

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E
ENGENHARIAS**

LEANDRO FELIPE VIGANÓ

**ANÁLISE DO DESGASTE DE INSERTOS DE METAL-DURO NA USINAGEM DE
FERRO FUNDIDO NODULAR**

CAXIAS DO SUL

2021

LEANDRO FELIPE VIGANÓ

**ANÁLISE DO DESGASTE DE INSERTOS DE METAL-DURO NA USINAGEM DE
FERRO FUNDIDO NODULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul, como requisito
parcial à obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico.

Orientador Prof. Dr. Eng^o. Rodrigo Panosso
Zeilmann.

CAXIAS DO SUL

2021

LEANDRO FELIPE VIGANÓ

**ANÁLISE DO DESGASTE DE INSERTOS DE METAL-DURO NA USINAGEM DE
FERRO FUNDIDO NODULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul, como requisito
parcial à obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico.

Aprovado em 10 de dezembro de 2021

Banca Examinadora

Prof. Orientador Dr. Eng. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Avaliador Dr. Eng. Marcos Alexandre Luciano
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Avaliador Dr. Eng. Leandro Luís Corso
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho aos meus pais, Roberto Viganó e Vanir Bonatto Viganó e também à toda minha família por sempre estarem presentes durante toda a graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e pela oportunidade dada para realização desta jornada.

A minha família, por toda educação, compreensão e sempre me apoiarem nos momentos de dificuldades.

A empresa Castertech Fundação e Tecnologia, e aos colegas de trabalho, pelo apoio e incentivo para realização deste trabalho e meu desenvolvimento profissional.

Aos professores da Universidade de Caxias do Sul, por todo o conhecimento, incentivo e oportunidade no decorrer desta caminhada, em particular ao Professor Dr. Engº. Rodrigo Panosso Zeilmann pela dedicação e orientação deste trabalho.

A todos os colegas e amigos que direta ou indiretamente me ajudaram e também incentivaram.

Agradeço também, de modo especial, à minha noiva, Caroline, que está ao meu lado em todos os momentos, me apoiando e incentivando a concluir a graduação.

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica, abordou o desgaste nas ferramentas de corte utilizadas no processo de fresamento de suportes em ferro fundido nodular. Como forma de mensuração, foi avaliado o desgaste das ferramentas de corte, tendo como base a quantidade de peças usinadas. Os ensaios de usinagem foram realizados em um centro de usinagem horizontal, avaliando três diferentes ferramentas de corte. O processo de usinagem manteve os mesmos parâmetros de corte e sempre utilizando fluido lubrificante, para assim ter uma comparação entre as diferentes ferramentas. O desgaste das ferramentas foi avaliado através de um microscópio trinocular estéreo, e foi possível observar que o mecanismo de desgaste de abrasão na superfície de flanco foi predominante. Afim de aumentar a quantidade de peças produzidas por gume, e conhecer os mecanismos de desgaste das ferramentas, o presente estudo apresenta uma revisão bibliográfica e contribuições de outros trabalhos para o tema. Após o término dos ensaios, identificou-se que a ferramenta SNMU apresentou aumento na quantidade média de peças usinadas por gume duas vezes maior que o processo inicial, redução de custo em aproximadamente dez vezes, e ainda um menor desgaste de flanco.

Palavras-chave: Usinagem, fresamento com fluido lubrificante, insertos, mecanismos de desgaste de ferramenta, ferro fundido nodular.

ABSTRACT

This Mechanical Engineering course conclusion work approached the tool wear on cutting tools used in nodular cast iron brackets milling. As a way of measuring, the tool wear of the cutting tools was evaluated, based on the number of machined parts. The machining tests were carried out on a horizontal machining center, evaluating three different cutting tools. The machining process kept the same cutting parameters and always using lubrication fluid, in order to have a comparison between the different tools. The tool wear was evaluated using a stereo trinocular microscope, and it was possible to observe that the tool wear mechanism of flank surface abrasion was predominant. In order to increase the amount of produced parts for each cutting edge, and to know the tool wear mechanisms, this study presents a literature review and contributions from other works for the subject. After the end of the tests, it was identified that the SNMU tool increase the average number of machined parts per cutting edge twice as high as the initial process, a cost reduction approximately ten times smaller than the initial process, and even less flank wear.

Key words: Machining, milling with lubricating fluid, carbide inserts, tool wear mechanisms, nodular cast iron.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Suporte fundido código 1368, usinado na CSF..... | 15 |
| Figura 2 – Produtos fundidos, usinados e montados pela Castertech..... | 17 |
| Figura 3 – Alguns dos mais importantes e típicos processos de usinagem..... | 20 |
| Figura 4 – Tipos de fresamento..... | 21 |
| Figura 5 – Ferramentas de corte de metal-duro..... | 23 |
| Figura 6 – Codificação dos insertos de metal-duro..... | 24 |
| Figura 7 – Classificação das ferramentas de corte de geometria definida..... | 26 |
| Figura 8 – Fresamento concordante e fresamento discordante..... | 28 |
| Figura 9 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta em função do tempo de corte..... | 29 |
| Figura 10 – Principais áreas de desgaste nas ferramentas de corte..... | 31 |
| Figura 11 – Tipos de desgaste das ferramentas de corte..... | 31 |
| Figura 12 – Classificação da forma do cavaco..... | 34 |
| Figura 13 – Diagrama de equilíbrio Fe-C..... | 35 |
| Figura 14 – Classificação da forma da grafita nos ferros fundidos..... | 37 |
| Figura 15 – Regiões usinadas no suporte 1368, em destaque..... | 38 |
| Figura 16 – Centro de usinagem horizontal Okuma MA-400HA..... | 40 |
| Figura 17 – Dispositivo hidráulico para fixação dos suportes na usinagem..... | 40 |
| Figura 18 – Microscópio trinocular estéreo..... | 41 |
| Figura 19 – Microscópio metalográfico Olympus GX51..... | 41 |
| Figura 20 – Durômetro Heckert WPM..... | 42 |
| Figura 21 – Equipamento de espectro Spectromaxx..... | 42 |
| Figura 22 – Máquina de pré-ajuste de ferramentas Zoller..... | 43 |
| Figura 23 – Ferramentas de corte avaliadas..... | 44 |
| Figura 24 – Adaptadores para fresas de disco..... | 45 |
| Figura 25 – Fresa disco diâmetro 160mm para 14 insertos LNKT, com sistema de fixação furo <i>arbor</i> , e diâmetro interno de 40mm..... | 45 |
| Figura 26 – Fresa disco diâmetro 160mm para 12 insertos 335, com sistema de fixação furo <i>arbor</i> , e diâmetro interno de 40mm..... | 45 |
| Figura 27 – Fresa disco diâmetro 160mm para 12 insertos SNMU, com sistema de fixação <i>arbor</i> porta fresa, e diâmetro interno de 27mm..... | 46 |
| Figura 28 – Fluxograma da execução do procedimento experimental..... | 47 |
| Figura 29 – Microestrutura na amostra do suporte 1368..... | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 30 – Desgaste inserto 335 na amostra 1, com ampliação 30x..... | 52 |
| Figura 31 – Desgaste inserto LNKT na amostra 1, com ampliação 30x..... | 53 |
| Figura 32 – Desgaste inserto SNMU (amostra 4), com ampliação 30x | 53 |
| Figura 33 – Gráfico comparativo do desgaste das ferramentas de corte analisadas..... | 54 |
| Figura 34 – Gráfico comparativo do custo dos gumes (a) e custo por peça (b) | 56 |
| Figura 35 – Geometria das ferramentas de corte..... | 56 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 – Faixa de composição de ferros fundidos típicos comuns | 36 |
| Quadro 2 – Resultado da microestrutura do fundido..... | 49 |
| Quadro 3 – Resultado da composição química do fundido | 50 |
| Quadro 4 – Resultado das propriedades mecânicas do fundido | 50 |
| Quadro 5 – Comparativo de custo das ferramentas em função da vida útil | 55 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Composição química do suporte 1368..... | 39 |
| Tabela 2 – Propriedades mecânicas e dureza Brinell do suporte 1368 | 39 |
| Tabela 3 – Especificações das ferramentas de corte..... | 43 |
| Tabela 4 – Dados desgaste das ferramentas de corte analisadas | 51 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------------------------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| Al ₂ O ₃ | Óxido de alumínio |
| ANFIR | Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários |
| APC | Aresta postiça de corte |
| CSF | Célula de Suportes Fundidos |
| CVD | <i>Chemical Vapour Deposition</i> |
| DIN | <i>Deutsches Institut für Normung</i> |
| Fe-C | Ferro-Carbono |
| FLR | Fluido lubrificarrefrigerante |
| HB | Dureza Brinell |
| HRC | Dureza Rockwell |
| IATF | <i>International Automotive Task Force</i> |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| MQL | Mínima quantidade de lubrificante |
| OHSAS | <i>Occupational Health and Safety Assessment Series</i> |
| PC | Plano de Controle |
| PVD | <i>Physical Vapour Deposition</i> |
| Ra | Desvio aritmético médio |
| Rq | Desvio médio quadrático |
| Rt | Altura total do perfil |
| Rz | Altura máxima do perfil |
| SAE | <i>Society of Automotive Engineers</i> |
| TiAlN | Nitreto de titânio-alumínio |
| TiC | Carboneto de titânio |
| TiCN | Carbonitreto de titânio |
| TiN | Nitreto de titânio |
| WE | <i>Wheel End</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 15 |
| 1.2 | AMBIENTE DE TRABALHO..... | 16 |
| 1.3 | OBJETIVOS | 18 |
| 1.3.1 | Objetivo geral..... | 18 |
| 1.3.2 | Objetivos específicos | 18 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 19 |
| 2.1 | USINAGEM | 19 |
| 2.1.1 | Fresamento | 20 |
| 2.1.1.1 | Fresamento com fluido lubrificante..... | 21 |
| 2.1.2 | Ferramentas de Corte..... | 22 |
| 2.1.2.1 | Fabricação e Materiais das Ferramentas de corte | 24 |
| 2.1.3 | Parâmetros de corte..... | 26 |
| 2.1.4 | Direção de corte | 27 |
| 2.2 | USINABILIDADE | 28 |
| 2.2.1 | Estimativa de vida útil das Ferramentas de corte | 29 |
| 2.2.2 | Mecanismos causadores de desgaste das Ferramentas de corte..... | 30 |
| 2.2.3 | Formas e tipos de cavaco..... | 33 |
| 2.3 | FERRO FUNDIDO | 35 |
| 2.3.1 | Ferro Fundido Nodular | 36 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 38 |
| 3.1 | MATERIAL..... | 38 |
| 3.2 | MÁQUINA E EQUIPAMENTOS | 39 |
| 3.3 | FERRAMENTAS DE CORTE..... | 43 |
| 3.4 | PARÂMETROS DE CORTE | 46 |
| 3.5 | FLUIDO LUBRIFICANTE | 46 |
| 3.6 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 47 |
| 3.6.1 | Avaliação da vida útil e desgastes das ferramentas | 48 |
| 3.7 | ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS | 48 |

| | | |
|-----|---|-----------|
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 49 |
| 4.1 | ANÁLISE DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS E MECÂNICAS | 49 |
| 4.2 | ANÁLISE DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE | 51 |
| 4.3 | ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA | 55 |
| 5 | CONCLUSÃO | 57 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 58 |
| | APÊNDICE A – TABELA COLETA DE DADOS | 61 |
| | APÊNDICE B – FOTOS DESGASTE DOS INSERTOS | 61 |

1 INTRODUÇÃO

Diariamente são utilizados objetos de diversas formas e dimensões, que possuem materiais e processos de fabricação diferentes. Segundo Sandvik (2021), a indústria de usinagem produz uma diversidade muito vasta de peças usinadas em materiais distintos, onde cada material tem suas características exclusivas.

O ferro fundido nodular caracteriza-se pela ductilidade, tenacidade e resistência mecânica, apresentando uma usinabilidade muito boa, comparável à do ferro fundido cinzento (CHIAVERINI, 1986).

Os processos de usinagem tiveram um progresso significativo com o passar do tempo, aprimorando técnicas, máquinas-ferramentas e materiais de ferramentas. Na área metalmeccânica, o processo de fabricação com remoção de cavaco com ferramentas de geometria de corte definida, são os principais processos de fabricação, devido aos grandes volumes de materiais que podem ser removidos por unidade de tempo, e à grande flexibilidade destes processos (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

De acordo com Ferraresi (1969), o fresamento é um processo mecânico de usinagem para obtenção de superfícies quaisquer, utilizando ferramentas multicortantes. Desta forma, é possível obter tanto peças prontas, quanto moldes ou ferramentas utilizadas em outros processos de fabricação, como estampagem em prensas ou injeção de materiais poliméricos em injetoras.

Essas ferramentas possuem uma vida útil, e, desde aproximadamente 1968, os metais-duros são revestidos com materiais duros para obter um aumento da sua resistência ao desgaste e conseqüentemente da sua produtividade. Este revestimento de material duro, tem a tarefa de proteger o material da ferramenta durante o processo de usinagem, reduzindo assim o desgaste da ferramenta que é formado por processos de adesão, abrasão, difusão e oxidação na superfície do material de corte, conforme será apresentado no próximo capítulo (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

A análise e escolha da ferramenta de corte à ser utilizada, leva em conta uma série de fatores, dentre eles, o material a ser usinado, condições da máquina operatriz, processo de usinagem, forma e dimensões da ferramenta, custo do material da ferramenta, condições de usinagem, além de características do material da ferramenta, como alta dureza a quente para suportar as tensões do corte, resistência ao desgaste, tenacidade e estabilidade química (DINIZ et. al.,1999). O estudo do desgaste das ferramentas de corte, permite a obtenção de dados precisos da ferramenta, para então otimizar os dados de corte, e auxiliar positivamente no processo de usinagem e redução de custos (SANDVIK, 2021).

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o emplacamento de reboques e semirreboques apresentando aumento de 6,16% no ano de 2020 comparado ao ano de 2019 (ANFIR, janeiro de 2021), e aumento de 47,22% nos meses de janeiro e fevereiro de 2021 comparado ao mesmo período de 2020 (ANFIR, março de 2021), se faz necessário a otimização e melhoria dos processos de fabricação.

No presente trabalho foram avaliados a vida útil e o desgaste de insertos para usinagem de suportes fabricados em ferro fundido nodular, podendo assim, obter melhor qualidade das peças e melhor aproveitamento das arestas de corte, bem como a redução de custo com os insumos de usinagem, e ainda, um ganho de produtividade.

Para satisfazer exigências de aumento de demanda, apresentado no mercado de implementos rodoviários, evidenciado no início do ano de 2021, König e Klocke (1997), descrevem que além da otimização dos materiais de corte, as ferramentas de usinagem devem ser utilizadas de forma econômica. Assim, as variáveis do processo de usinagem, como a geometria da ferramenta de corte, condições de corte, material da peça e materiais auxiliares, tenham a sua influência e seu efeito sobre o resultado do trabalho considerado.

O suporte 1368 (Figura 1) é usinado na Célula de Suportes Fundidos (CSF), e, é montado em uma alta gama de implementos rodoviários, visto que são montados 2 suportes para cada eixo, e que em geral, cada implemento possui 3 eixos (Randon Implementos, 2021).

Figura 1 – Suporte fundido código 1368, usinado na CSF



Fonte: O autor (2021) – Escala 1:2

Devido ao suporte fundido código 1368 ser uma peça com alto volume de produção, possuindo demanda média de 10.000 peças por mês, este é manufaturado de forma intermitente, e com baixo índice de *set-up*. Ainda, conta com tempo de ciclo de usinagem de 5 minutos por peça.

Para o processo de usinagem do suporte 1368, é utilizado uma ferramenta de corte, com 12 alojamentos para insertos, sendo que, com um gume de cada inserto, é obtido uma produção de 25 peças em média.

Com base nos dados apresentados foi definido esta peça da CSF, para realizar as análises apresentadas nos próximos capítulos.

1.2 AMBIENTE DE TRABALHO

De forma a delimitar o que se pretende alcançar com a realização deste trabalho, o mesmo foi desenvolvido na empresa Castertech Fundição e Tecnologia Ltda., no setor de Engenharia de Processos. Tal setor, é responsável pelo desenvolvimento, adequação e melhoria dos processos produtivos, e também atuando como suporte técnico nas atividades diárias da manufatura, tanto nos processos já definidos, quanto em criação de novos processos ou peças.

Em função do assunto analisado neste relatório, parte do processo de acompanhamento foi realizado no setor de usinagem da empresa, mais especificamente na Célula de Suportes Fundidos (CSF), onde foi acompanhado o dia-a-dia da produção, inclusive, com as trocas de ferramentas e insertos no setor de preparação de ferramentas de usinagem (*Pre-set*).

Os processos de usinagem, tiveram um progresso significativo com o passar dos anos, pelo aprimoramento de técnicas, desenvolvimento de máquinas-ferramentas mais precisas e com maior potência e versatilidade (KÖNIG e KLOCKE, 1997), e, alinhado a esse pensamento, a Castertech possui grandes oportunidades para atuação em melhorias de processos, com possibilidade de obter ganhos de capacidade produtiva e financeiros.

Líder nacional em desenvolvimento e produção de sistemas para *wheel end*, suportes fundidos e usinados para veículos comerciais, a Castertech aplica a mais avançada tecnologia global no desenvolvimento de seus produtos, garantindo qualidade, segurança e durabilidade em itens testados e aprovados (Empresas Randon/ Castertech, 2019).




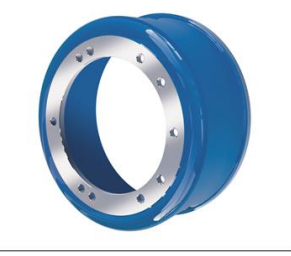
Fundada em 2006, foi criada para atender as demandas de peças fundidas da cadeia de suprimentos das Empresas Randon, e contava com um efetivo de aproximadamente 250 funcionários diretos e indiretos, trabalhando em 3 turnos.

Em janeiro de 2017, a Castertech teve o layout da usinagem e montagem totalmente redesenhado, a partir da metodologia *Lean Manufacturing*, incorporando os processos de usinagem e montagem da Suspensys Sistemas Automotivos Ltda, ambas empresas do Grupo Randon. Deste modo, foi criado o nome fantasia Suspensys WE, especializada em soluções de sistemas de rodagem (*Wheel End*). Com a incorporação da usinagem e montagem, a empresa passou a contar com efetivo de aproximadamente 400 funcionários.

Atualmente, contando com efetivo de 700 funcionários, a Castertech é fabricante de conjuntos cubo e tambor e de suportes fundidos de suspensões para ônibus, caminhões e reboques, apresentados na Figura 2, fornecendo para todas as montadoras de caminhões e ônibus do país, e atuando no mercado de reposição. Recentemente, passou a atuar no mercado de montadoras de máquinas agrícolas e tratores.

Esse fornecimento se deve ao forte trabalho na implementação de normas internacionais de Qualidade, como a IATF 16949, Segurança, com a OHSAS 18001, e também à preocupação com o Meio Ambiente, mantendo práticas legais e com a certificação em ISO 14001.

Figura 2 – Produtos fundidos, usinados e montados pela Castertech

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  | Suportes Fundidos |
|  |  |  | Cubos, Tambores e Conjuntos Cubo & Tambor |
|  |  |  | Polias e Linha Agrícola |

Fonte: O autor (2021)

1.3 OBJETIVOS

De forma a delimitar o que se pretende alcançar com a realização deste trabalho de conclusão de curso, apresenta-se nas seções subsequentes, os objetivos geral e específicos, com as ações necessárias para implementar o trabalho.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo do trabalho é avaliar tecnicamente o comportamento e tipos de desgaste nas ferramentas de corte (insertos) utilizadas no fresamento de suportes em Ferro Fundido Nodular, bem como sua influência na quantidade de peças usinadas por gume das ferramentas.

1.3.2 Objetivos específicos

Do objetivo geral derivam-se os específicos, relacionados com:

- a) Avaliar o desgaste das ferramentas de corte;
- b) Avaliar a vida útil das ferramentas de corte; e
- c) Identificar e mensurar o custo benefício das ferramentas avaliadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O capítulo a seguir, apresenta a elaboração da fundamentação teórica, que serviu como base para a elaboração deste trabalho. São apresentados conceitos básicos sobre usinagem e ferramentas de corte para usinagem, buscando referências alinhadas ao tema principal deste trabalho, que é, a análise do desgaste de insertos de metal-duro na usinagem de Ferro Fundido Nodular.

2.1 USINAGEM

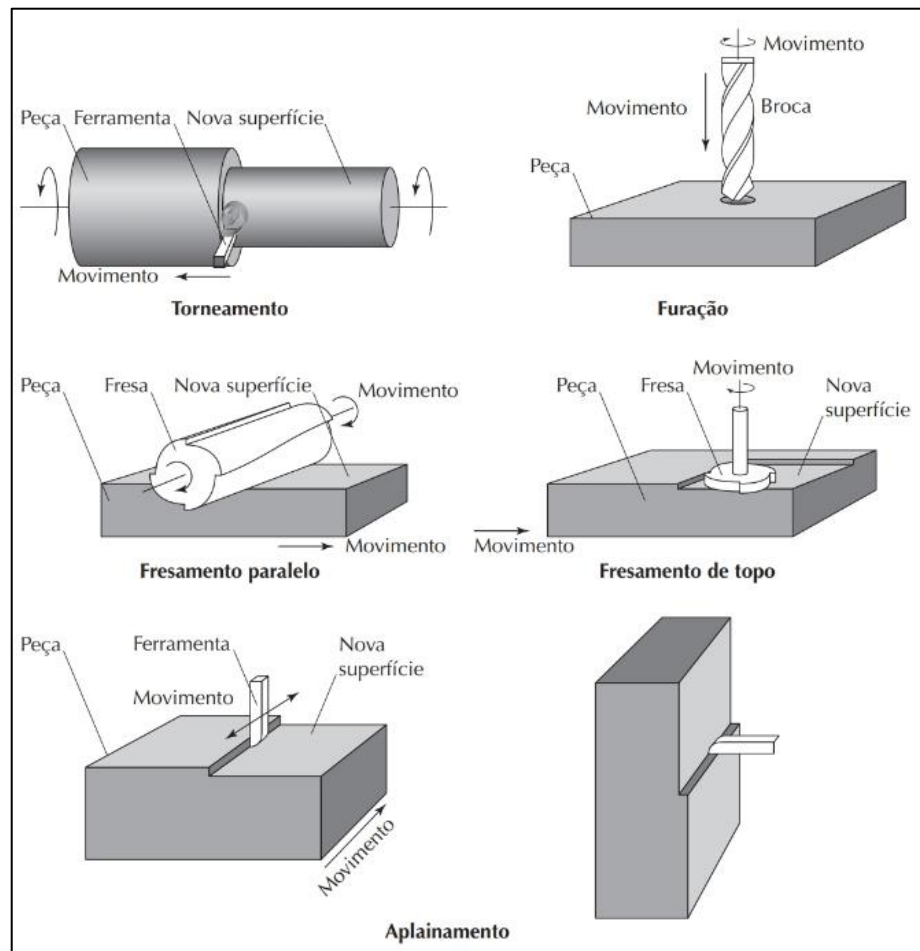
O processo de usinagem, pode ser definido como um processo de redução de massa, onde o material que se remove da peça inicial, é chamada de cavaco, que é definido como o material removido pela ação da ferramenta de corte (FRACARO, 2017).

Para Kiminami, Castro, e Oliveira (2013), a usinagem pode ser dividida em três processos, sendo eles: processos de corte com ferramentas mono e multicortantes (torneamento, furação, fresamento, corte por serra, aplainamento entre outros, conforme é apresentado na Figura 3), processos abrasivos (retificação, usinagem ultrassônica e outros), e por fim, os processos avançados de usinagem, que utilizam fontes de energia elétrica, química, térmica, hidrodinâmica e combinações dessas para remover o material da peça (eletro-erosão, feixe de elétrons, usinagem eletro-química, corte com jato d'água e abrasivos, entre outros).

Através da remoção de material pelos processos de usinagem, é possível obter melhor acabamento de superfícies de peças fundidas ou conformadas mecanicamente, dimensões mais precisas, fabricação seriada de peças com menor custo e ainda, fabricar peças de praticamente quaisquer formas, a partir de um bloco de material metálico (CHIAVERINI, 1986).

A obtenção de uma superfície usinada é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, em alguns casos, reações químicas. A rugosidade, que caracteriza o acabamento de uma superfície, é composta de erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte, sendo frequentemente utilizada como parâmetro para controlar um processo de usinagem, tendo como principais parâmetros o desvio aritmético médio (R_a), desvio médio quadrático (R_q), altura total do perfil (R_t) e altura máxima do perfil (R_z) (MACHADO et al., 2015).

Figura 3 – Alguns dos mais importantes e típicos processos de usinagem



Fonte: Adaptado de Kiminami, Castro, e Oliveira (2013)

2.1.1 Fresamento

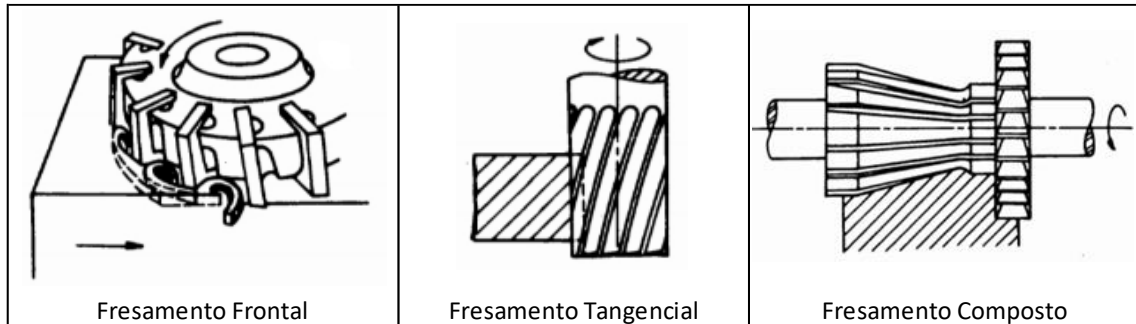
Segundo Diniz et. al. (1999), fresamento é a operação de usinagem que se caracteriza pela ferramenta utilizada. Esta ferramenta é denominada como fresa, a qual possui arestas cortantes, dispostas de forma simétrica, ao redor de seu eixo. Neste processo, o movimento de corte é gerado pela rotação da fresa, onde o avanço, geralmente é feito pela peça, que é fixada à mesa da máquina, à qual passa pela ferramenta em rotação, dando forma e dimensão desejada.

Ainda sobre o processo de fresamento, Diniz et. al. (1999) ressalta que a fresa pode se apresentar sob as mais variadas formas, conferindo a esta operação, um caráter de versatilidade em termos de geometrias possíveis de serem geradas.

Para Ferraresi (1969), o fresamento pode ser dividido de três maneiras, conforme apresentado na Figura 4, e abaixo descrito:

- a) Fresamento cilíndrico tangencial, que se destina à obtenção de superfície plana, paralela ao eixo de rotação da ferramenta;
- b) Fresamento frontal, ao qual se destina à obtenção de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta; e
- c) Fresamento composto, que é uma combinação dos processos acima mencionados.

Figura 4 – Tipos de fresamento



Fonte: Adaptado de Diniz et. al. (1999)

2.1.1.1 Fresamento com fluido lubrificadorrefrigerante

A utilização de fluidos lubrificadorrefrigerantes (FLR) na usinagem, foi introduzida por Frederick Taylor, em 1980. Inicialmente, Taylor utilizou água para resfriar a ferramenta, e, posteriormente, soluções de água e soda, e, água e sabão, porém, estas apresentavam oxidação, e baixo poder de lubrificante (DINIZ et. al., 1999).

Com a evolução das ferramentas e processos de usinagem, juntamente com a possibilidade de otimização dos parâmetros de corte, os estudos e desenvolvimentos de novos FLRs foram sendo aprimorados. Para König e Klocke (1997), o avanço das pesquisas gerou a combinação de diversos óleos minerais, óleos graxos, e aditivos, como o enxofre, o cloro e o fósforo, que foram dosados nos fluidos de corte, para satisfazer as operações de usinagem mais pesadas.

Stemmer (1993) descreve que os FLRs, têm como uma de suas finalidades, aumentar a vida das ferramentas, por meio da refrigeração. Sua aplicação é especialmente importante em altas velocidades de corte, e, com refrigeração intensa, possibilita um aumento de até 40% nas velocidades de corte, mantendo a mesma vida da ferramenta.

O gume da ferramenta, é a parte da ferramenta onde o cavaco se forma através do movimento relativo entre a ferramenta e a peça. Para diminuir a temperatura do gume, especialmente, na zona de contato da peça e do cavaco com a face da ferramenta, a lubrificação se faz necessária. Atuando diretamente na redução do atrito com a peça, e, indiretamente, reduzindo a relação entre o comprimento de corte e o comprimento do cavaco (fator de recalque), e seu trabalho de dobramento. O fluido de corte também auxilia a aumentar a eficiência de remoção de material, melhorar o acabamento, e, reduzir a força e potência do corte (STEMMER, 1993 e SIQUEIRA et. al., 2018).

Ainda que sejam apresentadas as vantagens proporcionadas pelos FLRs, sua aplicação tem sido discutida, devido aos efeitos negativos no aspecto ambiental, com os efeitos nocivos à atmosfera e degradação do solo e recursos hídricos, além dos custos elevados e o risco a saúde dos operadores. Para eliminar ou reduzir a utilização de fluidos, é importante controlar a temperatura, pois esta possui grande influência sobre o desgaste da ferramenta e a qualidade superficial da peça usinada. Assim, o desafio é encontrar parâmetros e estratégias de corte para atingir condições de temperatura que facilitem o cisalhamento e remoção do material sem aumentar os mecanismos de desgaste. A técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL), é uma opção considerável para obter as vantagens proporcionadas pela refrigeração com um baixo consumo de lubrificante (ZEILMANN et. al., 2009).

2.1.2 Ferramentas de Corte

Há aproximadamente 50 mil anos, o homem já produzia ferramentas de pedras, produzidas através do lascamento de seus gumes e adaptando à sua necessidade. Com o desenvolvimento tecnológico, no ano de 700AC, praticamente todas ferramentas eram fabricadas em ferro (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

Segundo Ferraresi (1969), Frederick Taylor teve importante contribuição no setor de materiais para ferramentas. Juntamente com White e outros, com o intuito de aumentar o rendimento da fabricação, em condições de usinagem cada vez mais severas, em 1903, chegaram em um protótipo, ao qual, posteriormente, seria o aço rápido.

Na sequência do aperfeiçoamento dos materiais para ferramentas de corte, e matrizes de estiramento, em 1914, Voigtlander e Lohmann desenvolveram um método de fabricação baseado na compressão e sinterização dos pós de carbonetos de tungstênio, e, carbonetos de

molibdênio, ao qual, posteriormente solicitaram sua patente. Neste processo, conhecido como metalurgia do pó, originam-se os carbonetos de tungstênio sinterizados, ou, metais-duros. Baseado neste processo, em 1926, foi iniciada a primeira produção industrial de metal-duro, com a marca Widia, que significa “como o diamante”, fazendo jus ao seu material, que possui dureza muito elevada (FERRARESI, 1969, e JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE AND CHEMICAL ENGINEERING, 2014).

Existem vários tipos de ferramentas de corte, para diversas aplicações, e que devem ser escolhidas com base nos catálogos de cada fabricante, juntamente com informações referentes ao material da peça a ser usinada, o tipo e formato da peça, as condições de usinagem e o nível do acabamento superficial necessário para cada operação (SANDVIK, 2021). A Figura 5 exemplifica algumas das ferramentas de metal-duro.

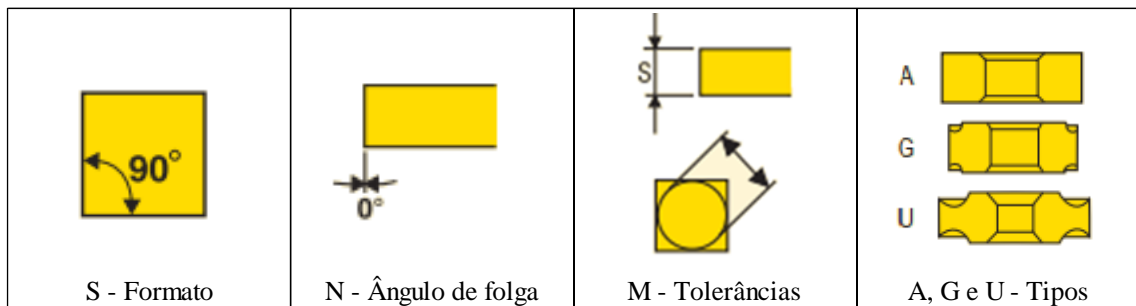
Figura 5 – Ferramentas de corte de metal-duro



Fonte: Sandvik (2021)

Os fabricantes de ferramentas e as pesquisas com ferros fundidos, geralmente recomendam utilizar ferramentas de metal-duro relacionados à classe K para usinagem desses materiais. Boehs et al. (2000) usinou ferro fundido nodular com insertos de metal-duro SNMG, e Teles (2007), utilizou insertos SNMG e SNMA em seu estudo. Tais insertos possuem mesmo formato, ângulo de folga e tolerâncias, porém são de tipos diferentes, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Codificação dos insertos de metal-duro



Fonte: Adaptado de Seco Tools (2021)

Ainda, para realizar a usinagem do ferro fundido, a grande maioria das pastilhas de metal-duro possuem camadas de cobertura de espessura microscópica. Os principais materiais empregados nestas coberturas são o carboneto de titânio (TiC) e/ou óxido de alumínio (Al_2O_3), nitreto de titânio (TiN) e carbonitreto de titânio (TiCN). A adição destas camadas tem por finalidade aumentar a resistência ao desgaste da camada superior do inserto que entra em contato com o cavaco e a peça (DINIZ et. al.,2006).

2.1.2.1 Fabricação e Materiais das Ferramentas de corte

Segundo Stemmer (1993), e Sandvik (2021), os materiais das ferramentas de corte devem possuir combinações básicas para garantir melhor rendimento e custo-benefício na usinagem, e estão divididas em várias classes, com propriedades específicas. As exigências básicas para o material de uma ferramenta de corte adequada para sua aplicação, deve ser:

- a) Duro para resistir ao desgaste de flanco e deformação;
- b) Tenaz para resistir à esforços de corte e quebra;
- c) Não reativo com o material da peça;
- d) Quimicamente estável para resistir à oxidação e difusão;
- e) Resistente a mudanças térmicas repentinas; e
- f) Facilidade de obtenção a preços econômicos.

Existe uma vasta gama de materiais de corte, conforme destacado na Figura 7, e, dentre elas, para Ferraresi (1969), o mais importante material para ferramentas utilizadas na indústria moderna, é o metal-duro.

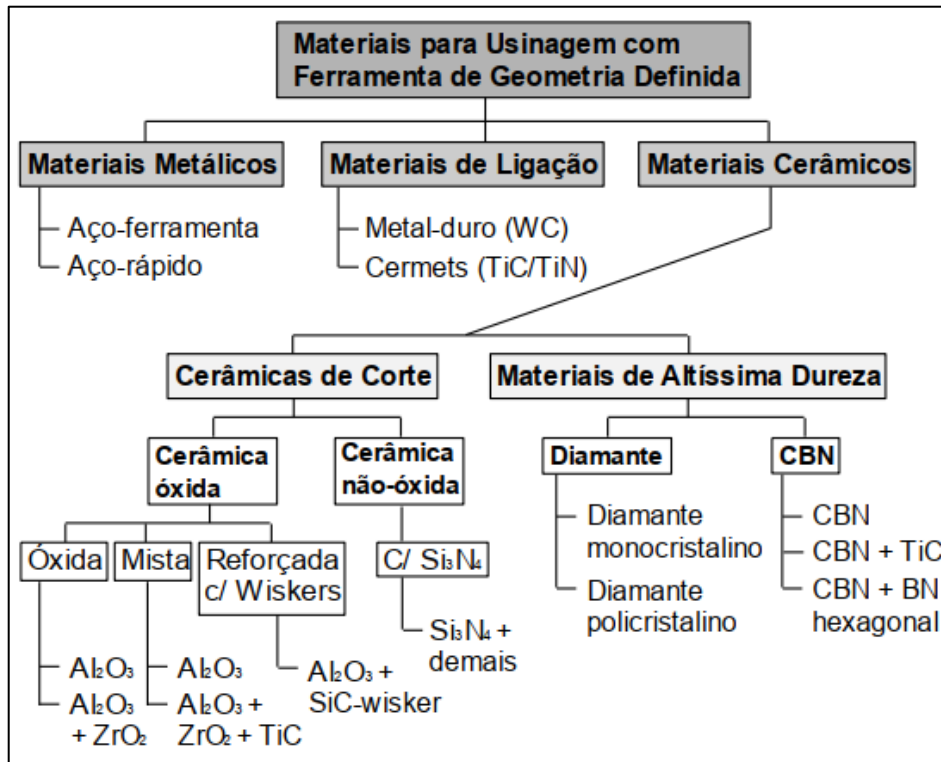
O Tungstênio é o metal com maior ponto de fusão, $3387^{\circ}C$, e de maior resistência à tração, com $4200N/mm^2$. Devido a seu ponto de fusão elevado, este metal era aplicado em

filamentos de lâmpadas, porém com a dificuldade de fusão, levou a técnica da sinterização e ao desenvolvimento da metalurgia do pó. Como base para fabricação do metal-duro, a composição original da mistura, é de 81% de Tungstênio, 6% de Carbono, e, 13% de Cobalto. (STEMMER, 1993).

Conforme Sandvik (2021), a ISO (*International Organization for Standardization*), recomendou a divisão do metal-duro em seis grupos principais, tendo em vista que os materiais da peça de cada grupo têm propriedades exclusivas em relação à usinabilidade:

- a) Grupo P – Classes empregadas na usinagem de metais e ligas ferrosos, variando de materiais sem ligas a de alta liga e incluindo aços fundidos e aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos. Geralmente possui usinabilidade boa, mas varia basicamente de acordo com a dureza do material.
- b) Grupo M – Classes empregadas na usinagem de aços inoxidáveis, com liga de no mínimo 12% de cromo. Comumente para toda gama desses materiais, as arestas de corte são expostas a uma grande quantidade de calor, ocasionando desgaste tipo entalhe e aresta postiça.
- c) Grupo K – Classes empregadas para os ferros fundidos em geral. Geralmente são usinados com tipos negativos de insertos que proporcionam arestas robustas. Apresentam cavacos curtos e bom controle de cavacos na maioria das condições, mesmo contendo carboneto de silício (SiC) que é muito abrasivo para a aresta de corte.
- d) Grupo N – Utilizados para os metais não ferrosos, como o alumínio, cobre, latão etc. Geralmente o inserto apresenta vida útil longa em função das altas velocidades de corte e baixas durezas (normalmente inferiores a 130 HB).
- e) Grupo S – Empregado na usinagem das superligas resistentes ao calor e materiais à base de titânio. Apresentam difícil controle de cavacos, são pastosos, criam aresta postiça, endurecem durante o trabalho e geram calor, fazendo assim com que a vida útil das arestas do inserto sejam reduzidas.
- f) Grupo H – Esse grupo de materiais contém aços endurecidos e temperados, com uma dureza entre 45 e 68 HRC, e ainda, ferro fundido coquilhado. A dureza elevada faz com que sejam difíceis de usar, gerando calor durante o corte e são muito abrasivos para a aresta de corte.

Figura 7 – Classificação das ferramentas de corte de geometria definida



Fonte: Adaptado de König e Klocke (1997)

2.1.3 Parâmetros de corte

De acordo com König e Klocke (1997), para otimizar a produtividade na usinagem, através da diminuição dos tempos de usinagem, e aumentando a vida das ferramentas de corte, é importante compreender os parâmetros de processo.

Os principais parâmetros que influenciam no desgaste das ferramentas, são a velocidade de corte (V_c), a velocidade de avanço (V_f), a profundidade de corte radial (a_e), a profundidade de corte axial (a_p) e o diâmetro da ferramenta (d). Mesmo conhecendo estes parâmetros, em muitas situações, não é possível, ou não é viável financeiramente, aumentá-los devido às limitações de máquinas ou do tipo de aplicação.

Ainda de acordo com König e Klocke (1997), experimentos realizados, mostram que, a taxa de usinagem pode ser melhorada respeitando as limitações de máquinas. Isso pode ser realizado com o aumento da velocidade de avanço, juntamente com a diminuição da profundidade de corte axial. Deve-se levar em consideração que este aumento da velocidade de avanço, não cause aumento elevado dos níveis de desgaste, ou uma deflexão acentuada na ferramenta.

A velocidade de corte, é a velocidade tangencial instantânea, resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, conforme abaixo apresentado, na Equação 1, para o seu respectivo cálculo (DINIZ et. al., 1999):

$$V_c = \frac{\pi.d.n}{1000} \quad (1)$$

onde: V_c é a velocidade de corte [m/min];
 d é o diâmetro da ferramenta [mm]; e
 n é a rotação da ferramenta [rpm].

Já a velocidade de avanço, resulta do avanço pela rotação da ferramenta. Abaixo é apresentada a Equação 2, para o respectivo cálculo (DINIZ et. al., 1999):

$$V_f = f.n \quad (2)$$

onde: f é o avanço [mm/rot]; e
 V_f é a velocidade de avanço [mm/min].

A rotação da ferramenta em torno da peça, se dá a partir da velocidade de corte, e considera o diâmetro da ferramenta. Abaixo é apresentado, na Equação 3, o seu respectivo cálculo:

$$rpm = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi.d} \quad (3)$$

onde: V_c é a velocidade de corte [m/min]; e
 d é o diâmetro da ferramenta [mm];

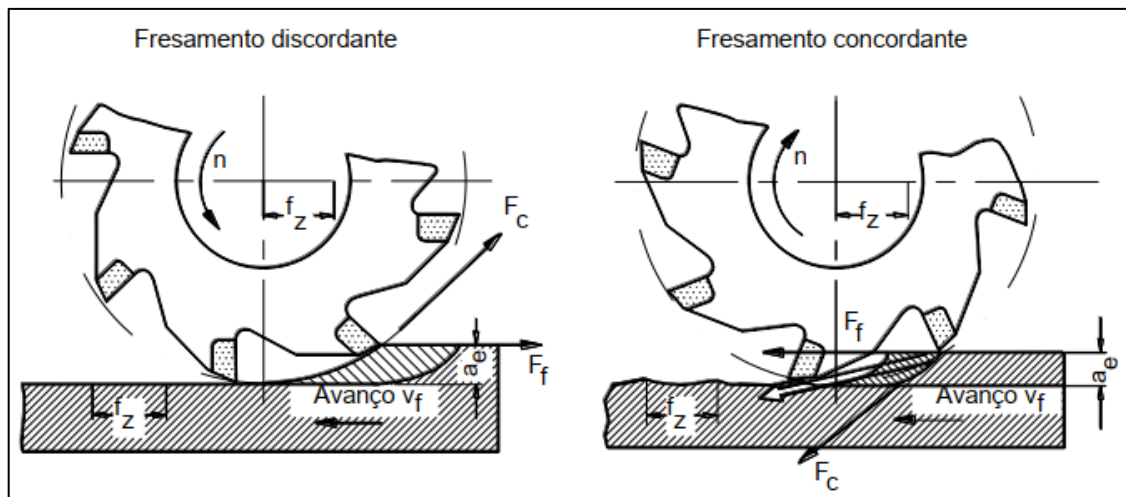
2.1.4 Direção de corte

Conforme König e Klocke (1997), o sentido da rotação da ferramenta, e o avanço da peça, devem ser avaliados para determinar o tipo do fresamento, sendo classificado em concordante ou discordante, conforme é apresentado na Figura 8.

No fresamento discordante, o avanço e movimento de corte tem sentidos contrários. O gume da ferramenta entra na peça com uma espessura teórica de usinagem igual a zero, e na saída do corte, sofre elevados esforços, podendo assim, ocasionar vibrações. O fresamento discordante pode ser vantajoso quando ocorrerem grandes variações na folga no fuso da mesa da máquina-ferramenta.

Em contrapartida, o movimento concordante, apresenta o sentido de rotação e o avanço no mesmo sentido, onde, a espessura de usinagem apresentada no fim do corte, é menor do que a recomendada para a geometria da ferramenta, obtendo assim menor desgaste e, por consequência, maior vida da ferramenta, e ainda, melhor qualidade superficial da peça (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

Figura 8 – Fresamento concordante e fresamento discordante



Fonte: König e Klocke (1997)

2.2 USINABILIDADE

Segundo Diniz et. al. (1999), pode-se entender que a usinabilidade é o grau de dificuldade de se usinar um determinado material.

Comumente, esta é uma propriedade intrinsecamente associada à dureza do material do aço e a sua resistência mecânica, porém, esse raciocínio é falso.

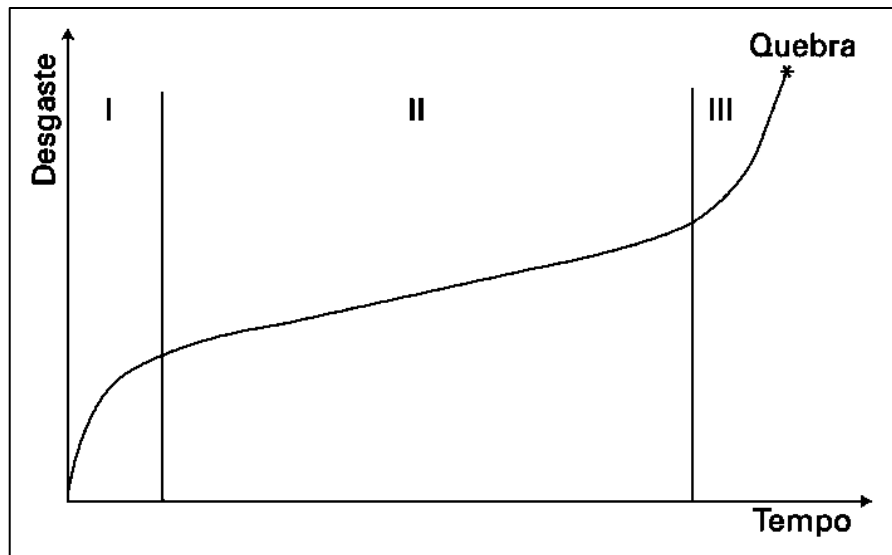
Embora a dureza e a resistência mecânica sejam fatores importantes na usinabilidade do material, Diniz et. al. (1999), considera também, que temos outros fatores de suma importância, tanto no material, quanto nas condições de usinagem, conforme os exemplos abaixo citados:

- a) Quantidade de inclusões e de aditivos empregados para melhorar a usinabilidade;
- b) A quantidade de partículas duras;
- c) A micro-estrutura;
- d) A tendência ao empastamento de cavaco do material na superfície de saída da ferramenta.
- e) Características da ferramenta;
- f) Sistema de refrigeração; e
- g) Tipo de trabalho executado pela ferramenta (operação empregada, tipo de corte, entre outros).

2.2.1 Estimativa de vida útil das Ferramentas de corte

O tempo em que uma aresta da ferramenta de corte trabalha realmente, antes de ser reafiada ou substituída, é denominado “vida da ferramenta de corte” (T). Para manter o processo produtivo economicamente viável, deve ser adotado um critério para determinar o fim da vida da ferramenta. Normalmente na usinagem, as arestas de corte se desgastam seguindo uma curva-padrão, que é representada na Figura 9 (MACHADO et al. 2015).

Figura 9 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta em função do tempo de corte



Fonte: Machado et al. (2015)

Existem diversas formas de se identificar o fim da vida das ferramentas de corte, entre elas, considera-se: imperfeição no acabamento superficial, formação de pequenas rebarbas na superfície da peça usinada, alteração da forma do cavaco resultante, alterações nas dimensões

da peça a usinar, forças de corte e de avanço, aumento da temperatura da cunha de corte, entre outras (MACHADO et al. 2015).

Para Valim (2018), pode-se empregar métodos usuais para determinar a vida útil de uma ferramenta, sendo eles: o tempo em que a ferramenta permanece em operação; o tempo total que a ferramenta pode ser utilizada em corte efetivo sem a necessidade de realizar a troca; quantidade de cavaco produzido; número de peças usinadas; a velocidade de corte equivalente, que é a relação da velocidade de corte com o tempo útil de corte da ferramenta.

Já para Ferraresi (1969), a vida da ferramenta de corte pode ser expressa em minutos, e em alguns casos, calculando o percurso de corte, em quilômetros, através da Equação abaixo:

$$L = v \cdot T \cdot \frac{1}{1000} \quad (4)$$

ou ainda, o percurso de avanço, em milímetros, e seguindo a seguinte Equação:

$$L_a = a \cdot n \cdot T \quad (5)$$

onde: T é a vida da ferramenta de corte [min];

v é a velocidade de corte [m/min];

a é o avanço [mm/rot];

n é a rotação da ferramenta [rpm].

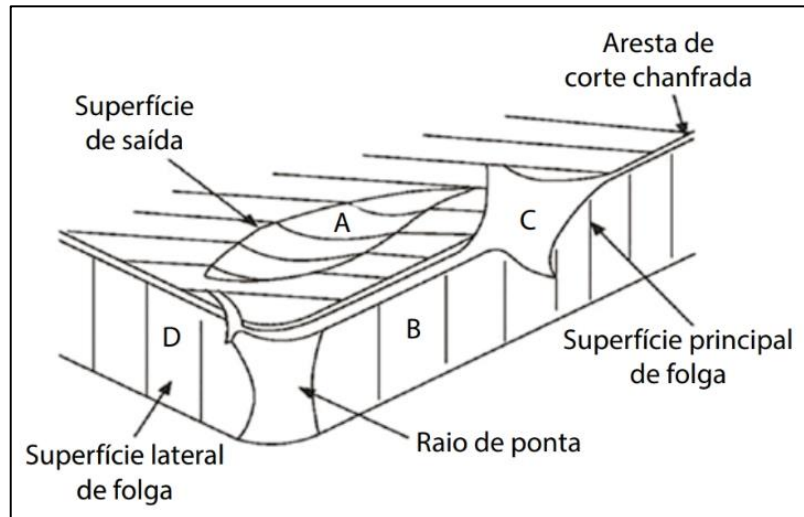
2.2.2 Mecanismos causadores de desgaste das Ferramentas de corte

Antes de falar do desgaste propriamente dito, é importante conhecer as avarias nas ferramentas de corte. Esse fenômeno acontece de forma anormal e imprevisível, e pode originar-se de forma térmica ou mecânica, sendo causado pelo surgimento de lascas, quebra ou trinca da aresta de corte, provocando a perda de uma parte considerável de material da aresta de corte da ferramenta ou a sua destruição total. A trinca, quando superficial, geralmente provoca lascas na ferramenta, e quando é mais profunda, acaba ocasionando a quebra da ferramenta (VALIM, 2018).

Mesmo possuindo tenacidade suficiente para evitar uma avaria, a ferramenta de corte estará sempre sujeita ao desgaste. Segundo Machado et al. (2015), existem três tipos principais

de desgastes de ferramenta, são eles: o desgaste de cratera (área A), o desgaste de flanco (área B), e o desgaste de entalhe (áreas C e D), que geralmente ocorrem nas regiões apresentadas na Figura 10.

Figura 10 – Principais áreas de desgaste nas ferramentas de corte



Fonte: Rebeyka, (2016)

Sandvik (2017) e Seco (2018), descrevem que para compreender as vantagens e as limitações de cada ferramenta, é importante conhecer os diferentes tipos de desgaste aos quais as ferramentas de corte estão sujeitas. Os principais tipos de desgaste são ilustrados na Figura 11 e tem como principais causas a temperatura elevada no gume, elevados esforços de corte, e, em muitos casos, parâmetros de corte incorretos.

Figura 11 – Tipos de desgaste das ferramentas de corte



Fonte: Adaptado de Sandvik, (2017)

O tipo de desgaste apresentado nas operações de usinagem depende do material que está sendo usinado, do material da ferramenta e das condições de corte (KISHAWY et al., 2005). Stemmer (1993) e Machado et al. (2015), definem que, entre os principais mecanismos causadores dos desgastes das ferramentas de corte, destacam-se: adesão, oxidação, abrasão mecânica e difusão. Estes são detalhados abaixo:

- a) Adesão: Ocorre entre o material da peça e as asperezas superficiais da ferramenta, se deve as altas temperaturas e pressões na zona de corte, e ainda pelo cavaco recém removido estar quimicamente muito ativo. Forma o gume postiço, com partículas de elevado grau de deformação a frio. Ao serem removidas, essas partículas causam desgaste abrasivo no flanco e na face da ferramenta.
- b) Oxidação: Verifica-se em altas temperaturas, com a formação de carepas ou óxidos porosos na superfície da ferramenta, e na presença de ar e água (contida no fluido de corte). Se forma especialmente nas extremidades do cavaco, devido a aproximação do ar e fluido, sendo fundamental para o desgaste de entalhe.
- c) Abrasão: Geralmente ocorre no desgaste de flanco e de cratera, sendo mais relevante no desgaste de flanco, visto que quando o material é removido ou deslocado da superfície por partículas duras, que podem estar soltas entre duas superfícies com movimento relativo, a superfície de folga se atrita com a peça.
- d) Difusão: Consiste na transferência de átomos de um metal para o outro, ativada pela elevada temperatura de corte da ferramenta, e, pela semelhança físicoquímica dos metais envolvidos. Atua tanto na superfície de saída como na superfície de folga, e a taxa de desgaste aumenta com o aumento da velocidade de corte e do avanço, e, é o principal mecanismo para formação do desgaste de cratera.

Segundo Ferraresi (1969), o desgaste da ferramenta de corte pode ser facilmente avaliado através da utilização de lupa com retículo ou microscópio de oficina, com escala de medição em décimos de milímetros. Para maior precisão, emprega-se microscópio de oficina com mesa de avanço micrométrico, permitindo leituras de centésimos de milímetros. Ainda é possível utilização de perfilômetro especiais ou radioisótopos.

Já para Machado et al. (2015), a análise dos mecanismos de desgaste é complexa, mas o procedimento mais indicado é, primeiramente, considerar o material da ferramenta, o material da peça e as condições de corte. Tais informações restringem a possibilidade de predominância de um ou outro mecanismo de desgaste. Após, realiza-se a análise das regiões desgastadas, limpando as ferramentas em solventes apropriados. Com isso, realiza-se as análises visuais e

microscópica, em microscópio óptico e depois eletrônico, se necessário. Outros tipos de análises podem ser empregados, quando disponíveis, como as análises qualitativa e quantitativa superficial de elementos químicos cujas técnicas variam.

Para realizar a análise do desgaste das ferramentas de corte e condições de usinagem, TOOPTONG et. al. (2018), segue a mesma proposta de Machado et al. (2015), sugerindo que a coleta de dados do perfil de desgaste seja realizada em cada uma das arestas de corte das ferramentas utilizadas, e em cada condição de usinagem. Após, cada aresta de corte é preparada para realizar a medição do desgaste com o microscópio apropriado e então, as amostras são comparadas.

2.2.3 Formas e tipos de cavaco

Conforme dito anteriormente, o cavaco é a porção de material removida no processo de fabricação de peças, pela ação da ferramenta de corte na usinagem. É caracterizado por apresentar forma irregular, e ocorre tanto no desbaste, com cavacos geralmente mais grossos, quanto no acabamento, onde, apresenta cavacos mais finos (VALIM, 2018).

Para Ferraresi (1969), uma das classificações mais comuns para o tipo do cavaco, que é citada tanto na literatura alemã como na americana, é a subdivisão em três tipos, sendo eles:

- a) Cavaco Contínuo: Apresenta-se constituído de lamelas justapostas em uma disposição contínua, e, agrupadas em grupos lamelares. Esta lamela, é uma camada de material de cavaco, constituída pelos grãos cristalinos deformados. Geralmente forma-se na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, com pequeno e médio avanço, não havendo interferências como vibrações ou variações na condição de atrito na superfície de saída da ferramenta de corte. A velocidade de corte normalmente é superior à 60m/min.
- b) Cavaco de Cisalhamento: Apresenta-se constituído de grupos lamelares bem distintos e justapostos, onde esses elementos de cavaco são cisalhados e parcialmente soldados em seguida. É formado quando tiver a diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento, devido ao aumento de deformação, à diferença da estrutura metalográfica, ou as variações da espessura do cavaco, ocasionadas por vibrações externas. O cavaco de cisalhamento também pode ser formado operando com grandes avanços e velocidades de corte inferiores a 100m/min, e, com ferramenta de corte com ângulo de saída pequeno.

c) Cavaco de Ruptura: É formado de fragmentos arrancados da peça usinada, onde acontece uma ruptura completa do material em grupos lamelares, e, os quais permanecem separados. Geralmente formar-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, tais como ferro fundido ou latão.

Além dos tipos de cavacos apresentados, também é possível separá-los quanto à sua forma: fitas, helicoidais, espirais, e lascas ou pedaços. Esta classificação é detalhada conforme a ABNT NBR ISO 3685, e é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Classificação da forma do cavaco

| 1 - Cavaco em fita | 2 - Cavaco tubular | 3 - Cavaco espiral | 4 - Cavaco hel. tipo arruela | 5 - Cavaco hel. cônico | 6 - Cavaco em arco | 7 - Cavaco fragmentado | 8 - Cavaco tipo agulha |
|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| | | | | | | | |
| 1-1- Longo | 2-1- Longo | 3-1- Plano | 4-1- Longo | 5-1- Longo | 6-1- Conect. | | |
| | | | | | | | |
| 1-2- Curto | 2-2- Curto | 3-2- Cônico | 4-2- Curto | 5-2- Curto | 6-2- Solto | | |
| | | | | | | | |
| 1-3 - Emaranhado | 2-3 - Emaranhado | | 4-3 - Emaranhado | 5-3 - Emaranhado | | | |

Fonte: ABNT NBR ISO 3685 (2017)

As formas de cavacos em fitas, são as que causam os maiores transtornos no que se refere à segurança de produtividade e ainda ocupam maior espaço de armazenamento. Para evitar ou reduzir a formação dessa forma de cavaco, os parâmetros de corte, geralmente podem ser otimizados, ou ainda, a utilização de FLR auxilia nesse processo. O método mais satisfatório para produzir cavacos curtos é a utilização de ferramentas com quebra-cavacos. O cavaco helicoidal é considerado o mais conveniente, enquanto o cavaco em lascas é preferido quando se pretende ocupar menor espaço. Para essa formação de cavacos, é possível a utilização de FLR na máquina para remover o cavaco (MACHADO et al. 2015).

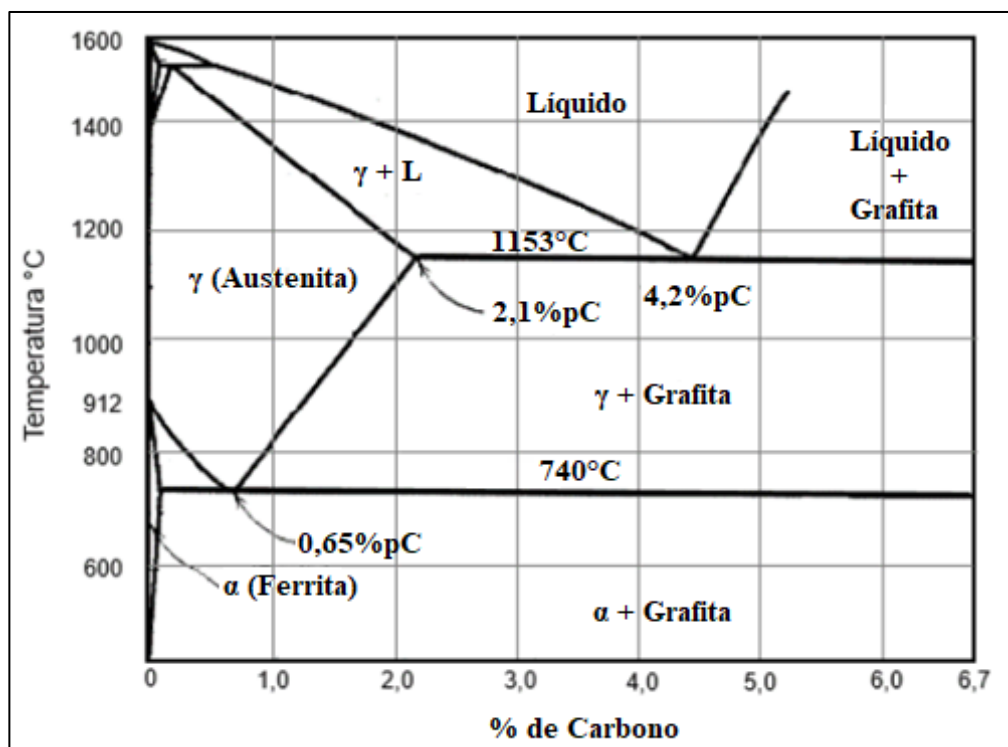
2.3 FERRO FUNDIDO

Os ferros fundidos são materiais de fundamental importância para a indústria. Além de suas propriedades específicas, podem ser introduzidos elementos de liga, ou mesmo, tratamentos térmicos, possibilitando a sua utilização em aplicações antes exclusivas do aço (CHIAVERINI, 1986).

Este material é obtido através do processo de fundição, que é um processo de fabricação onde a matéria-prima (metais e ligas metálicas) é submetida a altas temperaturas. Com esse processo, a liga metálica líquida, é derramada em um molde e, após a solidificação dessa liga, é obtido a peça fundida (BALDAM e VIEIRA, 2014)

Através do diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono (Fe-C), apresentado na Figura 13, costuma-se definir o ferro fundido como as ligas Fe-C com teor de carbono acima de 2,0%. Através da influência do silício na formação estrutural dessa liga, o ferro fundido é normalmente considerado uma liga ternária de Fe-C-Si. Isto ocorre devido ao silício constantemente estar presente em teores superiores ao do próprio carbono, que geralmente está presente parcialmente livre na forma de veios ou lamelas de grafita (CHIAVERINI, 1996).

Figura 13 – Diagrama de equilíbrio Fe-C



Fonte: Adaptado de Chiaverini (1996)

Os ferros fundidos são classificados de acordo com sua composição química e microestrutura. Estão abaixo indicados, no quadro 1, os principais tipos de ferros, sem elementos de liga, bem como sua composição química.

Quadro 1 – Faixa de composição de ferros fundidos típicos comuns

| Tipo | Composição química % | | | | |
|--------------------|----------------------|----------|------------|------------|------------|
| | C | Si | Mn | S | P |
| Branco | 1,8/ 3,6 | 0,5/ 1,9 | 0,25/ 0,80 | 0,06/ 0,20 | 0,06/ 0,20 |
| Maleável | 2,2/ 2,9 | 0,9/ 1,9 | 0,15/ 1,20 | 0,02/ 0,20 | 0,02/ 0,20 |
| Cinzento | 2,5/ 4,0 | 1,0/ 3,0 | 0,20/ 1,00 | 0,02/ 0,25 | 0,02/ 1,00 |
| Nodular | 3,0/ 4,0 | 1,8/ 2,8 | 0,10/ 1,00 | 0,01/ 0,03 | 0,01/ 0,10 |
| Grafita compactada | 2,5/ 4,0 | 1,0/ 3,0 | 0,20/ 1,00 | 0,01/ 0,03 | 0,01/ 0,10 |

Fonte: Adaptado de Chiaverini (1996)

2.3.1 Ferro Fundido Nodular

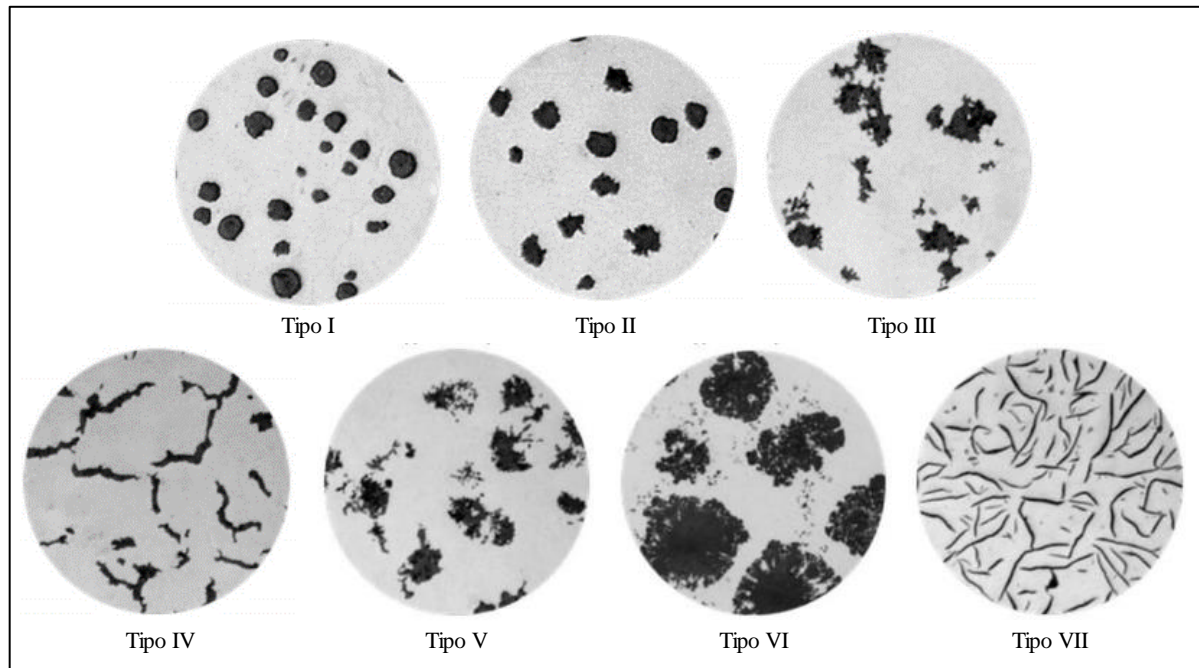
O ferro fundido nodular ou dúctil é caracterizado pela ductilidade, tenacidade e resistência mecânica. Seu limite de escoamento é mais elevado do que no ferro fundido cinzento, ferro maleável, e ainda, nos aços-carbonos sem elementos de liga. Possui composição química semelhante à do ferro fundido cinzento e é obtido por meio do processo de nodularização, no qual são adicionados elementos como o magnésio, cério e outros, para que ocorra a transição do carbono livre para a estrutura em grafita na forma esferoidal. (CHIAVERINI, 1996 e ASTM A247, 2016).

Para alcançar a microestrutura desejada, a utilização dos elementos nodularizantes não devem exceder os níveis determinados, garantindo assim, a correta redução dos níveis de oxigênio e enxofre da solução por um determinado tempo. Este processo é conhecido como *fading* e auxilia a reduzir a formação de carbonetos na solidificação, que acabam prejudicando as propriedades mecânicas do material (GOODRICH, 1997).

Segundo a norma ASTM A247, 2016, e FERNANDINO et. al., 2020, a grafita da microestrutura do ferro fundido nodular é composta por pelo menos 80% de grafita esferoidal em conformidade com o tipo I (nodular em forma e é geralmente desejável forma de grafite em ferro dúctil) e o tipo II (consiste em nódulos ligeiramente irregulares e tem pouco ou nenhum efeito desfavorável nas propriedades do ferro dúctil, porém é identificado como o principal responsável para o desenvolvimento de iniciação de trincas no metal).

É apresentado na Figura 14, o padrão usado como referência comparativa, observando com ampliações que revelem claramente as formas de grafita na microestrutura da amostra polida, sob o microscópio. As porcentagens de cada tipo de grafita devem ser estimadas por observação, ou ainda, contando as partículas de cada tipo (ASTM A247, 2016 e SAE J434, 2004).

Figura 14 – Classificação da forma da grafita nos ferros fundidos



Fonte: Adaptado de ASTM A247 (2016)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

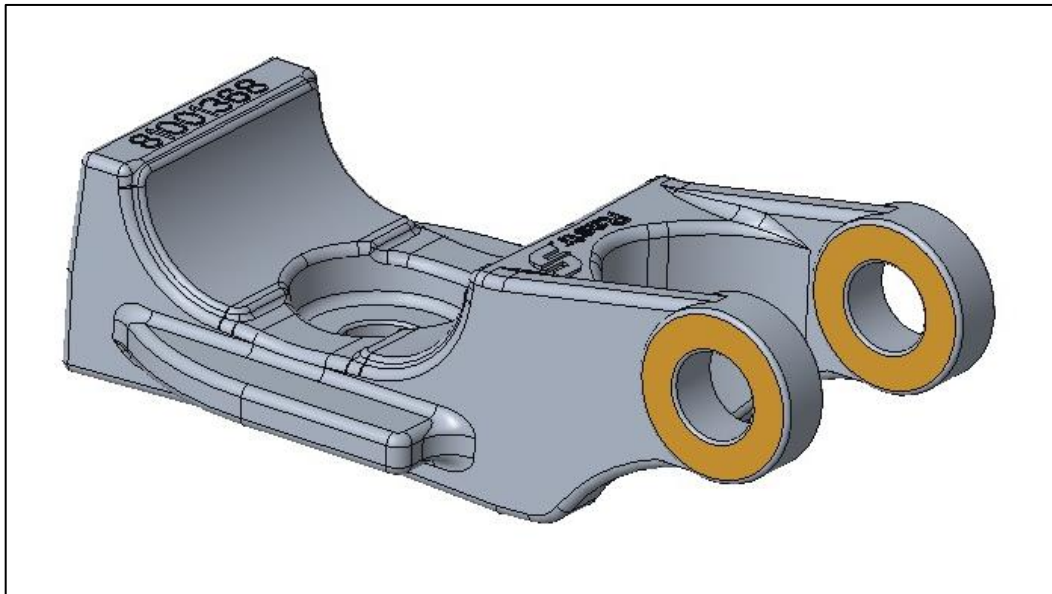
Baseado em fundamentações teóricas, neste capítulo é apresentado o procedimento experimental realizado no trabalho, descrevendo os materiais, os parâmetros de processo, as especificações das ferramentas e os equipamentos, bem como a análise dos resultados e as conclusões obtidas.

O material analisado e os passos seguidos estão detalhados na sequência.

3.1 MATERIAL

Os ensaios de fresamento foram realizados com os suportes 1368, ilustrado na Figura 15, que são fabricados de ferro fundido nodular, seguindo a norma SAE J434 D4512, e documentação específica da área de engenharia de processos da empresa Castertech.

Figura 15 – Regiões usinadas no suporte 1368, em destaque



Fonte: O autor (2021) – Escala 1:2

As amostras ensaiadas devem apresentar composição química e propriedades mecânicas conforme os limites de tolerância definidos em projeto. Os limites que os materiais dessa classe podem apresentar, para a composição química e propriedades mecânicas respectivamente estão apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2, respectivamente.

Para a microestrutura do material, é esperado grafita do tipo VI, com matriz metálica 50% ferrita e 50% perlita, e com nodularização mínima de 80%.

Tabela 1 – Composição química do suporte 1368

| Composição | Mínima (%) | Máxima (%) |
|---------------------|-------------------|-------------------|
| Carbono | 3,50 | 3,70 |
| Silício | 2,15 | 2,45 |
| Manganês | 0,40 | 0,50 |
| Fósforo | 0 | 0,05 |
| Enxofre | 0 | 0,01 |
| Carbono equivalente | 4,22 | 4,53 |
| Cromo | 0 | 0,07 |
| Cobre | 0 | 0,05 |
| Estanho | 0,010 | 0,015 |
| Magnésio | 0,03 | 0,05 |
| Alumínio | 0 | 0,016 |
| Cobre equivalente | 0,30 | 0,50 |
| Boro | 0 | 0,0012 |
| Níquel | 0 | 0,05 |

Fonte: Adaptado do PC 013 Castertech, 2021.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas e dureza Brinell do suporte 1368

| Especificação | Mínima | Máxima |
|----------------------------|---------------|---------------|
| Dureza Brinell (HB) | 156 | 217 |
| Resistência à tração (MPa) | 450 | - |
| Limite de escoamento (MPa) | 295 | - |
| Alongamento (%) | 12 | - |

Fonte: Adaptado do PC 013 Castertech, 2021.

3.2 MÁQUINA E EQUIPAMENTOS

Foi utilizado para o processo de usinagem dos suportes de ferro fundido nodular o centro de usinagem Okuma MA-400HA, ano 2007 de propriedade da Castertech. Este centro de usinagem é um centro de trabalho horizontal com controle numérico de três eixos, e que possui mesa de 400mm x 400mm. Sua rotação máxima do *spindle* é de 15.000 rpm, e tem potência máxima de 38 kW. Este equipamento possui curso máximo dos eixos conforme dados a seguir: X, de 560mm, Y, de 610mm e Z, com 625mm. A Figura 16 ilustra o modelo da máquina utilizada.

Figura 16 – Centro de usinagem horizontal Okuma MA-400HA



Fonte: Okuma (2021) – Escala 1:400

Para a fixação das peças no centro de usinagem, foi utilizado um dispositivo hidráulico conforme apresentado na Figura 17. Este dispositivo suporta fixação para usinagem de quatro peças por ciclo de máquina, e com isso possibilita um melhor aproveitamento da própria máquina e ganho no tempo de usinagem.

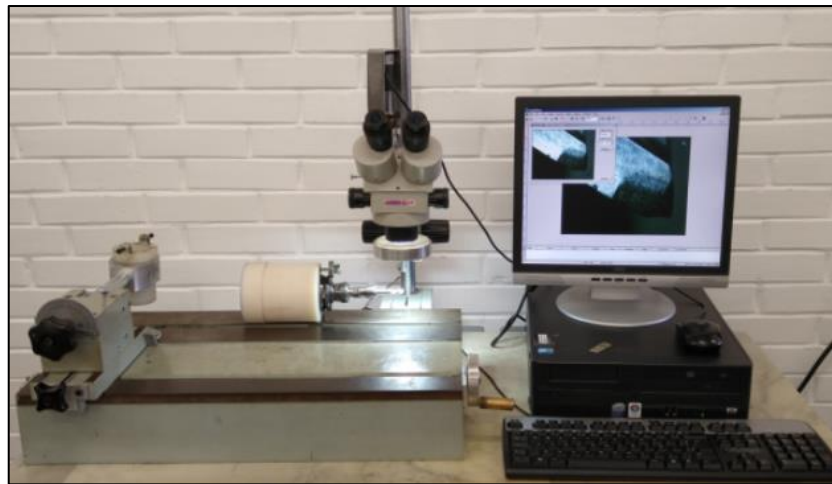
Figura 17 – Dispositivo hidráulico para fixação dos suportes na usinagem



Fonte: O autor (2021) – Escala 1:12

Para auxiliar na avaliação e na medição do desgaste das ferramentas de corte avaliadas, foi utilizado o estereoscópio trinocular de medição universal, modelo TNE-10B, da marca Entex. Este equipamento possui ampliação de 7 a 45 vezes, e é auxiliado pelo software ScopePhoto 2.0.4 para aquisição e avaliação das imagens. A figura 18 ilustra o estereoscópio disponível no Laboratório de Usinagem (UCS - Bloco D - Sala 114) utilizado na verificação das ferramentas.

Figura 18 – Microscópio trinocular estéreo



Fonte: UCS – Universidade de Caxias do Sul (2021)

Para a obtenção da microestrutura presente nas amostras, foi utilizado o microscópio metalográfico Olympus, modelo GX 51, que possibilita ampliação de 100 vezes. A Figura 19 ilustra o equipamento que será utilizado.

Figura 19 – Microscópio metalográfico Olympus GX51



Fonte: O autor (2021)

Para realizar a medição de dureza superficial das amostras, foi utilizado o durômetro HECKERT WPM, modelo HPO-3000, que realiza a medição de dureza de forma não destrutiva, utilizando a escala Brinnell (HB). A Figura 20 apresenta o equipamento utilizado.

Figura 20 – Durômetro Heckert WPM



Fonte: O autor (2021)

Para realizar a identificação da composição química presente nas amostras, foi utilizado o equipamento de espectro de emissão óptica por centelhamento, Spectromaxx. A Figura 21 ilustra o equipamento de espectro.

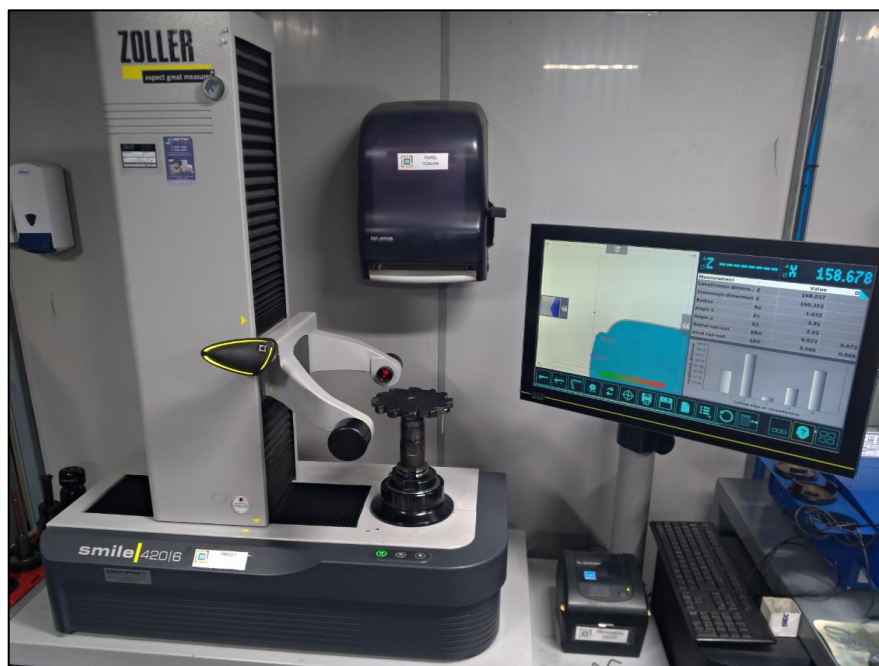
Figura 21 – Equipamento de espectro Spectromaxx



Fonte: O autor (2021)

A fim de realizar a avaliação e medição do batimento das ferramentas, foi utilizado a máquina de pré-ajuste de ferramentas Zoller, modelo smile 420. A Figura 22 ilustra o equipamento de preset.

Figura 22 – Máquina de pré-ajuste de ferramentas Zoller



Fonte: O autor (2021)

3.3 FERRAMENTAS DE CORTE

Para o processo de fresamento do suporte 1368, foram avaliadas três ferramentas de corte do fabricante Seco Tools. Foram utilizados insertos de metal-duro revestido, de diferentes classes, coberturas e geometrias. A Tabela 3 apresenta as características básicas das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios, e a Figura 23 ilustra tais ferramentas.

Tabela 3 – Especificações das ferramentas de corte

| Descrição da ferramenta | Classe | Cobertura | Gumes | Comprimento efetivo do gume |
|-------------------------|--------|-----------|----------------------------------|-----------------------------|
| LNKT 080508 PPTN-M06 | MK2050 | PVD | 4, sendo 2 cada sentido de corte | 7,5 mm |
| 335.18-1005 T-M10 | MK1500 | CVD | 4, sendo 2 cada sentido de corte | 10 mm |
| SNMU 120410 TN-MD13 | MK2050 | PVD | 8 | 9,8 mm |

Fonte: Adaptado de Seco Tools (2018)

Figura 23 – Ferramentas de corte avaliadas



Fonte: Adaptado de Seco Tools (2018) – Escala 3:1

As ferramentas de corte LNKT e 335 eram utilizadas no processo de usinagem, porém devido à sua geometria e o sentido de corte aplicado, alguns gumes não podem ser utilizados nesse processo. Para melhor aproveitamento dos gumes, seguindo recomendações técnicas do fabricante, pode-se aplicar na usinagem de ferro fundido nodular insertos de classes MK2050 com cobertura PVD (*Physical Vapour Deposition*), que auxiliam a diminuir o coeficiente de atrito entre cavaco, ferramenta e peça. Tais classes são recomendadas para fresamento com e sem refrigeração, e são indicadas para aplicações com baixos avanços, onde a alta tenacidade é exigida, além de aumentar significativamente a produtividade, e a redução dos custos de produção (SECO TOOLS, 2021). Para tanto, optou-se pelo inserto SNMU de classe MK2050 e cobertura PVD, onde todos os seus gumes podem ser utilizados no processo de usinagem.

Atualmente, o metal duro com classes de cobertura, representa entre 80 a 90% de todos insertos das ferramentas de corte. A cobertura CVD (*Chemical Vapour Deposition*), aplicada na classe MK1500 acima descrita, é gerada por reações químicas em temperaturas de 700 a 1050 °C, e pode apresentar uma única camada de cobertura de TiC, ou coberturas de Al₂O₃ e de TiN, ou ainda, coberturas de TiCN. A cobertura PVD aplicada na classe MK2050, é formada em temperaturas relativamente baixas (400 a 600°C), e pode apresentar em sua composição o TiN, TiCN e nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) (SANDVIK, 2021 e SECO TOOLS, 2018).

Para a fixação das ferramentas de corte, foram utilizados suportes com adaptador para fresas de disco haste ISO 40 DIN 69871, com sistema de fixação *arbor*, de eixo deslizante ajustável, conforme ilustrado na Figura 24. Nestes suportes, foram fixadas cada uma das fresas disco de diâmetro 160 mm, compatível com cada ferramenta de corte analisada. As Figuras 25, 26 e 27, apresentam as fresas de disco para as ferramentas utilizadas.

Figura 24 – Adaptadores para fresas de disco



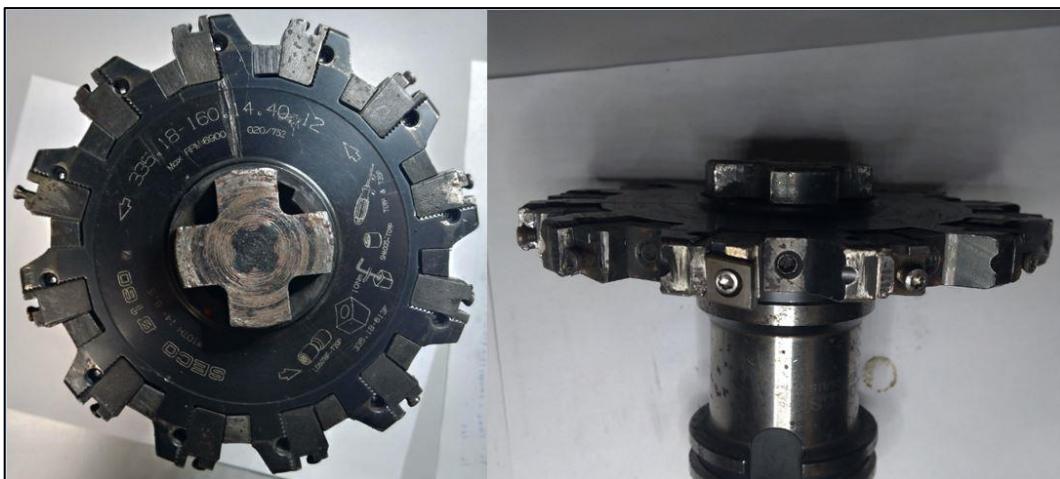
Fonte: Adaptado de Seco Tools (2018) – Escala 1:4

Figura 25 – Fresa disco diâmetro 160mm para 14 insertos LNKT, com sistema de fixação furo *arbor*, e diâmetro interno de 40mm



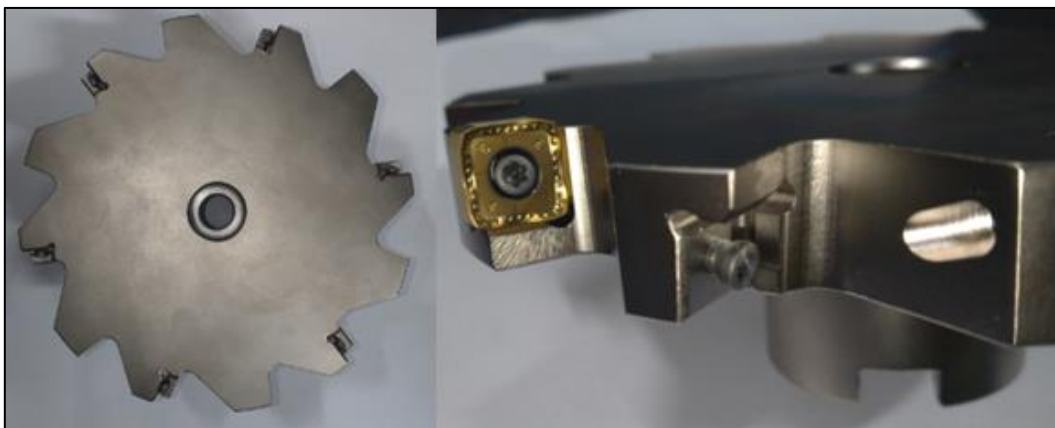
Fonte: O autor (2021) – Escala 1:3

Figura 26 – Fresa disco diâmetro 160mm para 12 insertos 335, com sistema de fixação furo *arbor*, e diâmetro interno de 40mm



Fonte: O autor (2021) – Escala 1:3

Figura 27 – Fresa disco diâmetro 160mm para 12 insertos SNMU, com sistema de fixação *arbor* porta fresa, e diâmetro interno de 27mm



Fonte: O autor (2021) – Escala 1:3

3.4 PARÂMETROS DE CORTE

Buscando eliminar algumas variáveis que possam influenciar nos resultados da análise do desgaste das ferramentas de corte, alguns parâmetros devem ser mantidos constantes durante o processo de fresamento das amostras (DINIZ et. al.,2006; SOUZA e HUBNER, 2014).

Os parâmetros adotados seguem a recomendação do fabricante das ferramentas de corte e definição do setor de Engenharia de Processos da empresa Castertech. Foi empregado velocidade de corte (V_c) de 450 m/min, profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm, avanço (f) de 0,2 mm/rot e rotação do *spindle* (n) de 895rpm. O sentido de corte utilizado é o convergente, que é o mais recomendado devido à espessura dos cavacos diminuir a partir do início do corte, se aproximando de zero gradativamente ao final do corte.

3.5 FLUIDO LUBRIRREFRIGERANTE

O FLR utilizado é o Synergy 905 do fabricante Blaser Swisslube. Este fluido é uma emulsão oleosa, proveniente da mistura de ácidos orgânicos (sais), contendo nitrogênio e inibidores, e isento de óleo mineral, possuindo ainda, boa ação anti-corrosiva. O fabricante recomenda diluição em água potável, utilizado na proporção de 94% de água potável e 6% de fluido, a qual é verificada com um refratômetro manual diariamente na central de abastecimento da máquina.

Este fluido é aplicado em todas as etapas do processo de fresamento, de forma abundante por meio de um bico rígido, entre a região de corte e a ferramenta.

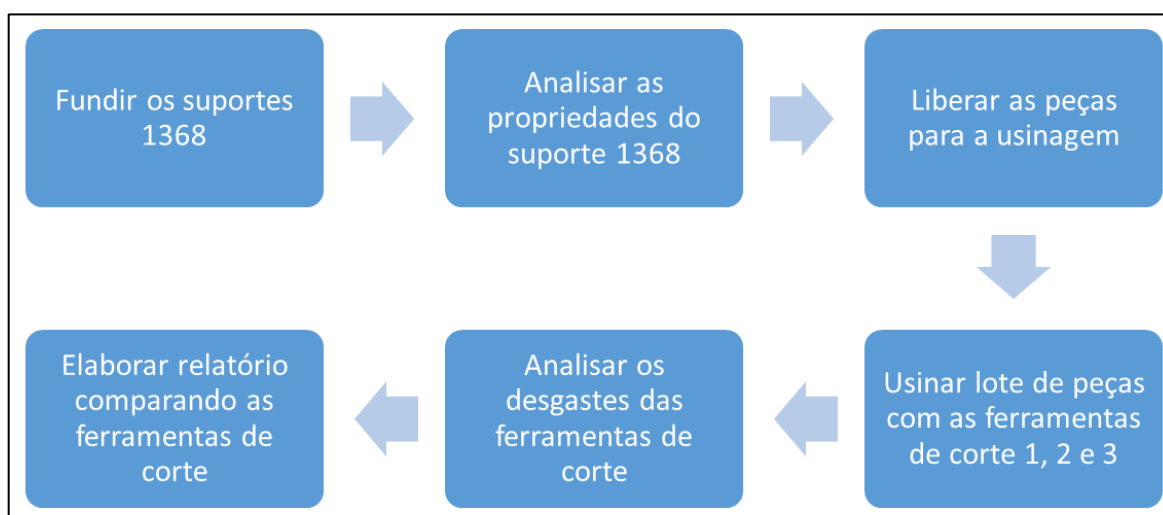
3.6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após a realização da fundição das peças, foi disponibilizado uma amostra para as análises de dureza superficial, microestrutura, composição química e resistência à tração, bem como os procedimentos internos da Castertech para liberação do lote de peças. Todos os resultados obtidos, foram devidamente catalogados e referenciados posteriormente.

Para o processo de usinagem, foi realizado o fresamento dos suportes 1368 de forma sequencial, avaliando todos os gumes das ferramentas de corte. Ao iniciar cada ensaio de usinagem foram utilizados insertos novos, conforme especificações predefinidas. O tamanho da amostragem foi definido conforme cada ferramenta de corte apresentava fim de vida em quatro gumes. Tal análise ocorre para uma maior amostragem, e para comprovação e validação dos resultados encontrados nos testes.

Durante a realização de todos os ensaios de usinagem, as ferramentas de corte foram catalogadas e os resultados referenciados de acordo com cada ferramenta ensaiada. Com base nas medições de desgaste e dados coletados, foi realizado a análise do desgaste das ferramentas de corte, e esta análise foi transcrita em gráficos da vida útil da ferramenta. A Figura 28, apresenta de forma resumida o fluxograma para a execução das etapas do processo de coleta de dados.

Figura 28 – Fluxograma da execução do procedimento experimental



Fonte: O autor (2021)

3.6.1 Avaliação da vida útil e desgastes das ferramentas

Como critério para definição de fim de vida, foi avaliado o dimensional e acabamento da usinagem dos suportes, sendo que os mesmos não podem apresentar rebarbas ou imperfeições que afetem a montagem, segurança dos operadores ou o visual das peças. Também foi considerado como fim de vida, a quebra ou lascamento da ferramenta de corte, e ainda um desgaste de flanco máximo de corte ($V_{bmáx}$) estipulado em 0,5mm. A literatura baseada na ABNT NBR ISO 3685, sugere um $V_{bmáx}$ de 0,6mm para critério de vida em ferramentas de metal-duro, porém à fim de evitar alterações dimensionais ou rebarbas, foi considerado o $V_{bmáx}$ acima informado. Estes controles foram realizados a cada final de ciclo de usinagem, ou seja, a cada quatro peças fresadas.

As possíveis vibrações e ruídos durante o fresamento, foram analisados apenas de forma empírica, pelo próprio operador, sem outros equipamentos para coleta de dados. Tais informações não foram usadas como parâmetros para análise dos resultados coletados.

O desgaste das ferramentas de corte foi avaliado por meio de microscópio ótico, sendo medida a largura do desgaste de flanco após o término do processo de fresamento. Também foram obtidas imagens de seu real estado com objetivo de apresentar e detalhar os mecanismos de desgaste dos insertos.

3.7 ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Após a realização de cada etapa dos processos de fresamento, foi identificado o tipo de desgaste presente, tendo como base, os critérios de fim de vida das ferramentas previamente apresentados. Visto que os parâmetros de corte foram os mesmos para as ferramentas avaliadas, não haverá diferença nos tempos de usinagem, e afim de obter os custos e ganhos financeiros com a alteração de ferramentas de corte, foi avaliado e comparado a quantidade de peças produzidas por gume em cada ferramenta. O Apêndice A apresenta a forma da coleta de dados e amostragem realizada, bem como os mecanismos e desgaste avaliados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são exibidos e abordados os resultados obtidos nos ensaios apresentados no capítulo 3. Como forma de obter uma melhor confiabilidade de dados, além do ensaio inicial, realizou-se réplicas do experimento com cada inserto avaliado. As discussões são apresentadas de forma separada para cada ferramenta de corte aplicada durante o processo de usinagem, e posteriormente realizado o comparativo geral.

4.1 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS E MECÂNICAS

Com o objetivo de garantir o atendimento às especificações de material, e reduzir variação no processo de usinagem, realizou-se as medições e análise das amostras do lote fundido do suporte 1368.

As amostras do lote fundido foram primeiramente enviadas para a identificação da microestrutura no microscópio metalográfico, e para análise de composição química no equipamento de espectro. Estes dados foram analisados juntamente com a equipe da qualidade, e ambas amostras apresentaram composições químicas e de microestruturas em conformidade com os limites especificados em projeto, deste modo, as peças foram liberadas para a manufatura. Os Quadros 2 e 3 apresentam respectivamente os valores encontrados para estas duas análises, e a Figura 29 ilustra a microestrutura presente no fundido.

Quadro 2 – Resultado da microestrutura do fundido

| Fases | Especificado | Encontrado |
|-------------------------|---|-------------|
| Ferrita | Matriz orientativa Ferrita - Perlita | 85% Ferrita |
| Perlita | | 15% Perlita |
| Carboneto | 0% | 0 |
| Nodularização | 80% Min. | 0,93 |
| Nódulos mm ² | Informativo | 375 |
| Tamanho | Informativo | 7 e 8 |
| Nodularização CP | 80% Min. | NM |
| Grafita | Forma IV | Forma IV |

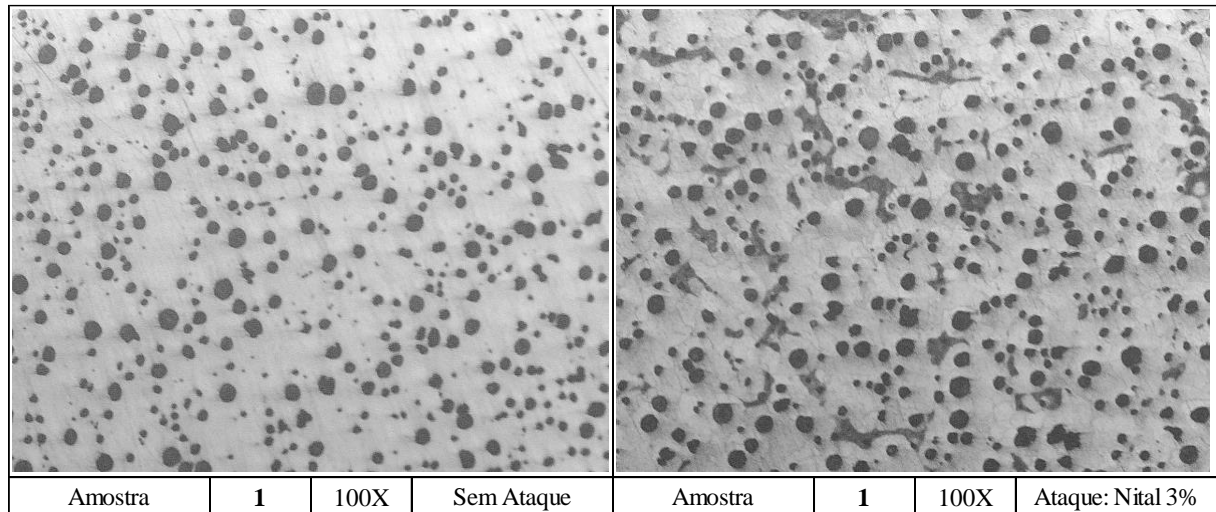
Fonte: O autor (2021)

Quadro 3 – Resultado da composição química do fundido

| Espectrometria realizada (%) | | | | | | |
|------------------------------|------|-------|-------|--------|-------|--------|
| C | Si | Mn | P | S | Mg | B |
| 3,57 | 2,33 | 0,446 | 0,025 | 0,0028 | 0,037 | 0,0005 |

Fonte: O autor (2021)

Figura 29 – Microestrutura na amostra do suporte 1368



Fonte: O autor (2021) – Escala 100:1

Para realizar a medição da dureza dos suportes 1368, as amostras foram encaminhadas para análise em durômetro. Posteriormente, estas amostras foram preparadas em corpos de provas para realização do ensaio de tração, onde as mesmas foram tracionadas no sentido axial até a ruptura destes corpos de provas. No Quadro 4, são apresentados os resultados obtidos para dureza e o ensaio de tração, onde todos dados foram avaliados e estão dentro dos limites especificados.

Quadro 4 – Resultado das propriedades mecânicas do fundido

| Propriedade | Especificado | Encontrado |
|-----------------------------|--------------|------------|
| Dureza da peça fundida (HB) | 156 a 217 | 164 a 173 |
| Resistência à tração (MPa) | 450 | 507 |
| Limite de escoamento (MPa) | 295 | 339 |
| Alongamento (%) | 12 | 17 |

Fonte: O autor (2021)

Após a análise metalográfica das amostras, foi possível identificar uma matriz 85% perlítica, com grafita do tipo VI e apresentando nodularização de 93% com tamanho na faixa

de 7 a 8, atendendo especificações da norma ASTM A247. A estrutura apresenta uma elevada resistência ao desgaste, sendo indicado para componentes mecânicos (CHIAVERINI, 1986).

4.2 ANÁLISE DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE

A fim de reduzir as variáveis que possam influenciar no desgaste das ferramentas de corte, além de controlar as propriedades químicas e mecânicas das peças fundidas, Mitsubishi (2021), recomenda avaliar o batimento das ferramentas e dos insertos. Para tanto, foi utilizado a máquina de pré-ajuste de ferramentas da marca Zoller, onde as medições de batimento radial e axial, apresentaram valores entre 0,022 mm e 0,031mm, sendo um pouco acima do limite apresentado por Kline e Devor (1983), que é 0,0254mm. Para Cavaler (2003), quanto menor for a medição do batimento, mais equilibrada é a carga de trabalho sobre cada gume, melhorando assim, a vida útil das ferramentas de corte e o acabamento das peças.

Analisando o desgaste nas ferramentas de corte mencionadas na seção 3.3, foi realizada a coleta de dados, aos quais são apresentados na Tabela 4. Nesta, é possível verificar os resultados para o desgaste de flanco ($V_{bmáx}$) em cada uma das amostras, bem como a quantidade de peças usinadas por gume. Ainda, pode ser verificado que as amostras não apresentaram quebras de gumes, que estavam previstas na coleta de dados.

Tabela 4 – Dados desgaste das ferramentas de corte analisadas

| Ferramenta | Fim de vida da ferramenta | $V_{bmáx}$ (mm) | Qtd. de peças usinadas por gume |
|---|---------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 335 (1) | 3 | 0,27 | 37 |
| 335 (2) | 4 | 0,37 | 43 |
| 335 (3) | 4 | 0,37 | 45 |
| 335 (4) | 3 | 0,35 | 42 |
| LNKT (1) | 3 | 0,40 | 47 |
| LNKT (2) | 3 | 0,43 | 48 |
| LNKT (3) | 4 | 0,60 | 54 |
| LNKT (4) | 3 | 0,45 | 51 |
| SNMU (1) | 2 | 0,12 | 88 |
| SNMU (2) | 3 | 0,18 | 95 |
| SNMU (3) | 3 | 0,18 | 98 |
| SNMU (4) | 2 | 0,11 | 92 |
| Critério de fim de vida da ferramenta: | | | |
| (1) Quebra/ lascamento | | (2) Sem desgaste | |
| (3) Acabamento | | (4) Ruído/ vibração | |

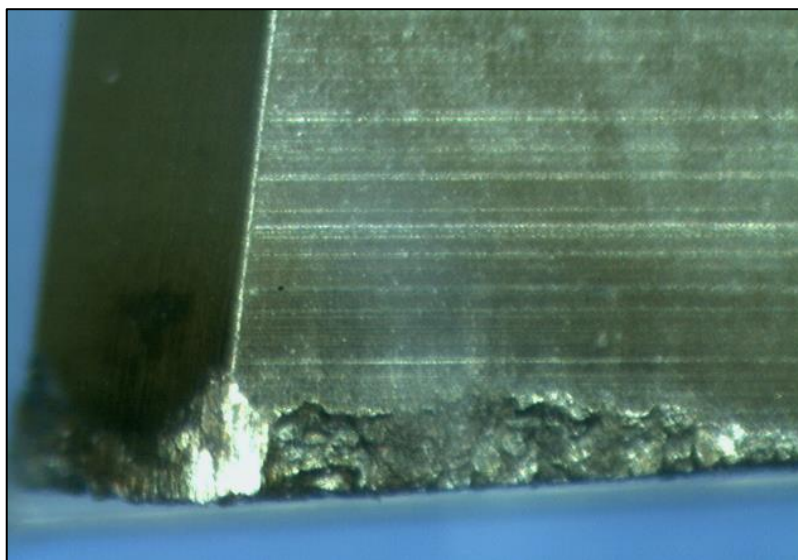
Fonte: O autor (2021)

O menor desgaste pode ser observado na quarta amostra do inserto SNMU, apresentando $V_{bm\acute{a}x}$ de 0,11mm, e, o maior desgaste fica evidenciado na terceira amostra do inserto LNKT, com $V_{bm\acute{a}x}$ de 0,60mm. Tais resultados estão dentro dos critérios apresentados na norma ABNT NBR ISO 3685, embora, uma das amostras tenha atingido o valor máximo recomendado para o desgaste.

Ainda, se pode observar que a fresa LNKT, que apresentou o maior desgaste, possui maior número de gumes. Tal informação converge com estudos apresentados por Santos (2001), onde a correta determinação do número de gumes tem influência direta sobre o acabamento, a força de corte, a vida da ferramenta, o tempo de corte, e ainda, a potência consumida no processo. Em condições de corte constantes, o aumento no número de gumes resulta em uma maior energia específica para remoção de material.

Na Figura 30 pode-se observar o desgaste de adesão e abrasão, juntamente com pequenos lascamentos apresentados na amostra 1 do inserto 335, após realizar usinagem de 37 peças. A medição de desgaste nesse primeiro ensaio foi de $V_{bm\acute{a}x} = 0,27$ mm, sendo o menor desgaste evidenciado nesta família de insertos.

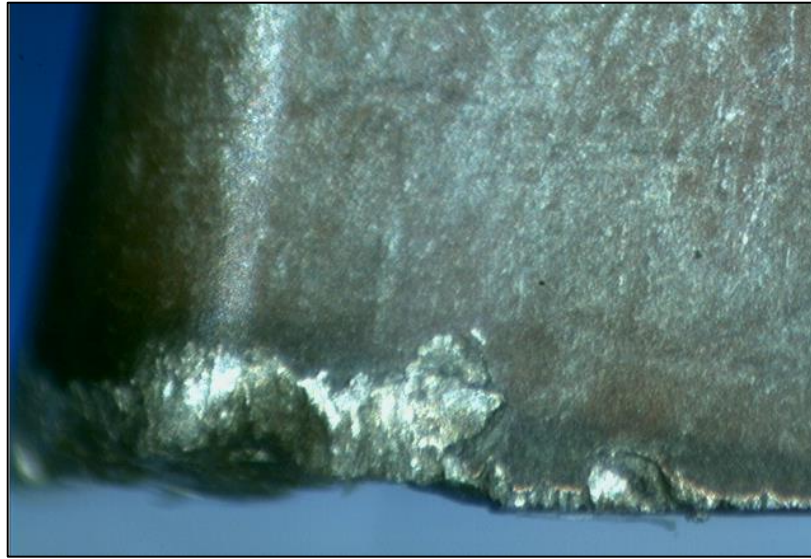
Figura 30 – Desgaste inserto 335 na amostra 1, com ampliação 30x



Fonte: O autor (2021) – Escala 30:1

A menor medição de desgaste encontrado na família das ferramentas LNKT foi evidenciado no primeiro ensaio, onde foi obtido o valor de $V_{bm\acute{a}x} = 0,40$ mm, ao qual pode ser verificado na Figura 31. Também é possível notar que o mecanismo de desgaste que se destaca é a abrasão, havendo lascamentos nos flancos, sendo semelhante aos estudos apresentados por Teti (2002).

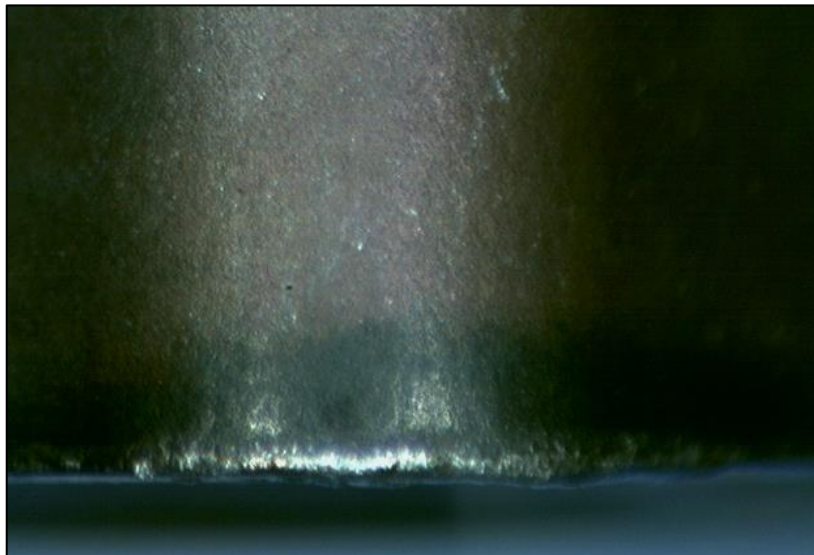
Figura 31 – Desgaste inserto LNKT na amostra 1, com ampliação 30x



Fonte: O autor (2021) – Escala 30:1

Para a família de insertos SNMU, o menor desgaste dos insertos foi evidenciado na amostra 4, que apresentou o valor de $V_{bmáx} = 0,11$ mm. A Figura 32 apresenta o desgaste obtido neste ensaio, onde pode ser observado que o desgaste de flanco é uniforme, consistente e controlável, sendo o fenômeno de desgaste mais desejável e esperado para as coberturas por PVD (Seco Tools, 2019).

Figura 32 – Desgaste inserto SNMU (amostra 4), com ampliação 30x



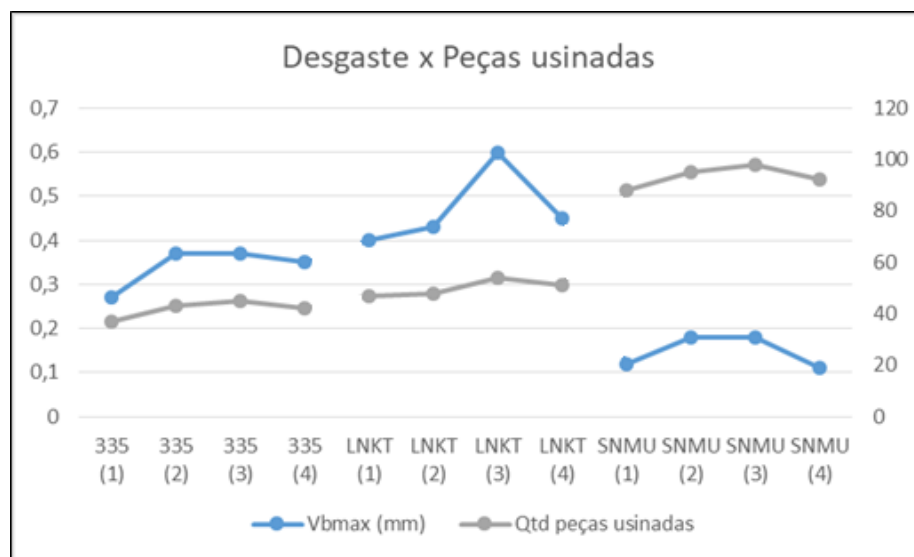
Fonte: O autor (2021) – Escala 30:1

No processo de usinagem, os mecanismos de desgaste predominantes nas amostras dos insertos foram abrasão e adesão. A ação do desgaste por abrasão ocorre porque o material

aderido, juntamente com o atrito devido aos constantes choques sofridos pelas constantes entradas e saídas da ferramenta na peça, vai removendo a camada de revestimento do inserto, tornando-a mais vulnerável à ação da abrasão e a solicitações térmicas, ocasionando desgaste de flanco e lascamentos. Ainda, ocorre o aumento do esforço de corte e piora da qualidade superficial da peça. O desgaste acima descrito é semelhante ao encontrado nas pesquisas de Weinert (1993) e Teti (2002).

No comportamento do desgaste e da vida útil de cada ferramenta de corte é possível verificar as diferenças de desgaste $V_{b\text{máx}}$ e o rendimento de peças usinadas por gume. Para melhor comparar e observar a tendência do desgaste de cada um dos insertos ensaiados, foi plotado o gráfico apresentado na Figura 33, onde a linha azul representa o desgaste, e a linha cinza representa a quantidade de peças usinadas por gume. Para complementar o comparativo de desgastes, no Apêndice B, é possível observar a imagem do desgaste obtido em cada inserto analisado.

Figura 33 – Gráfico comparativo do desgaste das ferramentas de corte analisadas



Fonte: O autor (2021)

A variação do desgaste entre insertos de mesma família, como o pico observado no inserto LNKT, pode ser causada pela quantidade de peças ser diferente em cada amostragem, pela diferença de batimento das ferramentas e insertos, ou ainda, por alguma pequena imperfeição causada por falha no processo de jateamento do fundido, mesmo que estes foram previamente avaliados. É importante destacar que os parâmetros de corte previamente definidos, permaneceram inalterados durante as réplicas dos ensaios.

4.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Para realizar a avaliação econômica das ferramentas de corte no processo de usinagem, não deve ser visto somente o custo dos insertos. Devem ser avaliados outros fatores, como a redução do desgaste dos insertos e o potencial aumento da quantidade média de peças usinadas por gume. Tais fatores auxiliam na redução de mão de obra envolvida com a troca e o ajuste de insertos e ainda, na redução do tempo para tais operações. A fim de analisar a economia gerada, foram comparados os custos das três ferramentas analisadas, observando o gasto ao usar cada peça. Tais dados são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Comparativo de custo das ferramentas em função da vida útil

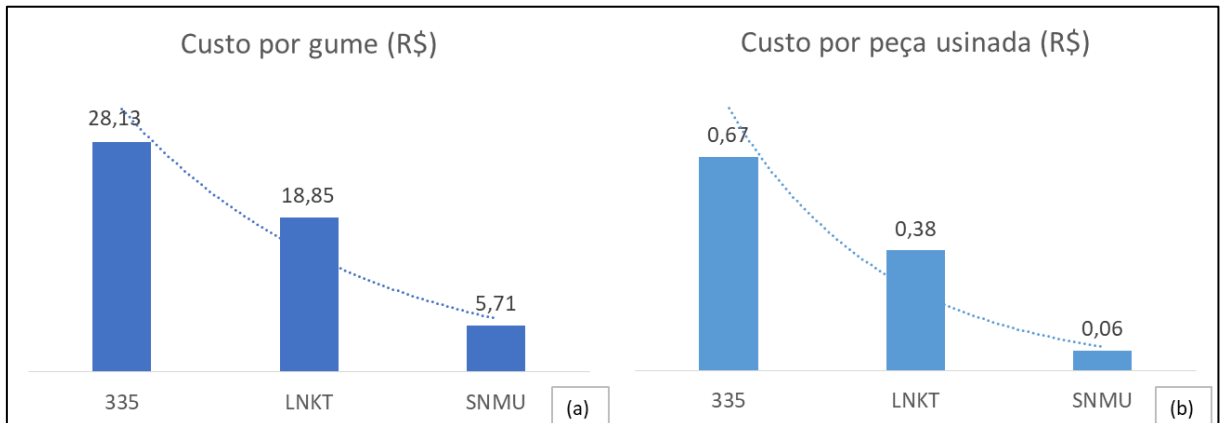
| Inserto | Gumes úteis | Custo inserto (R\$) | Custo por gume (R\$) | Custo por peça usinada (R\$) | Média peças usinadas por gume |
|---------|-------------|---------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 335 | 2 | 56,26 | 28,13 | 0,67 | 42 |
| LNKT | 2 | 37,69 | 18,85 | 0,38 | 50 |
| SNMU | 8 | 45,68 | 5,71 | 0,06 | 93 |

Fonte: O autor (2021)

Com base nos resultados dos testes comparativos entre as três ferramentas, pode-se concluir que a usinagem utilizando o inserto SNMU foi a condição que apresentou melhor desempenho do ponto de vista econômico. Devido ao inserto SNMU possuir maior número de gumes comparado aos demais insertos avaliados, seu custo total foi diluído em um número maior, fazendo seu custo ser menor, conforme é ilustrado na Figura 34 (a).

Além de possuir maior quantidade de gumes, o inserto SNMU também apresentou maior rendimento médio de usinagem de peças por gume, quando comparado ao processo inicial, por conseguinte, reduziu em praticamente dez vezes o custo por peça usinada, conforme apresentado na Figura 34 (b).

Figura 34 – Gráfico comparativo do custo dos gumes (a) e custo por peça (b)



Fonte: O autor (2021)

Outra vantagem para a ferramenta SNMU, é sua geometria e formato, que conta com ângulo de ponta grande, e ainda, raio de ponta maior que as demais ferramentas analisadas, conforme apresentado na Figura 35. Tal condição oportuniza gumes mais robustos e uma maior força de corte, o que ajuda explicar os resultados extensamente melhores frente às demais ferramentas avaliadas (SECO TOOLS, 2018).

Figura 35 – Geometria das ferramentas de corte

| Ilustração inserto e Quebra-cavaco | | | |
|------------------------------------|--------|--------|--------|
| Inserto | LNKT | 335 | SNMU |
| Espessura (S) | 5,00mm | 5,40mm | 4,80mm |
| Raio de ponta (RE) | 0,80mm | 0,00mm | 1,00mm |
| Ângulo formato inserto | 90° | 80° | 90° |
| Ângulo de folga | 15° | 0° | 0° |

Fonte: Adaptado de Seco Tools (2018)

É importante ressaltar, que os parâmetros de corte foram fixados de forma a atender todos limites recomendados pelos fabricantes das ferramentas de corte. Uma vez que as ferramentas de corte possuem recomendações específicas, em trabalhos futuros, estas podem ser reavaliadas, utilizando os parâmetros de corte otimizados, assim, obtendo uma melhor performance de cada uma.

5 CONCLUSÃO

Com uma constante necessidade de reduzir custos com ferramentas, e considerando que existem diversos fabricantes de insertos no mercado, a escolha de ferramentas que possam trazer melhores resultados, se torna uma difícil tarefa para as empresas. Em virtude disso, é necessário seguir critérios na escolha, sendo os ensaios com diferentes tipos de insertos uma forma eficaz de obter resultados e comparações.

Juntamente com a avaliação do desempenho dos insertos, foi avaliado e garantido que as especificações dimensionais e de acabamento da peça avaliada fossem atendidas. Foram realizadas quatro avaliações com cada um dos tipos de insertos selecionados e observou-se que houveram variações de desgaste entre insertos de mesmo tipo. Os mecanismos de desgaste predominantes nas amostras foram abrasão e adesão, ocasionando desgaste de flanco e pequenos lascamentos, mas, no contexto geral, os insertos avaliados obtiveram bom desempenho.

Ao relacionar os gráficos de desgaste e quantidade de peças usinadas por gume, foi observada uma certa semelhança no comportamento das ferramentas 335 e LNKT. O processo inicial com a ferramenta 335 apresentou rendimento de em média 42 peças usinadas com cada gume. Após, com a ferramenta LNKT, a média de peças aumentou para 50 peças, o que já foi uma melhora significativa, porém, ao fim deste estudo, os resultados apresentados permitem que seja afirmado que a ferramenta SNMU, obteve melhores resultados e custo benefício. Esta ferramenta obteve rendimento médio de peças por gume duas vezes maior que o processo inicial, e ainda, um custo reduzido em praticamente 10 vezes. Outro fator que auxiliou de forma positiva na escolha dos insertos SNMU, foi a sua geometria que difere dos demais insertos avaliados, possibilitando obter uma maior utilização dos mesmos, sem restar gumes sem uso. Ainda, por este inserto apresentar o menor desgaste de flanco, antes do fim de vida, poderão ser usinadas mais peças por gume sem afetar dimensional ou acabamento das peças.

Para finalizar, é importante destacar que os resultados dos ensaios obtidos neste trabalho são válidos para as condições e parâmetros previamente apresentados. Estes dados podem variar conforme a aplicação em outras máquinas, condições de corte ou ainda com o tipo das ferramentas utilizadas para fixação dos insertos, e o batimento nelas apresentado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM A247**: Standard Test Method for Evaluation the Microstructure of Graphite in Iron Castings, 2016.

ABNT NBR ISO 3685. Ensaio de vida da Ferramenta de ponta única para torneamento. [s.n.] 2017.

ANFIR. **Desempenho do setor - Janeiro a Dezembro de 2020**. Disponível em: <https://www.anfir.org.br/dados-do-setor.php>. Acesso em: 16 mar. 2021.

ANFIR. **Desempenho do setor - Janeiro e Fevereiro de 2021**. Disponível em: <https://www.anfir.org.br/dados-do-setor.php>. Acesso em: 16 mar. 2021.

BALDAM, Roquemar de Lima; VIEIRA, Estéfano Aparecido. **Fundição: processos e tecnologias correlatas**. 2ª ed. rev., São Paulo, Érica, 2014.

BOEHS, L., AGUIAR, C. G., FERREIRA, J.C., **A Usinagem do ferro fundido nodular de fundição contínua**. Máquinas e Metais, pp.58-72, Jul. 2000.

CAVALER, Luiz Carlos de Cesaro, **Fresamento periférico do aço AISI-SAE D6 temperado e revenido utilizando fresas de metal-duro**. Tese (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7.ed. ampl. e rev. São Paulo, ABM, 1996.

CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica, vol. 2: **Processos de Fabricação e Tratamento**, 2ª ed., São Paulo, McGraw-Hill, 1986.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora M.M.1999.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 5ª ed., São Paulo, Editora Artiliber, 2006.

FERNANDINO, D.O.; TENAGLIA, N.; COCCO, V. di; BOERI, R.e.; IACOVIELLO, F.. **Relation between microstructural heterogeneities and damage mechanisms of a ferritic spheroidal graphite cast iron during tensile loading**. Fatigue & Fracture Of Engineering Materials & Structures, [S.L.], v. 43, n. 6, p. 1262-1273, 17 mar. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/ffe.13221>.

FERRARESI, D., **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1969.

FRACARO, J., **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle**. 1ª ed. Curitiba; Inter Sabers, 2017.

GOODRICH, G. M., **Cast Iron Microstructure Anomalies and their causes**. American Foundry Society (AFS), Illinois, 1997.

KIMINAMI, C.S.; CASTRO, W.B.D.; OLIVEIRA, M.F.D. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. Editora Blucher, 2013.

KISHAWY H. A., DUMITRESCU M., NG E. -G., ELBESTAWI M.A., **Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005.

KLINE, W. A., e DEVOR, R. E. **The effect of runout on cutting geometry and forces in end milling**. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1983.

KÖNIG, Wilfried; KLOCKE, Fritz. **Fertigungsverfahren - Drehen, Bohren, Fräsen**. Aachen, Alemanha: Springer Verlag, 1997.

OKUMA, **Machining Centers**. Disponível em: <https://www.okuma.com/machining-centers>. Acesso em: 20 maio. 2021.

MACHADO, Álisson Rocha; COELHO, Reginaldo Teixeira; ABRÃO, Alexandre Mendes; SILVA, Márcio Bacci da, **Teoria da usinagem dos materiais**. 3ª ed. São Paulo: Editora Blücher, 2015.

MITSUBISHI. **Informações Técnicas**. Disponível em: http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/index.html. Acesso em: 20 out. 2021.

REBEYKA, C. J. **Princípios dos processos de fabricação por usinagem**. 1ª ed. Curitiba: Intersaberes, 2016.

SANDVIK. **Manual técnico de treinamento Tecnologia em Usinagem**. [s.n.], 2017.

SANDVIK. **Materials**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/materials/pages/default.aspx>. Acesso em: 20 abr. 2021.

SANTOS, André Luís Beloni dos. **Metodologia via redes neurais para a estimativa da rugosidade e do desgaste de ferramentas de corte no processo de fresamento frontal**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2001.

SECO TOOLS. **Catálogo e guia Técnico – Fresamento**. [s.n.], 2018.

SECO TOOLS. **Catalog & Technical guide – Milling**. [s.n.], 2021.

SECO TOOLS. **Catálogo e guia Técnico – Torneamento**. [s.n.], 2019.

SIQUEIRA, Victor Arrais; CHEIKH, Elhadji; SILVA, Adelti Assis; GOMES, Mariana; CRUZ, Matheus; FERNANDES, Gustavo; SANTOS, Mariana Rocha Dutra; COSTA, Vinícius; SÉRGIO, Paulo. **Influência do fluido de corte na formação de cavaco durante o torneamento – Liga de Alumínio 6351 T6**. Anais do X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador, BA, 2018. ABCM. <http://dx.doi.org/10.26678/abcm.conem2018.con18-0504>.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE J434. **Automotive Ductile (Nodular) Iron Castings**. USA, 2004.

SOUZA, André; HUBNER, Henrique. **Avaliação da rugosidade gerada no fresamento frontal assimétrico do ferro fundido nodular DIN GGG50**. VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 10 a 15 de ago. 2014, Uberlândia, MG.

STEMMER, C. E., **Ferramentas de corte I**. 3 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, Série Didática, 1993.

TELES, José Marcelo. **Torneamento de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizando ferramentas de metal-duro**. Itajubá, MG, [s.n.], 2007.

TETI, R. **Machining of Composite Materials**. CIRP Annals, 2002.

TOOPTONG, Sirisak; PARK, Kyung-Hee; KWON, Patrick. **A comparative investigation on flank wear when turning three cast irons**. Tribology International, [S.L.], v. 120, p. 127-139, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.025>.

VALIM, D. B., **Usinagem**. Porto Alegre: Editora SAGAH, 2018.

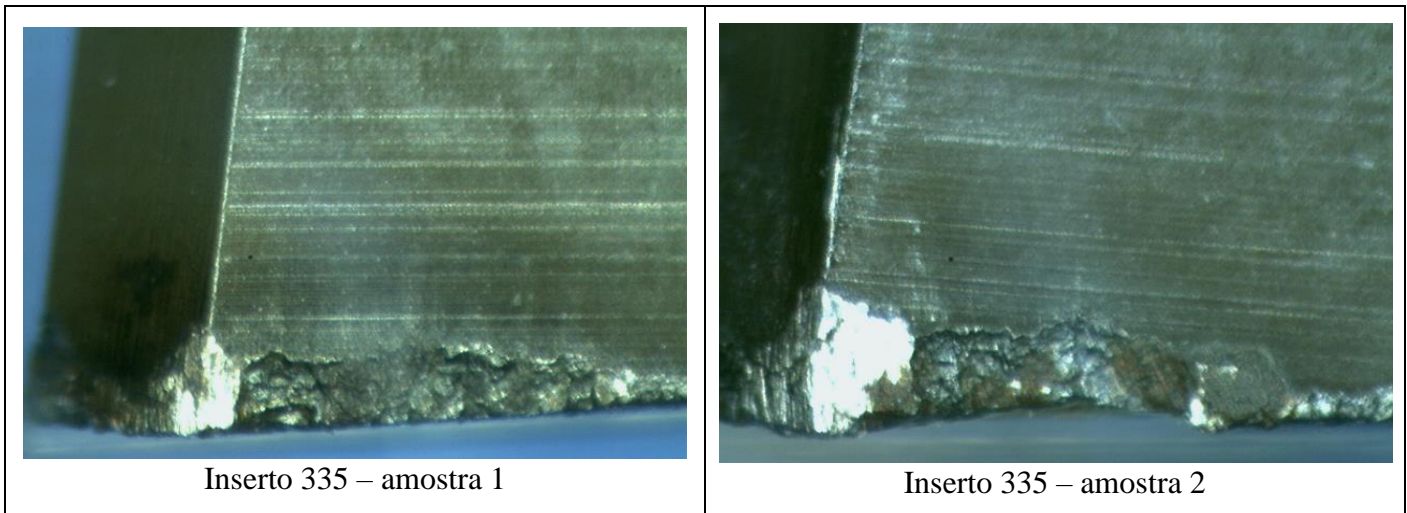
ZEILMANN, R. P.; VACARO, T.; BORDIN, F. M.; SONDA, V. **Processos de usinagem e responsabilidade ambiental através da redução da utilização de fluidos de corte**, XVII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, 16 e 17 set. 2009, São Paulo, SP.

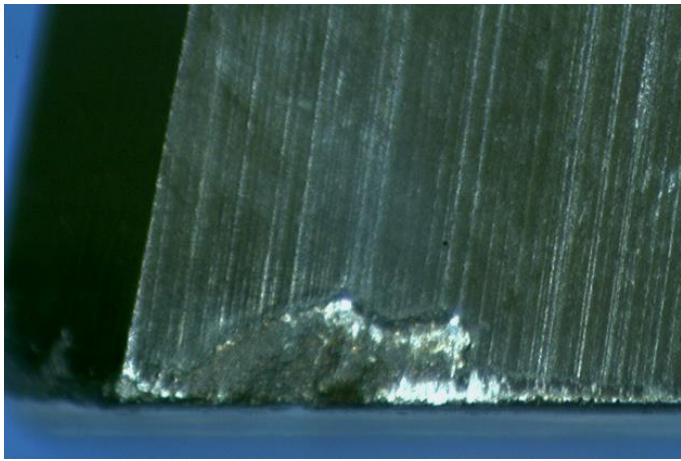
WEINERT, K., KÖNIG, W. **A consideration of tool wear mechanism when Machining Metal Matrix Composites (MMC)**. CIRP Annals, 1993.

APÊNDICE A – TABELA COLETA DE DADOS

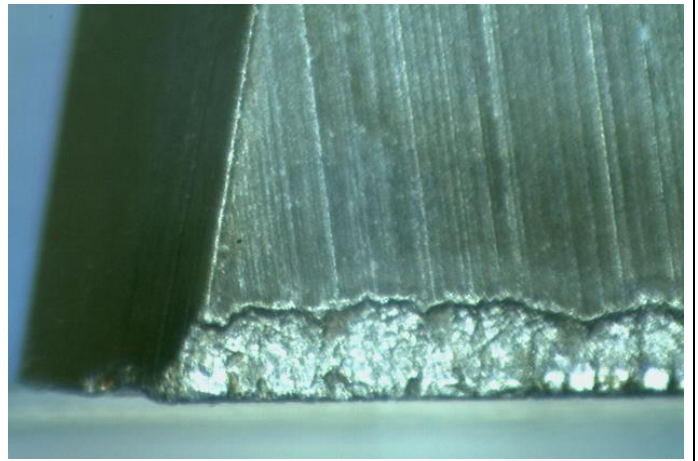
| Ferramenta | Fim de vida da ferramenta | $V_{bmáx}$ (mm) | Qtd. de peças usinadas por gume |
|---|---------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 335 (1) | | | |
| 335 (2) | | | |
| 335 (3) | | | |
| 335 (4) | | | |
| LNKT (1) | | | |
| LNKT (2) | | | |
| LNKT (3) | | | |
| LNKT (4) | | | |
| SNMU (1) | | | |
| SNMU (2) | | | |
| SNMU (3) | | | |
| SNMU (4) | | | |
| Critério de fim de vida da ferramenta: | | | |
| (1) Quebra/ lascamento | | (2) Sem desgaste | |
| (3) Acabamento | | (4) Ruído/ vibração | |

APÊNDICE B – FOTOS DESGASTE DOS INSERTOS

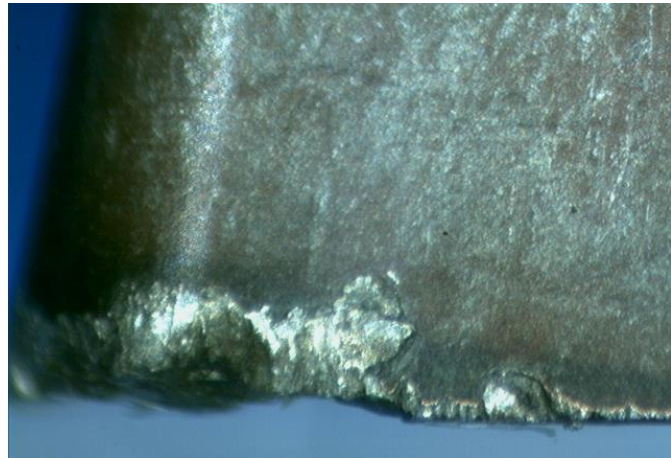




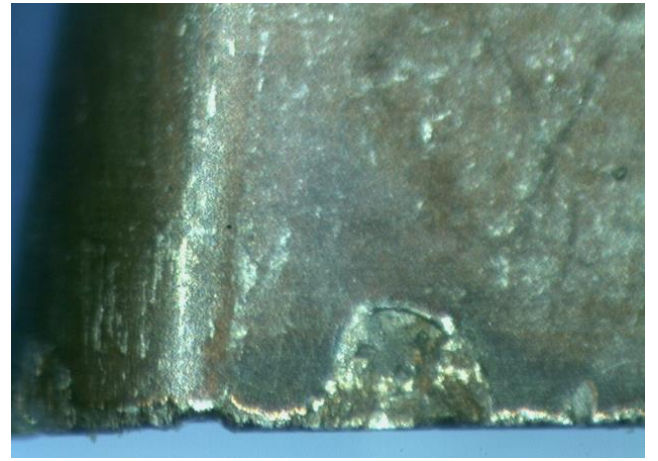
Inseto 335 – amostra 3



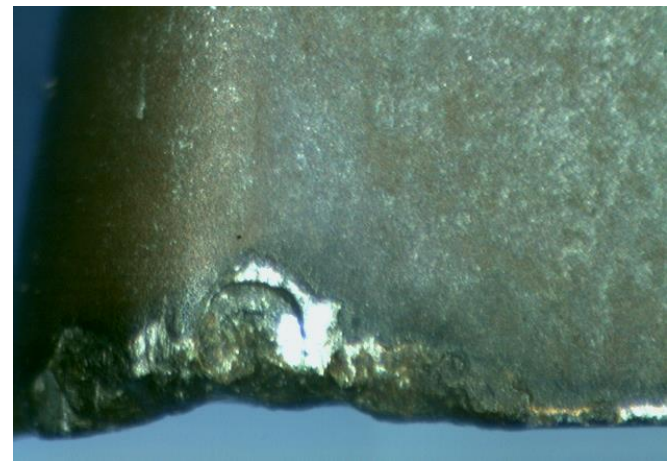
Inseto 335 – amostra 4



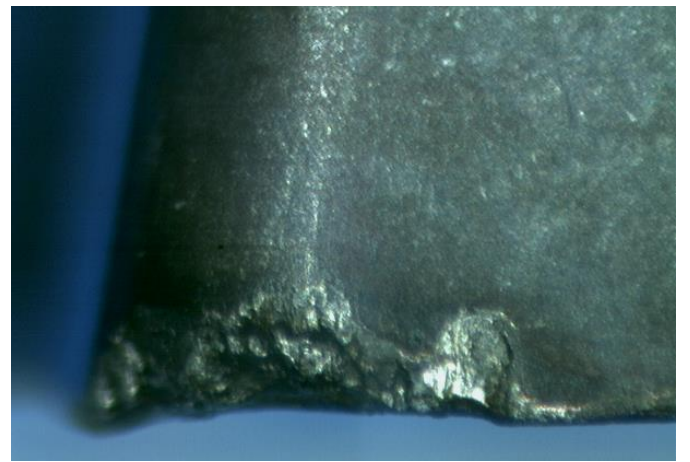
Inseto LNKT – amostra 1



Inseto LNKT – amostra 2



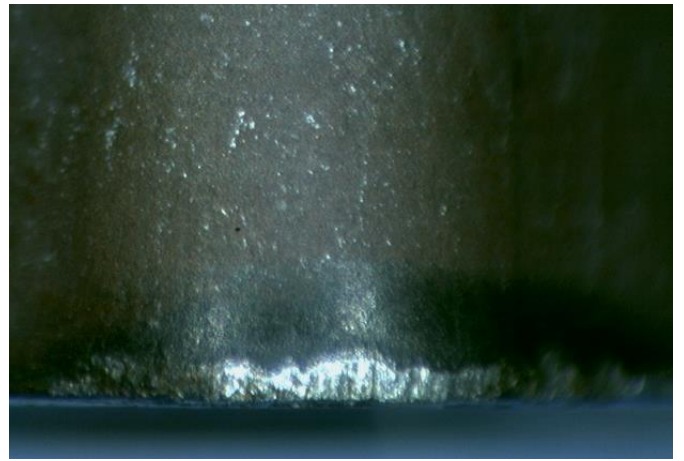
Inseto LNKT – amostra 3



Inseto LNKT – amostra 4



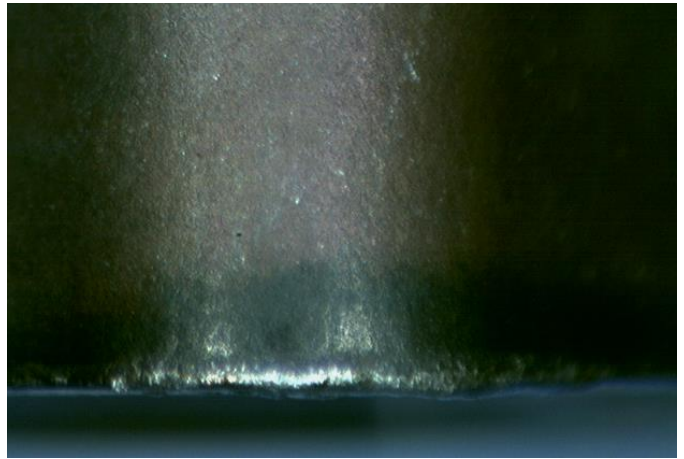
Inserto SNMU – amostra 1



Inserto SNMU – amostra 2



Inserto SNMU – amostra 3



Inserto SNMU – amostra 4