

ALCIONE DOS REIS

**Fresamento Frontal de Ferros Fundidos de Alta
Resistência**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

ALCIONE DOS REIS

Fresamento Frontal de Ferros Fundidos de Alta Resistência

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

Co - Orientador: Prof. Dr. Wilson Luiz Guesser

UBERLANDIA – MG

2019

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R375
2019

Reis, Alcione dos, 1976-
Fresamento Frontal de Ferros Fundidos de Alta Resistência
[recurso eletrônico] / Alcione dos Reis. - 2019.

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado.
Coorientador: Prof. Dr. Wilson Luiz Guesser.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-
graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2543>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Machado, Prof. Dr. Álisson Rocha,
1956-, (Orient.). II. Guesser, Prof. Dr. Wilson Luiz, 1951-,
(Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-
graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br


ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, nº 284, COPEM				
Data:	onze de dezembro de dois mil e dezenove	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	18:10
Matrícula do Discente:	11513EMC001				
Nome do Discente:	Alcione dos Reis				
Título do Trabalho:	Fresamento Frontal de Ferros Fundidos de Alta Resistência				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Usinagem de ferro fundido cinzento de alta resistência.				

Reuniu-se na Sala de Defesa da Pós Graduação sala 206- Bloco 1M, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Carlos Eiji Hirata Ventura - UFSCAR; João Roberto Ferreira - UNIFEI; Rosemar Batista da Silva - FEMEC/UFU; Washington Martins da Silva Júnior - FEMEC/UFU, Álisson Rocha Machado - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Álisson Rocha Machado, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Álisson Rocha Machado, Professor(a) do Magistério Superior**, em 11/12/2019, às 18:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Washington Martins da Silva Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 11/12/2019, às 18:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eiji Hirata Ventura, Usuário Externo**, em 11/12/2019, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Roberto Ferreira, Usuário Externo**, em 11/12/2019, às 18:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 11/12/2019, às 18:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1734730** e o código CRC **F5712AEC**.

*“Solidários, seremos união.
Separados uns dos outros seremos pontos de vista.
Juntos, alcançaremos a realização de nossos propósitos.”*
Bezerra de Menezes

DEDICATÓRIA

*À minha querida esposa Fernanda,
e aos meus filhos Ítalo Bruno, Mariana e Maria Eduarda
pelo carinho e compreensão nos momentos mais
difíceis para realização deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, eu agradeço por todos os obstáculos que colocastes em meu caminho, pois, nos momentos de dificuldades posso não compreender, mas quando chego ao topo da montanha, reconheço na paisagem a lição que Ele me deu, e na qual o senhor sempre me concedeu a perseverança e o discernimento necessário para concretizar e vencer mais esta etapa da minha vida.

À minha família que sempre me apoiou nos momentos difíceis ao longo desta jornada, estando sempre presente em todos os momentos da minha vida e por sempre acreditar em mim: em especial a minha esposa Fernanda, pela paciência, carinho e pelas suas palavras de incentivo depositadas em mim para o meu sucesso pessoal; aos meus filhos Ítalo Bruno, Mariana e Maria Eduarda, pelo amor incondicional; aos meus pais, Alci e Cleusa, pelo grande amor a mim dedicado e, em especial, a Dona Celeste que sempre me apoiou e acreditou em mim.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realizar este curso.

Ao Prof. Dr. Alisson Rocha Machado, pela orientação, compreensão, estímulo e principalmente paciência em transmitir a mim seus valiosos conhecimentos e por estar sempre à disposição no auxílio e direcionamento para realização deste trabalho de pesquisa.

Aos Professores, Dr. Marcio Bacci da Silva; Dr. Rosemar Batista da Silva, Dr. Arthur Alves Fiocchi; Dr. Wisley Falcon Sales e ao Dr. Éder Silva Costa por estarem sempre prontos a transmitir o auxílio necessário para a realização deste trabalho.

Aos técnicos e colegas do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, pelo apoio e contribuição para desenvolvimento deste trabalho, e aos amigos, Thiago Pereira, Thiago Menezes, Lazaro Henrique, Claudio Nascimento, Aline Elias, Kenji Okada, Deborah Oliveira, Milla Caroline, Leonardo Rosa e Denis Barbosa pelo o auxílio na medição e análise dos resultados.

Ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) pela disponibilização de recursos de análise e microscopia.

À Empresa Tupy Fundições, especialmente ao Sr. Prof. Wilson Luiz Guessser, pela importante participação no estabelecimento das parcerias entre as diferentes instituições, bem como no fornecimento de materiais para a pesquisa, e a Walter Tools pelo fornecimento das ferramentas de corte utilizadas na realização deste trabalho.

REIS, A. **Fresamento Frontal de Ferros Fundidos de Alta Resistência**. 2019. 197 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

RESUMO

Nos últimos anos as indústrias automobilísticas têm buscado implantar na linha de produção a fabricação de motores com maiores pressões na câmara de combustão, portanto, mais eficientes e menos poluentes, a fim de se manterem competitivas no mercado. Para tanto elas procuram utilizar motores mais leves, em função das menores espessuras de parede, conquistado assim um espaço no cenário industrial, de forma a enfrentar à concorrência global. Devido às suas boas propriedades mecânicas e térmicas, o ferro fundido cinzento é utilizado na fabricação de bloco e cabeçote de motores de combustão, pois apresenta características como baixo custo de fabricação e boa usinabilidade devido, principalmente, à grande quantidade de grafita livre em sua microestrutura, boa absorção de vibrações e boa estabilidade dimensional, que passam a ser fundamentais na aplicação destes materiais em peças automotivas. Porém, esta classe de material apresenta um limite de resistência mecânica menor que alguns outros tipos de ferros fundidos, como o vermicular ou Compacted Graphite Iron (CGI). Uma maneira de melhorar o desempenho dos motores de ferro fundido cinzento é aumentar a resistência mecânica desta classe de material. O presente trabalho objetiva avaliar a usinabilidade do ferro fundido de alta resistência, classe FC 300 (FC 300_(Mo+RG)), com adição de molibdênio e refino de grafita, para aplicação em cabeçotes de motores, em comparação com materiais já utilizados para este fim: ferro fundido cinzento FC 250 (FC 250), ferro fundido cinzento FC 300 ligado ao molibdênio (FC 300_(Mo)) e o ferro fundido vermicular da classe FV 450 (CGI). A usinabilidade foi avaliada por ensaios de vida da ferramenta, potência de usinagem e temperatura de corte no processo de fresamento frontal, operação muito utilizada na fabricação de cabeçotes de motores, a seco, com duas geometrias de ferramentas de metal duro, quando também foi medida a rugosidade superficial. Foram variadas duas faixas de velocidades de corte (v_c) = 230 e 350 (m/min) e de avanço por dente (f_z) = 0,1 e 0,2 (mm/dente) e a profundidade de corte foi mantida constante em (a_p) = 1 (mm). Entre os

materiais investigados, o ferro fundido FC 300 (Mo+RG) apresentou piores índices de usinabilidade, resultado da sua maior resistência mecânica e dureza dentre os ferros fundidos cinzentos. Quanto ao acabamento superficial, no início dos testes de vida (sem considerar o desgaste da ferramenta), e empregando a maior velocidade de corte, ele apresentou os melhores resultados, mas na menor velocidade de corte os piores.

Palavras-chave: *ferro fundido de alta resistência, fresamento frontal, desgaste de flanco, rugosidade superficial, forças e potência de usinagem, temperatura de corte.*

REIS, A. **Face Milling of High Strength Cast Irons**. 2019. 197 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

ABSTRACT

In recent years, the automotive industry has sought to implement in the production line engines with higher combustion chamber pressures, therefore, more efficient and less polluting, in order to remain competitive in the market. For this purpose, they try to use lighter engines with smaller wall thicknesses, thus conquering a space in the industrial scenario, aiming the global competition. Due to its mechanical and thermal properties, gray cast iron is used in the manufacturing of blocks and heads of combustion engines, as they possess characteristics such as low manufacturing cost and good machinability mainly because of the large amount of free graphite in its microstructure, good damping and dimensional stability, which become fundamental in the application of these materials in automotive parts. However, this material has lower mechanical strength than some other types of cast irons, such as the Compacted Graphite Iron (CGI). One way to improve the performance of gray cast iron engines is to increase its mechanical strength. The present work aims to evaluate the machinability of high strength gray cast iron FC 300 grade ($FC300_{(Mo+RG)}$), with graphite refinement and alloyed with molybdenum, for application in cylinder heads, in comparison with materials already used for this purpose: gray cast iron FC 250 (FC250), gray cast iron FC 300 alloyed with molybdenum ($FC300_{(Mo)}$) and compacted graphite iron FV 450 (CGI). The machinability was evaluated by tool life trials in the dry face milling process, an operation frequently used in the manufacturing of cylinder heads, with two carbide tool geometries, and the surface roughness was also measured. Two levels of cutting speeds ($v_c = 230$ and 350 (m/min) and feed rates ($f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/tooth) were used. The depth of cut was kept constant at ($a_p = 1$ (mm)). Among the evaluated materials, the $FC300_{(Mo+RG)}$ cast iron presented the worse machinability indexes, as a result of its higher mechanical strength and hardness. As for the surface finishing, at the beginning of the tool life

tests (without considering the wear of the tool), at the highest cutting speed, presented the best results, but at the lowest cutting speed the worst.

Keywords: high strength cast iron, face milling, flank wear, surface roughness, machining force and power, cutting temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de matriz metálica em ferros fundidos: a) ferrita 100x; b) perlita 1.000x (GUESSER, 2009).....	6
Figura 2.2 - Microestrutura do ferro fundido: a) branco; b) cinzento; c) dúctil (ou nodular); d) vermicular; e) maleável (GUESSER, 2009).....	8
Figura 2.3 - Faixa aproximada de quantidades de carbono e silício nas ligas ferrosas (ASM, 1996).....	9
Figura 2.4 - Microestrutura do ferro fundido cinzento classe FC250, (a) revelando a estrutura da grafita (sem ataque, 200X) e (b) também a matriz (com ataque, 400 X) (GUESSER, 2009).....	11
Figura 2.5 – Aplicações típicas de ferros fundidos cinzentos: blocos, cabeçotes e elementos de freios (GUESSER, 2009).....	12
Figura 2.6 - Micrografia do ferro fundido vermicular: (a) Micrografia óptica da peça atacada com Nital; (b) Forma espacial da grafita compactada. MEV 395x. (ASM, 1996; MOCELLIN, 2002).....	15
Figura 2.7 – Aplicações de ferro fundido vermicular na fabricação do bloco motor V6 (GUESSER, 2009).....	16
Figura 2.8 - Morfologia típica da grafita: (a) cinzento; (b) vermicular; (c) nodular (DAWSON et al., 2001).....	19
Figura 2.9 - Forma e distribuição dos veios de grafita, segundo as normas da ASTM e da AFS.....	23
Figura 2.10 - Usinabilidade de diferentes ferros fundidos, onde se avalia a vida da ferramenta até desgaste de flanco de 0,2 mm (CONSALTER et al., 1987 ; GUESSER, 2009).....	27

Figura 2.11 – Vida efetiva de corte em diferentes materiais de ferramenta de corte, para corte interrompido (a) e contínuo (b) do CGI perlítico e do ferro fundido cinzento (Adaptado REUTER et al., 2001).....	32
Figura 2.12 – Vida das ferramentas em relação à usinagem do ferro fundido vermicular e do ferro fundido cinzento em diferentes processos de usinagem (REUTER, 2000, apud XAVIER, 2009).....	33
Figura 2.13 – Comportamento do desgaste da ferramenta cerâmica e metal-duro após usinagem de ferro fundido cinzento (MEURER, 2007).....	34
Figura 2.14 – Fresamento frontal e periférico (Adaptado de STEMMER, 2005).....	35
Figura 2.15 – Modelos de fresas para faceamento (Fonte – CATÁLOGO WALTER TOOLS, 2018).....	39
Figura 2.16 - Geração de calor e distribuição da temperatura na interface ferramenta peça durante o processo de usinagem (BAGETTI, 2009; CIMM, 2015).....	44
Figura 2.17 – Cavaco GG25 quando usinado a 750 m/min: a) vista lateral; b) vista superior (GUENZA, 2008).....	45
Figura 2.18 - Variação cíclica da temperatura de corte no processo de corte interrompido (PALMAI, 1987; MACHADO, 2015).....	47
Figura 2.19 - Diferentes modelos e geometrias de fresas (Fonte – CATÁLOGO WALTER TOOLS, 2018).....	48
Figura 2.20 - Ilustração entre dureza e a tenacidade dos materiais aplicados na fabricação ferramenta de corte (Adaptado - MITSUBISHI MATERIALS, 2018).....	50
Figura 2.21 - Micrografia mostrando a morfologia dos tipos de avaria na ferramenta: a) deformação plástica (MOTA 1994; MACHADO et al., 2015); b) lascamento (LIU, Z.Q, 2002); c) trincas térmicas (METALS HANDBOOK, 1989); d) quebra (LIU, Z.Q, 2002).....	53
Figura 2.22 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (Adaptado - MACHADO et al., 2015).....	54
Figura 2.23 – Mecanismos de desgaste de uma ferramenta de corte (KÖNIG, 1997).....	56

Figura 2.24 - Classificação da Integridade Superficial.....	59
Figura 2.25 - Elementos do acabamento superficial: a) rugosidade superficial; b) ondulações; c) marcas denotando direções das irregularidades; d) falhas (Adaptado de MACHADO et al., 2015).....	61
Figura 3.1 – Fluxograma das principais etapas do projeto.....	66
Figura 3.2 - Ilustração esquemática da geometria dos corpos de prova: (a) barras prismáticas retangulares sem furos; (b) barras prismáticas retangulares dotadas de furos.....	67
Figura 3.3 - Micrografias das superfícies dos materiais sem ataque, obtidas por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV): a) ferro fundido classe FC 250; b) ferro fundido classe FC 300 _(Mo) ; c) ferro fundido classe FC 300 _(Mo+RG) ; d) ferro fundido classe FV450.....	69
Figura 3.4 - Micrografias das superfícies dos materiais com ataque NITAL 3%, obtidas por meio do microscópio óptico: a) ferro fundido classe FC 250; b) ferro fundido classe FC 300 _(Mo) ; c) ferro fundido classe FC 300 _(Mo+RG) ; d) ferro fundido classe FV450.....	70
Figura 3.5 – Exemplo de identificação das inclusões de sulfeto de manganês, amostra de Ferro fundido Classe FC 300 _(Mo)	72
Figura 3.6 - Determinação do espaçamento interlamelar da perlita nos ferro fundidos.....	73
Figura 3.7 - Fresas e ferramentas de metal duro utilizadas nos ensaios de usinabilidade: a) fresa modelo Xtrac-tec [®] com inserto de metal duro de geometria Heptagonal; b) fresa modelo Xtrac-tec [®] com inserto de metal duro de geometria com face dupla.....	75
Figura 3.8 (a) – Geometria e detalhes de fabricação do inserto de metal duro com geometria heptagonal para acabamento (Fonte - CATÁLOGO WALTER TOOLS, 2018).....	76
Figura 3.8 (b) – Geometria e detalhes de fabricação do inserto de metal duro de face dupla utilizada para acabamento (Fonte - CATÁLOGO WALTER TOOLS, 2018).....	76
Figura 3.9 (a) – Geometria e detalhes da fresa modelo Xtrac-tec [®] para inserto de metal duro de geometria Heptagonal (Fonte - CATÁLOGO WALTER TOOLS, 2018).....	77

Figura 3.9 (b) – Geometria e detalhes da fresa a 90° modelo Walter BLAXX para inserto de metal duro de face dupla. (Fonte - CATÁLOGO WALTER TOOLS, 2018).....	77
Figura 3.10 – Montagem, fixação do corpo de prova; a) fresamento frontal com inserto de geometria heptagonal; b) fresamento frontal com inserto de geometria face dupla.....	78
Figura 3.11– Microscópio ferramenteiro SZ6145TR – OLYMPUS.....	81
Figura 3.12 - Sistema de medição de potência proposto.....	82
Figura 3.13 – Sistema de medição proposto para aquisição de temperatura utilizando a câmera termográfica infravermelha FLIR A325.....	84
Figura 4.1 - Quantidade média de partículas de MnS por milímetro quadrado.....	87
Figura 4.2 - Distribuição das áreas das partículas de MnS.....	88
Figura 4.3 (a) - Caracterização do espaçamento interlamelar.....	89
Figura 4.3 (b) - Microdureza da perlita dos materiais estudados.....	90
Figura 4.4 - Imagens comparativas da perlita nos ferros fundidos: a) FC250; b) FC300 (Mo); c) FC300 (Mo + RG); d) FV 450.....	91
Figura 4.5 - Gráfico do comportamento do sinal de corrente medidos ao longo de um teste para material FC250 utilizando ferramenta de geometria (A) para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente).....	92
Figura 4.6 - Gráfico do comportamento do sinal de corrente medidos ao longo de um teste para material FC250 utilizando ferramenta de geometria (B) para a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente).....	93
Figuras 4.7 - Potência do motor para testes com a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	94
Figura 4.8 - Potência do motor para testes com a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	95

Figura 4.9 - Imagens de obtenção da temperatura com a utilização da câmera termográfica infravermelha, durante os testes de usinagem utilizando a ferramenta de geometria (A), e velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min), avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente) e profundidade de corte $a_p = 1,0$ mm.....	90
Figura 4.10 – Gráfico de comportamento do sinal de temperatura para o material FC 250 utilizando ferramenta de geometria (A), velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min); avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente) e profundidade de corte $a_p = 1$ (mm).....	100
Figura 4.11 - Gráfico de comportamento do sinal de temperatura para o material FC 250 utilizando ferramenta de geometria (B), velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min); avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente) e profundidade de corte $a_p = 1$ (mm).....	101
Figura 4.12 - Valores médios de temperatura obtidos durante os testes de usinagem com (a) ferramenta de geometria (A) e (b) ferramenta de geometria (B), com a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min); avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente) e $a_p = 1$ (mm).....	102
Figura 4.13 - Valores médios de temperatura obtidos durante os testes de usinagem com (a) ferramenta de geometria (A) e (b) ferramenta de geometria (B), com a velocidade de corte igual $v_c = 230$ (m/min); avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente) e $a_p = 1$ (mm).....	103
Figura 4.14 - Desgaste de flanco ($VB_{Bmáx.}$) em função do tempo de usinagem para a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e $f_z = 0,1$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	107
Figura 4.15 - Desgaste de flanco ($VB_{B máx.}$) em função do tempo de usinagem para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e $f_z = 0,1$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	108
Figura 4.16 - Desgaste de flanco ($VB_{Bmáx.}$) em função do tempo de usinagem, para a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e $f_z = 0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	110
Figura 4.17 - Desgaste de flanco ($VB_{B máx.}$) em função do tempo de usinagem para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e $f_z = 0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	111

Figura 4.18 - Desgaste de flanco ($VB_{B \text{ máx.}}$) em função do tempo de usinagem para a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e $f_z = 0,2$ (mm/dente) em superfícies dotadas de furos; a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	113
Figura 4.19 - Desgaste de flanco ($VB_{B \text{ máx.}}$) em função do tempo de usinagem para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e $f_z = 0,2$ (mm/dente) em placas de ferros fundidos com superfícies dotadas de furos; a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	114
Figura 4.20 - Valores obtidos do tempo de vida das ferramentas para a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min); $f_z = 0,1$ (mm/dente); $a_p = 1$ (mm); $a_e = 60$ mm; a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	115
Figura 4.21 - Valores obtidos do tempo de vida das ferramentas para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min); $f_z = 0,2$ (mm/dente); $a_p = 1$ (mm); $a_e = 60$ mm; a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	116
Figura 4.22 – Vidas das ferramentas de corte no fresamento de peças sem furos na superfície e com furos na superfície, com velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	118
Figura 4.23 - Vidas das ferramentas de corte no fresamento de peças sem furos na superfície e com furos na superfície, com velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	119
Figura 4.24 - Vidas das ferramentas de corte no fresamento de peças sem furos na superfície e com furos na superfície, com velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	120
Figura 4.25 - Vidas das ferramentas de corte no fresamento de peças sem furos na superfície (corte contínuo) e com furos na superfície, com velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	121

- Figura 4.26 - Arestas de corte das ferramentas utilizando velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente): a) geometria A (FV 450); b) geometria B (FV 450); c) geometria A (FC 250); d) geometria B (FC250); e) geometria A (FC300 (Mo)); f) geometria B (FC300 (Mo)); g) geometria A (FC300 (Mo+RG)); h) geometria B (FC300 (Mo+RG))..... 128
- Figura 4.27 - Arestas de corte das ferramentas utilizando velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente): a) geometria A (FV 450); b) geometria B (FV 450); c) geometria A (FC 250); d) geometria B (FC250); e) geometria A (FC300 (Mo)); f) geometria B (FC300 (Mo)); g) geometria A (FC300 (Mo+RG)); h) geometria B (FC300 (Mo+RG))..... 129
- Figura 4.28 - Arestas de corte das ferramentas de geometria (A) utilizando velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente): a) geometria A (FV 450); b) geometria A (FC 300 (Mo+RG)); c) geometria A (FC 300 (Mo)); d) geometria A (FC250)..... 131
- Figura 4.29 - Arestas de corte das ferramentas de geometria (B) utilizando velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente): a) geometria B (FV 450); b) geometria B (FC 300 (Mo+RG)); c) geometria B (FC 300 (Mo)); d) geometria B (FC250)..... 132
- Figura 4.30 - Arestas de corte das ferramentas de geometria (A) utilizando velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente): a) geometria B (FV 450); b) geometria B (FC 300 (Mo+RG)); c) geometria B (FC 300 (Mo)); d) geometria B (FC250)..... 134
- Figura 4.31 - Arestas de corte das ferramentas de geometria (B) utilizando velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente): a) geometria B (FV 450); b) geometria B (FC 300 (Mo+RG)); c) geometria B (FC 300 (Mo)); d) geometria B (FC250)..... 135
- Figura 4.32 – Parâmetro de rugosidade superficial R_a para a velocidade de corte igual $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B)..... 137
- Figura 4.33 – Parâmetro de rugosidade superficial R_a para a velocidade de corte igual $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B)..... 138
- Figura 4.34 - Parâmetro de rugosidade superficial R_q para a velocidade de corte igual $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B)..... 139

Figura 4.35 – Parâmetros de rugosidade superficial R_q para a velocidade de corte igual $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	140
Figura 4.36 - Parâmetros de rugosidade superficial R_z para a velocidade de corte igual $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	141
Figura 4.37 – Parâmetros de rugosidade superficial R_z para a velocidade de corte igual $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Faixa da composição de ferros fundidos típicos comuns (ASM, 1996).....	9
Tabela 2.2 – Comportamento das propriedades para as diferentes classes de ferros fundidos cinzentos (GUESSER, 2009).....	13
Tabela 2.3 – Principais aplicações para as diferentes classes de ferros fundidos cinzentos (GUESSER, 2009).....	14
Tabela 2.4 - Classes do ferro vermicular conforme norma SAE J1887/2002 (GUESSER, 2009).....	17
Tabela 2.5 - Comparação entre as propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos cinzentos, vermiculares e nodulares (DAWSON et al., 2014).....	20
Tabela 2.6 - Influência dos elementos de liga presentes nos ferros fundidos (CHIAVERINI, 2002).....	24
Tabela 2.7 - Efeito da microestrutura e dureza da matriz sobre o índice de vida da ferramenta de corte nos ferros fundidos cinzentos (ASM, 1989).....	28
Tabela 2.8 - Principais fatores que exercem influência nos parâmetros “x” e “K”, da equação de Taylor (MACHADO et al., 2015).....	58
Tabela 2.9 - Rugosidades obtidas por fresamento para superfícies planas (Adaptado - HÜBNER et al., 2014).....	62
Tabela 2.10 - Alterações causadas tanto na usinagem convencional e não convencional.....	64
Tabela 3.1 - Composição química dos materiais estudados.....	68
Tabela 3.2 - Características da grafita e da matriz dos ferros fundidos.....	68
Tabela 3.3 - Dureza e resistência mecânica dos ferros fundidos.....	71
Tabela 3.4 - Descrição das ferramentas de corte utilizadas.....	75
Tabela 3.5 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de vida das ferramentas.....	79
Tabela 3.6 - Quantidades de ensaios para os testes de usinabilidade.....	80

Tabela 4.1 - Resultado da análise de variância para quantidade média de partículas de MnS /mm ²	88
Tabela 4.2 - Resultado da análise de distribuição das áreas das partículas de MnS.....	89
Tabela 4.3 - Resultado da análise de variância para espaçamento interlamelar (μm).....	90
Tabela 4.4 - Resultado da análise de variância da microdureza na perlita (HV).....	91
Tabela 4.5 – Resultado da análise de variância para temperatura (C °) entre os materiais.....	105
Tabela 4.6 - Tempo de vida das ferramentas para a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) com $f_z = 0,1$ (mm/dente).....	122
Tabela 4.7 - Tempo de vida das ferramentas para a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) com $f_z = 0,2$ (mm/dente).....	122
Tabela 4.8 - Tempo de vida das ferramentas para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) com $f_z = 0,1$ (mm/dente).....	123
Tabela 4.9 - Tempo de vida das ferramentas para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) com $f_z = 0,2$ (mm/dente).....	124
Tabela 4.10 – Resultado da análise de variância (ANOVA) tempo vida da ferramenta.....	125
Tabela 4.11 – Resultado da análise de variância (ANOVA) em função do tempo vida da ferramenta para as demais liga de ferros fundidos.....	126
Tabela 4.12 – Resultado da análise de variância para rugosidade (R_a) liga FC 300 (Mo).....	144
Tabela 4.13 – Resultado da análise de variância para rugosidade (R_a) das demais ligas.....	145
Tabela 4.14 . Resumo comparativo dos resultados finais para cada material versus cada parâmetro de saída avaliado, quando foi utilizado a velocidade de corte igual $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente).....	146
Tabela 4.15 . Resumo comparativo dos resultados finais para cada material versus cada parâmetro de saída avaliado, quando foi utilizado a velocidade de corte igual $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente).....	147

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

a_e - Penetração de trabalho (mm)

AFS - *American Foundrymen's Society* (Sociedade Americana de Fundição)

a_p - Profundidade de corte (mm)

APC - Aresta postiça de corte

ASM - *American Society of Metals* (Sociedade Americana de Metais)

ASTM - *American Society for Testing Materials* (Sociedade Americana de Ensaios e Materiais)

CBN - Nitreto cúbico de boro

CGI - Ferro fundido vermicular

CNC - Comado numérico computadorizado

CVD - Deposição química de vapor

EDS - Espectrômetro de energia dispersiva

F_c - Força de corte (N)

F_f - Força de avanço (N)

f_z - Avanço por dente (mm/dente)

HB - Dureza Brinell

hm - Espessura média do cavaco (mm)

HV - Dureza Vickers

ISO - Organização Internacional para Padronização

IT - Intervalo de Tolerância ou Qualidade do Trabalho

LE - Limite de escoamento (MPa)

LEPU - Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem

LR - Limite de resistência à tração (MPa)

MEV - Microscópio eletrônico de varredura

NBR - Norma Brasileira

P_c - Potência de corte (kW)

PCBN - Nitreto cúbico de boro policristalino

PCD - Diamante policristalino

P_f - Potência de avanço (kW)

P_m - Potência fornecida pelo motor (kW)

PVD - Deposição física de vapor

Q_{a1} - Calor gerado na zona de cisalhamento secundário.

Q_{a2} - Calor gerado na zona de interface peça-superfície de folga da ferramenta.

Q_c - Calor dissipado pelo cavaco.

Q_f - Calor dissipado pela ferramenta de corte.

Q_{ma} - Calor dissipado pelo meio ambiente.

Q_p - Calor dissipado pela peça.

Q_z - Calor gerado na zona de cisalhamento primário.

R_a - Rugosidade média aritmética (μm)

RG – Refino de grafita

R_q - Desvio médio quadrático do perfil avaliado (μm)

R_z - Valor médio de rugosidade máxima em cinco pontos (μm)

SAE - *Society of Automotive Engineers*

Si - Silício

Si_3N_4 - Nitreto de silício

TiAlN - Nitreto de titânio e alumínio

TiN - Nitreto de titânio

$\text{VB}_{\text{Bmáx}}$ - Desgaste de flanco (mm)

v_c - Velocidade de corte (m/min)

v_e - Velocidade efetiva de corte (m/min)

v_f - Velocidade de avanço (mm/mi)

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxi
CAPITULO I – INTRODUÇÃO.....	1
CAPITULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 - Ferros fundidos.....	5
2.1.1 - Ferros fundidos cinzentos.....	10
2.1.2 - Aplicações dos ferros fundidos cinzentos.....	13
2.1.3- Ferros fundidos vermiculares.....	14
2.1.4 - Aplicações dos ferros fundidos vermiculares.....	18
2.2 - Propriedades mecânicas e físicas dos ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular..	18
2.3- Ferros fundidos de alta resistência.....	21
2.3.1- Componentes estruturais dos ferros fundidos.....	22
2.3.2 - Mecanismos de elevação da resistência dos ferros fundidos.....	23
2.4 - Usinabilidade dos ferros fundidos – efeitos da microestrutura.....	25
2.4.1- Usinabilidade de ferros fundidos cinzentos.....	25
2.4.2- Usinabilidade de ferros fundidos vermiculares.....	29
2.4.3- Efeito da forma da grafita e influência da proporção perlita / ferrita.....	30
2.4.4- Influência da forma da grafita.....	31
2.4.5- Efeitos dos elementos de liga.....	31

2.5- Fresamento de ferros fundidos cinzentos e vermiculares.....	35
2.5.1- Fresamento ferros fundidos cinzentos.....	37
2.5.2- Fresamento ferro fundido vermicular	39
2.6- Potência de usinagem.....	41
2.6.1- Potência de usinagem (fresamento).....	41
2.6.2- Medição de potência de corte.....	42
2.7 - Temperatura na usinagem de ferros fundido.....	43
2.7.1- Influência das variáveis do processo na temperatura.....	46
2.8 - Materiais e geometria de ferramentas utilizadas no fresamento dos ferros fundidos.....	47
2.9- Desgaste e vida de ferramentas na usinagem de ferros fundidos.....	51
2.9.1 - Mecanismos de desgastes.....	54
2.9.2 - Vida das ferramentas e fatores que a influenciam.....	57
2.10- Integridade superficial de peças de ferros fundidos no fresamento.....	58
2.11- Rugosidades das superfícies usinadas.....	60
2.12- Alterações sub-superficiais.....	63
CAPITULO III - METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	65
3.1- Material da peça.....	67
3.1.1- Caracterização dos materiais utilizados	68
3.1.2- Propriedades Mecânicas.....	70
3.1.3- Determinação da distribuição das inclusões de MnS nos ferros fundidos.....	71
3.1.4- Determinação do espaçamento interlamelar da perlita.....	72
3.1.5- Ensaio de microdureza na perlita	73
3.2- Máquina Ferramenta.....	74
3.3- Ferramentas de Corte.....	74
3.4- Ensaio de usinagem	78
3.4.1- Preparação e fixação dos corpos de prova.....	78
3.4.2- Parâmetros de Corte.....	79
3.5 - Medições de desgaste da ferramenta.....	81
3.6 - Medições da potência consumida pelo motor	81
3.7 - Caracterização dos mecanismos de desgaste da ferramenta.....	83

3.8- Medição da rugosidade	83
3.9- Medição da temperatura de corte.....	83
CAPITULO IV-RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	86
4.1- Considerações iniciais.....	86
4.2 - Caracterização microestrutural dos ferros fundidos	87
4.2.1- Distribuição das partículas de sulfeto de manganês nos ferros fundidos cinzentos....	87
4.2.2- Caracterização da perlita nos ferros fundidos	89
4.3 - Potência de corte e Corrente.....	92
4.4 - Temperatura de corte.....	97
4.5 - Desgaste das ferramentas	106
4.6 - Tempo de vida das ferramentas de corte.....	115
4.7 - Rugosidade superficial.....	136
CAPITULO V- CONCLUSÕES.....	148
CAPITULO VI - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	150
CAPITULO VII-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	151
APÊNDICES.....	165
Apêndice A - Gráficos decodificados de temperatura obtidos durante os testes de usinagem com ferramenta de geometria (A), em função da velocidade de corte igual $v_c = 350$ (m/min); avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente) e profundidade de corte $a_p = 1$ (mm).....	165
Apêndice B - Gráficos descodificados de temperatura obtidos durante os testes de usinagem com ferramentas de geometria (A), em função da velocidade de corte igual $v_c = 230$ (m/min); avanço pro dente $f_z = 0,1$ (mm/dente) e profundidade de corte $a_p = 1$ (mm).....	167
Apêndice C - Valores da corrente $I(A)$ obtidos do motor após tratamento computador através do software LabView®, em função da velocidade de corte igual $v_c = 230$ (m/min) em relação variação da geometria das ferramenta de corte.....	169
Apêndice D - Valores da corrente $I(A)$ obtidos do motor após tratamento computador através do software LabView® em função da velocidade de corte igual $v_c = 230$ (m/min) em relação variação da geometria das ferramenta de corte.....	171

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

No atual cenário, a indústria automotiva vem se deparando com restrições crescentes impostas pela lei, que visam à redução da emissão de gases combustíveis. Por outro lado, há uma demanda por maior desempenho dos motores, cada vez menores e silenciosos. Fatores, estes, que têm orientado e contribuído para o desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas ao motor de combustão, pois, em função de tais desenvolvimentos, permite-se obter elevadas pressões de injeção e máximas pressões de combustão, garantindo assim uma combustão mais eficiente e um melhor desempenho do motor, além da redução de emissões, bem como uma operação mais silenciosa. Porém, esta tecnologia exige maior solicitação mecânica do motor, podendo resultar em falhas prematuras por fadiga, o que gera uma demanda por um metal capaz de substituir o ferro cinzento convencional, habitualmente utilizado na fabricação de blocos, mas não adequados às altas pressões mencionadas.

Para Guesser (1997), dentre os ferrosos, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de importância fundamental para a indústria, sendo que a tecnologia utilizada na fabricação dos ferros fundidos tem recebido, continuamente, importantes desenvolvimentos, tanto em processos de fabricação como em materiais. Tais desenvolvimentos, resultantes de necessidades nas áreas de aplicação, visando melhorias e redução de custos, trazem como consequência a atualização tecnológica de um material de longa tradição de uso na indústria automobilística.

Com a crescente demanda na indústria Metalmecânica, a produção de ferros fundidos tem aumentado muito nos últimos anos, representando boa parte do mercado dos materiais utilizados na indústria e, por isso, a busca contínua pelas melhorias de propriedades tem levado várias indústrias e centros universitários ao desenvolvimento de inúmeras pesquisas a fim de se manterem competitivas no mercado. A adição de elementos tais como silício, magnésio, cromo, molibdênio, cobre e também a aplicação de tratamentos térmicos adequados tem contribuído muito para a melhoria das propriedades mecânicas destes materiais, como, por exemplo, a rigidez

e a ductilidade, tornando o emprego destes materiais viável em certas aplicações que eram até então exclusivas dos aços de médio teor de carbono (SILVA, 2010).

De acordo com Guesser (2009), o ferro fundido cinzento é um material muito utilizado na fabricação de blocos e cabeçotes de motores de combustão, além de engrenagens e discos de freios. Entretanto, o aumento nas taxas de compressão pode ocasionar trincas e ou deformações nesses componentes, razão pela qual, mesmo pequenas quantidades de elementos de liga, tais como o cromo, molibdênio, ou níquel são usados principalmente para atingir alta resistência, o que aumenta significativamente a vida dos elementos (SILVA, 2016).

A resistência mecânica do ferro fundido cinzento, material utilizado na fabricação dos motores de combustão, não permite atingir pressões maiores, no entanto, possui características particulares e indispensáveis, tais como boa condutividade térmica e amortecimento de vibrações (MOCELLIN, 2012).

Outra classe empregada na fabricação destes componentes, principalmente em motor diesel, é a dos ferros fundidos vermiculares, da qual sua alta resistência mecânica, comparado ao ferro fundido cinzento, permite o alcance de maiores taxas de compressão nestes motores, o que pode resultar em reduções de espessuras das peças (GUESSER 2009). Porém, suas características mecânicas e físicas tornam os custos dos processos ainda mais elevados, sobretudo, nos processos de usinagem, em virtude dos tempos de processo e do desgaste das ferramentas serem mais elevados, acrescentando o número de trocas, acarretando em um maior tempo de parada de máquina e reduzindo a capacidade de produção ao utilizar este material (SILVA, 2016; BAGETTI, 2009).

Segundo Naves (2009), quando comparado ao ferro fundido cinzento, a dificuldade na usinagem do vermicular está associada a dois fatores: a sua alta resistência mecânica envolvendo grandes forças de corte e a ausência de sulfeto de manganês em sua microestrutura, sempre presente nos ferros fundidos cinzentos, e que se deposita sobre a ferramenta de corte garantindo uma ação lubrificante local (DORÉ et al., 2007). No caso do ferro fundido vermicular, que possui limite de resistência cerca de 75% maior e rigidez em torno de 45% superior ao do ferro fundido cinzento, torna-se evidente a maior dificuldade na sua usinagem em relação ao cinzento (DAWSON et al., 2004).

Assim, a escolha de um material para aplicação na indústria automobilística deve ser embasada nas seguintes características: peso, resistência mecânica, custo do material, considerações ambientais e custo de usinagem (SILVA, 2016).

De acordo com Guesser (2009), para o entendimento das propriedades mecânicas dos ferros fundidos, é necessário que se compreenda a formação da microestrutura nestes materiais, e de como as variáveis de processo e de composição química afetam a microestrutura. Este conhecimento, normalmente, cabe ao fabricante da peça, porém a discussão de alguns fundamentos auxilia o engenheiro projetista na percepção do que é possível obter com os ferros fundidos, suas possibilidades e limitações. Entretanto, vale ressaltar que a presença de elementos de liga influencia na usinabilidade dos ferros fundidos.

Dentro deste contexto, a usinabilidade é um fator que merece atenção especial e deve ser analisada juntamente com a melhoria das propriedades mecânicas desejadas, sendo seu estudo fundamental para o engenheiro mecânico, ao qual se oferece mais uma opção no sentido da seleção de materiais metálicos para as diversas aplicações industriais (CHIAVERINI, 2002; SILVA, 2010).

Um novo material deve proporcionar um grau de desempenho em engenharia superior ao não encontrado nos materiais convencionais, ademais, os novos materiais são desenvolvidos para atuar nos sistemas mais complexos e importantes do veículo, como motores, chassis e suspensão.

São inúmeras as questões envolvidas no desenvolvimento de um novo material, em princípio, a indústria automotiva vem priorizando a redução no peso do automóvel, o que dependerá de inovações tecnológicas em diversas áreas (GUESSER, 2009). Nesta perspectiva, as atividades de pesquisa e desenvolvimento de produtos têm sido consideradas como fator de competitividade industrial, na medida em que possibilitam que as empresas criem vantagens sobre seus concorrentes, conseguindo maiores ganhos de mercado.

Nessa linha, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo de usinabilidade de um ferro fundido de alta resistência, classe FC 300 (FC 300_(Mo+RG)), com adição de molibdênio e refino de grafita, através do processo de fresamento frontal, para aplicação em cabeçotes de motores, em comparação com materiais já utilizados para este fim: ferro fundido cinzento FC 300 ligado ao molibdênio (FC 300_(Mo)), ferro fundido cinzento FC 250 (FC 250) e o ferro fundido vermicular da classe 450 (CGI 450). Nesta comparação, o ferro fundido cinzento FC 250 (FC 250) e o ferro fundido vermicular da classe FV 450 (CGI 450) serão utilizados como referência.

Os resultados obtidos neste estudo poderão contribuir de diversas formas, entre elas: (i) entender melhor o comportamento desses materiais durante a usinagem; (ii) mensurar como o aumento da resistência dos ferros fundidos cinzento afeta a usinabilidade; (iii) gerar conhecimento para aumentar a produtividade no chão de fábrica; (iv) melhorar a qualidade de superfícies usinadas; (v) gerar dados que possam ser usados por fabricantes para desenvolver ferramentas e máquinas ferramentas mais eficientes para a usinagem dos ferros fundidos cinzentos.

Este trabalho está dividido em seis capítulos, incluindo esta introdução – Capítulo I; Revisão Bibliográfica – Capítulo II; Metodologia – Capítulo III; Resultados e Discussões – Capítulo IV; Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros – Capítulo V e Referências Bibliográficas.

CAPITULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica que abordará os ferros fundidos cinzentos de alta resistência, ferro fundido vermicular, desvios dimensionais, qualidade de superfícies usinadas, os desgastes ocorridos nas ferramentas com ênfase em fresamento frontal, entre outros temas importantes inerentes ao trabalho.

2.1 - Ferros Fundidos

De acordo Chiaverini (2002), ferro fundido é uma liga de ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2%, em quantidade superior à que pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar em carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita. A maioria dos ferros fundidos contém silício entre 1 a 3% e enxofre, podendo ou não haver outros elementos de liga.

Segundo Guessser (2009), os ferros fundidos são ligas Fe-C-Si, contendo ainda Mn, S e P, podendo adicionalmente apresentar elementos de liga diversos. Eles são ligas que apresentam na solidificação geralmente uma fase pró-eutética (austenita, grafita) e que se completa com uma solidificação eutética (austenita + grafita ou austenita + carbonetos).

Pelo conhecimento do diagrama do equilíbrio Fe-C, costuma-se definir ferro fundido como “as ligas Fe-C cujo teor de carbono se situa acima 2,0% aproximadamente”. Face à influência do silício nessa liga, sobretudo sob o ponto de vista de sua constituição estrutural, o ferro fundido é normalmente considerado uma “liga ternária Fe-C-Si”, pois o silício está frequentemente presente em teores superiores ao do próprio carbono (ASM, 1996).

Em ambas as formas, os ferros fundidos apresentam ductilidade insuficiente para operações de conformação mecânica. Deste modo, os componentes fabricados em ferros fundidos só podem ser obtidos pelos processos de fundição. Outra característica relevante nos ferros fundidos é a sua

relativa facilidade de fusão, quando comparado aos aços com baixo teor de carbono. A sua matriz metálica também pode ser constituída de ferrita, que resulta em baixos valores de resistência associados a altos valores de ductilidade e tenacidade. Outra alternativa é a matriz perlítica, que implica em bons valores de resistência mecânica correlacionada relativamente a baixos valores de ductilidade. Na Figura 2.1 são mostradas as microestruturas dos ferros fundidos (GUESSER, 2009).

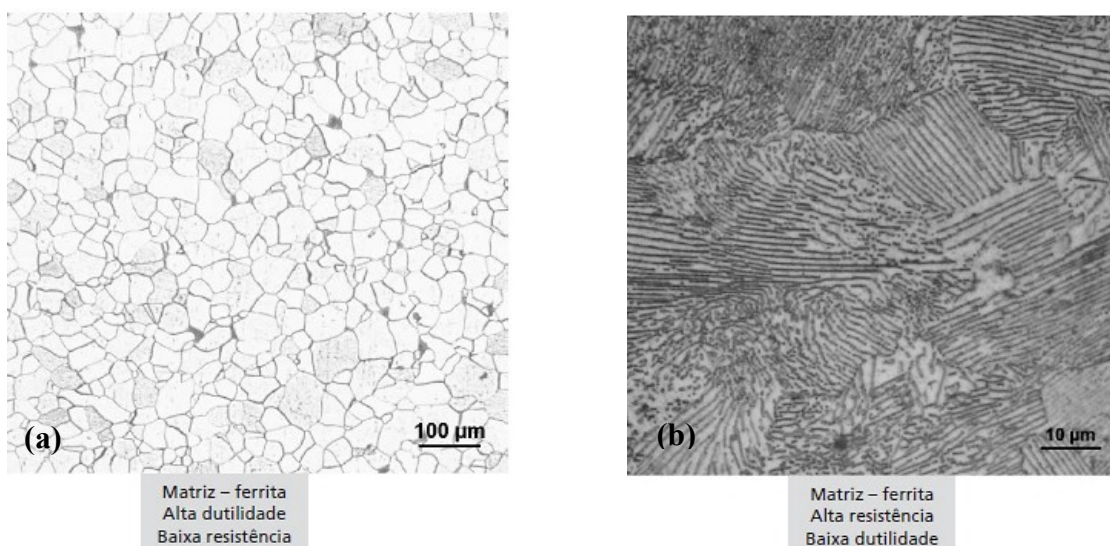


Figura 2.1 – Tipos de matriz metálica em ferros fundidos: a) ferrita 100x; b) perlita 1.000x (GUESSER, 2009).

Os ferros fundidos são geralmente classificados de acordo com a forma em que o carbono se apresenta na microestrutura: cinzento, nodular, maleável, branco, mesclados e os ferros fundidos vermiculares. Os cinco tipos de ferro fundido comercial são cinzento, dúctil, maleável, grafite compactado e ferro fundido branco. Com a exceção do ferro fundido branco, todos os ferros fundidos têm em comum uma microestrutura que consiste em fase de grafita numa matriz que pode ser ferrítica, perlítica, bainítica, martensítica, ou suas combinações. Os quatro tipos de ferro fundido são grosseiramente classificados de acordo com a morfologia da fase de grafita (GUESSER, 2009).

A ASM (1996), caracteriza os ferros fundidos da seguinte forma: Ferro fundido branco, Ferro fundido cinzento, Ferro fundido vermicular, Ferro fundido dúctil (ou nodular) e Ferro fundido maleável (Figura 2.2).

O ferro fundido cinzento é amplamente utilizado pela indústria de máquinas e equipamentos, indústria automobilística, ferroviária, naval, dentre outras. A presença de veios de grafita em sua microestrutura, proporcionando diversas características, torna o ferro fundido cinzento quase que insubstituível na fabricação de carcaças de motores e bases de equipamentos.

A grafita absorve vibrações, facilita a usinagem e confere ao ferro fundido uma melhor estabilidade dimensional. O ferro fundido cinzento tem várias propriedades únicas que derivam da existência de grafita lamelar na microestrutura, podendo ser usinado facilmente em durezas conducentes à boa resistência ao desgaste. O ferro fundido cinzento resiste a escoriações sob limites de lubrificação, condições em que o fluxo de lubrificante é insuficiente para manter uma película cheia de fluido. Tem excelentes propriedades para aplicações que envolvem amortecimento de vibração ou choque térmico moderado (GUENZA 2008).

O ferro fundido vermicular (ou *compacted graphite iron* - CGI) é caracterizado por grafita que está interligada dentro de células eutéticas, como a grafita na forma de flocos em ferro fundido cinzento. Comparado com o grafite no ferro fundido cinzento, a grafita em ferro CGI, no entanto, é mais grosseira e mais arredondada. A estrutura pode ser considerada intermediária entre os de ferro fundido cinzento e ferro fundido dúctil. As propriedades individuais também podem ser consideradas intermediárias entre aqueles de ferros fundidos cinzentos e dúcteis, mas as combinações de propriedades os tornam superiores a qualquer ferro fundido cinzento, com aplicações tais como os rotores do disco de freio e cabeçotes de motores a diesel, entre outras.

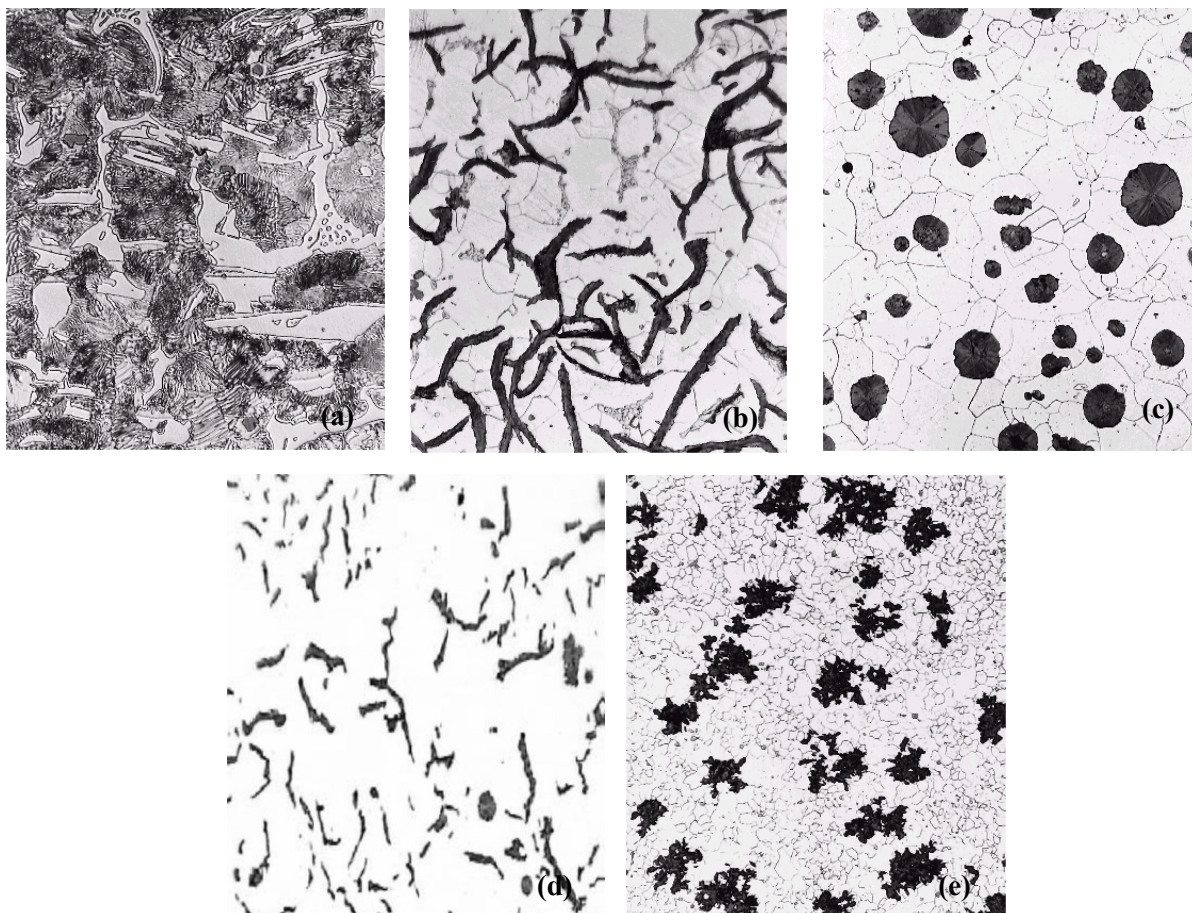


Figura 2.2 - Microestrutura do ferro fundido: a) branco; b) cinzento; c) dúctil (ou nodular); d) vermicular; e) maleável (GUESSER, 2009).

Chiaverini (2002) lista a influência dos principais elementos químicos na estrutura dos ferros fundidos. Cada um dos elementos de liga presentes na composição química do ferro fundido apresentará algum efeito em sua estrutura final, conforme citam, em termos gerais (DAWSON et al., 2014). Nesse caso, os elementos químicos têm o seguinte efeito:

- *Carbono*: é o elemento base, que determina a quantidade de grafita a se formar;
- *Silício*: é o elemento grafitizante, que favorece a formação de grafita;
- *Manganês*: é o oposto do silício, estabilizando a cementita e, além disso, é um elemento dessulfurante e tem efeito de promover a presença de perlita na matriz;
- *Fósforo*: formador de um composto de natureza eutética – carboneto de ferro e fosfeto de ferro de aparência branca e perfurada, chamado steadita;

- *Enxofre*: combina com o manganês, formando sulfeto de manganês (MnS).

Os ferros fundidos também podem ser classificados como ferros fundidos não ligados ou ferros fundidos ligados. Ferros fundidos não ligados são essencialmente ligas de ferro-carbono-silício contendo pequenas quantidades de manganês, fósforo e enxofre. A gama de composição de ferros fundidos típicos não ligados é apresentada na Tabela 2.1. Na Figura 2.3 é descrita a gama de carbono e silício para ferros fundidos comuns, em comparação com o aço. A linha tracejada inferior define o limite superior de teor de carbono como o limite da solubilidade do carbono na austenita.

Tabela 2.1- Faixa da composição de ferros fundidos típicos comuns (ASM, 1996).

Tipo de Ferro Fundido	Composição Química %				
	C	Si	Mn	P	S
Cinzento	2,5 - 4,0	1,0 - 3,0	0,2 - 1,0	0,002 - 1,0	0,02 - 0,25
Vermicular	2,5 - ,0	1,0 - 3,0	0,2 - 1,0	0,002 - 1,0	0,01 - 0,03
Dúctil (Nodular)	3,0 - 4,0	1,8 - 2,8	0,1 - 1,0	0,01 - 0,1	0,01 - 0,03
Branco	1,8 - 3,6	0,5 - 1,9	0,25 - 0,8	0,06 - 0,2	0,06 - 0,2
Maleável	2,2 - 2,9	0,9 - 1,9	0,15 - 1,2	0,02 - 0,2	0,02 - 0,2

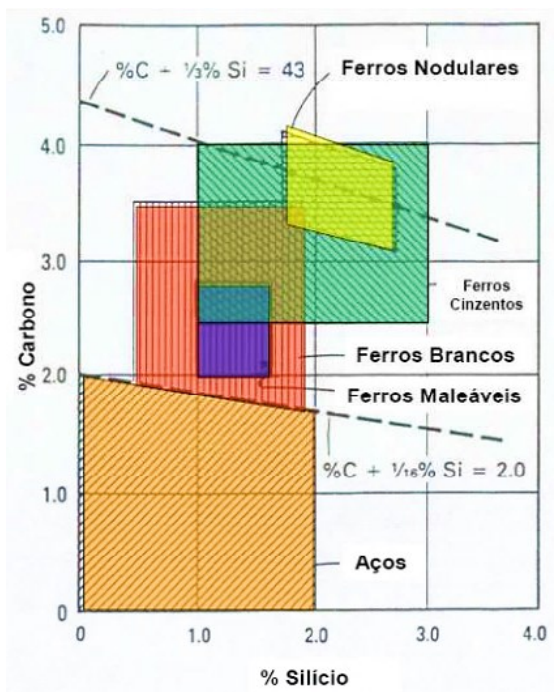


Figura 2.3 - Faixa aproximada de quantidades de carbono e silício nas ligas ferrosas (ASM, 1996).

Uma mesma composição química pode originar um ferro fundido branco ou cinzento conforme a velocidade de resfriamento a que a peça é submetida e esta é definida pela espessura da peça e pela natureza do molde em que a peça é vazada. Baixos teores de carbono e silício e velocidades de resfriamento altas favorecem a solidificação segundo a forma metastável, com formação de cementita, originando ferros fundidos brancos. Um resfriamento lento e elevados teores de (C) e (Si) incentivam o crescimento dos veios de grafita, com formação de uma estrutura de matriz ferrítica, de baixa resistência (REUTER, 2001).

Nos ferros fundidos com grafita, a microestrutura apresenta-se como uma matriz similar aos aços (ferrita, perlita, martensita, etc.) e partículas ou um esqueleto de grafita. A grafita possui resistência mecânica muito baixa de modo que, sob o enfoque de propriedades mecânicas, a sua presença pode ser entendida como uma descontinuidade da matriz, exercendo um efeito de concentração de tensões (GOODRICH, 2003 apud GUESSER, 2009).

Por outro lado, outras propriedades podem ser influenciadas favoravelmente pela forma da grafita em veios, como a condutividade térmica, o amortecimento de vibrações e a usinabilidade. A matriz metálica pode ser, por exemplo, constituída de ferrita, onde, este microconstituente resulta em baixos valores de resistência, associados a altos valores de ductilidade e tenacidade.

Outra alternativa é a matriz perlítica, o que implica em bons valores de resistência mecânica, associados a valores relativamente baixos de ductilidade. Produzindo-se então misturas de ferrita e perlita obtêm-se as diferentes classes de ferros fundidos, com diferentes combinações de propriedades, cada qual adequada para uma aplicação (WARDA, 1998; VIDAL et al., 2013).

Nos próximos tópicos será feita uma abordagem mais detalhada dos ferros fundidos cinzentos de alta resistência e, também dos convencionais, referentes às classes: FC250; FC 300 (Mo) ligado ao molibdênio; FC 300 (Mo+RG) ligado ao molibdênio mais refino de grafita, além do ferro fundido vermicular (*Compacted Graphite Iron – CGI*) classe 450, materiais que serão utilizados nos testes de usinabilidade via processo de fresamento neste trabalho.

2.1.1- Ferros fundidos cinzentos

Embora seja possível produzir ferros fundidos cinzentos de alta qualidade sem a adição de elementos de liga, apenas com um controle rigoroso do carbono livre, do carbono combinado, dos teores de silício e manganês e da técnica de fabricação, a adição de elementos de liga vem se

tornando uma prática usual, por permitir não só obter maiores resistências com o carbono equivalente mais elevado (os ferros fundidos comuns de alta resistência apresentam baixo carbono equivalente), como também porque as estruturas resultantes são menos sensíveis à variação da espessura das peças (GUESSER, 2009). O ferro fundido cinzento apresenta a grafita em forma de veios ou lamelas, conforme mostra a Fig.2.4 e matriz de ferrita + perlita, em quantidades que podem variar de 0 a 100%, obtendo-se assim as diversas classes de ferro fundido cinzento com diferentes propriedades.

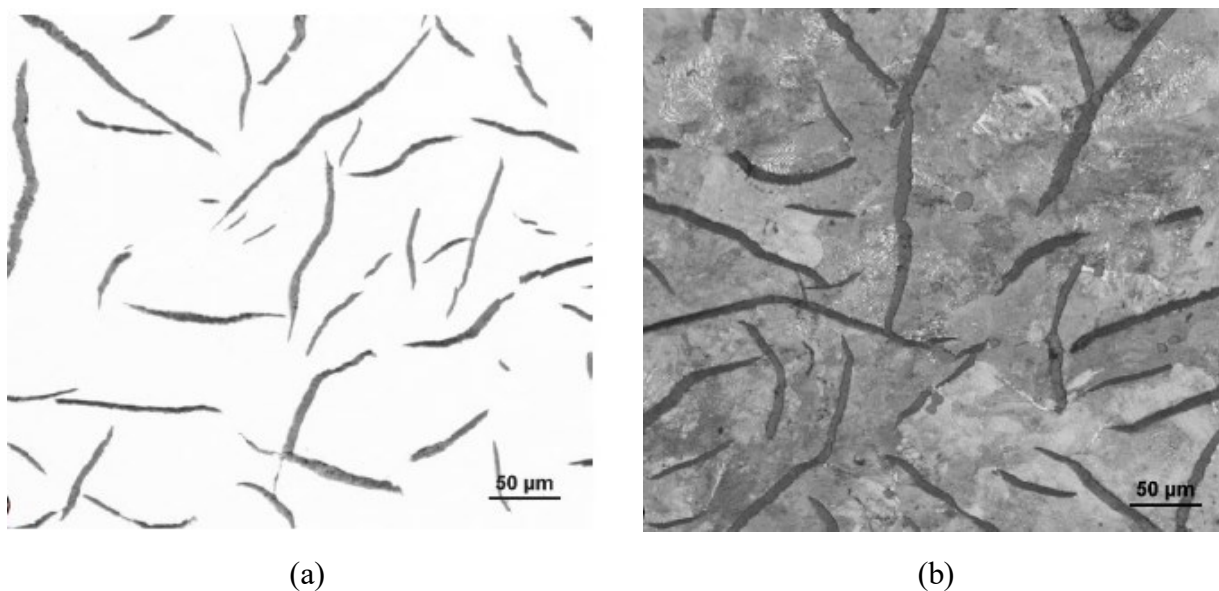


Figura 2.4 - Microestrutura do ferro fundido cinzento classe FC250, (a) revelando a estrutura da grafita (sem ataque, 200X) e (b) também a matriz (com ataque, 400 X) (GUESSER, 2009).

Portanto, pode-se observar que, para diferentes classes de ferros fundidos, há algumas propriedades que melhoram, enquanto outras têm um comportamento oposto. Em grande parte, isto é decorrente da sua microestrutura e composição química. Os ferros fundidos cinzentos apresentam-se dentro de uma faixa de composição química muito ampla (conforme mostrado na Tabela 2.1) e possuem limites de resistência mecânica à tração de 100 a 400 MPa, sendo mais comum na faixa de 150 a 300 MPa, com alongamento muito pequeno.

De acordo com Guesser (2009), a grafita em forma de lamelas fornece bons valores de condutividade térmica, o que torna este material uma excelente escolha para a fabricação de

componentes sujeitos à fadiga térmica. Outra propriedade de destaque dos ferros fundidos cinzentos é a capacidade de amortecimento de vibrações, importantes para bases de máquinas e aplicações com restrições de ruídos, como mostra a Figura 2.5.



Figura 2.5 – Aplicações típicas de ferros fundidos cinzentos: blocos, cabeçotes e elementos de freios (GUESSER, 2009).

Segundo as normas ABNT EB-126 e DIN 1691, os ferros fundidos cinzentos são designados por FC (ABNT) ou GG (DIN), seguidos dos algarismos representativos do limite mínimo de resistência à tração (CHIAVERINI, 2002):

- As classes FC-100 e FC-150 correspondem aos ferros fundidos cinzentos comuns, com excelente fundibilidade e melhor usinabilidade. A classe FC-150 é utilizada, entre outras aplicações, em bases de máquinas, carcaças metálicas e aplicações semelhantes.

- As classes FC-200 e FC-250 também possuem boa fundibilidade e usinabilidade, apresentam melhor resistência mecânica e se aplicam principalmente em elementos estruturais, tais como barramentos, cabeçotes e mesas de máquinas operatrizes.

- As classes FC-300 e FC-350, com maiores durezas e resistência mecânica, aplicam-se em engrenagens, pequenos virabrequins, bases de máquinas pesadas, colunas de máquinas, buchas e grandes blocos de motores.

- A classe FC-400 é a classe de uso comercial que possui a maior resistência mecânica, apresentando, para essa finalidade, combinação dos elementos de liga, entre eles, níquel, cromo e molibdênio. Sendo sua utilização limitada a peças de espessuras médias e grossas.

Na Tabela 2.2 é apresentada uma visão geral sobre as principais propriedades dos ferros fundidos cinzentos (citados pelas classes da Norma ABNT) (GUESSER, 2009).

Tabela 2.2 – Comportamento das propriedades para as diferentes classes de ferros fundidos cinzentos (GUESSER, 2009).

FC 100	FC 150	FC 200	FC 250	FC 300	FC 300	FC 400
Resistência mecânica ➡						
Modulo de elasticidade ➡						
← Capacidade de amortecimento de vibrações						
Resistências as altas temperaturas ➡						
← Resistência ao choque termico						
Dureza ➡						
Resistência ao desgaste ➡						
← Usinabilidade						
Acabamento em superficies usinadas ➡						
← Fundibilidade						
Custo ➡						

2.1.2 - Aplicações dos ferros fundidos cinzentos

Na Tabela 2.3 é apresentada uma visão geral sobre as principais aplicações dos ferros fundidos cinzentos (citados pelas classes da Norma ABNT), (GUESSER, 2009).

Tabela 2.3 – Principais aplicações para as diferentes classes de ferros fundidos cinzentos (GUESSER, 2009).

Classe ASTM A48	Aplicações
20 ($\sigma_R > 140$ MPA min)	Aplicações de baixa responsabilidade: utensílios domésticos; produtos sanitários; bases de máquinas; fundidos ornamentais; carcaças; tampas de poços; tubos centrifugados; Conexões
25 ($\sigma_R > 172$ MPA min)	Aplicações idênticas às da classe 20, porém com maiores exigências de resistência mecânica
30 ($\sigma_R > 206$ MPA min)	Elementos construtivos (grelhas, buchas, rotores, carcaças de compressor, tubos e conexões) placas de embreagem; discos de freio; blocos de motor; cabeçotes, pistões hidráulicos; barramentos de máquinas operatrizes; carcaças de motores elétricos
35 ($\sigma_R > 240$ MPA min)	Aplicações idênticas às da classe 30, porém com maiores exigências de resistência mecânica
40 ($\sigma_R > 275$ MPA min)	Aplicações envolvendo tensões mais elevadas, sendo exigidas maior dureza e resistência mecânica. O processo produtivo incorpora a adição de elementos de liga em pequenas quantidades e controles da microestrutura e do processo de inoculação: engrenagens; discos de freio; eixo de comando de válvulas; virabrequins; blocos de motor; cabeçotes; buchas, válvulas; munhões, cilindros e anéis empregados em locomotivas
50 ($\sigma_R > 344$ MPA min)	Aplicações idênticas às da classe 40
60 ($\sigma_R > 413$ MPA min)	É a classe de maior resistência mecânica, empregando-se, normalmente, a adição de Ni, Cr e Mo tambores e discos de freio especiais; virabrequins, bielas, cabeçotes, peças de bombas de alta pressão; carcaças de britadores; matrizes de forjamento e estampagem; cilindros hidráulicos, etc.

2.1.3 - Ferros fundidos vermiculares

Os ferros fundidos vermiculares *Compacted Graphite Iron* (CGI) representam a mais nova família dos ferros fundidos. A grafita apresenta-se predominante em forma de “vermes” (ou compacta) podendo a matriz ser ferrítica, perlítica ou combinações destes microconstituintes (GUESSER, 2009).

Segundo Mocellin (2002), em algumas aplicações do ferro fundido, como em blocos de motores a diesel, coletores de escapamento e outras, é recomendável que o material possua características tais como: elevada resistência mecânica; boa condutividade térmica; tenacidade; ductilidade e capacidade de amortecimento de vibrações.

A resistência mecânica dos ferros fundidos vermiculares, similarmente aos outros ferros fundidos, depende da matriz e da grafita. O efeito da grafita, no caso dos vermiculares, é um agravante pelo fato desse material conter sempre uma quantidade de grafita nodular junto com a grafita vermicular. A limitação da percentagem de nódulos é devido à diminuição da usinabilidade, aumento da tendência a rechupes e diminuição do amortecimento de vibrações causado pelo aumento do percentual de nódulos. Na Figura 2.6 é apresentada a micrografia, vista em microscópio óptico, e a forma espacial da grafita, vista no microscópio eletrônico de varredura, do ferro fundido vermicular (GUESSER, 2009).

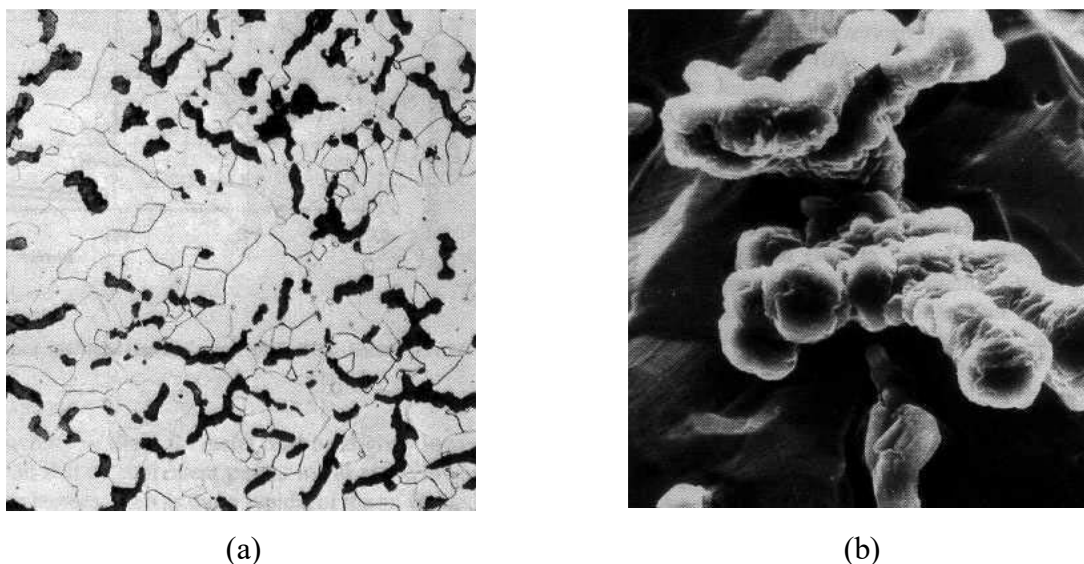


Figura 2.6 - Micrografia do ferro fundido vermicular: (a) Micrografia óptica atacada com Nital; (b) Forma espacial da grafita compactada. MEV 395x. (ASM, 1996; MOCELLIN, 2002).

O ferro fundido vermicular possui praticamente o dobro da resistência mecânica em comparação ao ferro fundido cinzento, tradicionalmente usado em blocos de motores. Com maior resistência, é possível fazer motores mais potentes do mesmo tamanho ou, então, motores mais compactos com a mesma potência (BAGETTI, 2009). Na Figura 2.7 é demonstrado uma aplicação

do ferro fundido na fabricação de um bloco motor V6. Esses motores apresentam a vantagem adicional de combustão mais eficiente e, portanto, são menos poluentes.

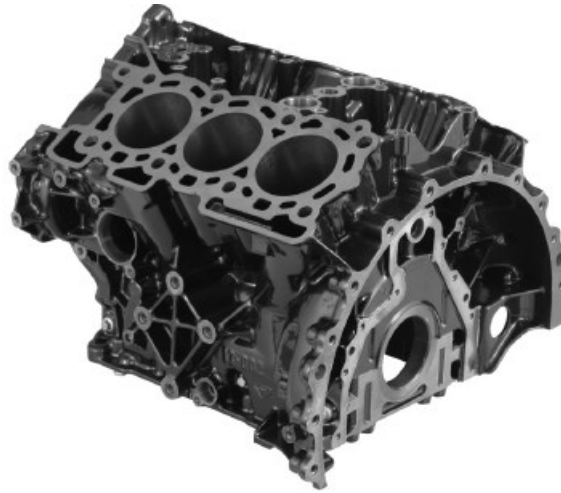


Figura 2.7 – Aplicações de ferro fundido vermicular na fabricação do bloco motor V6 (GUESSER, 2009).

A aplicação do ferro fundido vermicular com microestrutura perlítica na produção do cabeçote de motor, além da maior resistência a altas taxas de compressão, evitando trincas e deformações, permite também assentos das válvulas endurecidos e mais resistentes, não sendo necessários os anéis insertados (SILVA, 2014).

Em relação à morfologia da grafita do ferro fundido vermicular, verifica-se que esta é intermediária aquela do ferro fundido cinzento e nodular, com a porcentagem de nódulos de no máximo 20%, no caso de blocos e cabeçotes, por exemplo. Quanto aos diversos métodos estudados para obtenção do ferro fundido vermicular, apenas dois obtiveram resultados positivos para a produção em grande escala: o primeiro, adicionando elementos nodularizantes como o magnésio (Mg) e elementos antinodularizantes como o titânio (Ti); e o segundo, adicionando elementos nodularizantes como o magnésio em quantidades controladas (GUESSER; SCHROEDER; DAWSON, 2001; MOCELLIN, 2002).

Enquanto, a microestrutura do ferro fundido vermicular tem pouca influência para o aumento na condutividade térmica, o aumento da nodularidade 10-30% causa redução adicional de 10% na condutividade térmica do ferro fundido vermicular em relação ao ferro cinzento.

Portanto, é mais significativo para as especificações de ferro fundido vermicular focar em evitar alta nodularidade em vez de tentar identificar oportunidade para aumento na condutividade térmica (DAWSON et al., 1997). O ferro fundido vermicular tem substituído com vantagens o ferro fundido nodular em aplicações em que este último não pode ser empregado devido sua condutibilidade térmica mais baixa e sua tendência de empenar.

O controle do processo de produção de peças de ferro fundido vermicular é muito importante já que as diferentes morfologias da grafita que podem surgir na liga determinam suas propriedades e usinabilidade, principalmente na usinagem de blocos de motor e cabeçotes (VIANA, 2009). No ferro fundido vermicular a grafita apresenta certo grau de conectividade e um fator de forma intermediário entre as duas anteriores, proporcionando também, propriedades mecânicas e térmicas intermediárias (GUESSER, 2009).

Na Tabela 2.4 é apresentada as classes de ferro fundido vermicular segundo a Norma SAE J1887/2002. Guesser (2009) afirma que essa norma prevê duas classes com valores de nodularidade maiores que os usuais (máximo 20%), uma classe com matriz ferrítica e outra com matriz perlítica. Os valores de dureza da Norma SAE são considerados orientativos, e são iguais ao da Norma ASTM.

Tabela 2.4 - Classes do ferro vermicular conforme norma SAE J1887/2002 (GUESSER, 2009).

Classe	Dureza típica (HB)	LR min (MPa)	LE min (MPa)	Alongamento min (%)	Matriz Típica	Nodularidade (%)
C250	121-179	250	175	3,0	ferrita	< 20
C300HN	131-189	300	175	3,0	ferrita	20-50
C300	143-207	300	210	2,5	ferrita- perlita	< 20
C350	163-229	350	245	2,0	ferrita- perlita	< 20
C400	197-255	400	280	1,5	perlita- ferrita	< 20
C450	207-269	450	315	1,0	perlita	< 20
C500HN	207-269	500	315	1,5	perlita	20-50

2.1.4 - Aplicações dos ferros fundidos vermiculares

Devido à sua maior condutividade térmica em relação ao ferro fundido nodular, o ferro fundido de grafita compactada é preferido para peças fundidas a serem utilizadas a elevadas temperaturas e/ou sob condições de fadiga térmica, como por exemplo, sua aplicação na produção de motores diesel de alta potência.

Em consequência dessas características, os ferros fundidos vermiculares são aplicados em situações em que a resistência do ferro fundido cinzento é insuficiente, mas é indesejável a utilização do ferro nodular devido às suas propriedades menos favoráveis à fundição e devido a sua condutividade térmica ser menor em relação ao ferro fundido vermicular. Entre as inúmeras peças produzidas em série atualmente, citada na literatura, pode-se mencionar: aplicações que envolvem placas de suporte para grandes motores diesel, tubulações de exaustão, caixas de engrenagens, lingoteiras, blocos e cabeçotes de motores, cárters, discos de freio, engrenagens excêntricas, rodas dentadas, entre outras (ASM, 1990; SILVA, 2015).

2.2 - Propriedades mecânicas e físicas dos ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular.

As diferenças entre essas ligas são creditadas às morfologias das suas grafitas, que conferem propriedades físicas e mecânicas distintas a cada uma delas. De acordo com Dawson (2001), umas das principais diferenças entre ferro fundido cinzento, ferro fundido vermicular e o ferro fundido dúctil são pela forma e distribuição das partículas de grafita. No ferro fundido vermicular observa-se que as partículas são alongadas e orientadas aleatoriamente como visto no ferro cinzento, porém são mais curtas, grossas, e com bordas arredondadas. Segundo Guessier (2009) as partículas de grafita compacta estão conectados os seus vizinhos mais próximos dentro da célula eutética. Essa morfologia da grafita, com as bordas arredondadas e as superfícies irregulares das partículas da grafita, resulta em maior adesão entre a grafita e a matriz metálica, dificultando assim a início e o crescimento de trincas e fornecendo propriedades mecânicas superiores, na Fig. 2.8 é apresentada as diferenças da morfologia da grafita.

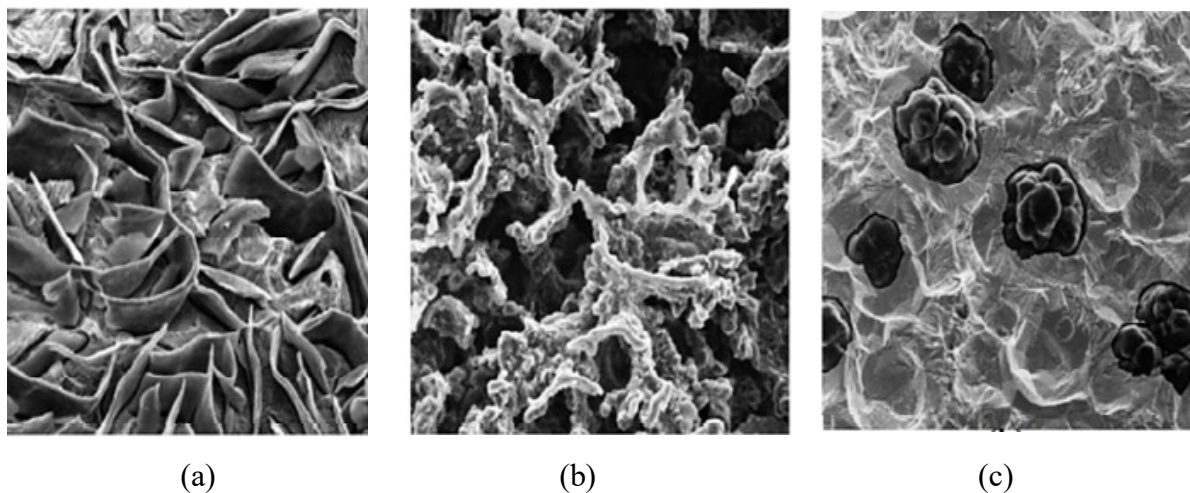


Figura 2.8 - Morfologia típica da grafita: (a) cinzento; (b) vermicular; (c) nodular (DAWSON et al., 2001).

O ferro fundido cinzento apresenta grafitas na forma de lamelas, com cantos agudos e superfícies lisas. Suas grafitas são interconectadas e sem orientação preferencial, formando uma rede quase contínua. De acordo com Dawson (1994), as grafitas, por possuírem uma alta condutividade térmica, da ordem de aproximadamente 3 a 5 vezes maior que a do ferro, garantem ao material uma boa condutividade térmica; e devido às suas orientações neste elas proporcionam uma excelente capacidade de amortecimento de vibrações. Essa se deve ao caminho que as ondas vibratórias realizam ao se propagarem através do ferro, refletindo-se na superfície das grafitas e sendo enfraquecida pela sua transformação em calor.

Deste modo, ao mesmo tempo em que se tem vantagens em razão da forma e orientação das grafitas na matriz, têm-se desvantagens com a redução da resistência mecânica, da ductilidade e da tenacidade do material. Isto é causado em função das descontinuidades provocadas na matriz pelos cantos agudos das grafitas, que agem como pontos de concentração de tensões e planos de propagação de trincas (DAWSON, 1993; DAWSON, 1994b; XAVIER, 2003).

No ferro fundido nodular, as grafitas se apresentam na forma de nódulos, não gerando descontinuidades na matriz, o que ocasiona menor concentração de tensões. Esta disposição das grafitas confere ao material um aumento da sua resistência mecânica, ductilidade e tenacidade maiores que as encontradas no ferro cinzento (DAWSON, 1993). Como desvantagens, pode se

citar: menor condutividade térmica da liga, em virtude de as grafitas não se mostrarem interconectadas; menor capacidade de amortecimento e pior usinabilidade quando comparado com o ferro fundido cinzento e o CGI (DAWSON, 1993).

Quanto ao ferro fundido vermicular, a morfologia da sua grafita apresenta lamelas espessas com cantos arredondados, interconectados e com superfície áspera e irregular, daí o nome de vermicular (DAWSON; 1993; SINTERCAST, 1994). Os cantos arredondados não agem mais como pontos de concentração de tensões e a grafita interconectada propicia uma taxa maior de transferência de calor e dissipação de vibrações que o nodular.

Portanto, esta forma de grafita é responsável pela liga possuir boas características de resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistência à fadiga térmica, amortecimento e condutividade térmica intermediária aos ferros cinzentos e nodulares, descritos na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Comparação entre as propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos cinzentos, vermiculares e nodulares (DAWSON et al., 2014).

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência à tração [MPa]	250	450	750
Módulo de elasticidade [GPa]	105	145	160
Alongamento (%)	0	1,5	5
Resistência à fadiga [MPa]	110	200	250
Condutividade térmica [W/mK]	48	37	28
Dureza [HB 10/3000]	179-202	217- 241	217-255
Capacidade relativa de amortecimento	1	0,35	0,22

Com relação ao ferro fundido cinzento, o ferro fundido vermicular oferece as seguintes vantagens (DAWSON, 2002):

- Redução de espessuras de parede para um mesmo carregamento;
- Redução do fator de segurança devido à menor variação das propriedades do fundido;
- Redução de fraturas frágeis na manufatura, montagem e serviço, devido à maior ductilidade;
- Maior resistência, sem a necessidade de recorrer a elementos de liga;
- Menor profundidade de rosca necessária, portanto, parafusos menores podem ser utilizados.

Ainda segundo Dawson (2002), quando comparado ao ferro fundido nodular, as vantagens do ferro fundido vermicular são:

- Melhor produção de peças complexas fundidas;
- Redução nas tensões residuais, devido à maior condutividade térmica e ao módulo de elasticidade menor;
- Melhor transferência de calor;
- Melhor usinabilidade.

2.3 - Ferros fundidos de alta resistência

De forma similar como acontece com os aços, à adição de elementos de liga em teores elevados nos ferros fundidos tem por objetivo conferir-lhe propriedades especiais, como resistência à corrosão, desgaste, calor, aumento de tenacidade, melhora na usinabilidade, dentre outras, características estas que lhes conferem uma melhora com adição de alguns elementos de liga (GUESSER, 2009).

Elementos de liga, incluindo o silício (quando excede a cerca de 3%), são geralmente adicionados para aumentar a resistência, dureza, capacidade de endurecimento, ou resistência à corrosão do ferro base. Eles são, muitas vezes, adicionados em quantidades suficientes para afetar as propriedades, ou distribuição de constituintes na microestrutura (ASM, 1996).

Em ferros fundidos cinzentos e ferros fundidos dúcteis, mesmo pequenas quantidades de elementos de liga, tais como o cromo, molibdênio, ou níquel são usados principalmente para atingir alta resistência.

- O silício, que em teores até cerca de 3,5% aumenta a velocidade de crescimento da gravita, devido à sua tendência de grafitação, acima de 4% retarda o fenômeno.

- O cromo, que é elemento estabilizador de carbonetos, retarda a tendência ao crescimento do ferro fundido, quando utilizado a temperaturas de 455°C ou superiores.

- O silício e o cromo aumentam ainda a resistência à formação da casca de óxido, pois formam uma camada superficial fina, a qual é impermeável às atmosferas oxidantes.

- O níquel atua, sobretudo, no sentido de melhorar a resistência e a tenacidade a temperaturas elevadas da mesma forma do molibdênio (CHIAVERINI, 2002).

Adições de alumínio são utilizadas para reduzir o crescimento e a tendência à formação de casca de óxido. Esse elemento, entretanto, afeta negativamente as propriedades mecânicas do material à temperatura ambiente.

Segundo Chiaverini (2002), são dois os fatores preponderantes na determinação da estrutura do ferro fundido:

- Composição Química
- Velocidade de Resfriamento

2.3.1 - Componentes Estruturais dos Ferros Fundidos

A grafita é considerada o componente mais importante que determina as características mecânicas fundamentais dos ferros fundidos. Costuma-se comparar os ferros fundidos aos aços, chamando-os de aços contendo grafita em veios, pois, a rigor, os outros constituintes estruturais importantes – cementita, perlita e ferrita – são os constituintes básicos dos aços. Os veios de grafita constituem uma solução de continuidade na estrutura ou matriz básica do material (GUESSER, 2009).

O carbono determina a quantidade de grafita que se pode formar e o silício é essencial para propiciar a decomposição da cementita (carboneto de ferro) em ferrita e grafita, conforme reação da Equação 1.



A reação anterior produz grafita em ferro fundido porque o carboneto de ferro Fe_3C não é verdadeiramente estável, mas somente metaestável (VAN VLACK, 1984).

A ASTM (American Society for Testing Materials) e a AFS (American Foundrymen's Society) classificam o aspecto e a forma de apresentação da grafita em cinco tipos, como segue na Figura 2.9.

a) irregular desorientada; b) em roseta; c) desigual irregular; d) interdentrítica desorientada; e) interdentrítica orientada.

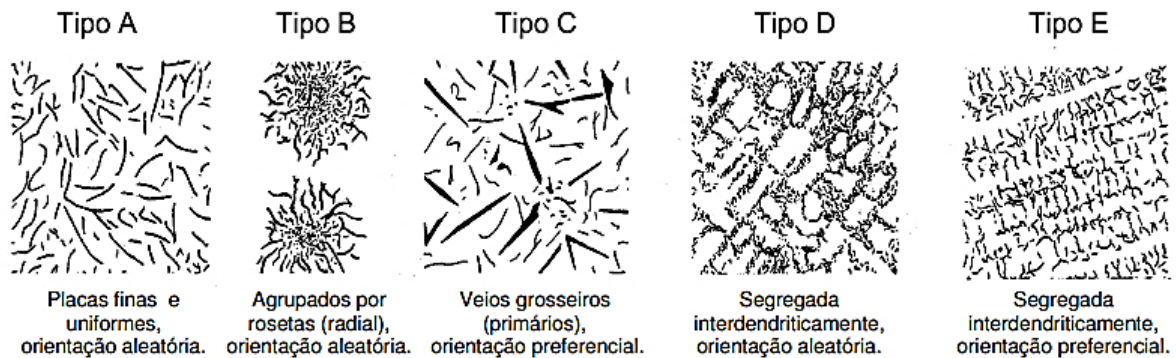


Figura 2.9 - Forma e distribuição dos veios de grafita, segundo as normas da ASTM e da AFS.

2.3.2 - Mecanismos de elevação da resistência dos ferros fundidos

Os Ferros fundidos podem constituir uma variada gama de produtos complexos, quando neles são adicionados elementos de liga. É possível uma grande variedade de microestruturas e propriedades resultantes, dependendo da composição química, condições de solidificação e do tipo de tratamento térmico (LIMA, 1997).

Os elementos de liga interferem diretamente na usinabilidade e a determinação da influência dos elementos de liga que compõem os ferros fundidos é bastante difícil, tendo em vista três fatores: a reação entre esses elementos, seu efeito na microestrutura e a taxa de resfriamento (TELES, 2007; NAVES, 2009).

A influência dos elementos de liga presentes nos ferros fundidos pode ser dividida em dois tipos: os formadores de carbonetos (cromo, cobalto, manganês, molibdênio) que prejudicam a usinabilidade devido ao fato de que carbonetos são partículas muito duras e abrasivas; e os grafitizantes (silício, níquel, alumínio e cobre) que auxiliam a usinabilidade (DINIZ et al., 1999).

A introdução de outros elementos de liga nos ferros fundidos é feita quando se deseja um ou diversos dos seguintes efeitos, conforme visto na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Influência dos elementos de liga presentes nos ferros fundidos (CHIAVERINI, 2002).

<p>a) aumentar a dureza e a resistência mecânica</p> <p>b) conferir resistência uniforme através de toda a seção em peças de grandes dimensões;</p> <p>c) diminuir o peso em consequência do aumento da resistência, de modo a reduzir a inércia de uma parte em movimento ou reduzir a carga-morta em um veículo ou uma estrutura;</p> <p>d) conferir resistência à corrosão;</p>	<p>e) aumentar a resistência ao calor;</p> <p>f) aumentar a resistência ao desgaste;</p> <p>g) aumentar a capacidade de corte;</p> <p>h) melhorar as propriedades elétricas e magnéticas.</p>
--	---

Os três primeiros requisitos da tab. 2.6 são alcançados porque os elementos de liga aumentam a resistência da ferrita e formam ainda outros carbonetos, além do Fe_3C , contribuindo para a melhora da resistência mecânica do material.

Geralmente esse aumento da resistência é conseguido pela adição de um ou vários elementos de liga em teores relativamente baixos, não ultrapassando em sua soma o valor de 5%. Nessas condições, os princípios fundamentais dos tratamentos térmicos permanecem porque, ainda que a presença de novos elementos de liga obrigue a um ajuste nas temperaturas dos tratamentos, a transformação da austenita e as estruturas resultantes são as mesmas que ocorrem nos aços-carbono (DAWSON, 2002).

A obtenção das outras características, de d a h, requer a introdução dos elementos de liga em teores mais elevados, produzindo-se alterações mais profundas na ferrita, além de resultarem em carbonetos mais complexos. Neste caso, os tratamentos térmicos também devem ser alterados Dawson (2002), para facilitar muitas vezes a formação dos carbonetos especiais (INFOMET, 2015; CHIAVERINI, 2002).

A classificação refinada dos ferros fundidos está relacionada à matriz da microestrutura, quanto maior o teor de perlita, maior a resistência à tração alcançada (GUESSER, 2003).

2.4 - Usinabilidade dos ferros fundidos – efeitos da microestrutura

Em termos gerais, pode ser mencionado que quanto maior a dureza e a resistência mecânica de um tipo de ferro fundido pior, é sua usinabilidade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006). A dureza Brinell é um indicador de usinabilidade porque a dureza é dependente da microestrutura, mas apenas a dureza não é consistente como uma medida de usinabilidade. Uma maneira de avaliar melhor a usinabilidade do ferro fundido é combinar o teste de dureza com uma avaliação da microestrutura, por causa de alguns microconstituintes que adversamente afetam a usinabilidade (ASM, 1989; BEZERRA, 2003).

As variações na microestrutura dos ferros fundidos podem afetar a usinabilidade de diversas maneiras:

- Abrasividade → partículas duras de microestrutura promovendo o desgaste abrasivo da ferramenta de corte. Este efeito é intensificado pelo aumento da força de corte;
- Lubrificação na interface ferramenta/cavaco; Ação lubrificante da grafita e de partículas de sulfeto de manganês;
- Quebra do cavaco → sulfeto de manganês e grafita, particularmente a lamelar, favorecem a quebra de cavaco, diminuindo o tamanho da região de aderência e o tempo de contato cavaco/ferramenta (GUESSER, 2009).

Além da influência do silício na usinabilidade através da transformação do carbono em grafita para a formação de ferro fundido cinzento, o comportamento da usinagem dos ferros fundidos é fortemente influenciado pela composição através dos efeitos de elementos de liga sobre a formação de carboneto ou de grafita (DINIZ et al., 2006). Os aditivos, quando adicionados em ferro fundido, influenciam na usinabilidade porque formam ou impedem a formação de carbonetos, agindo na resistência mecânica e/ou dureza (FERRER, 2006).

2.4.1 - Usinabilidade de ferros fundidos cinzentos

Pela fácil fusão e vazamento de sua liga, o ferro fundido cinzento possui uma usinabilidade superior aos demais ferros fundidos de dureza equivalente, resistência mecânica satisfatória, boa resistência ao desgaste e boa capacidade de amortecimento, é, dentre os ferros fundidos, o mais utilizado (CHIAVERINI, 2002).

Segundo Guesser (2009), a microestrutura do ferro fundido cinzento é o principal indicador de sua usinabilidade. A perlita aumenta a resistência mecânica do ferro fundido cinzento e diminui a sua usinabilidade. Além da influência da própria matriz ou da porcentagem relativa de ferrita e perlita, os veios de grafita, quantidade, distribuição e tamanho, também são fatores importantes na usinabilidade do ferro fundido cinzento; a grafita é um lubrificante natural. Os veios de grafita introduzem descontinuidades na matriz do metal e agem como um quebra cavacos, formando cavacos de ruptura.

Outro fator que favorece a usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos é as inclusões de sulfeto de manganês, MnS. De acordo com Rosa (2009), o sulfeto de manganês está entre as inclusões favoráveis da usinagem, pois dependendo das condições forma-se uma camada protetora de sulfeto de manganês na superfície da ferramenta, que promove redução de geração de calor e, conseqüentemente, da temperatura na ferramenta e diminui a força de corte.

Dependendo da distribuição dessas inclusões presentes nos ferros cinzentos, diferentes resultados de usinabilidade podem ser obtidos. Estudos realizados por Pereira, Boehs e Guesser (2005) mostram que o aumento da quantidade de partículas de sulfeto de manganês, juntamente com o aumento da velocidade de corte, tornam o efeito benéfico dessas partículas mais evidente na usinagem.

No processo de usinagem dos ferros fundidos, a vida da ferramenta e as velocidades de corte são diretamente influenciadas pela microestrutura. A liga do ferro fundido cinzento é caracterizada pela grande quantidade de flocos de grafita, os quais introduzem descontinuidades na matriz do metal que reduzem a ductilidade, causam a quebra fácil dos cavacos, fazendo que haja um comprimento de contato cavaco-ferramenta pequeno e relativamente acarretando menores forças de usinagem e potência consumida, baixas taxas de desgaste e altas taxas de remoção de material.

Esta é a principal razão para o melhor comportamento de usinagem dos ferros fundidos cinzentos (ASM, 1989). De um modo geral, a usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos decresce à medida que se caminha para classes de maior resistência, devido ao aumento da quantidade de perlita na matriz e diminuição da quantidade de grafita, como mostrado na Figura 2.10.

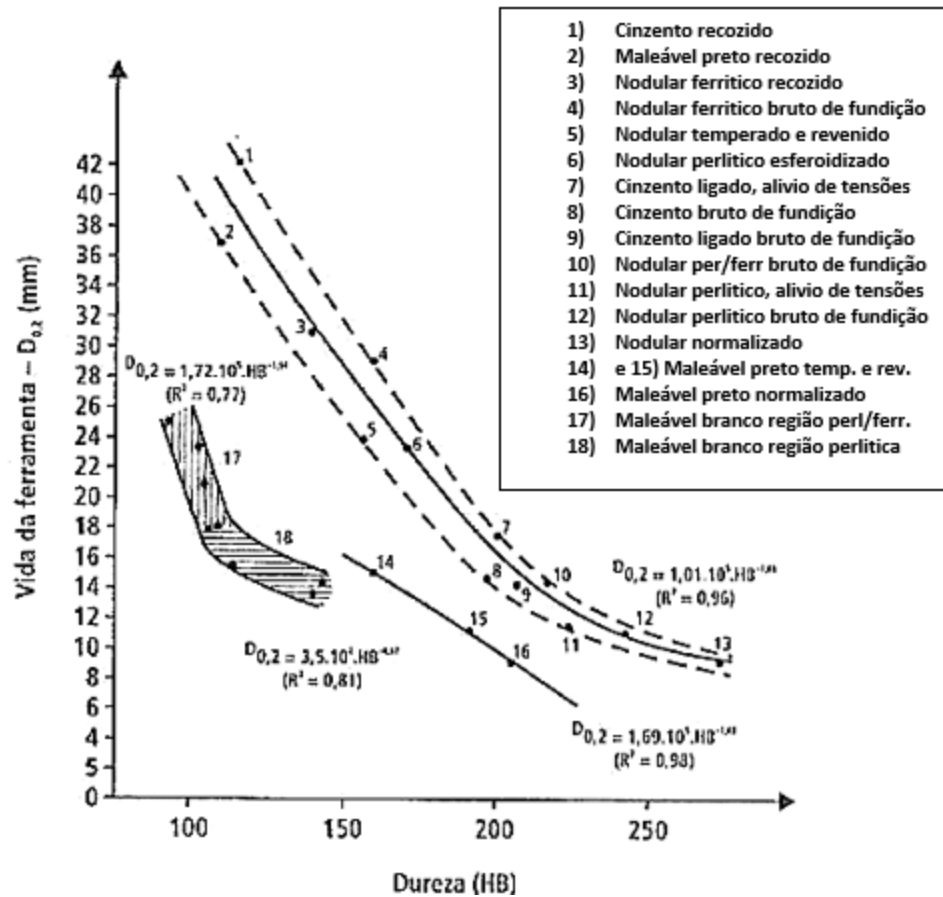


Figura 2.10 - Usinabilidade de diferentes ferro fundidos, onde se avalia a vida da ferramenta até desgaste de flanco de 0,2 mm (CONSALTER et al., 1987 ; GUESSER, 2009).

Como em todas as ligas metálicas, existe uma correlação de afinidades entre as propriedades do ferro fundido e sua estrutura, correlação esta que, no caso particular do ferro fundido cinzento, é mais estreita e mais complexa, tendo em vista a presença de carbono livre na forma da grafita. A velocidade de resfriamento, que pode estar relacionada com a espessura da peça, influencia necessariamente na forma, tamanho e distribuição com que os veios de grafita se apresentam (SILVEIRA, 1983; MUÑOZ DIAS, 2001). Na Tabela 2.7 é apresentado os índices de usinabilidade de ferros fundidos cinzentos com diferentes microestruturas, levando-se em consideração as proporções de perlita na matriz e o espaçamento interlamelar.

Tabela 2.7 - Efeito da microestrutura e dureza da matriz sobre o índice de vida da ferramenta de corte nos ferros fundidos cinzentos (ASM, 1989).

Microestrutura da matriz	Dureza Brinell	Índice de vida da ferramenta
ferrita	121-179	20
50% de ferrita e 50% de perlita	131-189	10
perlita grossa	143-207	2
perlita média	163-229	1,5
perlita fina	197-255	1
perlita fina com 5% em excesso de Fe ₃ C	207-269	0,3

Na Tabela 2.7 é listado um índice de vida da ferramenta para diferentes microestruturas de matriz de ferros fundidos cinzentos contendo 2,5% de grafita e dureza. Pode se observar nessa tabela que as taxas de desgaste da ferramenta aumentam de forma proporcional em relação ao aumento de perlita em matrizes perlita / ferrítica e com a diminuição do espaçamento interlamelar da perlita, ou seja, ocorre um aumento adicional nas taxas de desgaste da ferramenta quando a matriz perlítica contém excesso de carboneto de ferro. Portanto, o desgaste da ferramenta aumenta com o aumento da porcentagem de perlita e cementita (MUÑOZ DIAS, 2001).

Variações no processo de fundição das peças podem produzir diferentes características de usinabilidade no interior da mesma peça. Um rápido resfriamento de uma seção fina, por exemplo, pode provocar uma dureza elevada, dificultando a usinabilidade (GUESSER, 2002).

Segundo Marwanga et al., (1999) nos ferros fundidos, a grafita em forma de “escamas”, assim como a microestrutura, influenciam na quantidade de trincas e lascas que acontecem durante o processo de usinagem de engrenagens, blocos de motor, e outras peças acabadas.

A resistência básica e a dureza do ferro fundido são devidas à matriz metálica na qual a grafita está presente. As propriedades da matriz metálica podem variar desde aquelas suaves, como a do aço de baixo carbono até as mais duras, como a dos aços de alto carbono. A matriz pode ser completamente de ferrita que tem alta usinabilidade, porém baixa resistência ao desgaste abrasivo (DINIZ et al., 2010).

Uma matriz completamente perlítica é característica de ferro fundido cinzento de alta resistência. Muitas fundições produzem ferros fundidos com uma microestrutura de matriz de ferrita e perlita, para obter dureza e resistência médias. Adições de ligas e tratamentos térmicos

podem ser usadas para produzir ferro fundido cinzento com perlita muito fina ou com uma estrutura de matriz acicular (GUESSER, 2009; FERRER, 2006).

A grafita tem pouca resistência e dureza, diminuindo estas propriedades da matriz metálica, porém, a presença da grafita melhora a usinabilidade do ferro fundido cinzento, até mesmo em níveis de dureza elevados (GUESSER, 2009). O ferro fundido cinzento pode ser usinado a seco, propiciando melhores resultados, ou com ar atmosférico ou comprimido, às vezes utilizado para aspiração do cavaco, a fim de evitar algum dano à máquina-ferramenta (DINIZ et al., 2010; FERRER, 2006).

A resistência ao desgaste do ferro fundido cinzento é considerada uma característica importante, o que é, aliás, comprovado na prática pelo seu emprego usual em peças móveis de máquinas. Um dos fatores favoráveis ao comportamento do ferro fundido cinzento quanto à resistência ao desgaste é a alta usinabilidade do material, fazendo com que assim, as peças correspondentes possam ser produzidas economicamente dentro de rigorosas tolerâncias dimensionais, o que contribui para diminuir o atrito entre partes e diminuir a ação de desgaste (CHIAVERINI, 2002; GUESSER, 2009; INFOMET, 2015).

A presença de grafita livre, garante ao material característica lubrificante, contribuindo para a diminuição do atrito entre as partes de contato, o qual, por sua vez, pode levar à possibilidade de, pelo calor desenvolvido, ocorrer uma soldagem localizada, tendo como consequência o arrancamento de partículas, tornando novamente uma superfície áspera na usinagem (GUESSER, 2009; INFOMET, 2015).

Aparentemente, a melhor estrutura para o ferro fundido cinzento, sob o ponto de vista de resistência ao desgaste, é a matriz 100% perlítica e grafita do tipo A, ou seja, veios irregulares e desorientados. O pior ferro fundido seria o que apresenta matriz ferrítica associada com grafita dendrítica, tipo D ou E (GUESSER, 2009; INFOMET, 2015).

2.4.2 - Usinabilidade de ferros fundidos vermiculares

Os principais trabalhos sobre a usinabilidade dos ferros fundidos vermiculares foram desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do PTW - Instituto de Gerenciamento de Produção, Tecnologia e Máquinas-Ferramenta (Institut für Produktionmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen) da Universidade Técnica de Darmstadt (Technische Universität Darmstadt)

e no Brasil em diferentes institutos de pesquisa e universidades, sob demanda e participação da Tupy S.A. Desta forma, grande parte das informações que será apresentada na sequência é creditada aos autores vinculados a essas instituições.

O ferro fundido vermicular possui propriedades mecânicas superiores ao ferro fundido cinzento, atualmente utilizado na fabricação de blocos de motores, sem perdas significativas em condutividade térmica, possibilitando a fabricação de motores diesel de maior eficiência térmica, menor emissão e peso reduzido (MOCELLIN et al., 2002).

Segundo Bagetti et al., (2009), no caso do ferro fundido vermicular, em relação ao ferro fundido cinzento, este possui maior limite de resistência, cerca de 75% a mais e maior rigidez, em torno de 45%, o que torna evidente uma maior dificuldade na sua usinagem em relação ao ferro fundido cinzento (DAWSON; SCHROEDER, 2004 ; MOCELLIN et al., 2002).

Portanto, devido a este tipo de microestrutura o ferro fundido vermicular apresenta boa resistência mecânica, ductilidade e tenacidade e, apesar de inferior ao cinzento, boa capacidade de amortecimento e condutividade térmica, consequentemente resistência ao choque térmico.

Tendo em vista todas estas características citadas anteriormente, a estrutura do ferro fundido vermicular é considerada de relativa baixa usinabilidade, tornando-se este um fator limitante de sua aplicação (DORÉ et al., 2007).

Outro fator, também importante e que deve ser levado em consideração na fabricação do ferro fundido vermicular é o limite de nodularidade que deve estar em uma faixa de 0 a 20%, pois quanto maior a quantidade de nódulos de grafita na sua microestrutura, maior será a resistência à tração e a rigidez, diminuindo a condutividade térmica e usinabilidade do material (DORÉ, 2007).

2.4.3 - Efeito da forma da grafita e influência da proporção perlita / ferrita

Segundo Dawson et al., (1999) a formação de cavacos em ferros fundidos é afetada diretamente pela forma de distribuição da grafita, que possui pouca resistência mecânica e gera descontinuidades e efeitos na matriz, auxiliando o processo de remoção de material. Um aumento na proporção de perlita não implica necessariamente em um maior desgaste da ferramenta de usinagem (FERRER, 2006).

De acordo com Sahm et al., (2002) e Godinho (2007), existem diversas variáveis que podem influenciar a usinabilidade do ferro fundido vermicular. Dentre elas, podem ser citadas:

- A quantidade de perlita;
- A influência das inclusões;
- A forma da grafita e os efeitos dos elementos de liga;
- A distribuição da grafita;
- Efeitos dos elementos de liga.

2.4.4 - Influência da forma da grafita

Nos ferros fundidos o formato da grafita na matriz metálica exerce uma influência considerável nas propriedades mecânicas do material e na usinabilidade. No ferro fundido cinzento o formato lamelar da grafita, por exemplo, possui extremidades pontiagudas, que agem como grandes concentradores de tensão, resultando em uma redução da resistência mecânica do material, principalmente quando o mesmo é submetido a esforços de tração. No ferro fundido vermicular a grafita possui extremidades arredondadas e interligadas com as grafitas vizinhas. Isto proporciona um ganho de resistência e tenacidade, piorando, entretanto, a usinabilidade do material (DAWSON et al., 2001).

2.4.5 - Efeitos dos elementos de liga

Ressalta-se que uma forte influência na usinabilidade dos ferros fundidos está na adição de elementos de ligas. No ferro fundido vermicular os elementos normalmente utilizados para alterar as propriedades mecânicas do material e a usinabilidade são: enxofre, silício, titânio, cromo e manganês (ANDRADE, 2005; GODINHO, 2007).

No ferro fundido cinzento o enxofre (teor entre 0,08 a 0,12%) reage com o manganês (Mn) formando inclusões de sulfeto de manganês (MnS). Durante o processo de usinagem, estas inclusões de sulfeto de manganês formam uma camada protetora e com alta capacidade de cisalhamento nas superfícies da ferramenta de corte, proporcionando uma barreira contra os mecanismos de desgastes de abrasão e difusão (GUESSER et al., 2005).

Na obtenção do ferro fundido vermicular faz-se necessária a adição de magnésio (Mg) em sua composição. Este elemento desempenha o papel de agente nodularizante da grafita formando as grafitas compactas com formato vermicular. No ferro fundido vermicular o baixo teor de enxofre (0,005 a 0,025%) e a presença de magnésio, o qual possui uma maior afinidade química pelo enxofre, impede a formação do MnS e assim dando lugar ao MgS.

Com a ausência do MnS, o que induz a não formação da camada protetora que reduz os mecanismos de desgaste de abrasão e de difusão na ferramenta, resulta em menor vida da ferramenta quando comparada ao processo de usinagem do ferro fundido cinzento (REUTER et al., 2002; DAWSON, 2001).

Entretanto, as propriedades superiores do ferro fundido vermicular implicam em um maior custo de usinagem em relação ao ferro fundido cinzento, devido aos tempos de processo e desgaste das ferramentas serem mais elevados (BAGETTI et al., 2009).

Essa diferença de usinabilidade entre os dois materiais torna-se mais clara quando da análise da Figura 2.11 (a) e (b), na qual se observa resultados de um estudo feito por Reuter et al., (2001).

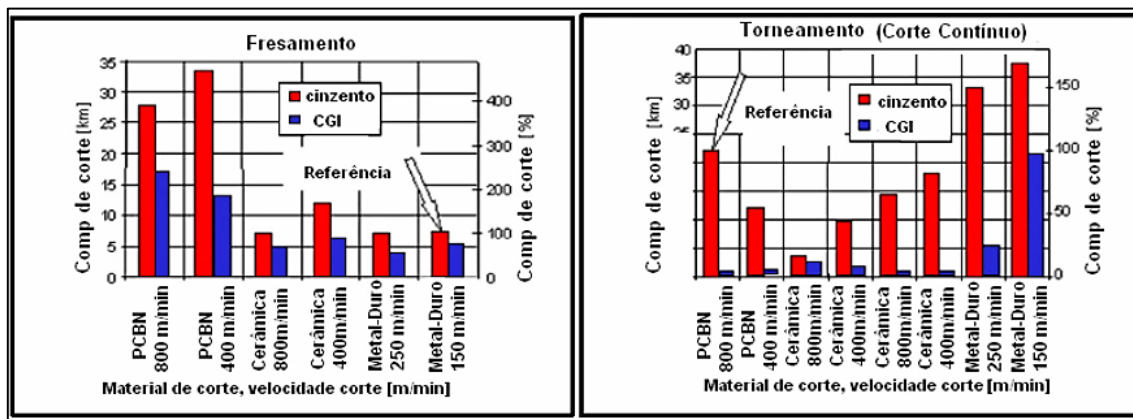


Figura 2.11 – Vida efetiva de corte em diferentes materiais de ferramenta de corte, para corte interrompido (a) e contínuo (b) do CGI - *Compacted Graphite Iron* perlítico e do ferro fundido cinzento (Adaptado de REUTER et al., 2001).

Segundo o autor, foram utilizados neste estudo, parâmetros de corte comumente empregados na usinagem do ferro fundido cinzento, isto é, velocidades de corte entre 150-250 (m/min) com ferramentas convencionais de metal-duro e 400-800 (m/min) com ferramentas cerâmicas e CBN. Diante dos resultados obtidos, pode se concluir que a vida da ferramenta na

usinagem do vermicular é cerca de 50% da vida da ferramenta obtida na usinagem do ferro fundido cinzento, em operações de fresamento e de torneamento (REUTER et al., 2001). Os autores explicam que, no fresamento a altas velocidades de corte, a tendência à difusão e à oxidação é menor em razão do corte ser interrompido.

O ferro fundido vermicular possui maior resistência e dureza, o que resulta em maiores forças de corte; sendo assim, as operações de usinagem nesse material requerem cerca de 20% a 30% a mais de potência, bem como sistemas de fixação mais robustos, em relação à usinagem do ferro fundido cinzento (GASTEL et al., 2000).

É importante ainda destacar que, ao mesmo tempo em que o ferro fundido vermicular apresenta maior dificuldade em sua usinagem em relação ao ferro fundido cinzento, também apresenta maior facilidade em ser usinado quando em comparação ao ferro fundido nodular.

Na Figura 2.12 é mostrado a dificuldade em usinar o ferro fundido vermicular em comparação com o ferro fundido cinzento. Em todos os processos, é evidente que o vermicular é mais difícil de ser usinado que o ferro fundido cinzento. Em operações de usinagem como fresamento e furação, a vida da ferramenta condiz com a diferença verificada na resistência mecânica das ligas. O problema que ainda requer soluções é a grande diferença observada no processo de mandrilamento, no qual a vida da ferramenta, quando usinando o vermicular, é em torno de 5% do valor obtido quando usinando o cinzento com altas velocidades de corte e utilizando ferramentas cerâmicas (XAVIER, 2009).

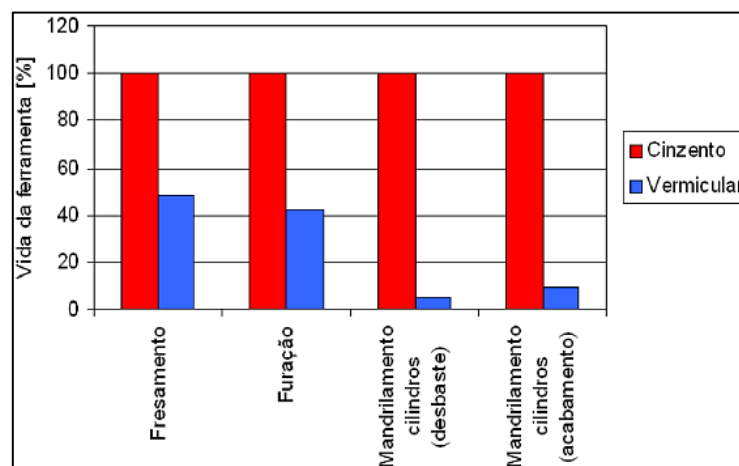


Figura 2.12 – Vida das ferramentas em relação à usinagem do ferro fundido vermicular e do ferro fundido cinzento em diferentes processos de usinagem (REUTER, 2000, apud XAVIER, 2009).

A dificuldade na usinagem dos ferros fundidos vermiculares torna-se ainda maior quando estão submetidos a alguns processos de fabricação que envolve altas velocidades de corte, alta taxa de calor gerado e assim, menor tempo de vida da ferramenta. A operação mais crítica ainda é o mandrilamento dos cilindros, processo no qual a redução da vida útil da ferramenta é bastante significativa, segundo Mocellin (2007).

Dentre os estudos de usinabilidade do ferro fundido cinzento, Meurer (2007) analisou a usinabilidade por intermédio de ensaios em discos de freio ventilados, com diferentes ligas de ferro fundido cinzento FC-250, utilizando-se de ferramentas de metal duro e cerâmica. O autor avaliou o desempenho das ferramentas tanto na remoção da camada bruta de fundição, como no desbaste pós-remoção. Os resultados obtidos pelo autor podem ser observados na Figura 2.13. Esses resultados deixam evidente o melhor desempenho da ferramenta de metal-duro, tanto na remoção da camada bruta de fundição quanto no desbaste após a remoção. No entanto, os melhores resultados com as ferramentas de metal-duro foram obtidos em razão da velocidade de corte mais baixa $v_c = 400$ (m/min), utilizando a camada de revestimento (TiN), em que os efeitos do aumento da temperatura e da abrasão não são tão ativos, o que proporciona maior tempo de vida para as ferramentas (MEURER, 2007).

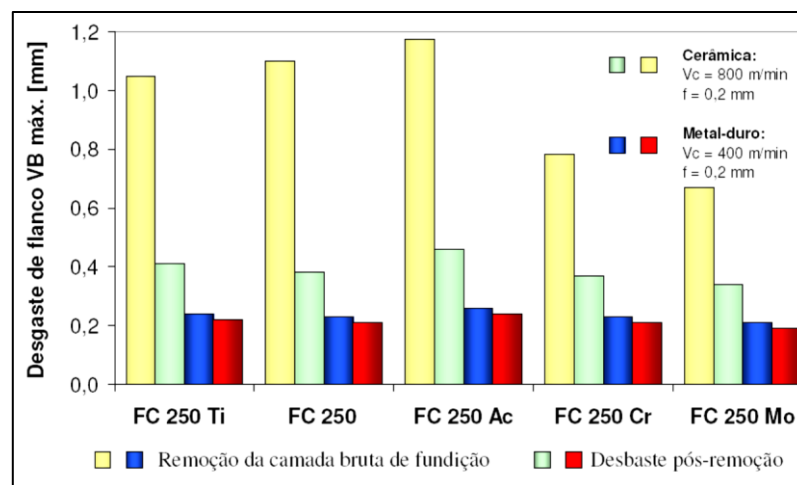


Figura 2.13 – Comportamento do desgaste da ferramenta cerâmica e metal-duro após usinagem de ferro fundido cinzento (MEURER, 2007).

O autor explica que durante a remoção da camada bruta de fundição, a baixa tenacidade das ferramentas cerâmicas foi um agravante adicional para o aumento do desgaste, pois a camada bruta possui imperfeições de dimensões e falta de homogeneidade da microestrutura na camada, exercendo um esforço de corte bastante variável nas ferramentas de corte.

Quanto às diferenças de usinabilidade entre as ligas, observa-se que ambas as ferramentas de corte apresentaram menor desgaste de flanco em todos os ensaios na usinagem na liga FC 250. De acordo com o autor, isso ocorreu em virtude do alto teor de carbono, associado ao menor número de células eutéticas, maior percentual de grafitas grandes e dureza mais baixa (MEURER, 2007).

2.5 - Fresamento de ferros fundidos cinzentos e vermiculares

Segundo Stemmer (2005), o fresamento pode ser dividido em dois grupos principais, fresamento frontal e fresamento periférico (tangencial), conforme mostrado na Figura 2.14. Outros métodos são considerados variações destes dois.

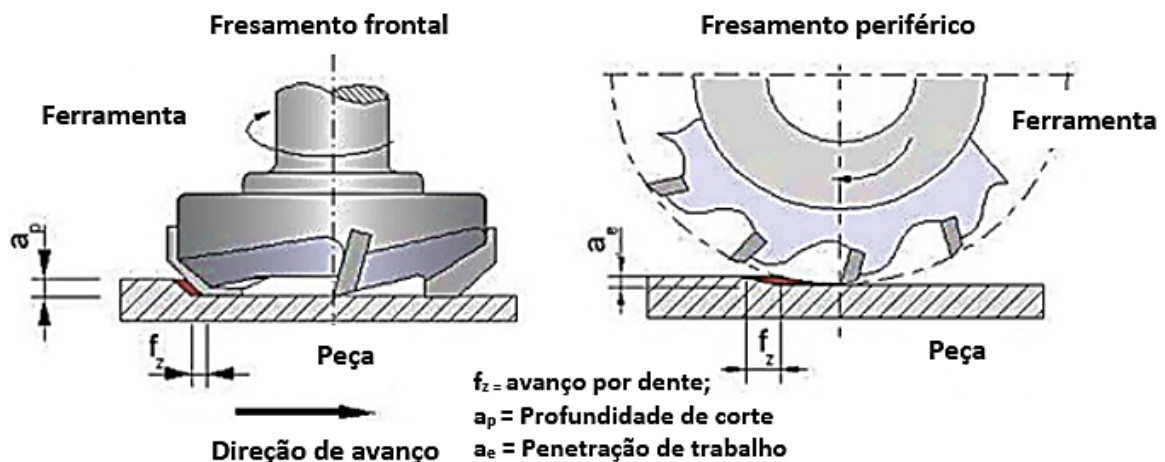


Figura 2.14 – Fresamento frontal e periférico (Adaptado de STEMMER, 2005).

- **Fresamento frontal:** nesse caso, os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta. O eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada. As fresas são chamadas frontais ou de topo, o fresamento pode ser utilizado tanto para desbaste quanto para acabamento de peças.

A penetração de trabalho (a_e) é consideravelmente maior que a profundidade de corte (a_p), sendo a superfície da peça gerada pelas duas arestas de corte da ferramenta (aresta principal e aresta secundária).

- **Fresamento periférico** (concordante ou discordante): operação nos quais os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta. O eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo gerada. As fresas são chamadas de cilíndricas ou tangenciais, sendo a profundidade de corte (a_p) significativamente maior que a penetração de trabalho (a_e).

A vida útil das ferramentas no processo de fresamento é maior que os valores usuais no torneamento, pois a temperatura de usinagem média é menor. Para o processo de fresamento Stemmer (2005) recomenda que o diâmetro da fresa utilizada no fresamento frontal deve ser maior do que a largura a ser fresada ($D > 1,5 \times a_e$). Com isso, a espessura do cavaco na entrada será igual ou maior do que 80% do avanço por dente e o impacto inicial se dará afastado da aresta de corte, em um ponto menos vulnerável.

Segundo Sandvik Coromant (2008), o posicionamento da fresa afeta o ângulo de entrada da pastilha, determinando se o choque inicial é absorvido por uma região mais ou menos resistente. Com fresas de diâmetro igual à largura da peça, a espessura do cavaco na entrada e saída fica muito pequeno, provocando elevado desgaste abrasivo (MUELLER, 2005).

Existe ainda o fresamento de topo que é geralmente diferenciado do fresamento tangencial ou frontal mais pelo tipo da aplicação do que pela definição. Ele normalmente é preferido quando do perfilamento e abertura de canais, cavidades ou reentrâncias. São bastante empregados na produção de moldes e matrizes (TRENT, 2000).

O fresamento de topo não é tão eficiente quanto os outros métodos de fresamento na remoção de material devido ao topo da ferramenta não ser apoiado e a razão comprimento/diâmetro geralmente ser alta. Consequentemente, cortes pesados não são praticáveis. Mas apesar de sua baixa eficiência na remoção de metal, o fresamento de topo é frequentemente preferido para perfilamento, abertura de ranhuras, chanframentos e usinagem de cavidades (ASM, 1989; VIANA, 2009).

Segundo Machado et al., (2015) e Sales et al., (2007), as ferramentas de corte usadas no corte interrompido como o (fresamento), são frequentemente rejeitadas por lascamento, trincamento ou fratura (quebras). Neste tipo de operação o desenvolvimento do desgaste uniforme, na superfície de folga ou saída, será dominante apenas se a ferramenta de corte possuir

tenacidade suficiente para resistir aos choques mecânicos e térmicos inerentes a tais processos. No corte interrompido, uma aresta de corte pode sofrer avarias na entrada, no meio ou na saída do corte, durante um ciclo ou revolução da ferramenta.

Com a progressão do desgaste e avaria ocorridas nas ferramentas de corte, isto pode gerar a quebra da ferramenta, e muitas vezes, esta quebra pode acontecer inesperadamente devido a alguns fatores como: ferramenta muito dura, carga excessiva, influência do raio de ponta, ângulo de ponta ou ângulo de cunha pequeno, corte interrompido, parada instantânea, dentre outros fatores (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010).

Segundo Zeilmann et al., (2011), tratando-se de um processo de fresamento, onde o corte é interrompido, com cada aresta de corte experimentando uma fase ativa, onde há o corte e a formação do cavaco, e uma fase inativa, onde não há corte, a ferramenta sofre aquecimentos e resfriamentos cíclicos, que podem ocasionar trincas e sulcos desenvolvidos em forma de pente (MACHADO et al., 2015).

De acordo com Trent et al., (2000), a fratura da ferramenta ocorre mais frequentemente no início do corte interrompido, normalmente devido à profundidade de usinagem inadequada. A fratura pode ser iniciada, também, pela deformação da ferramenta, seguida pela formação de trinca e, finalmente, a fratura mecânica surge no estágio final da falha da ferramenta.

Doré et al., (2007) afirmam que, durante a usinagem, a ferramenta é submetida a desgastes que dependem da forma da solicitação e do tempo de sua utilização. O desgaste é relativamente rápido e se deve sobretudo às solicitações térmicas e mecânicas elevadas (WEINGAERTNER e SCHROETER, 2002). A fim de aumentar a vida das ferramentas, é indispensável conhecer as causas dos desgastes (STEMMER, 2005).

2.5.1 - Fresamento de ferros fundidos cinzentos

No fresamento de ferros fundidos cinzentos com ferramentas de metal duro, normalmente, ocorrem os desgastes de flanco, podendo ocorrer trincas térmicas com mecanismos de desgaste abrasivo sendo predominante. Na peça, problemas de microlascamento no lado de saída da fresa da peça e de acabamento superficial são os principais (STEMMER, 2005).

Há vários conceitos de fresas que foram desenvolvidas especificamente para fresamento de ferros fundidos cinzentos:

- Fresa para faceamento;
- Fresa para desbaste;
- Fresa ajustável para acabamento;
- Fresa não ajustável para acabamento.

A maioria das fresas pode ser usada em ferro fundido cinzento, bastando simplesmente levar em consideração a escolha de uma geometria da pastilha e classe dedicadas para o processo de fresamento.

✓ *Desbaste*

i) De preferência, o corte deve ocorrer sem refrigeração, ou sem fluido de corte, para minimizar problemas com trincas térmicas. Use pastilhas de metal duro com coberturas espessas.

ii) Se o microlascamento da peça for um problema sugere-se verificar o desgaste de flanco, reduzir o avanço (f_z), para reduzir a espessura de cavacos e usar uma geometria mais positiva.

iii) Se a utilização do fluido de corte for necessária para evitar a formação de pó na usinagem, deve-se optar por pastilhas da classe para fresamento com refrigeração e normalmente mais tenazes, K30-40 (Fonte - SANDVIK, 2015).

Ferramentas de metal duro com cobertura é sempre a primeira escolha, porém, também é possível utilizar cerâmicas. Observa-se que a velocidade de corte (v_c) deve ser muito alta, acima de 800 m/min. Ressalta-se que a formação de rebarbas na peça limita a velocidade de corte. Não devendo ser usada a refrigeração (STEMMER, 2005).

✓ *Acabamento*

i) Devem-se usar pastilhas de metal duro com cobertura, ou alternativamente, uma pastilha de metal duro sem cobertura, sem ou com refrigeração.

ii) Nitreto Cúbico de Boro (CBN) pode ser usado para acabamento com altas velocidades em ferros fundidos cinzentos, e não sem a presença de fluido de corte (Fonte - SANDVIK, 2015).

2.5.2 - Fresamento de ferro fundido vermicular

O ferro fundido vermicular (CGI) com teor perlítico menor que 90% (geralmente com cerca de 80%) é mais comumente usado no fresamento. Peças típicas são blocos de motor, cabeçotes e coletores de escapamento (GUESSER, 2009).

As recomendações na escolha das ferramentas (fresas) são as mesmas utilizadas para ferros fundidos cinzentos; no entanto, geometrias de pastilha com arestas de corte mais vivas, mais positivas, devem ser selecionadas, para minimizar a formação de rebarba na peça. Na figura 2.15 podem ser vistos alguns modelos de fresas para faceamento.



Figura 2.15 – Modelos de fresas para faceamento (Fonte – CATÁLOGO WALTER TOOLS, 2018).

O ferro fundido vermicular inclui invariavelmente partículas esferoidais de grafita nodular. Enquanto a nodularidade aumenta, aumentam também as forças de corte e a rigidez, diminuindo a usinabilidade e a condutividade térmica (WEBER, 2005). Além disso, com o aumento da nodularidade a resistência do material também é elevada influenciando diretamente na usinabilidade (DAWSON, 1994).

Um fator que dificulta a usinagem de faceamento em um bloco de motor é o grande número de interrupções na superfície devido às nervuras e bolachas para reforço da estrutura do bloco, além dos furos do cilindro; demais furações de refrigeração, fixação do cabeçote e alívios

de peso. Cuidados especiais são levados em conta na escolha da fresa, pois fresas muito positivas reduzem o esforço de corte da usinagem, reduzindo a tendência ao lascamento das bordas da superfície, porém têm uma vida relativamente baixa, quando comparada às fresas com geometria da aresta de corte negativa devido a pouca resistência ao impacto (GUESSER, 2009).

Na usinagem de ferro fundido, um dos fatores que determinam o fim de vida de uma fresa é o lascamento de borda da superfície usinada, que é influenciado pelo aumento do desgaste frontal na aresta principal de corte da ferramenta e esforços de corte. Para minimizar esta ocorrência, é necessário que se utilize avanços por dente pequenos. Sendo assim, as fresas de passo fino são indicadas para desbaste e acabamento nestas partes do bloco, que permitem grandes velocidades de avanço, mesmo com um pequeno avanço por dente, proporcionando uma economia grande no tempo de corte (SANDVIK, 2005).

Porém, o uso de fresas de passo fino e de geometrias negativas da fresa é limitado pela falta de estabilidade da peça, máquina e dispositivo, fazendo com que este tipo de fresa gere elevados esforços de corte, causando irregularidade dimensional na superfície a ser usinada (MUELLER, 2005).

Outro fator importante a ser considerado é em relação ao sentido de corte da fresa (concordante ou discordante), cada sentido de corte apresenta limitações e sua influência deve ser analisada em função das diversas geometrias das peças a ser usinada (FERRER, 2006).

Ainda sobre as limitações em relação ao processo de fresamento, têm-se as seguintes considerações:

- A largura do corte aumenta em relação ao diâmetro da fresa;
- Exige a utilização de máquinas mais robustas e de maior rigidez do sistema máquina/ferramenta/peça.

Segundo Sandvik (2015), o raio na ponta do inserto aumenta sua resistência e facilita a distribuição uniforme de calor e desgaste na região crítica do inserto. A desvantagem é sua limitação em produzir um bom acabamento superficial (FERRER, 2006).

2.6 - Potência de usinagem

2.6.1 - Potência de usinagem (fresamento)

De acordo com Machado et al. (2015) a potência de usinagem necessária para girar o eixo-árvore é resultante da soma das energias necessárias para cisalhar o material, vencer o atrito, gerar nova superfície, entre outros fenômenos envolvidos. De forma resumida, em processos de fabricação, a potência de usinagem pode ser determinada pelo produto das componentes da força de usinagem pelas respectivas velocidades nessas direções.

Portanto, para as três principais componentes das forças no processo de usinagem sendo força de corte, força de avanço e força passiva, haverá uma potência respectiva para o corte e outra para o avanço, uma vez que a força passiva não possui um vetor velocidade na mesma direção. A soma das duas potências (de corte e de avanço) resulta na potência efetiva (NAVES, 2009). A potência de corte é dada pela equação (2) e a potência de avanço pela equação (3):

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6,0 \cdot 10^4} \quad [\text{KW}] \quad (2)$$

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{6,0 \cdot 10^7} \quad [\text{KW}] \quad (3)$$

Geralmente a força de corte (F_c) e a força de avanço (F_f) são dadas em [N] e a velocidade de corte (v_c) (m/min) e a velocidade de avanço (v_f) é dado em (mm/min).

Na relação entre a potência de corte (P_c) e a potência de avanço (P_f), ambas resultantes em (KW), que em situações extremas a potência de avanço chega a ser muito menor que a de corte, fazendo com que esta seja desprezada no dimensionamento do motor da máquina (DINIZ et al., 2010). De acordo com Machado et al., (2015), somente o cálculo da potência de corte é suficiente para que se determinar a potência requerida ao motor principal da máquina para uma operação de usinagem.

Segundo Diniz et al., (2010) quando se despreza a potência de avanço, tem-se a potência fornecida pelo motor (P_m) relacionada apenas com a potência de corte e o rendimento ou a eficiência da máquina em que a operação está sendo executada, representada na equação (4):

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \quad (4)$$

Em que η é o rendimento, podendo este valor variar dependendo do tipo de transmissão de movimentos da máquina.

Durante o processo de fresamento a potência consumida pelo motor principal da máquina tende a aumentar com o aumento do desgaste da ferramenta de corte. Logo, quanto maior o desgaste da ferramenta, maior o esforço de corte e, conseqüentemente, maior será a corrente necessária ao processo. Diante disto, a vida da ferramenta pode ser monitorada através da análise do comportamento dos sinais elétricos do motor da máquina-ferramenta (ANDRADE, 2012; NAVES, 2009).

2.6.2 - Medição de potência de corte

A alternativa mais simples de determinação dos esforços é pela avaliação da potência. Com este método, entretanto, não é possível a determinação vetorial da força de corte, mas somente o módulo. A potência, entretanto, é uma das maneiras mais simples para o dimensionamento do processo, tanto do ponto de vista da máquina quanto da ferramenta.

De acordo com Costa (2009), quando se adotam estimativas para projetar novas aplicações, existem duas maneiras clássicas de calcular o valor teórico das forças de corte. Através de cálculos baseados na espessura média do cavaco (hm), sendo que o cavaco removido no processo de fresamento tem sua espessura variável, em função da conjugação do avanço com a velocidade de corte e de acordo com a taxa de remoção de material (Q) e energia específica de corte.

Ressalta-se que é comum, no fresamento, mais de uma aresta cortante estar em contato ao mesmo tempo (FERRARESI, 2006; DINIZ, 2010). Vale destacar também que o ângulo de saída (γ) da ferramenta é outro parâmetro que afeta o valor da potência de corte. Com o aumento do

ângulo de saída, decorrerá uma maior facilidade ao escoamento do cavaco, reduzindo os esforços de corte e, portanto, a potência. Ocorrerá o aumento de aproximadamente 1% a cada 1° de redução deste ângulo (GUENZA et al., 2008).

Como as forças de corte são dependentes das áreas de contato entre a ferramenta e a peça e ferramenta e o cavaco, leva-se em conta a geometria da ferramenta. A ocorrência de aresta postiça ou o uso de quebra cavacos, bem como o uso de chanfros para proteção da aresta tendem a alterar os valores dos esforços de corte e a potência (SHAW, 2005; GUENZA, 2008).

2.7 - Temperaturas na usinagem de ferro fundido

Em usinagem, praticamente toda a energia mecânica consumida é convertida em energia térmica. Somente uma pequena porcentagem (1 a 3%) não é convertida em energia térmica ou é associada à geração de novas superfícies, transformações de fases e deformações elásticas na peça e cavaco (MACHADO et al., 2011). O calor é gerado nas zonas de cisalhamento e conduzido para a peça, para o cavaco, para a ferramenta e ambiente.

O aquecimento da peça durante a usinagem é, na maioria dos casos, considerado benéfico, pois implica em redução da tensão de cisalhamento do material. Em algumas situações o aquecimento da peça pode causar problemas dimensionais ou promover transformações de fase nas regiões próximas à superfície e, com isso, modificar as suas propriedades. A porção de calor transmitida à ferramenta é mais problemática (TRENT, 200). A elevação da temperatura da ferramenta tem como consequência a redução da resistência à deformação plástica do material da ferramenta e a criação de condições favoráveis para os mecanismos de desgaste termicamente ativados. As consequências da elevação da temperatura sobre a ferramenta de corte resultam na redução de sua vida e na limitação das condições de corte a serem adotadas, principalmente a velocidade de corte e o avanço.

Diante do exposto, pode-se afirmar que a temperatura de corte é considerada uma das grandezas mais influentes nos processos de usinagem, o que justifica a realização de trabalhos que buscam medir e avaliar as influências da temperatura no desempenho das ferramentas de corte.

Durante a usinagem, o cavaco do ferro fundido vermicular tende a ficar mais em contato com a face da ferramenta do que o cavaco do cinzento. Este fato aliado ao maior coeficiente de

atrimento do *Compacted Graphite Iron* CGI e à sua menor condutividade térmica tende a elevar a temperatura da ferramenta durante o corte. No entanto, as medições revelam que as temperaturas da ferramenta durante o corte do CGI são apenas alguns graus acima do cinzento (REUTER et al., 1999).

Na usinagem, praticamente toda a energia mecânica associada à formação do cavaco se transforma em energia térmica. Os centros de geração de calor no processo são a deformação do cavaco na região de cisalhamento, o atrito entre a ferramenta e o cavaco e o atrito entre a ferramenta e a peça. O calor gerado é dissipado através do cavaco, da peça, da ferramenta e pelo meio ambiente. Na Figura 2.16 é mostrado o percentual do calor dissipado por cada um dos meios citados, sendo que a maior parte do calor (75 %) é transportada pelo cavaco (DINIZ et al., 2006; WEINGAERTNER & SCHROETER, 2002).

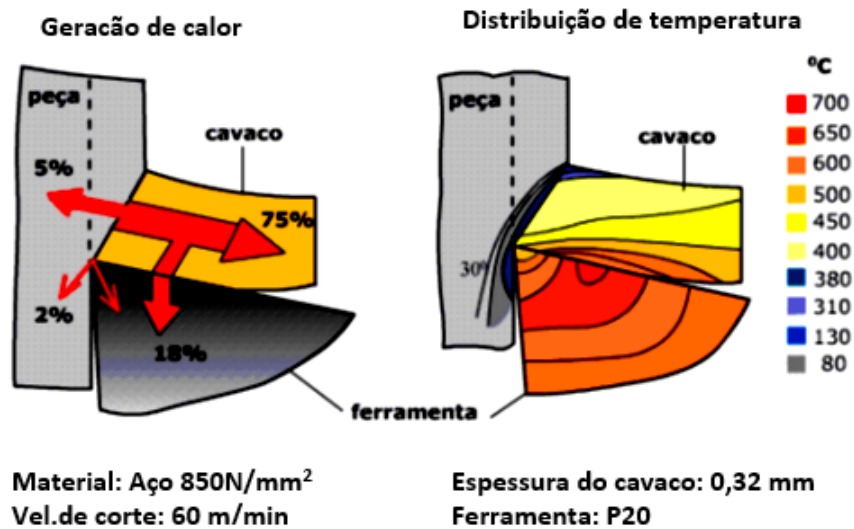


Figura 2.16 - Geração de calor e distribuição da temperatura na interface ferramenta peça durante o processo de usinagem (BAGETTI, 2009; CIMM, 2015).

A quantidade de calor gerada na usinagem aumenta com a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Esse aumento na temperatura acaba acelerando o desgaste na ferramenta de corte, e em consequência aumenta o coeficiente de atrito e a força de corte na usinagem (DINIZ et al., 2006). No ferro fundido vermicular, por ter uma condutividade térmica menor que

o ferro fundido cinzento, acaba ocorrendo um aumento na temperatura, sendo esse um dos causadores do fim de vida prematuro da ferramenta de corte (DORÉ, 2007).

Durante o processo de usinagem, a maior parte do calor gerado é dissipada pelo cavaco e uma menor quantidade é liberada pela própria peça. O restante do calor, ou seja, uma pequena parcela não se dissipa, gerando aumento significativo na temperatura da ferramenta, podendo alcançar valores de até 1.100°C ou superiores, comprometendo a resistência desta (COSTA, 1997; BAGETTI, 2009). No ferro fundido cinzento o cavaco é gerado por propagação de trincas, formando pequenos segmentos, que em baixas velocidades acabam se soldando por caldeamento devido às altas pressões e temperaturas geradas no contato com a face da ferramenta, resultando num aspecto mais coeso ao cavaco (SCHULZ, 2001). Na Figura 2.17 são mostradas as micrografias de cavaco de ferro fundido cinzento GG25, usinado em velocidade de corte na zona de transição entre corte convencional e HSC.

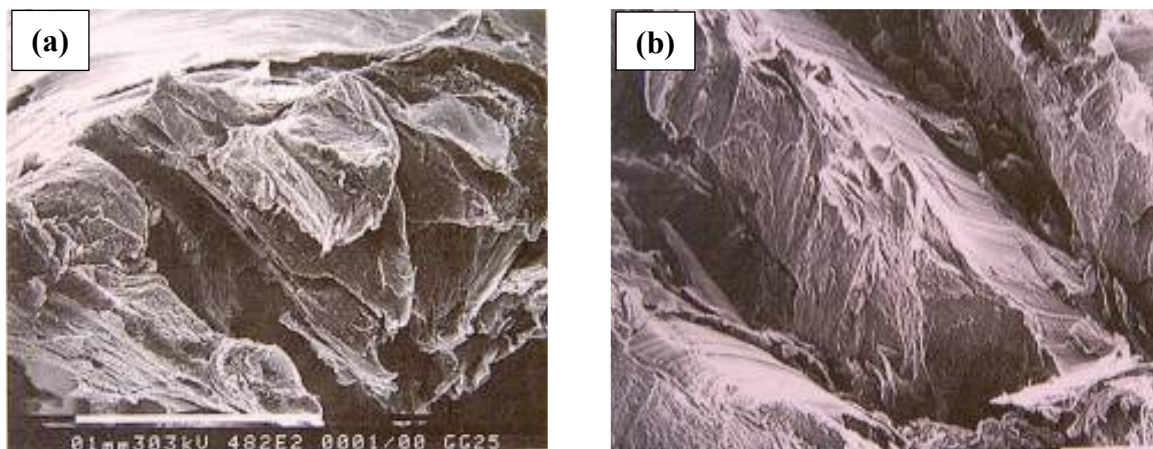


Figura 2.17 – Cavacos de GG25 gerado após a usinagem a 750 m/min: a) vista lateral; b) vista superior (GUENZA, 2008).

À medida que a velocidade de corte aumenta há um aumento na propagação das trincas no cavaco também cresce, e há menos tempo para que o calor seja conduzido para outras regiões, o que aliado à maior energia cinética fornecida aos segmentos, diminui a tendência de formação da “solda” destes segmentos, reduzindo o tamanho do cavaco. Isto facilita a expulsão do mesmo, diminuindo o tempo de contato com a face da ferramenta e consequente transferência de calor, contribuindo positivamente para redução do desgaste. A temperatura da ferramenta se mantém a

níveis suportáveis, proporcionando tempo de vida adequada mesmo com o aumento significativo da velocidade de corte (SCHULZ, 2001; GUENZA, 2008).

2.7.1 - Influência das variáveis do processo na temperatura

No corte interrompido, a variação da temperatura durante a usinagem ocorre de maneira cíclica, sendo esse um dos fatores mais dominantes nos mecanismos de desgaste e falha das ferramentas. As temperaturas desenvolvidas na ferramenta, em específico no corte interrompido, variam ciclicamente, ou seja, aumentam durante o tempo ativo e diminuem durante o tempo inativo. Essa flutuação da temperatura na interface cavaco/ferramenta leva a uma modificação também cíclica da distribuição de tensão na aresta de corte da ferramenta, podendo provocar a formação de trincas originadas por fadiga térmica (DA SILVA et al., 2001; BAGETTI, 2009).

Segundo Bagetti (2009), os efeitos térmicos da variação da temperatura são decorrentes das condições de corte, sobretudo em relação à velocidade de corte, do avanço e da relação do tempo ativo e inativo de cada ciclo, levando-se sempre em consideração o material da peça e da ferramenta de corte (SILVA et al., 2001; SANTOS, 1996). Na Figura 2.18 é possível visualizar essa variação cíclica da temperatura no corte intermitente.

Esse fenômeno cíclico também pode ser promovido por meio da variação de temperatura em consequência do acesso irregular de fluido lubrificante. Essa ação cíclica de temperatura e tensões acarreta o aparecimento de trincas de origem térmica nas ferramentas que não apresentam tenacidade suficiente para suportar a ação dessas tensões. Tais trincas desenvolvem o que se conhece por sulcos em forma de pente (SANTOS, 1996).

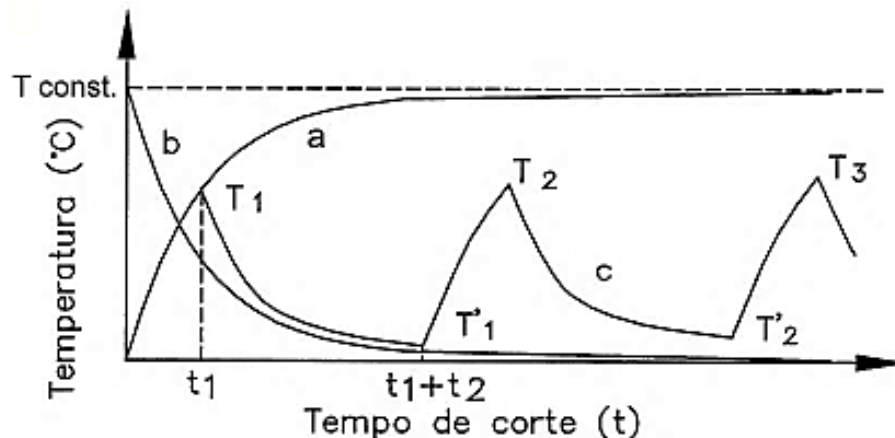


Figura 2.18 - Variação cíclica da temperatura de corte no processo de corte interrompido (PALMAI, 1987; MACHADO, 2015).

2.8 - Materiais e geometria de ferramentas utilizadas no fresamento dos ferros fundidos

Os dois tipos de materiais mais comuns usados em ferramentas de corte destinadas às operações tradicionais de usinagem são o aço rápido e o metal duro, que juntos somam 90% das aplicações na indústria moderna. Outros materiais mais avançados, tais como CBN e diamantes, detêm os 10% restantes das aplicações (KOELSCH, 2000). Por outro lado, a usinagem de materiais frágeis e/ou operações de cortes interrompidos como o caso do fresamento, por exemplo, requerem materiais de ferramentas com suficiente tenacidade para suportarem os choques e os impactos inerentes a tais processos (HÜBNER et al., 2013).

Segundo Stemmer (2005), a classificação das fresas pode ser realizada seguindo vários critérios dentre eles:

<ul style="list-style-type: none"> - Quanto ao método de fresamento - Quanto ao tipo de construção das fresas: <ul style="list-style-type: none"> - Fresa inteiriça; - Fresa calçada (dentes fixados por processos de soldagem) - Fresa com dentes intercambiáveis - Quanto à forma geométrica das fresas <ul style="list-style-type: none"> - Fresa cilíndrica e cônica; - Fresas angulares; 	<ul style="list-style-type: none"> - Quanto ao tipo de flanco ou superfície de incidência das fresas - Quanto à forma dos dentes das fresas e dos canais entre os dentes - Quanto ao sentido de corte das fresas: <ul style="list-style-type: none"> - Fresa com sentido de corte à esquerda; - Fresa com sentido de corte à direita; - Fresas com perfil constante (Detalonadas)
---	--

Na Figura 2.19 estão alguns modelos de fresas com diferentes geometrias.



Figura 2.19 - Diferentes modelos e geometrias de fresas (Fonte – CATÁLOGO WALTER TOOLS, 2018).

A classificação das ferramentas de metal duro segundo a norma ISO 513/1975 apresentava apenas três classes P, M e K. Após algumas revisões em seu texto original, as classes N, H e S foram incluídas na classificação e a última revisão da norma, incorporada pela ABNT, ABNT NBR ISO 513:2013 – (Versão Corrigida: 2015) define as classes da seguinte forma: P, M, K, N, H e S. A classe K é a classe dos ferros fundidos, apesar de também poder ser utilizada na usinagem dos aços temperados, não ferrosos, plásticos e madeiras. Nesta classe o metal duro é

composto por WC+Co, ou seja, carbonetos de tungstênio aglomerado pelo cobalto, sendo usadas na usinagem de materiais frágeis que geram cavacos curtos os quais provocam menor atrito entre o cavaco e a região de saída da ferramenta. As classes com maior teor de cobalto como é a classe K20-30, são mais empregadas nas condições de usinagem de acabamento ou cortes interrompidos, pois estas criam tensões mais elevadas na ferramenta exigindo assim maior tenacidade (MACHADO et al., 2015).

De acordo com Trent et al., (2001) o uso da cerâmica (alumina (Al_2O_3) e sialon (SiAlON)) como ferramenta de geometria definida para usinagem de ferro fundido vem aumentando consideravelmente nos últimos anos, principalmente nos processos de fresamento, torneamento de produção em massa e processos de furação. A maioria dos ferros fundidos hoje é utilizada na fabricação de tambores de freio, embreagens e blocos de motores, pois devido à obtenção de um excelente acabamento superficial conseguido atualmente com o uso de pastilhas de cerâmica como ferramenta, isto faz com que, frequentemente seja eliminada a necessidade de uma operação de acabamento posterior. Isto se deve aos cavacos do ferro fundido possuir em forma fragmentada, o que implica no uso de velocidades de corte muito elevadas, sem problemas de controle de cavacos.

Para o fresamento de ferros fundidos, em virtude da natureza abrasiva dos mesmos, o emprego de fresas calçadas ou com insertos intercambiáveis de metal-duro é o que resulta em uma aplicação mais econômica. O uso de insertos de cerâmica vem obtendo grande sucesso no fresamento de ferro fundido, em operações onde ocorrem impactos menos violentos, com avanços pequenos e onde o conjunto máquina-peça-dispositivo de fixação é rígido (SOUZA, 2011).

Entretanto, as propriedades superiores do ferro fundido vermicular implicam em um maior custo de usinagem em relação ao ferro fundido cinzento, devido aos tempos de processo e desgaste das ferramentas serem mais elevados. Em função destes problemas, vários fabricantes e pesquisadores vêm se dedicando e pesquisando intensamente novos materiais, geometria e/ou revestimento para fabricação de ferramentas utilizadas na usinagem de ferros fundido vermiculares, de modo a se aproximar cada vez mais às condições de usinagem do ferro fundido cinzento (BAGETTI, 2009). Na Figura 2.20 é mostrado um diagrama de relação entre a dureza e a tenacidade entre os materiais aplicados na fabricação de ferramentas de corte.

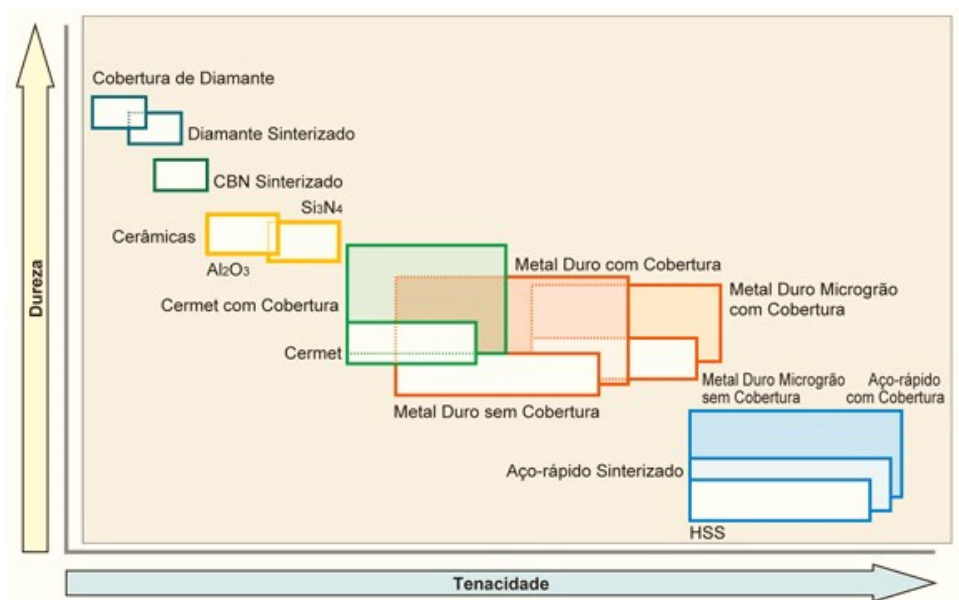


Figura 2.20 - Ilustração entre dureza e a tenacidade dos materiais aplicados na fabricação ferramenta de corte (Adaptado - MITSUBISHI MATERIALS, 2018).

Na seleção do material de ferramenta de corte para uma aplicação específica, o grande número de ferramentas existentes no mercado dificulta a decisão e torna a tarefa relativamente complexa.

De acordo com Doré (2007), na usinagem de ferros fundidos, pode ser utilizada uma grande variedade de materiais para ferramentas de corte. Dentre eles, os que se destacam com resultados de tempo de vida de ferramenta superiores são os metais-duros, cerâmicas e o CBN, sendo dada maior ênfase aos metais-duros revestidos e às cerâmicas.

Nota-se que a introdução de novos materiais está ganhando força considerável no processo de fresamento, principalmente devido às modernas máquinas CNC disponíveis hoje no mercado, que garantem potência, rigidez e rotação ao processo de usinagem (MACHADO et al., 2015).

Bagetti (2009) em seus estudos sobre análise da usinabilidade, deformação e temperatura no fresamento dos ferros fundidos vermicular e cinzento, utilizou dois tipos de materiais de ferramentas, uma de metal-duro revestido e outra de cerâmica, ambas fabricadas pela Walter Tools (2006) e com mesma geometria. A ferramenta de metal-duro, denominada pelo fabricante de WAK15, possui três camadas de revestimento, com substrato WK1 de carboneto de tungstênio

(WC) e cobalto (Co). O processo de revestimento é o CVD (chemical vapour deposition – deposição química a vapor). A ferramenta de cerâmica é à base de Si_3N_4 (nitreto de silício), não possuindo revestimento, porém, apresentando alta dureza a quente e baixo coeficiente de atrito, proporcionando alta resistência ao desgaste (STEMMER, 2005; BAGETTI, 2009).

Segundo Massirer Junior et al., (2011) a vida da ferramenta para a usinagem do ferro fundido vermicular é muito inferior à do ferro fundido cinzento, em grande parte, por causa do tipo da grafita. Esta diferença foi atribuída à maior resistência dos ferros fundidos vermiculares e à ausência de sulfeto de manganês, responsável pela função lubrificante da ferramenta. Ainda de acordo com o autor, a vida da ferramenta utilizada na usinagem do ferro fundido vermicular atingiu apenas 40% do valor alcançado para usinar o ferro fundido cinzento.

2.9 - Desgaste e vida de ferramentas na usinagem de ferros fundidos

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 3685, o desgaste de uma ferramenta é o resultado de mudanças na forma da ferramenta a partir do seu estado original, que acontecem durante o processo de corte, provocadas pela perda gradual de material ou deformação.

Machado et al. (2015), definem desgaste em ferramentas de usinagem, como sendo a destruição de uma ou de ambas as superfícies que compõem um sistema tribológico, geralmente envolvendo perda progressiva de material. O estudo dos principais mecanismos de desgaste das ferramentas de corte torna-se necessário para se adequar os parâmetros do processo e reduzir os problemas de parada de máquina para troca da ferramenta (NAVES, 2009).

Segundo Ferrer et al., (2006), a diferença entre desgaste e avaria pode ser analisada a partir da definição clássica de desgaste sendo, desgaste é a perda ou deslocamento de massa de um material causado por algum tipo de fenômeno tribológico.

As ferramentas de corte usadas no corte interrompido, processo de fresamento, são frequentemente rejeitadas por lascamento, trincamento ou fratura (quebras). Neste tipo de operação o desenvolvimento do desgaste uniforme, na superfície de folga ou saída, será dominante apenas se a ferramenta de corte possuir tenacidade suficiente para resistir aos choques mecânicos e térmicos inerentes a tais processos. No corte interrompido, uma aresta de corte pode sofrer avarias na entrada, no meio ou na saída do corte, durante um ciclo ou revolução da ferramenta (SALES et al., 2007).

Segundo Trent e Wright (2001), podem-se distinguir três tipos de destruição da ferramenta de corte na usinagem: avaria, desgaste e deformação plástica, alguns autores consideram a deformação plástica como um mecanismo de desgaste. Os três promovem a mudança na geometria da ferramenta de corte. Os dois primeiros, geralmente, promovem a perda de massa, enquanto o ultimo promove o deslocamento de massa na ferramenta de corte. Suas definições são apresentadas a seguir:

- **Avaria;** é um processo de destruição da ferramenta de corte que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lascamento ou trinca da ferramenta de corte. A quebra e o lascamento levam à perda de uma quantidade considerável de material da ferramenta de corte instantaneamente, enquanto a trinca promove a abertura de uma fenda no corpo da ferramenta de corte. A quebra é mais comum em ferramentas com baixa tenacidade, como as cerâmicas e os ultraduros. Já o lascamento depende também da tenacidade da ferramenta, mas pode ocorrer até mesmo em ferramentas de aço-rápido (SANTOS, 2004; MACHADO et al., 2015).

- **Desgaste;** Em tribologia, Hutchings (1992), em seu clássico livro sobre o assunto, define desgaste como sendo “a destruição de uma ou de ambas as superfícies que compõem um sistema tribológico, geralmente envolvendo perda progressiva de material”. No desgaste, ao contrário da avaria, esta perda acontece de maneira contínua e progressiva, e em proporções pequenas, às vezes a nível atômico, às vezes a nível granular, ocorrendo segundo vários mecanismos e a deformação plástica pode fazer parte dos mesmos. Neste processo, a temperatura desenvolvida durante o corte tem um papel decisivo, e o desgaste ocorre em ferramentas de corte de qualquer material (MACHADO et al., 2015).

- **Deformação Plástica;** é a mudança da geometria da ferramenta de corte pelo deslocamento de massa. Ela ocorre por cisalhamento devido às altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. Em casos extremos, a deformação plástica leva à total destruição da cunha cortante da ferramenta, podendo até perder massa. Ela ocorre comumente em ferramentas com resistência ao cisalhamento relativamente baixa e com maior tenacidade, como o aço-rápido, as ligas fundidas e o metal duro. Na Figura 2.21 podem ser vistos os tipos de avarias que ocorrem nas ferramentas de corte.

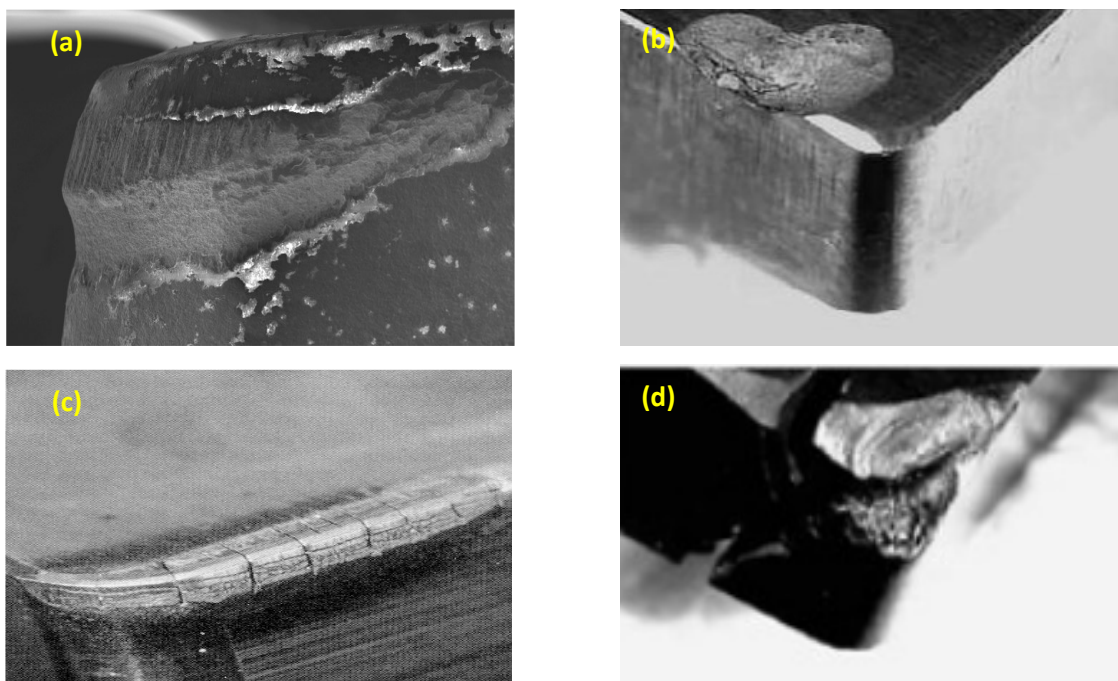


Figura 2.21 - Micrografia mostrando a morfologia dos tipos de avaria na ferramenta: a) deformação plástica (MOTA 1994; MACHADO et al., 2015); b) lascamento (LIU, Z.Q, 2002); c) trincas térmicas (METALS HANDBOOK, 1989); d) quebra (LIU, Z.Q, 2002).

Pelo menos três formas de desgaste podem ser identificadas nas ferramentas de corte, ilustradas na Figura. 2.22:

- I. Desgaste de cratera (área A);
- II. Desgaste de flanco (área B);
- III. Desgaste de entalhe (*notch wear*, áreas C e D da Figura. 2.22).

Antes que um desses desgastes atinja grandes proporções, de maneira a colocar o processo de corte em risco, a ferramenta deverá ser reafiada ou substituída.

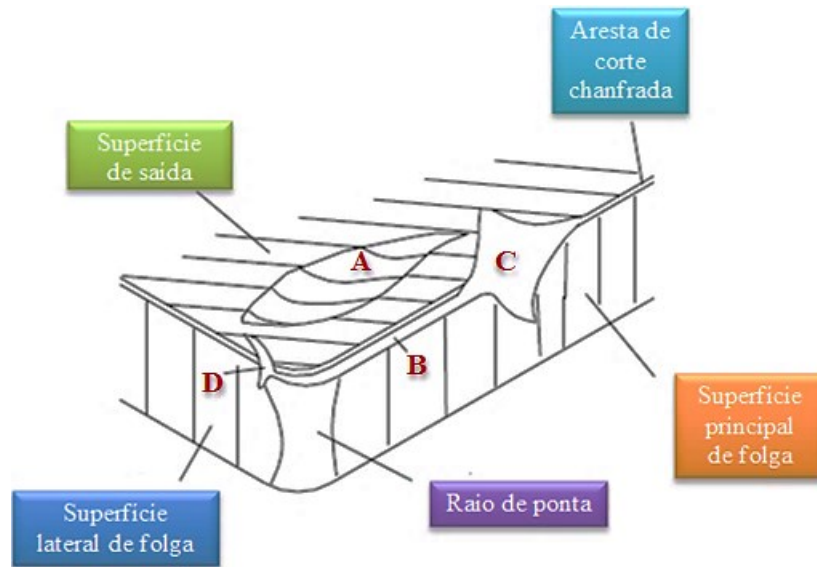


Figura 2.22 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (Adaptado - MACHADO et al., 2015).

2.9.1 - Mecanismos de desgastes

Os mecanismos do desgaste da ferramenta de corte, de forma geral, agem ao mesmo tempo, dificultando a detecção da sua causa e efeito. Em condições normais de corte, uma das formas de desgaste apresentada na Fig. 2.23 irá prevalecer, e elas se desenvolvem por vários mecanismos de desgaste (MASSIRER JUNIOR, 2011; NAVES, 2009).

De acordo com Machado et al., (2015), a ação de cada um dos mecanismos de desgaste está ligada à temperatura de corte (causada pela velocidade de corte, avanço e outros fatores) durante a usinagem. Segundo Trent (1998), essas formas de desgaste podem ser geradas por uma ou por várias combinações de mecanismos de desgaste: deformação plástica, adesão ou *attrition*, difusão, abrasão ou oxidação, os principais mecanismos de desgaste são:

- **Abrasão:** É proveniente do contato entre a peça e a ferramenta, provocando a remoção de partículas do material da ferramenta durante a usinagem. Ele é frequentemente causado pelas partículas duras do material da peça, mas também pela temperatura de corte que reduz a dureza do material da ferramenta. A resistência à abrasão depende essencialmente da dureza a quente da ferramenta de usinagem.

- **Adesão:** Ocorre quando da ruptura dos micros caldeamentos na superfície da ferramenta, os quais surgem da ação da temperatura e pressão existentes na zona de corte. Outro fator é a superfície inferior do cavaco, recém-retirado, estar livre de camadas protetoras de óxido, apresentando-se, portanto, muito ativa quimicamente. A aresta postiça de corte é um exemplo da adesão do material nas superfícies da ferramenta. As partículas micro caldeadas, por sua vez, representam barreiras para o escoamento e deslizamento do cavaco sobre a superfície da ferramenta. Isto provoca o arranque das partículas soldadas, levando consigo, muitas vezes, pedaços do material da ferramenta de corte, causando então final precoce de sua vida. A escolha correta do fluido de corte bem com as ferramentas com revestimento pode reduzir este tipo de desgaste.

- **Desgaste causado pela aresta postiça de corte (APC):** A APC ocorre pela soldagem ou caldeamento do material em usinagem na face da ferramenta e que, por isso, assume a função da aresta de corte, a partir do momento no qual o material aderido se deforma e encrua com o fluxo posterior de cavacos sobre ele. Partículas da aresta postiça de corte podem se desprender e deslizar entre o flanco e a superfície usinada. Isto acarreta um desgaste excessivo de flanco por abrasão e má qualidade superficial, pois parte do material pode aderir-se à peça.

- **Difusão:** É o mecanismo dependente da temperatura na zona de corte, a partir da qual os átomos adquirem mobilidade, estando intimamente ligada às altas velocidades de corte. As propriedades químicas do material da ferramenta e sua afinidade com o material da peça são determinantes para o surgimento deste mecanismo. Algumas ferramentas são especialmente projetadas e especificadas para possuir resistência à difusão. As cerâmicas puras são ótimas em relação à estabilidade química, na usinagem de aços (MASSIRER JUNIOR, 2011; FERRER, 2006).

- **Oxidação:** Ocorre sob altas temperaturas e na presença do ar atmosférico, com a formação típica de carepas. O metal-duro, cuja temperatura de início de oxidação oscila entre 700 e 800°C, está mais sujeito ao mecanismo de oxidação quando composto exclusivamente de carboneto de tungstênio e cobalto. Adições de óxido de titânio e outros carbonetos, entretanto, amenizam a probabilidade de sua ocorrência. Ferramentas cujos materiais contêm óxido de alumínio estão menos sujeitas a este mecanismo de desgaste.

Na Figura 2.23 é ilustrado a ocorrência dos mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte, sendo esta influenciada pela velocidade de corte e pelo avanço de corte,

entre outros parâmetros. Assim, alterando-se as condições de corte podem ser modificados os mecanismos de desgaste de uma ferramenta de corte (MASSIRER JUNIOR, 2011; FERRER, 2006; GUESSER, 2009)

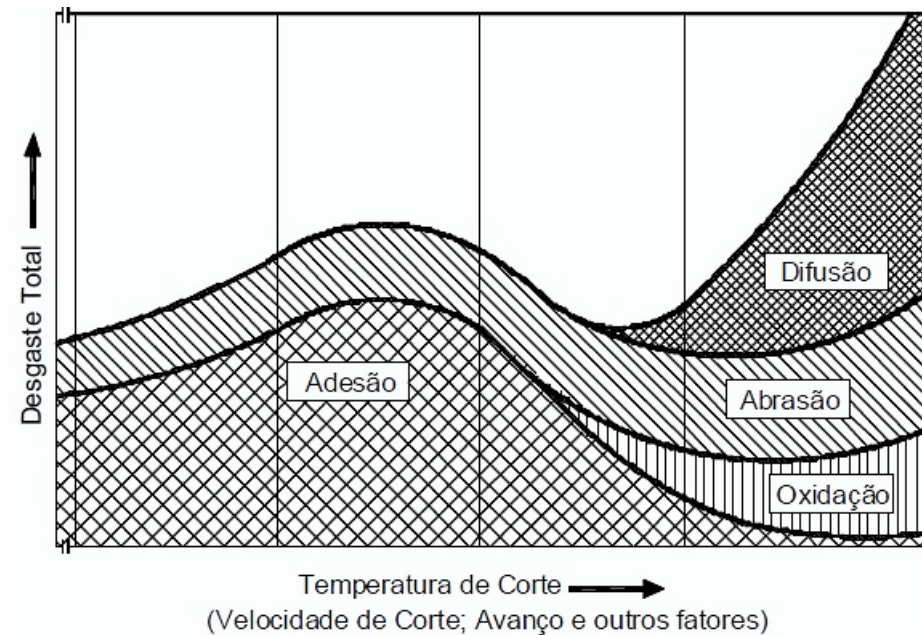


Figura 2.23 – Mecanismos de desgaste de uma ferramenta de corte (KÖNIG, 1997).

Todos os tipos de desgaste estarão presentes na usinagem dos ferros fundidos, como em qualquer outro tipo de material (MASSIRER JUNIOR, 2011).

Observa-se que em baixas temperaturas apenas os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes e a adesão é predominante, enquanto que em temperaturas elevadas, a adesão perde lugar para os novos mecanismos de difusão e oxidação. Estes dois mecanismos vão crescendo em participação com o aumento da temperatura e a difusão cresce numa escala exponencial. Este diagrama também salienta que o desgaste total cresce muito com o aumento da temperatura de corte.

2.9.2 - Vida das ferramentas e fatores que a influenciam

Segundo Machado et al., (2015), a vida de uma ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido. O fim de vida de uma ferramenta de corte é, geralmente, definido pelo grau de desgaste estabelecido.

Ressalta-se ainda que as grandezas consideradas para definir a vida da ferramenta podem ser o tempo de corte, o volume de material cortado ou número de peças fabricadas. O fim da vida é detectável quando ocorre mudança em uma ou mais características do processo. Estas podem estar correlacionadas com mudanças no ruído, no acabamento superficial, na forma de cavaco, vibrações entre a peça e ferramenta, dentre outros. Quando se deseja determinar as curvas de vida de uma ferramenta para um determinado material, com uma precisão razoável, deve-se recorrer aos ensaios de usinagem de longa duração. Nestes ensaios, a aresta de corte da ferramenta trabalha em condições constantes de corte, sendo utilizado um critério de fim de vida de desgaste previamente fixado (KRATOCHVIL, 2004).

A equação de Taylor representa o tempo de vida de uma ferramenta para determinada velocidade de corte, e ela é dada pela equação (5).

$$T = K * V_c^{-x} \quad (5)$$

onde,

x = coeficiente angular da reta.

K = vida da ferramenta para uma velocidade de corte 1 m/min.

As velocidades de corte obtidas pela equação de Taylor podem ser utilizadas na otimização de um processo de usinagem. As velocidades assim obtidas são denominadas velocidades ótimas de corte. Diversos fatores influenciam no comportamento do desgaste da ferramenta e, portanto, nos parâmetros da equação de Taylor, conforme apresentado na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Principais fatores que exercem influência nos parâmetros “x” e “K”, da equação de Taylor (MACHADO et al., 2015).

<i>Quanto à peça:</i>	<i>Quanto à ferramenta de corte:</i>	<i>Quanto ao fluido de corte:</i>	<i>Quanto à máquina ferramenta:</i>
<ul style="list-style-type: none"> - composição química - tamanho do grão - fusão e processo de fundição - fabricação: <ul style="list-style-type: none"> • fundido • forjado • laminado • trefilado - tratamento térmico: <ul style="list-style-type: none"> • recozimento • normalização • tempera e revenido • outros - propriedades: <ul style="list-style-type: none"> • resistências à tração • ductilidade • dureza • encruabilidade - dimensões e forma - microestrutura 	<ul style="list-style-type: none"> - composição - tratamento térmico - dureza e resistência ao desgaste - geometria - tenacidade 	<ul style="list-style-type: none"> - propriedades refrigerantes - propriedades lubrificantes - forma de aplicação 	<ul style="list-style-type: none"> - tipo de máquina - rigidez - avanço - profundidade - velocidade de corte

2.10 - Integridade superficial no fresamento de ferros fundidos

O termo “integridade superficial” foi citado pela primeira vez em (1964) por Field e Kahles como definição para o conjunto de alterações na superfície das peças devido à ação de ferramentas de corte ou de outros processos de fabricação. As alterações superficiais podem ser de natureza mecânica, metalúrgica, química ou outros tipos de transformação (LUCCA et al., 1998). A integridade superficial tornou-se oficialmente um campo de estudos, durante a 21ª Assembleia Geral da CIRP em Setembro de 1971 (SALES et al., 2007).

Segundo Machado et al., (2015), a condição de uma superfície usinada é o resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e às vezes reações químicas. Todos estes fatores podem ter efeitos diferentes na nova superfície, assim o termo integridade superficial é utilizado para descrever a qualidade de uma superfície e, portanto, engloba um grande número de variações na mesma.

Desta forma, o conceito de integridade superficial não pode ser definido apenas em uma dimensão e não abrange somente a rugosidade da superfície ou a sua forma geométrica.

Este termo também envolve outras características da superfície e de camadas abaixo desta, onde estas são classificadas em alterações na microgeometria da superfície e alterações em camadas internas da peça, ou seja, alterações sub-superficiais que descrevem a integridade superficial. Na Figura 2.24 é apresentada a classificação da integridade superficial (MACHADO et al., 2015).

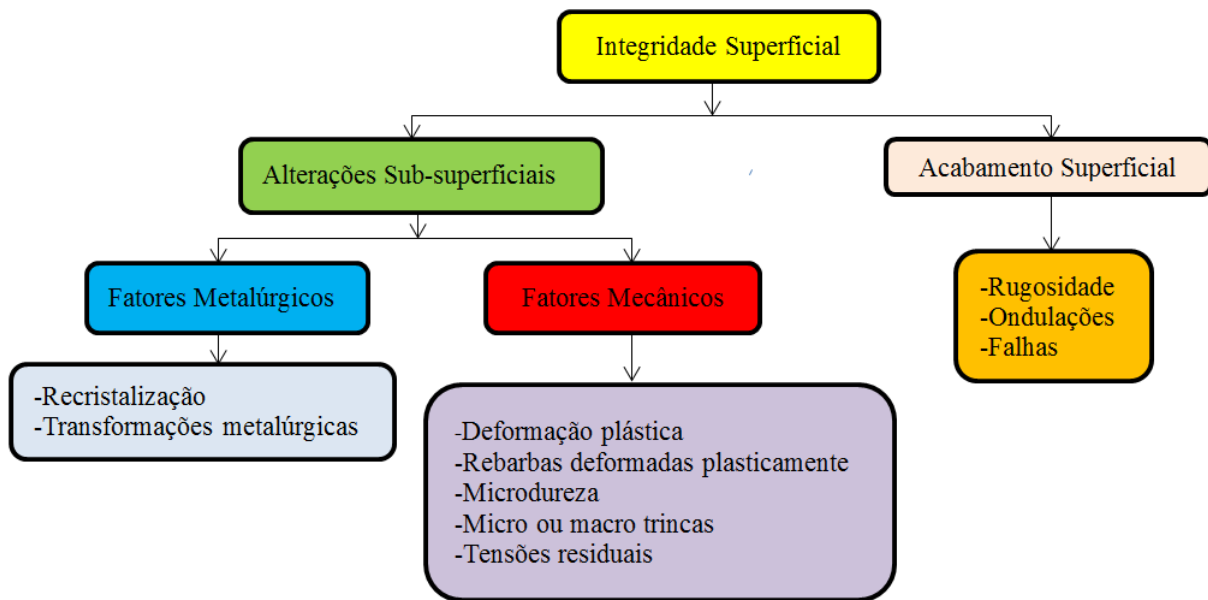


Figura 2.24 - Classificação da Integridade Superficial (Adaptado de MACHADO et al., 2015)

Através destas informações, permite-se realizar uma caracterização da natureza da camada superficial da peça (PAULO, 2008). O processo de fabricação, em especial os processos de usinagem, é determinante na integridade superficial que se deseja alcançar. Alguns problemas que têm sido identificados em razão do processo, dentre outros, são: superaquecimento, queima, micro trincas, irregularidades superficiais, alterações metalúrgicas, incluindo distorções microestruturais, tensões residuais e redução da vida em fadiga.

Muitas alterações ocorrem devido ao ciclo térmico mecânico, enquanto que outra devido às deformações mecânicas que ocorrem durante o corte. Os efeitos térmicos tendem promover tensão residual de tração, enquanto os efeitos mecânicos tendem a resultar em uma tensão residual de compressão (AXINTE e DEWES, 2002; OLIVEIRA 2006).

Segundo Farias (2009), a vida útil de uma peça produzida a partir de processos de usinagem depende fortemente da sua condição superficial. Por intermédio de uma adequada caracterização da qualidade superficial e da compreensão dos elementos que exercem influência sobre a mesma, é possível melhorar o desempenho dos componentes fabricados, evitar falhas e reduzir os custos globais de manufatura (ZEILMANN et al., 2010).

Assim, o estudo da integridade superficial do material após o processo de fabricação tenta explicar, por meio do máximo de informações possíveis retiradas do próprio material, qualquer alteração ocorrida na superfície e sub-superfície da peça, visando prever a vida útil deste material (PAULO, 2008).

2.11 - Rugosidades das superfícies usinadas

Segundo a ABNT NBR ISO 4287, a rugosidade é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos. Ela afeta os seguintes aspectos: qualidade de deslizamento; resistência ao desgaste; possibilidade de ajuste do acoplamento forçado; resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes; qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras; resistência à corrosão e à fadiga; vedação e a aparência.

O acabamento de uma superfície usinada é a combinação de vários fatores que podem ser divididos em (MACHADO et al., 2015; KALPAKJIAN e SCHMID, 2010; HÜBNER et al., 2014):

- Rugosidade Superficial;
- Ondulações;
- Falhas.

A rugosidade superficial por sua vez é um parâmetro que é especificado de acordo com a aplicação da superfície usinada. Uma rugosidade pequena é essencial em superfícies de mancais, superfícies que requerem pintura, superfícies que servirão de escoamento de fluidos e gases, superfícies cujo visual exige brilho e aquelas superfícies que devem refletir raios e luzes

(MACHADO et al., 2015). Na Figura 2.25 são mostrados os elementos que representam o acabamento superficial.

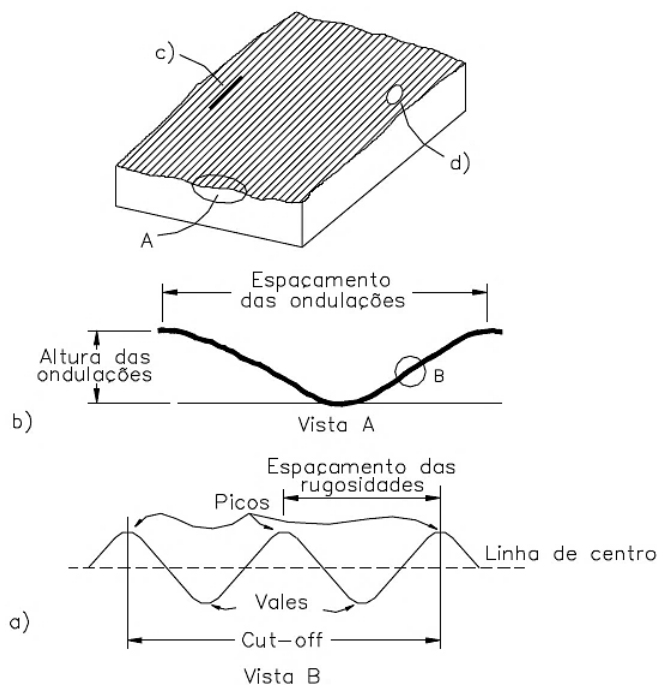


Figura 2.25 - Elementos do acabamento superficial: a) rugosidade superficial; b) ondulações; c) marcas denotando direções das irregularidades; d) falhas (Adaptado - MACHADO et al., 2015).

A norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) define (R_a) rugosidade média, como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição. Este valor é obtido medindo-se os desvios do perfil em relação a uma linha de centro. A altura máxima do perfil (R_z) é definida como a média da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales detectadas em trechos no comprimento de amostragem. Já a rugosidade (R_q) é denominado como o desvio médio quadrático do perfil avaliado, ou seja, é a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem, este valor representa a altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, dentro do comprimento de amostragem.

De acordo com Machado et al., (2015), a rugosidade média teórica (R_a) pode ser calculada no fresamento frontal utilizando uma ferramenta com raio de ponta (r_e) e avanço por dente (f_z) pela Equação 6.

$$Ra = \frac{r\varepsilon - \sqrt{r\varepsilon^2 - \left(\frac{f_z}{2}\right)^2}}{2} \quad (6)$$

Em casos reais, a rugosidade real costuma ser maior do que a teórica, devido a:

- posicionamento irregular das pastilhas no sentido axial;
- desgaste irregular das arestas;
- fluxo irregular de cavaco;
- fixação e/ou rigidez da peça deficiente;
- condições da máquina deficientes (exemplo; se a fresa não está bem balanceada, o dente

mais externo faz o corte; assim, o avanço real por dente é igual ao avanço por rotação, o que prejudica o acabamento).

Cada processo de usinagem garante uma precisão em determinadas condições de usinagem. Na Tabela 2.9 é apresentada Classe de Tolerância (IT) e a Rugosidade Média (R_a) que podem ser obtidas por fresamento.

Tabela 2.9 - Rugosidades obtidas por fresamento para superfícies planas (Adaptado - HÜBNER et al., 2014).

Processo de Fresamento	Classe de Tolerância (IT)	Rugosidade R_a (μm)
Desbaste	11-13	5 – 20
Semi-acabamento	8-11	1,25 – 10
Acabamento	6-8	0,32 – 1,25

Uma superfície após o processo de fresamento apresenta erros de perfil e rugosidade do material, estes erros normalmente são uma ondulação, que pode ser resultado de folgas da ferramenta montada na face do fuso ou posição axial irregular dos cantos das arestas de corte, sendo que as distâncias entre picos normalmente coincidem com o avanço por dente (de SOUZA JÚNIOR e SALLES, 2001).

Segundo de Souza Júnior e Salles (2001), nos processos de fresamento referentes ao faceamento de peças onde a profundidade de corte é inferior a 1 mm, obtêm-se um melhor acabamento com o uso de insertos com uma face plana, o que promove o alisamento da superfície

usinada e a aresta de corte mais saliente alisa a superfície cortada pelas arestas de corte anteriores. Assim, somente uma parte da aresta de corte da fresa gera a superfície acabada. Se o avanço por rotação é menor que a largura da fase plana, somente a aresta mais saliente fará o acabamento da superfície (SANDVIK, 1994). Todavia, os sistemas de fixação e ajustes destes insertos na ferramenta (fresa) é de fundamental importância para se conseguir uma planicidade perfeita entre os insertos e um batimento axial com uma menor dispersão (de SOUZA JÚNIOR e SALLES, 2001).

De acordo com Metals Handbook (1989), para obtenção do acabamento no processo de fresamento, este irá decorrer de vários fatores como a composição e condição do metal, velocidade de corte, avanço, material e geometria da ferramenta, além do fluido de corte.

Segundo Oliveira (2006), pode-se adquirir até 0,25 μm referentes à rugosidade média aritmética superficial após o processo de fresamento, quando se utiliza ferramenta especial com condições de corte muito bem controladas. Porém, sem o controle rigoroso das variáveis de processo pode-se obter usualmente valores na faixa de 3,20 μm com ferramentas de metal duro ou aço-rápido (METALS HANDBOOK, 1989).

Atualmente, novas tecnologias aplicadas às ferramentas de corte (insertos e pastilhas) com arestas alisadoras podem produzir acabamentos ainda melhores. Vários são os fatores que influenciam o acabamento, e para obter superfícies com valores de rugosidade menores, se faz necessário que as vibrações sejam evitadas, o que pode ser adquirido através de máquinas com elevada margem de rigidez e livre de folgas em suas guias.

A geometria da ferramenta deve ser cuidadosamente escolhida, assim como as condições de corte, onde se deve trabalhar fora da faixa que conduz a aresta postiça de corte e utilizar ferramentas em que a ponta não seja aguda e com arestas de corte sem quebras. Por fim, o material da peça deve estar livre de defeitos como: trincas, bolhas e inclusões (BOEHS et al., 1999; OLIVEIRA, 2006).

2.12 - Alterações sub-superficiais

De acordo com Machado et al., (2015), durante o processo de usinagem, com a remoção de cavaco a superfície usinada adquire uma camada bastante diferente do interior. A identificação das alterações na superfície e subsuperfície é de suma importância, principalmente em

componentes que estarão sujeitos a altas tensões, em particular tensões alternadas (tração-compressão). É também importante para componentes que irão trabalhar às altas temperaturas e em atmosferas corrosivas, porque a resistência à fluência e outras propriedades mecânicas podem ser afetadas por alterações sub-superficiais.

As principais alterações causadas tanto na usinagem convencional, como na usinagem não convencional estão descritas na tabela 2.10.

Tabela 2.10 - Alterações causadas nos processos de usinagem convencional e não convencional.

Fatores Mecânicos	Fatores Metalúrgicos
<ul style="list-style-type: none"> - <i>Deformação Plástica;</i> - <i>Rebarbas Deformadas Plasticamente;</i> - <i>Microdureza;</i> - <i>Trincas;</i> - <i>Tensões Residuais.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Recristalização;</i> - <i>Transformação de Fases.</i>

Esta proposta está dentro de um projeto de pesquisa que o LEPU vem desenvolvendo em parceria com a Fundição Tupy, onde visa caracterizar vários materiais com relação à usinabilidade, em diversos processos.

Os resultados obtidos neste estudo poderão contribuir de diversas formas, entre elas: (i) entender melhor o comportamento desses materiais durante a usinagem; (ii) dimensionar como o aumento da resistência dos ferros fundidos cinzento afeta a usinabilidade; (iii) gerar conhecimento para aumentar a produtividade no chão de fábrica; (iv) melhorar a qualidade de superfícies usinadas; (v) gerar dados que possam ser utilizados por fabricantes para desenvolver ferramentas e máquinas ferramentas mais eficientes para a usinagem dos ferros fundidos cinzentos.

A seguir no capítulo III, está exposta a metodologia experimental utilizada para realização dos ensaios de usinagem.

CAPITULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada na realização dos ensaios de usinabilidade, baseada em testes de fresamento frontal em ferros fundidos de alta resistência. São eles: ferro fundido cinzento FC 300 ligado ao molibdênio ($FC300(Mo)$), ferro fundido cinzento com adição de molibdênio e refino de grafita ($FC300(Mo+RG)$), o ferro fundido vermicular da classe 450 (FV450) e o ferro fundido cinzento FC250. Os dois últimos serão investigados para servir de referências nas comparações.

Inicialmente foram realizados ensaios preliminares para identificar os parâmetros de corte que resultassem em consideráveis valores de desgaste e tempo de usinagem que pudessem ser utilizados como referência para os ensaios de usinagem definitivos, utilizando duas geometrias diferentes de pastilhas de metal duro.

Conforme fluxograma ilustrado na Fig. 3.1, são apresentadas as etapas desenvolvidas no procedimento experimental, desde as informações dos ferros fundidos de alta resistência da classe FC 300 ($Mo+RG$) e FC 300 (Mo), geometrias das ferramentas de corte, ensaios de usinagem empregados nos processos de fresamento frontal, etapas de análise da qualidade das superfícies usinadas e as características que foram observadas nas ferramentas utilizadas e suas implicações na usinagem, tipos e variáveis, além do método de aplicação de usinagem. Os ensaios de usinabilidade foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPUS – da Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC – da Universidade Federal de Uberlândia – UFU.

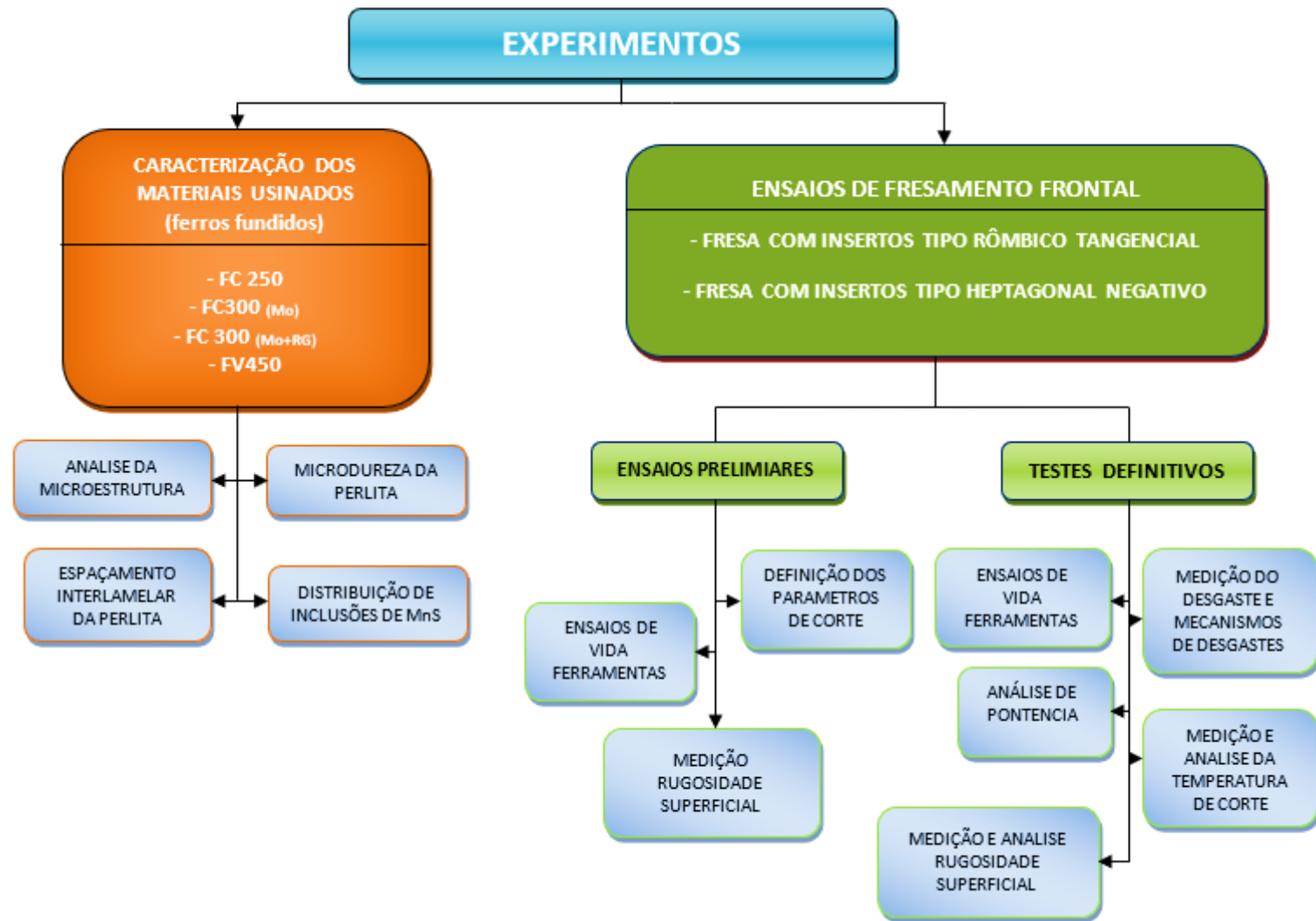


Figura 3.1 – Fluxograma das principais etapas da tese.

3.1 - Material da peça

Os quatro tipos de materiais utilizados nos ensaios de usinabilidade foram fornecidos pela empresa TUPY S.A em forma de barras prismáticas retangulares, com dimensões de, aproximadamente, 400 mm de comprimento, 240 mm de largura e 40 mm de espessura. Nas Figuras 3.2 (a) e (b) estão às ilustrações esquemáticas da geometria dos corpos de prova. A fim de aumentar a descontinuidade do corte interrompido, foram utilizadas barras com furos na superfície conforme visto na fig. 3.2 (b), cada barra contém em média 589 furos, todos com diâmetro igual a 10 mm e espaçamento de 2 mm entre cada furo.

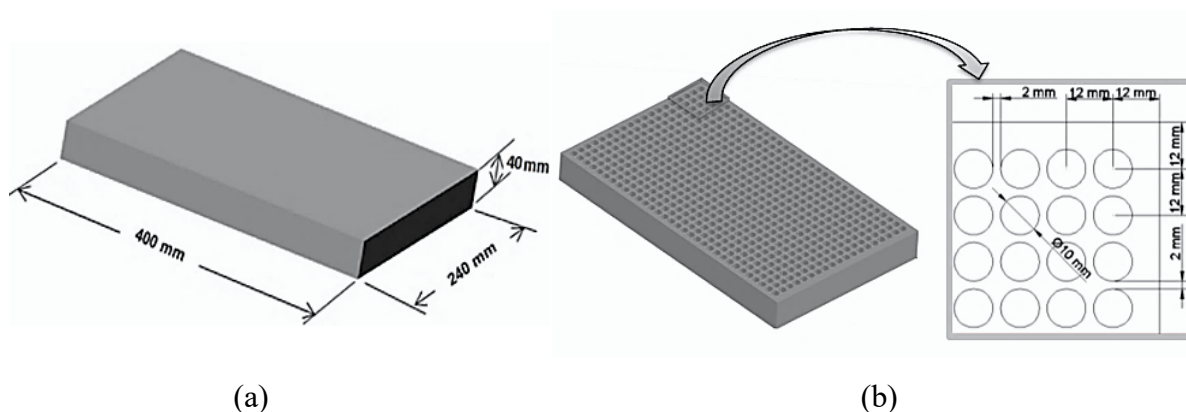


Figura 3.2 - Ilustração esquemática da geometria dos corpos de prova: (a) barras prismáticas retangulares sem furos; (b) barras prismáticas retangulares contendo os furos.

Para a execução desta pesquisa, foi necessária uma preparação dos corpos de prova, sendo estes pré-usinados na superfície superior das placas e na superfície inferior antes da realização dos testes de fresamento frontal a fim de melhorar o assentamento do material e também para eliminar qualquer resíduo proveniente do processo de fundição que pudesse interferir no desgaste das ferramentas.

3.1.1 - Caracterização dos materiais utilizados

As informações referentes à composição química, propriedades mecânicas e características da matriz e da grafita dos materiais foram disponibilizadas pela TUPY S.A, detalhadas nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 - Composição química dos materiais estudados.

Material	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ti [%]	Sn [%]	Cu [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu eq.
FC250	1,900 - 2,000	0,500 - 0,600	0,020 - 0,030	0,100	0,270	0,01-	0,130	0,280	0,020	-	2,38
FC300_(Mo)	2,11	0,50	0,036	0,10	0,23	0,01	0,06	0,67	0,23	-	4,07
FC300_(Mo+RG)	2,12	0,66	0,035	0,10	0,23	0,01	0,06	0,67	0,22	-	4,12
FV450	2,210	0,320	0,019	0,003	0,031	0,007	0,070	0,990	-	0,016	

Tabela 3.2 - Características da grafita e da matriz dos ferros fundidos.

Material	Matriz	Grafita	
		Forma	% Nodular
FC250	100% Perlítica	I	-
FC300 _(Mo)	100% Perlítica	I	-
FC300 _(Mo+RG)	100% Perlítica	I	-
FV450	99% Perlítica	III - VI	9

As imagens referentes à microestrutura (micrografias) dos materiais foram obtidas por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Hitachi, modelo TM 3000, conforme exibidas na Figura 3.3. Observa-se, nesta figura, o aspecto de apresentação da grafita nos três ferros cinzentos como sendo de placas finas e uniformes com orientação aleatória, típicos da forma I e tipo A, bem como o aspecto da grafita refinada do FC300_(Mo+RG). No ferro fundido vermicular, as formas observadas como III e VI da grafita correspondem, respectivamente, à forma de vermes e nódulos.

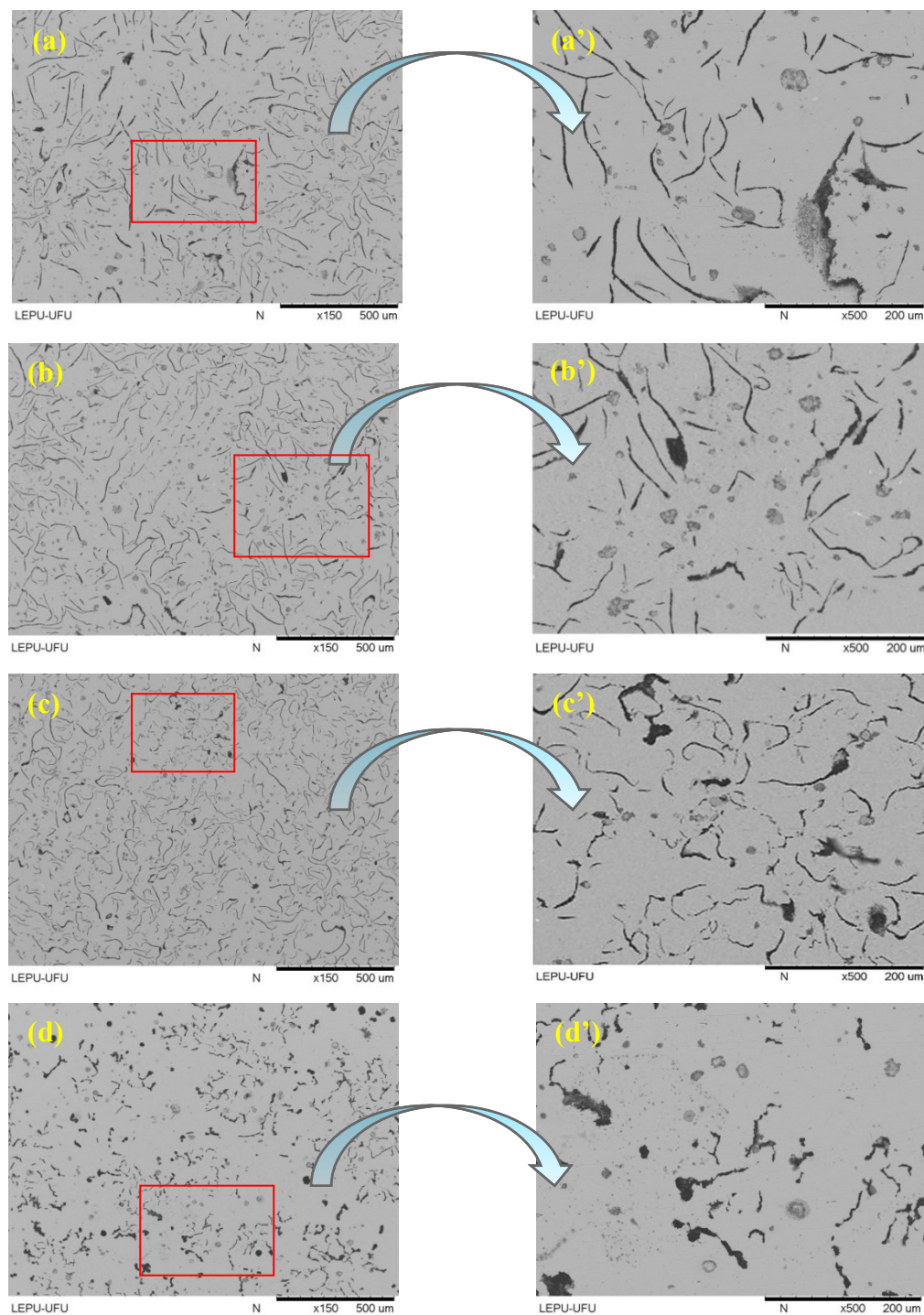


Figura 3.3 - Micrografias das superfícies dos materiais sem ataque, obtidas por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV): a) ferro fundido classe FC 250; b) ferro fundido classe FC 300 (M_0); c) ferro fundido classe FC 300 (M_0+RG); d) ferro fundido classe FV450.

As micrografias evidenciando a matriz perlítica destes materiais foram obtidas por microscopia óptica, utilizando um microscópio óptico da marca Olympus, as quais se encontram na Figura 3.4.

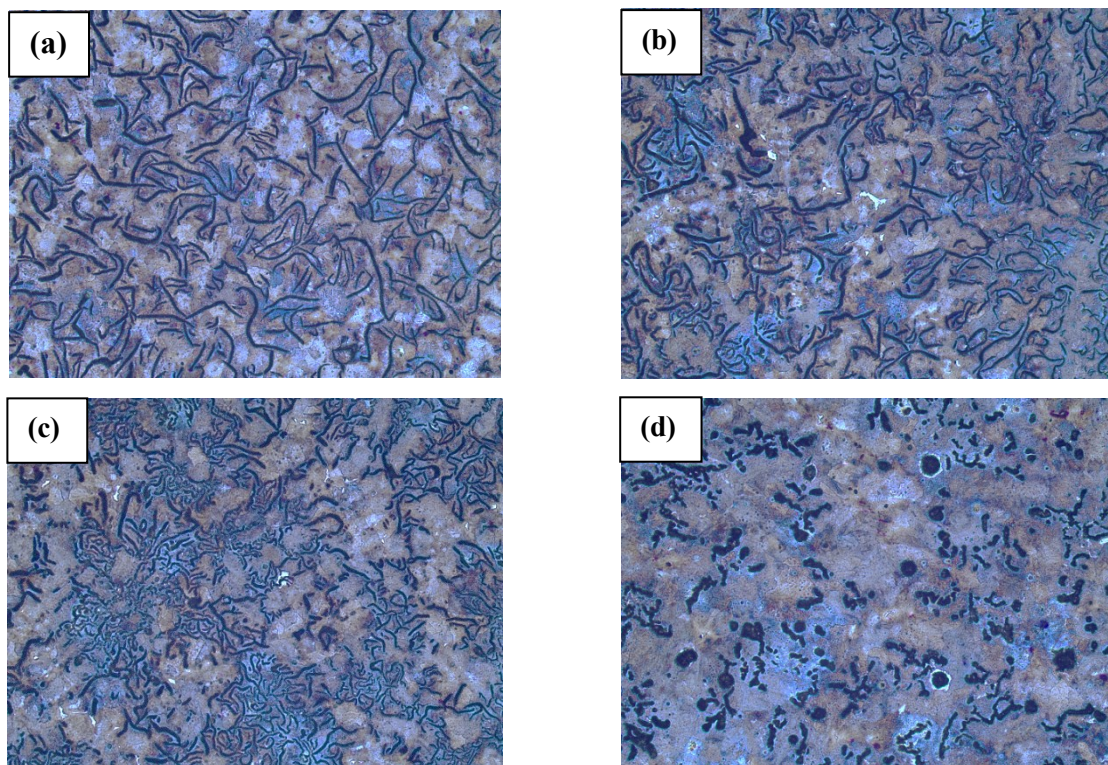


Figura 3.4 - Micrografias das superfícies dos materiais com ataque NITAL 3%, obtidas por meio do microscópio óptico: a) ferro fundido classe FC 250; b) ferro fundido classe FC 300_(Mo); c) ferro fundido classe FC 300_(Mo+RG); d) ferro fundido classe FV450.

3.1.2 - Propriedades mecânicas

Os valores da dureza Brinell foram obtidos por um Durômetro Wolpert, e os valores da resistência mecânica por uma máquina marca EMIC, ambos desenvolvidos na empresa Tupy S.A.. Esses valores, para os quatro materiais, se encontram na Tabela 3.3.

Normalmente, não se mede o alongamento nos ferros fundidos cinzentos, pois estes materiais apresentam um alongamento muito baixo (inferior a 1%). Além disso, o Limite de

Escoamento (LE) também não é medido. Isto porque os veios de grafita atuam como se fossem espaços vazios, reduzindo a resistência mecânica e impedindo a deformação plástica.

Como resultado, uma peça de ferro fundido cinzento não tem, na prática, comportamento plástico. Assim, o Limite de Escoamento está muito próximo do Limite de Resistência à Tração (MASSIRER JUNIOR, 2010; SILVA, 2016).

Tabela 3.3 - Dureza e resistência mecânica dos ferros fundidos.

Propriedades	FC250	FC300 _(Mo)	FC300 _(Mo+RG)	FV450
Dureza [HB]	187	207	217	229
Limite de Escoamento [MPa]	-	-	-	379
Limite de Resistência [MPa]	259	278	283	524
Alongamento [%]	-	-	-	1,54

3.1.3 - Determinação da distribuição das inclusões de MnS nos ferros fundidos

Para determinar a distribuição de inclusões de MnS nos ferros fundidos, foram retiradas pequenas amostras dos corpos de prova de usinagem. Após o processo de embutimento, as amostras foram lixadas com lixas d'água com granas de 240, 400, 600, 800, 1200, 1500 e 2000 “mesh”, nesta ordem, todas do fabricante 3M. Após o lixamento elas passaram pelo processo de polimento, utilizando uma politriz com um feltro apropriado e pasta diamantada, com granulometria de 1 (μm), a fim de se obter uma superfície espelhada.

Para a avaliação da quantidade e área das partículas de sulfeto de manganês, distribuídas na matriz dos materiais, utilizou-se o microscópio óptico Olympus, (modelo BX51) e o *software Stream Essentials 1.9.4*, também do fabricante Olympus em imagens com área de $0,05 \text{ mm}^2$.

Para determinar a quantidade de inclusões de MnS/ mm^2 em cada amostra de ferro fundido, foram utilizadas 10 imagens com ampliação de (500x) e para avaliação da área, foram selecionadas aleatoriamente 150 partículas de sulfeto de manganês em imagens com os mesmos níveis de ampliação. Tais inclusões eram identificadas visualmente e quando o *software* incluía óxidos, estes eram removidos durante o processo de avaliação. Na Figura 3.5 é mostrado um exemplo de como a área das partículas foi medida.

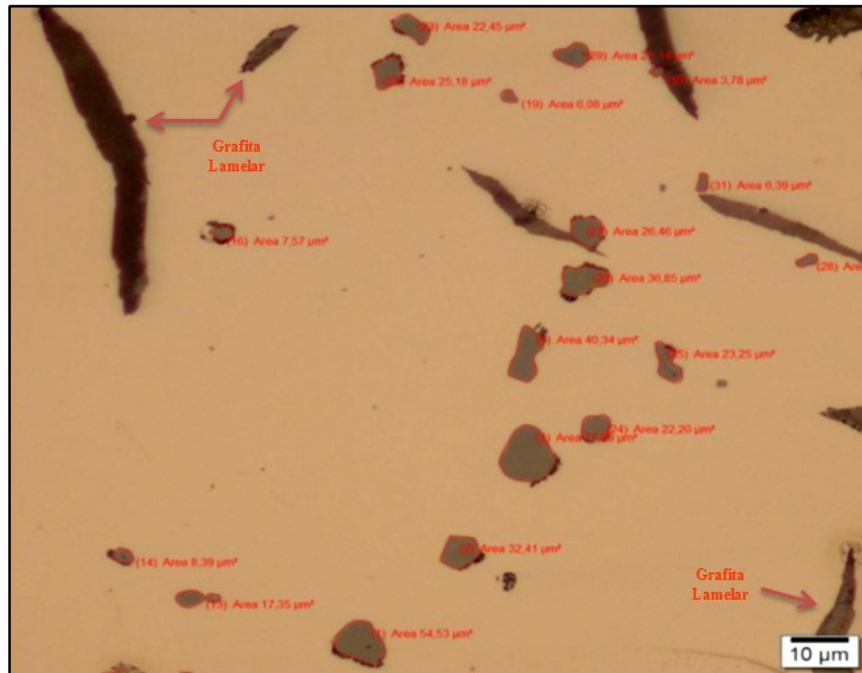


Figura 3.5 – Exemplo de identificação das inclusões de sulfeto de manganês, amostra de Ferro fundido Classe FC 300_(Mo) (Fonte - Próprio Autor).

3.1.4 - Determinação do espaçamento interlamelar da perlita

Para revelação da matriz e na determinação referente ao espaçamento interlamelar da perlita nos materiais, as amostras foram atacadas com reagente Nital 3%. Para se definir e apontar o espaçamento interlamelar foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura – MEV- Modelo *Hitashi* TM 3000, pertencente ao LEPU. Foi realizado um total de 25 imagens ampliadas (em 20000x), de diferentes regiões e selecionadas de forma aleatória, para a medição das interseções das lamelas de cementita, também foram selecionados 25 pontos, usando a mesma metodologia utilizada por Voort e Roosz (1984) em seus estudos, descritas a seguir.

- i) Seleção de colônias de perlita com o menor espaçamento de campo;
- ii) Com auxílio do *software Image J (Image Processing and Analysis in Java 1.5)* foi traçada uma linha de forma perpendicular às lamelas de cementita, cujo comprimento conhecido era de 3,7 μm , conforme visto na Figura 3.6.

iii) Dividiu-se o comprimento desta linha pelo número de lamelas de cementita cortadas pela linha. O resultado desta divisão foi considerado como sendo o valor do espaçamento interlamelar da perlita para cada medição como resultado final para cada material.

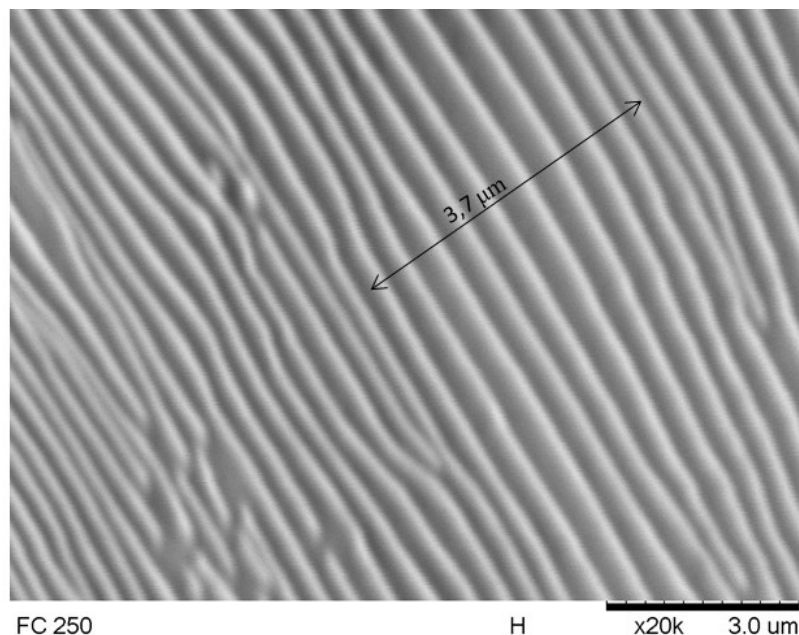


Figura 3.6 - Determinação do espaçamento interlamelar da perlita nos ferros fundidos (Fonte - Próprio Autor).

3.1.5 - Ensaios de microdureza na perlita

Para a medição da microdureza Vickers (HV) na perlita foi utilizado um microdurômetro da marca SHIMADZU, modelo HMV, pertencente ao Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (Laprosolda), da Universidade Federal de Uberlândia, com um penetrador piramidal de diamante de base quadrada, com ângulo de 136° entre as faces. As amostras utilizadas para esta avaliação foram às mesmas amostras usadas para determinação do espaçamento interlamelar, descrito no item anterior.

Para determinação da microdureza nos materiais, foram estabelecidos como critério 15 pontos distintos sobre as superfícies das amostras, submetidas a uma carga de 0,1 Kg com um tempo equivalente para endentação igual a 15 segundos. Tomou-se o cuidado em evitar que o

penetrador atingisse os veios de grafita, devido a esta fase possuir baixa dureza e resistência, mascarando os resultados.

3.2 - Máquina ferramenta

A máquina-ferramenta utilizada para os ensaios de usinagem foi um Centro de Usinagem Vertical CNC linha Discovery modelo 760, com potência do motor principal de 11 KW, rotação máxima de 10.000 RPM, do fabricante ROMI Bridgeport, pertencente ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU, da Universidade Federal de Uberlândia. Foi desenvolvido um programa específico para o processo de fresamento frontal, para que ao final de cada passe executado sobre as barras, fosse realizada a inspeção visual da superfície, medição do desgaste da ferramenta e medição da rugosidade superficial da peça.

3.3 - Ferramentas de corte

Duas diferentes geometrias de ferramentas código ISO de metal duro para acabamento foram utilizadas para os ensaios de usinabilidade, sendo uma heptagonal, código XNHF0906ANN-D57-WKP25S Tiger-tec[®], definida como (geometria A) e a outra com face dupla, código LNHU130608R-L55T-WKP25S Tiger-tec[®] Silver, definida como (geometria B), ambas pertencentes à classe WKP 25S, sem revestimentos. Para as pastilhas de geometria heptagonal foi usada uma fresa modelo Xtrac-tec[®], código F4045.B27.080.Z09.06 e para as pastilhas de face dupla uma fresa com ângulo a 90° modelo BLAXX, código F5141.B27.080.Z10.12, ambas com diâmetro de 80 mm. Tanto os insertos como as fresas foram fabricados pela Walter Tools, ferramentas semelhantes as utilizadas no processo de fresamento frontal, sendo inserto heptagonal (acabamento) e inserto tipo face dupla (semi-acabamento) nas linhas de fabricação de blocos e cabeçotes de motores na empresa TUPY S.A.

Nas Figuras 3.7 (a) e (b) juntamente com a Tabela 3.4 são apresentados detalhes das ferramentas utilizadas nos experimentos. Vale destacar que, para economia de material da peça e insertos, apenas uma pastilha foi montada na fresa em cada teste, ajustando o avanço por dente correspondente. Este procedimento foi investigado por Richetti et al., (2004), que destacaram sua efetividade em ensaios comparativos, como os aqui investigados.

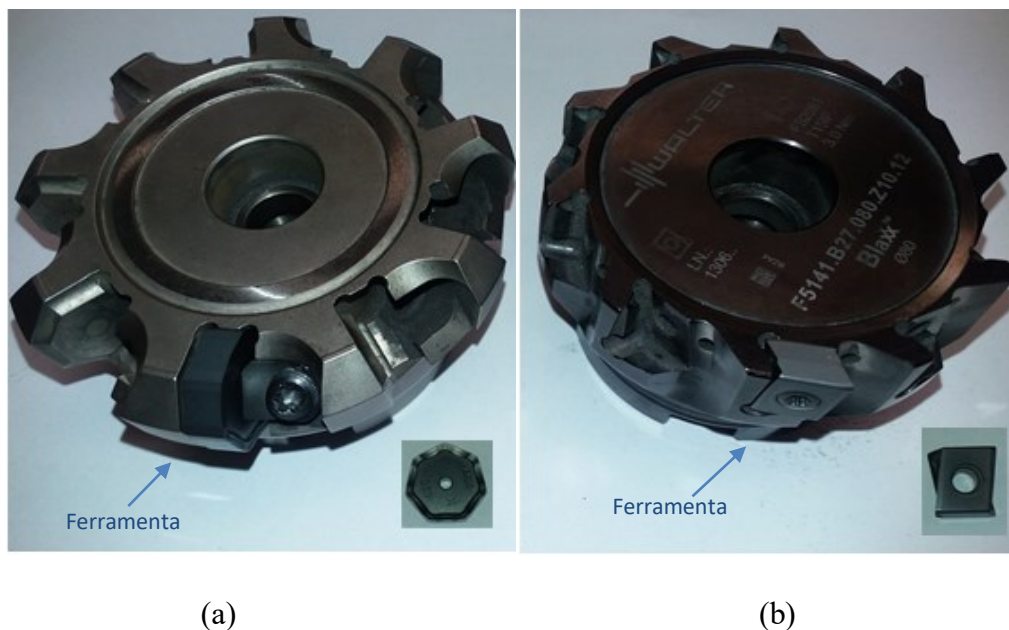
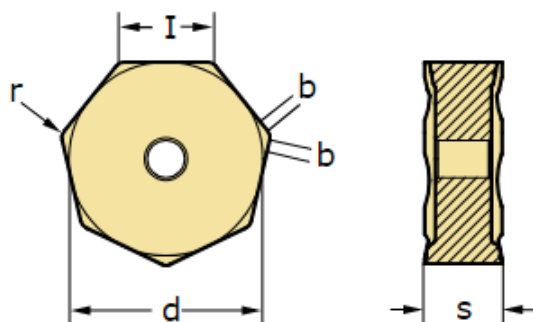


Figura 3.7 – Cabeçote porta fresas e ferramentas de metal duro utilizadas nos ensaios de usinabilidade: a) fresa modelo Xtrac-tec® com inserto de metal duro de geometria Heptagonal; b) fresa modelo Xtrac-tec® com inserto de metal duro de geometria com face dupla.

Tabela 3.4 - Descrição das fresas utilizadas.

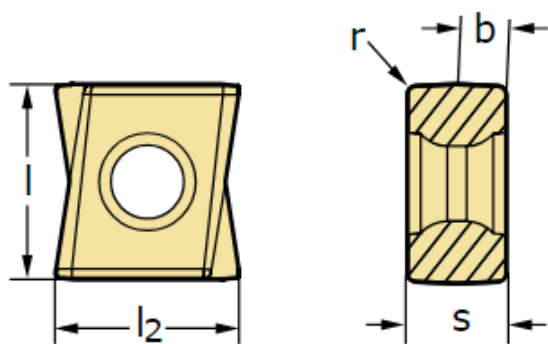
Ferramentas	Descriminação	Especificação
Fresa geometria (A)	Fresa modelo Xtrac-tec® com inserto de metal duro de geometria Heptagonal	Xtrac-tec® código F4045. B27.080.Z09.06
Fresa geometria (B)	Fresa a 90° com pastilha de metal duro para acabamento de face dupla	Walter BLAXX, código F5141. B27.080.Z10.12

Nas Figuras 3.8 (a) e (b) estão apresentados os desenhos esquemáticos e as geometrias dos insertos de metal duro utilizados nos ensaios.



Descrição	Símbolo	Valor
Classe de tolerância do inserto	Classe de tolerância	H
Quantidade de arestas de corte	Quantidade arestas de corte	14,00
Diâmetro do círculo interno	d	19,05 mm
Comprimento da aresta de corte	I	9,00 mm
Espessura do inserto	s	6,35 mm
Raio de ponta	r	0,80 mm
Comprimento da aresta alisadora	b	1,4 mm

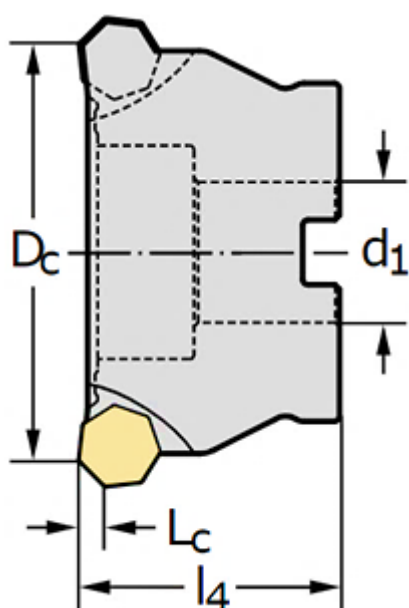
Figura 3,8 (a) – Geometria e detalhes de fabricação do inserto de metal duro com geometria heptagonal para acabamento (Fonte - CATÁLOGO WALTER TOOLS, 2018).



Descrição	Símbolo	Valor
Classe de tolerância do inserto	Classe de tolerância	M
Quantidade de arestas de corte	Quantidade arestas de corte	4,00
Largura do inserto	l_2	12,00 mm
Comprimento da aresta de corte	l	13,00 mm
Espessura do inserto	s	6,80 mm
Raio de ponta	r	0,80 mm
Comprimento da aresta alisadora	b	2,2 mm

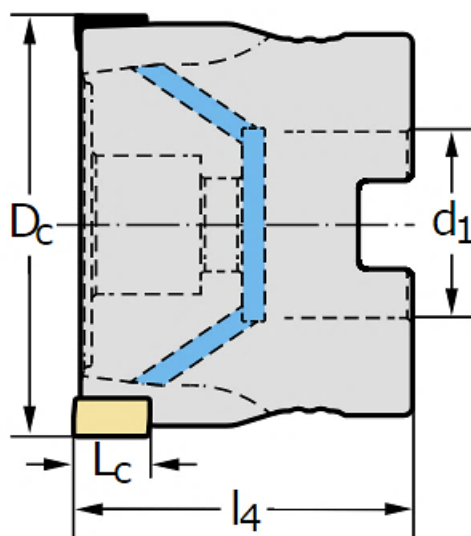
Figura 3.8 (b) – Geometria e detalhes de fabricação do inserto de metal duro de face dupla utilizada para acabamento (Fonte - CATÁLOGO WALTER TOOLS, 2018).

Nas Figuras 3.9 (a) e (b) é mostrado os desenhos esquemáticos dos corpos e modelos de fresas, que foram utilizadas nos ensaios de fresamento frontal.



Descrição	Símbolo	Valor
Diâmetro da aresta	D_c	80,00 mm
Diâmetro da haste	d_1	27,00 mm
Comprimento funcional	l_4	50,00 mm
Comprimento da aresta de corte	L_c	6,00 mm
Número de cortes	Z	9,00
WT	WT	1,4 Kg
Quantidade de insertos intercambiáveis	Quantidade de insertos intercambiáveis	9,00

Figura 3.9 (a) – Geometria e detalhes do cabeçote porta fresa modelo Xtrac-tec® para inserto de metal duro de geometria Heptagonal (Fonte - CATÁLOGO WALTER TOOLS, 2018).



Descrição	Símbolo	Valor
Diâmetro da aresta	D_c	80,00 mm
Diâmetro da conexão	d_1	27,00 mm
Balanço máximo	l_4	50,00 mm
Comprimento da aresta de corte	L_c	12,00 mm
Número de cortes	Z	10,00
WT	WT	1,27 Kg
Quantidade de insertos intercambiáveis	Quantidade de insertos intercambiáveis	4,00

Figura 3.9 (b) – Geometria e detalhes do cabeçote porta fresa a 90° modelo Walter BLAXX para inserto de metal duro de face dupla. (Fonte - CATÁLOGO WALTER TOOLS, 2018)

3.4 - Ensaios de usinagem

Nesta sessão serão apresentados os parâmetros de corte e todas as informações sobre os ensaios de usinagem dos quatro materiais investigados no processo de fresamento frontal a seco, com duas diferentes geometrias de ferramentas de corte.

3.4.1 - Preparação e fixação dos corpos de prova

A preparação e fixação dos corpos de prova na máquina é de grande importância para o sucesso dos testes de usinagem, pois os erros de planicidade, vibrações, desalinhamento podem promover desgastes extemporâneos da aresta de corte e, portanto, devem ser evitados. Assim, os corpos de provas foram previamente usinados em ambas as suas superfícies e depois colocados sobre uma base nivelada de aço carbono e posteriormente, foram soldados, a fim de se obter uma melhor fixação e rigidez, além de um aproveitamento maior da área e de volume usinado em relação à superfície.

O processo de fresamento frontal foi realizado na parte superior das placas, respeitando sempre uma espessura igual a 10 mm acima dos cordões de solda realizados, evitando assim, que qualquer tipo de variação ocorridos na estrutura do material devido ao processo de soldagem influenciasse no desgaste das ferramentas de corte, conforme pode ser observados nas Figuras 3.10 (a) e (b).



Figura 3.10 – Montagem, fixação do corpo de prova; a) fresamento frontal com inserto de geometria heptagonal; b) fresamento frontal com inserto de geometria face dupla.

Nos ensaios de vida da ferramenta no fresamento frontal das ligas de ferros fundidos foram alternados os valores de velocidades de corte e avanço por dente, sendo feitas duas (2) réplicas para cada experimento, totalizando três ensaios (ensaio e duas réplicas) em cada condição de corte. Foi adotado um valor de desgaste de flanco máximo, $VB_{Bmax} = 0,4$ mm como critério de fim de vida das ferramentas de corte nos ensaios.

3.4.2 - Parâmetros de corte

Antes dos testes definitivos, foram realizados ensaios preliminares para identificar parâmetros de corte adequados para os ensaios definitivos. Nos testes definitivos foi usado um planejamento fatorial 2^k , onde k é igual a 3 (velocidade de corte, v_c ; avanço, f_z e material da peça), portanto, os ensaios preliminares precisavam indicar os níveis (alto e baixo) das variáveis v_c e f_z . Procurou-se ajustar esses níveis de forma a proporcionar vidas de ferramentas de corte ajustadas para os insertos de metal duro, isto é, que não fossem demasiadamente longas (nos níveis baixos), de forma a não consumir muito tempo e material, nem demasiadamente curtas (nos níveis altos), de forma a oferecer pouca informação do teste.

Nos ensaios preliminares foram utilizadas as duas geometrias de ferramentas de corte, no fresamento de faceamento das diferentes classes de ferros fundidos. Ao final dos ensaios preliminares foram estabelecidos os níveis dos parâmetros de corte máximos e mínimos para os ensaios de vida das ferramentas, conforme podem ser vistos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de vida das ferramentas

Geometria	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_c (mm)	a_p (mm)
Heptagonal (A)	350/230	0,1/0,2	60	1
Face dupla (B)				

A variável qualitativa (material da peça) do fatorial 2^3 possui 4 (quatro) níveis. Assim, o número total de ensaios de vida da ferramenta, considerando os testes e as duas réplicas para cada condição, foram 48 ensaios. Na Tabela 3.6 estão apresentadas as quantidades de ensaios para cada liga de ferro fundido, com suas respectivas condições de corte.

Tabela 3.6 - Quantidades de ensaios para os testes de usinabilidade

Ensaio	Material	Inserto	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_p (mm)	Replicas
1	FC 250	(A)	350	0,1	1	2
2		(B)	350	0,2	1	2
3		(A)	230	0,1	1	2
4		(B)	230	0,2	1	2
5	FC 300_(Mo)	(A)	350	0,1	1	2
6		(B)	350	0,2	1	2
7		(A)	230	0,1	1	2
8		(B)	230	0,2	1	2
9	FC 300_(Mo+RG)	(A)	350	0,1	1	2
10		(B)	350	0,2	1	2
11		(A)	230	0,1	1	2
12		(B)	230	0,2	1	2
13	FV 450	(A)	350	0,1	1	2
14		(B)	350	0,2	1	2
15		(A)	230	0,1	1	2
16		(B)	230	0,2	1	2

Determinou-se que a avaliação do desgaste do inserto deveria ser medida a cada três passes (corridas) da ferramenta sobre o corpo de prova, já para a liga de ferro fundido cinzento FC 250 o desgaste foi determinado a cada seis passes. Isso se deve às propriedades deste material em relação aos demais, no que diz respeito a sua usinabilidade, apresentando vidas maiores e testes mais longos.

Além da medição do desgaste dos insertos de metal duro, também foram avaliados o acabamento da superfície usinada, ou desvios microgeométricos (rugosidade), e a potência consumida do motor durante a usinagem, para cada ensaio. As frequências de medições desses parâmetros foram às mesmas adotadas para a medição de desgaste do inserto.

3.5 - Medições de desgaste da ferramenta

O monitoramento de desgaste nas ferramentas foi obtido por meio do microscópio ferramenteiro ‘SZ6145TR – OLYMPUS’ com auxílio do *software* de captura de imagens ‘*Imagem Pro-Express*’ conforme mostrado na Figura 3.11.



Figura 3.11– Microscópio ferramenteiro SZ6145TR – OLYMPUS

3.6 - Medições da potência consumida pelo motor

Para a aquisição e monitoramento da potência elétrica do motor (W) nesta etapa, foram acoplados um transdutor de corrente modelo HAS 50-S e um transdutor de tensão modelo LV 20-P, dispostos diretamente na rede de alimentação de toda a máquina, além, de amplificadores operacionais da série 741 e de um dispositivo de aquisição de dados da *National Instruments*, com um conversor modelo NI USB-6221, de 16 entradas, contendo 16 bits com capacidade de aquisição de 250 KS/s, conforme visto na figura 3.12.

Os dados são convertidos e transmitidos por comunicação serial via USB ao computador, onde posteriormente foram tratados e armazenados em arquivos de texto pelo *software* Labview®.



Figura 3.12 - Sistema de medição de potência proposto (Fonte - Próprio Autor).

3.7 - Caracterização dos mecanismos de desgaste da ferramenta

Para análises dos mecanismos de desgaste das ferramentas, foi empregado o microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Hitachi, modelo TM 3000 MICSF. Para que os mecanismos de desgaste pudessem ser analisados, foi necessário limpar as ferramentas com acetona e assim obter melhor visualização e localização do desgaste e da área desgastada. Para análise dos elementos químicos em diferentes pontos da região desgastada, para identificar presença de material da peça aderido foi utilizado um espectrômetro de energia dispersiva (EDS), da marca Hitachi, modelo TM 3000 XSTREAM2.

3.8 - Medição da rugosidade

Para a medição dos parâmetros de rugosidade foi utilizado um rugosímetro portátil modelo SJ201 P/M da marca MITUTOYO, com resolução de 0,01 μm e agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de 5 μm , que foi apoiado propriamente em um suporte projetado para este fim, na qual foram medidos os parâmetros Ra , Rq e Rz , utilizando um *cut-off* de 0,8 mm, de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4288 (2008).

Para aquisição de dados desses desvios microgeométricos (Ra , Rq e Rz) foram executadas três medições de forma espaçadas, obtidas ao final de cada corrida da ferramenta sobre a superfície das barras de ferro fundido, a fim de obter a média aritmética e o desvio padrão para análise dos resultados.

3.9 - Medição da temperatura de corte

Para estudar as características térmicas que ocorreram durante os ensaios de usinabilidade nas diferentes classes de ferros fundidos, mediu-se a temperatura de usinagem com uso de uma câmera termográfica infravermelha, marca FLIR SYSTEMS BRASIL, modelo FLIR A325, pertencente ao Laprosolda. A câmera termo sensível filma a usinagem, produzindo imagens utilizando um tipo de sensor térmico modelo “microbolometer uncooled” e matriz de plano focal (FPA); 320 x 240 pixels onde código de cores identifica as temperaturas atingidas nas regiões analisadas conforme pode ser visto na Figura 3.13.

As imagens das superfícies da peça/ferramenta eram capturadas, decodificadas e analisadas com o auxílio dos softwares Matlab® e OringPRO®. O processo consiste em determinar a temperatura externa durante os testes específicos de fresamento, utilizando um laptop para gerenciar os dados de saída da câmera termográfica. Foram utilizadas duas condições de corte [$v_c = 230$ (m/min); avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente) e $v_c = 350$ (m/min); avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente)], mantendo-se constante a profundidade de corte axial (a_p) em 1 (mm) e a profundidade radial (a_e) em 60 (mm)..



Figura 3.13 – Sistema de medição proposto para aquisição de temperatura utilizando a câmera termográfica infravermelha FLIR A325.

A câmera termográfica recebe uma radiação “ W_{total} ” (radiação total recebida pela câmera) a uma temperatura T (espectro total) em curtas distâncias e gera um sinal de saída “ U_{fonte} ” (sinal de saída da câmera termográfica) que é linearmente proporcional ao sinal de entrada.

Com base na tabela de emissividade exibida no manual da câmera (FLIR SISTEM, 2009) adotou-se para as ligas de ferro fundido uma emissividade de (0,95), a uma distância fixa igual a 0,85 (m), com um valor de transmitância igual a 1, sendo este o valor padrão recomendado. A

temperatura de saturação da câmera foi fixada a 510°C durante as filmagens dos ensaios de usinabilidade.

No capítulo IV a seguir estão apresentados os resultados obtidos em relação ao tempo de vida das ferramentas, desgaste, medições dos desvios microgeométricos (rugosidade), dados de potência e corrente do motor consumida além da temperatura durante a usinagem, além das análises dos resultados para estas variáveis.

CAPITULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Considerações iniciais

Este capítulo descreve os resultados obtidos nesta pesquisa, em que o objetivo principal foi avaliar a usinabilidade através do processo de fresamento frontal de ferro fundido de alta resistência classe FC 300 _(Mo+RG), com adição de molibdênio e refino de grafita, ferro fundido cinzento ligado ao molibdênio FC 300 _(Mo), ferro fundido cinzento FC 250 e o ferro fundido vermicular da classe CGI 450, com ferramentas de metal duro sem revestimento. A avaliação de desempenho foi em termos de potência consumida pelo motor, temperatura de corte durante usinagem, tempo de vida das ferramentas de corte, com análise dos mecanismos de desgaste ocorridos nas ferramentas e rugosidade superficial da peça. Foi empregado o teste de análise de variância (ANOVA) com intervalo de confiança de 95% e nível de significância de 5% para análise dos resultados, sendo também avaliado o aspecto sobre a utilização de duas geometrias de insertos de metal duro na usinabilidade de classes de ferros fundidos de alta resistência.

A primeira etapa consiste na caracterização microestrutural dos materiais estudados, atividade importante para contribuir na discussão e justificativa dos resultados dos testes de usinabilidade.

A segunda etapa consiste na avaliação dos resultados da potência (W) consumida do motor e a temperatura de corte durante a usinagem.

Finalmente, a terceira etapa consiste em avaliar o tempo de vida das ferramentas, os desgastes e mecanismos de desgaste, influência da geometria dos insertos de metal duro e a rugosidade superficial das peças por meio dos parâmetros Ra , Rq e Rz .

4.2- Caracterização microestrutural dos ferros fundidos

4.2.1 - Distribuição das partículas de sulfeto de manganês nos ferros fundidos cinzentos

Os resultados das medidas referentes à quantidade média de MnS/mm² e área das inclusões de sulfeto de manganês dos ferros fundidos cinzentos estão ilustrados nas Figuras. 4.1 e 4.2, respectivamente. O ferro fundido vermicular não apresenta partículas dessas inclusões em sua microestrutura, uma vez que o enxofre é reduzido nestes materiais.

Através da Fig. 4.1 pode-se observar que houve pequenas diferenças nas médias dessas partículas. O ferro fundido com refino de grafita FC300_(Mo+RG) possui, em média, 418 partículas de MnS/mm², em que 27% das inclusões medidas na amostra tem área entre 11 e 20 µm², 21% das partículas possuem área entre 6 e 10 µm² e menores que 6 µm² representam cerca de 13% das inclusões totais, conforme Figura 4.2.

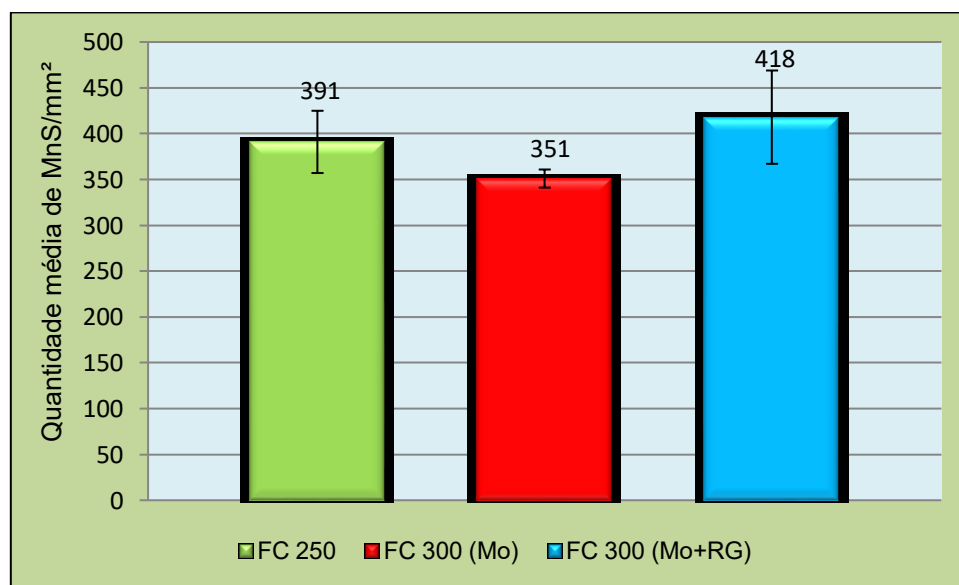


Figura 4.1 - Quantidade média de partículas de MnS por milímetro quadrado

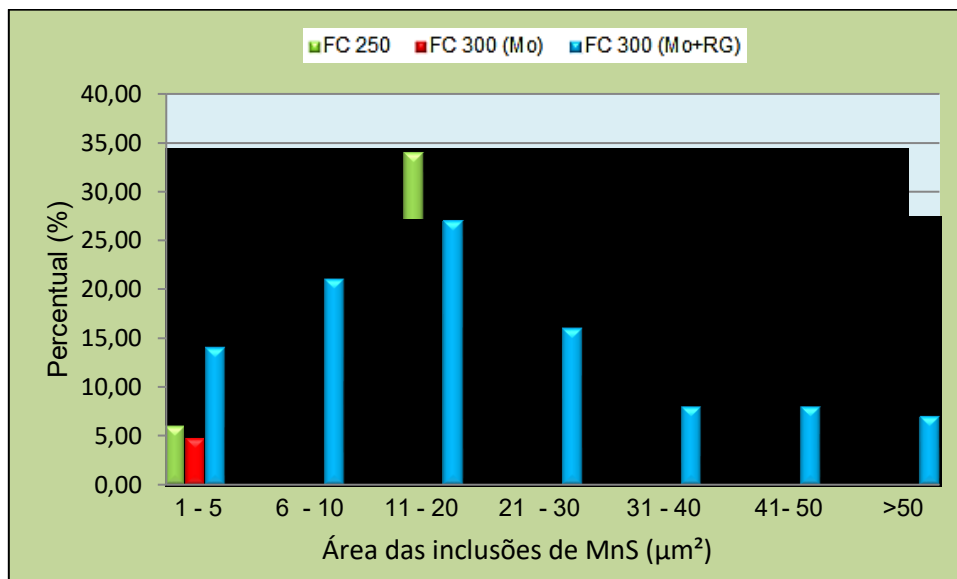


Figura 4.2 - Distribuição das áreas das partículas de MnS.

O FC 250 que apresenta 391 partículas de MnS/mm² possui 33% das inclusões possuem área entre 11 e 20 μm², 20% das partículas têm área entre 6 e 10 μm², enquanto 7% das inclusões apresentam área entre 1 e 5 μm². Por fim, o FC300_(Mo) possui, em média, 351 partículas de MnS/mm² que estão presentes no material da seguinte forma: 25% das partículas analisadas apresentam área entre 11 e 20 μm², 24% das inclusões têm área entre 6 e 10 μm² e apenas 5% das partículas de MnS possuem área menor que 6 μm².

Para confirmar estatisticamente que existe diferença significativa na quantidade de inclusões por milímetro quadrado com relação aos três materiais, foi realizado a análise de variância (ANOVA) referente à quantidade média de partículas de MnS /mm². Os dados foram obtidos utilizando intervalo de confiança de 95 % e nível de significância de 5 %, com o uso de software Matlab[®]. Na Tabela 4.1 são mostrados os resultados da análise para quantidade média de partículas de MnS /mm², já na tab. 4.2 estão os resultados da análise de distribuição das áreas das partículas de MnS.

Tabela 4.1 – Resultado da análise de variância para quantidade média de partículas de MnS /mm².

<i>Análise de variância para quantidade média de partículas de MnS /mm².</i>					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-p</i>
Entre grupos	5072,888889	2	2536,444444	4,445569	0,065413
Dentro dos grupos	3423,333333	6	570,555556		
Total	8496,222222	8			

Tabela 4.2 – Resultado da análise de distribuição das áreas das partículas de MnS.

<i>Análise de distribuição das áreas das partículas de MnS.</i>					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-p</i>
Entre grupos	8,666667	2	4,333333	0,648456	0,534641
Dentro dos grupos	120,285714	18	6,682540		
Total	128,952381	20			

4.2.2 - Caracterização da perlita nos ferros fundidos

Os resultados de caracterização da perlita dos quatro ferros fundidos avaliados estão ilustrados na Fig. 4.3 (a) e (b). O gráfico superior na Fig. 4.3 (a) é relativo ao espaçamento interlamelar e o gráfico na Fig. 4.3 (b) da microdureza da perlita.

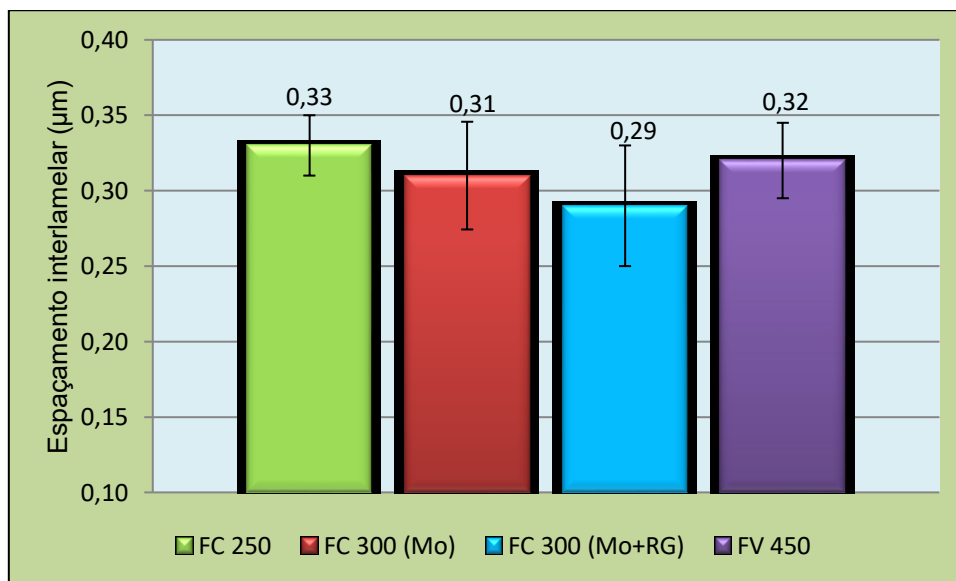


Figura 4.3 (a) - Caracterização do espaçamento interlamelar da perlita.

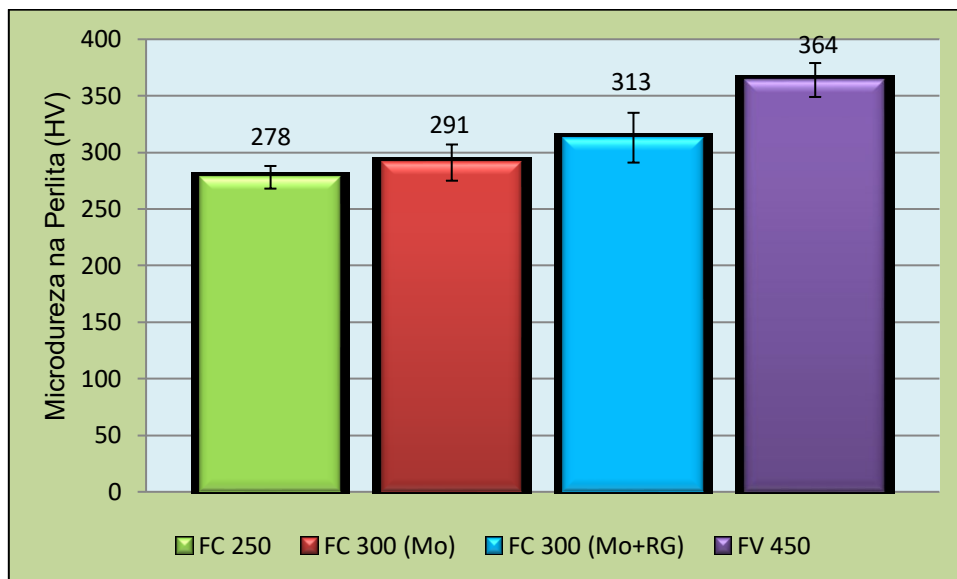


Figura 4.3 (b) - Microdureza da perlita dos materiais estudados.

Pode-se observar, por meio das Figuras. 4.3 (a) e (b) que há diferença estatística significativa entre os materiais avaliados e também entre a microdureza do FV450 e do FC250, como indicado pelas barras de dispersão dos resultados. Entretanto, em termos de valores médios, o FC300(Mo+RG) possui o menor espaçamento interlamelar da perlita, em média de 0,29 μm .

Da mesma forma, a utilização de técnicas estatísticas, ou seja, análise de variância (ANOVA) foi utilizada para confirmar que existe diferença significativa nas análises realizadas tanto para o espaçamento interlamelar (μm), quanto para a microdureza na perlita (HV) com relação aos materiais utilizados na pesquisa. Na Tabela 4.3 estão os resultados da análise para espaçamento interlamelar (μm), enquanto na tabela 4.4 podem ser vistos os resultados da análise de variância da microdureza na perlita (HV).

Tabela 4.3 – Resultado da análise de variância para espaçamento interlamelar (μm).

<i>Análise de variância espaçamento interlamelar (μm)</i>					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-p</i>
Entre grupos	0,002033	3	0,000677	1,056277	0,419635
Dentro dos grupos	0,005133	8	0,000641		
Total	0,007166	11			

Tabela 4.4 – Resultado da análise de variância da microdureza na perlita (HV).

<i>Análise de variância da microdureza na perlita (HV)</i>					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-p</i>
Entre grupos	18137	3	6045,667	5,800592	0,061262
Dentro dos grupos	4169	4	1042,25		
Total	22306	7			

A microdureza do material FC 300_(Mo+RG) foi a maior entre os ferros fundidos cinzentos e menores apenas em relação ao ferro fundido vermicular da classe 450. Isto pode indicar, que para ambos os materiais, ocorrerá um aumento na resistência à tração e abrasividade. Na Figura 4.4 é mostrado as imagens comparativas da perlita dos quatro ferros fundidos pesquisados, obtidas através do MEV:

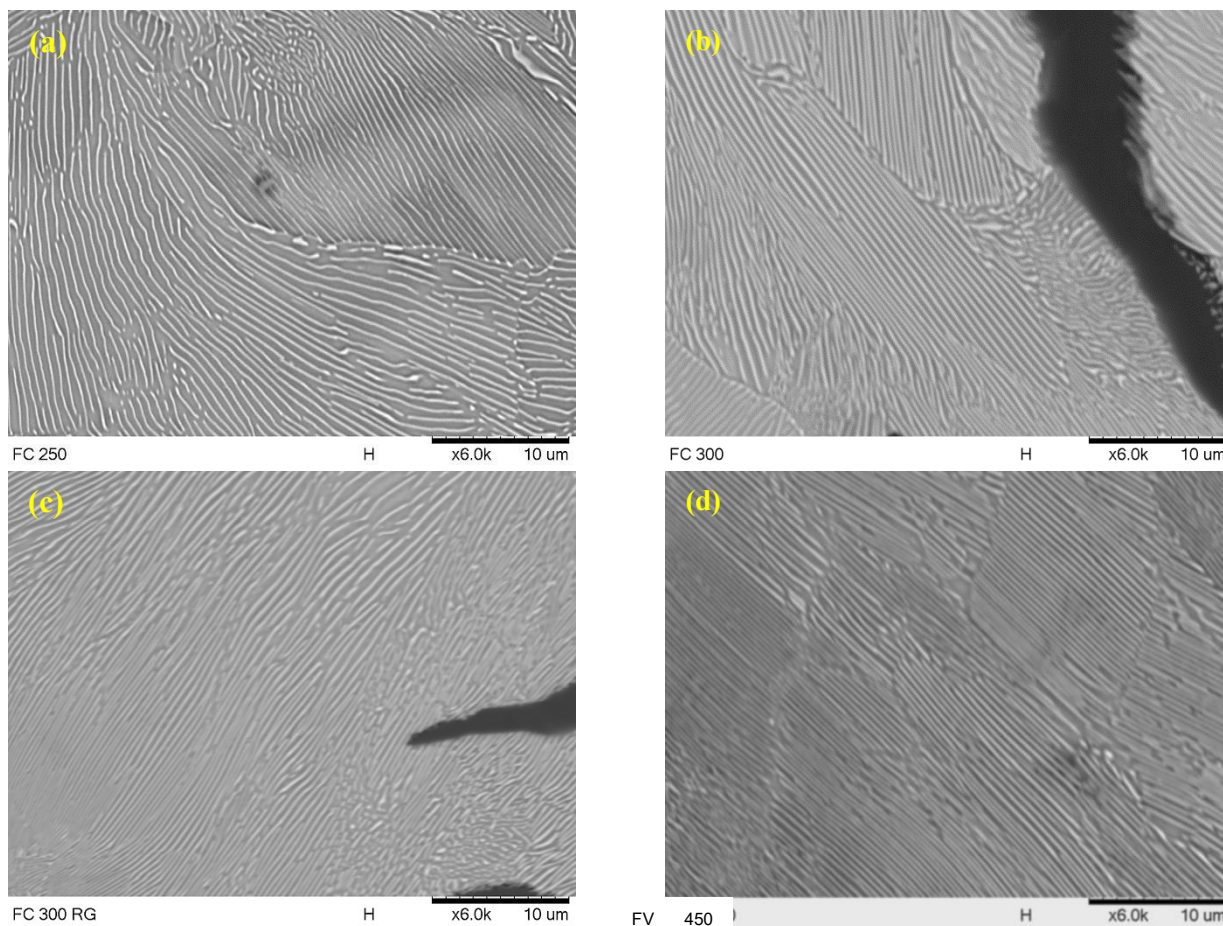


Figura 4.4 - Imagens comparativas da perlita nos ferros fundidos: a) FC 250; b) FC 300_(Mo); c) FC 300_(Mo + RG); d) FV 450.

A seguir estão os resultados potências de corte e corrente no motor e da temperatura de corte das ferramentas.

Os gráficos referentes a potências de corte e corrente do motor foram construídos com valores provenientes do comportamento do sinal de corrente medidos ao longo dos testes para cada material.

4.3 - Potências de corte e Corrente

Nas Figuras 4.5 e 4.6 são apresentados exemplos do comportamento do sinal de corrente medidos ao longo de um teste, na usinagem do material FC250, quando se utilizaram as ferramentas de geometria (A) e (B), respectivamente. Os gráficos para todos os materiais e condições testadas são apresentados no Apêndice B. A média dos valores dessas correntes são usadas para o cálculo da potência do motor principal da máquina ferramenta em cada ensaio.

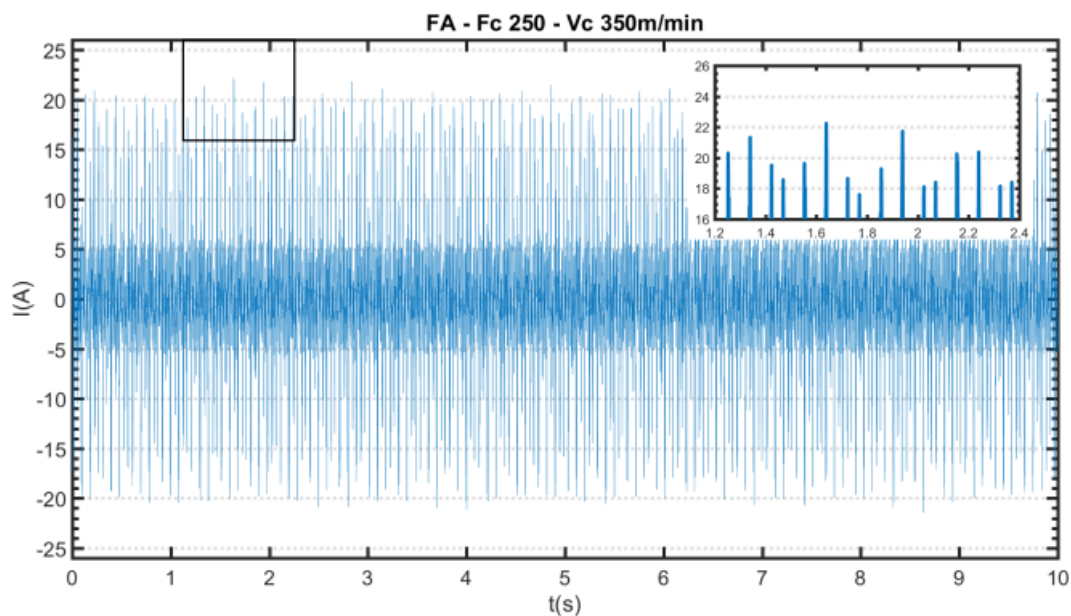


Figura 4.5 - Gráfico do comportamento do sinal de corrente medido ao longo de um teste para material FC250 utilizando ferramenta de geometria (A) para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente).

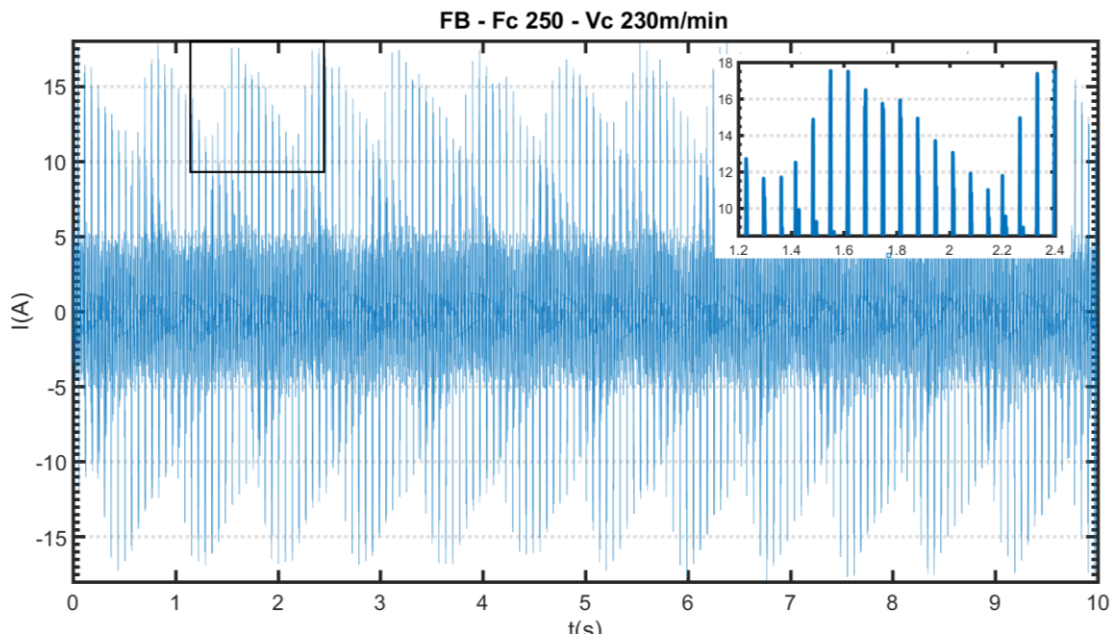
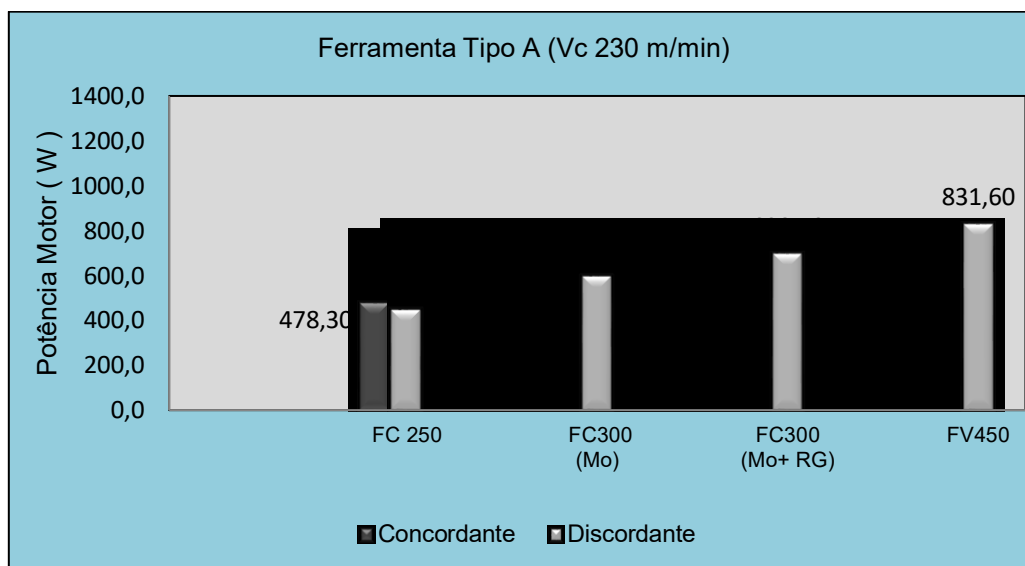


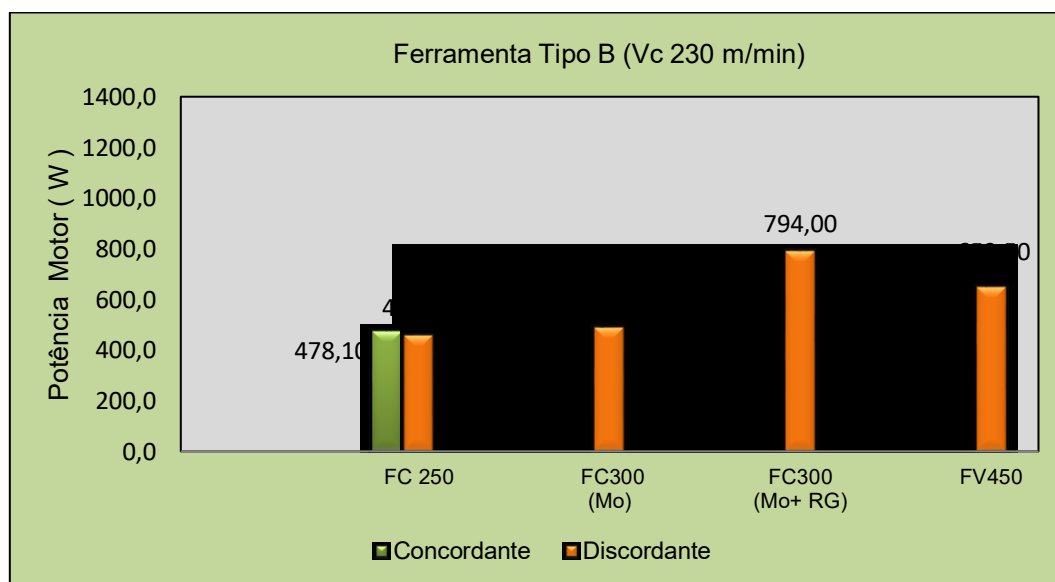
Figura 4.6 - Gráfico do comportamento do sinal de corrente medidos ao longo de um teste para material FC250 utilizando ferramenta de geometria (B) para a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente).

Nas Figuras 4.7 e 4.8 são apresentados os valores de potência consumida, para as duas geometrias de ferramentas e velocidades de cortes testadas.

Vale ressaltar que os valores apresentados nos gráficos são valores da potência de corte, derivados da dedução da potência medida durante o processo de corte, já com as devidas subtrações dos valores de potência adquiridos no modo vazio, lembrando que para estes testes em particular, foram adotados os movimentos de corte no sentido predominantemente concordante e discordante.

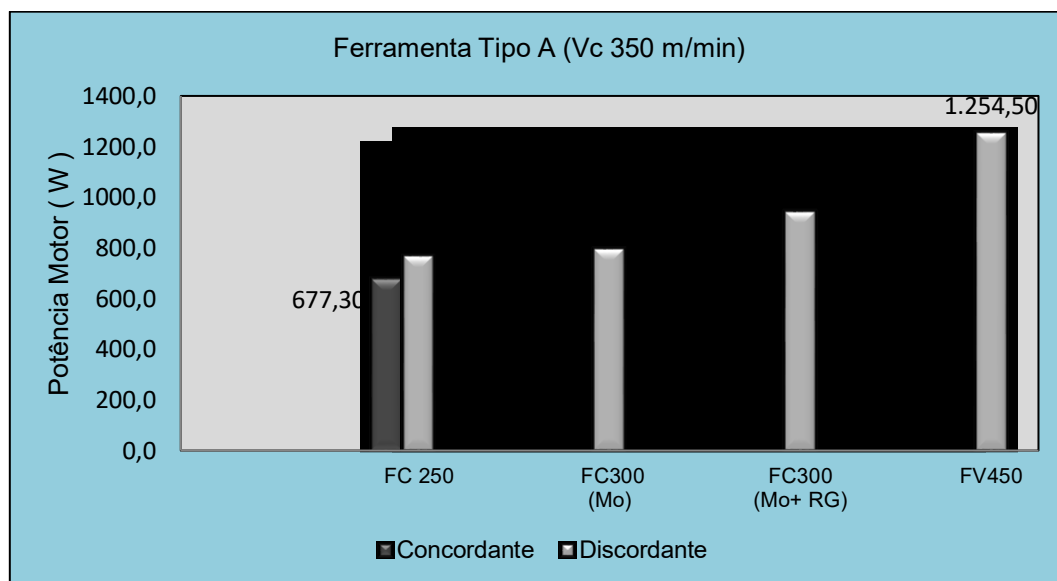


(a)

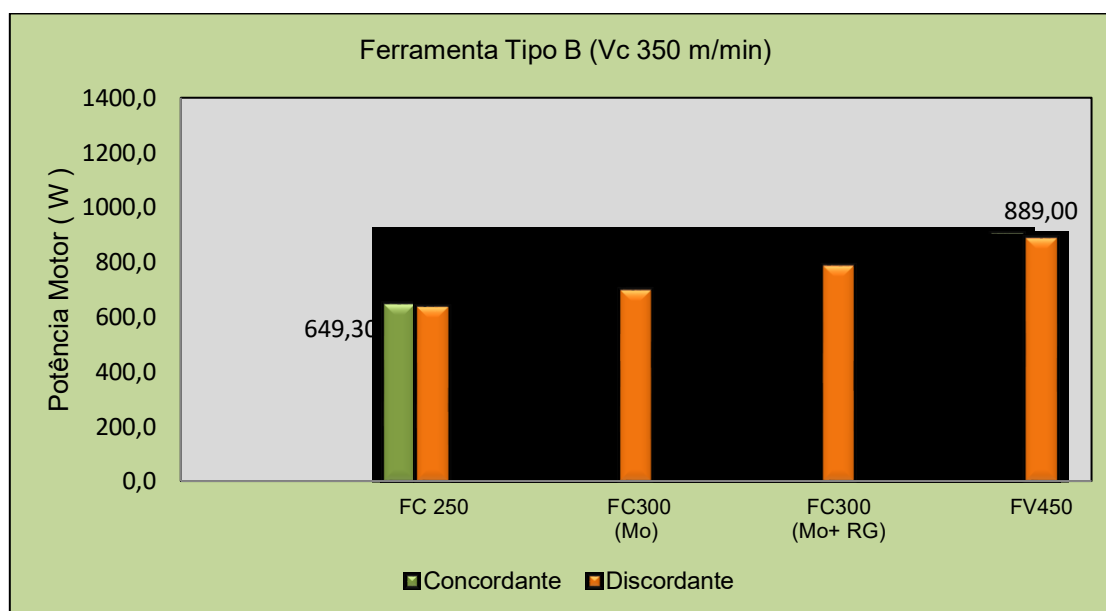


(b)

Figuras 4.7 - Potência do motor para testes com a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).



(a)



(b)

Figura 4.8 - Potência do motor para testes com a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).

Nota-se de que nas Figuras 4.7 e 4.8 a potência de usinagem tende a se elevar com o aumento da velocidade de corte. Segundo a literatura, a potência de corte é diretamente proporcional à velocidade de corte, apesar do aumento desse parâmetro implicar, em algumas situações, no decréscimo da força de usinagem, pela maior geração de calor e, conseqüentemente, redução da resistência do material que por sua vez melhora a usinabilidade. Isso ocorre sempre na usinagem de materiais dúcteis como os aços, mas não para os materiais frágeis, como os ferros fundidos. Nestes materiais, o cavaco é descontínuo e neste caso, a maior velocidade de corte aumenta a espessura das lamelas e, conseqüentemente aumentam a força, ao invés de diminuir (TRENT e WRIGHT, 2000).

Para Gabaldo et al., (2009), a potência de corte exerce importante influência no processo de fresamento de ferros fundidos, principalmente naqueles usados na fabricação de blocos de motores. Com o aumento do desgaste nas arestas de corte, a área de contato entre peça e ferramenta e a deformação do cavaco aumentam e, conseqüentemente, o consumo de potência necessária para a realização do corte nas ligas de ferro fundido.

Outro fator importante a ser analisado principalmente pensando em longo prazo, é o fator da estabilidade da máquina durante a usinagem, que depende da qualidade e estado de manutenção. Percebe-se que ferro fundido da classe FV 450 da figura 4.8 (a) foi o que acarretou maior potência consumida de corte durante a usinagem, sendo esta liga a que possui o maior limite de resistência e a maior dureza entre os materiais estudados. Em contrapartida, observa-se pelos gráficos de potência de corte que o material que apresentou a menor potência durante as variações de velocidade de corte e geometria de ferramentas foi à classe FC 250 seguida da classe FC 300 (M₀) da figura 4.7 (b)

Diniz et al., (2006) afirmam que o crescimento da potência com o desgaste está ligado não somente ao desgaste de flanco, mas também a outros tipos de desgaste e avarias que podem, ao crescer, diminuir o valor da potência, como é o caso do desgaste de cratera que, por aumentar o ângulo efetivo de saída, diminui a potência consumida.

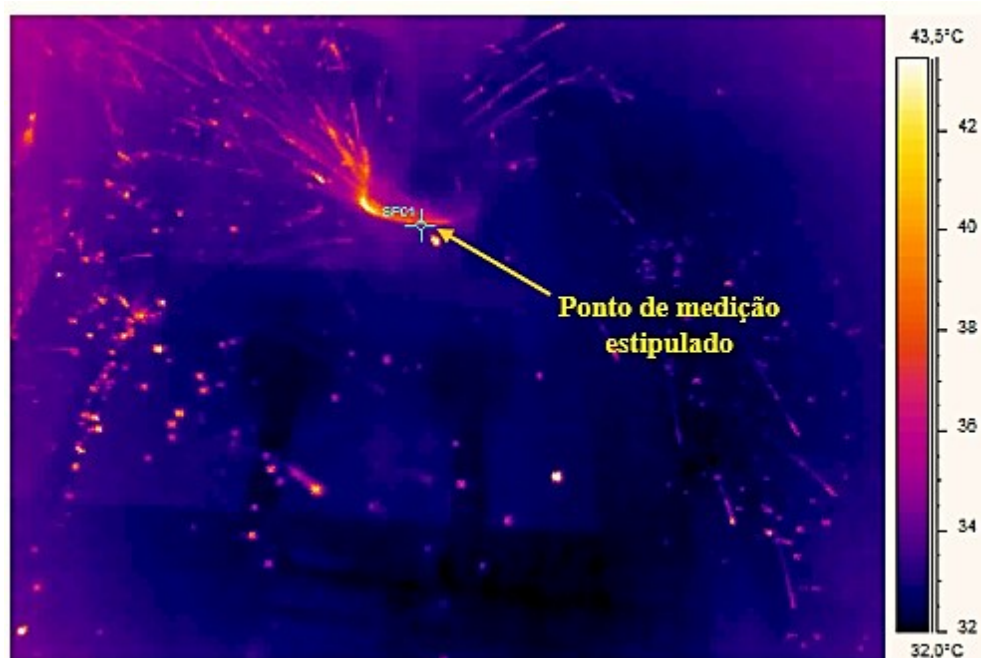
Segundo Bagetti et al., (2009), a maior resistência e dureza do ferro fundido vermicular resulta em maiores forças de corte, sendo assim, as operações de usinagem nesse material requerem cerca de 20% a 30% a mais de potência, bem como sistemas de fixação mais robustos em relação à usinagem do ferro fundido cinzento (GASTEL, 2000).

Após análise da potência consumida com relação ao limite de resistência dos materiais em estudo, verifica-se que liga FV 450 apresenta o maior limite de resistência e a maior dureza superficial, entre os materiais estudados apresentando a maior potência consumida. A liga FC250 foi a que apresentou menor potência consumida quando comparado nas condições de cortes utilizadas. As ligas de ferro fundido FC 300_(Mo) e a FC 300_(Mo+RG) ficaram entre estas duas ligas.

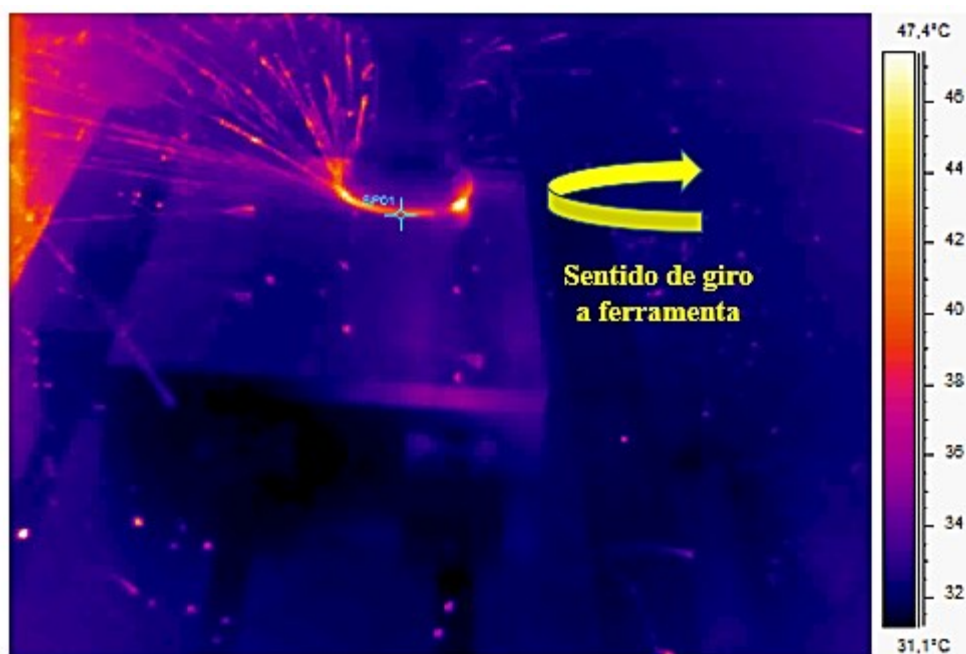
Visto que o FC 250 possui o menor limite de resistência, entre os materiais estudados, e também as características de morfologia das grafitas que facilitam a sua usinagem, sendo de fácil cisalhamento, quando comparados com as demais ligas. À medida que a ferramenta vai se desgastando, ocorrem variações no processo de usinagem, fazendo com que a temperatura se eleva e a força de corte e potência consumida da máquina aumentem, alterando a superfície usinada e piorando o acabamento superficial (NAVES, 2009).

4.4 - Temperatura de corte

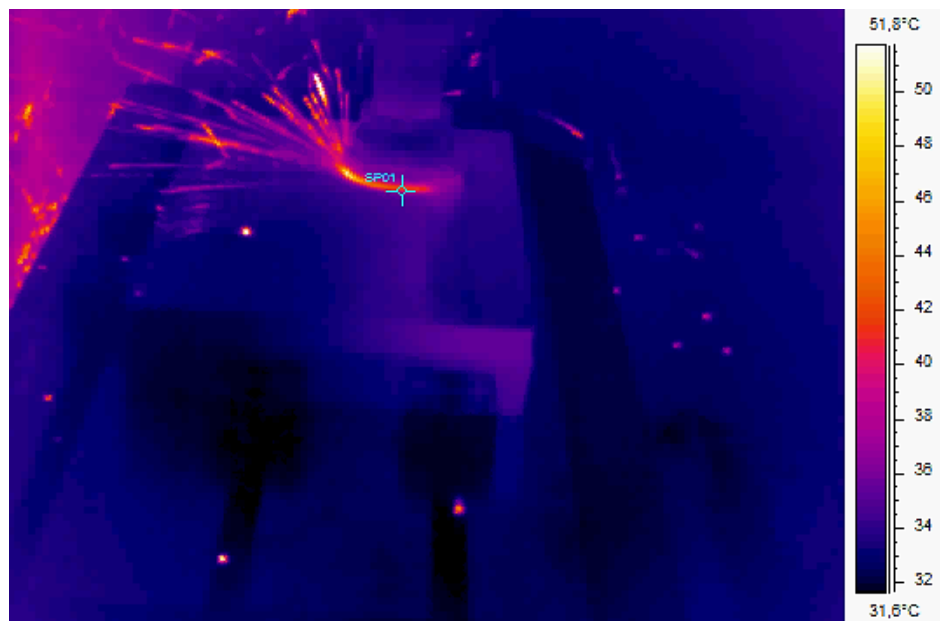
Nas Figuras 4.9 de (a) a (d) estão as imagens geradas pela câmera termográfica infravermelha, utilizadas para determinação da temperatura num determinado ponto fixo, durante os testes de usinagem com ferramentas de geometrias (A), utilizando uma velocidade de corte de 350 (m/min), avanço de 0,2 (mm/dente), profundidade de corte (a_p) de 1,0 (mm) e penetração de trabalho (a_e) de 60 (mm). Estas imagens visam de ilustrar como as temperaturas foram determinadas nos ensaios de fresamento dos quatro materiais, em todas as condições de teste. De maneira geral, os resultados mostram que as temperaturas atingidas no processo de fresamento não são elevadas.



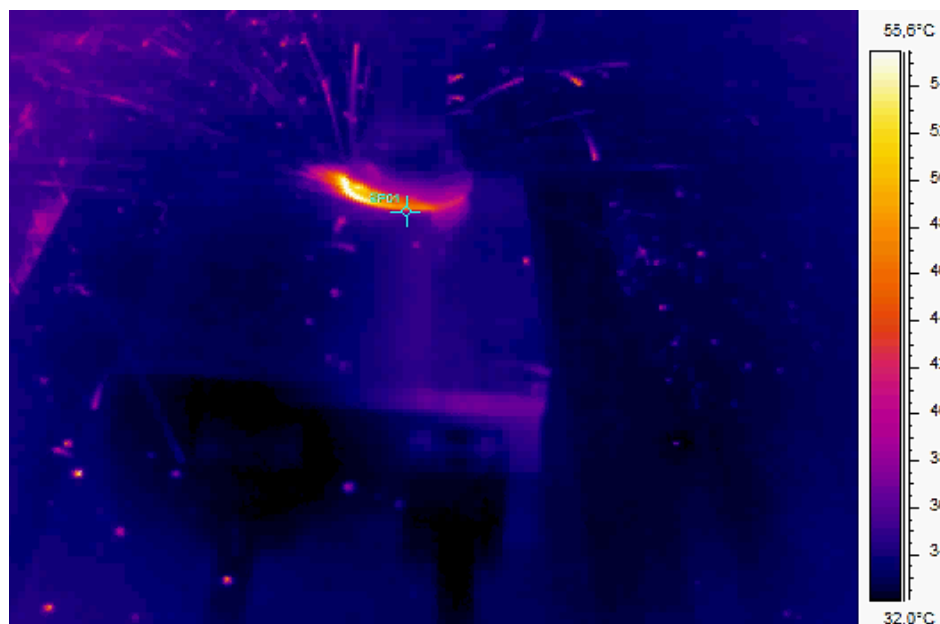
FC 250



FC 300 (Mo)



FC 300 (Mo +RG)



FV 450

Figura 4.9 - Imagens de obtenção da temperatura com a utilização da câmera termográfica infravermelha, durante os testes de usinagem utilizando a ferramenta de geometria (A), e velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min), avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente) e profundidade de corte $a_p = 1,0$ mm.

Pelos resultados obtidos notam-se, as diferenças dos valores médios de temperatura na entrada e saída da aresta de corte através das escalas de temperaturas. Verifica-se que o aquecimento no ferro fundido vermicular FV450 é maior do que as outras ligas em estudo, seguido pelo ferro fundido FC300_(Mo+RG).

Nas figuras 4.10 e 4.11 são apresentados exemplos do comportamento do sinal de temperatura no ponto de medição estipulado (ver Fig. 4.9) na usinagem do material FC250 quando se utilizaram as ferramentas de geometria (A) e (B), respectivamente. Esses gráficos foram gerados a partir dos arquivos de gravação feitos pela câmera termográfica, que foram decodificados e gerenciados com o auxílio dos *softwares* Matlab® e OringPRO®. Esses gráficos foram utilizados para determinar os valores de média da temperatura para todos os ensaios. Os gráficos para todos os materiais e condições testadas são apresentados no Apêndice A.

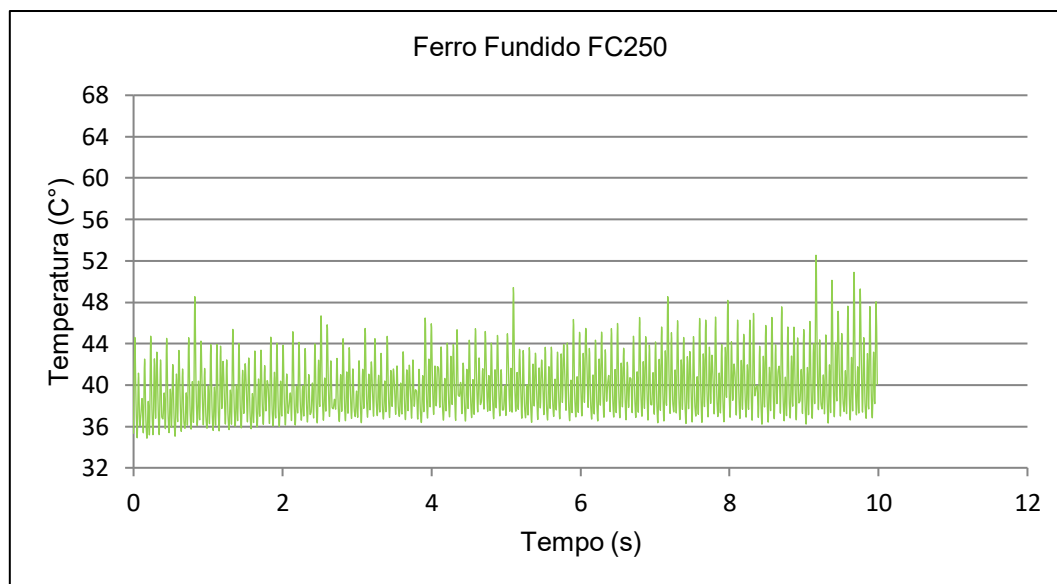


Figura 4.10 – Gráfico de comportamento do sinal de temperatura para o material FC 250 utilizando ferramenta de geometria (A), velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min); avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente) e profundidade de corte $a_p = 1$ (mm).

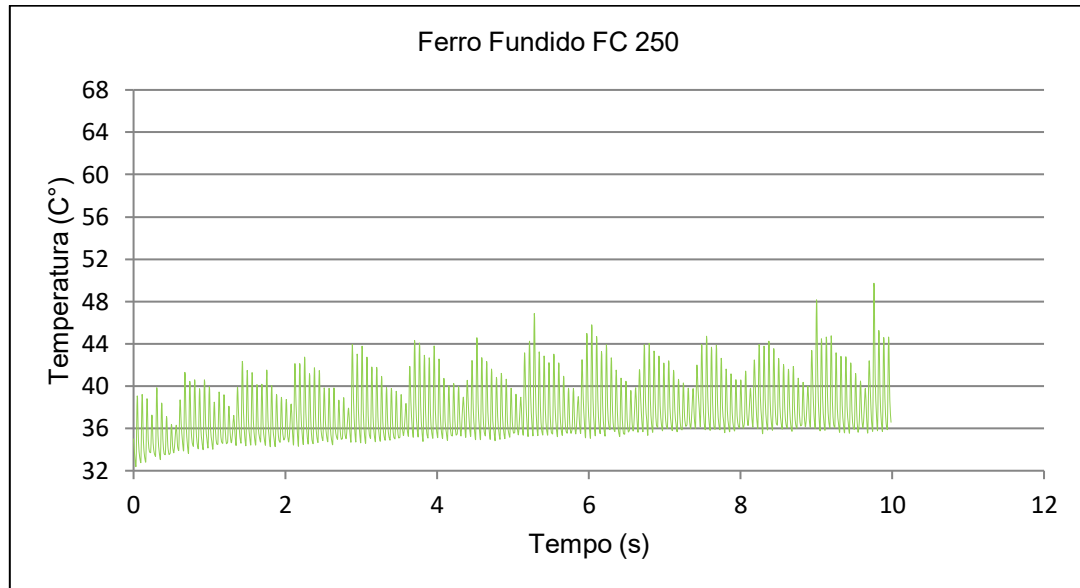
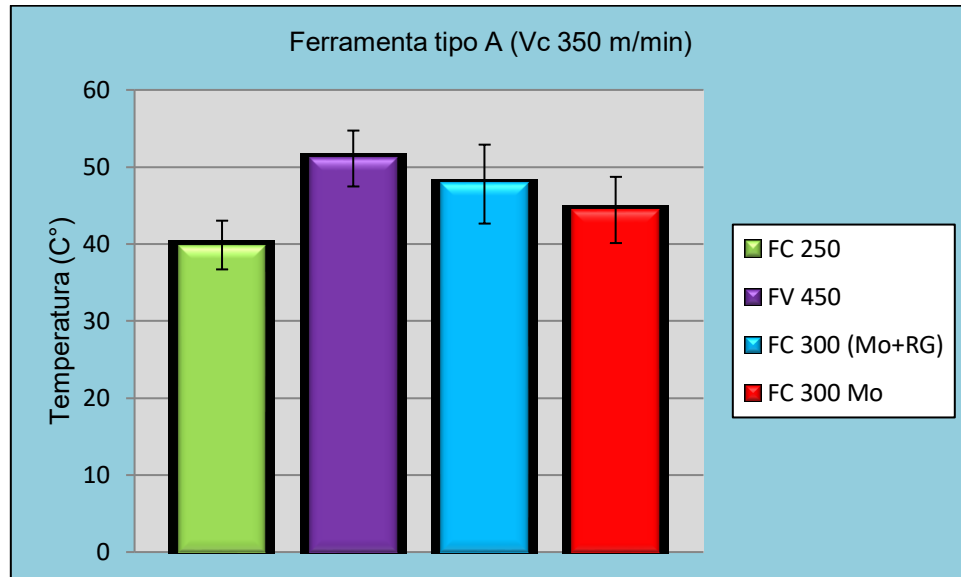
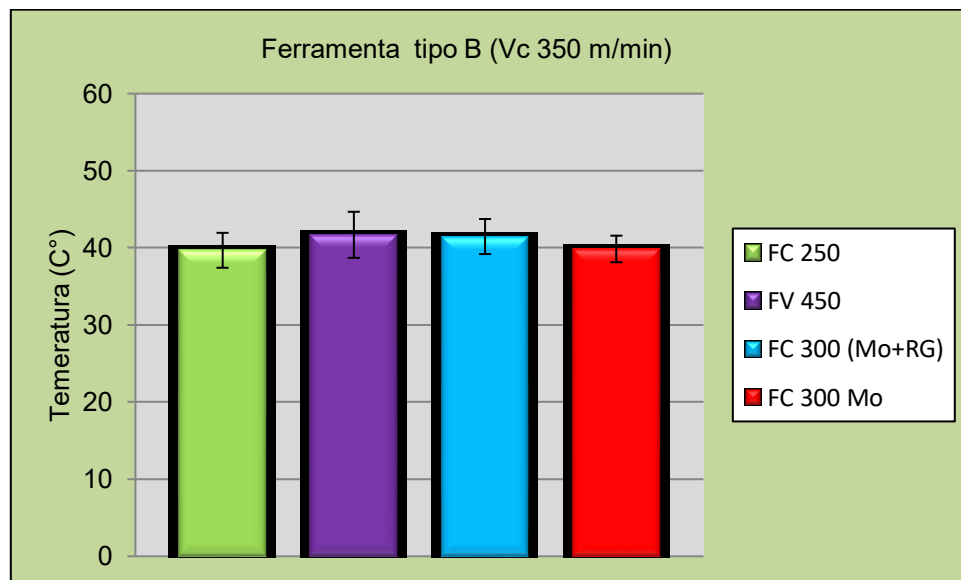


Figura 4.11 - Gráfico de comportamento do sinal de temperatura para o material FC 250 utilizando ferramenta de geometria (B), velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min); avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente) e profundidade de corte $a_p = 1$ (mm).

Os valores médios da temperatura em cada condição de corte testada [testes nos extremos das condições, isto é, $v_c = 350$ (m/min) e $f_z = 0,2$ (mm/dente); $v_c = 230$ (m/min) e $f_z = 0,1$ (mm/dente)], usando as duas geometrias de ferramentas, para cada material, geraram os gráficos de barras apresentados nas Figuras 4.12 e 4.13.

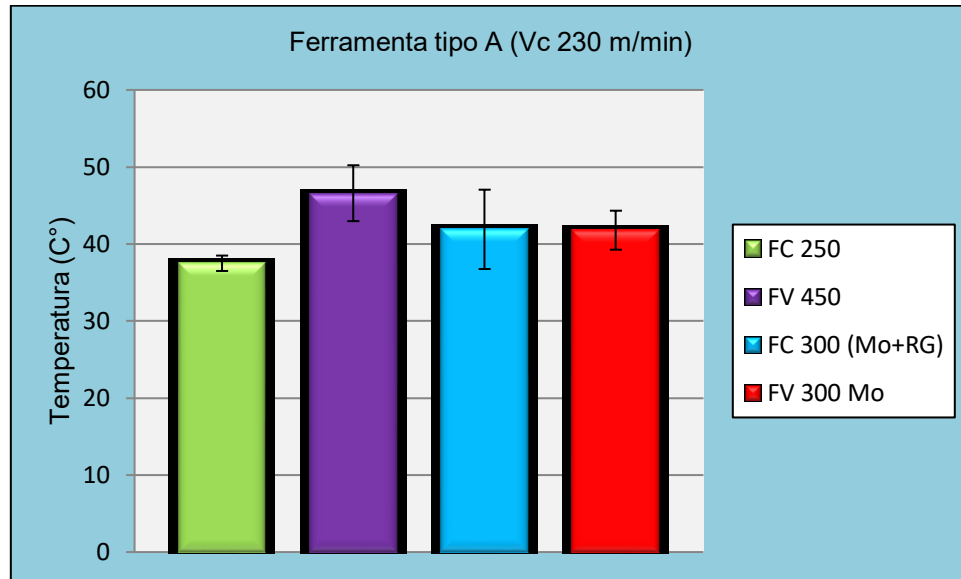


(a)

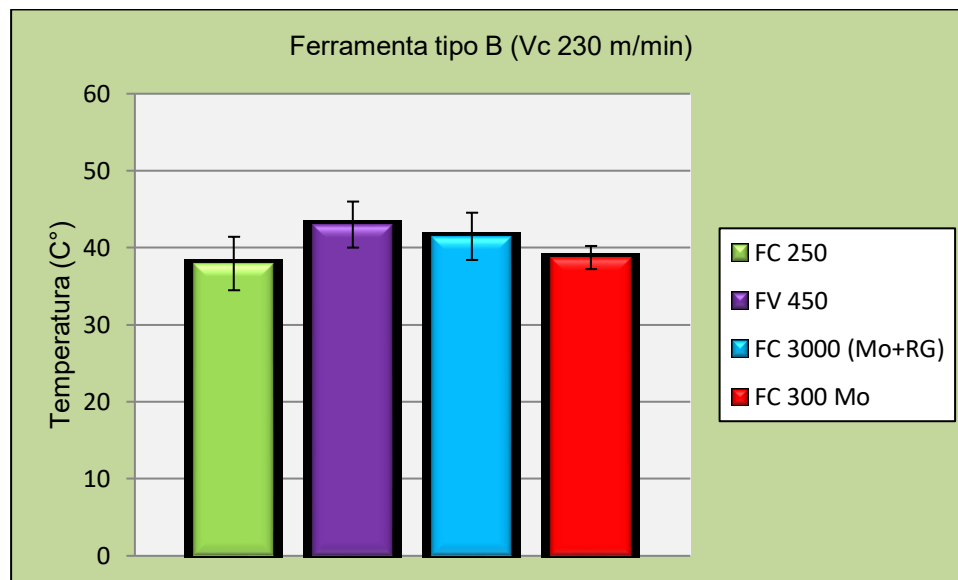


(b)

Figura 4.12- Valores médios de temperatura obtidos durante os testes de usinagem com (a) ferramenta de geometria (A) e (b) ferramenta de geometria (B), com a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min); avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente) e $a_p = 1$ (mm).



(a)



(b)

Figura 4.13 Valores médios de temperatura obtidos durante os testes de usinagem com (a) ferramenta de geometria (A) e (b) ferramenta de geometria (B), com a velocidade de corte igual $v_c = 230$ (m/min); avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente) e $a_p = 1$ (mm).

Observa-se que em todas as condições testadas, o ferro fundido cinzento FC250 apresentou os menores valores de temperatura e o ferro fundido vermicular FV450 os maiores, independente

da velocidade de corte utilizada. Vale destacar que foi utilizado um método alternativo de medição com a câmera termográfica infravermelha no modo simplificado, na qual somente indica a temperatura instantânea de uma região limitada da peça. Podendo o equipamento ser calibrado com o valor da emissividade do material em que se mede a temperatura. A precisão e a quantidade de informações obtidas são, entretanto, menores (GUENZA, 2009). Os ferros fundidos cinzentos FC 300_(Mo) e FC 300_(Mo+RG) apresentaram temperaturas intermediárias, sendo que as temperaturas do FC 300_(Mo + RG) são ligeiramente superiores ao FC 300_(Mo).

De acordo com Guenza (2008) o cavaco curto, típico do ferro fundido cinzento, não possibilita distinguir macroscopicamente alteração nos mecanismos de formação do cavaco e em sua geometria durante a usinagem. Percebeu-se somente centelhamento intenso durante a usinagem, confirmando visualmente o aumento da temperatura do cavaco sem correspondente alteração da temperatura da peça. Ainda em concordância com o autor, além do tamanho reduzido do cavaco outro fato que limita a avaliação do processo, segundo este critério, é a variação de dureza do material.

Para Ferrer (2006) os ferros fundidos cinzentos podem apresentar uma ampla faixa de dureza, dependendo da velocidade de resfriamento, da espessura da secção e da composição química do material. A dureza do material influencia diretamente na velocidade de corte a partir da qual ocorre mudança na morfologia do cavaco

Segundo Doré (2007) durante o processo de usinagem, o cavaco do ferro fundido vermicular, neste caso a liga FV450, tende a ficar mais em contato com a ferramenta, comparando com as demais ligas de ferro fundido cinzento (maior comprimento de contato cavaco-ferramenta). Dessa forma, o maior coeficiente de atrito do ferro fundido vermicular aliado à sua menor condutividade térmica, tende a elevar a temperatura da ferramenta durante o corte, sendo esta, alguns graus acima do cinzento (REUTER *et al.*, 2001).

Os valores aqui obtidos ao final dos testes de temperaturas foram semelhantes aos resultados encontrados por Bagetti (2009) onde em seus estudos, o autor verificou a análise da usinabilidade, deformação e temperatura no fresamento dos ferros fundidos vermicular e cinzento. Para confirmar estatisticamente a diferença entre os materiais, foram realizados à análise de variância (ANOVA) para temperatura, utilizando intervalo de confiança de 95 % e nível de significância de 5 %.

Para a avaliação da temperatura (C°), nota-se na Tab. 4.5 a interação entre os três parâmetros envolvidos, o que reflete nos resultados obtidos. Na Tabela 4.5 é mostrado a análise de variância para temperatura.

Tabela 4.5 – Resultado da análise de variância para temperatura (C °) entre os materiais.

<i>Análise de Variância para temperatura (C °)</i>					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-p</i>
Classes de materiais	92,800320	3	30,933440	6,755383	0,013882
Geometria da ferramenta	45,784325	1	45,784325	9,998586	0,013353
Interações	30,867918	3	10,289306	2,247024	0,160116
Erro	36,632639	8	4,5790798		
Total	206,085204	15			

Os efeitos térmicos da variação da temperatura são decorrentes das condições de corte, sobretudo da velocidade de corte, do avanço e da relação do tempo ativo e inativo de cada ciclo, levando-se sempre em consideração o material da peça e da ferramenta de corte (SILVA et al., 2001; BAGETTI, 2009). O aquecimento foi menor em relação aos ensaios com as ferramentas de geometria (B). A diferença percentual entre as temperaturas dos ensaios entre as ligas foi de 10%, menor do que nos ensaios com menor avanço.

De acordo com Ferrer (2006), com o aumento da velocidade de corte, isso tende a proporcionar um aumento da taxa de desgaste, tendo como resultado uma redução na vida ferramenta. Isto é explicado porque, com o aumento da velocidade de corte, eleva-se a temperatura na ferramenta e, por sua vez, facilita o surgimento do desgaste, deixando o substrato da ferramenta mais suscetível aos efeitos da temperatura e da abrasão, aumentando a taxa de desgaste. (XAVIER, 2003).

Outro fator a se considerar ainda segundo Machado et al., (2015) é que, assim como acontece com a velocidade de corte, alterações na velocidade de avanço proporcionam mudanças na força de corte, temperatura e na deformação plástica do material. Pois, durante o fresamento, com a utilização de pequenos avanços, a compressão gerada pelas arestas de corte sobre o material irá gerar uma grande deformação plástica e ainda em relação à velocidade de corte, à

medida que se aumenta o valor desta, ocorre o aumento da geração de calor na região de corte e, portanto, há elevação da temperatura nesta região. O aumento da temperatura do material da peça reduz a resistência mecânica do mesmo, proporcionando a diminuição das componentes da força de usinagem.

A seguir estão os resultados dos ensaios de vida e da caracterização do desgaste das ferramentas.

Os gráficos referentes ao fim de vida das ferramentas foram construídos com valores oriundos do comprimento do desgaste de flanco da aresta de corte que demonstrou maiores taxas. Para facilitar a interpretação dos resultados obtidos com relação à geometria, tempo de vida das ferramentas e da caracterização dos mecanismos de desgaste, estes estão divididos em tópicos de acordo com cada geometria de ferramenta e condição de corte utilizada neste estudo.

4.5 - Desgaste das ferramentas (vida)

A seguir, nas Figuras 4.14 e 4.15 são apresentados os gráficos de desgaste de flanco ($VB_{Bmax.}$) monitorados no decorrer do tempo, para os ensaios de vida das ferramentas nas diferentes classes de ferros fundidos, em função da geometria da ferramenta e da velocidade de corte (v_c), para o menor avanço por dente de 0,1 mm. Todos os ensaios foram realizados sem refrigeração e como critério de fim de vida da ferramenta, o desgaste ($VB_{B máx.}$) igual a 0,4 mm.

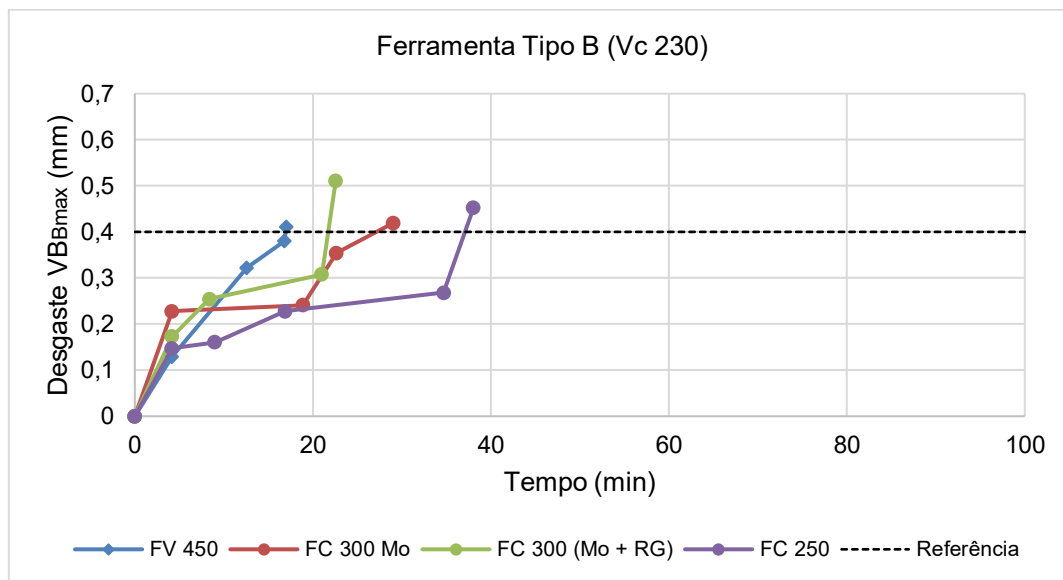
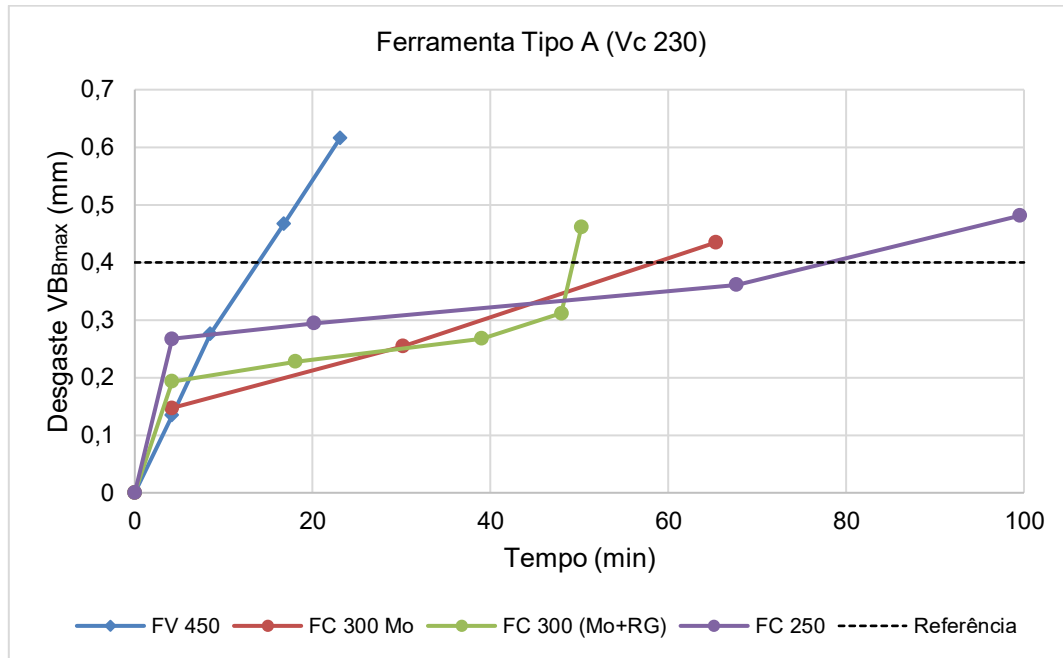
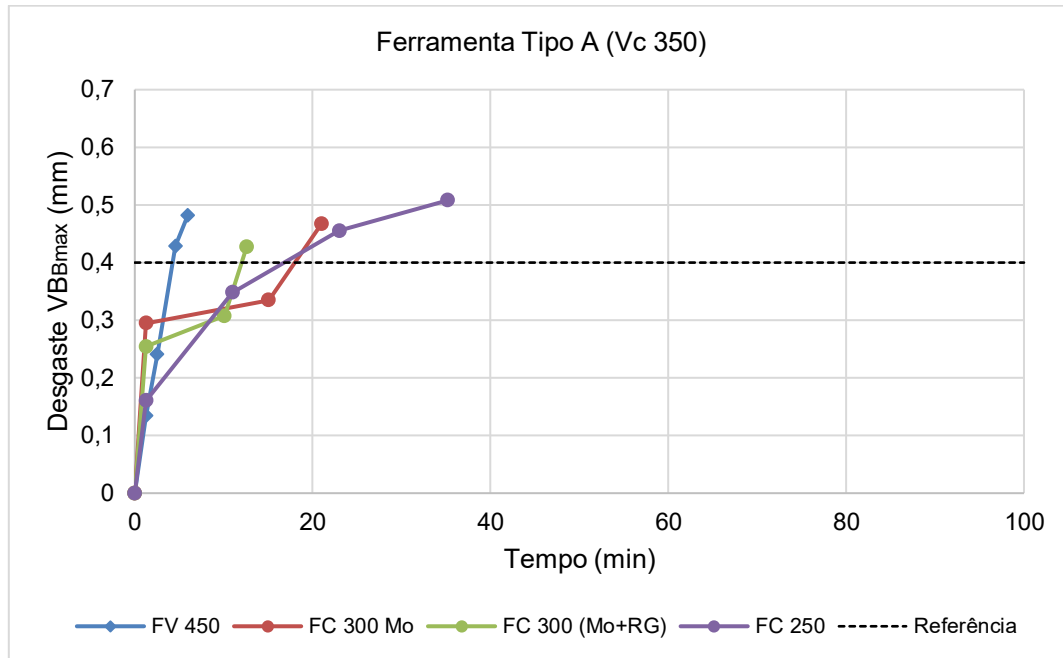
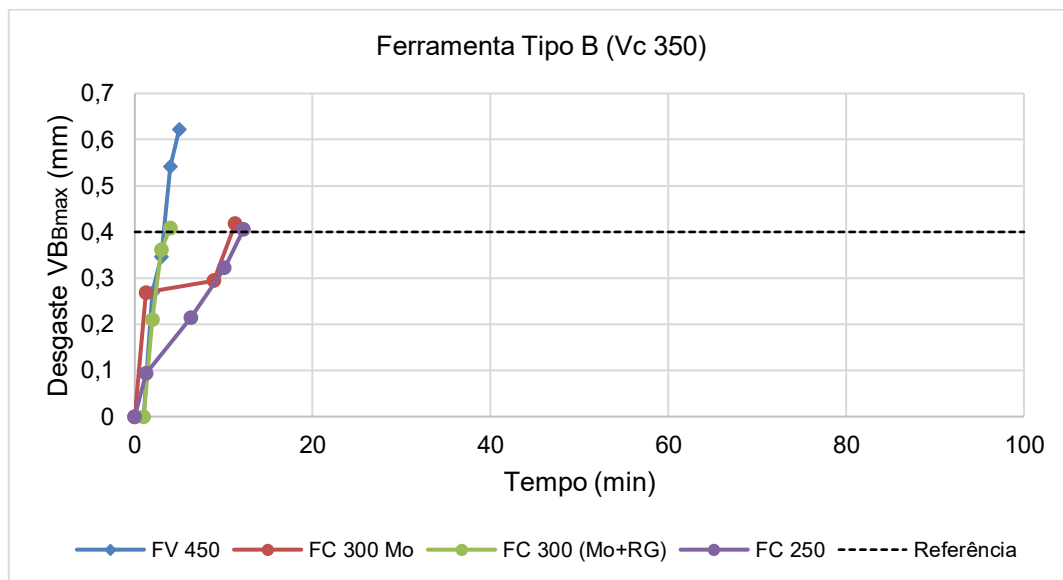


Figura 4.14 - Desgaste de flanco ($VB_{Bmáx.}$) em função do tempo de usinagem para a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e $f_z = 0,1$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).



(a)



(b)

Figura 4.15 - Desgaste de flanco ($VB_{B \text{ máx.}}$) em função do tempo de usinagem para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e $f_z = 0,1$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).

De acordo com as Figuras 4.14 (a) e (b) e 4.15 (a) e (b), observa-se que a taxa de desgaste de flanco ($VB_{B\text{ máx.}}$) foi sempre maior para o ferro fundido vermicular. Para as condições de corte utilizadas nos testes com velocidades de corte $v_c = 350$ (m/min) e $v_c = 230$ (m/min) utilizando um avanço de $f_z = 0,1$ (mm/dente) o comportamento do desgaste evidenciou uma boa relação com a resistência à ruptura à tração e dureza, ou seja, o ferro fundido vermicular classe FV450 demonstrou ter pior usinabilidade, resultado da sua maior resistência mecânica e dureza, seguido do FC 300_(MO+RG) quando comparado às demais classes investigadas.

A morfologia da grafita vermicular da classe FV 450 pode ter influenciado negativamente nesta condição, restringindo a propagação de trincas internas no material e dificultando o fluxo térmico gerado no processo de formação do cavaco, de tal modo que beneficiasse algum tipo de mecanismo de desgaste termicamente ativado.

Segundo Doré (2007), a maior dureza do material, somada a presença de carbonetos, aumenta a abrasividade do cavaco, aumentando assim a taxa de desgaste. Isso mostra que o aumento na dureza e a presença de carbonetos, junto com a nodularidade, provocaram o fim de vida antecipado da ferramenta.

Com relação à geometria da ferramenta, obteve-se um desgaste mais acelerado na ferramenta de corte com geometria (B), possivelmente devido ao aumento da geração de calor entre a superfície de contato peça / ferramenta, levando em consideração o ângulo de saída da ferramenta com geometria (B) ser um ângulo positivo.

A seguir, nas Figuras 4.16 e 4.17 são apresentados os gráficos de desgaste de flanco ($VB_{B\text{ máx.}}$) monitorados, para $f_z = 0,2$ (mm/dente), nas duas velocidades de corte e duas geometrias de ferramentas.

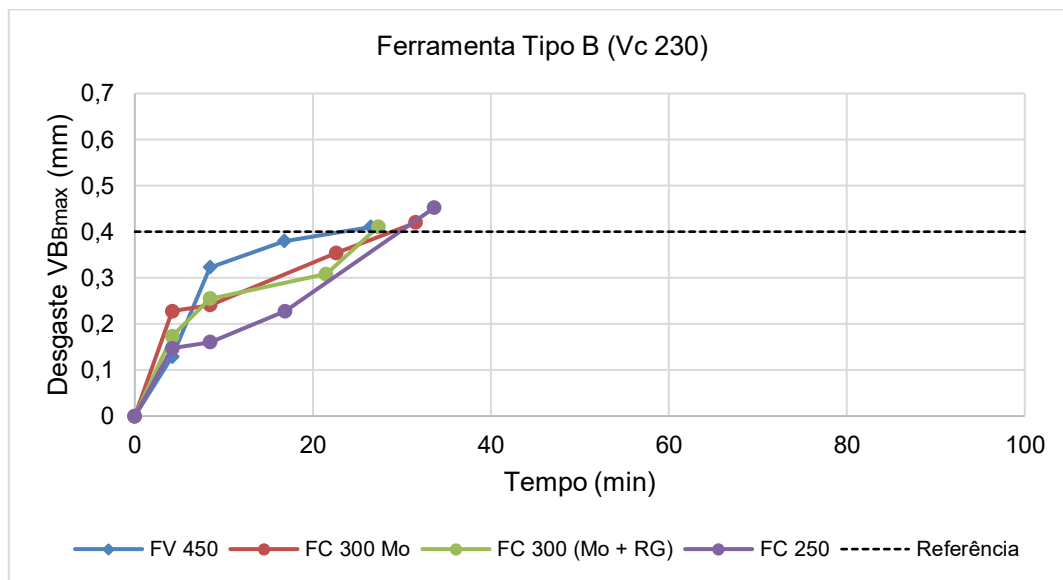
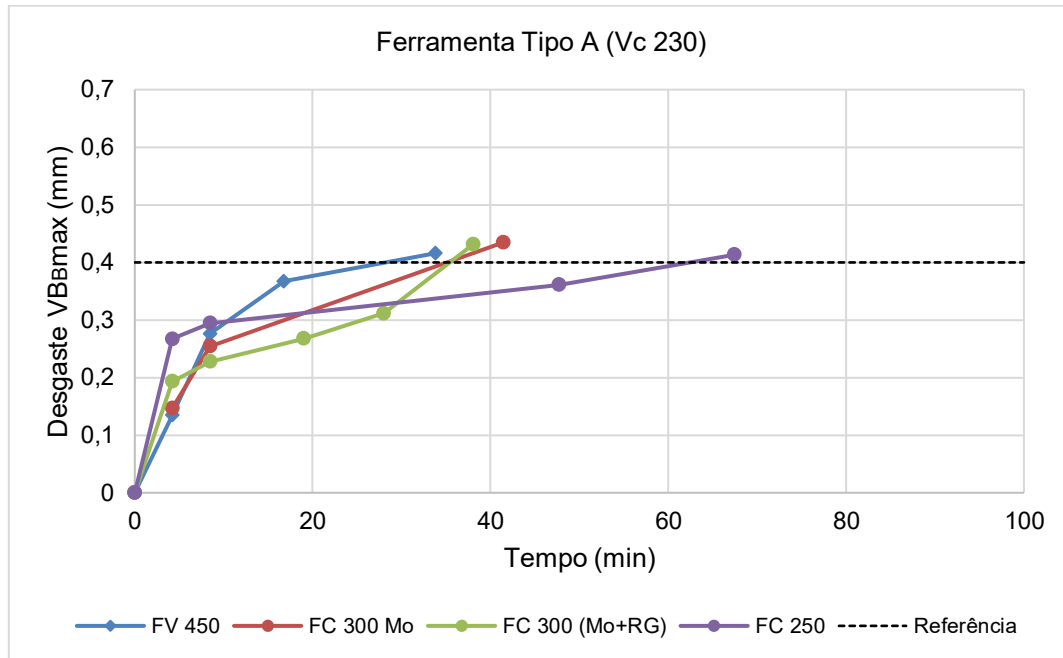


Figura 4.16 - Desgaste de flanco ($VB_{B\text{m}\acute{a}x.}$) em função do tempo de usinagem, para a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e $f_z = 0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).

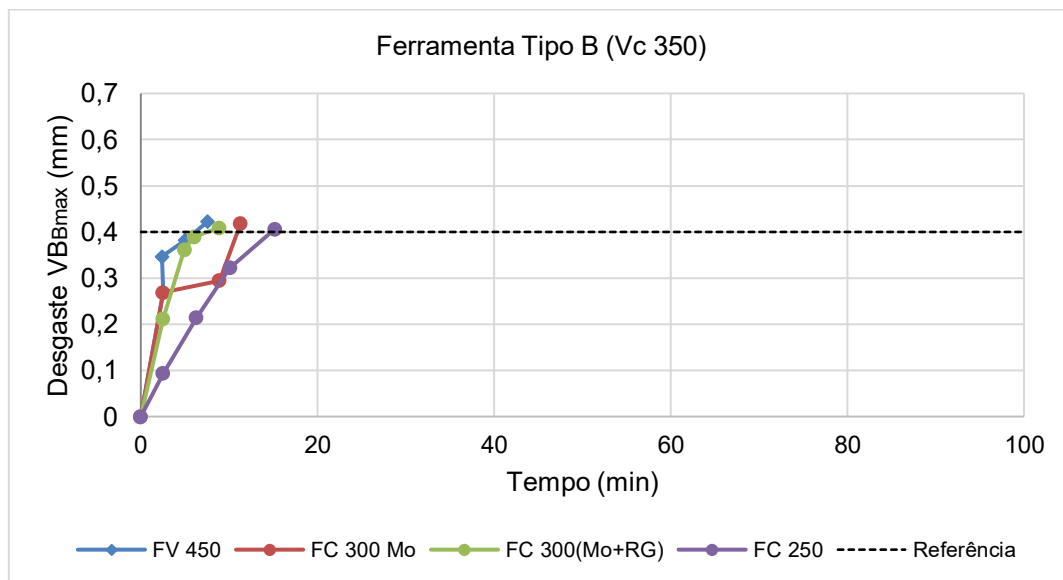
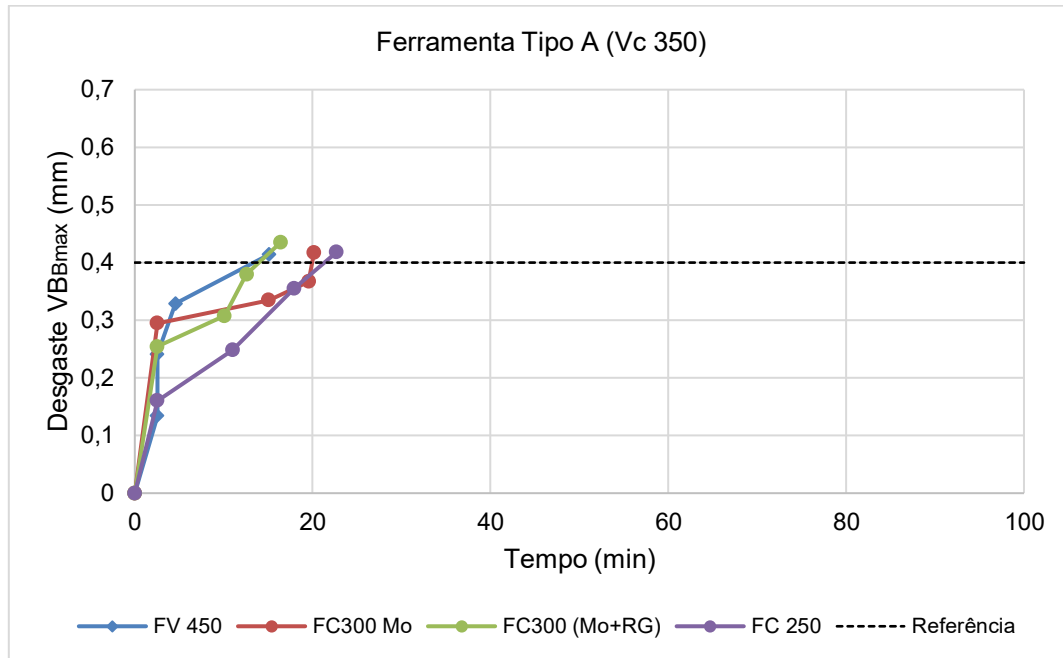


Figura 4.17 - Desgaste de flanco ($VB_{B \text{ máx.}}$) em função do tempo de usinagem para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e $f_z = 0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).

Verifica-se nos resultados obtidos do tempo principal total de usinagem, que com o aumento da velocidade de corte de 230 (m/min) para 350 (m/min) mantendo o valor de avanço $f_z = 0,2$ (mm/dente) a ferramenta de geometria (B), acarretou em um aumento no desgaste de flanco em torno de 15 e 30% nos ensaios. Nota-se que a variação dos parâmetros de corte envolvidos influenciou diretamente no tempo de usinagem dos corpos de prova.

Salienta que com o aumento da velocidade de corte para todos os materiais houve um aumento do desgaste das ferramentas, independente da geometria e com isso originou uma redução da usinabilidade em todas as ligas investigadas.

Para Xavier (2009) dentre os parâmetros de corte da usinagem, a velocidade de corte é um daqueles que mais influência na vida da ferramenta, possuindo grande correlação com a geração de calor na zona de corte, diante disto, percebeu-se que o ferro fundido vermicular foi o que apresentou maiores valores de desgastes. Isso pode ser motivado pela morfologia da grafita deste material, resultando em maior limite de resistência, o que dificulta a formação de cavaco e com isso reduz a usinabilidade deste material. Na sequência, as ferramentas que apresentaram maiores desgastes (ou vidas mais curtas) foram as que usinaram o FC300_(Mo+RG) e depois o FC 300_(Mo), com o ferro fundido cinzento da classe FC 250 apresentando as maiores vidas devido a sua micro estrutura.

De acordo com Guesser et al., (2014) outra explicação é que nos ferros fundidos cinzentos há a presença de sulfetos de manganês (MnS), que tendem a se depositar na superfície da ferramenta, tendo uma função protetora e responsável pela redução do desgaste da aresta de corte.

Nas Figuras 4.18 e 4.19 são apresentados os gráficos de desgaste de flanco ($VB_{Bmax.}$) monitorados no decorrer do tempo, para os ensaios de vida das ferramentas nas diferentes classes de ferros fundidos, desta vez em barras com as mesmas dimensões das anteriores, porém, com a sua superfície dotadas de furos, afim, de aumentar a descontinuidade do corte interrompido, tornando-o ainda mais crítico, variando a velocidade de corte a geometria da ferramenta.

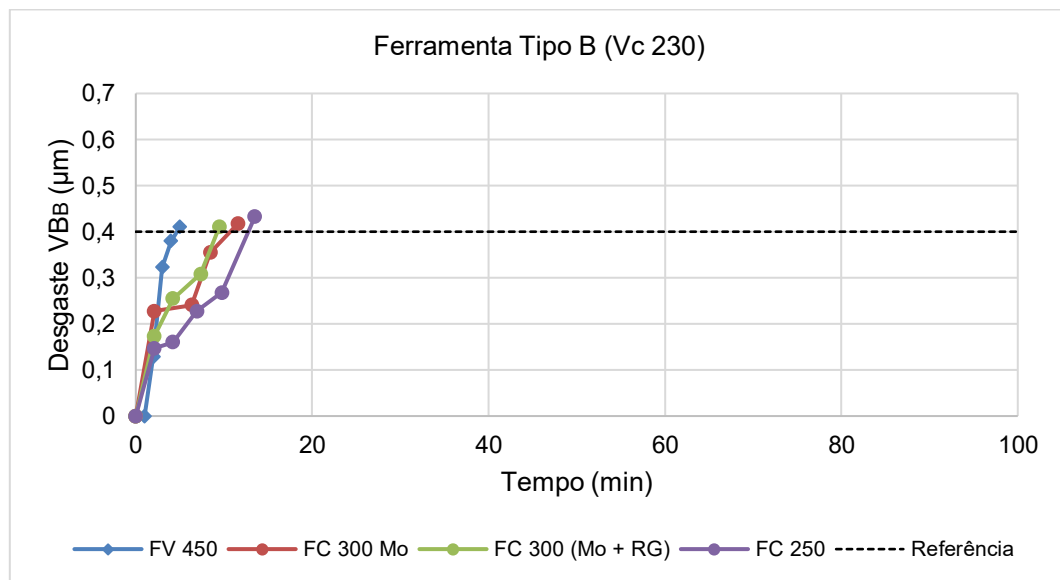
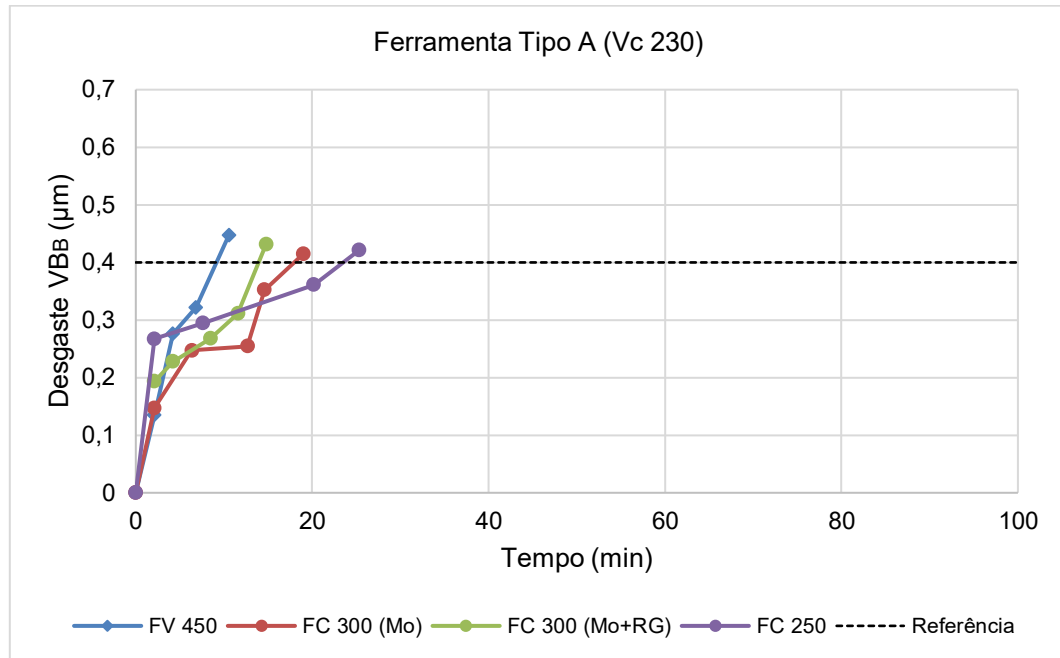


Figura 4.18 - Desgaste de flanco (VB_B máx.) em função do tempo de usinagem para a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e $f_z = 0,2$ (mm/dente) em superfícies dotadas de furos; a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).

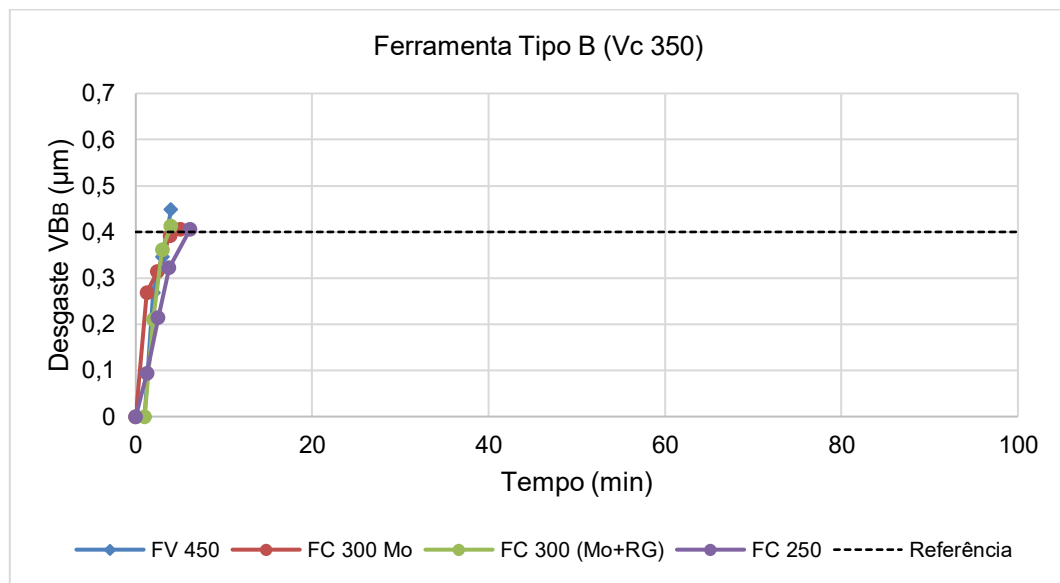
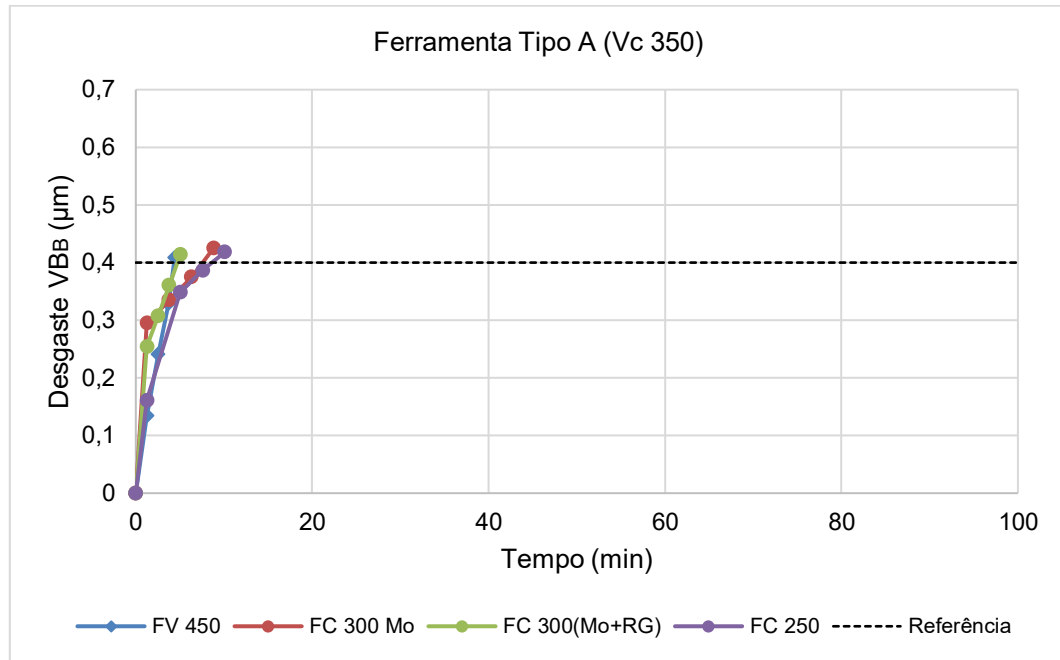
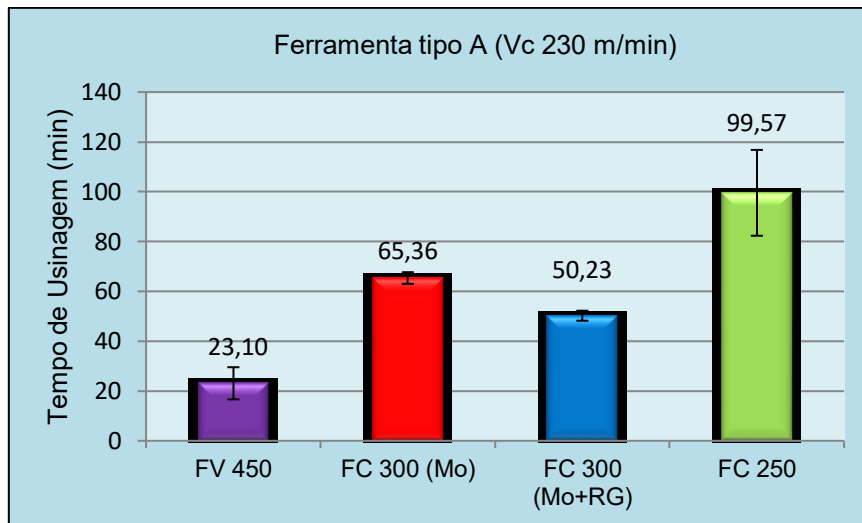


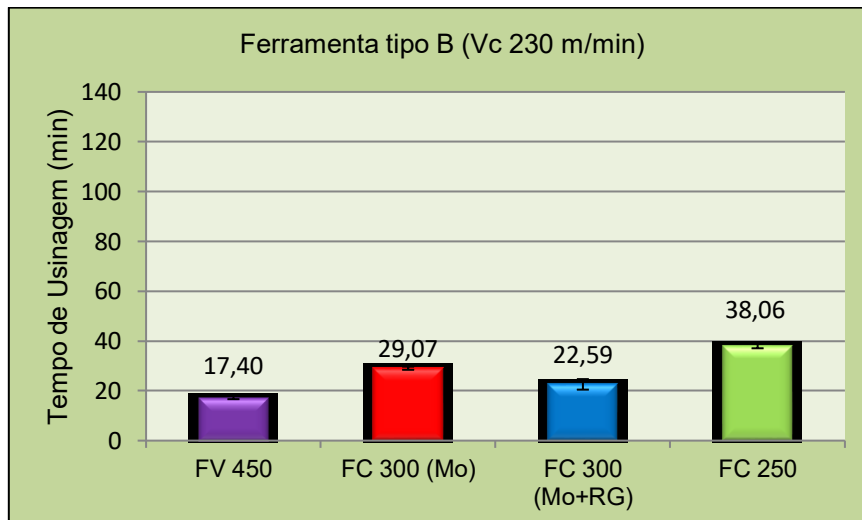
Figura 4.19 - Desgaste de flanco (VB_B máx.) em função do tempo de usinagem para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e $f_z = 0,2$ (mm/dente) em placas de ferros fundidos com superfícies dotadas de furos; a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).

4.6 - Tempo de vida das ferramentas de corte

Nas Figuras 4.20 e 4.21 são apresentados os valores do tempo de vida das ferramentas obtidos ao final dos ensaios (para o critério de $VB_{Bmax} = 0,4 \text{ mm}$) para as diferentes classes de ferros fundidos.

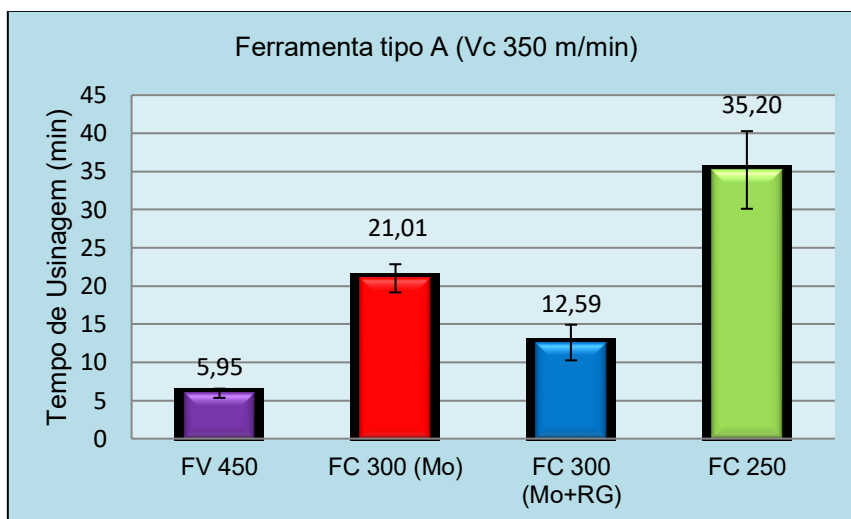


(a)

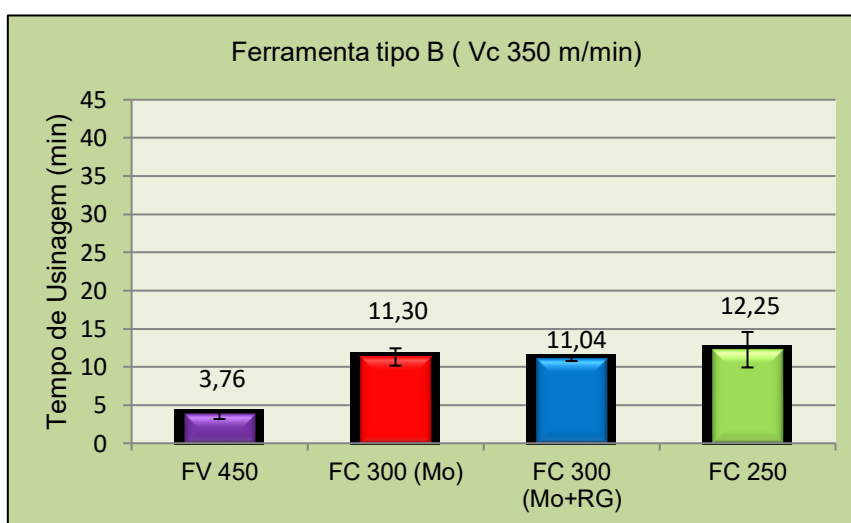


(b)

Figura 4.20 - Valores obtidos do tempo de vida das ferramentas para a velocidade de corte $v_c = 230 \text{ (m/min)}$; $f_z = 0,1 \text{ (mm/dente)}$; $a_p = 1 \text{ (mm)}$; $a_e = 60 \text{ mm}$.



(a)



(b)

Figura 4.21 - Valores obtidos do tempo de vida das ferramentas para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min); $f_z = 0,2$ (mm/dente); $a_p = 1$ (mm); $a_e = 60$ mm.

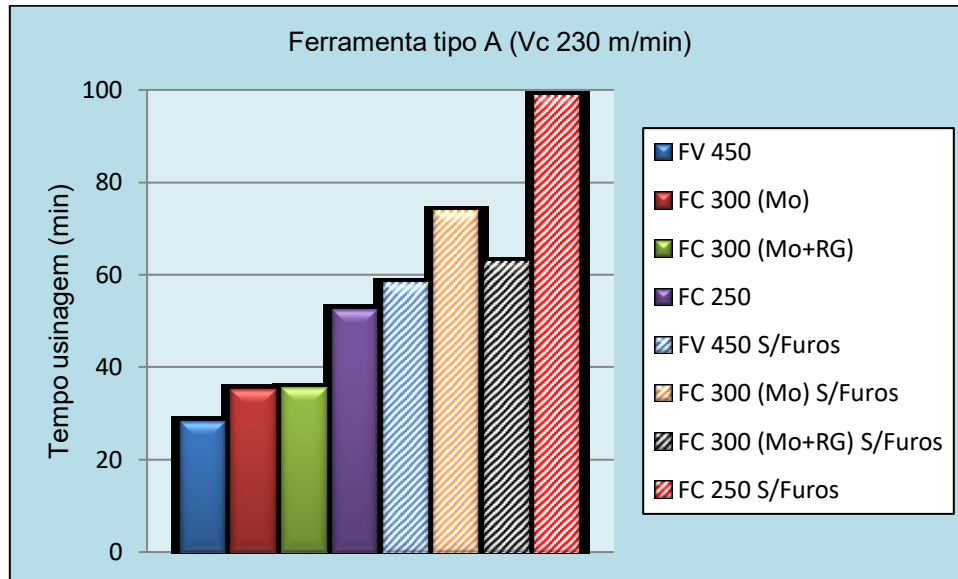
Baseado nas figuras 4.20 e 4.21 pode verificar-se que na condição mais severa (v_c e f_z nos níveis altos), o desgaste da ferramenta foi mais acelerado, proporcionando vidas das ferramentas menores que na condição mais branda (v_c e f_z nos níveis baixos), para todos os materiais testados e nas duas geometrias de ferramentas. De acordo com os valores observados, fica mais evidente o

alto impacto da velocidade de corte na usinagem dos materiais em análise. Tomando como exemplo o desempenho da ferramenta de geometria (A) que usinou a classe FC250, observa-se que a mudança da velocidade de 350 (m/min) para 230 (m/min), levando em consideração a relação do avanço empregado, implica em um aumento percentual em torno de 100% a mais no tempo de vida da ferramenta, sem que, na menor velocidade corte, o critério de fim de vida adotado tenha sido atingido.

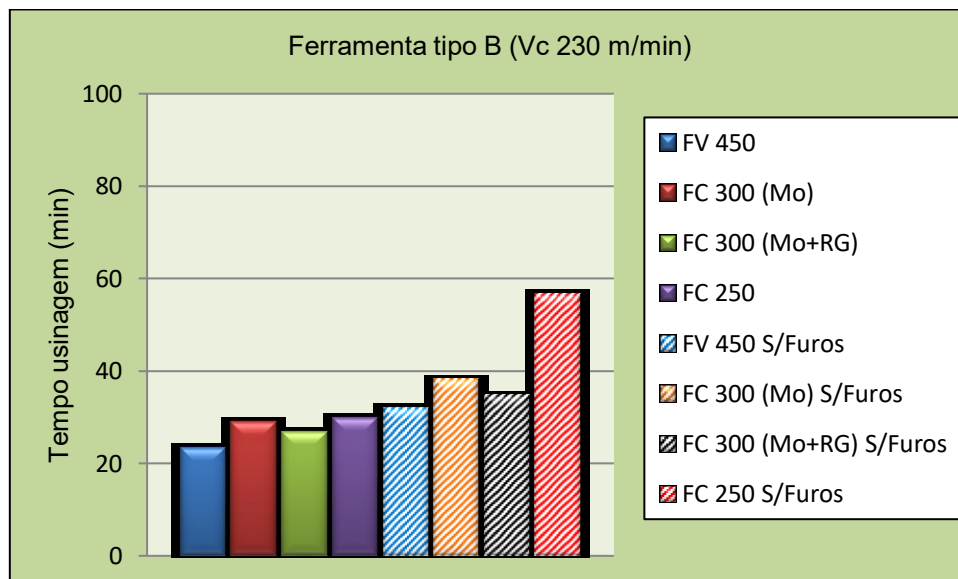
Segundo König e Klocke, (1997) e Machado et al., (2015) o parâmetro de corte que apresenta maior influência sobre a vida de uma ferramenta é a velocidade de corte, por ser o principal responsável pelo aumento da temperatura na região de formação de cavacos. Porém, a força de usinagem aumenta com o incremento do avanço. Consequentemente, o aumento das componentes da força de usinagem leva a menores vidas das ferramentas, influenciando também na temperatura na região do corte, entretanto, com menor significância do que a velocidade de corte.

Percebe-se ainda que durante o processo de fresamento o ferro fundido vermicular classe FV 450 ao ser empregado em diferentes parâmetros de corte e variação de geometria de ferramentas de corte, foi o material que apresentou pior usinabilidade, quando comparado com as demais classes. Isso pode ser motivado pela morfologia da grafita deste material, resultando em maior limite de resistência e dureza, o que dificulta a formação de cavaco e com isso reduz sua usinabilidade (REUTER, 2001).

Nas Figuras 4.22 a 4.23 estão mostrados os gráficos de tempo de vida das ferramentas, baseado no critério de fim de vida pré-estabelecido de 0,4 mm, comparando o fresamento frontal em barras que não possui furos na superfície, com barras com furos na superfície, caracterizando um corte mais interrompido devido aos furos, para os quatro materiais investigados utilizando as duas geometrias de ferramentas.

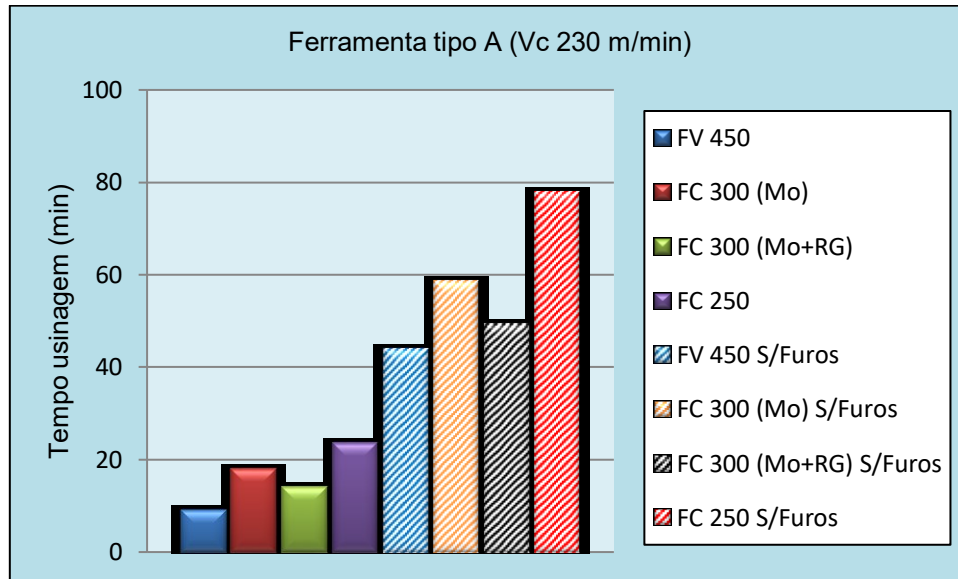


(a)

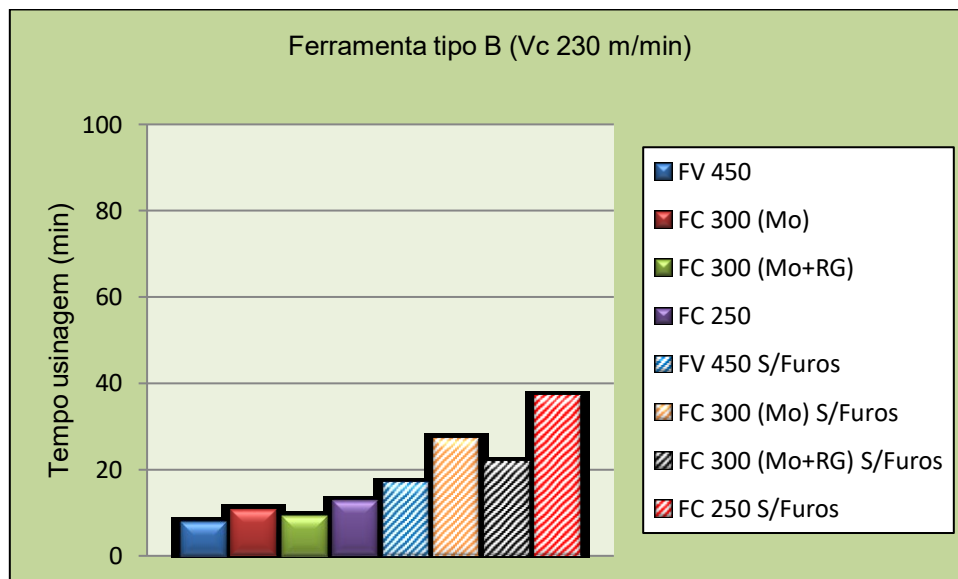


(b)

Figura 4.22 – Vidas das ferramentas de corte no fresamento de peças sem furos na superfície e com furos na superfície, com velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).

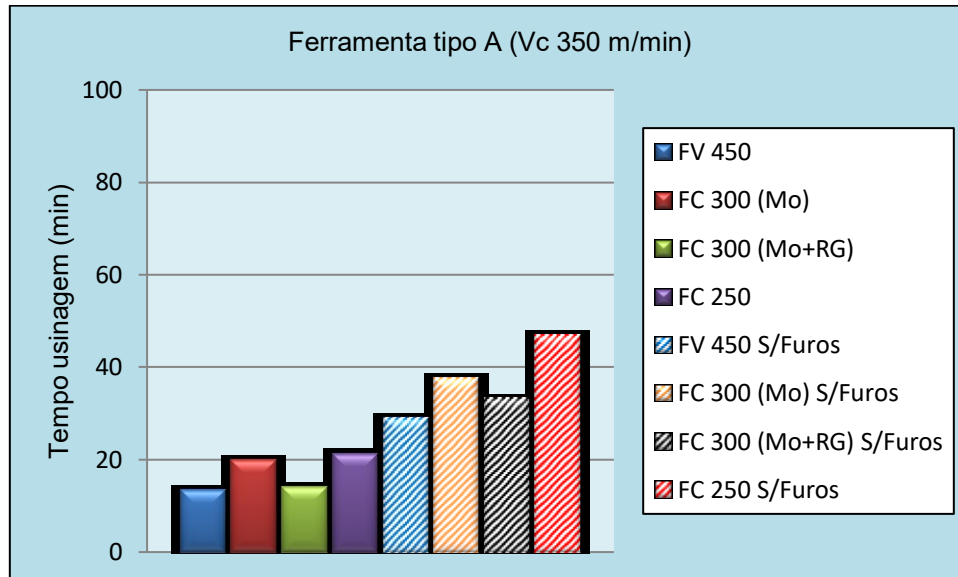


(a)

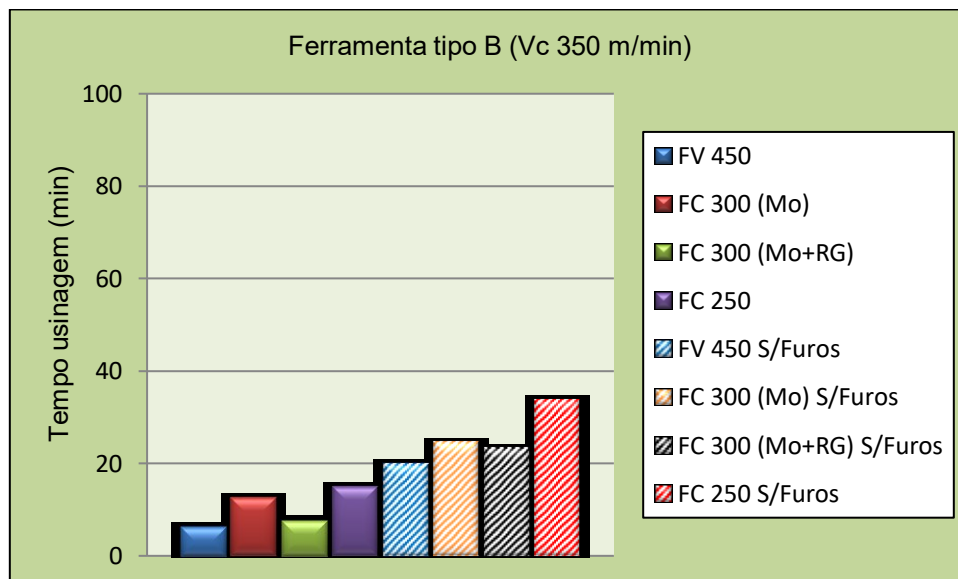


(b)

Figura 4.23 - Vidas das ferramentas de corte no fresamento de peças sem furos na superfície e com furos na superfície, com velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).

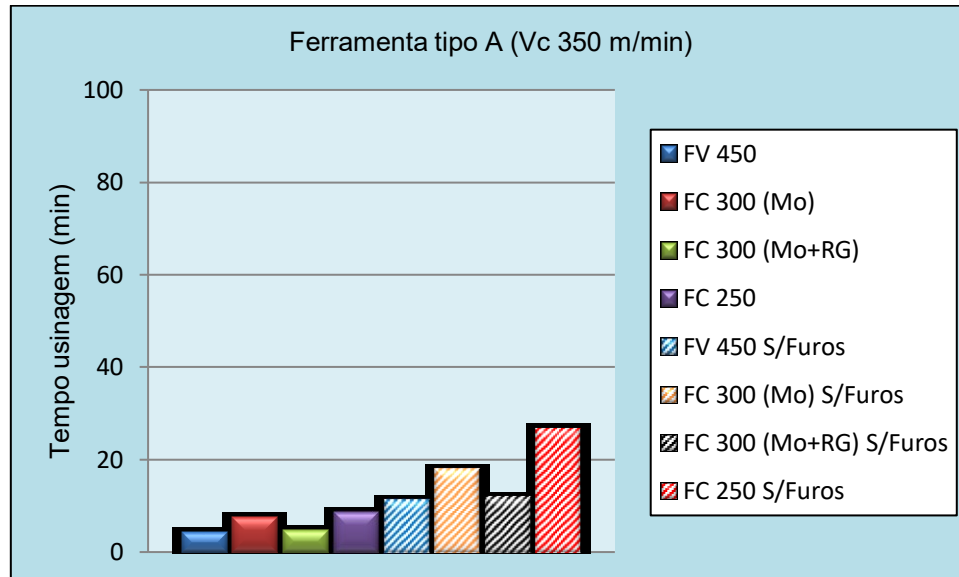


(a)

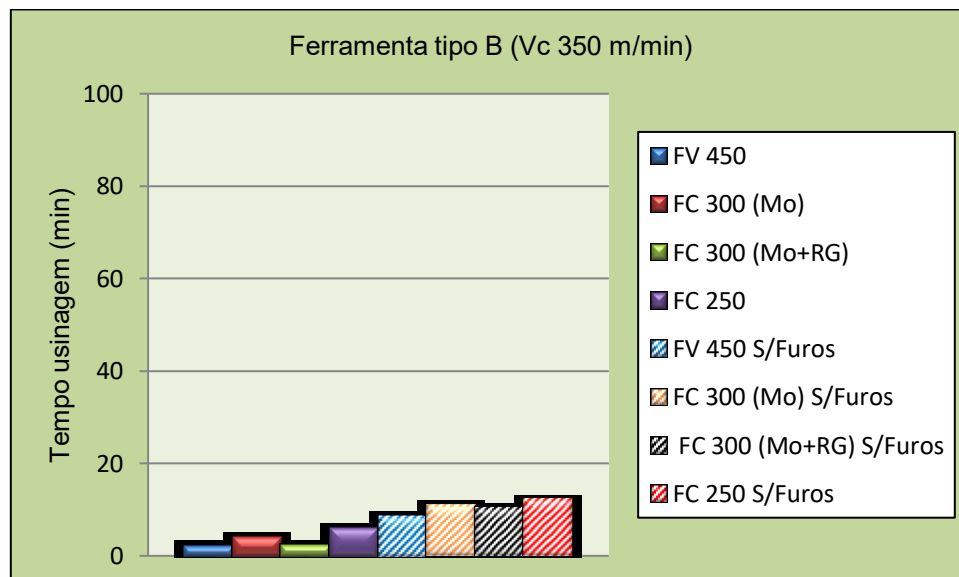


(b)

Figura 4.24 - Vidas das ferramentas de corte no fresamento de peças sem furos na superfície e com furos na superfície, com velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).



(a)



(b)

Figura 4.25 - Vidas das ferramentas de corte no fresamento de peças sem furos na superfície (corte contínuo) e com furos na superfície, com velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).

Esses gráficos mostram que para as mesmas condições de corte utilizadas, o ferro fundido vermicular classe FV450 apresentou a pior usinabilidade (vidas menores) entre os materiais testados, seguido do FC300_(Mo+GR), depois o FC300_(Mo) e finalmente pelo FC250. O processo de fresamento frontal em barras com furos na superfície apresentou vidas das ferramentas menores que quando usinando superfícies de barras sem furos.

Nas Tabelas 4.6 e 4.7 estão os tempos de vida das ferramentas de corte, baseado no critério de fim de vida adotado para os ensaios, comparando o fresamento frontal em “barras sem furos” e “barras com furos” na superfície, utilizando velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente) para ferramenta de geometria (A) e ferramenta de geometria (B).

Tabela 4.6 - Tempo de vida das ferramentas para a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) com $f_z = 0,1$ (mm/dente).

Material	FV 450	FC 300 _(Mo)	FC 300 _(Mo + RG)	FC 250	FV 450	FC 300 _(Mo)	FC 300 _(Mo + RG)	FC 250
Barras sem furos					Barras com furos			
Ferramenta tipo A $v_c = 230$ (m/min) e $f_z = 0,1$ (mm/dente)								
Tempo de usinagem (min.)	58,25	73,92	62,71	98,67	28,25	35,09	35,42	52,45
Ferramenta tipo B $v_c = 230$ (m/min) e $f_z = 0,1$ (mm/dente)								
Tempo de usinagem (min.)	31,01	38,16	32,62	56,53	23,29	28,91	26,63	29,75

Tabela 4.7 - Tempo de vida das ferramentas para a velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) com $f_z = 0,2$ (mm/dente).

Material	FV 450	FC 300 _(Mo)	FC 300 _(Mo + RG)	FC 250	FV 450	FC 300 _(Mo)	FC 300 _(Mo + RG)	FC 250
Barras sem furos					Barras com furos			
Ferramenta tipo A $v_c = 230$ (m/min) e $f_z = 0,2$ (mm/dente)								
Tempo de usinagem (min.)	43,87	58,56	49,31	78,04	9,14	17,94	13,92	25,50
Ferramenta tipo B $v_c = 230$ (m/min) e $f_z = 0,2$ (mm/dente)								
Tempo de usinagem (min.)	16,96	27,16	21,71	37,10	7,73	10,71	9,26	12,76

De acordo com a Tabela 4.6 percebe-se que o tempo de usinagem (vida da ferramenta) diminuiu consideravelmente quando se usinou as “barras com furos” comparadas com a usinagem das “barras sem furos” do mesmo material, 51,50% para o ferro fundido FV450 e 43,52% para o FC250, com ferramentas de geometria tipo (A) para uma velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente). Para a ferramenta de geometria tipo (B) o maior valor de decréscimo do tempo de usinagem foi obtido com FC300 _(Mo+RG) 71,77%, ficando o FC250 com a menor diferença de 46,84%.

Quando alterado o valor de avanço por dente para $f_z = 0,2$ (mm/dente), na mesma velocidade de corte de $v_c = 230$ (m/min), utilizando a ferramenta de geometria tipo (A), o maior valor de decréscimo obtido no tempo de usinagem das barras com furos em relação aquelas sem furos foi com liga FV 450 (79,16%) e o menor para a liga de FC250 (41,32%) (Tab.4.7). Para ferramenta de geometria tipo (B) com os mesmos parâmetros de corte utilizados, o maior decréscimo no tempo de usinagem das barras com furos em relação aquelas sem furos foi com o material FC300 _(Mo+RG), (60,56%), sendo que o FC 250 apresentou a menor diferença (24,89%).

A seguir, nas Tabelas 4.8 e 4.9 estão os tempos de vida das ferramentas de corte, baseado no critério de fim de vida adotado, comparando-se o fresamento frontal em “barras sem furos” na superfície e “barras com furos” na superfície, utilizando velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanços por dente (f_z) de 0,1 e 0,2 (mm/dente), para as ferramentas de geometria (A) e geometria (B).

Tabela 4.8 - Tempo de vida das ferramentas para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) com $f_z = 0,1$ (mm/dente).

Material	FV 450	FC 300 _(Mo)	FC 300 _(Mo + RG)	FC 250	FV 450	FC 300 _(Mo)	FC 300 _(Mo + RG)	FC 250
Barras sem furos					Barras com furos			
Ferramenta tipo A $v_c = 350$ (m/min) e $f_z = 0,1$ (mm/dente)								
Tempo de usinagem (min.)	29,02	37,70	33,10	46,98	13,38	19,94	13,92	21,31
Ferramenta tipo B $v_c = 350$ (m/min) e $f_z = 0,1$ (mm/dente)								
Tempo de usinagem (min.)	19,88	24,46	23,29	33,73	6,16	12,45	7,57	14,79

Tabela 4.9 - Tempo de vida das ferramentas para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) com $f_z = 0,2$ (mm/dente).

Material	FV 450	FC 300 _(Mo)	FC 300 _(Mo + RG)	FC 250	FV 450	FC 300 _(Mo)	FC 300 _(Mo + RG)	FC 250
Barras sem furos					Barras com furos			
Ferramenta tipo A $v_c = 350$ (m/min) e $f_z = 0,2$ (mm/dente)								
Tempo de usinagem (min.)	11,28	17,98	12,01	26,80	4,33	7,55	4,72	8,64
Ferramenta tipo B $v_c = 350$ (m/min) e $f_z = 0,2$ (mm/dente)								
Tempo de usinagem (min.)	8,56	10,94	10,26	12,08	2,21	4,02	2,32	5,99

A princípio, fica evidente que o aumento tanto da velocidade de corte como do avanço acarreta redução no tempo de vida das ferramentas. Isto se deve, respectivamente, ao fato da maior geração de calor promovida pela maior velocidade de corte e pelo aumento da área da seção de corte com a utilização de maiores avanços (MACHADO et al., 2015).

Na Tabela 4.8, com os resultados para a velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanço de corte $f_z = 0,1$ (mm/dente) e ferramenta com geometria tipo (A), nota-se que quando se usinou as “barras com furos” comparadas com a usinagem das “barras sem furos” do mesmo material a maior redução no tempo de usinagem de corte (vida da ferramenta) foi no fresamento do FC300 _(Mo+RG) (57,94% menor), seguido do FV450 (54,64% menor), ficando o FC250 com a menor diferença (47,94%). Para a ferramenta de corte com geometria do tipo (B), respeitando os mesmos parâmetros de corte, a maior diferença no tempo de usinagem ocorreu no fresamento da liga FV 450 (69,01% menor) e a menor diferença na usinagem do FC300 _(Mo).

Os resultados utilizando-se um valor do avanço $f_z = 0,2$ (mm/dente) com uma velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min), conforme visto na Tab.4.9, indicam que a maior diferença de tempo de usinagem (vida da ferramenta) obtido utilizando a ferramenta de geometria tipo (A), comparando o fresamento de “barras com furos” e “barras sem furos” na superfície foi na usinagem da liga FC300 _(Mo+RG) (67,76%), enquanto que a menor diferença na usinagem foi observada para a liga FC 250 (47,10%).

Para a ferramenta de geometria tipo (B) as maiores reduções no tempo de usinagem, quando comparado o fresamento das “barras com furo” com as “barras sem furos”, ficaram com a

liga de FC300_(Mo+RG) (77,38%), seguido do FV450 (74,18%) e a menor diferença no fresamento do FC 250 (50,41%).

Desta forma, comprova-se que a condição mais crítica encontrada foi a usinagem das superfícies com os furos com as ferramentas de geometria tipo (B), com redução do tempo de vida das ferramentas entre 50 a 65%, dependendo do material, quando comparada com a ferramenta de geometria tipo (A). Observa-se também uma maior dificuldade na usinagem das ligas de ferros fundidos FV450, seguida da FC300_(Mo+RG), em relação às demais ligas. Assim de acordo com a literatura para usinagem dos ferros fundidos, a sua usinabilidade é diretamente influenciada pela microestrutura da liga (ASM, 1989).

Para as análises de variância (ANOVA) referentes os testes realizados, utilizou-se o software Matlab[®] com intervalo de confiança de 95% e nível de significância de 5%. A variável dependente (resposta) é, em primeira instância, o tempo vida da ferramenta, ou seja, neste caso é a medida do comprimento do desgaste de flanco (VB_{Bmax}) pré-estabelecido na aresta principal de corte, e em segunda instância a rugosidade (R_a) e as variáveis independentes são a velocidade de corte, avanço de corte, geometria das ferramentas e o tipo de material usinado.

Na Tabela 4.10 é apresentado o resultado da análise de variância para a liga de ferro fundido FC300_(Mo+RG). Esta análise tende a expressar uma visão global em termos de tendência da vida da ferramenta relacionada em função do tempo de corte, das variáveis utilizadas e o tipo de material.

Observa-se maior influência para a velocidade de corte, sendo mais significativo para o caso em que se usou maior avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente). O resultado condiz com a teoria que mostra que a medida em que se aumenta a velocidade de corte o tempo de usinagem diminui, e o desgaste da aresta se acelera significativamente, e esta deve ser repostada mais frequentemente.

Tabela 4.10 – Resultado da análise de variância (ANOVA) tempo vida da ferramenta.

<i>Análise de Variância (FC300_(Mo+RG) / VB_{Bmax})</i>					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-p</i>
f_z (mm/dente)	0,070600026	7	0,010085718	1,505973	0,234611
v_c (m/min)	0,047546799	1	0,047546799	7,099561	0,01696
Geometria da ferramenta	0,193027057	7	0,027575294	4,117469	0,009062
Erro	0,107154336	16	0,006697146		
Total	0,418328218	31			

De acordo com Trent (2000) a velocidade de corte tem uma grande influência sobre a o tempo de vida da ferramenta de usinagem comparando-se com o avanço e profundidade de usinagem, de forma que ela influencia significativamente a economia do processo como um todo.

Para confirmar estatisticamente a diferença entre os materiais, foi realizada uma análise de variância com intervalo de confiança de 95 % e nível de significância de 5 %. Na Tabela. 4.11 são demonstrados os resultados para a análise de variância (ANOVA) do tempo vida da ferramenta para as demais ligas em comparação à liga FC 300 $(Mo+RG)$, utilizando os mesmos parâmetros de corte. Para esta análise de variância não foi feito nenhum tipo de ajuste no modelo matemático feita pela análise de variância.

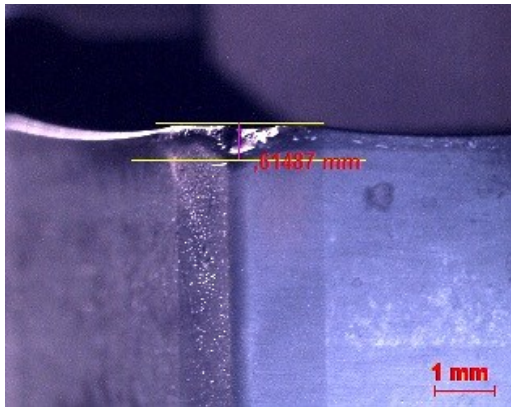
Pelo nível de probabilidade (p) é possível verificar se serão significativas as variações de velocidade de corte e avanço, tipo de liga usinada em relação ao tempo de vida da ferramenta de corte adotando para o critério de fim de vida de $VB_{Bmax} = 0,4$ (mm). Para que um fator seja considerado significativo à probabilidade (p) deve ser menor ou igual ao nível de significância (neste caso considerado de 0,05%). Vale ressaltar que, quanto menor o valor de “ p ”, mais relevante é a variável.

Tabela 4.11 – Resultado da análise de variância (ANOVA) em função do tempo vida da ferramenta para as demais liga de ferros fundidos.

Ligas de Ferro fundido	Nível de Probabilidade (p)
FC250	0,0315
FC300 (Mo)	0,0276
FV450	0,0192

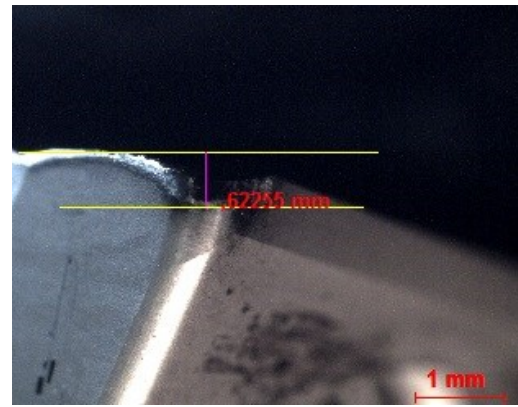
A progressão dos desgastes nas ferramentas foi verificada no decorrer dos testes através do microscópio ferramenteiro, e no geral estão apresentadas nas imagens das Figuras 4.26 (a) a (h) que abrange os valores de desgaste para as duas geometrias de ferramentas utilizando velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente).

Geometria (A)

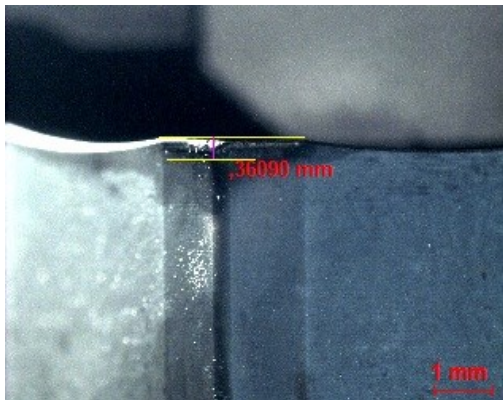


(a) FV450

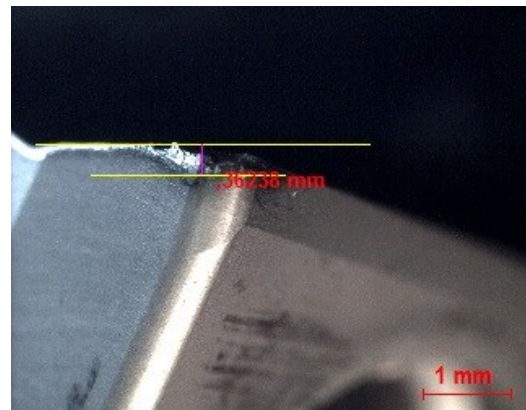
Geometria (B)



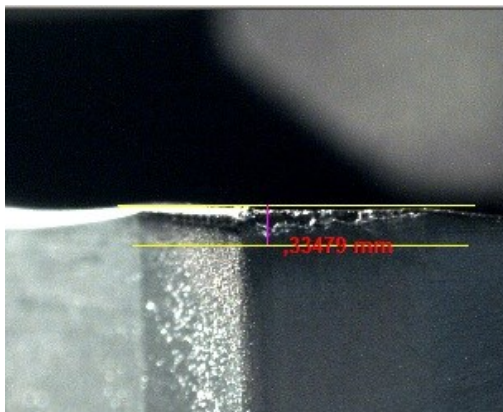
(b) FV450



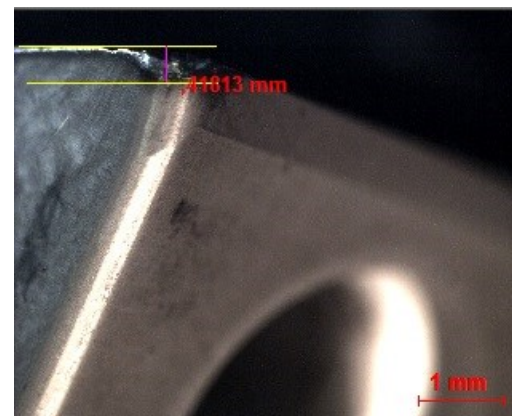
(c) FC250



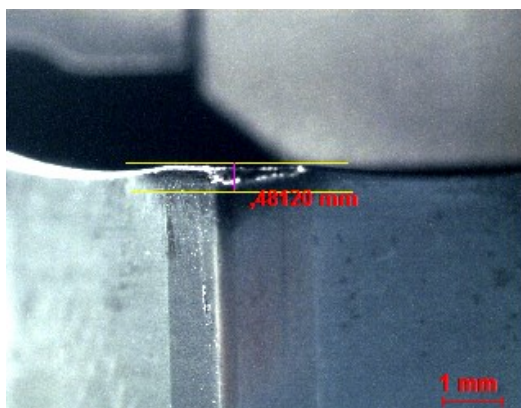
(d) FC250



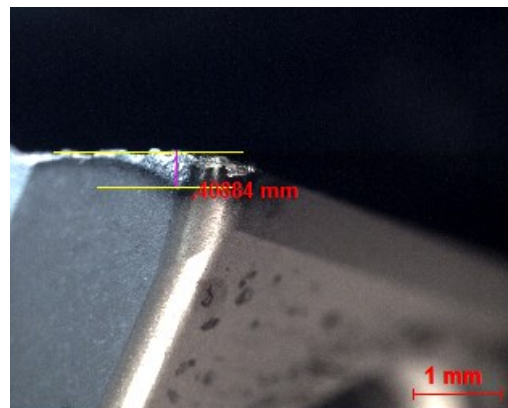
(e) FC300 (Mo)



(f) FC300 (Mo)



(g) FC 300 (Mo+RG)

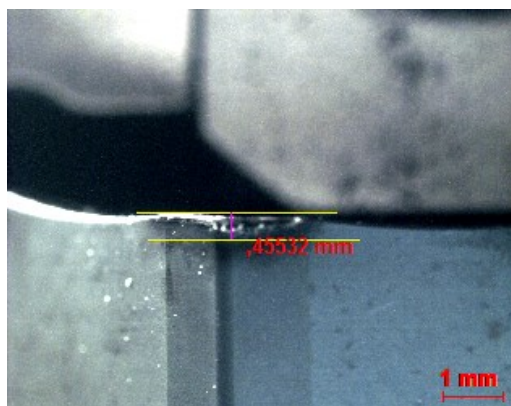


(h) FC 300 (Mo+RG)

Figura 4.26 - Arestas de corte das ferramentas utilizando velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente): a) geometria A (FV 450); b) geometria B (FV 450); c) geometria A (FC 250); d) geometria B (FC250); e) geometria A (FC300 (Mo)); f) geometria B (FC300 (Mo)); g) geometria A (FC300 (Mo+ RG)); h) geometria B (FC300 (Mo+RG));

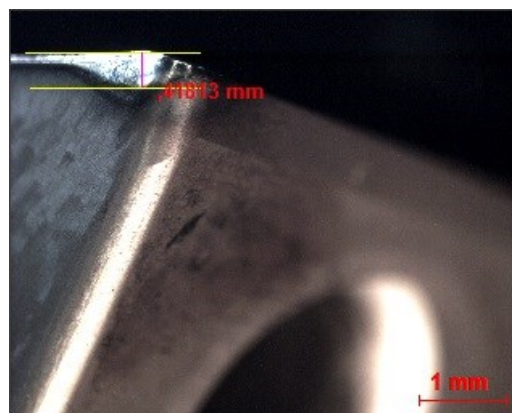
Nas Figuras 4.27 (a) a (h) são apresentadas as imagens das arestas de corte dos insertos de metal duro de geometria (A) e (B) empregados na usinagem dos ferros fundidos com velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente).

Geometria (A)

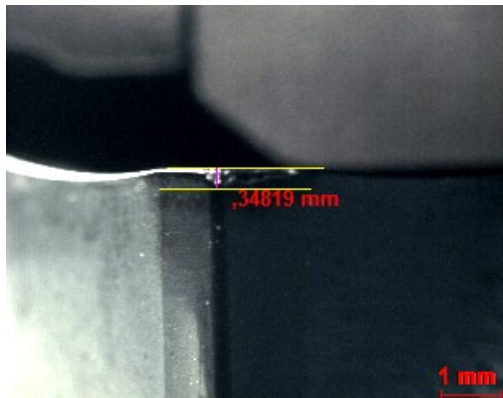


(a) FV450

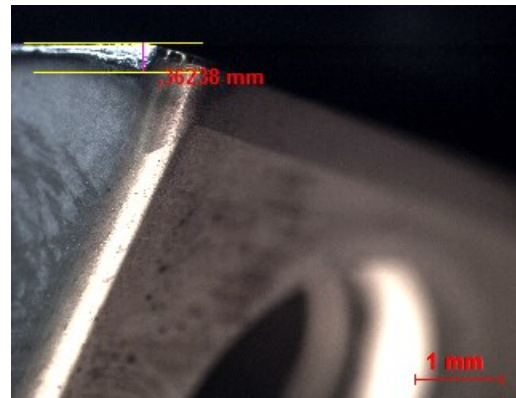
Geometria (B)



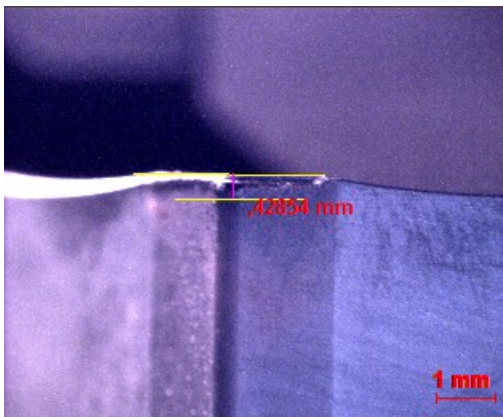
(b) FV450



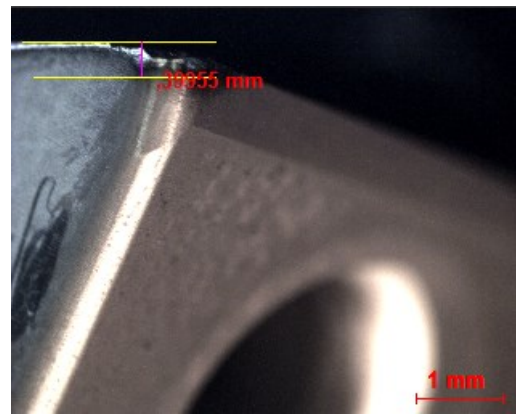
(c) FC250



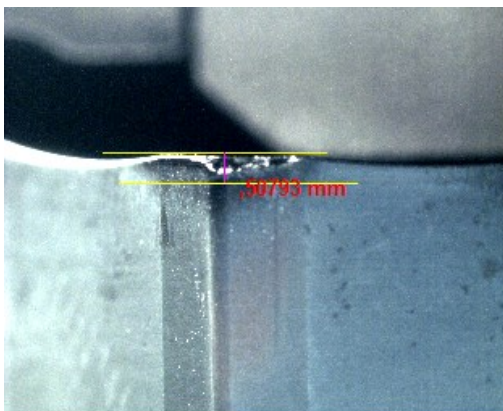
(d) FC250



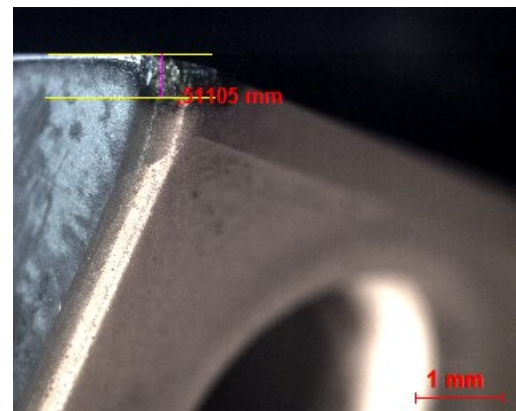
(e) FC300 (Mo)



(f) FC300 (Mo)



(g) FC 300 (Mo+RG)



(h) FC 300 (Mo+RG)

Figura 4.27 - Arestas de corte das ferramentas utilizando velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente): a) geometria A (FV 450); b) geometria B (FV 450); c) geometria A (FC 250); d) geometria B (FC250); e) geometria A (FC300 (Mo)); f) geometria B (FC300 (Mo)); g) geometria A (FC300 (Mo+ RG)); h) geometria B (FC300 (Mo+RG)).

Através das análises nas figuras 4.26 e 4.27 nota-se que ferramenta de geometria (A) pode ser considerada a melhor ferramenta na usinagem dentre as ligas de ferros fundidos usinadas. Já a ferramenta de geometria (B) não mostrou resultados muito expressivos principalmente na usinagem das ligas FV 450 e FC300 _(Mo+RG). O desgaste ocorrido nas ferramentas é semelhante ao encontrado por Xavier (2003), que na usinagem de ferro fundido vermicular também observou o mecanismo de desgaste como abrasão, porém em menor intensidade.

Para analisar os mecanismos de desgaste da ferramenta, utilizou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), que evidenciaram, para esta condição de corte, a adesão (*attrition*) e lascamento como causas predominantes de desgastes para os quatro ligas de ferros fundidos, além da análise por Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS) para a verificação dos elementos químicos presentes na região desgastada da ferramenta em diferentes ampliações.

Nas Figuras 4.28 (a) a (d) são apresentadas as imagens do desgaste das ferramentas com geometria (A) e velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente) obtidas no (MEV).

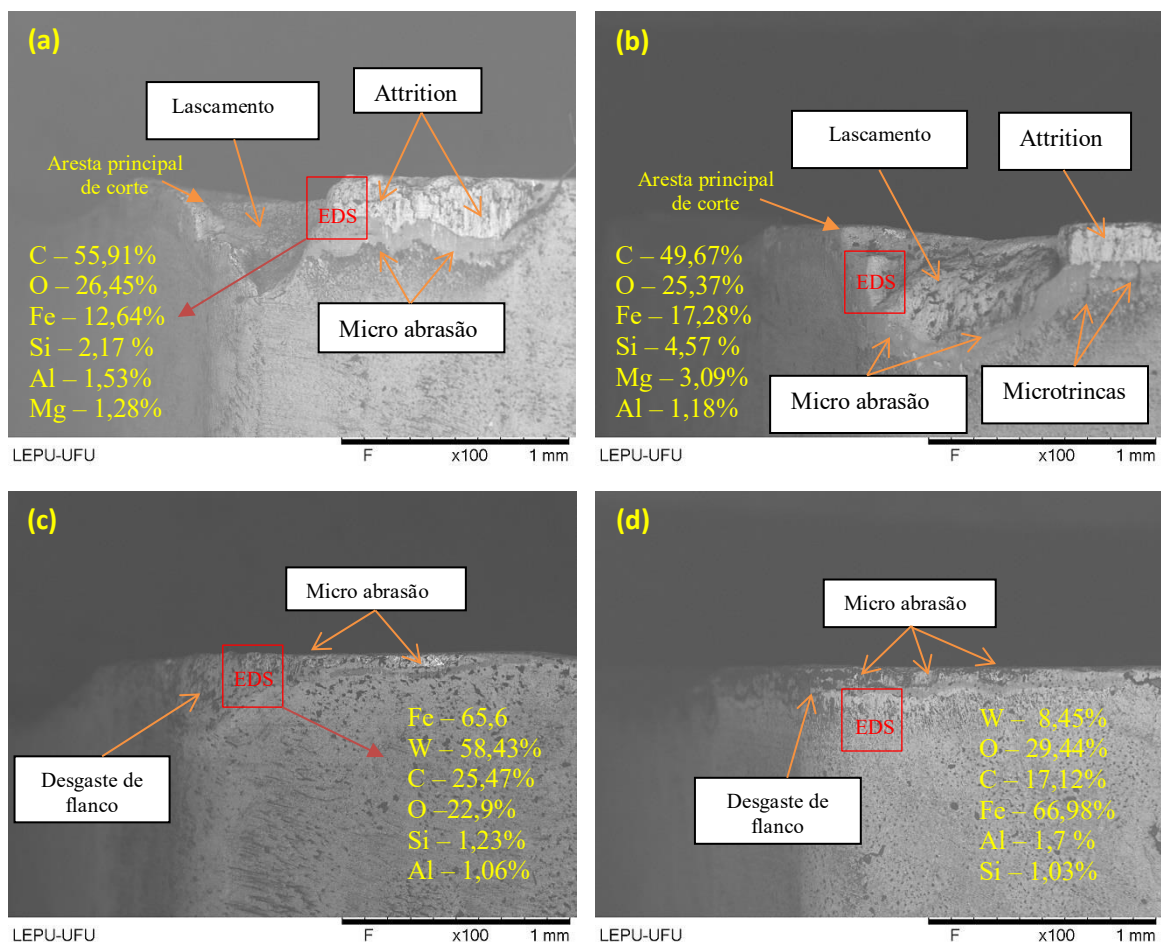


Figura 4.28 - Arestas de corte das ferramentas de geometria (A) utilizando velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente): a) FV 450; b) FC 300 (Mo+RG); c) FC 300 (Mo); d) FC 250.

As imagens dos insertos utilizados na usinagem das ligas FV 450, FC 300 (Mo+RG) e o FC 300 (Mo) apresentaram um desgaste severo com lascamentos e perda de substrato na aresta de corte, além da adesão de elementos do material em análise. O inserto de metal duro de geometria (A) utilizada na usinagem do FC 300 (Mo+RG) apresentou microsulcos na superfície desgastada do flanco, que são característicos do mecanismo de desgaste abrasivo. Nas Figuras 4.28 (a) e (b) observa-se que o desgaste atingiu o substrato da ferramenta em grande parte da aresta de corte de forma agressiva.

Para o inserto de metal duro utilizado na liga FV 450 o mesmo apresentou sulcos na superfície desgastada do flanco, podendo ter ocorrido devido à remoção de partículas duras do

ferro fundido em estudo ou até mesmo do próprio inserto. Essas partículas duras seriam capazes de riscar a superfície da ferramenta e remover a camada depositada sobre a ferramenta, desgaste por abrasão (XAVIER, 2009; FERRER, 2006). Além disso, percebeu-se que o *attrition* foi o mecanismo gerador do desgaste na ferramenta. Assim como no FV 450, o ferro fundido cinzento FC 300 (Mo+RG) também apresentou um maior desgaste de flanco se comparado as ligas FC 300 (Mo) e FC 250.

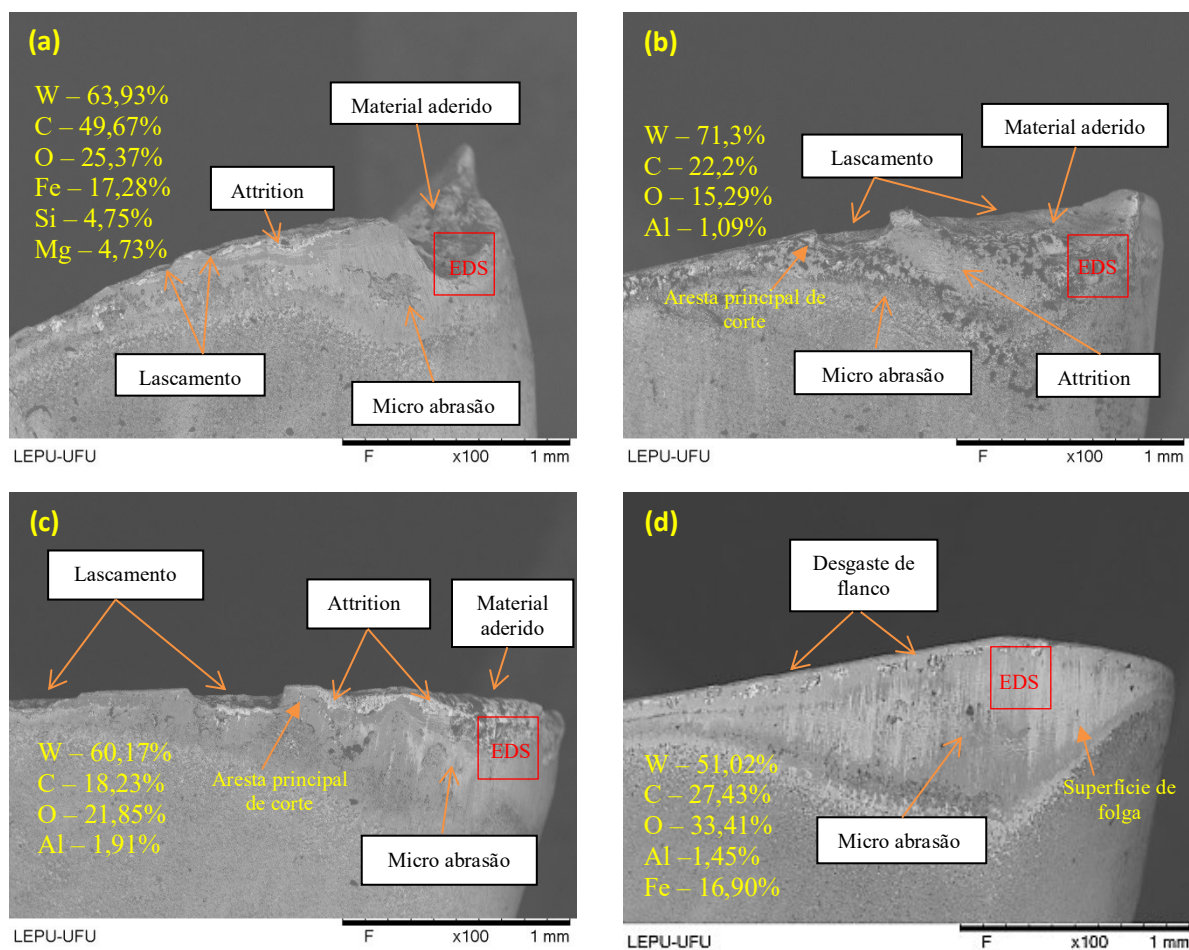


Figura 4.29 - Arestas de corte das ferramentas de geometria (B) utilizando velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente): a) FV 450 ; b) FC 300 (Mo+RG); c) FC 300 (Mo); d) FC 250.

Nas Figuras 4.29 (a) a (d) observam-se as imagens de desgaste das ferramentas com geometria (B), utilizando velocidade de corte $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,2$

(mm/dente) obtidas com o auxílio do (MEV), para as diferentes classes de ferros fundidos. Nota-se que, de modo análogo, assim como nas figuras apresentadas das arestas de corte com geometria (A), pode-se dizer que os desgastes são semelhantes, tendo em vista que, as ferramentas utilizadas nos ferros fundidos da classe FV 450 sempre alcançaram maiores taxas de desgaste, seguidas das classes FC 300_(Mo+RG) e FC 300_(Mo) atingindo-se taxas de desgastes considerados intermediárias, ficando a classe FC 250 com os menores valores observados.

Percebe-se que, quando utilizou a $(v_c) = 350$ (m/min) para as classes de ferro fundido FV450 e FC 300_(Mo+RG), as ferramentas apresentam um elevado processo de desgaste. Neste caso as ferramentas chegaram a uma condição severa, perdendo parte do material da aresta principal de corte durante o processo de usinagem, por lascamentos. No caso do ferro fundido FV450 e FC 300_(Mo+RG), a alta resistência mecânica e elevada dureza destas ligas também contribuíram para acelerar o processo de degradação das ferramentas, há também outro fator que pode ter contribuído negativamente para o alto valor de desgaste, que é a menor condutividade térmica do FV 450 quando comparada aos demais usinados

Nas Figuras 4.30 e 4.31 (a) a (d) estão apresentadas as imagens das arestas de corte das ferramentas de geometria (A) e (B) respectivamente empregadas na usinagem dos ferros fundidos com velocidade de corte igual $(v_c) = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente). Nesta condição as vidas das ferramentas de corte foram bem superiores (tempos maiores), o que implica em uma taxa de desgaste bem inferior, e um processo de destruição da aresta de corte mais ameno que na maior velocidade de corte de 350 (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente).

Apesar de um desgaste aparentemente menos agressivo, houve também micro lascamentos na ferramenta, atribuídos às solicitações térmicas que ultrapassaram o limite de resistência à tração da ferramenta na usinagem dos ferros fundidos FV 450, FC 300_(Mo+RG) e FC 300_(Mo).

A partir da análise das Figuras 4.30 (c) a (d) é possível notar que a morfologia do desgaste é bastante semelhante, para os insertos utilizados nas ligas de FC250 e FC 300_(Mo), além da análise das imagens na caracterização do desgaste sofrido pelas ferramentas.

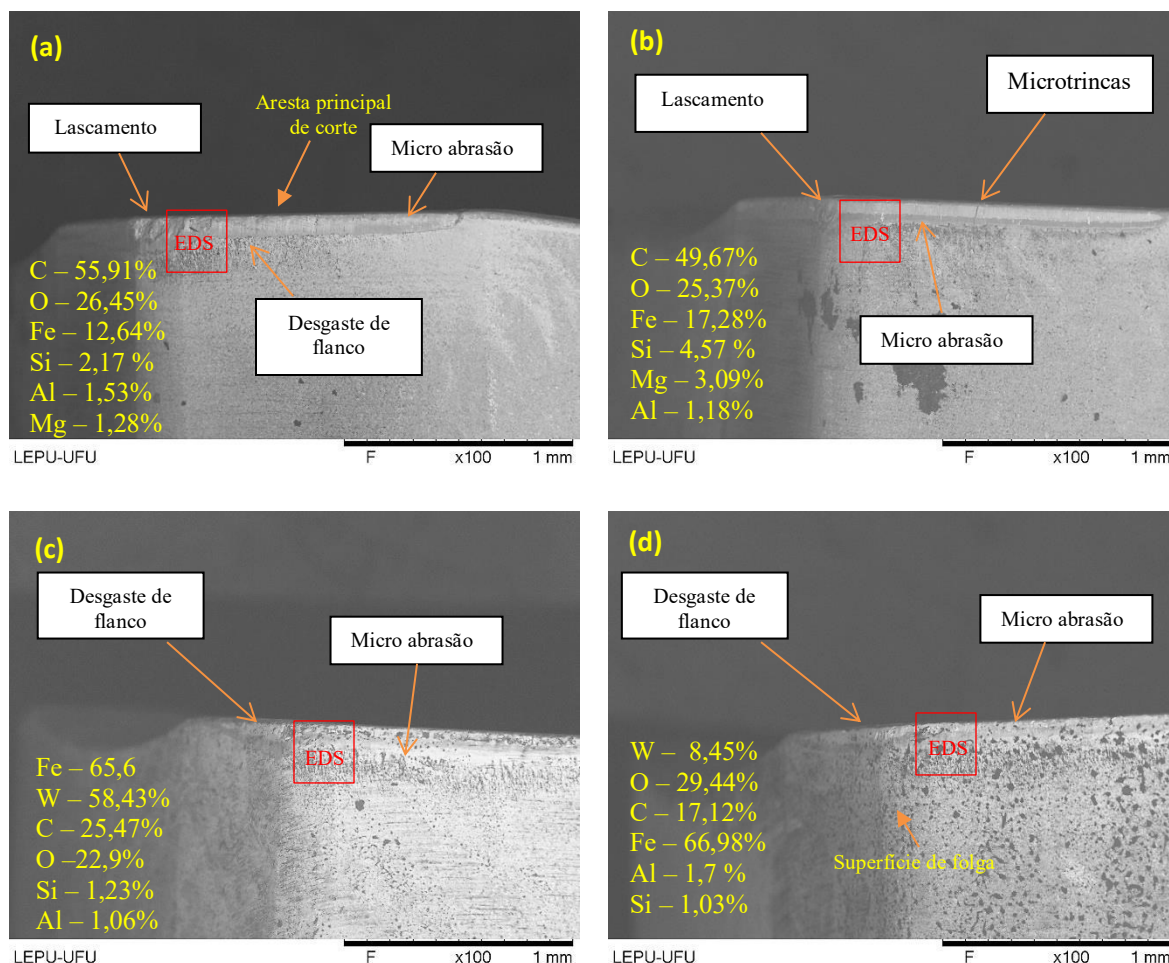


Figura 4.30 - Arestas de corte das ferramentas de geometria (A) utilizando velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente): a) FV 450; b) FC 300 (Mo+RG) ; c) FC 300 (Mo) ; d) FC 250.

Os resultados oferecem estimativas razoáveis dos elementos químicos presentes nas superfícies analisadas e são indicativas de ter atingido o substrato e, portanto, um desgaste bastante agressivo, principalmente no ferro fundido vermicular, que possui maior dureza e resistência mecânica que os cinzentos e, portanto, é considerado mais difícil de usinar.

De acordo com Silva et al., (2015), este resultado evidencia a maior usinabilidade da liga de ferro cinzento da classe FC 250, que pelo o efeito de sua grafita lamelar, que facilita a propagação de trincas nos planos de cisalhamento, além da presença das partículas de sulfeto de manganês atuarem como lubrificantes na interface cavaco-ferramenta

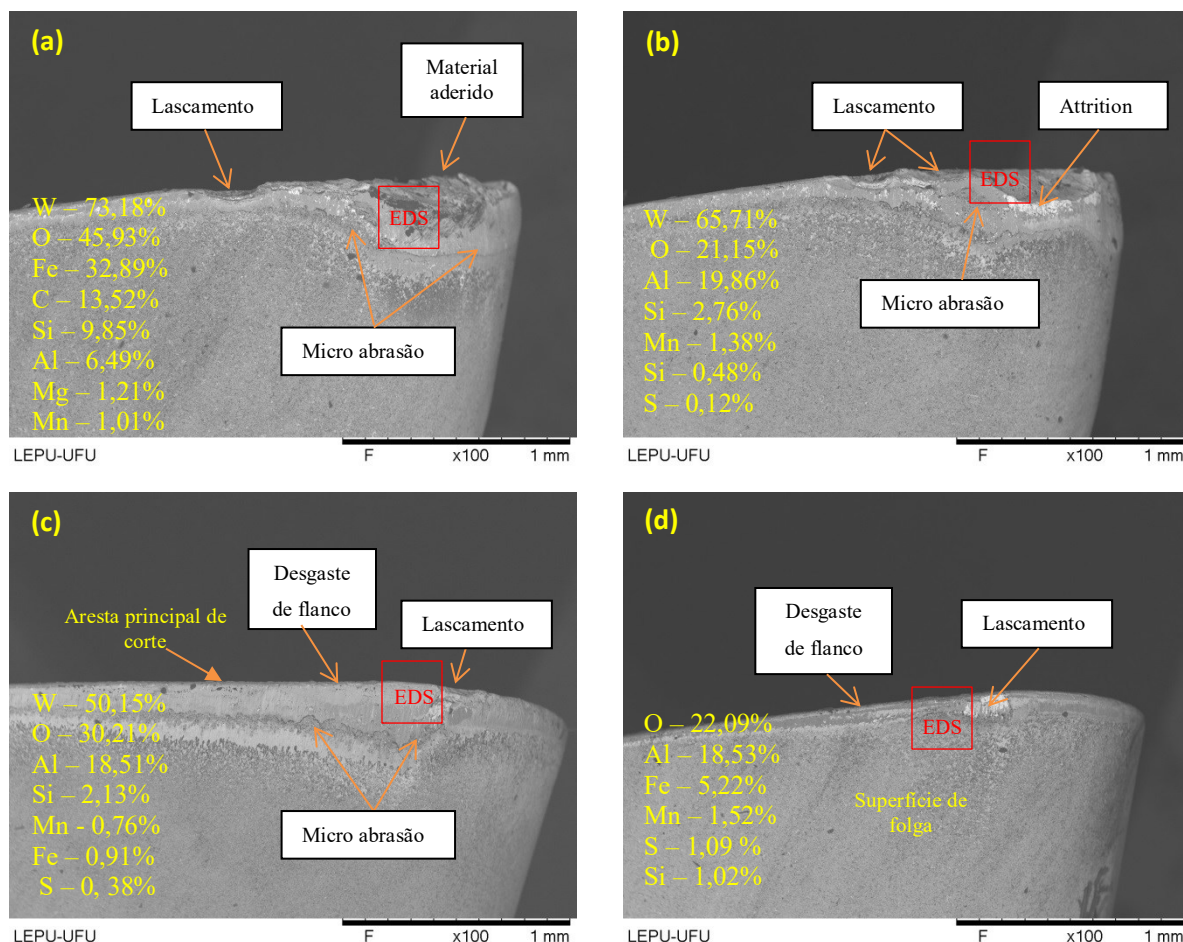


Figura 4.31 - Arestas de corte das ferramentas de geometria (B) utilizando velocidade de corte $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ (mm/dente): a) FV 450; b) FC 300 _(Mo+RG); c) FC 300 _(Mo) ; d) FC 250.

Em contrapartida, a maior resistência mecânica, juntamente com a morfologia da grafita vermicular, que restringe a propagação de trincas, influenciou na maior taxa de desgaste (VB_{Bmax}) para o FV450, sendo o material a apresentar a pior usinabilidade.

Segundo Dawson et al., (2004), que dizem que o aumento da nodularização da grafita na microestrutura do ferro fundido vermicular aumenta a resistência à tração e rigidez, diminuindo a usinabilidade e a condutividade térmica. Outro aspecto relevante também a ser levado em consideração refere-se à presença de oxigênio nas superfícies de folga desgastadas das ferramentas. A presença dele indica que nesta região houve a penetração do ar atmosférico e possível formação de óxidos, que se aderem na superfície da ferramenta e, posteriormente, são

arrancados pelo fluxo de material da peça, interagindo, portanto, no sistema tribológico, para promover o desgaste durante o processo de fresamento (REUTER, 2001).

Quanto às diferenças de usinabilidade entre as ligas, observa-se que ambas as geometrias de ferramentas de corte apresentaram menor desgaste de flanco em todos os ensaios na usinagem na liga de ferro fundido FC 250.

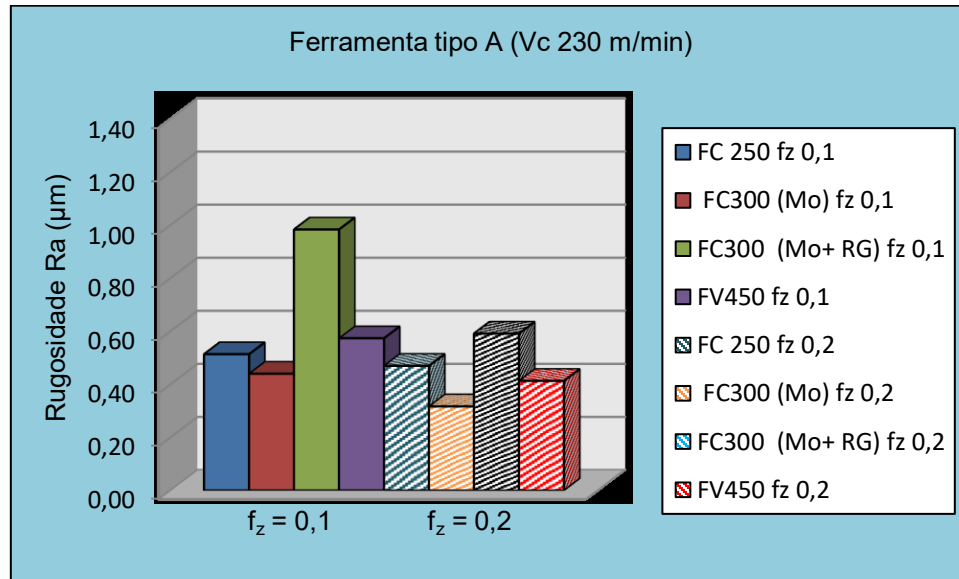
De acordo com Bagetti (2009) isso ocorre em virtude do alto teor de carbono associado ao menor número de células eutéticas, maior percentual de grafitas grandes e com dureza mais baixa deste material.

De um modo geral, os mecanismos de desgastes predominantes são *attrition*, micro abrasão e micro lascamento da aresta de corte, independente da ferramenta utilizada, das condições de corte e do material usinado. Obviamente, estas variáveis apenas alteraram a taxa de desgaste, como apresentado nos resultados das curvas de vida.

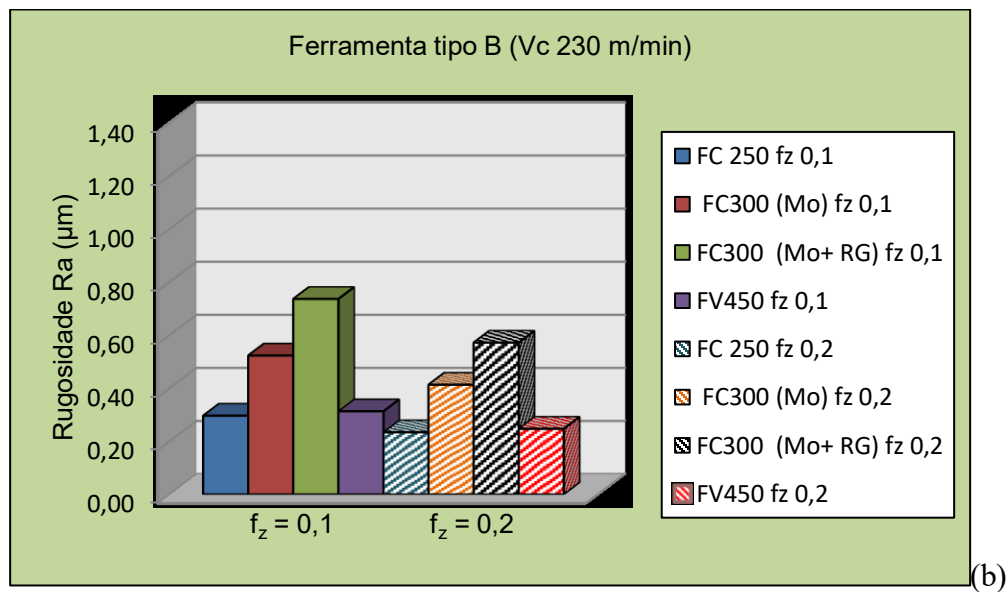
4.7 - Rugosidade superficial

As Figuras 4.32 a 4.37 apresentam os valores dos parâmetros de rugosidade superficial (R_a , R_q e R_z) obtidos no fresamento das diferentes classes de ferros fundidos, para as duas geometrias de ferramentas de corte utilizadas variando duas velocidades de corte $v_c = 350$ e 230 (m/min), alternando os avanços por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente). As medições foram realizadas sempre no primeiro passe usinado pela ferramenta de corte durante os ensaios, e em três posições distintas equidistantes sobre a superfície dos corpos de prova ao longo da primeira corrida, ou seja, estes resultados são referentes à primeira usinagem na superfície dos materiais sem influência do desgaste das ferramentas. Os pontos considerados foram no início, no meio e no final do passe.

Salienta-se que o tempo de uma passada varia de acordo com o avanço. Para a velocidade de corte de 230 m/min o tempo da passada para o menor avanço de $0,1$ mm/dente foi de $4'23''$ e para a velocidade de 350 m/min, $2'57''$. Para o maior avanço de $0,2$ mm/dente, esses tempos foram, obviamente, a metade. As medições foram feitas na direção de avanço para captar as influências das marcas deixadas pelo avanço da ferramenta e o *cut-off* do equipamento foi ajustado em $0,8$ mm.

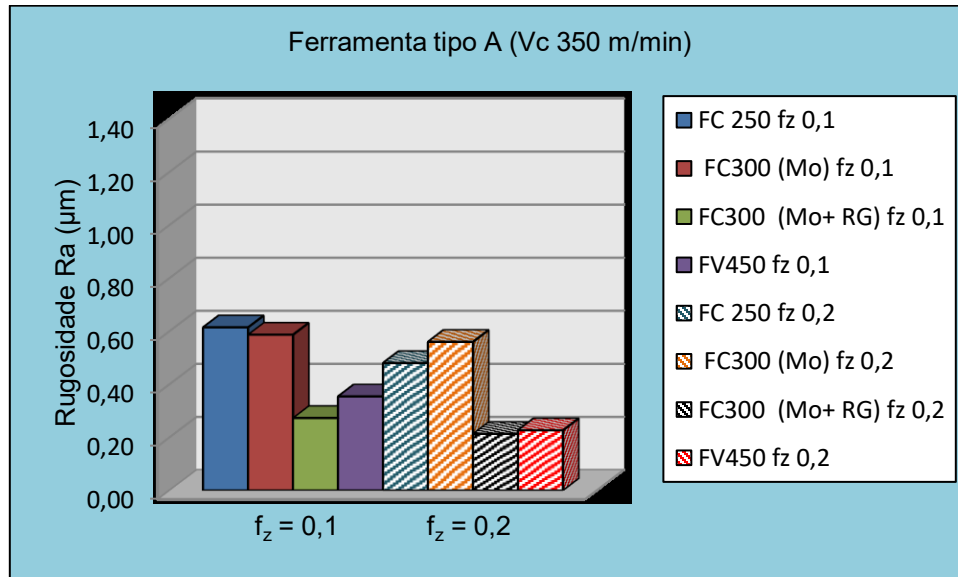


(a)

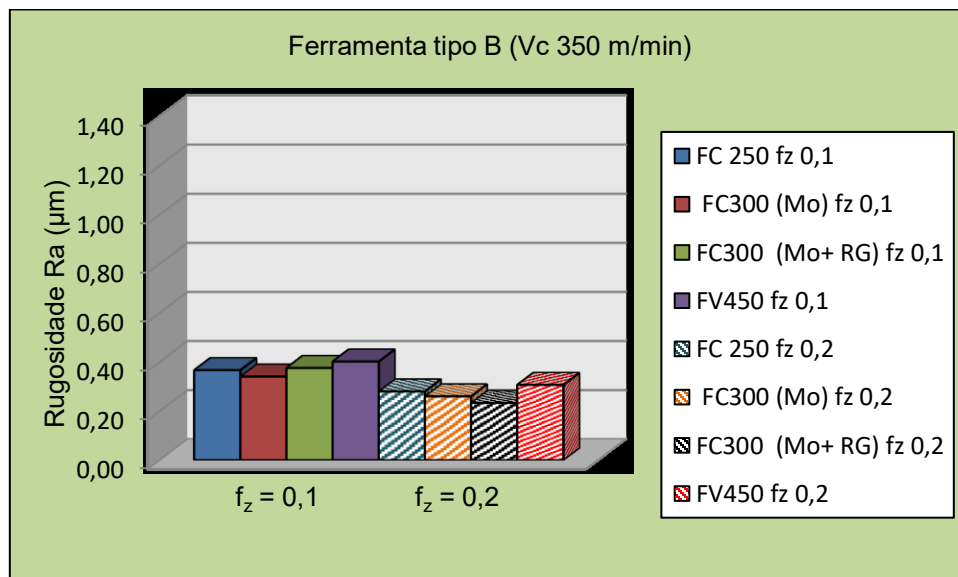


(b)

Figura 4.32 – Parâmetro de rugosidade superficial R_a para a velocidade de corte igual $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).

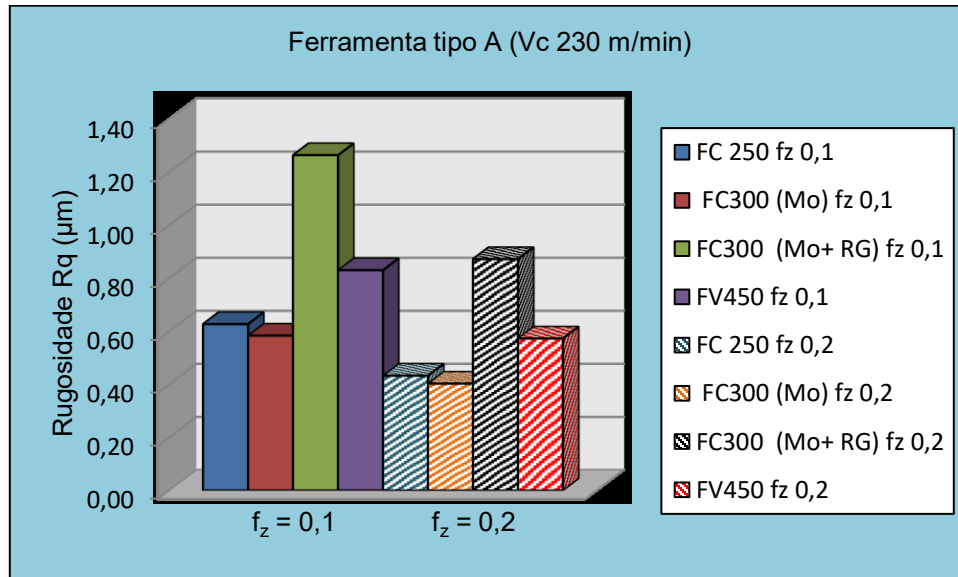


(a)

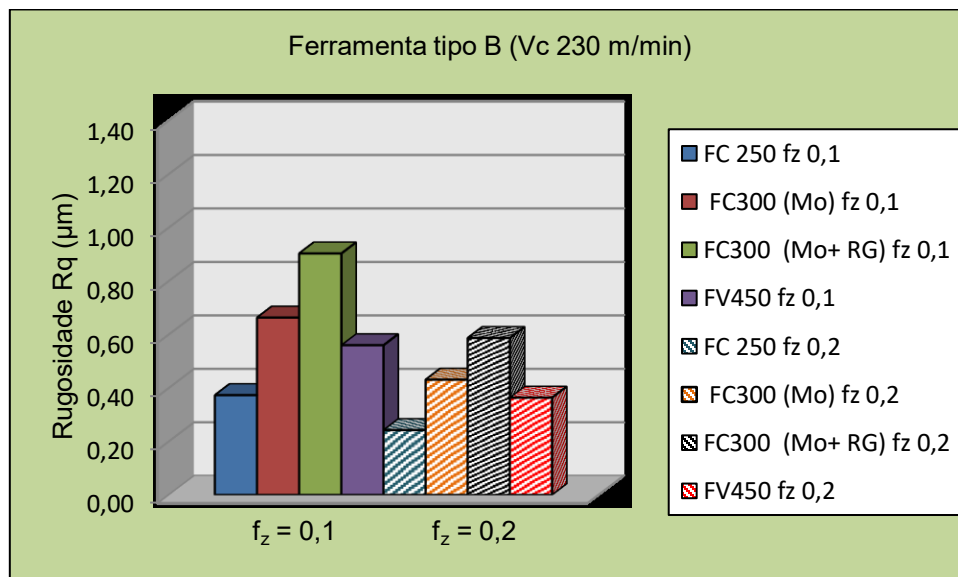


(b)

Figura 4.33 – Parâmetro de rugosidade superficial R_a para a velocidade de corte igual $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).

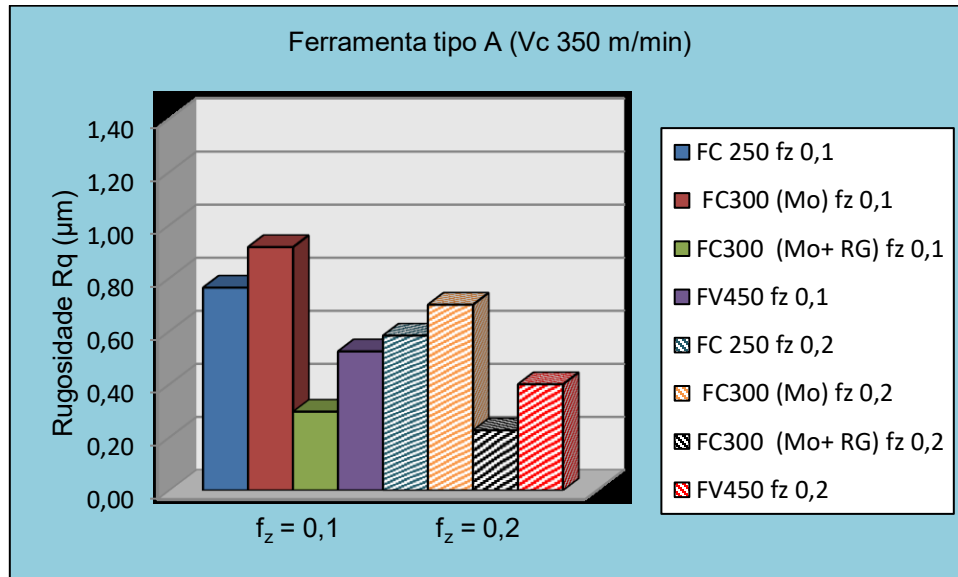


(a)

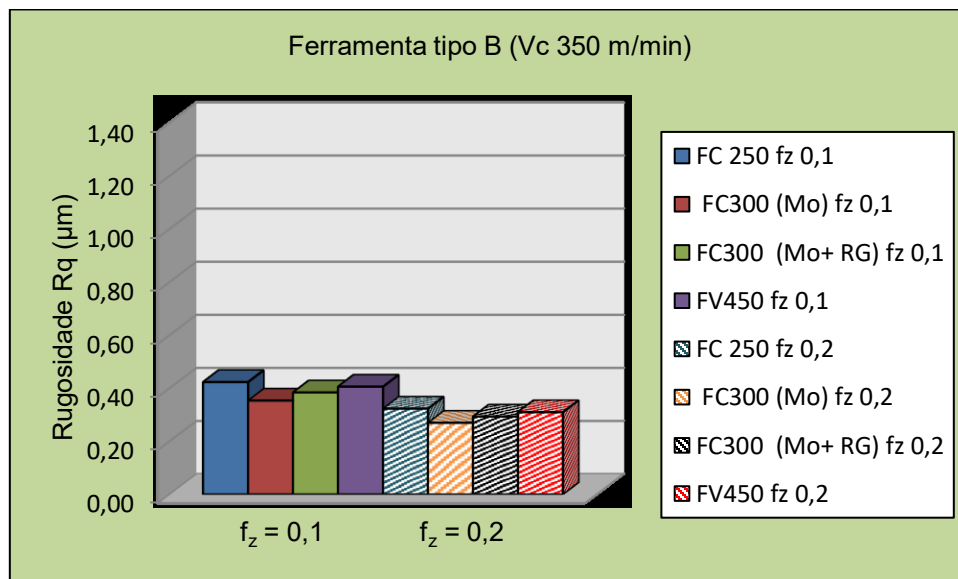


(b)

Figura 4.34 - Parâmetro de rugosidade superficial R_q para a velocidade de corte igual $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).

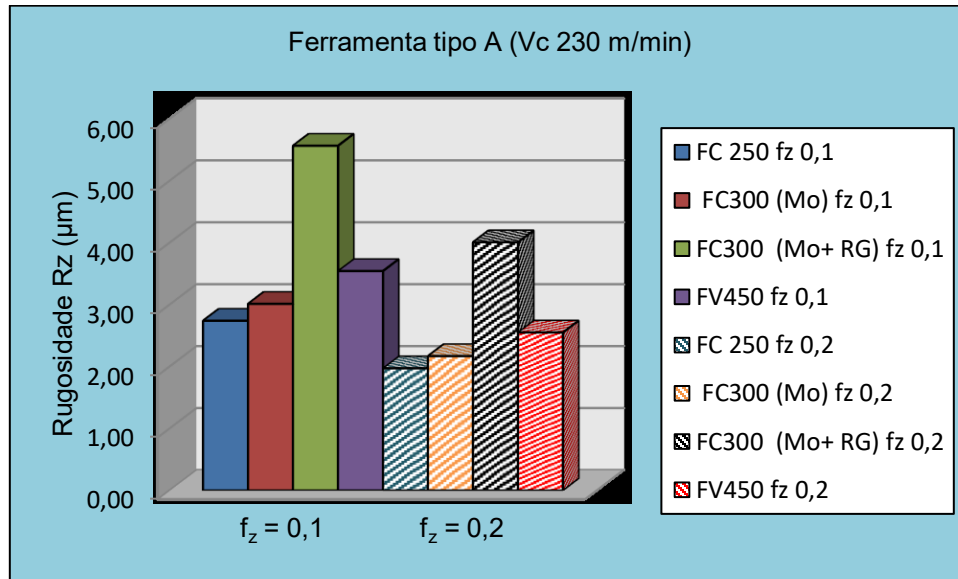


(a)

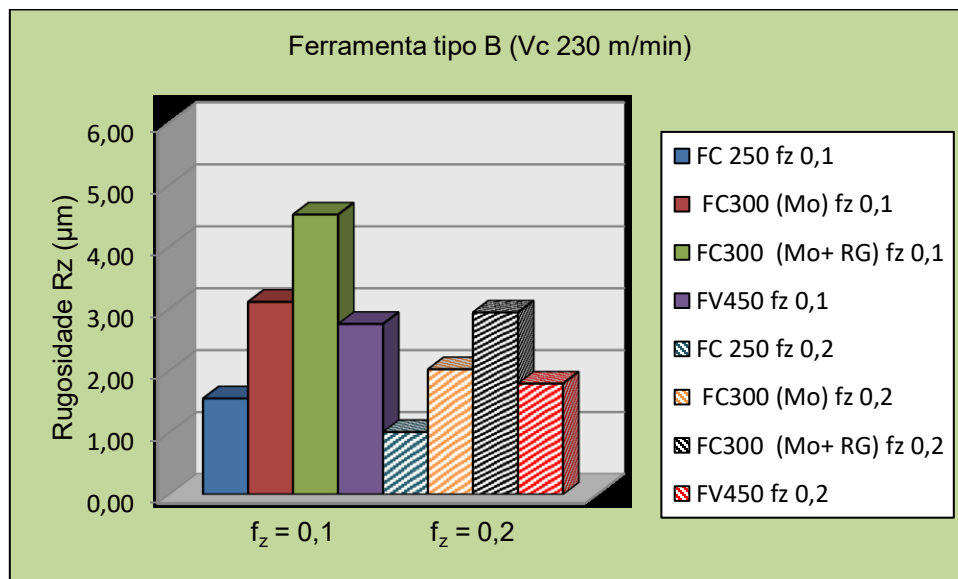


(b)

Figura 4.35 – Parâmetros de rugosidade superficial R_q para a velocidade de corte igual $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).

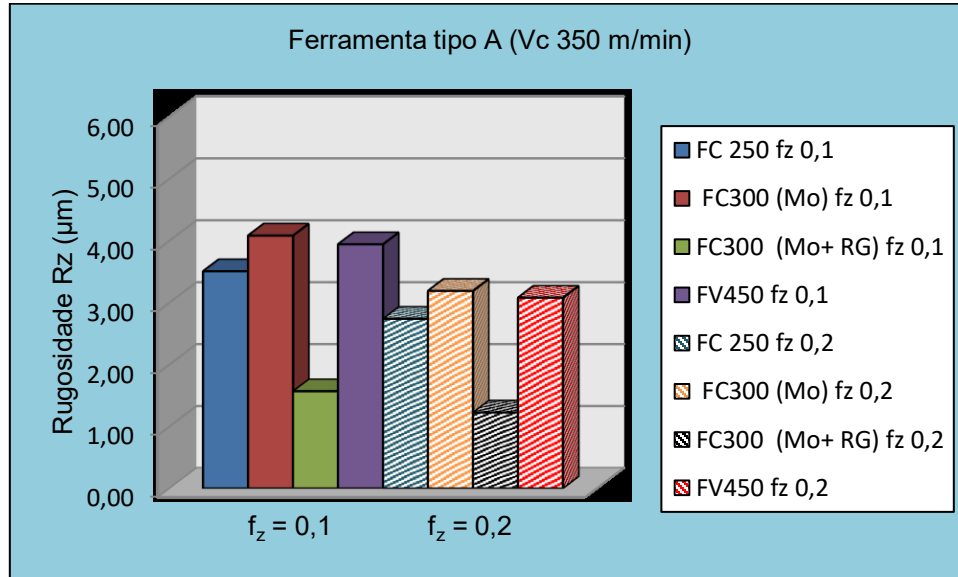


(a)

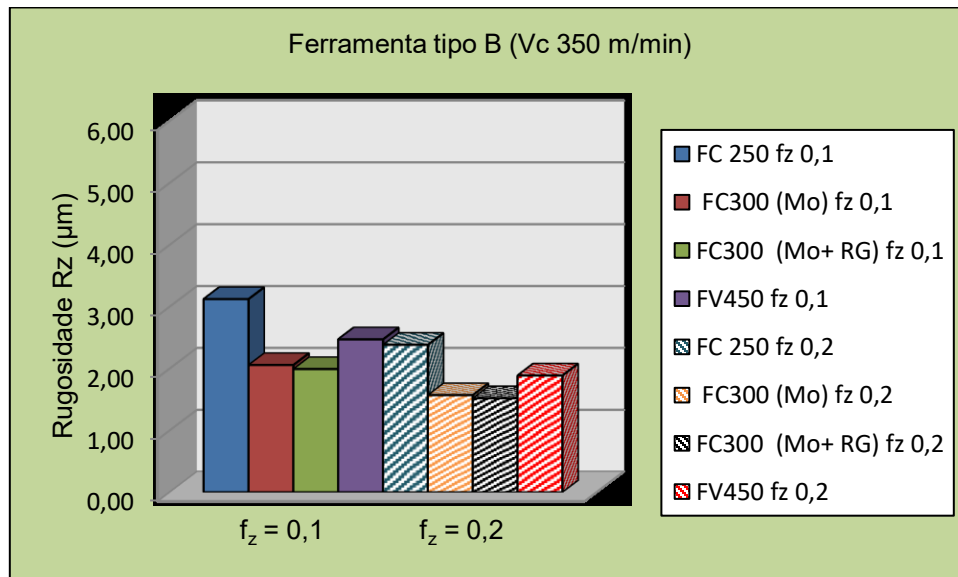


(b)

Figura 4.36 - Parâmetros de rugosidade superficial R_z para a velocidade de corte igual $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).



(a)



(b)

Figura 4.37 – Parâmetros de rugosidade superficial R_z para a velocidade de corte igual $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente); a) ferramenta de geometria (A); b) ferramenta de geometria (B).

Através dos gráficos de rugosidades, observa-se que há uma alternância na classificação dos materiais com relação à rugosidade. Verifica-se que para a ferramenta com geometria (A) e velocidade de corte de 230 (m/min), independentemente do avanço, a classe FC 300_(Mo) apresentou, de modo geral, os menores valores para o parâmetro de rugosidade (R_a), seguido da classe FV 450 e o material FC 300_(Mo+RG) o valor mais alto de acabamento superficial. Com a ferramenta de geometria (B), utilizando os mesmos parâmetros de corte, os menores valores de rugosidade foram obtidos com a liga FC250.

Para velocidade de corte de $v_c = 350$ (m/min) utilizando ferramenta de geometria (A), independentemente do avanço por dente, os menores valores de rugosidade (R_a) foram obtidos com a classe FC 300_(Mo+RG), seguida da classe FV450. Com a ferramenta de geometria (B) e avanço por dente de $f_z = 0,2$ (mm/dente) os menores valores de rugosidade foram obtidos com a classe FC 300_(Mo+RG), seguido da classe FV450.

Pode ser observado nos gráficos que os três parâmetros de rugosidade adotados (R_a , R_q e R_z) também apresentaram tendência definida conforme o aumento da velocidade de corte e do avanço, sendo semelhantes para as quatro classes de materiais.

De acordo com Guenza (2008), na prática, porém, o acabamento superficial é ainda influenciado pela geometria e desgaste da ferramenta, pelo ângulo de saída e rigidez de fixação tanto da ferramenta de corte e também quanto da fixação do corpo de prova. Além das questões relativas à geometria de corte o acabamento superficial é influenciado pela velocidade de corte, além do avanço. Mantidas as demais condições de trabalho, maiores velocidades de corte tendem a produzir melhor qualidade superficial (OLIVEIRA et al., 2003).

Segundo Stemmer (2005), o avanço de corte é também uma variável que influencia diretamente o valor da rugosidade teórica, pois quanto menor o avanço, menor tende a serem as marcas deixadas na superfície da peça pela passagem da ferramenta.

Ao final das corridas os valores de rugosidade mostram uma diminuição quando utilizadas as ferramentas de geometria (B) isto, provavelmente devido ao seu maior raio de ponta e maior comprimento da aresta alisadora, pois, este raio, deve ser suficientemente grande para diminuir o efeito das marcas de avanço, com apreciável melhora na rugosidade o que gerou, pelo menos no início de vida da ferramenta, menores valores em relação a acabamento superficial.

Assim, a qualidade das superfícies e os resultados aqui encontrados indicam que o FC 300_(Mo+RG) e o FV 450 obtiveram melhores resultados de rugosidade, fato que pode ser justificado, de

acordo com Machado et al., (2015), devido às melhores propriedades mecânicas destes materiais, de forma que quanto maior a dureza do material, com fina granulação e alta dureza dos seus microconstituintes tende a ser melhor o acabamento superficial.

Para confirmar estatisticamente a diferença entre os materiais, foram realizados à análise de variância (ANOVA) para rugosidade (R_a), os dados foram obtidos utilizando intervalo de confiança de 95 % e nível de significância de 5 %, com o uso de software Matlab®.

Na avaliação da rugosidade (R_a) verifica-se uma maior influência atribuída ao avanço, geometria da ferramenta no conjunto com a velocidade de corte, considerando o menor valor encontrado para (p), indicando que são variáveis significativas no processo.

Para a avaliação do desgaste, nota-se na tab.4.12 uma interação entre os três parâmetros envolvidos: avanço, velocidade de corte e geometria da ferramenta, o que reflete nos resultados obtidos. Na Tabela 4.12 são mostrados os resultados da análise para rugosidade (R_a).

Tabela 4.12 – Resultado da análise de variância para rugosidade (R_a) liga FC 300 (Mo).

<i>Análise de Variância FC300 (Mo)</i>					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-p</i>
f_z (mm/dente)	0,075115214	7	0,010730745	0,975543	0,481276
v_c (m/min)	0,23826062	7	0,034037231	3,094358	0,029053
Geometria da ferramenta	0,055568612	1	0,055568612	5,051797	0,039055
Erro	0,175996336	16	0,010999771		
Total	0,544940781	31			

Através dos resultados expostos na tab. 4.12 observa-se maior influência estatística para a geometria da ferramenta de corte, seguido pela variação de velocidade de corte (v_c) utilizada, sendo mais significativo para o caso em que se usou a ferramenta de geometria (B) para o maior valor de avanço $f_z = 0,2$ (mm/dente). O resultado demonstra que para a liga de ferro fundido FC 300 (Mo) obteve resultados significativos, principalmente em relação à geometria de ferramentas, ficando as demais liga com valores obtidos abaixo do nível de significância de 5 % adotado. Na tabela 4.13 são apresentados os valores obtidos para as demais ligas com os níveis de significância.

Tabela 4.13 – Resultado da análise de variância para rugosidade (R_a) das demais ligas.

Ligas de Ferro fundido	Nível de Probabilidade (p)
FC 250	0,04153
FC 300 (Mo+RG)	0,03451
FV 450	0,02278

Segundo Hübner et al., (2014) ao selecionar os parâmetros de entrada para se otimizar a rugosidade (R_a) gerada na superfície fresada, é importante analisar cuidadosamente certos fatores tais como, o posicionamento irregular das pastilhas no cabeçote fresador, tolerâncias das pastilhas, folga no eixo árvore etc, visto que a combinação desses pode resultar em uma diferença da rugosidade para os valores de avanços (f_z) utilizados, mesmo sendo os avanços inferiores ao comprimento da aresta alisadora.

Através dos resultados da ANOVA tem-se a possibilidade de optar pelos parâmetros de usinagem a fim de que se determine a rugosidade desejada, vida da ferramenta e aumente a viabilidade do processo de fabricação.

A seguir estão apresentados os resumos comparativos dos resultados finais para cada material versus cada parâmetro de saída avaliado, indicando o melhor e pior em termos de usinabilidade. Os seguintes conceitos foram utilizados para a classificação dos parâmetros de saída avaliados: 1 = (Melhor); 2 = (Bom); 3 = (Regular); 4 = (Pior).

Tabela 4.14 . Resumo comparativo dos resultados finais para cada material versus cada parâmetro de saída avaliado, quando foi utilizado a velocidade de corte igual $v_c = 230$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente).

Material	Geometria ferramenta	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	Potencia motor (W)	Temperatura (C°)	Tempo de usinagem (min)	Mecanismo de desgaste	Rugosidade (μm)		
								Ra	Rq	Rz
FC 250	(A)	230	0,1	1	1	1	Desgaste de flanco/ Micro abrasão	2	4	1
	(B)	230	0,1	1	1	1	Desgaste de flanco/ Lascamento	1	1	1
	(A)	230	0,2	1	1	1	Desgaste de flanco/ Lascamento	2	3	1
	(B)	230	0,2	1	1	1	Desgaste de flanco	1	1	1
FC 300 (Mo)	(A)	230	0,1	2	2	2	Desgaste de flanco/ Micro abrasão	1	3	2
	(B)	230	0,1	2	2	2	Desgaste de flanco/ Micro abrasão	3	3	3
	(A)	230	0,2	2	2	2	Desgaste de flanco/ Lascamento e Micro abrasão	1	4	2
	(B)	230	0,2	2	2	2	Microtrincas / Lascamento e Micro abrasão	3	3	3
FC 300 (Mo+RG)	(A)	230	0,1	3	3	3	Micro trincas/ Lascamento e Micro abrasão	4	1	4
	(B)	230	0,1	3	3	3	Attrition/ Lascamento e Micro abrasão	4	4	4
	(A)	230	0,2	3	3	3	Micro trincas/ Lascamento e Micro abrasão	4	1	4
	(B)	230	0,2	3	3	3	Desgaste de flanco/ Lascamento e Micro abrasão	4	4	4
FV 450	(A)	230	0,1	4	4	4	Desgaste de flanco/ Lascamento e Micro trincas	3	2	3
	(B)	230	0,1	4	4	4	Desgaste de flanco/ Lascamento e Micro abrasão	2	2	2
	(A)	230	0,2	4	4	4	Desgaste de flanco/ Lascamento /Micro abrasão	3	2	3
	(B)	230	0,2	4	4	4	Material aderido/ Lascamento e Micro abrasão	2	2	2

Obs.: Os seguintes conceitos foram utilizados para a classificação dos parâmetros de saída: 1 = (Melhor); 2 = (Bom); 3 = (Regular); 4 = (Pior).

Tabela 4.15 . Resumo comparativo dos resultados finais para cada material versus cada parâmetro de saída avaliado, quando foi utilizado a velocidade de corte igual $v_c = 350$ (m/min) e avanço por dente $f_z = 0,1$ e $0,2$ (mm/dente).

Material	Geometria ferramenta	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	Potencia motor (W)	Temperatura (C°)	Tempo de usinagem (min)	Mecanismo de desgaste	Rugosidade (μm)		
								Ra	Rq	Rz
FC 250	(A)	350	0,1	1	1	1	Desgaste de flanco/ Micro abrasão	4	3	2
	(B)	350	0,1	1	1	1	Desgaste de flanco/ Lascamento	3	4	4
	(A)	350	0,2	1	1	1	Desgaste de flanco/ Lascamento	3	3	2
	(B)	350	0,2	1	1	1	Desgaste de flanco/Attrition/ Micro abrasão e material aderido	3	4	4
FC 300 (Mo)	(A)	350	0,1	2	2	2	Desgaste de flanco/ Micro abrasão	3	4	4
	(B)	350	0,1	2	2	2	Desgaste de flanco/ Micro abrasão/ Attrition	1	1	2
	(A)	350	0,2	2	2	2	Desgaste de flanco/Attrition/ Lascamento e Micro abrasão	4	4	4
	(B)	350	0,2	2	2	2	Micro trincas / Lascamento e Micro abrasão	2	1	2
FC 300 (Mo+RG)	(A)	350	0,1	3	3	3	Micro trincas/ Lascamento e Micro abrasão	1	1	1
	(B)	350	0,1	3	3	3	Attrition/ Lascamento e Micro abrasão	2	2	1
	(A)	350	0,2	3	3	3	Micro trincas/ Micro trincas/Attrition e Micro abrasão	1	1	1
	(B)	350	0,2	3	3	3	Desgaste de flanco/ material aderido/ Lascamento e Micro abrasão	1	2	1
FV 450	(A)	350	0,1	4	4	4	Desgaste de flanco/ Lascamento e Micro trincas	2	2	3
	(B)	350	0,1	4	4	4	Desgaste de flanco/ Lascamento e Micro abrasão	4	3	3
	(A)	350	0,2	4	4	4	Desgaste de flanco/ Lascamento/ Attrition /Micro abrasão	2	2	3
	(B)	350	0,2	4	4	4	Material aderido/Attrition Lascamento e Micro abrasão	4	3	3

Obs.: Os seguintes conceitos foram utilizados para a classificação dos parâmetros de saída: 1 = (Melhor); 2 = (Bom); 3 = (Regular); 4 = (Pior).

CAPITULO V

CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser obtidas para os testes e condições de corte utilizadas neste trabalho:

- O elemento de liga $(Mo+RG)$ interfere nas propriedades mecânicas e nas características das microestruturas dos materiais, proporcionando um aumento na sua resistência e abrasividade, influenciando diretamente na sua usinabilidade.

- Com o aumento da velocidade de corte (v_c) e do avanço por dente (f_z) para todos os materiais, evidenciou-se um aumento significativo no desgaste e com isso uma redução de vida da ferramenta em todas as classes de ferros fundidos usinados.

- Tanto no fresamento em superfície sem furos como no corte em superfícies dotadas de furos, nas mesmas condições de corte, o ferro fundido vermicular classe FV450 apresentou sempre os menores tempos de vida das ferramentas de corte, independente da geometria da ferramenta utilizada, seguido da liga $FC300_{(Mo+RG)}$, sendo estes os que apresentaram os piores índices de usinabilidade.

- Para as classes de ferro fundido FV450 e FC 300 $(Mo+RG)$, na condição de velocidade de corte (v_c) = 350 (m/min) com avanço por dente (f_z) = 0,2 (mm/dente) percebe-se um elevado processo de desgaste, neste caso nas ferramentas de geometria (B), chegaram a uma condição mais severa, perdendo parte do material da aresta principal de corte durante o processo de usinagem.

- As arestas de corte das ferramentas de geometria (A) empregadas com velocidade de corte igual (v_c) = 230 (m/min) e avanço por dente (f_z) = 0,1(mm/dente), foram superiores, resultando em maiores tempos de usinagem, o que implica em uma taxa de desgaste bem inferior, resultando em um processo de destruição da aresta de corte mais ameno que na maior velocidade de corte de 350 (m/min) e maior avanço por dente $f_z = 0,2$ (mm/dente).

- Após os ensaios fica evidenciado que a condição mais crítica das superfícies com os furos, intensificando o desgaste e reduzindo a vida das ferramentas de geometria tipo (B) em aproximadamente de 50 a 65% mais baixo relacionado ao tempo de usinagem quando comparada com a ferramenta de geometria tipo (A), evidenciando uma maior dificuldade na usinagem das ligas de ferros fundidos FV 450 seguida da FC 300 (Mo+RG), em relação às demais ligas.

- Entre os mecanismos de desgaste mais evidentes que foram possíveis ser identificados, destacam-se a micro abrasão, attrition e micro lascamento.

- Os resultados em geral e a qualidade das superfícies aqui encontrados indicam que o FC 300 (Mo+RG) e o FV 450 obtiveram melhores resultados de rugosidade, fato que pode ser justificado pelas melhores propriedades mecânicas destes materiais, de forma que quanto maior a dureza do material, com fina granulação e alta dureza dos seus microconstituintes, tende a ser melhor o acabamento superficial.

- Em relação à temperatura na entrada e saída da aresta de corte, com os resultados obtidos, verifica-se que o aquecimento no ferro fundido vermicular FV 450 é maior do que todas as outras ligas em estudo, seguido pelo ferro fundido FC 300 (Mo+RG) para um mesmo número de medições, sendo que o menor aquecimento foi obtido com as ferramentas de geometria (B) em relação aos ensaios.

- Através dos gráficos de potência (W) no motor da máquina ferramenta, observa-se que as classes FC 250 e FC 300(Mo) apresentaram os menores valores de potência nos ensaios, independente da geometria de ferramenta e condições de corte.

CAPITULO VI

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A metodologia empregada neste trabalho suscitou dúvidas que fazem jus à investigação posterior para de fato entender melhor a usinabilidade dos materiais, tais como:

- Realizar estudo do desempenho de outros tipos de geometrias ferramenta de corte, de outras classes e revestimento.
- Investigar a influência da utilização de Mínima Quantidade de *Fluido* (MQF) no fresamento dos materiais, com o intuito de confrontar com os dados obtidos neste trabalho.
- Realizar estudo de usinabilidade com diferentes tipos de refino de grafita variando a porcentagem de adição de molibdênio nos ferros fundidos de alta resistência.
- Avaliar a usinabilidade das quatro ligas de ferros fundidos aplicando outros processos de usinagem como furação seguida de alargamento e rosqueamento com ou sem a utilização da técnica de MQF.
- Averiguar outras grandezas físicas que indiquem o índice de usinabilidade do material tais como: sinal de torque (N.m), da força de corte (F_c) e das tensões residuais após os processos de usinagem.

CAPITULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, O.L, VILELLA, R.C. & BUTTON, S.T. 2004. **Processos de Fabricação e Planejamento de Processos**. 2ª Ed. Campinas, UNICAMP, Processos Produtivos em Engenharia de Produção – Usinagem. <http://mmborges.com/processos>

ALTINTAS, Y. **Direct Adaptive Control of End Milling Process**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 34, n. 4, p. 461-472,1994. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(94\)90078-7](https://doi.org/10.1016/0890-6955(94)90078-7)

AMORIM, H. **Materiais para Ferramentas de Corte- Parte 7**. ENG03343 – Processos de Fabricação por Usinagem. 2003. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC – Porto Alegre, RS.

ANDRADE, C. L. F. **Análise de Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos Revestidas com TiN e TiAlN**. 2005. 171f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

ANDRADE, R.R. **Estudo da relação entre as principais estratégias de fresamento de cavidades na usinagem de moldes termoplásticos**, Escola de Engenharia de Piracicaba, Piracicaba 2012.

ARMAREGO, E. J. A.; DESHPANDE, N. P. **Computerized Predictive Cutting Models for Force in End-Milling Including Eccentricity Effects**. Annals of the CIRP, v. 38, n. 1, p. 45-49, 1989. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62649-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62649-3)

ASM. **Speciality Handbook: Cast Irons**. Estados Unidos: ASM International, 1996, p. 33-267.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR ISO 513:2013 Versão Corrigida: 2015 - **Classificação e Aplicação de Metais Duros para a Usinagem com Arestas de Corte Definidas** - Designação dos grupos principais e grupos de aplicação- Rio de Janeiro, Pp.4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR ISO 3685:1993 Versão Corrigida: 2017 - **Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento** - Rio de Janeiro, Pp.61.

BAGETTI, J. H. **Análise da Usinabilidade, Deformação e Temperatura no Fresamento dos Ferros Fundidos Vermicular e Cinzento**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina,

CATÁLOGO GERAL WALTER TOOLS 2018. Disponível em:

<https://www.walter-tools.com/pt-pt/press/news/pages/2018-new-catalogue.aspx>

CASOTTI B. P; DEL BEL FILHO. E; CASTRO P. C. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas 2011**. www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/...pt/.../set3304.pdf

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7ª Edição, 2002.

CIMM. **Material Didático sobre Usinagem**. Disponível em:

<http://www.cimm.com.br/materialdidatico/usinagem.shtml>, Acesso em outubro de 2015.

COSTA, A. R. **Otimização do Processo de Fresamento de Cavidades com Fresas de Inseto Intercambiáveis**. 2003. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia de Fabricação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

COSTA, A. S. **Uma contribuição ao Estudo do Fresamento Frontal em Blocos de Motores de Ferro Fundido Cinzento**. Dissertação de Mestrado (Profissional) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica - Campinas, SP: [s.n.], 2009.

COSTA, E. S. **Influência da Penetração de Trabalho na Usinabilidade do Aço NB 316 no Fresamento Frontal**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1997.

DA SILVA, M. B.; LOPES, D. S.; LOY, R. M. B. **Estudo da Formação de Trincas Térmicas em Ferramentas de Usinagem no Processo de Fresamento**. In: I COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2001, Curitiba. Anais, 2001.

DAWSON, S. **Mechanical and Physical Properties of Compacted Graphite Iron at Elevated Temperatures**. SinterCast S.A, Switzerland, Fev.1994a.

DAWSON, S. **Operational Properties of Compacted Graphite Iron: Feedback from ongoing test programmers**. SinterCast S.A, Switzerland, Fev. 1994b.

DAWSON, S. **Practical applications for Compacted Graphite Iron**. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 5., 2002. Darmstadt. **Anais...** Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2002.

DAWSON, S., WURTEMBERG, M. V., 1994, “**Experiências Práticas com Ferro Fundido de Grafita Compacta como Material para Componentes Automotivos**”, Baseado no trabalho apresentado no 26º ISATA, Aachen, Alemanha;

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., 2010. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 7ª Ed. São Paulo: Artliber Editora, 268p – Brasil.

DORÉ, C. **Influência da Variação da Nodularidade na Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2007.

DROZDA, T. J.; WICK, C. (Ed.) **Tool and Manufacturing Engineers Handbook - Machining**. 4. ed. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1983. V. 1, p. 1.1-1.66, 10.1-10.76.

FERRARESI, D. 2006. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blücher, Volume 1, 12ª reimpressão Pp. 751.

FERRER, J. A. G. **Uma contribuição ao fresamento frontal de superfícies irregulares de ferro fundido cinzento**, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 2006. 208 p. Tese de Doutorado.

GABALDO, S. **Uma contribuição à melhoria do processo de fresamento de ferro fundido Vermicular-CGI** - Campinas, SP 2009. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 208 p. Dissertação Mestrado.

GODINHO, A, F, C, E. **Análise do Mandrilamento de Cilindros de Blocos de Motores em Ferro Fundido Vermicular com Diferentes Concepções de Ferramentas** - 2007- Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

GOODRICH, G.M. *Iron Castings Engineering Handbook. AFS, 2003.*

GUENZA, J.E. **Análise do Desempenho do Fresamento em Altas Velocidades de Corte do Ferro Fundido GG25 em Aplicação Industrial**, 2008 Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 134 p.

GUESSER, W, GUEDES, L. C. **Desenvolvimentos Recentes de Ferros Fundidos Aplicados a Indústria Automobilística**. Trabalho apresentado no Seminário da Associação de Engenharia Automotiva - AEA, São Paulo, 1997.

GUESSER, W. **Compacted Graphite Iron – a New Material for Diesel Engine Cylinder Blocks**. II Encontro da SBPMat Brazilian MRS Meeting, 2003.

GUESSER, W. **Ferro Fundido com Grafita Compacta**. Metalurgia & Materias: Junho 2002. p.403-405.

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**, 1^a. ed., São Paulo, Editora Blücher, 2009.

GUESSER, W., MASIERO, I., CABEZAS, C. **Thermal Conductivity of Gray Iron and Compacted Graphite Iron Used for Cylinder Heads**. Revista Matéria, vol. 10, n. 2, Junho 2005.

GUESSER, W., MASIERO, I., MELLERAS, E., CABEZAS, C. **Fatigue Strength of Gray Iron and Compacted Graphite Iron Used for Engine Cylinder Blocks**. Society of Automotive Engineers, Inc, 2004.

GUESSER, W., SCHROEDER, T., DAWSON, S. **Production Experience With Compacted Graphite Iron Automotive Components**. AFS Transactions, American Foundry Society, Des Plaines, USA: Paper 01-071, 2001, p.1-11.

HÜBNER, H. B., SOUZA, A. J. 2014. **Avaliação da Rugosidade Gerada no Fresamento Frontal Assimétrico do Ferro Fundido Nodular DIN GGG50** - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC, Rua Sarmento Leite, 425 – Centro – CEP: 90050-170 – Porto Alegre, RS.

HUTCHINGS, I.M., 1992, “**Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials**”
Published by Edward Arnold, London, ISBN 0 340 56184 X, 273 pg.

INFOMET. Acesso em novembro 2015.

Disponível em: <http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=146>

JUNIOR, M. E¹; GUESSER, W. L². **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular Através de Ensaios de Furação. 2011.** ¹Tupy S. A., Rua Albano Schmidt, 3400 – 89227-901 – Joinville – SC – Brasil – Fone: (47) 4009-8144. ²UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina, Campus Universitário Professor Avelino Marcante, s/n – 89223-100 – Joinville – SC – Brasil - 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO - 11 a 15 de abril de 2011 – Caxias do Sul – RS - Brasil.

KOELSCH, J. R., 2000, “**Ferramentas de carbeto: o estado da arte**”, Revista Máquinas e Metais, v.36, n.415, p.186-201.

KOHOUT, J. A **Simple Relation For Deviation of Grey and Nodular Cast Irons From Hooke’s Law.** Materials Science and Engineering, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01145-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01145-5)

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. FERTIGUNGSVERFAHREN, Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren. 6. Auflage. Berlin : Springer - Verlag, 1999. 471 p.

KRATOCHVIL, R. **Fresamento de Acabamento em Altas Velocidades de Corte Para Eletrodos de Grafita Industrial.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

LIMA, A., GORGULHO, G. 2013 - **Avaliação do Comportamento da Integridade Superficial em Peças Submetidas a Processos de Usinagem em Condições Otimizadas** - 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação 7 th Brazilian Congress on Manufacturing Engineering 20 a 24 de Maio de 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ - Brasil May 20th to 24th, 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ – Brasil

LIMA, M.S.F. **Uma Contribuição ao Estudo da Microestrutura dos Ferros Fundidos Refundidos Superficialmente por Laser**. 1997. 162 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1997.

MACEDO, S.E.M. **Análise de Forças no Fresamento de Topo Convencional e com Altas Velocidades de Corte**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MACHADO, A.R., ABRÃO, A.M., COELHO, R.T., DA SILVA, M.B., 2011, **Teoria da Usinagem dos Materiais** 2.^a edição, Editora Blücher, São Paulo-SP, Pp. 397.

MANGONI, C. **Determinação Teórico-Experimental de Forças e Análise Dinâmica por Elementos Finitos no Fresamento de Peças com Baixa Rigidez**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MARWANGA, R.O., VOIGT, R.C., COHEN, P.H. **Influence of Graphite Morphology and Matrix Structure on Chip Formation During Machining of Continuously Cast Ductile Irons**. AFS Transactions, 33, 2000, p 651-661.

METALS HANDBOOK, 1989, **American Society for Metals - ASM**, 9a ed., vol. 16.

MEURER, P. R. **Usinagem de Ferro Fundido Cinzento FC-250 com Diferentes Tipos de Elementos de Liga Utilizado na Fabricação de Discos de Freio**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MOCELLIN, F. **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MOCELLIN, F; BOHES, L. **Study of the Machinability of Compacted Graphite Iron for Drilling Process**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and engineering, vol.26 no.1 Rio de Janeiro Jan./Mar. 2004 <https://doi.org/10.1590/S1678-58782004000100004>

MONTGOMERY, D.; ALTINTAS, Y. **Mechanism of Cutting Force and Surface Generation in Dynamic Milling**. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v. 113, n. 2, p. 160-168, Maio 1991. <https://doi.org/10.1115/1.2899673>

MUELLER, A. **Análise da Influência das Variáveis de Processo no Desempenho da Cerâmica Não-Oxida SI3N4 no Fresamento Frontal de Ferro Fundido Cinzento – COBEF** 2005. Renault do Brasil – Borda do Campo, S.J.P, Paraná.

MUÑOZ DIAS, L.R; **A Influência do Teor Relativo Perlita/Ferrita na Usabilidade do Ferro Fundido Cinzento** - 2011 - Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

NAVES, V. T. G. **Estudo da Usabilidade dos Ferros Fundidos Cinzentos Ligados (Crus e CrCuSnMo) e Vermicular Classe 350 no Fresamento Frontal em Alta Velocidade de Corte**. 2009. 145 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

OLIVEIRA, J. M. 2006 - **Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas Para Produção de Moldes e Matrizes** - Pró-reitora de Pós-graduação e Pesquisa Coordenadoria de Pós-graduação Programa de Pós-graduação em Materiais - **Universidade de Caxias do Sul**- Caxias do Sul. RS

PALMAI, Z. “**Cutting Temperature in Intermittent Cutting**”, International Journal of Machine Tools Manufacture, vol. 27(2), 1987, pp.261-274. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(87\)80055-X](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(87)80055-X)

PAULO, R. G. R. 2008 - **Avaliação da Integridade Superficial e Usinabilidade de Engrenagens Forjadas Utilizando Fresamento com Alta Velocidade de Corte** - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica- Faculdade de Engenharia - UNESP - Campus de Ilha Solteira- SP.

PEREIRA, A. A.; BOEHS, L.; GUESSER, W. L., **Como as inclusões no material da peça podem afetar o desgaste da ferramenta?** O Mundo da Usinagem 4ª Edição – 2005.

PEREIRA, A.A. **Influência do teor de Enxofre na Microestrutura, nas Propriedades Mecânicas e na Usinabilidade o Ferro Fundido Cinzento FC 25**. Florianópolis, 2005. Dissertação-Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

REUTER, U., SCHULZ, H., DAWSON, S., HOLLINGER, I., ROBBINS,M., DAETH, J. **The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron**. Society of automotive engineers, Inc, Alemanha, 2001, p 1-18.

REUTER, U., SCHULZ, H., KONETSCHNY, C., GASTEL, M., MCDONALD, M. **Wear Mechanisms in High-Speed Machining of Compacted Graphite Iron**. CGI Design and Machining Workshop, PTW TU-Darmstadt, 1999.

RIBEIRO; J.L.S. **Fresamento do Aço VH Super nos Estados Recozido e Temperado com Metal Duro e Cermet**- Belo Horizonte Escola de Engenharia da UFMG- 2007.

RICHETTI, A.; MACHADO, A.R.; DA SILVA, M.B.; EZUGWU, E.O.; BONNEY, J., **“Influence of the Number of Inserts for Tool Life Evaluation in Face Milling of Steels”**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 44, Issue 7-8, June 2004, pp. 695-700. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.02.007>

ROSÁRIO, J. F. A., SOUZA, R. M. 2006- **Avaliação da Integridade Superficial no Torneamento de Um Ferro Fundido Nodular com Carbonetos**. Laboratório de Fenômenos de Superfície, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo EP-USP – Cidade Universitária - São Paulo/SP Brasil.

SAHM, A.; ABELE, E.; SCHULZ, H. **State of the Art in CGI Machining**. In: **Compacted Graphite Iron Machining Workshop**, 2002, Darmstadt. Annals. . Darmstadt, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61464-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61464-4)

SANDVIK. Acesso em outubro de 2015. Disponível em:
http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/catalogue/POR/ROT_D.pdf.

SANDVIK COROMANT. **Catálogo Principal**. São Paulo, 2008. 1157 p.

SANDVIK COROMANT. **Manual Técnico de Usinagem**. Manual. São Paulo, 2005. 600 p

SANTOS, J.A.B.O., 2004, **“Estudo da Aplicação de Revestimento Superficiais em Fresas Caracóis**, Dissertação de Mestrado, PUC-MG, Fevereiro, Belo Horizonte, MG, 164 pg.

SANTOS, S. C., SALES, W.F., 2007, **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. 1ª Ed. São Paulo: Artliber Editora, 276p – Brasil.

SCHAPLA, A; KEMPKA, A; NUNES, F, L; PALIGA, R, M, G. **Fresadora; Processos de Usinagem I**; Universidade Regional Integrada de Alto Uruguai e das Missões. Campus de Erechim. Engenharia Industrial Mecânica- Erechim- 2010

SCHROETER, R. B. **Usinagem de ultraprecisão de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho**. Florianópolis, 1997. 194 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

SCHULZ, HERBERT. **Scientific fundamentals of HSC**, München: Hanser, 2001.

SHAW, M.C., 1984, **“Metal Cutting Principles”**, Oxford University Press, ISBN

SILVA, A. A. P. **Tratamento Térmico**. Dissertação (Conclusão de curso) Departamento de Tecnologia em Projetos Mecânicos, Faculdade de Tecnologia de Mogi-Mirim. 2010.

SILVA, A. E., **Furação de Ferros Fundidos de Alta Resistência Aplicados em Cabeçotes de Motores** - Dissertação Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 114 f. 2016.

SILVA, E. **Avaliação da Usinabilidade da liga de Ferro Fundido Vermicular Classe 350 para Aplicação em Cabeçotes de Motor Através de Ensaios de Fresamento Frontal** – Dissertação Mestrado – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de pós-graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Joinville, 152 f. 2014.

SILVA, E. L. - **Análise da Influência de Parâmetros de Corte na Integridade Superficial e Esforços na Operação de Torneamento do Ferro Fundido Nodular Austemperado** - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica- Universidade Federal de São João Del-Rei- São João Del-Rei. MG. 2013.

SINTERCAST SUPERMETAL. **Compacted Graphite Iron-Mechanical and Physical Properties for Engine Design**. 2014. 20 p. Publicação Técnica. Disponível em: <http://sintercast.com/media/1686/sintercast-cgi-mechanical-and-physical-properties-for-engine-design-1.pdf>

SINTERCAST. IRON, THE 21ST Century Material. **Catálogo de Produtos**. SinterCast S.A, Switzerland, 1994.

SINTERCAST. **Annual Report**. 2011. **Otimização dos Tempos e Custos do Fresamento**

SMITH, S.; TLUSTY, J. **An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process**. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, v. 113, n. 2, p. 169-175, Maio 1991. <https://doi.org/10.1115/1.2899674>

SOUZA, A.J. **Apostila Processos de Fabricação por Usinagem- Parte1**. 2011. Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Departamento e Engenharia Mecânica

SOUSA JÚNIOR, A. M; SALES, W.F. 2001- **Estudo da Utilização de CBN no Fresamento de Blocos Motores de Ferro Fundido GH190** - 1º COBEF 02 a 04 de Abril de 2001- Curitiba-Paraná-PR.

STEMMER, C.E., 2005, **Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos**, 2ª edição, Editora da UFSC, Florianópolis-SC.

STEMMER, G. E. **Ferramentas de Corte I**. 6. ed. Florianópolis: Ed. UFSC, 2005.

STOETERAU, R. L., **Processo de Usinagem, Apresentação de aulas**, UFSC, Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS1.pdf> Acesso em: Outubro 2015.

TRENT, E.M. “**Metal Cutting and the Tribology of Seizure: III. Temperature in Metal Cutting**”, Wear, vol. 128, 1988, pp. 65-81. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90253-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90253-0)

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4th Edition, Butterworths – Heinemann. 2001, 446 p.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos Materiais**. 15. reimpr. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

VIANA, R. **Estudo da Caracterização de Ferramentas de Corte Texturizadas a laser e revestidas utilizadas no Fresamento Frontal de ferro fundido Vermicular**. Tese de Doutorado, UFU, 2009.

VIDAL, D. F. **Análise de Estrutura e Propriedades Mecânicas de um Ferro Fundido Nodular em Processo de Fundição Produzido pela Técnica de Imersão de Sino**, Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2013.

VOORT, G. F. V.; ROOSZ, A. Measurement of the interlamellar spacing of pearlite. **METALLOGRAPHY**, v. 17, p. 1-17, 1984. [https://doi.org/10.1016/0026-0800\(84\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0026-0800(84)90002-8)

WARDA, R., JENKIS, L., RUFF, G., KROUGH, J., KOVACS, B. V., DUBÉ, F. **Ductile Iron Data for Design Engineers**. Published by Rio Tinto & Titanium, Canada, 1989.

WEBER, R. **CGI in series production**. EISENWERK BRUHL GMBH – Darmstadt Machining Workshop – November 2005.

WEINGAERTNER, W.L., SCHROETER, R.B. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida – Parte I**. Tradução do livro “Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen” de Wilfried König e Fritz Klocke, Florianópolis, 2002.

WERLANG FILHO, A. **Análise da Usinabilidade de Ferros Fundidos Nodulares Austemperados como Função dos Tratamentos Térmicos e Microestruturas** - Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - Porto Alegre - RS – 2015.

WOLF BRASIL TOOLS. Disponível em: http://www.wolfbrasil.com.br/?page_id=616 acessado em Outubro de 2015.

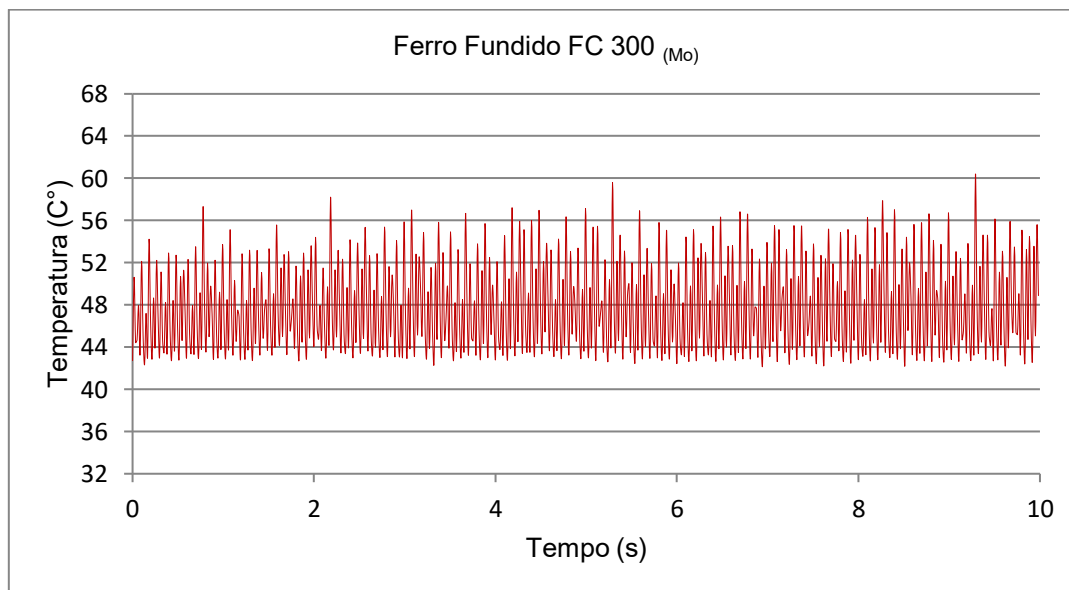
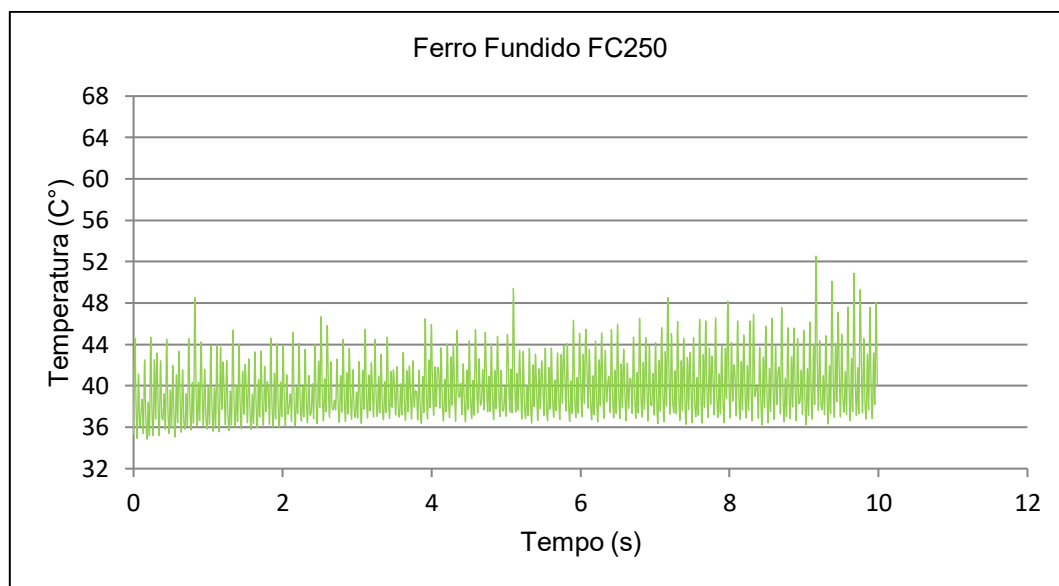
XAVIER, F. A. **Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-duro, Cerâmica e CBN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. 2003.

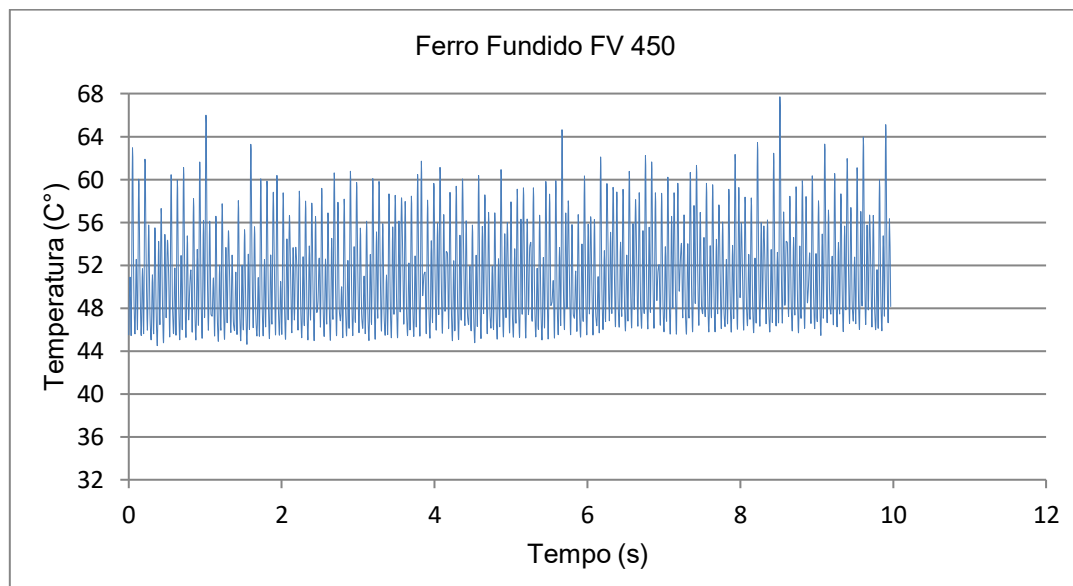
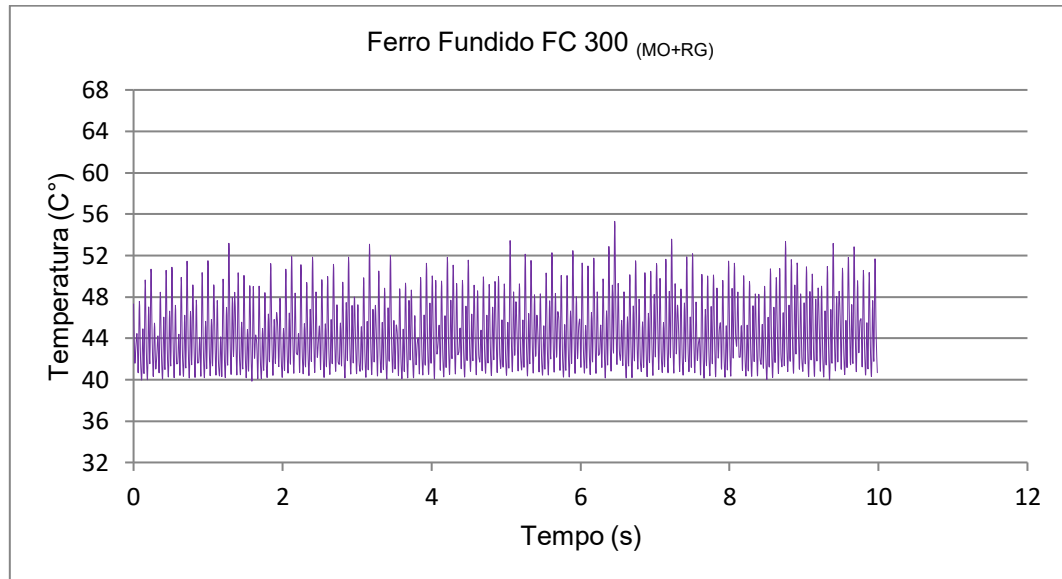
ZEILMANN, P. R; BORDIN, F. M; ZANOTTO, M. C; SOARES, R. M; VACARO, T. 2010- **Integridade Superficial Resultante de Diferentes Processos de Usinagem- Estudos Tecnológicos** - Vol. 6, nº 2: 94-103 (Mai/ago. 2010) <https://doi.org/10.4013/ete.2010.62.04>

ZHENG, L.; LIANG, S. Y. **Identification of Cutter Axis Tilt in End Milling**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, v. 119, n. 2, p. 178-185, Maio 1997. <https://doi.org/10.1115/1.2831093>

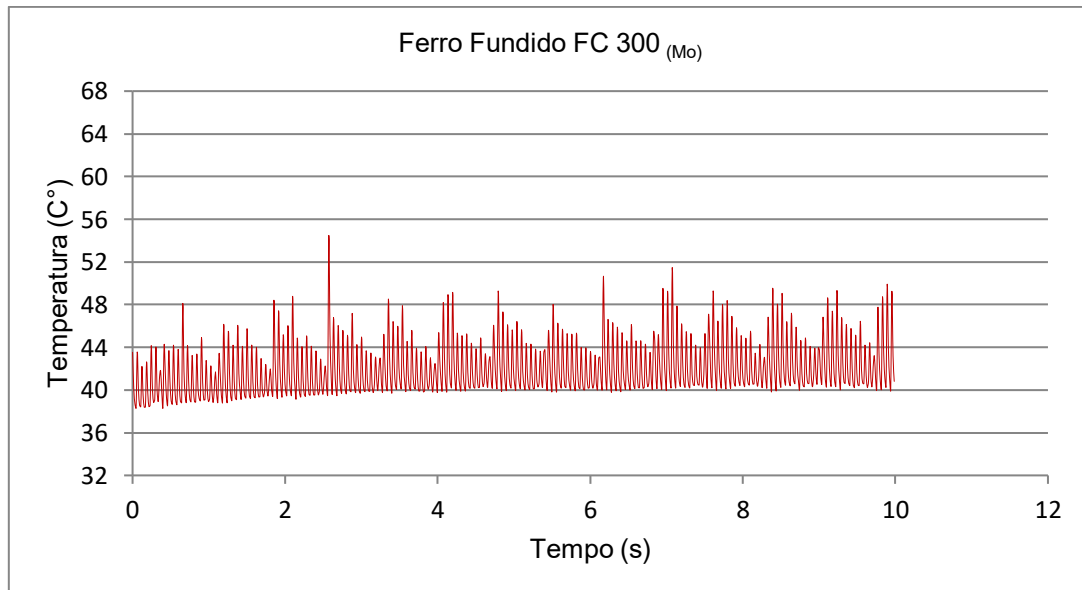
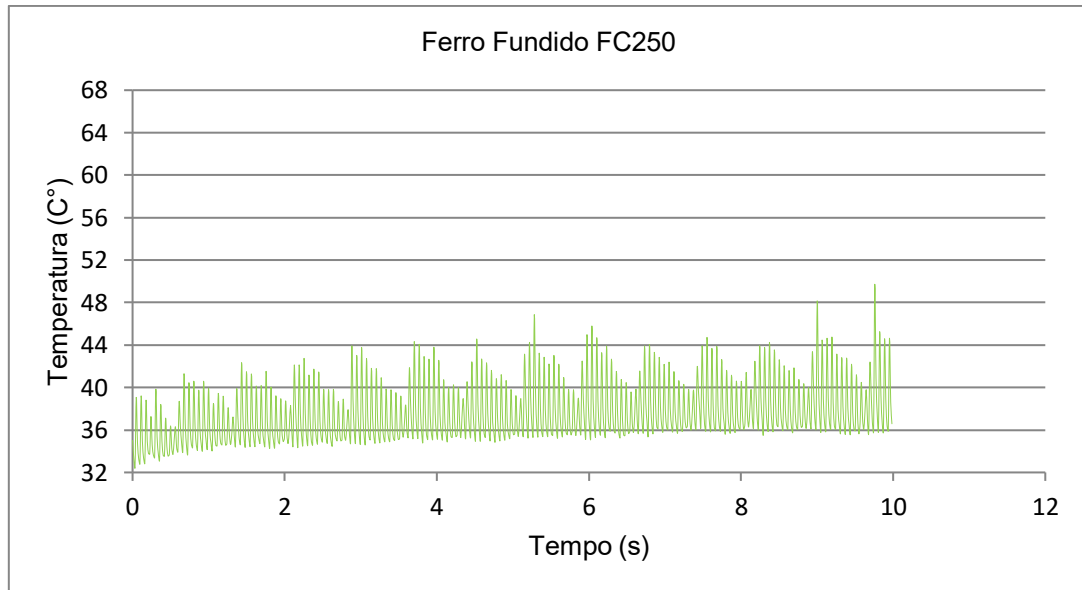
APÊNDICES

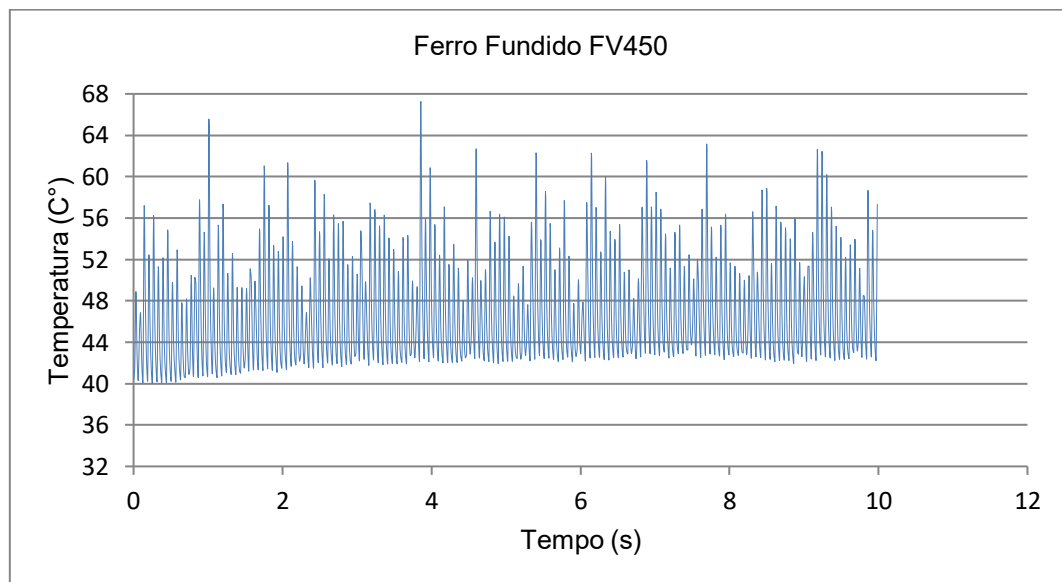
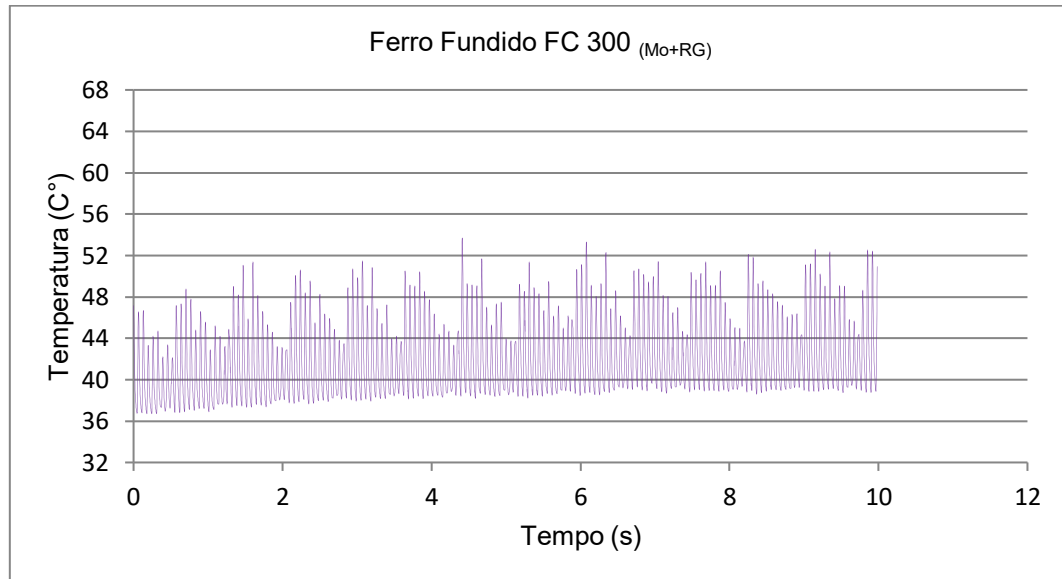
Apêndice A - Gráficos decodificados de temperatura obtidos durante os testes de usinagem com ferramenta de geometria (A), em função da velocidade de corte igual (v_c) = 350 (m/min); avanço por dente (f_z) = 0,2 (mm/dente) e profundidade de corte (a_p) = 1(mm).



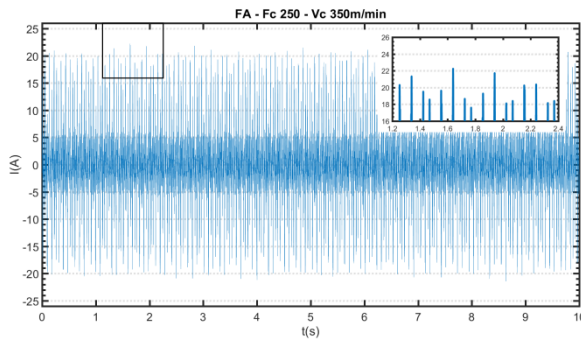


Apêndice B-Gráficos decodificados de temperatura obtidos durante os testes de usinagem com ferramentas de geometria (A), em função da velocidade de corte igual ($v_c = 230$ (m/min)); avanço pro dente ($f_z = 0,1$ (mm/dente) e ($a_p = 1$ (mm).

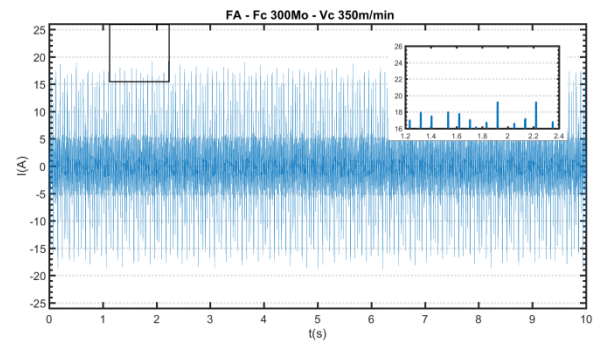




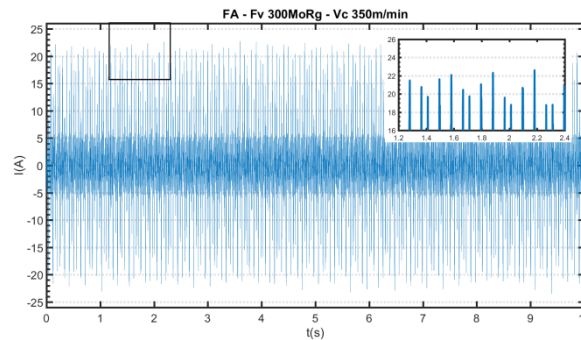
Apêndice C- Valores da corrente I (A) obtidos do motor após tratamento computador através do software LabView[®], em função da velocidade de corte igual (v_c) = 230 (m/min) em relação variação da geometria das ferramenta de corte



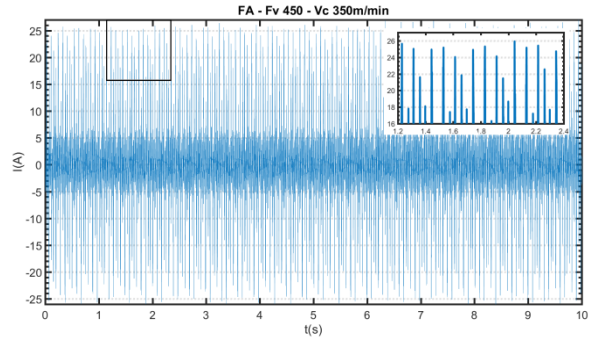
(a)



(b)

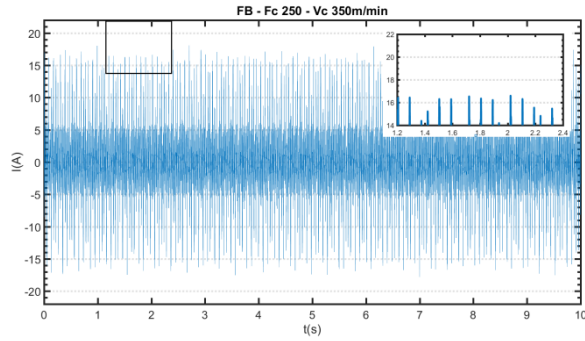


(c)

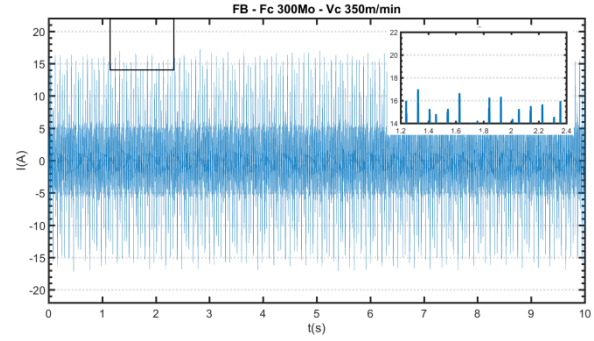


(d)

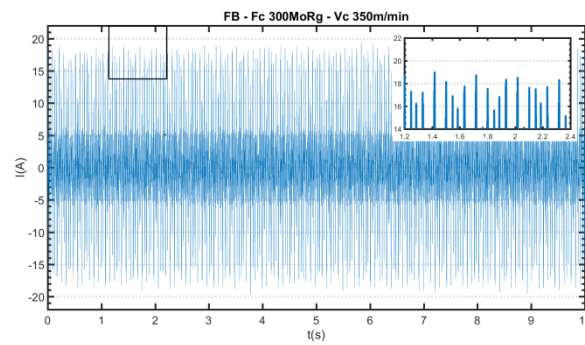
Valores obtidos de corrente do motor em função da velocidade de corte igual v_c = 350 (m/min) com a ferramenta de geometria A ; a) FC 250; b) FC 300_(Mo); c) FC 300_(Mo+RG); d) FV450.



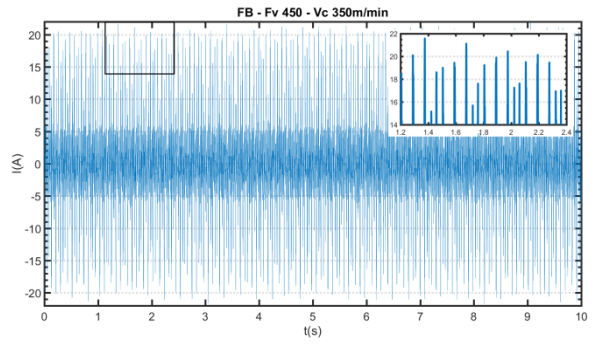
(a)



(b)



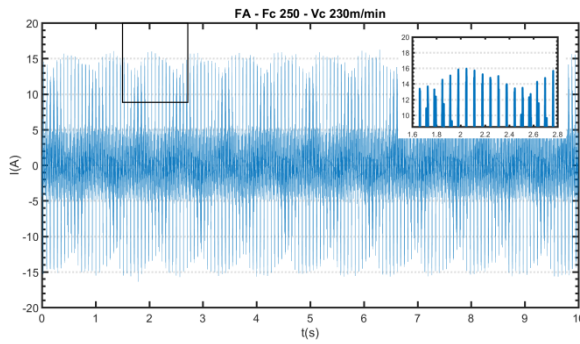
(c)



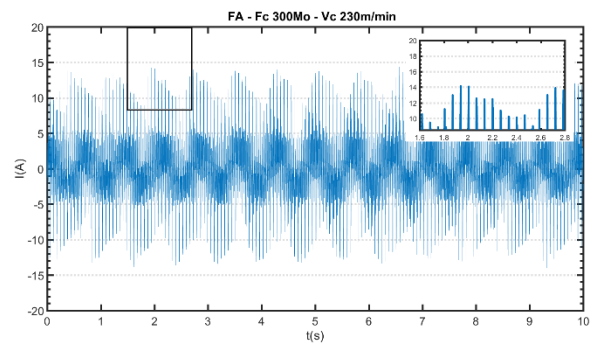
(d)

Valores obtidos de corrente no motor em função da velocidade de corte igual $v_c = 350$ (m/min) com a ferramenta de geometria B ; a) FC 250; b) FC 300_(Mo); c) FC 300_(Mo+RG); d) FV 450.

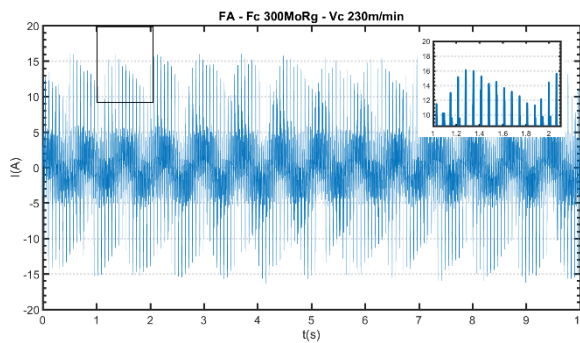
Apêndice D- Valores da corrente $I(A)$ obtidos do motor após tratamento computador através do software LabView® em função da velocidade de corte igual $(v_c) = 230$ (m/min) em relação variação da geometria das ferramenta de corte.



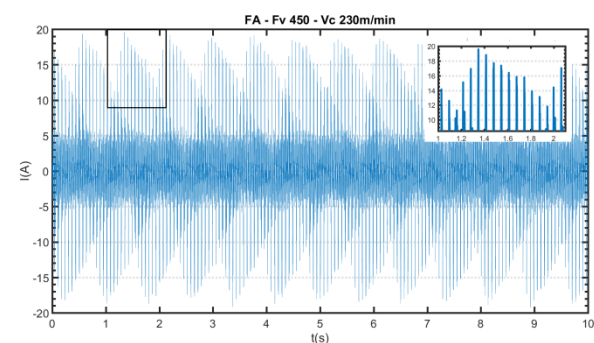
(a)



(b)

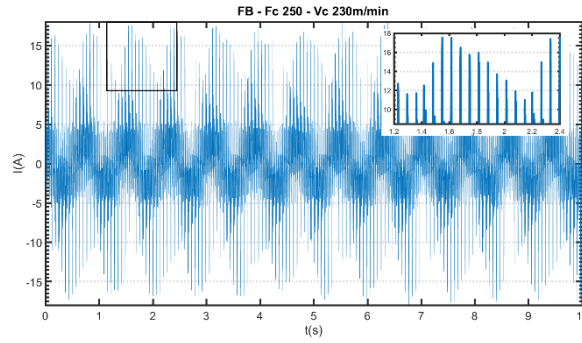


(c)

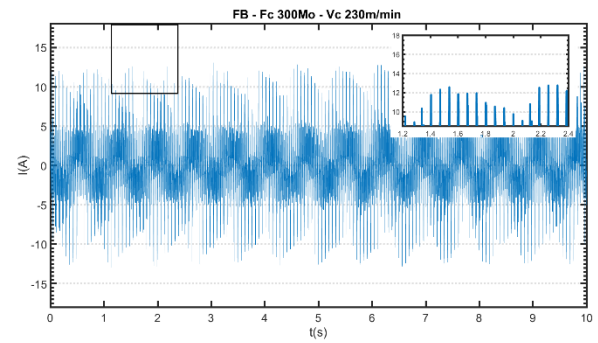


(d)

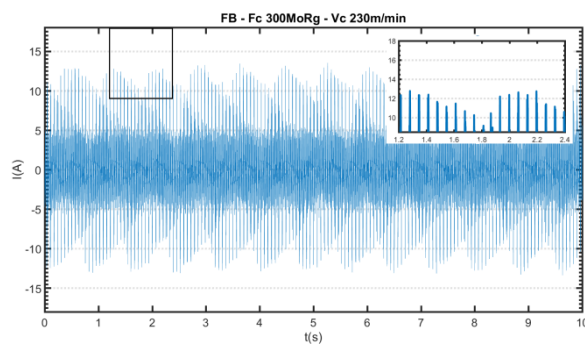
Valores obtidos de corrente do motor em função da velocidade de corte igual $(v_c) = 230$ (m/min) com a ferramenta de geometria A ; a) FC 250; b) FC 300_(Mo); c) FC 300_(Mo+RG); d) FV 450.



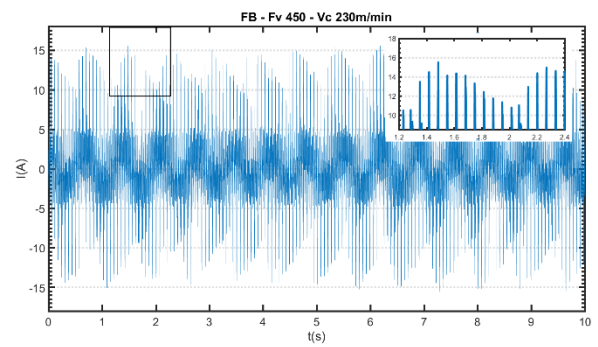
(a)



(b)



(c)



(d)

Valores obtidos de corrente do motor em função da velocidade de corte igual (v_c) = 350 (m/min) com a ferramenta de geometria A ; a) FC 250; b) FC 300 (M_o); c) FC 300 (M_o+RG); d) FV 450.