4 corpos de 25cm como mostra a figura 13 tendo em vista que o torno da figura 12 suporta apenas peças de pequeno porte. O comprimento percorrido durante as usinagens foi de 20cm. O passe 0 foi realizado com o objetivo de nivelar o tarugo, foi tirado 1mm de diâmetro.

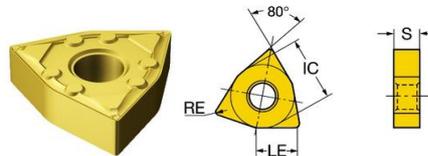
Figura 13 – Tarugo



Fonte: Autor, 2018.

A Sandvik Coromant é mundialmente conhecida pelas suas fabricações de várias ferramentas no mundo da metalurgia, o modelo escolhido para o experimento foi o **WNMG060404 WF3005**, representada na figura 14, na tabela 10 suas especificações.

Figura 14 – Representação da Pastilha de Corte



Fonte: Sandvik Coromant, adaptada

Tabela 10: Dados da Pastilha Conforme Fabricante

Parâmetros De Corte de Acordo com o Fabricante		
Ap	Fn	Vc
0.75 mm (0.15 - 3.00)	0.15 mm (0.4 - 0.20)	155 m/min (145-165)

Fonte: Sandvik Coromant

O porta ferramenta utilizado nesse experimento, foi o **SUPORTE EXTERNO INTERCAMBIÁVEL MWLNR 2020 K06**, própria para pastilha escolhida, intercambiável. O porta ferramenta foi adaptado de 20x20 para 12x12 para poder ser utilizada no torno. Figura 15.

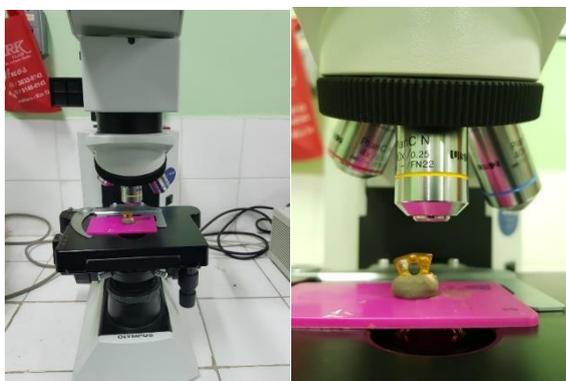
Figura 15 – Porta Ferramenta.



Fonte: Autor, 2018.

Após a cada passe, a pastilha foi retirada da porta ferramenta para verificar o desgaste que ocorria com a mesma, as medições do desgaste foram feitas no Microscópio de marca OLYMPUS onde foi utilizada a lente de 40x e, as fotos do desgastem foram tirados com auxílio do programa MULTICAM, ao total foram realizados 17 passes, figura 16.

Figura 16 – Microscópio Utilizado no Experimento



Fonte: Autor, 2018.

3.2.1 Equipamentos e Materiais para Microscopia e Metalografia.

É importante ter cuidado com o que você compra. Em algumas situações a especificação do material vendido não é o que ele realmente é, não se sabe ao certo se o material (tarugo) comprado é um ferro fundido nodular, ou seja, uma metalografia é necessária para comprovar se realmente o material é um ferro fundido nodular. Para realizar a metalografia, é necessário seguir um passo-a-passo, para que no final, a

microestrutura seja revelada. Primeiramente foi separado um pequeno corpo de prova do tarugo de ferro fundido nodular, figura 17.

Figura 17 – Demonstrando o corpo de prova.



Fonte: Autor, 2018.

Em seguida, o corpo foi submetido na embutidora modelo PRE 30 Mi da marca AROTEC, cujo o objetivo é deixar o mesmo de forma linear e de fácil manuseio, tendo em vista que a peça é pequena, isso evita também que a amostra rasgue ou facilite um abaulamento. O embutimento foi feito em uma embutidora, figura 18, a quente até atingir a temperatura de 150°C até atingir a temperatura ambiente, pelo fato de ser a quente, foi utilizado a resina baquelite, de baixo custo e de dureza relativamente alta.

Figura 18 – Embutidora.



Fonte: Autor, 2018.

Após atingir a temperatura ambiente, a amostra presente na figura 14 está pronta para fazer o lixamento. Figura 19.

Figura 19 – Amostra do Embutimento do Ferro Fundido.



Fonte: Autor, 2018.

O lixamento que consta na figura 20 tem como objetivo deixar a amostra mais perfeita possível, o objetivo é eliminar os riscos e marcas profundas dando um acabamento para superfície para poder fazer o polimento, no caso desse experimento, foi feito o lixamento manual, com lixa própria para ferro fundido, são essas: 80, 120, 240, 320, 360, 600, 800, 1200, 2500. De acordo com a lixa, os riscos vão sumindo consequentemente.

Figura 20 – Operação Manual do Lixamento.



Fonte: Autor, 2018.

Antes de realizar o polimento na, foi feita uma limpeza na superfície da amostra afim de tirar traços abrasivos, poeiras, solventes, esse processo pode ser feito por lavagem com água ou álcool. O polimento visa um acabamento superficial polido e inseto de marcas, no caso da amostra, foi utilizado primeiramente a cera para fazer o

primeiro polimento e no segundo, foi utilizada a pasta diamantada, esse processo mecânico foi feito na politriz de modelo DP 9 de marca PENAMBRA. figura 21.

Figura 21 – Politriz.



Fonte: Autor, 2018.

Após o polimento, a amostra foi lavada na água destilada afim de tirar os resíduos da cera e pasta diamantada, em seguida secou-se a amostra para dar sequência ao ataque químico, cujo objetivo é permitir a identificação das fases da microestrutura. O ataque feito foi por imersão, onde a superfície da amostra é imersa na solução de ataque. Como o material é ferro fundido, foi usado Nital a 2%, com o tempo de 5 segundos. Após o ataque, foi passado um pouco de álcool em gel para tirar os resíduos do ataque químico.

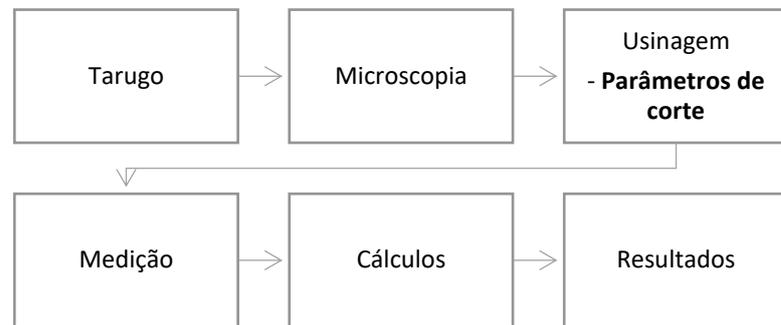
3.3 Técnica

Para realizar o estudo proposto neste trabalho foi iniciada uma pesquisa a partir de uma revisão bibliográfica com o objetivo de conhecer a atual problemática ocorrente no ambiente estudado, procedimentos de cálculos e, avaliações já feitas. Serão utilizados dados obtidos através de experimentos e estatísticas que, aliados aos procedimentos de cálculo citados anteriormente, proporcionarão a quantificação otimização estudada.

3.4 Procedimentos

Para proceder com o estudo do presente projeto, foi elaborado um fluxograma, onde é demonstrado o passo a passo para chegar ao resultado do projeto.

Fluxograma do Processo do Estudo.



Inicialmente, é definido o tema de estudo, no caso deste trabalho o tema é: análise do desgaste ferramental na usinabilidade do tarugo de ferro fundido nodular. Entretanto, para fins acadêmicos, o experimento foi dividido em duas partes, I e II, o intuito disso é para coletar uma quantidade dados significativa para enriquecer a pesquisa.

4.0 Discussões e Resultados

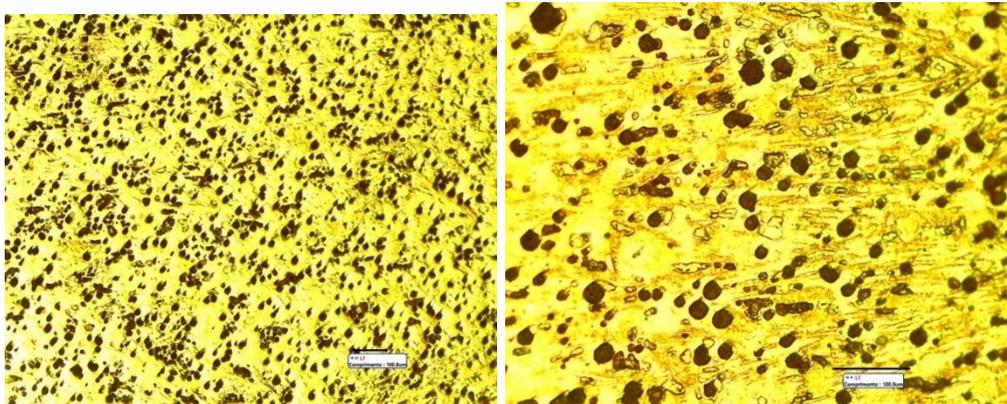
No primeiro experimento, onde foi feita a metalografia conforme figura 22, a microestrutura revelada foi de fato, um ferro fundido nodular, figura 23 para a) ampliação de 40x e b) para ampliação de 100x, pois a mesma apresenta uma matriz de ferrita α (coloração amarelada) e nódulos de grafita (coloração escura).

Figura 22 – Análise da Amostra



Fonte: Autor, 2018.

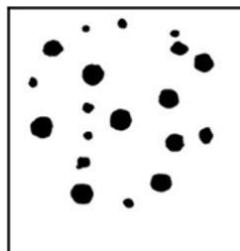
Figura 23 – Amostra Microscópica do Ferro Fundido Nodular, a) ampliação de 40x e b) ampliação de 100x.



Fonte: Autor, 2018.

Para constatação, foi comparado a microestrutura de um FoFo nodular da norma ISO 945 (Figura 24) com a microestrutura encontrada. Como pode ser observado, as duas amostras, figura 23 a) e b), são equivalentes.

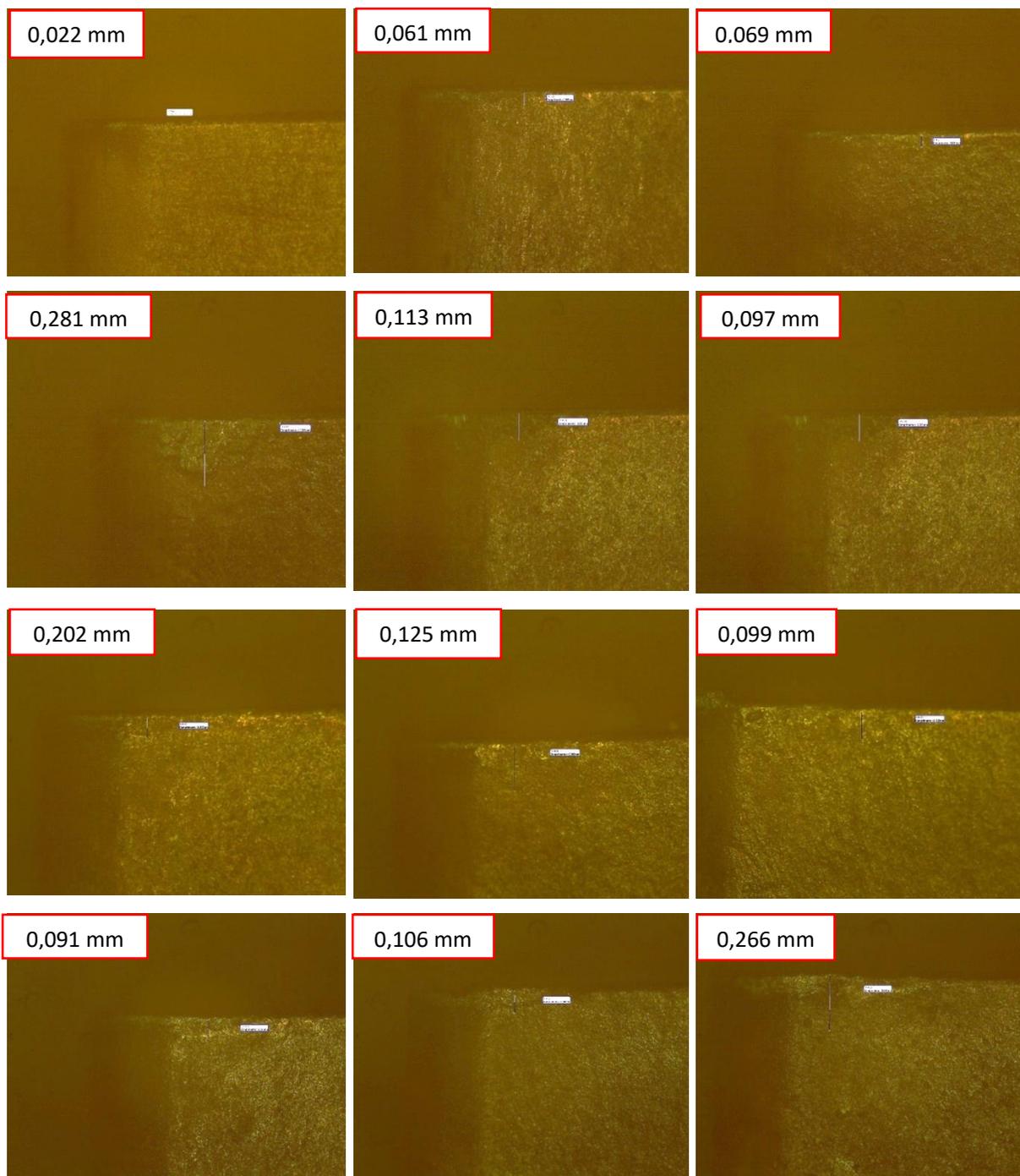
Figura 23 – Amostra do Ferro Fundido Nodular.

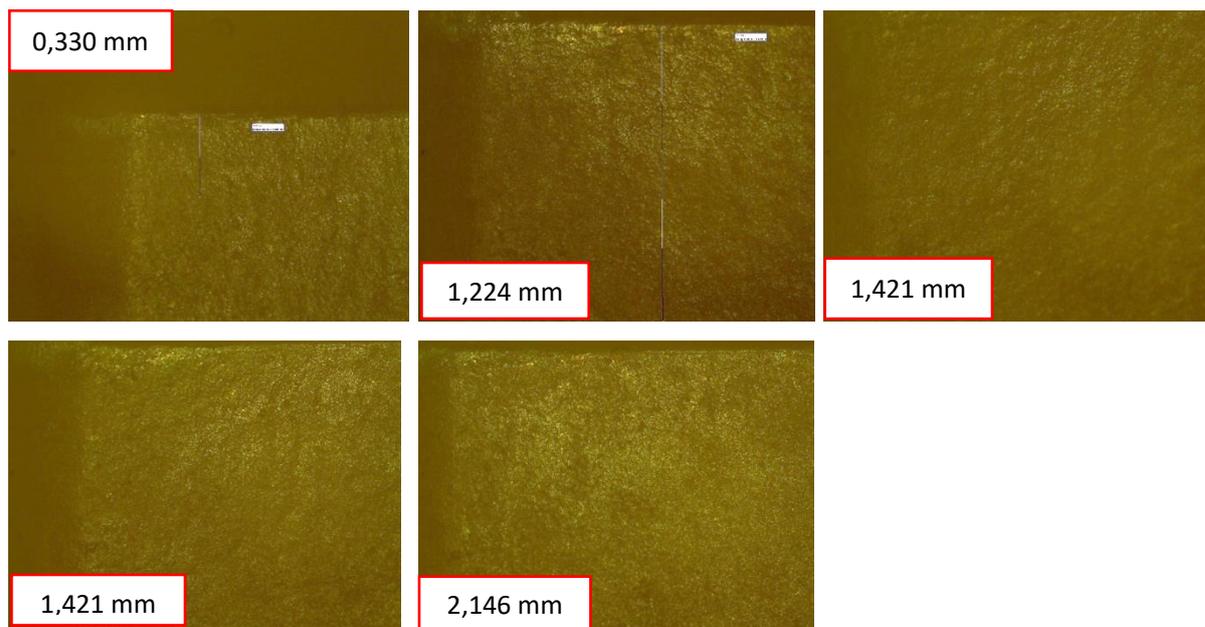


Fonte: ISO 943, Adaptada.

A figura 25 apresenta as 17 medições feitas de acordo com o passe, a cada passe, a altura do desgaste foi medida.

Figura 26 – Amostra Microscópica do Desgaste Ferramental na lente de 40x.





Fonte: Autor, 2018.

Como pode ser observado na figura 26, o desgaste apresentou-se de forma progressiva gerando assim, um desgaste de flanco.

Na tabela 11 é apresentado o controle de passes no experimento, a cada passe, foi calculado o seu tempo de corte total (equação 8) para esse passe.

Tabela 11 Controle de Passes

Nº de Passes	Diâmetro do Tarugo (mm)	Altura do Desgaste na Ferramenta(mm)	Tempo de Total de Corte para Cada Passe(min)
PASSE 1	50,9	0,022	1,48
PASSE 2	51,85	0,061	2,96
PASSE 3	51,8	0,069	4,44
PASSE 4	44	0,281	5,93
PASSE 5	43,95	0,113	7,41
PASSE 6	43,9	0,097	8,89
PASSE 7	43,85	0,202	10,37
PASSE 8	43,8	0,125	11,85
PASSE 9	34,5	0,099	13,33
PASSE 10	34,45	0,091	14,81
PASSE 11	34,4	0,106	16,30
PASSE 12	34,35	0,266	17,78
PASSE 13	24,6	0,33	19,26
PASSE 14	24,55	1,224	20,74
PASSE 15	19,15	1,421	22,22
PASSE 16	19,1	1,734	23,70
PASSE 17	16	2,146	25,19

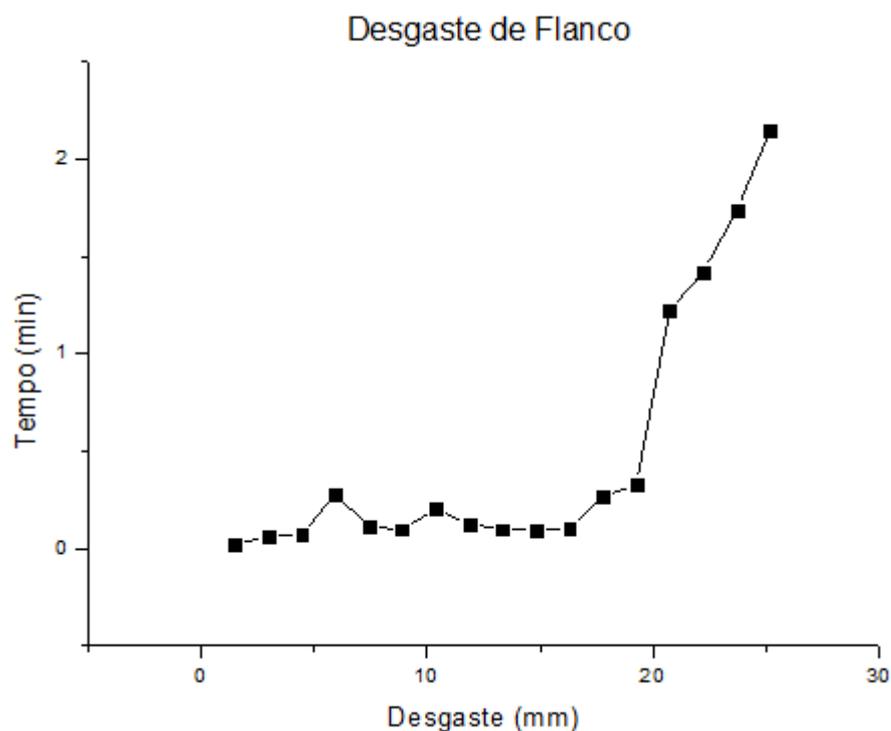
Fonte: Autor, 2018.

Nos passes 4 e 8 onde está destacado de amarelo houve vibrações no momento do torneamento contínuo e com isso foi necessário ser interrompido os passes. Após interrupção foi utilizado outra ferramenta por esse motivo que os valores não estão seguindo o padrão de 0.5 mm por cada passe.

No passe 15 onde está destacado de verde apresentou-se com maior relevância o desgaste de flanco e partir desse passe o desgaste cresceu de forma linear, onde foi decidido interromper os ensaios para não ocasionar a quebra da ferramenta.

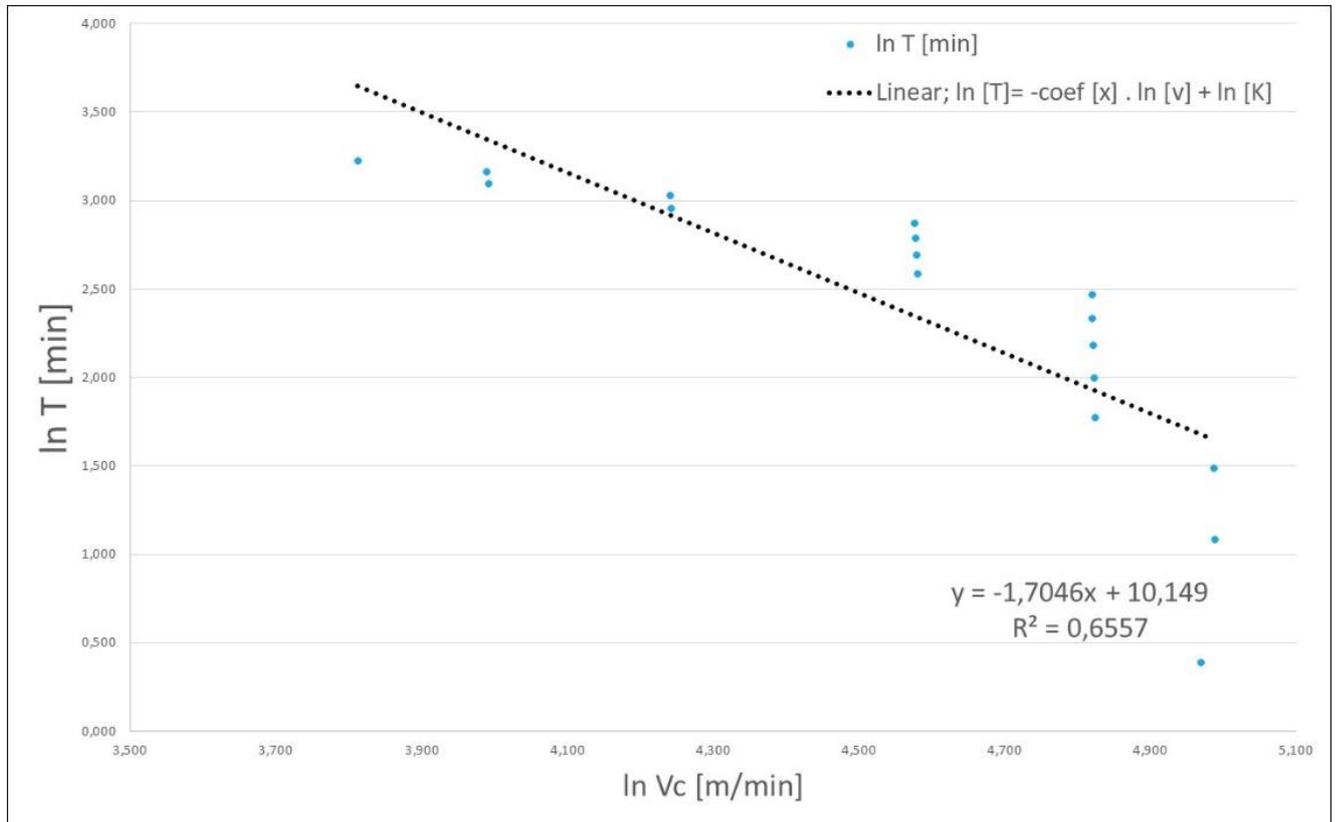
O gráfico da vida útil da ferramenta foi gerado de acordo com a altura do desgaste, o mesmo tendeu a crescer a cada passe e, de acordo com a equação 8, foi determinado que em 22,2 minutos e desgaste com altura de 1,4 mm tendeu a crescer de forma linear.

Figura 26 – Resultado da Curva da Vida Útil da Ferramenta



O desgaste médio encontrado foi de 1.4 mm, a partir desse ponto já ficou estabelecido o fim da vida útil da ferramenta do desgaste de flanco, a partir de 0.59mm foi calculado a equação da reta gerando assim o gráfico bi-logaritimico, $\ln T \times \ln Vc$, apresentado na figura 28. O Valor da constante $x = 1,7046$ e $K = 1,36E+05$.

Figura 28 - Representação do Fim da Vida Útil da Ferramenta



6.0 Conclusão

Diante das informações coletadas e dos resultados obtidos com a realização das análises práticas, pode-se verificar que a condição de usinabilidade do material representa uma significativa variação na vida útil da ferramenta, ou seja, é válido mencionar que as condições de vida útil da pastilha depende de uma série de fatores distintos, entretanto, para o presente estudo, conclui-se que uma usinagem sem fluido não é recomendado, além de desgastar precocemente a vida útil da ferramenta, os fabricantes de ferramenta de corte recomendam o uso do fluido de corte para ter um melhor acabamento no processo de torneamento. O desgaste resultante prova que um passe sem fluido influencia diretamente no acabamento da peça e na sua vida útil. Esse tipo de desgaste oferece um tempo de vida útil previsível, porém estável, ou seja, se o passe tivesse acompanhado com o fluido de corte, a sua vida útil aumentaria, mas, seria o mesmo tipo de desgaste, o mesmo ocorre devido à abrasão que é causada por constituintes duros que existem no material da peça. A microestrutura resultante na metalografia mostrou o FoFo nodular assim validando todos os parâmetros selecionados e executados e com isso, mesmo que, todos os parâmetros sejam selecionados para serem utilizados no material mesmo assim, ainda pode ocorrer variações para que o desgaste ocorra precocemente.

Para uma futura dissertação ou artigo, é desejável um estudo que abranja uma quantidade maior de dados, como por exemplo, variar os parâmetros de corte, aplicar o fluido de corte e verificar o tipo de rugosidade, assim a obtenção de dados será bem maior e com isso possibilitando novos resultados. .

7.0 Referências Bibliográficas

A. ROULA, G.A. KOSNIKOV. Manganese distribution and effect on graphite shape in advanced cast irons. *Materials Letters* 62, 2008. 4 p.

ABELE, E; DÖRR., Ferramentas de corte protegidas contra a defasagem tecnológica. *Maquinas e Metais*, São Paulo, n 439, p 38-53, 2002.

ABNT NBR 6916:2017 - Ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal - Especificação, que revisa a norma ABNT NBR 6916:1981.

ABNT.NBR-8582.1984 – Peças em ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal classificadas conforme a dureza brinell.

ASTM E140-02e1 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness. New York: 1998. 21 p.

ANDRADE, M. M., Introdução do trabalho científico: elaboração de trabalhos na graduação. 7ª ed. São Paulo: Atlas, 2006.

ASHBY, M.; **SHERCLIFF**, H.; **CEBON**, D. *Materials engineering, science, processing and design*. 3. ed. Londres, Inglaterra: Editora ButterworthHeinemann, 2007. 512p.

ASME, 1952. “Manual on Cutting the Metals”, the American Society of Mechanical Engineers, USA.

BJORKEGREN, L.-E., **HAMBERG**, K. e **JOHANNESSON**, B. Propriedades mecânicas e usinabilidade de FoFos nodulares ferríticos endurecidos com silício. *Revista Giesserei-Praxis* n 1, p 16-27, jan. 1999

BOULGER, F. W., 1990. “Machinability of Steels”, *Metals Handbook Tenth Edition* v.1, pp 591-602.

CALLISTER, W.D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 6th edition. New York: 2003.

CARVALHO, P. S. L. de., *et al.* Minério de ferro. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-233, mar. 2014.

CASOTTI, E. D. B; **CASTRO**, P. C., *Industria de Fundição: situação atual e perspectivas*. BNDES Setorial 33, p. 121-162.

CASSANIGA, Fernando A. *História e Aplicação do CNC*. [S.i], 2002. Disponível

CHIAVERINI, V. "Aços e ferros fundidos". 6ª ed., São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1990. 576 pgs.

COROMANT, S. (FIRM). *Modern metal cutting: a practical handbook*. Sandvik Coromant, 1994.

COROMANT, S. *Torneamento geral: positiva e negativa* [2014]. Disponível em: http://www.sandvik.coromant.com/ptpt/knowledge/general_turning/how-to-achieve-good-componentquality/insert-information/positive-and-negative

DHAR, N. R.; **KAMRUZZAMAN**, M.; **AHMED**, Mahiuddin. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness 117 in turning AISI-4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 172, n. 2, p. 299-304, 2006.

DINIZ, A. E.; **COPPINI**, N. L., **MARCONDES**. F. C. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 6. ed.. São Paulo: Editora MM, 2008. 262p.

DINIZ, Anselmo Eduardo *et al.* *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 3.ed. São Paulo: Artilber, 2003.

DINIZ, Anselmo Eduardo; **MARCONDES**, Francisco Carlos; **COPPINI**, Nivaldo Lemos. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 3 ed. São Paulo: Artilber Editora, 1999. 244p.

E. HUG, C. KELLER , J. FAVERGEON K. DAWI. Application of the Monkman– Grant law to the creep fracture of nodular cast irons with various matrix compositions and structures – Revista Materials Science and Engineering A, 2009.

FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. 5ª ed. São Paulo: Editora Blücher, 1977, 751p.

FREITAS, B. M.; DESGASTE DE FERRAMENTAS E OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE NA USINAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO 304L COM FLUIDO VEGETAL. COPPE UFRJ. 2014

GASPAR, Marcos. A melhoria contínua em processos produtivos, com a utilização da tecnologia CNC, na indústria metal-mecânica. Faculdade de Tecnologia Zona Leste. São Paulo, 2009. Disponível em <<http://www.fateczl.edu.br>>.

GONÇALVES, Bruno Bastos; YAGINUMA, Gabriel Fernando; YAMAMOTO, Marcelo Kazuo. Óleos de usinagem: tipos, classificação e desempenho. Universidade Estadual Paulista, 2010, 13p. Disponível em: <http://wwwp.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo_18.pdf>. Acesso em: 20/11/2017

GROOVER, M. P., Fundamentals of Moder Manufacturing. Prentice Hall, 1996.

INTERNATIONAL STANDARD ISO 945-1 N 479 – Graohite classification by visual analysis.

ISIK, Y. Investigating the machinability of tool steels in turning operations. Materials & Design, v. 28, n. 5, p. 1417-1424, 2007.

J. PUPAVA, R. DÖPP, F. NEUMANN. Beitrag zur metallurgischen Bewertung von elektrisch erschmolzenem Gußeisen Mit Lamellengraphit für Automobilguß.Revista Giesserei-Praxis n 12, p 489-497, dez. 2003.

KALPAKJIAN, S., Manufacturing Engineering & Technology. 4th ed, Addison Wesley, 2000.

KRATOCHVIL, R. Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafita industrial. Tese (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

KUMAR, A. S.; **DURAI**, A. R.; **SORNAKUMAR**, T. Machinability of hardened steel using alumina based ceramic cutting tools. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 21, n. 3, p. 109117, 2003.

LAKATOS, E. M. & **MARCONI**, M. A. Metodologia científica. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2006.

LAKATOS, E. M. & **MARCONI**, M. A. Metodologia do trabalho científico. 7ª ed. São Paulo: Atlas, 2007.

LAWAL, Sunday Albert; **CHOUDHURY**, Imtiaz Ahmed; **NUKMAN**, Yusoff. A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant. In: JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2012, 12p. Editora: Elsevier.

M. B. DA SILVA, D. F. **SANTOS**. Determinação da Usinabilidade do ferro fundido nodular produzido na fundição da A A Eletrotécnica LTDA. Jun. 2008.

M. HUPALO, E. H. **CONRAD**, M. C. **TRINGIDES**. Growth mechanism for epitaxial graphene on vicinal 6H-SiC (0001) surfaces: A scanning tunneling microscopy study. Jul. 2008.

MACHADO, A. Comando Numérico Aplicado às Máquinas-Ferramenta. 4 ed. São Paulo, Ícone, 1990.

MARCICANO, João Paulo P. Introdução ao comando numérico. São Paulo, 2002. Disponível em: <http://www.dsc.inf.furb.br>

PRODANOV, C. C; **FREITAS**, E. C., Metodologia do trabalho científico [recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2ª ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RUBIO, J.C. Automação de Máquinas Ferramenta. Apostila DEMEC/UFMG, 1999;

RUBIO, J.C. Controladora flexível multi-eixo para acionamentos fracionários de alta dinâmica. Dissertação de Mestrado, CPGM –UFSC, Florianópolis, 1992.

SÁ, Napoleão Armstrong R. A. de. Fluidos de Corte. Escola Politécnica de Pernambuco, 2010, 16p.

SANTOS, Ricardo Adriano dos. Sistemas CNC. [S.i], 2002. Disponível em: <http://www.dsc.inf.furb.br>

SERBINO, E. M. Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar. Tese (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

SHABTAY, D., **KASPI**, M., 2002. “Optimization of machining economics problem under the failure replacement strategy”. International Journal of Production Economics, v.80, ed. 3, pp. 213-230.

SIMON, Alexandre Tadeu. Condições de utilização da tecnologia CNC: um estudo para máquinas-ferramenta de usinagem na indústria brasileira. Dissertação [Mestrado]. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP, 2001. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br>

SOUZA, A. J. Processos de fabricação por usinagem – Parte 1. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011, 89p. Disponível em:<http://www.chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem_Parte1.pdf>.

Acesso em: 20/11/2017

SOUZA, T. N. F., Produção e caracterização física e mecânica de ferros fundidos nodulares e ferros fundidos nodulares austemperados com adição de nióbio. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

STEMMER, C. E. Ferramentas de Corte I. 2ª ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 249 p.

STEMMER, C. E. Ferramentas de Corte II. 2ª ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 314 p.

STEMMER, C.E., 1995. “Ferramentas de Corte I”, 3a edição, Editora da UFSC, Florianópolis. CASSANIGA, Fernando A. História e Aplicação do CNC. [S.i], 2002. Disponível em: <http://www.usinagem-brasil.com.br>

STEMMER, G. Erich. Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscas, fresas, brochas, rebolos e abrasivos. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1992.

STOETERAU, R. L. Fundamentos dos processos de usinagem. São Paulo: USP, [2003]. Disponível em:

<<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202AULA%20RS1.pdf>>

STOETERAU, R. L. Processos de usinagem. Trabalho de Graduação. Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. 2007a.

STOETERAU, R. L. Fluidos de corte e revestimentos de ferramentas. Universidade Federal de Santa Catarina, 2007b, 50p. Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-11-U-2007-1-Fluidos.pdf>>. Acesso em: 01/12/2017.

TANAKA, Marcelo Costa. Avaliação de um Dispositivo utilizado em Máquina de Medir por Coordenadas. Monografia, UFRN, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Recursos Humanos – PRH 14/ANP. Áreas de Concentração: Engenharia de Petróleo, Natal/RN, Brasil, 2009.

TELES, J. M. Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro. 2007. 124 p.

Usinagem Brasil. O que é torneamento? [2009]. Disponível em <<http://www.usinagem-brasil.com.br/44-o-que-e-torneamento-/pa-1/>>. Acesso em: 23 de abril de 2018.

VACARO, T. Redução da utilização de fluidos de corte: uma abordagem ecológica na gestão de processos de usinagem. In: XVII ENCONTRO DE JOVENS PESQUISADORES DA UCS, 2009, Caxias do Sul. Disponível em: <http://www.ucs.br/ucs/pesquisa/jovenspesquisadores2009/trabalhos/poster/e_Tiago_Vacaro.pdf>. Acesso em: 01/12/2017

VATUK. J. Ferro fundido nodular com Nb aumenta a resistência ao desgaste de anéis de pistão de motores de combustão interna. Fundição e Serviços, 2003.

Vida útil da ferramenta. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general_turning/how-to-achieve-good-component-quality/tool-life> Acesso em 11/09/17.

W. L. GUESSER, D. G. HILÁRIO. A produção dos ferros fundidos nodulares perlíticos. Out. 1999.