

PEDRO HENRIQUE PIRES FRANÇA

**DESGASTE DE FERRAMENTAS REVESTIDAS POR
TiN E TiNAl SOB DIVERSAS CONDIÇÕES DE
USINAGEM NO FRESAMENTO DE FERRO FUNDIDO
VERMICULAR**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

PEDRO HENRIQUE PIRES FRANÇA

**DESGASTE DE FERRAMENTAS REVESTIDAS POR TiN E TiNAl
SOB DIVERSAS CONDIÇÕES DE USINAGEM NO FRESAMENTO DE
FERRO FUNDIDO VERMICULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como sendo um
requisito parcial para a obtenção do título de **BACHAREL EM
ENGENHARIA MECÂNICA.**

Orientador: Prof. Dr. Wisley Falco Sales

**UBERLÂNDIA - MG
2018**

PEDRO HENRIQUE PIRES FRANÇA

DESGASTE DE FERRAMENTAS REVESTIDAS POR TiN E TiNAl SOB DIVERSAS CONDIÇÕES DE USINAGEM NO FRESAMENTO DE FERRO FUNDIDO VERMICULAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como sendo um
requisito parcial para a obtenção do título de **BACHAREL
EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wisley Falco Sales / (Orientador)

Prof. MSc. Pedro Pio Rosa Nishida

MSc. Leandro Carvalho Pereira

Uberlândia, 20 de dezembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais Sebastião e Maria Eunice, por toda a educação que me proporcionaram, por todo o apoio e carinho que sempre demonstraram quando eu mais precisei.

Ao Professor Dr. Wisley Falco Sales, por toda a disposição, orientação, atenção e pela amizade.

Ao técnico Cláudio, conhecido como Kapa, pela amizade e ajuda durante todas as atividades executadas no LEPU.

Ao pessoal da minha turma e todos aqueles que estiveram comigo durante essa caminhada acadêmica.

Ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), por todo o espaço físico e infraestrutura disponível para a realização do trabalho.

A todos os professores e técnicos que tiveram participação direta e indireta na conclusão deste trabalho.

“Seu esforço não faz o menor sentido se você não acredita em si mesmo”

Uzumaki Naruto

FRANÇA, P. H. P. **Desgaste de ferramentas revestidas por TiN e TiNAl sob diversas condições de usinagem no fresamento de ferro fundido vermicular**. 2018, 43f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Uberlândia.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre o desgaste em ferramentas de metal duro com diferentes revestimentos, TiN e TiNAl, variando-se a dureza do material a ser usinado (ferro fundido vermicular), forma da superfície da peça, qualidade do revestimento e meio lubrificante. A medição do desgaste foi realizada a cada 400 mm de percurso de avanço. Os critérios admitidos para a interrupção do teste por aresta foram 4,8 m de percurso de avanço ou um desgaste de flanco maior que 0,3 mm seguindo a norma ISO 8688. Os ensaios experimentais mostraram que o revestimento TiNAl obteve um resultado melhor pois o revestimento da TiN descolou várias vezes. Além disso, a utilização de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) nestas condições teve um ganho de 40 % em relação ao fresamento a seco.

Palavras-chave: Ferro fundido vermicular, TiN, TiNAl, Lubrificação, Dureza, Revestimentos.

FRANÇA, P. H. P . **Wear of coated tools for TiN and TiAl under various conditions on milling machining of vermicular graphite cast iron**. 2018, 43f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Uberlândia

Abstract

This paper shows a study about wear in tool with a tungsten carbide with different coating, TiN e TiAl, varying the hardness of material (compact graphite cast iron), workpiece design, coating quality and medium coolant lubrication. The wear measurement was performed at each 400 mm of tool length, by the microscope Olympus SZ61. The criteria used for edge milling interruption were 4.8 m cutting length or a flank wear greater than 0.3 mm by following the standard that ISO 8688. Experimental tests have shown that the TiAl finish obtained a better result because the TiN coating has taken off several times. In addition, it was concluded that the use of Minimum Amount of Lubricant (MQL) under these conditions had a gain of 40% when compared with the dry milling.

Keywords: Compacted graphite grey cast iron, Coatings, TiN, TiAl , Lubrication, Hardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Forma da Grafita Tridimensional em diferentes ferros (DAWSON e SCHROEDER, 2000).	4
Figura 2 - Variedades de processos de fresamento (SANDVIK,2005).	7
Figura 3 - Avanço por dente (f_z), avanço de corte(f_c) no fresamento discordante. (NBR 6162, 1989).	8
Figura 4 - Profundidade de Corte(a_p), penetração de trabalho (a_e), penetração de avanço (a_f) em fresamento tangencial. (NBR 6162, 1989).	9
Figura 5 - Centro de Usinagem Vertical Discovery 760 utilizado para os ensaios de fresamento.	14
Figura 6 - (a) Ferramenta com revestimento TiAl utilizada no processo de fresamento; (b) Ferramenta com revestimento TiN utilizada no processo.....	16
Figura 7 - Durezas dos respectivos materiais utilizados no processo de fresamento (FONTE: Da Silva et. al., 2018).....	17
Figura 8 - (a) – Superfície maciça da placa; (b) Superfície furada da placa.	17
Figura 9 - Microscópio Olympus SZ61 que foi utilizado para realizar as medições de desgaste.	18
Figura 10 - Comparação do desgaste máximo em relação ao material usinado.	21
Figura 11 - Tempo de usinagem (s) x Material usinado.	21
Figura 12 - Volume de material retirado x Desgaste máximo.	22
Figura 13 - Tempo de usinagem x Volume da placa.	23
Figura 14 – (a) Deslocamento do revestimento de TiN durante o percurso de fresamento; (b) Desgaste excessivo após o percurso seguinte.	23
Figura 15 - Tempo de usinagem x Revestimento do material.	24
Figura 16 - Desgaste máximo de flanco x Revestimento.	24
Figura 17 - Tempo de usinagem x Condição lubri-refrigerante.....	25
Figura 18 - Desgaste máximo da ferramenta x Condição lubri-refrigerante.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Comparação das propriedades físicas de alguns tipos de ferro fundido (adaptado de DAWSON e SCHROEDER, 2000).	5
Tabela 2 : Especificações técnicas do Centro de Usinagem Discovery 760.....	15
Tabela 3 – Especificações técnicas das ferramentas TiN e TiNAl.....	15
Tabela 4 : Condições utilizadas no processo de fresamento.....	18
Tabela 5 : Parâmetros de corte utilizados nos testes de fresamento.	19
Tabela 6: Parâmetros relevantes no processo de fresamento (parâmetro p inferior a 0,05 é considerado estatisticamente relevante).....	20

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

f	Avanço [mm] ou Avanço por revolução [mm/rev]
D	Diâmetro [mm]
n	Movimento de rotação [rpm]
Z	Número de dentes [-]
TRM	Taxa de remoção de material [mm ³ /min]
t _c	Tempo de corte [min]
v _f	Velocidade de avanço [mm/volta]
v _c	Velocidade de corte [m/min]
f _z	Avanço por dente [mm/dente]
f _c	Avanço de corte [mm]
a _p	Profundidade de corte ou largura de corte [mm]
a _f	Penetração de avanço [mm]
a _e	Penetração de trabalho [mm]
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
VB _{bmáx}	Desgaste de flanco máximo

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivo	2
1.2.1 Objetivo geral	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
CAPÍTULO II	2
2.1 Ferro fundido	2
2.2 Ferro fundido vermicular	4
2.3 Usinabilidade dos ferros fundidos vermiculares	5
2.4 Fresamento	6
2.4.1 Variáveis do processo de fresamento	7
2.5 Defeitos na ferramenta de corte	9
2.5.1 Mecanismos de Desgaste.....	10
2.5.2 Formas de Desgaste	10
2.6 Vida da ferramenta de corte	11
2.7 Lubrificação MQL	12
CAPÍTULO III	14
Procedimentos Experimentais	14
3.1 Fresamento das placas de ferro fundido vermicular	14
3.1.1 Máquina Utilizada no processo.....	14
3.1.2 Ferramentas utilizadas no fresamento	15
3.1.3 Materiais usinados.....	16
3.1.4 Fluido de corte utilizado no processo.....	17
3.2 Medição do desgaste da aresta de corte	17
3.3 Procedimento experimental	18

CAPÍTULO IV	20
4.1 Análise da influência dos parâmetros	20
4.2 Análise da dureza	21
4.3 Análise das superfícies furadas/maciças das placas	22
4.4 Análise dos revestimentos	23
4.5 Análise das condições seco / MQL	24
CAPÍTULO V	27
5.1 Conclusões	27
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	27
Capítulo VI	29
Referências bibliográficas	29

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Com o avanço tecnológico, cada vez mais, há pesquisas com o intuito de descobrir novos materiais com melhores propriedades mecânicas, processos com capacidade de produção cada vez maiores e menores custos na produção. Dentre estes materiais, o ferro vermicular tem sido bastante cogitado, pois em certas aplicações, este ferro pode substituir o ferro fundido cinzento (Da Silva, R. B., et al, 2018).

O ferro vermicular, conhecido do inglês como *Compacted Graphited Iron-CGI* foi um ferro obtido por acaso durante a fabricação de ferro nodular, devido a erros em sua composição química. Neste material a sua grafita se apresenta na forma de vermes, diferente do ferro nodular, onde a mesma em sua microestrutura se apresenta na forma de nódulos (Da Silva, L. R.R., et al, 2018).

Junior e Guesser (2011) dizem que os ferros fundidos vermiculares não contêm uma usinabilidade boa em comparação com os ferros fundidos cinzentos devido a uma maior dureza, fazendo com que seu custo de produção seja mais caro. Porém, em relação ao ferro nodular, ele contém uma melhor usinabilidade e condutividade térmica. Na indústria automobilística, os materiais utilizados geralmente para a fabricação de blocos de motores são de ferro fundido cinzento ou ferro fundido vermicular ou então algumas ligas de alumínio. Para cada aplicação do material, avaliações como resistência mecânica, resistência térmica, peso, custo e tempo de produção e usinabilidade são avaliados.

Mesmo que o ferro fundido vermicular não contenha uma usinabilidade tão boa quanto o ferro cinzento, em algumas aplicações como na área automobilística, é preferível o uso deste ferro fundido do que o cinzento, por isso, estudá-lo é de suma importância.

Este presente trabalho, busca analisar o comportamento das ferramentas de metal duro, com diferentes revestimentos (TiN e TiAlN) no fresamento de vários ferros vermiculares com diferentes durezas e tenacidades sob diversas condições de usinagem.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento das ferramentas de metal duro com diferentes revestimentos (TiN e TiAlN), na usinagem de três diferentes tipos de ferro fundido vermicular, influência do volume de material removido e do sistema lubri-refrigerante.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar os mecanismos de desgaste das ferramentas no fresamento de três tipos de ferros fundidos vermiculares.
- Avaliar o desempenho de dois tipos de pastilhas de metal duro integral revestidas por TiN e por TiAlN.
- Avaliar a influência da lubrificação MQL (mínima quantidade de lubrificante) sobre o processo.
- Comparar o comportamento dos revestimentos para as condições impostas.
- Avaliar a influência da dureza dos ferros vermiculares no desgaste da ferramenta de corte.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ferro fundido

O ferro fundido é uma liga composta de ferro-silício-carbono, que contém teores de carbono acima de 2,0 % em sua composição (da Silva, L. R. R., and H. L. Costa, 2017a). Segundo a literatura o ferro fundido é considerado como uma "liga ternária Fe-C-Si" por conta da quantidade de silício ser maior do que a quantidade de carbono, promovendo uma decomposição do Fe_3C (Cementita) em ferro, e carbono sob a grafita lamelar (da Silva, L. R. R., and H. L. Costa, 2017b).

Chiaverini (2005), diz que a partir de alguns fatores pode-se determinar a estrutura do ferro fundido, como:

- **Composição Química:** Além do elemento ferro, há outros elementos na estrutura do ferro fundido que influenciam em suas propriedades. O carbono determina a quantidade de grafita que se pode formar. Já o silício é um elemento essencial para a grafitação do carbono. Também há outro elemento que faz o papel contrário do silício, o Manganês, estabilizando e contrabalanceando a ação grafitizante.
- **Velocidade de Resfriamento:** Em elevadas velocidades de resfriamento, o tempo é muito curto, dificultando a decomposição de cementita, gerando pouca ou nenhuma grafitação. Porém deve-se considerar a quantidade de carbono e silício na composição. Pelo contrário, em velocidades baixas, ocorre a grafitação formando uma composição composta de perlita e grafita.

2.2 Ferro fundido vermicular

O ferro fundido vermicular ou *Compacted Graphited Iron – CGI*, foi obtido por acidente em 1949 por Morrogh. Neste ferro, o formato da grafita se encontra na forma de vermes, disposta em uma matriz perlítica ou ainda ferrítico/perlítico.

Quando observado microscopicamente (Figura 1), é possível verificar que as grafitas vermiculares estão conectadas entre si, formando uma morfologia complexa, além de sua superfície apresentar imperfeições, resultando em forte adesão com a matriz de ferro (JUNIOR e GUESSER, 2011). As extremidades arredondadas da grafita do CGI suprimem a iniciação de trincas, enquanto a morfologia complexa e a forte adesão entre grafita e o ferro impedem a propagação das trincas (DAWSON e SCHROEDER, 2000).

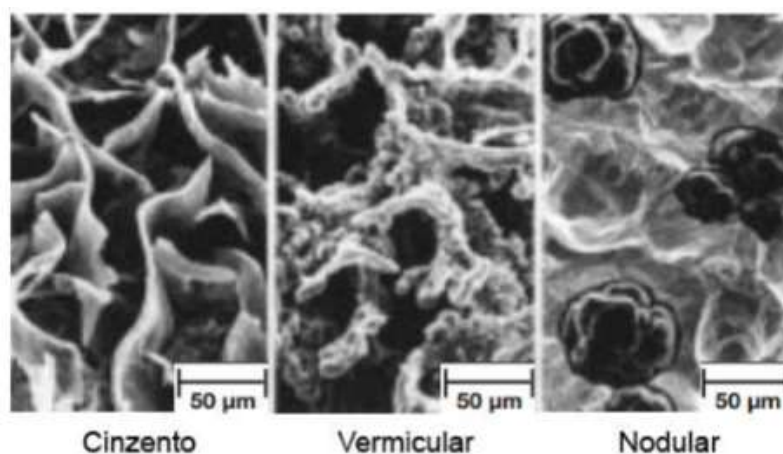


Figura 1 – Forma da Grafita Tridimensional em diferentes ferros (DAWSON e SCHROEDER, 2000).

Em relação aos ferros fundidos cinzentos e nodulares, o ferro fundido vermicular contém praticamente a mesma composição química, cerca de 94 % de ferro (Fe), 2,5 % de Silício (Si), 3 % de carbono (C), e os outros 0,5 % são outros elementos de ligas e residuais. Então, o que faz esses materiais terem diferentes propriedades físicas e mecânicas são a forma em que se encontra a grafita.

O ferro fundido cinzento apresenta a grafita na forma de lamelas (Figura 1), com cantos agudos e superfícies lisas. Suas grafitas são interconectadas e sem orientação preferencial, formando uma rede quase contínua.

As grafitas do ferro fundido nodular se apresentam na forma de nódulos (Figura 1), não gerando descontinuidade da matriz, o que ocasiona menor concentração de tensão. Esta

disposição das grafitas confere ao material um aumento da sua resistência mecânica, ductilidade e tenacidade, maior que o encontrado no ferro fundido cinzento (DAWSON,1993).

Em comparação, o ferro fundido vermicular contém uma elevada resistência mecânica e dureza do que ferro fundido cinzento, e uma melhor condutividade térmica e propriedades de amortecimento em relação ao ferro fundido nodular. Com isso, o ferro vermicular se torna bastante aplicável.

Na Tabela 1, pode-se observar algumas propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular. Assim, é possível verificar que, de um modo geral, os valores das propriedades do vermicular se encontram entre os do cinzento e do nodular, como citado anteriormente.

Tabela 1 : Comparação das propriedades físicas de alguns tipos de ferro fundido (adaptado de DAWSON e SCHROEDER, 2000).

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência à tração [Mpa]	250	450	750
Módulo de Elasticidade [GPa]	105	145	160
Resistência à Fadiga [Mpa]	110	200	250
Condutividade térmica [W/m ² K]	48	37	28

2.3 Usinabilidade dos ferros fundidos vermiculares

Segundo Diniz et. al. (2013) a usinabilidade é, de modo geral, um conjunto de propriedades que são tomadas a partir de um material que foi definido como padrão, que através de valores numéricos comparativos definem o grau de usinabilidade.

Como a usinabilidade não depende somente das condições e propriedades do material, mas também das condições de usinagem, características da ferramenta, condições de refrigeração, rigidez do sistema máquina-dispositivo de fixação peça-ferramenta e dos tipos de trabalho executados pela ferramenta (corte contínuo ou intermitente, condições de entrada e saída da ferramenta), um mesmo material pode ter um valor de usinabilidade diferente para condições de usinagem diferentes (DINIZ et al., 2013).

A usinagem do ferro fundido vermicular, assim como do ferro fundido cinzento, inicia-se com uma trinca formada no plano da grafita, que possui uma resistência menor aos esforços de corte. Todavia, como as arestas das lamelas das grafitas do ferro fundido vermicular

arredondadas, a sua usinagem requer maiores esforços de corte do que no ferro fundido cinzento (XAVIER,2003). Por apresentar maior resistência à tração (75%) e maior tenacidade (30 – 40%) em relação ao ferro fundido cinzento, o ferro fundido vermicular é mais difícil de ser usinado (DAWSON, 1995).

Dois pontos críticos para a usinabilidade do ferro fundido vermicular são a consistência da microestrutura e o controle da nodularidade. Para que haja boa usinabilidade, é necessário que as partículas de grafita apresentada como nódulos não ultrapassem o índice de 20% nas áreas a serem usinadas.

Em contrapartida, nas paredes externas que não são usinadas, a nodularidade mais alta é responsável por garantir maior resistência às mesmas. No sentido de controlar a nodularidade, o ferro fundido vermicular é frequentemente produzido com 0,1 a 0,2% de titânio. Estudos mostram que a produção de CGI sem titânio torna a usinabilidade igual ou até superior a dos ferros cinzentos (DAWSON, 1995).

2.4 Fresamento

Entre os processos de usinagem o fresamento é um processo bastante versátil e flexível. Devido a essas características ele é bastante aplicado em processos de fabricação industrial. Além de permitir modelar peças geométricas, livremente de sua complexidade e conseguir altas taxas de remoção de material.

Segundo (DROZDA,1983) esse processo possui uma grande variação, de acordo com o tipo de máquina utilizado, movimento da peça e tipos de ferramentas. Pela Figura 3, pode-se perceber a variedade de processos de fresamento, especificados por (SANDVIK,2005):

- | | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| 1-Faceamento | 8- Cortes |
| 2-Fresamento de cantos a 90° | 9- Fresamento com a Altos avanços |
| 3-Fresamento de perfis | 10- Fresamento de mergulho |
| 4-Fresamento de cavidades | 11- Fresamento em rampa |
| 5-Fresamento de canais | 12- Interpolação helicoidal |
| 6- Tornofresamento | 13- Interpolação circular |
| 7- Fresamento de roscas | 14- Fresamento trocoidal |

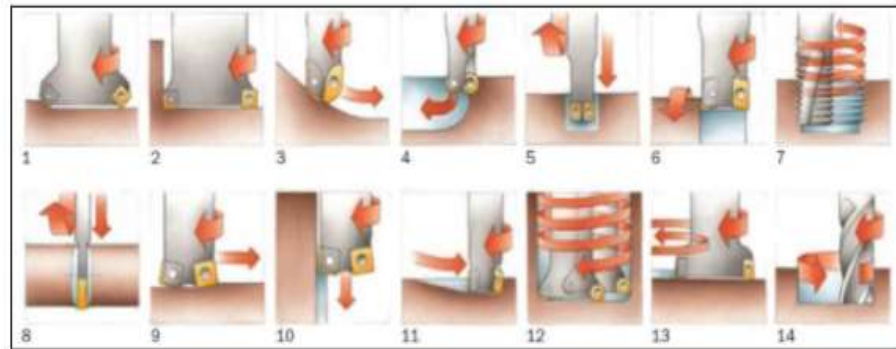


Figura 2 - Variedades de processos de fresamento (SANDVIK,2005).

A maioria das superfícies geradas pelo fresamento são superfícies planas (WEINGAERTNER; SCHROETER, 2002). Este processo pode ser diferenciado dos demais processos de usinagem com rotação de ferramenta (furação, mandrilamento, roscamento, trepanação, entre outros) pela atuação simultânea de somente parte das arestas de corte, (corte interrompido) e pelo deslocamento tanto da ferramenta quanto da peça durante a operação de corte (GROOVER, 2002).

As aplicações frequentes do processo são a obtenção de superfícies planas, rasgos, ranhuras, perfis, contornos, cavidades e roscas, entre outros. O movimento relativo pode ser resultante apenas da movimentação da ferramenta sobre a peça, ou ainda, ser resultante de uma combinação de movimentos de peça e ferramenta. Contudo, como característica do processo, tem-se a velocidade de avanço da peça bem inferior à velocidade de rotação da ferramenta (STEMMER,1995).

2.4.1 Variáveis do processo de fresamento

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), os parâmetros avaliados no processo de fresamento com seus respectivos nomes e unidades são:

- Avanço (f) [mm] – é o trajeto de avanço por volta da ferramenta.
- Avanço por revolução (f) [mm/rev] – É a distância linear percorrida por uma revolução completa da ferramenta, que é medida no plano de trabalho.
- Diâmetro (D) [mm] – É o diâmetro da ferramenta, que no caso é a fresa.
- Movimento de rotação (n) [rpm] – É o número de voltas que a ferramenta (fresa) dá em torno do seu eixo por unidade de tempo.
- Número de dentes (Z) [-] – É o número de dentes que a ferramenta contém.
- Taxa de remoção de material (TRM) [mm³/min] – É o volume de material retirado durante a usinagem por unidade de tempo.

- Tempo de corte(t_c) [min] - É o tempo onde o processo de usinagem ocorre, representando o tempo em que os movimentos de corte e avanço estão transcorrendo.
- Velocidade de avanço (v_f) [mm/volta] - É a velocidade instantânea do ponto de referência da ferramenta em relação ao avanço, de acordo com o sentido e direção de avanço.
- Velocidade de corte (v_c) [m/min] – É a velocidade instantânea tangencial do ponto de referência da ferramenta. Este parâmetro tem uma influência significativa na temperatura do processo devido ao impacto da aresta cortante e também devido à abrasão.

Na Figura 3, são apresentados os parâmetros como avanço por dente (f_z) e avanço de corte(f_c) no fresamento discordante.

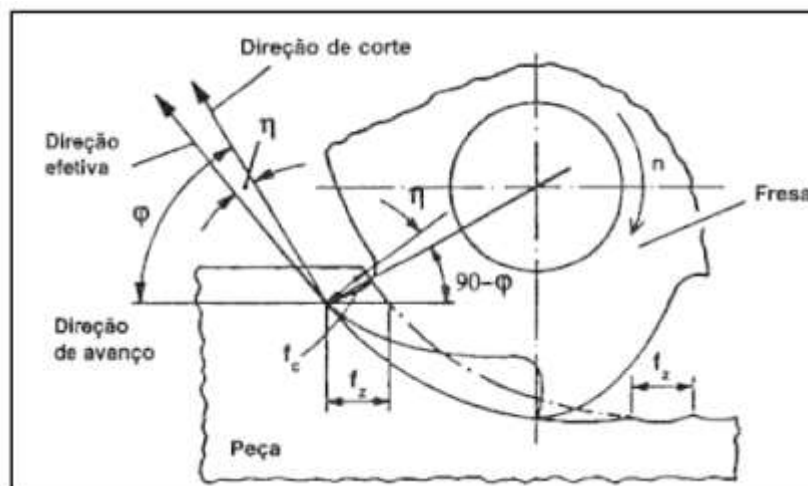


Figura 3 - Avanço por dente (f_z), avanço de corte(f_c) no fresamento discordante. (NBR 6162, 1989).

- Avanço por dente (f_z) [mm/dente] – é o trajeto de avanço por dente correspondente à distância entre duas superfícies em usinagem consecutivas, que é medido na direção do avanço.
- Avanço de corte (f_c) [mm] – Distância entre duas superfícies consecutivas, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de corte.

Na Figura 4 mostra os parâmetros de Profundidade de Corte(a_p), Penetração de Trabalho (a_e), Penetração de Avanço (a_f) no fresamento tangencial.

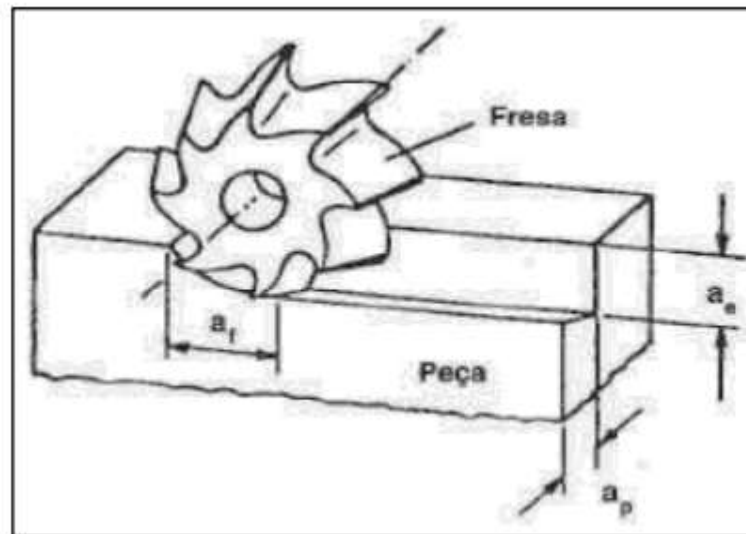


Figura 4 - Profundidade de Corte(a_p), penetração de trabalho (a_e), penetração de avanço (a_f) em fresamento tangencial. (NBR 6162, 1989).

- Profundidade de corte ou largura de corte (a_p) [mm] – Profundidade ou largura de penetração da ferramenta na peça. É medida perpendicularmente no plano de trabalho (direção do eixo da fresa).
- Penetração de avanço (a_f) [mm] – Profundidade de avanço medida a partir da penetração da ferramenta no plano de trabalho e na direção de avanço.
- Penetração de trabalho (a_e) [mm] – Penetração da ferramenta na peça, medida no plano de trabalho e na direção perpendicular à direção do plano de avanço.

2.5 Defeitos na ferramenta de corte

Durante o processo de usinagem, o contato ferramenta e peça gera vibrações, esforços mecânicos, altas temperaturas devido ao atrito, atrito dinâmico entre a ferramenta/peça e ferramenta/cavaco, gerando assim o fim da vida de corte da ferramenta. Alguns dos defeitos abaixo fazem com que a ferramenta perca sua eficiência. Estes fenômenos são:

- Deformação plástica - Devido a altas tensões no material, o mesmo sofre deformações irreversíveis, fazendo com que haja uma mudança na geometria da ferramenta de corte.
- Desgaste – Perda progressiva de material devido ao movimento relativo entre a superfície da peça e a ferramenta.

- Avaria – São falhas repentinas que acontecem na ferramenta podendo gerar lascas, trincas ou a quebra da ferramenta.

2.5.1 Mecanismos de Desgaste

O desgaste de uma ferramenta de metal duro é o resultado da ação de vários fenômenos distintos, denominados componentes do desgaste (FERRARESI,1977). Dependendo das propriedades do material usinado, das condições de usinagem e da ferramenta de corte, um tipo de desgaste predominará sobre outro.

Mecanismos como, difusão, abrasão ou *attrition*, atuam tanto isoladamente quanto em conjunto, gerando desgastes através de deformação plástica por cisalhamento, altas tensões de compressão ou entalhe (SALES e SANTOS, 2007). Na usinagem, os mecanismos mais predominantes geralmente são:

- Abrasão - É uma das principais causas de desgaste da ferramenta. O desgaste por abrasão ocorre quando há a perda de material através do contato de partículas duras que podem estar contidas no material da peça, ou da própria ferramenta. Este mecanismo pode ser considerado tanto “três corpos” quanto “dois corpos”.
- Aderência ou adesão: Geralmente ocorre a baixas velocidades de corte, nas quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. A aresta postiça de corte pode aparecer, e na sua presença o processo tem natureza menos contínua, principalmente se ela for instável. Sob tais condições, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface. (MACHADO et al., 2009).
- Difusão – A difusão é um fenômeno que acontece principalmente devido a altas temperaturas que consiste na passagem de átomos de um material para o outro. Na zona de corte da ferramenta, caso a temperatura esteja elevada, há possibilidade de a ferramenta fundir a peça.

Quando o material apresenta afinidade com o oxigênio, causa oxidação, onde é gerado um filme de óxido poroso sobre a ferramenta, onde é facilmente removido pelo atrito, gerando desgaste, principalmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nesta região. Alguns óxidos, como o de alumínio, são mais resistentes, assim alguns materiais que não contêm o mesmo desgastam-se mais facilmente (DINIZ, et al., 2013).

2.5.2 Formas de Desgaste

Devido ao contato físico dinâmico ferramenta/peça e ferramenta/cavaco na aresta de corte da ferramenta durante a usinagem, fará com que ela sofra mudanças geométricas ao

longo do tempo devido ao desgaste progressivo. Na ferramenta de corte, as formas de desgaste mais comuns são:

- Desgaste de flanco: Geralmente, é o principal fator a limitar a vida das ferramentas de corte. Decorre da perda do ângulo de folga da ferramenta, ocasionando um aumento da área de contato entre a superfície de folga e o material da peça, tornando maior o atrito naquela região (SALES e SANTOS,2007). Este desgaste é incentivado pelo aumento da velocidade de corte.
- Desgaste de cratera: Ocorre principalmente na superfície de saída da ferramenta, onde se localiza, durante o corte, a zona de deslizamento do cavaco. Este desgaste aparece geralmente em altas velocidades, quando há uma temperatura elevada, causando tanto desgaste por abrasão como difusão.
- Desgaste de entalhe: Não há evidências que explique exatamente o que provoca este desgaste. Ele ocorre, principalmente em materiais com elevado grau de encruamento e resistência a altas temperaturas.

2.6 Vida da ferramenta de corte

Pode-se definir a vida da ferramenta pelo tempo que ela consegue trabalhar com eficiência, sem a perda da sua capacidade de corte. A velocidade de corte é o parâmetro de maior influência no desgaste em uma ferramenta de corte de usinagem. Ela é diretamente responsável pelo aumento de temperatura na região de formação de cavacos, sendo esta, por si só, o que ativa ou acelera os mecanismos de desgaste apresentados até o momento (MACHADO et al. ,2009).

Segundo Sales e Santos (2007), o fim da vida da ferramenta de corte é determinado de acordo com o seu desgaste, que são dependentes de vários fatores. Alguns deles são:

- Receio de quebra da cunha cortante;
- Altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta;
- Elevado nível de ruído;
- Crescente nível de vibração;
- Aumento da força de usinagem;
- Acabamento da superfície fora da tolerância e não mais satisfatório;
- Outros

2.7 Lubrificação MQL

Um lubrificante funciona quando é introduzindo entre as superfícies de deslizamento de uma camada de material com uma resistência ao cisalhamento menor do que as próprias superfícies. Em alguns sistemas lubrificadas, o lubrificante pode não impedir completamente o contato da aspereza (HUTCHINGS,2003).

A técnica de MQL se baseia no princípio de utilização total de um óleo lubrificante sem resíduos; ou seja, com baixo fluxo do fluido de corte que é aplicado a elevadas pressões.

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

Segundo MACHADO et al (2000), para que a utilização de fluídos de corte seja minimizada, duas técnicas têm sido intensamente experimentadas: o corte completamente sem fluído (corte a seco) e o corte com mínima quantidade de refrigeração (MQL), pelo qual uma mínima quantidade de óleo é pulverizada em um fluxo de ar comprimido.

Porém, a utilização de MQL no processo de fresamento não é necessariamente a melhor opção, pois vai depender do tipo de sistema (aplicação interna ou externa), rugosidade superficial desejada, material da ferramenta, material usinado, dimensões da ferramenta, custo, entre outros (BRUNI, APOLITO, FORCELESE, et al,2004).

CAPÍTULO III

Procedimentos Experimentais

Este capítulo apresenta os equipamentos utilizados, ferramentas, materiais e a metodologia aplicada durante este trabalho.

3.1 Fresamento das placas de ferro fundido vermicular

A usinagem das placas de ferro fundido vermicular foram realizadas no Laboratório de Ensino e Pesquisa em usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). O processo de fresamento utilizado foi o faceamento.

3.1.1 Máquina Utilizada no processo

Para a realização dos ensaios de fresamento, foi utilizado um Centro de Usinagem Vertical Discovery 760 da marca ROMI (Fig. 5). A Tabela 2 mostra as especificações técnicas da máquina.



Figura 5 - Centro de Usinagem Vertical Discovery 760 utilizado para os ensaios de fresamento.

Tabela 2 : Especificações técnicas do Centro de Usinagem Discovery 760.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	DISCOVERY
Cabeçote vertical Cone da árvore	ISO 40
Faixa de velocidade (standart)	7 a 10.000 rpm
Peso admissível sobre a mesa (uniformemente distribuído)	900 kg
Trocador automático de ferramentas (standard) Capacidade do magazine de ferramentas	22 ferramentas
Diâmetro máximo da ferramenta	80 mm
Diâmetro máximo da ferramenta quando os alojamentos adjacentes estão vazios	160 mm
Comprimento máximo da ferramenta	254 mm
Peso máximo da ferramenta	6 kg
Potência instalada CNC Siemens Motor principal CA (30 min)	12,5 cv/ 9KW
Potência total instalada	15 KVA

Fonte: Manual Fornecido pelo fabricante ROMI

3.1.2 Ferramentas utilizadas no fresamento

Para os testes de fresamento, foram utilizadas ferramentas com material de base o metal duro com dois diferentes tipos de revestimentos, TiAlN – K10 na Fig.6 (a) e TiN – K20 na Fig. 6(b). As especificações técnicas das ferramentas estão de acordo com a Tab. 3.

Tabela 3 : Especificações técnicas das ferramentas revestidas por TiN e TiAlN.

Ferramenta	TiN - K20	TiAlN - K10
Diâmetro círculo Interno	19,05 [mm]	19,05 [mm]
Comprimento da aresta de corte	9,0 [mm]	9,0 [mm]
Quantidade de aresta de corte	14	14
Raio de Ponta	0,8 [mm]	0,8 [mm]
Espessura do inserto	6,35 [mm]	6,35 [mm]
Comprimento aresta alisadora	1,4 [mm]	1,4 [mm]
Classe de Tolerância	H	H

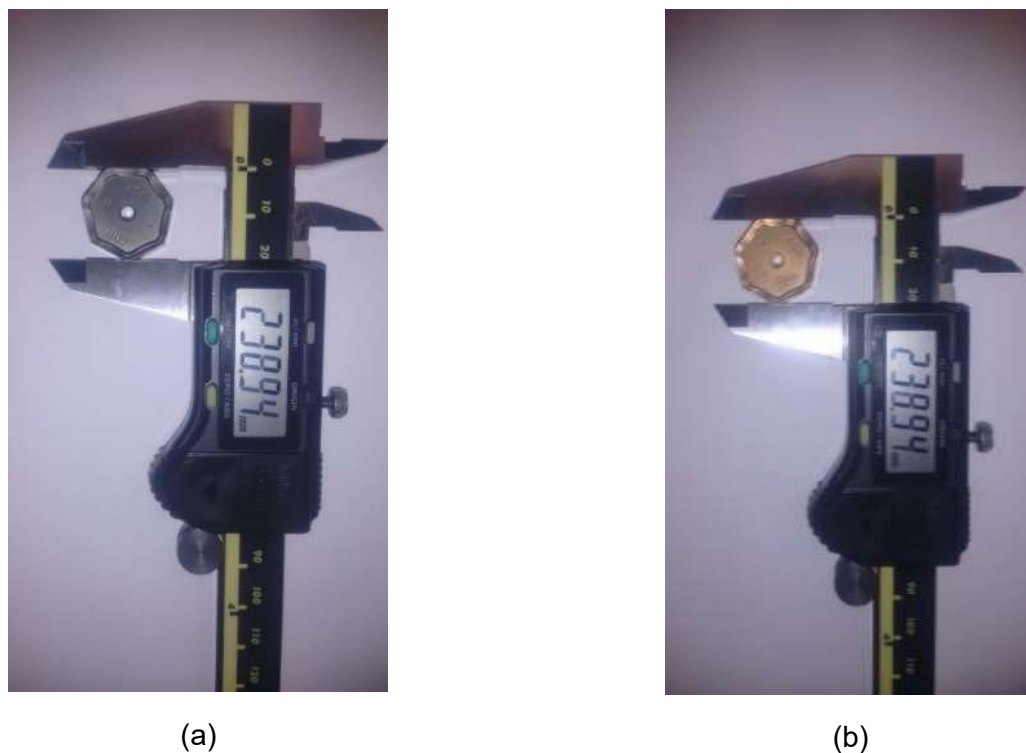


Figura 6 - (a) Ferramenta com revestimento TiAl utilizada no processo de fresamento; (b) Ferramenta com revestimento TiN utilizada no processo.

3.1.3 *Materiais usinados*

A dureza do material é um parâmetro relevante na usinagem. Para analisar a influência da dureza no processo, foram utilizados três tipos de ferro fundido vermicular com diferentes durezas (450, 500gr, 500grMo), conforme mostrado na Fig.7. Para analisar a influência do volume de material removido, em cada material, foi feito a usinagem em uma placa com superfície maciça de acordo com a Fig. 8(a) e em uma placa com superfície furada conforme a Fig. 8(b). No corpo de prova com superfície furada, havia furos de 10 mm de diâmetro com espaçamento de 2 mm. Todas as placas tinham dimensões iguais de 400 mm x 240 mm.

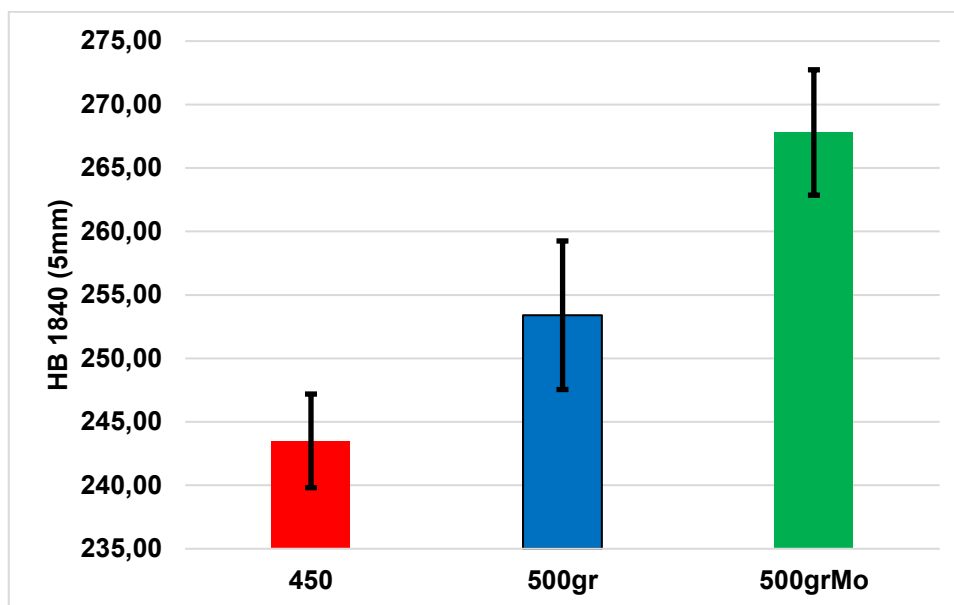
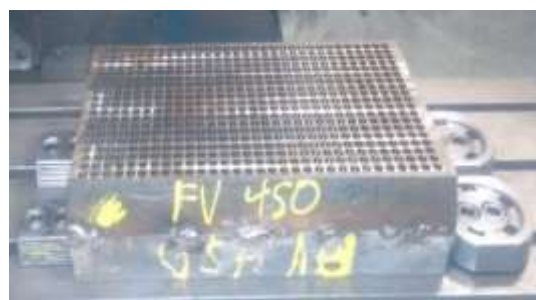


Figura 7 - Durezas dos respectivos materiais utilizados no processo de fresamento (FONTE: Da Silva et. al., 2018).



(a)



(b)

Figura 8 - (a) – Superfície maciça da placa; (b) Superfície furada da placa.

3.1.4 Fluido de corte utilizado no processo

Em alguns testes foi utilizado lubrificação MQL, o fluido utilizado como lubrificante foi o VASCOMILL MMS FA 2, com vazão de 50 mL/h a uma pressão de 5 bar.

3.2 Medição do desgaste da aresta de corte

Para medir o desgaste, foram obtidas imagens da aresta principal de corte pelo microscópio Olympus SZ61 (Fig. 9), medidos no *software* Stream Start. Para desgaste de flanco maiores que 0,3 mm trocava-se a aresta de corte.



Figura 9 - Microscópio Olympus SZ61 que foi utilizado para realizar as medições de desgaste.

3.3 Procedimento experimental

Antes de iniciar os testes de fresamento, para cada aresta de corte da ferramenta foi designado uma condição diferente. As condições foram divididas conforme a Tabela 4, realizando para o mesmo, três repetições, variando o revestimento da ferramenta, corpo de prova utilizado, sistema de lubrificação e tipo de ferro fundido vermicular, resultando em um total de 72 testes. Para cada teste foi utilizado um único dente.

Tabela 4 : Condições utilizadas no processo de fresamento.

Revestimento	Corpo de Prova	Lubrificação	Ferro Vermicular
TiN – K20	Maciço	MQL	450
TiNAl – K10	Furado	Seco	500gr 500grMo

Durante os testes, a cada 400 mm de percurso da ferramenta uma foto era tirada pelo microscópio para medir o desgaste. O critério de fim de vida para a ferramenta foi estabelecido de acordo com a norma ISO 8688. Nas ferramentas onde o desgaste não atingiu 0,3 mm foi estabelecido um percurso de avanço de 4,8 m/aresta de corte. Com o resultado das medições,

para os parâmetros que variaram (revestimento, tipo de ferro fundido vermicular, sistema lubri-refrigerante, corpo de prova), utilizou-se o *software* ANOVA® para fazer a análise de variância com uma confiabilidade de 95 %, a fim de se obter uma confiabilidade estatística nos resultados e também determinar quais foram os parâmetros mais importantes no teste . Além dos parâmetros variados, os demais parâmetros utilizados no experimento estão indicados de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 : Parâmetros de corte utilizados nos testes de fresamento.

Velocidade de Corte	300 [m/min]
Avanço	0,2 [m/rev]
Profundidade de Corte	1 [mm]
Critério de fim de vida	Desgaste de flanco máximo de 0,3 [mm] ou percurso de 4,8 [m] usinados
Vazão para testes com MQL	50 [ml/h]
Pressão para testes com MQL	5 [Bar]
Sistema de Lubrificação	Seco/ MQL
Tipo de Ferro Fundido Vermicular	450/ 500gr/ 500grMo
Corpo de Prova	Maciça/ Furada
Tipo de Revestimento	TiN- K20/ TiNAI-K10

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta todos os resultados obtidos, assim como discussões e análises.

4.1 Análise da influência dos parâmetros

Para analisar as influências dos parâmetros utilizados no processo de fresamento, foi utilizado o *software* ANOVA®. Os parâmetros relevantes estão demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros relevantes no processo de fresamento (parâmetro p inferior a 0,05 é considerado estatisticamente relevante).

Ordem	Parâmetros	p
1ª	Material	0,011042
2ª	Revestimento	0,027486
3ª	Corpo de Prova	0,031810
4ª	Lubrificação	0,046384

A coluna escrita em vermelho indica os valores de “p”. Para $p > 0,05$ significa que o parâmetro não é estatisticamente significativo em uma confiabilidade de 95 %. Vale ressaltar que, quanto menor o valor de “p”, mais relevante é a variável. Ao analisar a Tabela 5, pode-se perceber que o parâmetro com a menor importância é a de lubrificação que apresentou um valor de $p = 0,046384$. Uma hipótese seria que o grafite do próprio material já age como lubrificante, agindo como redutor do coeficiente de atrito e dos esforços de cisalhamento. Observa-se que o parâmetro mais relevante foi o material da placa, devido as forças que são

necessárias para usinar o material, que contém uma dureza relativamente elevada em relação a outros ferros fundidos.

4.2 Análise da dureza

De acordo com a média dos testes para ambas as ferramentas, foi obtido que dos ferros vermiculares testados, os que tiveram uma maior dureza apresentaram maior desgaste da ferramenta. Em materiais mais duros houve um maior desgaste máximo ($VB_{b\text{máx}}$) na aresta de corte da ferramenta (Fig. 10) assim como um menor tempo de usinagem. Pode-se dizer que isto ocorreu devido às forças necessárias para usinar o material e pela alta temperatura atingida na interface cavaco-ferramenta durante a usinagem.

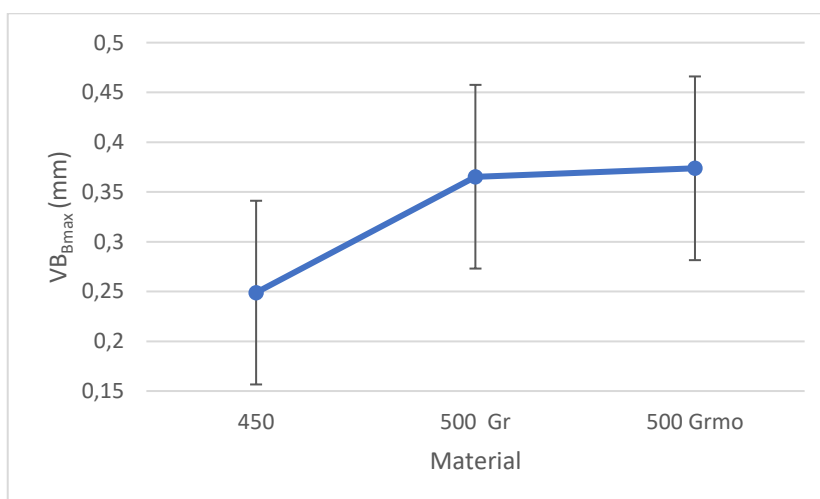


Figura 10 - Comparação do desgaste máximo em relação ao material usinado.

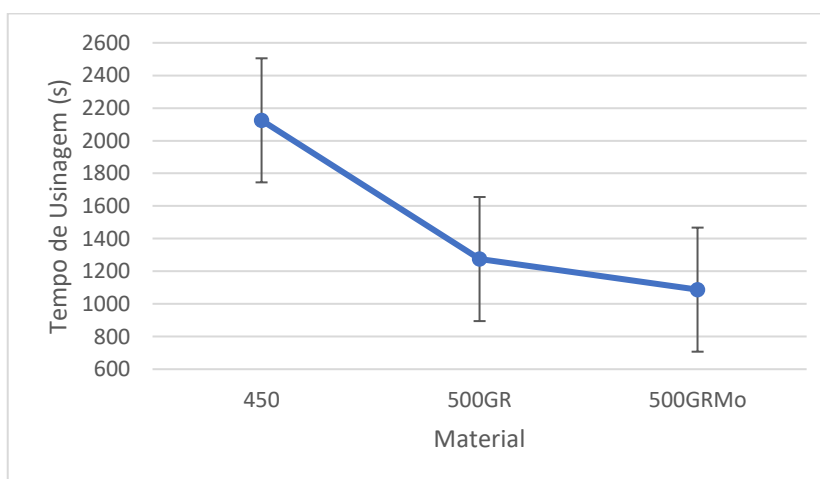


Figura 11 - Tempo de usinagem (s) x Material usinado.

4.3 Análise das superfícies furadas/maciças das placas

De acordo com os resultados obtidos para as superfícies das placas, pode-se observar por meio da Fig. 12 que a placa maciça apresentou uma pior usinabilidade do que a placa furada, pois na placa maciça, há um volume de material maior a ser retirado, resultando em maiores esforços na ferramenta. Aliado a isto, a placa com diversos furos torna o ciclo entre o tempo ativo e inativo praticamente iguais, ou seja, exigindo melhor tenacidade do material da ferramenta, assim como melhor coesão entre revestimento e substrato. Por outro lado, o efeito de elevação e redução de temperatura, e do gradiente térmico, tende a ser melhor na placa furada.

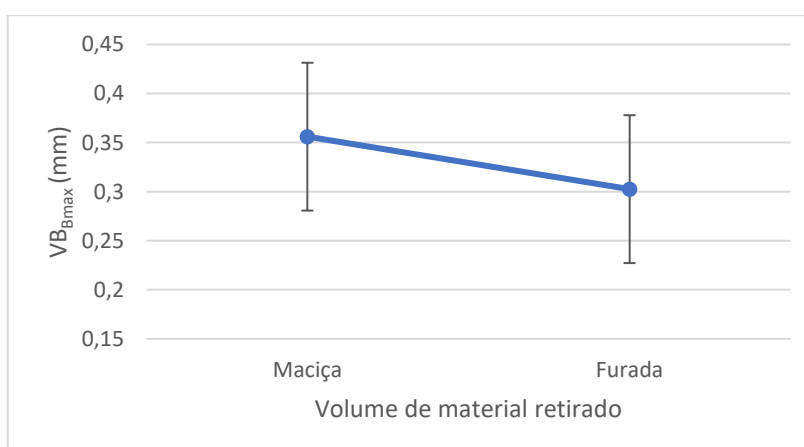


Figura 12 - Volume de material retirado x Desgaste máximo.

Em relação a vida, pode-se dizer que as ferramentas tiveram uma vida maior na usinagem das placas furadas de acordo com a Fig. 13, que mostra o gráfico de tempo de usinagem em relação ao volume de material removido durante o fresamento das placas. Outro fator que pode contribuir com esse comportamento é atribuído ao possível gradiente térmico gerado no corte da placa furada, menor do que o da placa contínua e conseqüentemente menores oscilações de deformações e tensões na cunha cortante. Isso pode reduzir a nucleação e propagação de trincas de origem térmica.

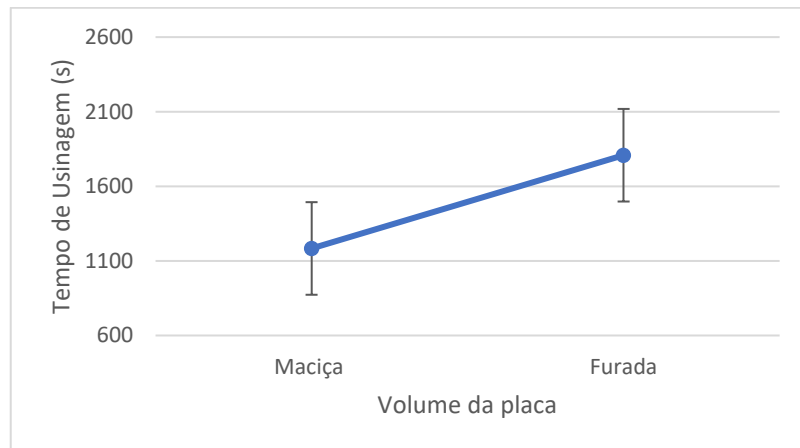


Figura 13 - Tempo de usinagem x Volume da placa.

4.4 Análise dos revestimentos

Em testes onde ambas as ferramentas cumpriram todo o percurso sem atingir o fim de vida, as revestidas por TiN apresentaram menores desgastes de flanco. Porém, em alguns testes, houve casos em que o revestimento se descolou durante o percurso de fresamento, resultando em um desgaste elevado no percurso seguinte pois, a dureza do revestimento é maior do que a dureza da própria ferramenta. A Fig. 14(a) mostra o descolamento do revestimento na aresta de corte da ferramenta durante o primeiro percurso de usinagem em um teste com as seguintes condições: seco, material 500gr, superfície maciça da placa. E a Fig. 14(b) representa a aresta de corte do mesmo teste no percurso seguinte, onde foi totalmente desgastada. Uma hipótese para o descolamento do revestimento pode ser a limpeza incorreta do material antes da sua deposição do próprio revestimento.

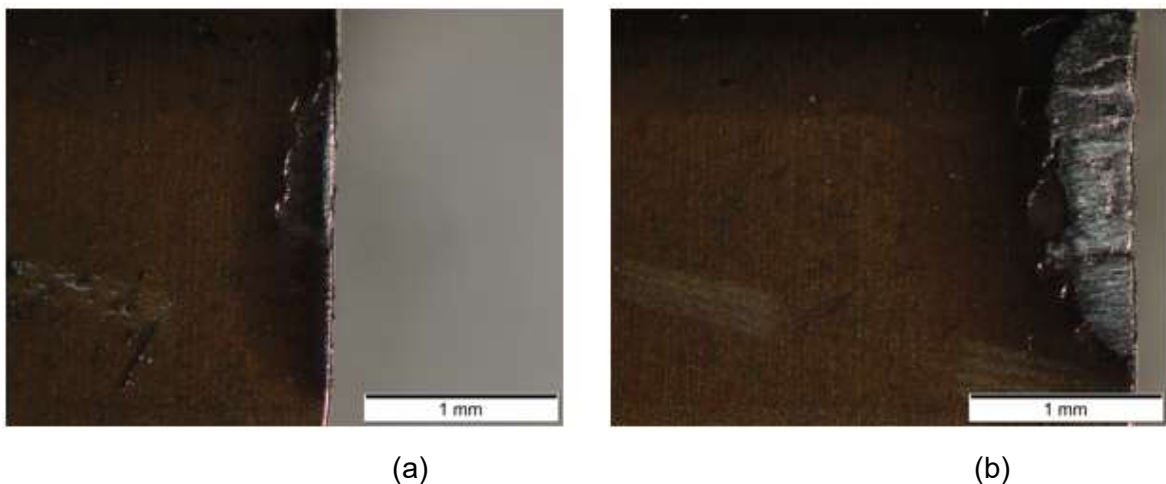


Figura 14 – (a) Deslocamento do revestimento de TiN durante o percurso de fresamento; (b) Desgaste excessivo após o percurso seguinte.

Para o tempo de usinagem, as ferramentas revestidas de TiAl apresentaram um tempo de usinagem de 42,59 % maiores do que as ferramentas revestidas de TiN, uma hipótese para essa diferença pode ser devido ao descolamento do revestimento da ferramenta TiN que aconteceu em alguns testes com várias condições de usinagem diferentes.

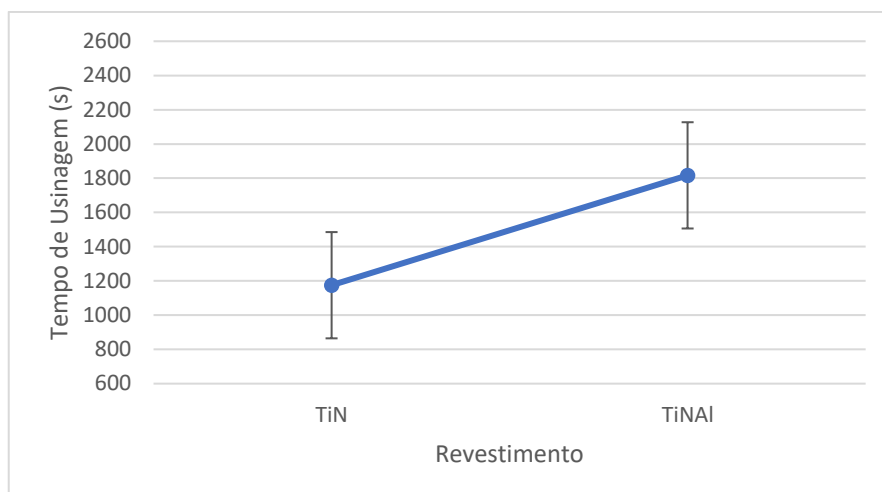


Figura 15 - Tempo de usinagem x Revestimento do material.

Nas ferramentas revestidas por TiN, o desgaste máximo foi maior pois (Fig. 16), como teve alguns descolamentos do revestimento, houve um contato maior do próprio material da ferramenta com a peça a ser usinada.

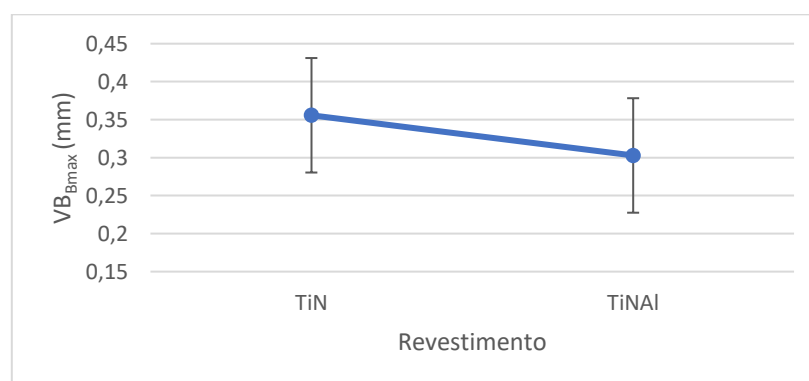


Figura 16 - Desgaste máximo de flanco x Revestimento.

4.5 Análise das condições seco / MQL

Nos testes realizados, para ambas as ferramentas revestidas, os que utilizaram MQL obteve um melhor resultado do que os testes que foram feitos a seco. Foi observado que ao

utilizar lubrificação MQL, às ferramentas tiveram uma vida média de 27 % (Fig. 17) maior do que as ferramentas que foram submetidas nos testes a seco.

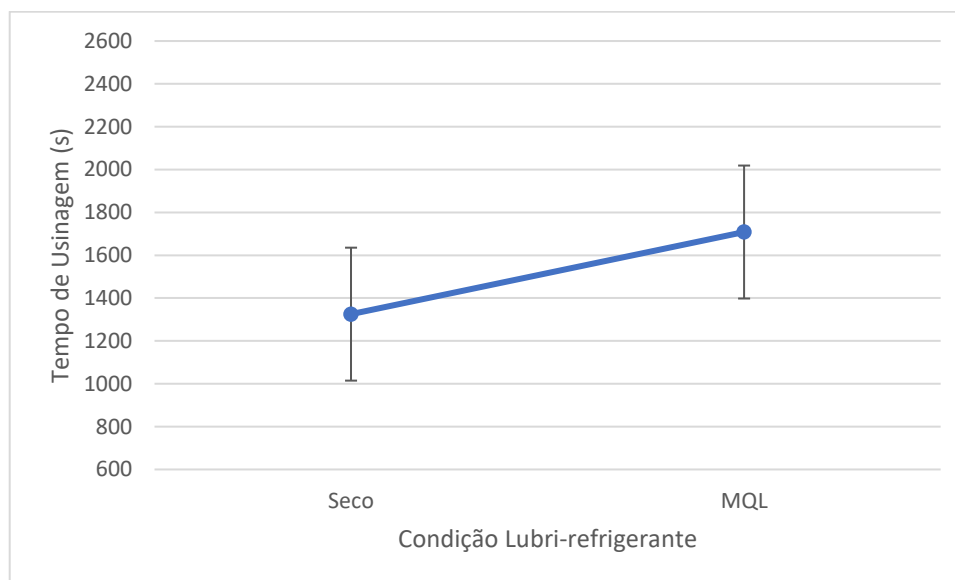


Figura 17 - Tempo de usinagem x Condição lubri-refrigerante.

Ao analisar a curva do desgaste máximo x condição lubri-refrigerante (Fig. 18), foi possível notar que, ao utilizar lubrificação MQL acarretou em um desgaste máximo de 40 % menor na aresta de corte. Pode-se dizer que a diferença é mais perceptível pois o MQL gera menor atrito e com isso menor desgaste máximo de flanco o que pode comprovar a hipótese amplamente discutida na literatura (SALES e SANTOS, 2007; MACHADO et. al. , 2009) de que o fluido de corte pode acessar a zona de escorregamento na interface cavaco-ferramenta e reduzindo o coeficiente de atrito dinâmico no processo de corte, aumentando a vida da ferramenta. Esta influência se torna ainda mais pronunciada com o aumento da lubricidade do fluido de corte.

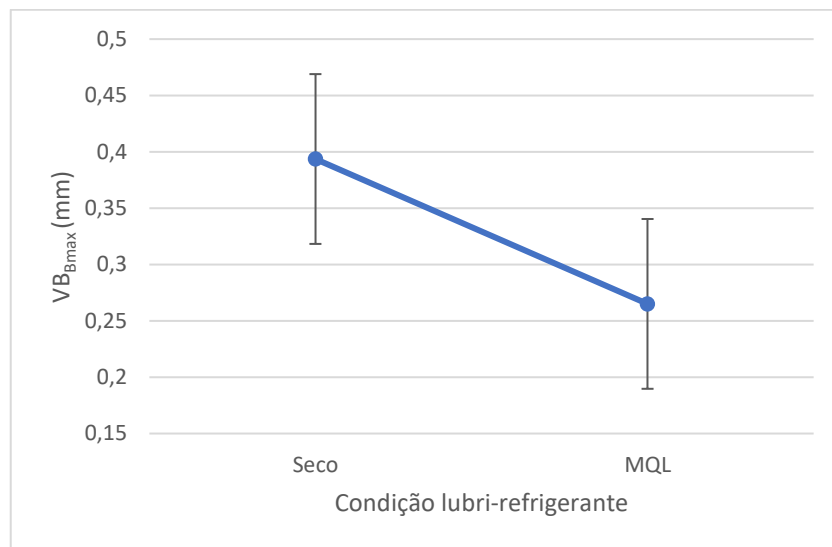


Figura 18 - Desgaste máximo da ferramenta x Condição lubri-refrigerante.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Com as condições analisadas para o fresamento das ferramentas TiN e TiAl pode-se chegar as seguintes conclusões:

- Em geral, as ferramentas TiAl obteve melhores resultado pois a TiN apresentou vários descolamentos do revestimento.
- A utilização da lubrificação MQL para essas condições, provou ser muito eficaz pois, houve um ganho médio do tempo de usinagem em 27 %. Além de reduzir em 40 % o desgaste máximo da aresta de corte, quando comparado aos testes secos.
- Quanto mais duro foi o material usinado, menor foi a vida da ferramenta, conseqüentemente, mais rápido foi o desgaste da aresta de corte da ferramenta.
- Para volumes maiores de material retirado, obteve-se um maior desgaste na aresta de corte da ferramenta.
- Os furos resultam em menos material para ser usinado, a tenacidade das ferramentas foi suficiente para resistir aos choques.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para um melhor entendimento do comportamento das ferramentas, algumas sugestões são:

- Com as mesmas condições de lubrificação e corte, fazer testes em materiais diferentes como: ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular.

- Realizar testes variando a vazão na lubrificação MQL.
- Utilizar condições de corte menos severas em relação as utilizadas neste trabalho.
- Realizar testes com ferramentas sem revestimento.

Capítulo VI

Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT – **Conceitos da Técnica de Usinagem – Movimentos e Relações Geométricas** , NBR 6162.

BRUNI, C.; d'APOLITO; FORCELLESE, A.; GABRIELLI, F.; SIMONCINI, M. **Surface roughness modelling in finish face milling under MQL and dry cutting conditions.** Ancona, Italy, 2004.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamento térmico, principais tipos.** 7. ed. ampl. e rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2005.

D. G. UNFALLVERSICHERUNG, **Minimum quantity lubrication for machining operations**, 2010.

DA SILVA, L. R. R., AND H. L. COSTA. "**Maskless Electrochemical Texturing of Automotive Cylinders.**" **Materials Performance and Characterization** 6.2 (2017): 96-111.

DA SILVA, L. R. R., AND H. L. COSTA. "**Tribological behavior of gray cast iron textured by maskless electrochemical texturing.**" **Wear** 376 (2017): 1601-1610.

DA SILVA, L.R.R., FAVERO, A. F., COSTA, E.S., PICO, D.F.M., SALES, W.F., GUESSER, W.L. AND MACHADO, A.R. **Cutting Temperatures in End Milling of Compacted Graphite Irons. *Procedia Manufacturing*** (2018), 26, pp.474-484.

DA SILVA, R. B., LIMA, M. L. S., PEREIRA, M. F., ABRÃO, B. S., DA SILVA, L. R. R., BIANCHI, E. C., & MACHADO, A. R. **"A surface and sub-surface quality evaluation of three cast iron grades after grinding under various cutting conditions."** *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 99.5-8 (2018): 1839-1852.

DAWSON, S. **Propriedades Operacionais do Ferro Fundido Vermicular (CGI): Feedback de Programas de Testes em Andamento.** Publicação Sintercast, Tradução para Português, 1995.

DAWSON, S., 1993, **The SinterCast Process and Compacted Graphited Iron**, International Conference on Latest and Best in Melting and Metal Treatment in Ferrous and Non-Ferrous Foundries, Coventry, England, 7p.

DAWSON, S.; SCHROEDER, T. **Compacted graphite iron: a viable alternative.** Crystal Lake: Engineered Casting Solutions AFS Spring, 2000.

DINIZ, A. E.; MARCONDES F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 8. Ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2013. 272 p.

DROZDA, T. J.; WICK, C. **Tool and manufacturing engineer's handbook – Machining**, n. 4. v.1. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1983. p. 1.1- 1.66, p. 10.1-10.76.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** 5 ed. São Paulo: Blucher, 1977.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing. Materials, processes, and systems.** New Jersey: Ed. John Wiley & Sons, 2002.

HUTCHINGS, I.M., 2003, **Tribology: Friction and wear of Engineering Materials**, Butterworth-Heinemann, p. 95.

ISO 8688-1, 1989. **Tool life testing in milling – Part 1 : Face milling**.

JUNIOR, E. M.; GUESSER, W. L. **Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular através de ensaios de furação**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., 2011, Caxias do Sul. Anais... Caxias do Sul: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2011.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M ; COELHO, R. T ; da Silva, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1 ed. São Paulo – SP : Edgard Blucher, 2009. v. 1. 77p.

MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. **Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de corte**, In: Congresso Usinagem 2000, São Paulo – SP, 2000.

SALES, W.F; SANTOS, S. C. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Artliber, 2007. 246 p.

SANDVIK, 2005, **Manual Técnico de Usinagem – Torneamento – Fresamento – Furação – Mandrilamento – Sistemas de Fixação**. Publicação da Sandvik Coromant, Brasil.

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

WEINGAERTNER, Walter Lindolfo; SCHROETER, R.B. **Introdução aos Processos de Usinagem: parte 1**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. 352 p. Apostila.

XAVIER, F. A., 2003. **Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 153 pp.