

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DA USINABILIDADE, DEFORMAÇÃO E TEMPERATURA NO FRESAMENTO
DOS FERROS FUNDIDOS VERMICULAR E CINZENTO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO HENRIQUE BAGETTI

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DA USINABILIDADE, DEFORMAÇÃO E TEMPERATURA NO FRESAMENTO
DOS FERROS FUNDIDOS VERMICULAR E CINZENTO**

JOÃO HENRIQUE BAGETTI

**Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de MESTRE EM
ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FABRICAÇÃO
sendo aprovada em sua forma final.**

PROF. LOURIVAL BOEHS, DR. ENG.
ORIENTADOR

PROF. WILSON LUIZ GUESSER, DR. ENG.
CO-ORIENTADOR

PROF. EDUARDO ALBERTO FANCELLO, D.SC.
Coordenador

BANCA EXAMINADORA

PROF. JOÃO CARLOS ESPÍNDOLA FERREIRA, PH.D. - PRESIDENTE

PROF. ROLF BERTRAND SCHROETER, DR. ENG.

PROF. CARLOS AUGUSTO SILVA DE OLIVEIRA, D.SC.

*“O pessimista vê dificuldades em toda oportunidade.
O otimista vê oportunidades em todas as dificuldades.”*

Winston Churchill

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar a vida e oportunizar esse momento.

Ao Professor Dr. Lourival Boehs, pela confiança depositada, oportunidade, orientação, colaboração e companheirismo.

Ao Professor Dr. Wilson Luiz Guesser, pelo auxílio e co-orientação.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de realização do trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Ao Projeto Remausme, pela bolsa de estudos e apoio financeiro ao trabalho.

Ao Instituto Fábrica do Milênio, Projeto IFM-II.

À empresa Tupy Fundições, pela doação dos materiais fundidos, doação das ferramentas, por disponibilizar a máquina-ferramenta para realização dos ensaios.

Ao apoio incondicional dos colaboradores da empresa Tupy Fundições, em especial ao M. Eng. Cássio Luiz de Andrade, à Osvaldina Budkevitz, ao Tarcizio Della Giustina e Pedro Masato Venancio Oikawa.

Aos colegas e amigos, em especial ao M. Eng. Christian Doré, M. Eng. Cassiano Guerra, M. Eng. Darlan Dallacosta, M. Eng. Fabio Antônio Xavier e ao Eng. Marcelo Sarturi, pelo apoio e companheirismo.

Aos bolsistas do laboratório Usicon, Pedro Hinckel e Guilherme Fantin Rebelo.

Aos colegas e amigos do laboratório Usicon, Eng. Fernando Souza Pereira, Sérgio Ari dos Santos, Tomaz Monteiro Fidélis Neto, Valtair Fabriciano Garcez e Joe Schmitz.

Aos membros do centro de metrologia e instrumentação (CMI) da fundação Certi, pela disponibilização do equipamento de medição tridimensional e informações.

Aos membros do laboratório Labmat pela disponibilização de equipamentos e informações.

Aos colegas e amigos do laboratório LMP, Professor DR. Rolf Bertrand Schroeter, e ao M. Eng. Allan Frederico Godinho, pelo apoio e companheirismo.

Aos Familiares, parentes e amigos, pela compreensão e apoio incondicional.

À minha noiva Felícia, pela compreensão e apoio incondicional durante toda a minha vida acadêmica, em especial neste momento.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	8
Lista de Tabelas.....	13
Simbologia.....	14
Resumo.....	15
Abstract.....	16
1 Introdução.....	17
1.1 Objetivos da pesquisa.....	18
1.2 Justificativas e contribuições.....	18
1.3 Estrutura do trabalho.....	19
2 Fundamentação teórica.....	20
2.1 Ferros fundidos.....	20
2.2 Ferro fundido cinzento.....	21
2.3 Ferro fundido vermicular.....	21
2.4 Propriedades físicas e mecânicas do cinzento, vermicular e nodular.....	22
2.4.1 Condutividade térmica dos ferros fundidos.....	24
2.5 Usinabilidade dos ferros fundidos cinzento e vermicular.....	28
2.5.1 Variáveis que influenciam na usinabilidade.....	36
2.6 Processo de fresamento.....	39
2.6.1 Forças no processo de fresamento.....	41
2.6.2 Fatores que influenciam nas forças de usinagem.....	42
2.6.3 Tipos de desgaste de ferramentas de corte.....	43
2.6.4 Causas de desgaste de ferramentas de corte.....	45
2.7 Deformação dos metais.....	48
2.7.1 Deformação em processos de usinagem.....	49
2.8 Fatores geradores de calor nos processos de usinagem.....	51
2.8.1 Métodos para medir temperatura em usinagem.....	55
3 Equipamentos Utilizados e Métodos.....	60
3.1 Máquinas-ferramenta.....	60
3.2 Fixação dos corpos-de-prova e cabeçote porta-ferramenta.....	61
3.2.1 Fixação dos corpos-de-prova.....	61
3.2.2 Cabeçote porta-ferramenta.....	62
3.3 Microscópios utilizados.....	63
3.4 Máquina de medição tridimensional.....	65

	6
3.5 Equipamentos para a medição da temperatura	66
3.6 Geometria dos corpos-de-prova.....	69
3.7 Metodologia para estudar a usinabilidade dos materiais	70
3.7.1 Parâmetros de corte	71
3.7.2 Procedimento experimental.....	71
3.8 Metodologia para estudar a deformação e temperatura dos materiais	73
3.8.1 Pré-usinagem	74
3.8.2 Procedimento para medição da deformação	75
3.8.3 Procedimento da usinagem para análise de deformação.....	76
3.8.4 Procedimento de usinagem para medição de temperatura	78
4 Materiais Utilizados.....	79
4.1 Caracterização dos materiais utilizados	79
4.1.1 Composição química dos ferros fundidos utilizados.....	79
4.1.2 Análise microestrutural dos ferros fundidos utilizados.....	79
4.1.3 Determinação da dureza e propriedades mecânicas	84
4.2 Materiais e geometria das ferramentas de corte	85
5 Apresentação e Discussões dos Resultados.....	86
5.1 Análise comparativa da usinabilidade do ferro fundido vermicular e do ferro fundido cinzento com ferramenta de metal-duro e cerâmica.....	87
5.1.1 Análise de usinabilidade do VER com a ferramenta de metal-duro	87
5.1.2 Análise de usinabilidade do CIN com a ferramenta de metal-duro.....	89
5.1.3 Comparativo dos resultados entre VER e CIN com metal-duro	91
5.1.4 Análise de usinabilidade do VER com a ferramenta de cerâmica	93
5.1.5 Análise de usinabilidade do CIN com a ferramenta de cerâmica	96
5.1.6 Comparativo dos resultados entre VER e CIN com cerâmica	100
5.2 Análise do aumento da temperatura dos corpos-de-prova em ferro fundido vermicular e cinzento durante o processo de fresamento	102
5.3 Análise de deformação dos corpos-de-prova em ferro fundido vermicular e cinzento em virtude do processo de fresamento	111
5.3.1 Análise de deformação dos corpos-de-prova em VER e CIN utilizados nos ensaios com metal-duro	112
5.3.2 Análise de deformação dos corpos-de-prova em VER e CIN utilizados nos ensaios com cerâmica com avanço de 0,15 mm/gume	115
5.3.3 Análise de deformação dos corpos-de-prova em VER e CIN utilizados nos ensaios com cerâmica com avanço de 0,30 mm/gume	119

	7
5.3.4 Resumo dos resultados de deformação	124
6 Conclusões e sugestões.....	125
6.1 Conclusões sobre a análise da usinabilidade	125
6.2 Conclusões sobre a análise da temperatura	127
6.3 Conclusões sobre a análise da deformação	128
6.4 Sugestões para trabalhos futuros	129
7 Referências.....	131

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 – MORFOLOGIA TÍPICA DA GRAFITA ENCONTRADA NOS FERROS FUNDIDOS. A (CINZENTO), B (VERMICULAR) E C (NODULAR). IMAGENS GERADAS POR MEV (DAWSON ET AL., 2001).....	22
FIGURA 2-2 – PROPAGAÇÃO DO CALOR PARA GRAFITA PARALELA NO PLANO BASAL (KEMPERS, 1966, MODIFICADO DE HOLMGREN; KÄLLBOM; SVENSSON, 2007). ...	25
FIGURA 2-3 – VALORES DE CONDUTIVIDADE DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR COM DIFERENTES NODULARIDADES (P É A PORCENTAGEM DE PERLITA E N A PORCENTAGEM DE NÓDULOS), COMPARADAS A CONDUTIVIDADE TÉRMICA A UMA LIGA DE FERRO FUNDIDO CINZENTO (SHAO, 1997, CITADO POR GUESSER ET AL., 2005).....	28
FIGURA 2-4 – VIDA COMPARATIVA PARA DIFERENTES MATERIAIS DE FERRAMENTA DE CORTE, PARA CORTE INTERROMPIDO (A) E CONTÍNUO (B) DO CGI PERLÍTICO E DO FERRO FUNDIDO CINZENTO (MODIFICADA DE REUTER E OUTROS, 2001).....	30
FIGURA 2-5 – RESULTADOS OBTIDOS EM ENSAIOS DE FURAÇÃO (MOCELLIN, 2002).....	31
FIGURA 2-6 – COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS COM FERRAMENTAS DE METAL-DURO, CERÂMICA E CBN EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE CORTE NO TORNEAMENTO (XAVIER, 2003).....	32
FIGURA 2-7 – CURVAS DE DESGASTE OBTIDAS PARA BROCAS REVESTIDAS COM TiAlN MONOCAMADA E COM VÁRIAS CAMADAS NANOMÉTRICAS E REVESTIDA COM TiN A $v_c=80\text{M}/\text{MIN}$ COM REFRIGERAÇÃO EXTERNA (ANDRADE, 2005).....	32
FIGURA 2-8 – RESULTADOS OBTIDOS COM FERRAMENTAS DE METAL-DURO E CERÂMICA PARA TRÊS LIGAS DE VERMICULAR (DORÉ, 2007).	34
FIGURA 2-9 – COMPORTAMENTO DO DESGASTE DA FERRAMENTA CERÂMICA E METAL-DURO APÓS USINAGEM DE 32 CORPOS-DE-PROVA (MEURER, 2007).	35
FIGURA 2-10 – FRESAMENTO FRONTAL E PERIFÉRICO (KÖNIG, 1999 CITADO POR POLLI, 2005).....	40
FIGURA 2-11 – FRESAMENTO DA FACE DOS CILINDROS DO BLOCO DE MOTOR (SILVA ET AL., 2005).....	40
FIGURA 2-12 – COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM NO PROCESSO DE FRESAMENTO (CIMM, 2007).....	41
FIGURA 2-13 – PERFIL INSTANTÂNEO DA FORÇA (MANGONI, 2004).....	42
FIGURA 2-14 – ILUSTRAÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO, CRATERA E ENTALHE EM UMA FERRAMENTA DE CORTE (MACHADO E SILVA, 1999; STEMMER, 2005A).	44
FIGURA 2-15 – (A) DEFORMAÇÃO PLÁSTICA; (B) LASCAMENTOS, DINIZ E OUTROS (1999). ..	44

FIGURA 2-16 – FIGURAS ILUSTRATIVAS DE TRINCAS DE ORIGEM TÉRMICA E MECÂNICA E QUEBRA DE FERRAMENTAS (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).	45
FIGURA 2-17 – MECANISMOS DE DESGASTE EM CONSEQÜÊNCIA DA TEMPERATURA DE CORTE (KÖNIG, 1997 CITADO POR ANDRADE, 2005).	47
FIGURA 2-18 – GERAÇÃO DA SUPERFÍCIE NO FRESAMENTO PERIFÉRICO (MODIFICADO DE BUDAK, 2006).	49
FIGURA 2-19 – FRESAMENTO PERIFÉRICO CONCORDANTE EM PEÇA DE PAREDE FINA (MODIFICADO DE TSAI; LIAO, 1999).	50
FIGURA 2-20 – GERAÇÃO DE CALOR, DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS E ZONAS DE GERAÇÃO DE CALOR DURANTE A USINAGEM (MODIFICADO DE CIMM, 2007).	52
FIGURA 2-21 – FIXAÇÃO DOS TERMOPARES À PEÇA (MODIFICADO DE TANG; HIROYUKI, 2007).	53
FIGURA 2-22 – EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE NA TEMPERATURA NO MANDRILAMENTO DE CILINDROS, (A) CORTE A SECO E (B) CORTE COM FLUIDO (MODIFICADA DE TANG; HIROYUKI, 2007).	54
FIGURA 2-23 – VARIAÇÃO CÍCLICA DA TEMPERATURA NO CORTE INTERROMPIDO (SILVA ET AL., 2001).	55
FIGURA 2-24 – ILUSTRAÇÃO DE UM PIRÔMETRO DE RADIAÇÃO (ROCHA, 1998).	58
FIGURA 2-25 – EXEMPLO DE EQUIPAMENTO PORTÁTIL PARA MEDIR TEMPERATURA POR TERMOVISÃO (FLUKE, 2007).	59
FIGURA 3-1 – DETALHES DA MÁQUINA UTILIZADA NOS ENSAIOS, (A) VISTA INTERNA COM VISÃO PARCIAL DA MESA DE FIXAÇÃO, (B) VISTA INTERNA COM VISÃO DO CABEÇOTE DA MÁQUINA.	61
FIGURA 3-2 – SISTEMA DE FIXAÇÃO UTILIZADO NA PRIMEIRA ETAPA DE ENSAIOS.	61
FIGURA 3-3 – SISTEMA DE FIXAÇÃO UTILIZADO NO SEGUNDO E NO TERCEIRO EXPERIMENTO.	62
FIGURA 3-4 – VISTAS DO CABEÇOTE UTILIZADO, (A) FRONTAL, (B) SUPERIOR.	63
FIGURA 3-5 – MICROSCÓPIO PARA MEDIR O DESGASTE DAS FERRAMENTAS.	63
FIGURA 3-6 – MICROSCÓPIO PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS.	64
FIGURA 3-7 – FOTO ILUSTRATIVA DO MEV (LABMAT, 2007).	65
FIGURA 3-8 – (A) MÁQUINA DE MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL SENDO PREPARADA PARA INÍCIO DA MEDIÇÃO, (B) DETALHE DO SISTEMA DE APALPAÇÃO.	66
FIGURA 3-9 – EQUIPAMENTO DE TERMOVISÃO FLUKE Ti20 (FLUKE, 2007).	67
FIGURA 3-10 – TERMOPAR UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS.	68
FIGURA 3-11 – TERMOPARES FIXADOS NOS CORPOS-DE-PROVA.	68

	10
FIGURA 3-12 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS UTILIZADO.	69
FIGURA 3-13 – DESENHO CORPO-DE-PROVA UTILIZADO	70
FIGURA 3-14 – FACE SUPERIOR DO CORPO-DE-PROVA USINADA E EM BRUTO DE FUNDIÇÃO.	72
FIGURA 3-15 – FACE INFERIOR DO CORPO-DE-PROVA USINADA E EM BRUTO DE FUNDIÇÃO.	72
FIGURA 3-16 – (A) CORPO-DE-PROVA EM BRUTO; (B) COM AS PAREDES USINADAS, COM OS FUROS DE FIXAÇÃO DOS TERMOPARES E PARA A FIXAÇÃO DO CORPO-DE-PROVA NA MÁQUINA.	74
FIGURA 3-17 – FIGURA ILUSTRANDO O SENTIDO DAS COORDENADAS NOS TRÊS EIXOS, PONTOS DE MEDIÇÃO E LINHAS DE REFERÊNCIA.	76
FIGURA 3-18 – DESENHO ESQUEMÁTICO ILUSTRANDO A QUANTIDADE DE MATERIAL REMOVIDO E ALTURA DOS PONTOS DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO.	77
FIGURA 4-1 – MICROGRAFIAS FERRO FUNDIDO VERMICULAR AMOSTRA 1.	80
FIGURA 4-2 – MICROGRAFIAS FERRO FUNDIDO VERMICULAR AMOSTRA 2.	81
FIGURA 4-3 – MICROGRAFIA DAS AMOSTRAS 1 E 2 DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR EVIDENCIANDO A PRESENÇA DE CARBONETOS DE SEGREGAÇÃO.	81
FIGURA 4-4 – MICROGRAFIAS DO FERRO FUNDIDO CINZENTO DE QUATRO AMOSTRAS RETIRADAS DE QUATRO CORPOS-DE-PROVA UTILIZADOS NOS ENSAIOS.	82
FIGURA 4-5 – MICROGRAFIAS DAS AMOSTRAS 3 E 4 DO FERRO FUNDIDO CINZENTO EVIDENCIANDO AS LAMELAS DE GRAFITA E A MATRIZ PERLÍTICA.	82
FIGURA 4-6 – IMAGEM OBTIDA EM MEV DA SUPERFÍCIE BRUTA DA AMOSTRA 3, EVIDENCIANDO A POSSÍVEL PRESENÇA DE AREIA RESIDUAL DE FUNDIÇÃO.	83
FIGURA 4-7 – IMAGEM OBTIDA EM MEV DA SUPERFÍCIE BRUTA DA AMOSTRA 4, EVIDENCIANDO A POSSÍVEL PRESENÇA DE AREIA RESIDUAL DE FUNDIÇÃO.	83
FIGURA 4-8 – INSERTOS DE CERÂMICA (ESQUERDA) E METAL-DURO (DIREITA) UTILIZADOS NOS ENSAIOS.	86
FIGURA 4-9 – DESENHO ILUSTRATIVO COM AS DIMENSÕES DOS INSERTOS.	86
FIGURA 5-1 – COMPORTAMENTO DO DESGASTE DA FERRAMENTA MD NO VER.	88
FIGURA 5-2 – DESGASTE DOS GUMES DOS ENSAIOS 1 E 2 NO VER OBSERVADOS NO MEV.	88
FIGURA 5-3 – COMPORTAMENTO DO DESGASTE DA FERRAMENTA MD NO CIN.	90
FIGURA 5-4 – DESGASTE DOS GUMES 1 DOS ENSAIOS 1 E 2 NO CINZENTO OBSERVADOS NO MEV.	91
FIGURA 5-5 – COMPORTAMENTO DA VIDA DA FERRAMENTA MD EM VER E CIN EM VIRTUDE DO TEMPO DE CORTE.	92

FIGURA 5-6 – COMPORTAMENTO DO DESGASTE DA FERRAMENTA CER EM VER.....	93
FIGURA 5-7 – VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO COM FERRAMENTA CER EM VER.	94
FIGURA 5-8 – IMAGENS DO DESGASTE DOS GUMES UTILIZADOS NOS ENSAIOS EM VER.	95
FIGURA 5-9 – COMPORTAMENTO DO DESGASTE DA FERRAMENTA CER EM CIN.....	96
FIGURA 5-10 – VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO COM FERRAMENTA CER EM CIN.	97
FIGURA 5-11 – IMAGENS DO DESGASTE DOS GUMES UTILIZADOS NOS ENSAIOS 1,2 E 3 EM CIN.....	98
FIGURA 5-12 – IMAGENS DO GUME UTILIZADO NO ENSAIO COM AVANÇO DE 0,3 MM/GUME EM CIN.	99
FIGURA 5-13 – COMPORTAMENTO DA VIDA DA FERRAMENTA CER EM VER E CIN EM RAZÃO DO TEMPO DE CORTE.....	100
FIGURA 5-14 – IMAGEM TÉRMICA COM UM GUME EM CONTATO COM O CORPO-DE-PROVA.	102
FIGURA 5-15 – IMAGEM TÉRMICA COM UM GUME SAINDO E O OUTRO ENTRANDO NO CORPO-DE-PROVA.	103
FIGURA 5-16 – GRÁFICO DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA OBTIDOS NOS ENSAIOS EM VER E CIN COM A FERRAMENTA MD.	104
FIGURA 5-17 – GRÁFICO DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO VER COMPARADOS COM A SIMULAÇÃO DO CIN COM A FERRAMENTA MD.....	106
FIGURA 5-18 – GRÁFICO DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA OBTIDOS NOS ENSAIOS EM VER E CIN, COM A FERRAMENTA CER, COM AVANÇO DE 0,15 MM/GUME.....	106
FIGURA 5-19 – GRÁFICO DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA OBTIDOS NOS ENSAIOS EM VER E CIN, COM A FERRAMENTA CER, COM AVANÇO DE 0,30 MM/GUME.....	107
FIGURA 5-20 – DIFERENÇA PERCENTUAL DAS TEMPERATURAS OBTIDAS NOS ENSAIOS REALIZADOS COM FERRAMENTA CER EM VER E CIN.....	108
FIGURA 5-21 – COMPARATIVO DOS RESULTADOS OBTIDOS EM TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.	109
FIGURA 5-22 – (A) PONTOS DE MEDIÇÃO NAS PAREDES DO CORPO-DE-PROVA; (B) DIFERENÇA DE ESPESSURA ENTRE AS PAREDES.	111
FIGURA 5-23 – VARIAÇÃO DOS TRÊS CORPOS-DE-PROVA EM VER, USINADOS COM A FERRAMENTA MD NO EIXO Y.....	112
FIGURA 5-24 – VARIAÇÃO DOS TRÊS CORPOS-DE-PROVA EM CIN, USINADOS COM A FERRAMENTA MD NO EIXO Y.....	113
FIGURA 5-25 – VARIAÇÃO DOS TRÊS CORPOS-DE-PROVA EM VER, USINADOS COM A FERRAMENTA MD NO EIXO X.....	114

FIGURA 5-26 – VARIAÇÃO DOS TRÊS CORPOS-DE-PROVA EM CIN, USINADOS COM A FERRAMENTA MD NO EIXO X.....	114
FIGURA 5-27 – VARIAÇÃO DOS TRÊS CORPOS-DE-PROVA EM VER, USINADOS COM A FERRAMENTA CER COM AVANÇO DE 0,15 MM/GUME, NO EIXO Y.	116
FIGURA 5-28 – VARIAÇÃO DOS TRÊS CORPOS-DE-PROVA EM CIN, USINADOS COM A FERRAMENTA CER COM AVANÇO DE 0,15 MM/GUME, NO EIXO Y.	117
FIGURA 5-29 – VARIAÇÃO DOS TRÊS CORPOS-DE-PROVA EM VER, USINADOS COM A FERRAMENTA CER COM AVANÇO DE 0,15 MM/GUME, NO EIXO X.	118
FIGURA 5-30 – VARIAÇÃO DOS TRÊS CORPOS-DE-PROVA EM CIN, USINADOS COM A FERRAMENTA CER COM AVANÇO DE 0,15 MM/GUME, NO EIXO X.	119
FIGURA 5-31 – VARIAÇÃO DOS TRÊS CORPOS-DE-PROVA EM VER, USINADOS COM A FERRAMENTA CER COM AVANÇO DE 0,30 MM/GUME, NO EIXO Y.	120
FIGURA 5-32 – VARIAÇÃO DOS TRÊS CORPOS-DE-PROVA EM CIN, USINADOS COM A FERRAMENTA CER COM AVANÇO DE 0,30 MM/GUME, NO EIXO Y.	121
FIGURA 5-33 – VARIAÇÃO DOS TRÊS CORPOS-DE-PROVA EM VER, USINADOS COM A FERRAMENTA CER COM AVANÇO DE 0,30 MM/GUME, NO EIXO X.	122
FIGURA 5-34 – VARIAÇÃO DOS TRÊS CORPOS-DE-PROVA EM CIN, USINADOS COM A FERRAMENTA CER COM AVANÇO DE 0,30 MM/GUME, NO EIXO X.	123

LISTA DE TABELAS

TABELA 2-1 – PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DOS FERROS FUNDIDOS CINZENTO, VERMICULAR E NODULAR (MODIFICADA DE <i>TECHNICAL ARTICLES</i> , 2000; ASM, 1996; GUESSER, 1997; HICK, 2000 CITADOS POR XAVIER, 2003 E SPECTRU, 2007).....	23
TABELA 2-2 – VANTAGENS DO VERMICULAR EM RELAÇÃO AO CINZENTO E NODULAR (MODIFICADO DE SPECTRU, 2007).	24
TABELA 2-3 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS CONSTITUINTES METALOGRAFICOS DOS FERROS FUNDIDOS (STEFANESCU, 2003, MODIFICADO DE GUESSER ET AL., 2005)....	25
TABELA 2-4 – RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA COM FERRO FUNDIDO VERMICULAR E CINZENTO EM DIFERENTES TEMPERATURAS (GUESSER ET AL., 2005).	26
TABELA 2-5 – EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA NA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FERRO FUNDIDO CINZENTO (STEFANESCU, 2003, MODIFICADO DE GUESSER ET AL., 2005). ..	27
TABELA 2-6 – FAIXA DE UTILIZAÇÃO E LIMITE DE ERRO DE ACORDO COM ASTM E-230 COM JUNÇÃO DE REFERENCIA A 0 °C (MOREIRA, 2002).....	57
TABELA 2-7 – APLICAÇÃO DOS TIPOS DE TERMOPARES (MOREIRA, 2002).....	57
TABELA 3-1 – PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS NOS ENSAIOS.	71
TABELA 3-2 – CODIFICAÇÃO DAS PEÇAS ENSAIOS DEFORMAÇÃO.	77
TABELA 4-1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA NOMINAL DOS FERROS FUNDIDOS UTILIZADOS.	79
TABELA 4-2 – CARACTERÍSTICAS DOS FERROS FUNDIDOS COM BASE NAS IMAGENS OBTIDAS.	80
TABELA 4-3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FERROS FUNDIDOS ENSAIADOS.....	84
TABELA 4-4 – SUBSTRATO E REVESTIMENTOS DA FERRAMENTA DE METAL-DURO.....	85

SIMBOLOGIA

a_e	[mm]	Penetração de trabalho
a_p	[mm]	Profundidade de corte
CBN		Nitreto de boro cúbico
CVD		<i>Chemical vapor deposition</i>
D	[mm]	Diâmetro da fresa
F	[N]	Força de usinagem
F_c	[N]	Força de corte
F_f	[N]	Força de avanço
F_p	[N]	Força passiva
f_z	[mm/gume]	Avanço por gume
HB		Dureza Brinell
HV		Dureza Vickers
n	[rpm]	Rotação
PCBN		Nitreto de boro cúbico policristalino
ppm		Partículas por milhão
rpm		Rotações por minuto máquina-ferramenta
VB	[mm]	Desgaste de flanco na ferramenta de corte
$VB_{máx}$	[mm]	Desgaste de flanco máximo na ferramenta de corte
v_c	[m/min]	Velocidade de corte
v_f	[mm/min]	Velocidade de avanço
y_p		Deflexão da peça na posição (x,z)
δ		Deformação total
δ_r		Limite de resistência à tração
δ_y		Deflexão da ferramenta posição axial z
ε		Deformação específica

RESUMO

O ferro fundido cinzento é um material de intensa utilização na fabricação de blocos de motores. Nos anos recentes, o ferro fundido vermicular vem ganhando grande espaço na construção de blocos de motores diesel, em razão das recentes evoluções tecnológicas desses motores, tanto em desempenho quanto na redução da emissão de poluentes, baseados em maiores pressões e temperaturas de trabalho. O ferro fundido vermicular atende cada vez melhor a essa demanda, em virtude das suas propriedades mecânicas superiores às do ferro fundido cinzento. Entretanto, em consequência disso, esse material apresenta maior dificuldade na usinagem, o que acarreta custos maiores no processo de fabricação dos blocos. Dentro desse contexto, este trabalho tem por objetivo o estudo da usinabilidade dos dois materiais, utilizando o processo de fresamento, que é um dos processos de grande aplicação na usinagem de blocos e cabeçotes de motores, ainda pouco estudado no Brasil com relação à usinabilidade do ferro fundido vermicular. Paralelamente, tem-se como objetivo avaliar a temperatura na peça durante a usinagem e também determinar as variações geométricas que podem ocorrer nas paredes da peça, tendo em vista o efeito térmico e os esforços da usinagem. Para tanto, houve a realização de experimentos com insertos de metal-duro e de cerâmica, os quais são utilizados pela indústria para o fresamento de blocos de motores, fabricados com ambos os materiais. Foram empregados três conjuntos de parâmetros de corte, um para a ferramenta de metal-duro e dois para a ferramenta cerâmica. Afim de medir a temperatura, foram utilizados termopares conectados ao corpo-de-prova e os sinais adquiridos e armazenados por meio de uma unidade de aquisição de dados. Com o propósito de caracterizar as variações geométricas nos corpos-de-prova, foi utilizada uma máquina de medição tridimensional. Os resultados de vida de ferramenta, avaliados pelo desgaste de flanco, permitiram evidenciar as dificuldades de usinagem do ferro fundido vermicular, comparativamente ao ferro fundido cinzento. Essas diferenças acentuam-se na usinagem com ferramenta de metal-duro e tornam-se menores com o uso de ferramentas cerâmicas. Os resultados referentes à temperatura demonstraram que o vermicular apresenta maior aquecimento durante a usinagem. Com relação às variações geométricas, não foi constatado predominância de maior ou menor variação para um ou outro material.

Palavras-chaves: Fresamento. Ferro fundido vermicular. Ferro fundido cinzento. Metal-duro. Cerâmica. Temperature. Deformação.

ABSTRACT

The gray cast iron is a material of intense utilization in the engine block's manufacture. In the last few years, the compacted graphite iron (CGI) is gaining a great space in the diesel engine block's construction, on account of the recent's technological evolutions of these engines, such as in the performance in the reduction of pollutant's emission, based on work's higher pressures and temperatures. The CGI provides each time in a better way this demand, in virtue of his mechanical properties that are superiors than the gray cast iron. Meantime, as consequence of that, this material present's bigger difficulty in the machining, what brings bigger costs in the block's manufactory process. Inside this context, this work has as the objective the machinability's study of two materials, using the milling process which is one of the process with a great utilization in the machining of block's and headstocks of engines, still not so studied in Brazil compared to machinability of the CGI. In parallel, the objective is to evaluate the temperature in the piece during the machining and also determinates the geometrics oscillation that can happen in the piece's wall, having in mind the thermal effect and the efforts of the machining. For that, there was the realization of experiments with carbide tool and ceramic tool, which are utilized by the milling of engine block's industry, manufactured with both materials. There were used three parameters sets of cut, one for the carbide tool and two for the ceramic tool. With the objective of check the temperature, there were used thermocouples connected to the pieces, was used a acquired sighs and stored through a acquisition unit of data. With the propose of characterize the geometric variation in the pieces, was used a three-dimensional measure machine. The results of tool's life, evaluated by the flank wear, allow showing up the difficulties in the CGI machining, comparatively to the gray cast iron. These differences get accented in the machining with carbide tools and become smaller with the ceramic tools use. The results referents to the temperature show that the CGI presents bigger heating during the machining. Regarding the geometrical variations, was not noted predominance of bigger or smaller variation for one or other material.

Keywords: Milling, compacted graphite iron (CGI), gray cast iron, carbide tool, ceramic tool, temperature, deformation.

1 INTRODUÇÃO

As recentes evoluções tecnológicas dos motores a diesel, tanto em desempenho quanto na redução da emissão de poluentes, são resultantes de maiores pressões e temperaturas de trabalho, fazendo com que o bloco do motor sofra maiores solicitações, podendo gerar quebras prematuras (GUESSER, 2002).

A fim de evitar tais problemas, o ferro fundido vermicular ou *Compacted Graphite Iron* (CGI) vem ganhando espaço no mercado de blocos e cabeçotes desse tipo de motor. Tal material tem praticamente o dobro da resistência mecânica em comparação ao ferro fundido cinzento, tradicionalmente usado em blocos de motores, porque, com resistência maior, é possível fazer motores mais potentes do mesmo tamanho ou, então, motores mais compactos com a mesma potência. Além disso, esses motores apresentam a vantagem adicional de combustão mais eficiente e, portanto, menos poluentes.

As propriedades superiores desse material implicam um maior custo de produção em relação ao ferro fundido cinzento, sobretudo nos processos de usinagem, em virtude dos tempos de processo e do desgaste das ferramentas serem mais elevados.

Em razão desses problemas, vem-se pesquisando de forma intensa a usinabilidade desse material, a fim de que esta possa se aproximar cada vez mais da usinabilidade do ferro fundido cinzento. Nesse contexto, cabe destacar os trabalhos efetuados no PTW da Universidade de Darmstadt, Alemanha, com a melhoria dos materiais das ferramentas, bem como a melhoria da liga de ferro fundido vermicular, por meio de mudanças nos aspectos metalúrgicos.

No Brasil, também estão sendo realizadas pesquisas importantes nesse sentido, lideradas pela empresa Tupy Fundições Ltda., pioneira na fabricação do ferro fundido vermicular, em cooperação com universidades brasileiras. Nessas cooperações, pode-se destacar a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por intermédio do seu Departamento de Engenharia Mecânica, que vem desenvolvendo trabalhos para a melhoria da usinabilidade do ferro fundido vermicular, com distintas composições e uso de ferramentas com geometrias e materiais diferentes. Destacam-se dentro dessa linha de pesquisa os trabalhos de Mocellin (2002), com furação, e Mocellin (2007), com brunimento; Xavier (2003), com torneamento; Andrade (2005), com furação; Doré (2007), com torneamento; Godinho (2007), com mandrilamento, entre outros que estão em desenvolvimento.

Esses trabalhos em sua maioria, visam ao desenvolvimento da liga de ferro fundido vermicular, variando-se características microestruturais, e também ao desenvolvimento de novas ferramentas, porém são trabalhos focados no estudo dos processos de corte contínuo.

Considerando esses pontos, o presente trabalho está inserido na parceria UFSC/Tupy, visando iniciar os estudos de usinabilidade desse material no processo de fresamento (corte interrompido), visto que no Brasil são poucos os trabalhos nesse contexto.

Adicionalmente, foram efetuados estudos com relação às temperaturas atingidas pelo ferro fundido vermicular e o ferro fundido cinzento, durante a usinagem, e também, com relação à deformação desses materiais em consequência da usinagem, porque o processo de fresamento facilita a utilização de sensores, como termopares, em virtude da ferramenta realizar o movimento principal durante o corte.

A seguir, são apresentados os objetivos, as justificativas e contribuições que motivaram a realização desta pesquisa, bem como a estrutura de apresentação deste trabalho.

1.1 Objetivos da pesquisa

- a) Pesquisar a usinabilidade do ferro fundido vermicular no processo de fresamento, tendo como parâmetro comparativo o ferro fundido cinzento.
- b) Estudar a elevação da temperatura dos ferros fundidos, vermicular e cinzento, com base nas medições da temperatura das peças, durante o processo de fresamento.
- c) Verificar a deformação das paredes das peças em ferro fundido vermicular e cinzento em consequência dos esforços e temperaturas de usinagem.

1.2 Justificativas e contribuições

A principal aplicação do ferro fundido vermicular é na fabricação de blocos e cabeçotes de motores a diesel, nos quais o processo de fresamento é bastante utilizado, tanto para o desbaste como para o acabamento de tais componentes.

Contudo, a maioria dos estudos de usinabilidade do ferro fundido vermicular é focada nos processos de corte contínuo, tais como torneamento e mandrilamento, por estes serem os processos mais críticos na usinagem do ferro fundido vermicular, em razão do alto desgaste das ferramentas de corte, do maior custo de usinagem e menor produtividade, quando comparado ao ferro fundido cinzento.

Considerando o fato de a usinagem do ferro fundido vermicular com corte interrompido ser pouco pesquisada e esse tipo de processo ser bastante empregado na usinagem de blocos e cabeçotes de motores, vê-se a necessidade de realizar estudos mais aprofundados da usinabilidade do ferro fundido vermicular no fresamento, gerando-se, assim, resultados de vida de ferramentas de corte, em determinados conjuntos de parâmetros de corte, os quais servem como base para a indústria melhorar os seus processos, reduzindo tempos e custos.

Tal fato justifica o presente trabalho, com o apoio da parceria entre a empresa Tupy Fundições e UFSC, o qual visa ampliar o estudo da usinabilidade do ferro fundido vermicular no processo de fresamento com ferramentas de metal-duro e cerâmica, aliado ao estudo do efeito térmico e dos esforços de corte nas características da peça proporcionados pelo processo de fresamento.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. Neste primeiro capítulo, é apresentado um breve histórico referente aos dois materiais estudados e uma pequena explanação dos tópicos a serem abordados, além de algumas pesquisas já desenvolvidas na área, bem como os objetivos e as justificativas desta pesquisa.

No segundo capítulo há a fundamentação teórica, referenciando trabalhos relacionados e necessários para a análise e interpretação dos resultados obtidos nesta pesquisa.

No terceiro capítulo são mencionados os equipamentos utilizados e é descrita a metodologia aplicada na pesquisa. Já na quarta seção, são apresentadas as características dos materiais utilizados, tanto dos ferros fundidos quanto das ferramentas.

No quinto capítulo, estão a análise e discussão dos resultados obtidos e, no sexto, conclusão, são descritas as conclusões a que se chegou neste trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo compreende, a princípio, alguns aspectos sobre as características e obtenção dos ferros fundidos cinzento e vermicular. No item 2.4, faz-se uma descrição das propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos citados, e o ferro fundido nodular é abordado de maneira breve. Este mesmo item traz o estado da arte referente à condutividade térmica dos ferros fundidos. No item 2.5, são abordados os aspectos que influenciam na usinabilidade dos ferros fundidos cinzento e vermicular.

Os demais itens, 2.6 a 2.8, trata-se, respectivamente, do processo de fresamento, da deformação dos metais e dos fatores geradores de calor nos processos de usinagem.

2.1 Ferros fundidos

Ferros fundidos são ligas de ferro-carbono, segundo sua definição, com teor de carbono acima de 2%. Em virtude da influência do silício na liga, o ferro fundido é em geral considerado uma liga ternária Fe-C-Si, pois o silício está sempre presente em teores superiores ao do carbono (CHIAVERINI, 2002).

Os ferros fundidos são materiais utilizados há muito tempo na indústria automobilística para a fabricação dos mais diversos componentes como, por exemplo, discos de freio, blocos e cabeçotes de motores.

Entre os vários ferros fundidos existentes, o ferro fundido cinzento é o mais utilizado. Recentemente, o ferro fundido vermicular vem ampliando, de forma significativa, a sua participação no mercado, sobretudo na construção de blocos de motores a diesel, pelo fato de ter propriedades mecânicas superiores às do ferro fundido cinzento.

Em razão da sua importância, os ferros fundidos vêm recebendo, de maneira contínua importantes desenvolvimentos, tanto em processos de fabricação como em materiais. Tais desenvolvimentos, resultantes de necessidades nas áreas de aplicação ou ainda de redução de custos, trazem como consequência a sua contínua atualização tecnológica (GUESSER; GUEDES, 1997).

2.2 Ferro fundido cinzento

Material amplamente empregado no setor automobilístico, o ferro fundido cinzento é uma liga ternária, que tem como elementos de liga fundamentais: ferro, carbono e silício. Apresenta na sua microestrutura carbono livre na forma de lamelas, denominada grafita, podendo ainda, em geral, apresentar parte do carbono combinado na forma do microconstituente denominado perlita (PIESKE; CHAVES FILHO; REIMER, 1974).

Além desses aspectos, é a liga mais usada entre os ferros fundidos, pois apresenta a melhor fundibilidade e uma das mais baixas temperaturas de fusão entre as ligas ferrosas. Sua contração na transformação líquido-sólido é baixa e, em alguns casos, nula, favorecendo a obtenção de peças sem defeitos internos. Pode, também, ser usado na maioria das aplicações no estado bruto de solidificação, o que simplifica a produção (PIESKE; CHAVES FILHO; REIMER, 1974).

O ferro fundido cinzento também apresenta características de fácil moldagem, resistência mecânica adequada, excelente usinabilidade, apropriada resistência ao desgaste e capacidade de amortecimento relevante (CHIAVERINI, 2002), que favorecem a sua ampla utilização na indústria. A obtenção desse material ocorre a partir do aumento no teor de silício (elemento grafitizante), obtendo-se a grafitização desejada por meio da redução da velocidade de resfriamento, para que a cementita tenha tempo suficiente para se decompor (MOCELLIN, 2002; DORÉ, 2007).

2.3 Ferro fundido vermicular

O ferro fundido vermicular ou CGI, do inglês *Compacted Graphite Iron*, é conhecido desde a década de 40, porém a sua utilização em escala industrial teve início na década de 90, quando a empresa *SinterCast* passou a comercializar a tecnologia e os equipamentos necessários para romper a principal barreira para sua utilização na indústria: a falta de um processo confiável de controle aplicável a uma produção em larga escala (MOCELLIN, 2002; XAVIER, 2003).

Em relação à morfologia da grafita do ferro fundido vermicular, verifica-se que esta é intermediária à 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; DAWSON, 2002)

Vencida essa barreira, o CGI vem ganhando espaço, sobretudo na indústria automobilística, graças às suas propriedades mecânicas maiores do que as do ferro fundido cinzento. Por esse motivo, vem sendo empregado na fabricação de peças que em geral são em ferro fundido cinzento, tais como discos de freios, coletores de escapamento, cabeçotes e, principalmente, em blocos de motores a diesel (GUESSER; GUEDES, 1997). Esse material com maior resistência possibilita que se fabriquem motores mais potentes, de mesmo tamanho, ou, então, motores mais compactos com a mesma potência, com a vantagem adicional de que proporcionam combustão mais eficiente e, portanto, menos poluentes.

2.4 Propriedades físicas e mecânicas do cinzento, vermicular e nodular

A diferença entre as propriedades mecânicas dos três principais tipos de ferros fundidos, ocorre em razão da diferença na morfologia da grafita, como pode ser visto na Figura 2-1.

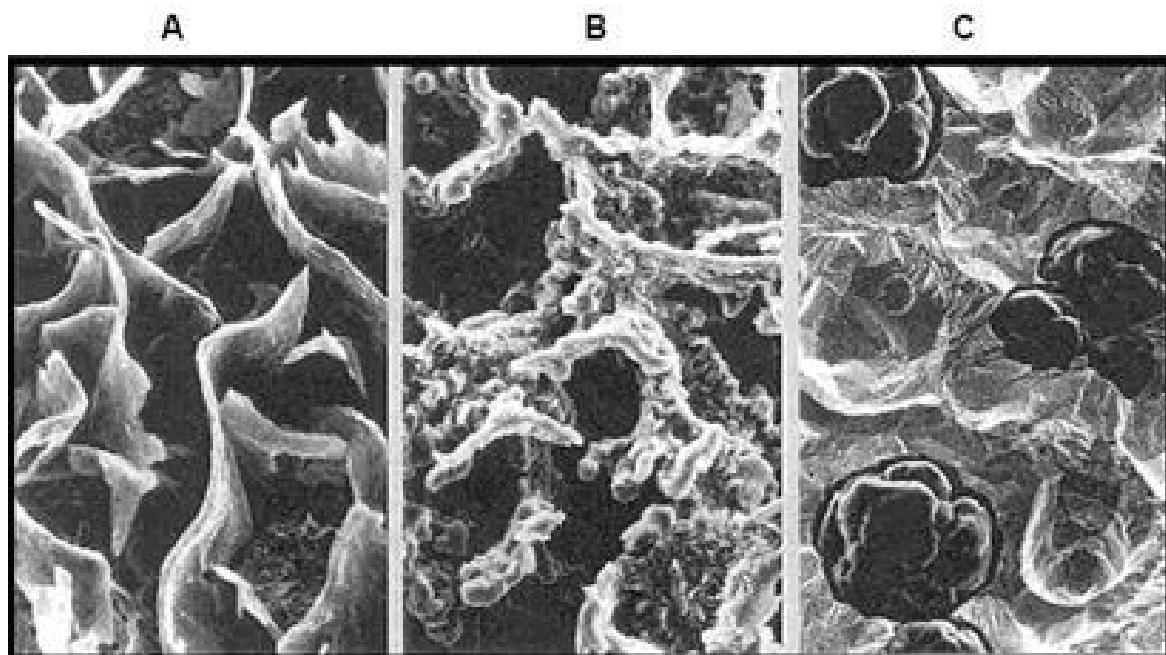


Figura 2-1 – Morfologia típica da grafita encontrada nos ferros fundidos. A (cinzento), B (vermicular) e C (nodular). Imagens geradas por MEV (DAWSON et al., 2001).

Pode-se observar que a grafita da estrutura A se apresenta na forma de lamelas e a estrutura B na forma de lamelas mais curtas com as extremidades arredondadas, o que torna a nucleação e propagação de trincas muito mais difíceis do que nos ferros fundidos que apresentam a grafita na forma lamelar (GUESSER, 2002). Já a estrutura C se apresenta na forma esférica ou em nódulos.

No ferro fundido vermicular (estrutura B), as extremidades arredondadas das lamelas da grafita não agem como pontos de concentração de tensões, e a grafita interconectada propicia taxa maior de transferência de calor e dissipação de vibrações do que o nodular, o que garante boas propriedades físicas e mecânicas (ASM, 1996 citado por XAVIER, 2003; GUESSER, 1997).

Por outro lado, a estrutura lamelar do ferro fundido cinzento proporciona melhor condutividade térmica e amortecimento, garantindo também a este melhor usinabilidade se comparado aos outros dois.

Na Tabela 2-1 é possível verificar as diferenças entre as propriedades mecânicas e físicas dos três ferros fundidos, enquanto na Tabela 2-2 estão expostas algumas vantagens do ferro fundido vermicular, em relação aos ferros fundidos cinzento e nodular.

Tabela 2-1 – Propriedades mecânicas e físicas dos ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular (Modificada de *Technical Articles*, 2000; ASM, 1996; GUESSER, 1997; HICK, 2000 citados por XAVIER, 2003 e SPECTRU, 2007).

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência à tração (MPa)	235	500	650
Módulo de elasticidade (GPa)	110	140	165
Resistência à fadiga (MPa)	100	205	265
Condutividade térmica [W/(mK)]	48	38	28
Dureza [HB]	200	225	270
Limite de escoamento 0,2%	160	380	425
Capacidade de amortecimento	$13,2 \times 10^{-4}$	$4 \text{ a } 6 \times 10^{-4}$	$2 \text{ a } 5 \times 10^{-4}$

Tabela 2-2 – Vantagens do vermicular em relação ao cinzento e nodular (modificado de SPECTRU, 2007).

Vantagens do ferro fundido vermicular em relação ao cinzento	Vantagens do ferro fundido vermicular em relação ao nodular
Maior resistência sem adição de elementos de liga	Maior condutividade térmica
	Maior capacidade de amortecimento de vibrações
Maior relação $\bar{\sigma}$ /HB	Melhor usinabilidade
Menor sensibilidade à secção	Melhor fundibilidade, que permite fabricar peças mais complexas
Maior ductilidade	Melhor resistência à fadiga térmica e choques térmicos

2.4.1 Condutividade térmica dos ferros fundidos

Em algumas aplicações, em especial para a indústria automobilística, a condutividade térmica é a principal razão para a escolha do material específico, para componentes de motores de combustão interna e sistemas de freios. Assim, tem-se utilizado os ferros fundidos para compor peças como cabeçotes, blocos de motor, discos e tambores de freios, entre outros, aliando suas boas propriedades mecânicas à sua boa condutividade térmica.

O uso recente do ferro fundido vermicular na fabricação de cabeçotes criou a necessidade de se estudar suas propriedades mais profundamente, em especial a sua condutividade térmica.

Ao compará-lo com o ferro fundido cinzento (Tabela 2-1), sua condutividade térmica apresenta valores mais baixos, o que dificulta a sua aplicação em tais componentes, no entanto apresenta propriedades mecânicas melhores. Porém, quando é comparado ao ferro fundido cinzento, com quantidades maiores de elementos de liga (Cu, Sn, Cr, Mo), os valores de condutividade são muito próximos, em virtude de esses elementos reduzirem a condutividade térmica (GUESSER et al., 2005).

Os valores de condutividade térmica também dependem das fases metalográficas dos ferros fundidos; a exemplo disso tem-se a ferrita, que apresenta maior condutividade térmica do que a perlita e a cementita, como pode ser visto na Tabela 2-3.

Tabela 2-3 – Condutividade térmica dos constituintes metalográficos dos ferros fundidos (STEFANESCU, 2003, modificado de GUESSER et al., 2005).

Constituintes Metalográficos	Condutividade Térmica ($Wm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$)		
	0-100 $^\circ C$	500 $^\circ C$	1000 $^\circ C$
Ferrita	71-80	42	29
Perlita	50	44	40
Cementita	7-8	-	-
Grafita	-	-	-
Plano cristalino paralelo	293-419	84-126	42-63
Plano cristalino perpendicular	84	-	-

Assim como as fases metalográficas, a forma, a quantidade e a orientação da grafita também influenciam na condutividade térmica. Se a grafita estiver disposta de forma paralela no plano basal, em vez de perpendicular, a propagação do calor, principalmente nos ferros fundidos cinzentos, será maior (GUESSER et al., 2005).

A Figura 2-2 ilustra a propagação do calor para grafita paralela no plano basal. Note-se que no aço o sentido da propagação do calor é em linha reta, enquanto no caso dos ferros fundidos ela contorna a grafita e segue em direção à próxima grafita.

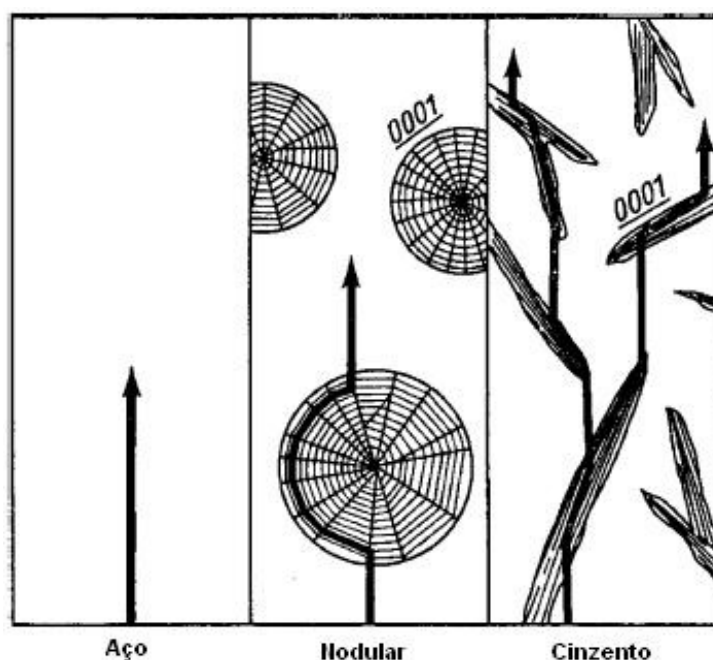


Figura 2-2 – Propagação do calor para grafita paralela no plano basal (KEMPERS, 1966, modificado de HOLMGREN; KÄLLBOM; SVENSSON, 2007).

Verifica-se que, no caso do ferro fundido cinzento, a propagação do calor flui melhor de uma grafita para outra, porque o alinhamento da grafita no plano basal propicia um caminho para o fluxo de calor com poucas interrupções na matriz, conforme pode ser visto na Figura 2-2 (HOLMGREN; KÄLLBOM; SVENSSON, 2007). Nos ferros fundidos cinzentos, a condutividade térmica diminui conforme se aumenta a temperatura, sendo esta uma tendência observada em várias pesquisas já realizadas (ANGUS, 1960; VDI-VERLAG, 1988; STEFANESCU, 2003 citados por GUESSER et al., 2005; HOLMGREN; KÄLLBOM; SVENSSON, 2007), porém nada se concretizou acerca das causas desse comportamento.

No entanto, constatou-se que o efeito da temperatura na redução da condutividade térmica é maior entre os ferros fundidos cinzentos com maior quantidade de carbono. Tal comportamento pode ser observado na Tabela 2-4, em que se tem valores de condutividade térmica obtidos em diferentes faixas de temperatura com duas ligas de ferro fundido vermicular (CGI) e duas de ferro fundido cinzento.

Os resultados da Tabela 2-4 apresentam a maior condutividade térmica do ferro fundido cinzento em relação ao ferro fundido vermicular, todavia a diferença entre a condutividade térmica dos dois materiais diminui conforme se aumenta a temperatura, porque a condutividade térmica do ferro fundido cinzento diminui com o aumento da temperatura. O mesmo não se observa no ferro fundido vermicular, pois a variação da condutividade térmica não é significativa com a variação da temperatura.

Outro ponto observado por Guessser e outros (2005) é que a liga de ferro fundido cinzento série 300 apresenta menor condutividade térmica do que a da série 250; isso ocorre em virtude de a primeira conter menor quantidade de carbono e maior quantidade de elementos de liga que a segunda, reduzindo assim a condutividade térmica (GUESSER et al., 2005).

Tabela 2-4 – Resultados de condutividade térmica com ferro fundido vermicular e cinzento em diferentes temperaturas (GUESSER et al., 2005).

Temperatura (°C)	Condutividade Térmica (W/K.m)			
	CGI350	CGI450	Cinzento 250	Cinzento 300
100	37,0	33,6	50,0	45,5
200	37,4	34,2	46,6	43,15
300	37,2	34,3	43,6	41,2
400	36,5	33,9	40,9	39,7

Como a condutividade térmica depende das fases metalográficas, ou seja, aumenta com a quantidade de ferrita (que tem alta condutividade térmica) e diminui com a perlita, grafita e cementita (que tem baixa condutividade) (ver Tabela 2-3) (PIESKE; CHAVES FILHO; REIMER, 1974). A presença de elementos de liga nos ferros fundidos atua variando a quantidade desses microconstituintes, em geral, diminuindo a condutividade térmica para uma determinada matriz.

Isso pode ser observado na Tabela 2-5, na qual se verificam os elementos de liga e suas faixas de porcentagem, que podem estar presentes no ferro fundido cinzento, bem como a porcentagem de redução da condutividade térmica em razão de sua adição (GUESSER et al., 2005).

Tabela 2-5 – Efeito dos elementos de liga na condutividade térmica do ferro fundido cinzento (STEFANESCU, 2003, modificado de GUESSER et al., 2005).

Elemento	Variação (%)	Efeito na condutividade (%)
Silício	1 - 6	-6
	0,65 - 4,15 (nodular)	-14,7
Manganês	0 - 1,5	-2,2
Cromo	0 - 0,39	+21
	0 - 0,5	-30
Cobre	0 - 1,58	-4,7
Níquel	0 - 0,74	-14,5
Molibdênio	0 - 0,58	-12
Tungstênio	0 - 0,475	-5,2
Vanádio	0 - 0,12	0

O último fator a se considerar é o teor de nodularidade do ferro fundido vermicular, que exerce influência sobre o aumento ou a redução de sua condutividade térmica, principalmente quando comparado ao ferro fundido cinzento de baixa liga. Isso ocorre porque a grafita na forma de nódulos faz com que o caminho do fluxo de calor tenha maior número de interrupções, diminuindo a condutividade térmica, e, como o ferro fundido vermicular apresenta um percentual de grafita nodular na sua microestrutura, esta atua reduzindo a sua condutividade térmica.

Essa influência pode ser vista na Figura 2-3, que apresenta valores de condutividade térmica em várias faixas de temperatura de uma liga de ferro fundido

cinzento e quatro ligas de ferro fundido vermicular, todas com a mesma faixa de carbono, sendo variada a nodularidade e quantidade de perlita.

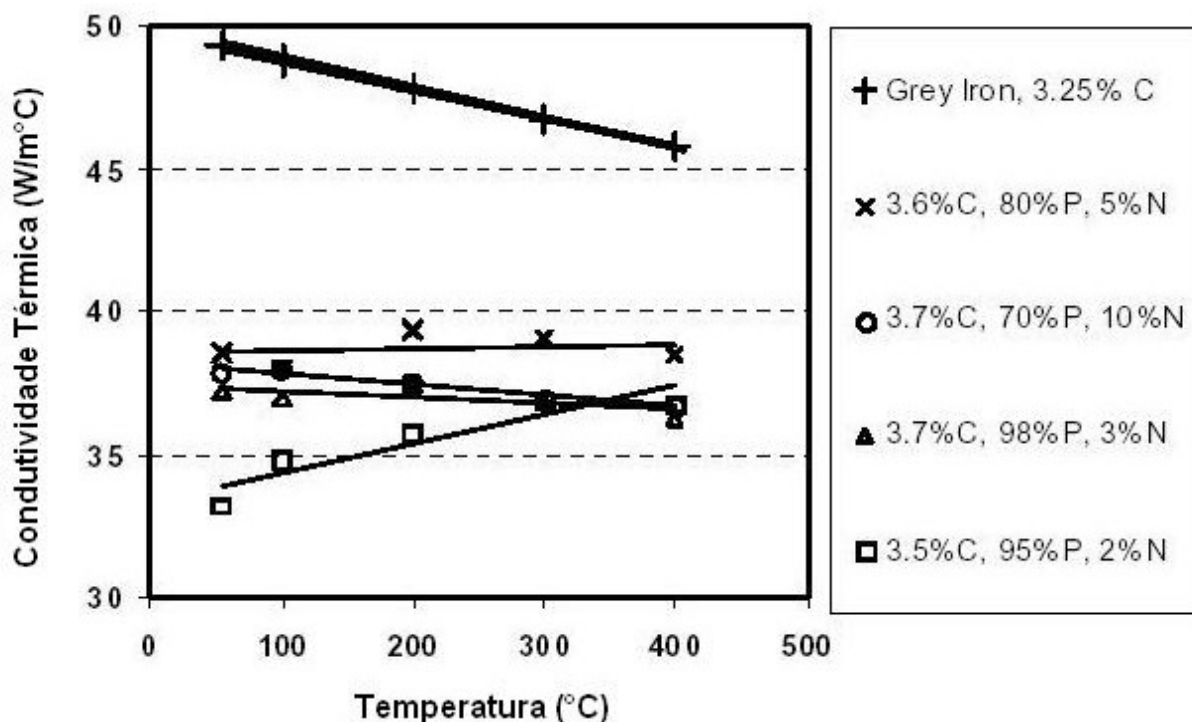


Figura 2-3 – Valores de condutividade do ferro fundido vermicular com diferentes nodularidades (P é a porcentagem de perlita e N a porcentagem de nódulos), comparadas a condutividade térmica a uma liga de ferro fundido cinzento (SHAO, 1997, citado por GUESSER et al., 2005).

2.5 Usinabilidade dos ferros fundidos cinzento e vermicular

A usinabilidade compreende a dificuldade ou facilidade de se remover material, obtendo-se, assim, uma peça acabada com a forma e as dimensões desejadas.

Com relação aos ferros fundidos, a usinabilidade desses materiais varia de acordo com os seus elementos de liga e conforme a quantidade e forma da grafita, que atua reduzindo o atrito entre a ferramenta e a peça (ANDRADE, 2005).

A grafita, portanto, concede aos ferros fundidos melhor usinabilidade, quando comparados a outros materiais que não possuem a grafita em sua estrutura como, por exemplo, o aço (KÖNIG, 1997 citado por ANDRADE, 2005).

A presença da grafita propicia a obtenção de cavacos quebradiços e forças de corte menores, levando a menor consumo de potência para usinagem e, conseqüentemente, prolongando a vida da ferramenta de corte. Além da grafita, a

matriz metálica dos ferros fundidos também exerce grande influência na sua usinabilidade (KÖNIG, 1997 citado por ANDRADE, 2005).

Já nos ferros fundidos de alta resistência e dureza, estão presentes a martensita, a bainita e a esteadita, as quais dificultam a usinagem, sendo muitas vezes necessária a redução dos parâmetros de corte.

No caso do ferro fundido vermicular, em relação ao ferro fundido cinzento, tem-se que aquele possui maior limite de resistência (cerca de 75% a mais) e maior rigidez (em torno de 45%), o que torna evidente a maior dificuldade na sua usinagem em relação ao ferro fundido cinzento (DAWSON; SCHROEDER, 2004).

Outro fator a se considerar entre esses dois ferros fundidos é a formação de sulfeto de manganês no ferro fundido cinzento, ausente no ferro fundido vermicular. O sulfeto de manganês se deposita na superfície da ferramenta de corte, garantindo lubrificação local, o que, conseqüentemente, reduz o coeficiente de atrito na interface cavaco/ferramenta, proporcionando menor desgaste da ferramenta (GASTEL et al., 2000; Pereira; BOEHS; GUESSER, 2006).

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 et al., 2000).

É importante ainda destacar que, ao mesmo tempo 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.

Essa diferença de usinabilidade entre os dois materiais torna-se mais clara quando da análise da Figura 2-4 (a) e (b), na qual observa-se resultados de um estudo feito por Reuter e outros (2001).

Nesse estudo, utilizando-se parâmetros de corte comumente empregados na usinagem do ferro fundido cinzento, isto é, velocidades de corte entre 150-250 m/min e ferramentas convencionais de metal-duro, obteve-se cerca de 50% da vida da ferramenta em relação à obtida na usinagem do ferro fundido cinzento, em operações de fresamento e de torneamento (DAWSON; SCHROEDER, 2004).

De forma similar, nas operações de fresamento a altas velocidades de corte (400-800 m/min), obteve-se aproximadamente 50% da vida da ferramenta em relação à obtida na usinagem do ferro fundido cinzento, ao usar o nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) ou insertos cerâmicos (Figura 2-4 (a)).

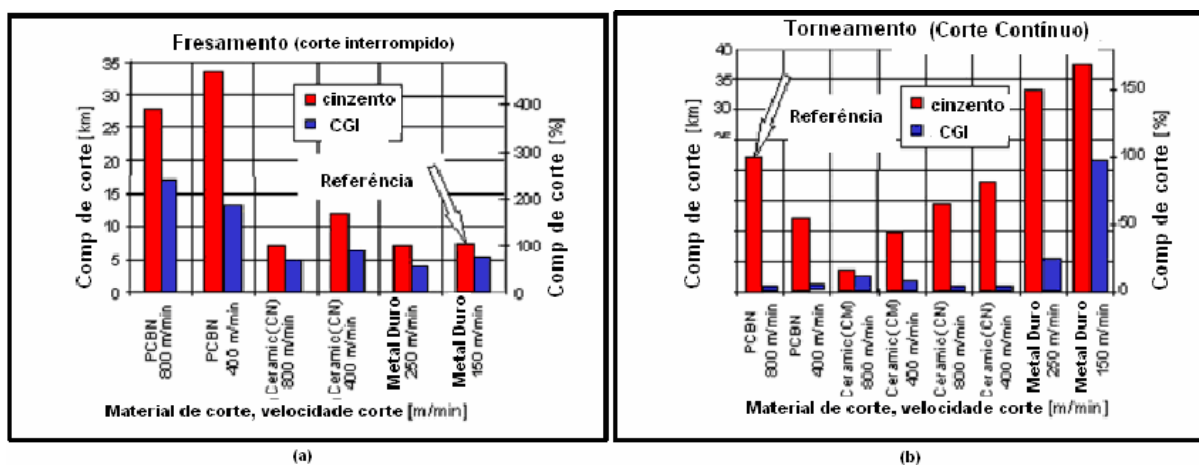


Figura 2-4 – Vida comparativa para diferentes materiais de ferramenta de corte, para corte interrompido (a) e contínuo (b) do CGI perlítico e do ferro fundido cinzento (Modificada de REUTER e outros, 2001).

Entretanto, a diferença entre a usinabilidade do CGI e do ferro fundido cinzento é mais significativa ao usar PCBN ou insertos de cerâmica em operações contínuas a altas velocidades de corte, tais como o torneamento ou mandrilamento de cilindros, como pode ser observado na Figura 2-4 (b). Isso ocorre porque um cilindro de um motor tem cerca de 90 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, sendo que o inserto da ferramenta fica em contato contínuo com a peça por aproximadamente 100 m, à medida que faz um movimento em forma de espiral ao longo do cilindro (DAWSON; SCHROEDER, 2004).

Sob as condições descritas, o acúmulo de tensões mecânicas e térmicas, combinadas com a difusão e oxidação, causam desgaste acelerado na ferramenta (DAWSON; SCHROEDER, 2004).

Reuter e outros (2000) explicam que, no fresamento a altas velocidades de corte, a tendência à difusão e à oxidação é menor em razão do corte ser interrompido. Seguindo essa linha de pesquisa, a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) também vem desenvolvendo trabalhos para investigar a usinabilidade do ferro fundido vermicular e cinzento.

Mocellin (2002) desenvolveu na UFSC um trabalho para avaliar a usinabilidade de ferro fundido vermicular com ensaios de furação. Em seu trabalho, foi utilizada uma liga de ferro fundido cinzento com 97% de perlita como referência, para cinco ligas de ferro fundido vermicular. Tais ligas foram obtidas por meio de variáveis controladas do processo de fundição, fornecendo tipos de ferro fundido vermicular com características de usinabilidade diferentes, conforme se verifica nos resultados na Figura 2-5.

Dessa forma, verifica-se que a liga de ferro fundido vermicular 2 (100% perlítico) foi obtida com alto teor de manganês, porém apresentou o pior resultado em relação ao ferro fundido cinzento. Assim, levando-se em consideração que a proporção de perlita entre os dois é muito próxima, a liga de vermicular 3 apresentou o melhor resultado de usinabilidade, no entanto sua proporção de perlita era muito baixa em relação ao ferro fundido cinzento, além disso, suas propriedades mecânicas eram piores do que as do ferro fundido cinzento.

As outras ligas de ferro fundido vermicular apresentaram resultados melhores em relação ao vermicular 2, por possuir menor quantidade de perlita, mas com propriedades mecânicas superiores às do ferro fundido cinzento.

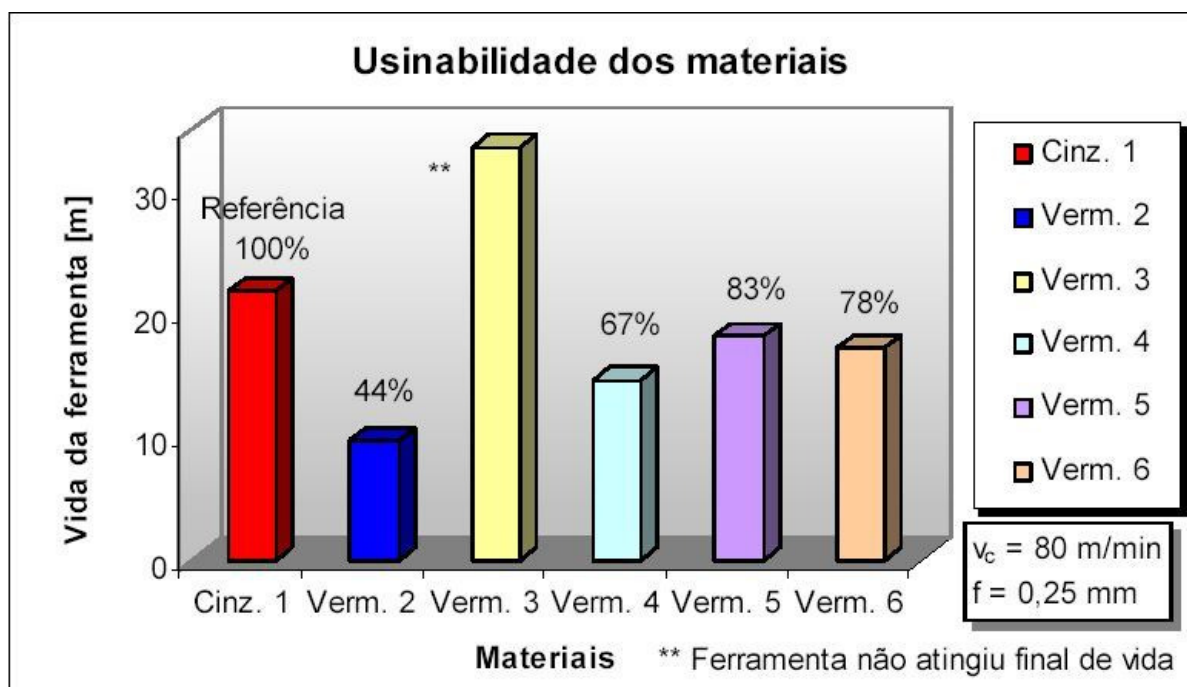


Figura 2-5 – Resultados obtidos em ensaios de furação (MOCELLIN, 2002).

Outro trabalho desenvolvido na UFSC foi com ensaios de torneamento (XAVIER, 2003). O foco do autor foi verificar qual o melhor material de ferramenta para usinar o ferro fundido vermicular. Para tanto, foram utilizados três tipos de ferramentas: metal-duro, cerâmica e CBN, de dois fabricantes diferentes.

Quanto ao material usinado, foi utilizada uma liga de ferro fundido vermicular com 8% de nodularidade e com 92% de perlita. Alguns resultados obtidos neste estudo estão expostos na Figura 2-6.

Constata-se, pela Figura 2-6, que o desempenho das ferramentas de metal-duro foram bem superiores ao apresentado pelas ferramentas de cerâmica e CBN,

principalmente nos resultados apresentados pelo fabricante A. Esse melhor desempenho é em virtude de o metal-duro ter sido submetido a velocidades de corte mais baixas, quando os efeitos do aumento da temperatura e da abrasão são menores.

A diferença entre o desempenho dos fabricantes, no caso do metal-duro, é em razão, em grande parte, de o fato do fabricante A ter fornecido sua ferramenta com uma camada a mais de revestimento de TiN, protegendo-a por maior tempo do efeito abrasivo (XAVIER, 2003).

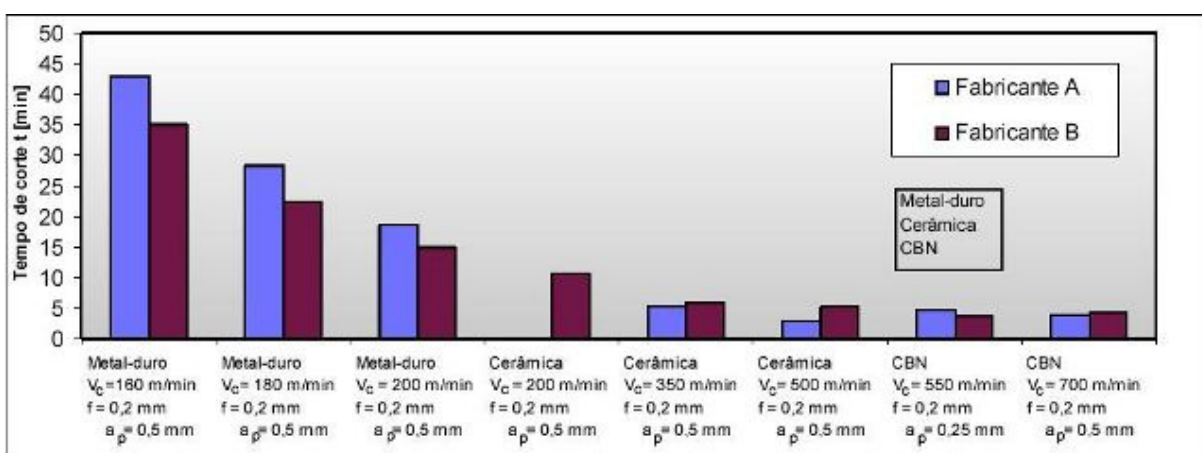


Figura 2-6 – Comparativo entre os resultados com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN em diferentes condições de corte no torneamento (XAVIER, 2003).

Andrade (2005) analisou a usinabilidade do ferro fundido vermicular no processo de furação com brocas de canais retos revestidas com Ti e TiAlN. Alguns dos resultados obtidos pelo autor estão ilustrados na Figura 2-7.

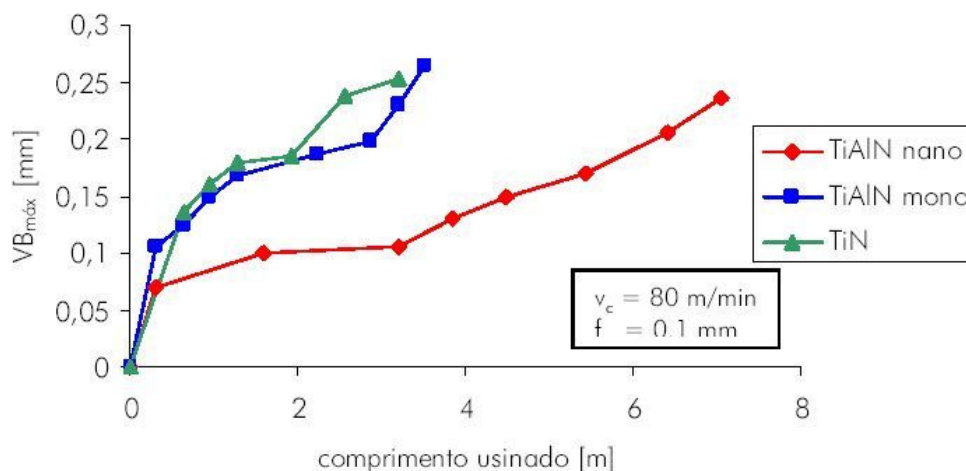


Figura 2-7 – Curvas de desgaste obtidas para brocas revestidas com TiAlN monocamada e com várias camadas nanométricas e revestida com TiN a $v_c=80$ m/min com refrigeração externa (ANDRADE, 2005).

A liga de ferro fundido vermicular utilizada apresentava 98% de perlita e nodularidade em torno de 10%. Os ensaios para avaliar a vida das ferramentas foram realizados com refrigeração externa e avanço intermitente e com refrigeração interna e avanço contínuo.

Pela Figura 2-7, observar-se que a broca revestida com várias camadas nanométricas de TiAlN obteve o melhor desempenho. O maior número de camadas, associado à tecnologia nanométrica, possivelmente deve ter fornecido maior resistência ao desgaste do que os demais revestimentos.

Referente ao TiN, pode-se afirmar que a sua menor resistência deve-se, provavelmente, em virtude da sua menor dureza e menor resistência a quente do que o TiAlN (FA. BALZERS, 2005b citado por ANDRADE, 2005). É provável que o revestimento TiAlN de camada única tenha se desprendido precocemente da ferramenta em consequência de sobrecargas na usinagem, expondo o substrato, de maneira direta, à zona de corte (ANDRADE, 2005).

O autor concluiu que o revestimento TiAlN, seja de camada única seja de várias camadas depositadas com espessuras nanométricas, apresenta-se como opção adequada para a usinagem do ferro fundido vermicular, considerando a velocidade de corte de 80 m/min, em geral utilizada na produção de blocos em vermicular.

Outro trabalho desenvolvido dentro dessa mesma linha de pesquisa, também na UFSC, foi o de Doré (2007). O autor verificou a influência do teor de nodularização no ferro fundido vermicular na sua usinabilidade. Seu trabalho foi desenvolvido com ensaios de torneamento, com três variações de ligas de vermicular, sendo estas com 6%, 26% e 36% de nodularidade, que o autor denominou, respectivamente, de VER-1, VER-2 e VER-3. Foram utilizadas três variações de ferramentas de metal-duro e cinco variações de ferramentas cerâmicas. Na Figura 2-8, está ilustrado o resultado geral do seu estudo.

Pelo gráfico da Figura 2-8, verifica-se que a liga VER-1, com menor nodularidade, foi a que apresentou a maior dureza e maior resistência, fatores esses associados à presença de carbonetos na liga. Essas características aumentaram a abrasividade do cavaco sobre as ferramentas, intensificando, nestas, o desgaste por abrasão, sobretudo nas ferramentas de metal-duro e nas cerâmicas não comerciais (quatro últimas no gráfico da esquerda para direita, Figura 2-8).

Nas ligas VER-2 e VER-3, que foram fornecidas com nodularidade maior, a dureza e resistência das ligas foram menores. Tal diminuição, principalmente em

relação à dureza, está associada ao aumento de ferrita nas ligas. A característica do desgaste nas ferramentas na usinagem dessas ligas muda, pois ocorre a eliminação dos carbonetos, e a nodularidade é bem maior. Nessa condição, o cavaco tende a ficar mais tempo em contato com a ferramenta, aumentando as solicitações térmicas sobre as ferramentas (DORÉ, 2007).

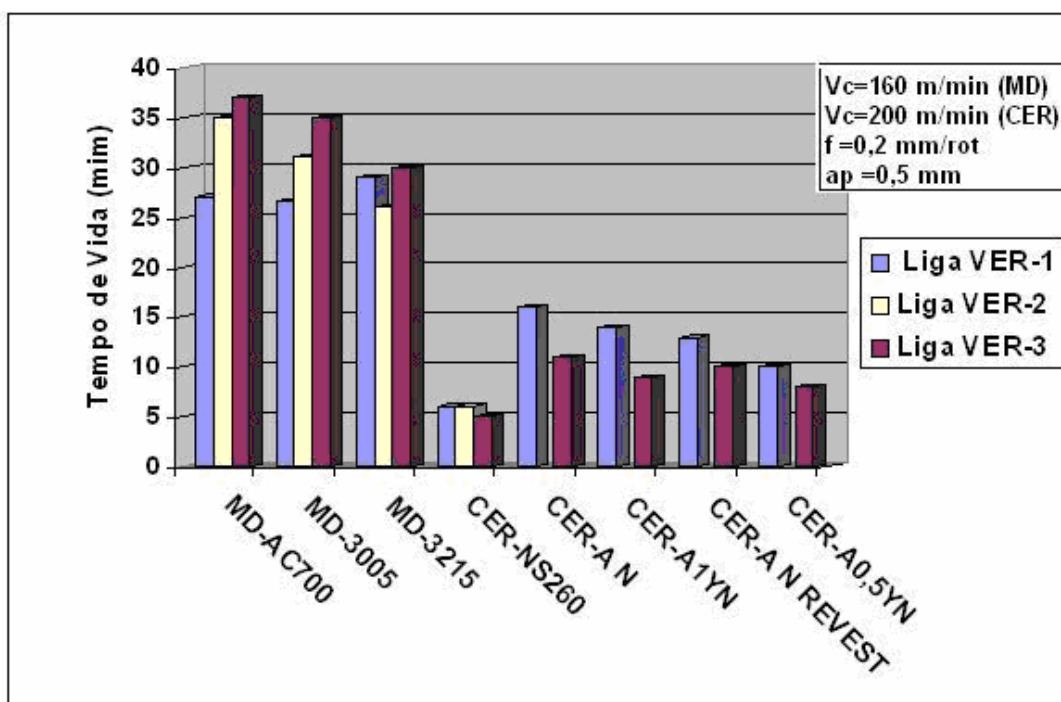


Figura 2-8 – Resultados obtidos com ferramentas de metal-duro e cerâmica para três ligas de vermicular (DORÉ, 2007).

Assim, o autor concluiu que, de maneira geral, os resultados apresentados confirmam que o metal-duro ainda é a melhor solução para a usinagem do vermicular, bem como apresentam resultados expressivos de novas ferramentas cerâmicas, de óxido de alumínio com carboneto de nióbio e óxido de ítrio (ferramentas não comerciais).

Dentre os estudos de usinabilidade do ferro fundido cinzento, inseridos nessa linha de pesquisa, há o de Meurer (2007), o qual analisou a usinabilidade desse material por intermédio de ensaios de usinagem 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 ainda 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 2-9.

Esses resultados deixam evidente o melhor desempenho da ferramenta de metal-duro, tanto na remoção da camada bruta de fundição quanto no desbaste pós-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) e da 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).

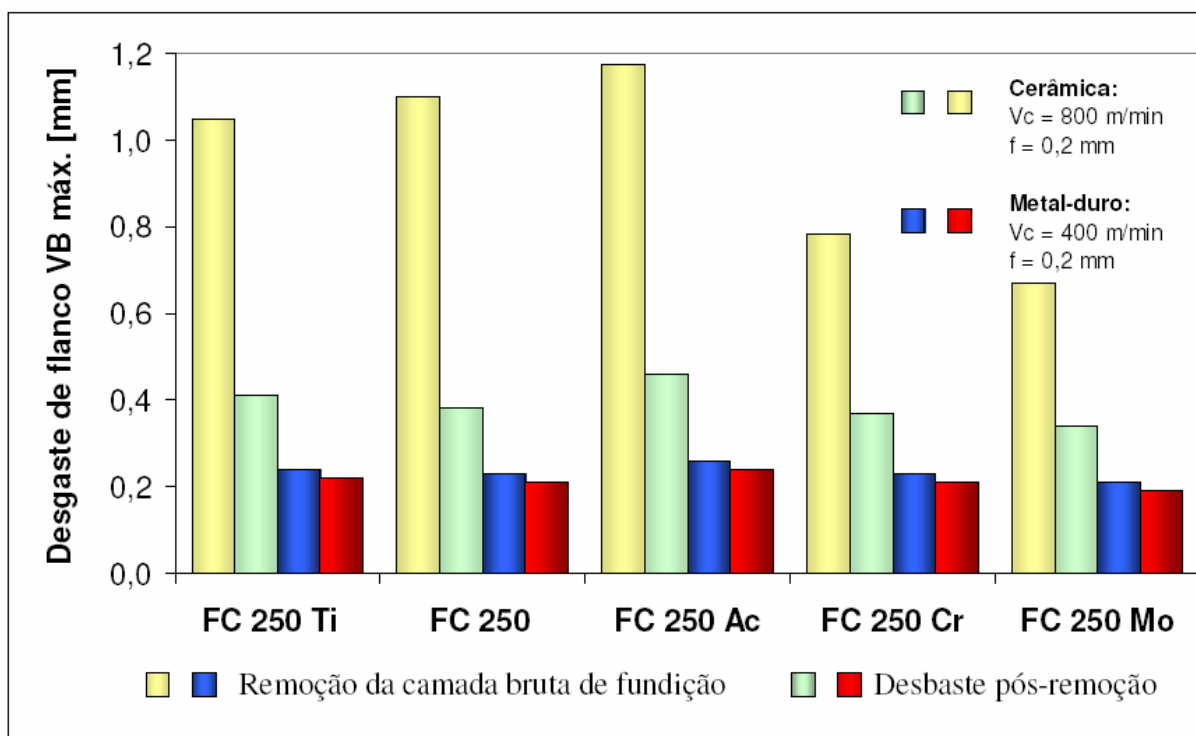


Figura 2-9 – Comportamento do desgaste da ferramenta cerâmica e metal-duro após usinagem de 32 corpos-de-prova (MEURER, 2007).

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 Mo. 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 com dureza mais baixa (MEURER, 2007).

Todavia, o ferro fundido cinzento com alto carbono FC 250 AC mostrou a pior usinabilidade na usinagem com ferramentas cerâmicas e metal-duro, embora a análise de variância não mostre uma diferença significativa perante as demais ligas no desgaste pós-remoção.

O ferro fundido cinzento ligado com cromo FC 250 Cr apresentou a segunda melhor usinabilidade. Apesar da adição de 200 ppm de cromo na sua microestrutura, não foi observado um desgaste acentuado de $VB_{máx}$. O efeito de uma inoculação apropriada com elementos grafitizantes deixou a liga com boa usinabilidade.

A liga FC 250 Ti apresentou a segunda pior usinabilidade, em razão de apresentar a maior quantidade de partículas de carbonitreto de titânio, altamente duras, que acabaram prejudicando a usinabilidade desse material.

A liga FC 250, a mais comum para a produção de discos de freio, no desgaste pós-remoção, apresentou a terceira melhor usinabilidade, porém, na remoção da camada bruta de fundição, foi a quarta, isso em decorrência de pior eficiência de limpeza do fundido.

2.5.1 Variáveis que influenciam na usinabilidade

Analisando os trabalhos expostos anteriormente, verifica-se que são muitas as variáveis que influenciam na usinabilidade do ferro fundido cinzento e vermicular. Levando-se em consideração tal fato, alguns autores investigaram as variáveis que influenciam nessas diferenças de usinabilidade, as quais são abordadas a seguir.

a) Forma da grafita

Nos ferros fundidos, a forma, o tamanho e a quantidade da grafita em geral têm maior influência do que a sua composição (REUTER et al., 2000 citado por MOCELLIN, 2002).

A variação da forma da grafita de lamelar (tipo de grafita do ferro fundido cinzento) para o formato da grafita observada no ferro fundido vermicular altera o modo de ruptura do cavaco de frágil para dúctil.

A morfologia das grafitas do ferro fundido vermicular não permite a clivagem nem a propagação de trincas. Lämpic e Henkel, citados por Doré (2007) e Andrade (2005), atribuem parte do maior desgaste da ferramenta na usinagem do ferro fundido vermicular à integração da grafita na matriz metálica, a fim de promover maior resistência mecânica e maior tenacidade do material (REUTER et al., 2001 citado por DORÉ, 2007; ANDRADE, 2005).

b) Influência da perlita

Os ferros fundidos são materiais compósitos formados por partículas de grafita em uma matriz de ferrita e/ou perlita. A perlita é constituída por uma estrutura lamelar alternada entre ferrita e cementita (Fe_3C), que reforçam a matriz, deixando-a mais dura e resistente (DAWSON, 1999). O seu efeito pode ser considerado de duas maneiras: quantidade de Fe_3C nas colônias de perlita, que está ligado diretamente à velocidade de resfriamento do material durante a decomposição da austenita, na temperatura de 725°C e pela proporção relativa de perlita e ferrita, que é fator determinante na resistência mecânica do material. Assim, um aumento de 15% para 95% de perlita no ferro fundido vermicular, mantendo-se as outras variáveis constantes, proporciona um aumento no limite de resistência de 300 para 480 MPa (DAWSON et al., 1998 citado por MOCELLIN, 2002).

c) Influência do enxofre (S)

O teor de enxofre, ao lado da forma da grafita, é considerado a diferença mais significativa do ferro fundido vermicular em relação ao cinzento (DAWSON et al. 2001, citado por ANDRADE, 2005).

No cinzento, o teor de enxofre varia entre 0,08% a 0,12%, enquanto no vermicular fica no intervalo de 0,005% a 0,025%, em razão de as grafitas compactas serem estáveis somente com baixos teores de oxigênio e enxofre.

No ferro fundido cinzento, o enxofre reage com o manganês (Mn), formando inclusões de MnS , as quais formam uma camada protetora sobre a ferramenta, servindo como barreira contra os mecanismos de abrasão e difusão.

O ferro fundido vermicular, por sua vez, não forma tal camada, pois, além de possuir praticamente um décimo do teor de enxofre do ferro fundido cinzento, o magnésio (Mg), adicionado como elemento necessário para a formação das grafitas compactas, possui maior afinidade química com o S do que o Mn (REUTER; SHULZ, 1999, citados por ANDRADE, 2005). Assim, há a formação do sulfeto de magnésio em vez da formação do sulfeto de manganês, não havendo a formação da camada protetora (ANDRADE, 2005).

d) Influência do titânio

O titânio pode ser adicionado de forma intencional, ou pode ser oriundo da matéria-prima. A adição no ferro fundido vermicular pode ser para controlar a forma da grafita (faixa de 0,1% a 0,25%) ou para melhorar a resistência ao desgaste (faixa

de 0,04% a 0,07%), segundo Dawson e outros (2001). O titânio reage com o carbono e/ou nitrogênio presentes na liga, formando inclusões de carbonitreto de titânio. Assim, havendo um aumento no teor de titânio, a vida da ferramenta de corte apresenta uma redução drástica (MOCELLIN, 2002).

e) Influência do cromo

O cromo segrega-se facilmente, promovendo a formação de carbonetos, sobretudo nas últimas regiões em solidificação. O cromo é ainda um perlitzante potente, quando comparado ao manganês, pois o aumento do seu teor provoca a formação da perlita fina (ANDRADE, 2005). A redução de 0,18% para 0,10% do teor de Cr no ferro fundido vermicular pode proporcionar aumento de aproximadamente 40% da vida da ferramenta (DAWSON et al., 2001).

f) Influência do silício

O silício é um formador de ferrita e está presente no ferro fundido vermicular em uma quantidade que varia em torno de 2% a 2,4% que, junto com os elementos perlitzantes, permite atingir a proporção de perlita desejada.

Se o teor do silício for aumentado para 3% e dos elementos formadores de perlita forem reduzidos, o ferro fundido vermicular obtido terá uma matriz ferrítica. Entretanto, a elevada concentração de silício tende a endurecer a ferrita por solução-sólida, fazendo com que o material atinja valores de dureza e resistência do ferro fundido cinzento perlítico, ou até mesmo o do ferro fundido vermicular perlítico (MOCELLIN, 2002).

g) Influência das inclusões

Inclusões não-metálicas são comumente encontradas em todos os metais fundidos, sob a forma de óxidos, nitretos, sulfetos ou complexos intermediários. Essas inclusões podem ser duras e abrasivas, como o TiC, ou mole e maleável, como o MnS (ANDRADE, 2005).

Tais inclusões são resultantes das impurezas na liga ou são, de forma proposital introduzidas para melhorar determinadas propriedades do material da peça. Inclusões abrasivas e dúcteis são adicionadas para melhorar a resistência ao desgaste e a usinabilidade do material, respectivamente (PEREIRA; BOEHS; GUESSER, 2005).

h) Influência do grau de nodularidade

Altas taxas de resfriamento favorecem a formação de partículas de grafita nodular na microestrutura do CGI, o que influencia, de modo direto, as propriedades físicas e mecânicas do material (SINTERCAST, 2001).

Aumentando a nodularidade, aumentam-se também a força e a rigidez do material, diminuindo a usinabilidade e a condutividade térmica. Em geral, é usado um limite de nodularidade de 20% para especificações de ferro fundido vermicular (GUESSER, 2003; DAWSON; SHROEDER, 2004).

2.6 Processo de fresamento

Fresamento é o processo de usinagem no qual a remoção de material ocorre de modo intermitente, por meio do movimento da ferramenta de corte (normalmente multicortante), gerando superfícies das mais variadas formas.

Normalmente, a peça efetua o movimento de avanço (velocidade baixa), enquanto que a ferramenta, girando a uma velocidade relativamente alta, executa o movimento de corte, mantendo o eixo de giro numa posição fixa (STEMMER, 2005b).

De acordo com Stemmer (2005b), em geral, tanto a peça quanto a ferramenta podem se movimentar. Esses movimentos podem ser tanto independentes quanto combinados, o que permite ampla gama de operações, gerando superfícies planas ou curvas, ranhuras, ressaltos, roscas, engrenagens e outras formas.

Tal fato proporciona vantagens ao processo de fresamento, em virtude da variedade de formas que podem ser produzidas, da qualidade da superfície obtida, das altas taxas de remoção de cavacos e da disponibilidade de ampla variedade de ferramentas.

Uma outra característica do processo é que cada gume da ferramenta (fresa) remove uma porção de material da peça na forma de pequenos cavacos individuais (POLLI, 2005).

O fresamento pode ser dividido em dois principais grupos (fresamento frontal e fresamento periférico), de acordo com Stemmer (2005b), conforme se verifica na Figura 2-10. Outros métodos podem ser considerados variações desses dois.



Figura 2-10 – Fresamento frontal e periférico (KÖNIG, 1999 citado por POLLI, 2005).

As diferenças entre os dois são:

- Periférico** (concordante ou discordante): operação nas 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 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).
- 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 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

O fresamento é utilizado tanto para desbaste quanto para acabamento de peças. No caso do fresamento frontal (por exemplo, as faces do bloco do motor), Stemmer (2005b) recomenda que o diâmetro da fresa seja maior do que a largura a ser fresada (recomenda-se $D > 1,5 \times a_e$), como pode ser visto na Figura 2-11.

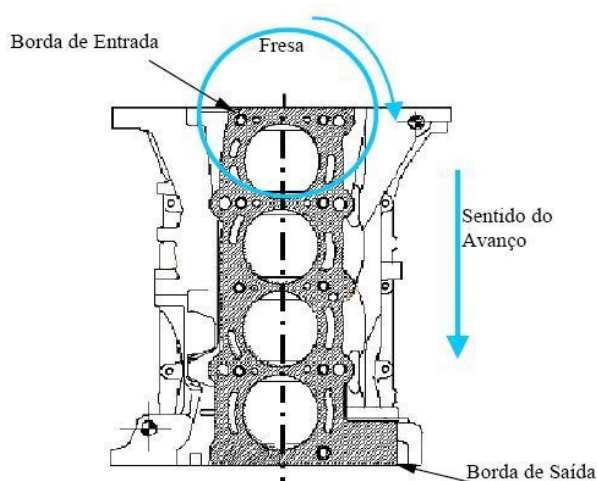


Figura 2-11 – Fresamento da face dos cilindros do bloco de motor (SILVA et al., 2005).

Deve-se evitar a utilização de fresas com diâmetro excessivo, pois, além de antieconômicas, são mais sensíveis a deflexões e vibrações. Por outro lado, fresas com diâmetro igual à largura da peça proporcionam espessura de cavaco muito pequena na entrada e saída, acelerando o desgaste por abrasão, além da tendência do cavaco se soldar ao gume da ferramenta (STEMMER, 2005b).

2.6.1 Forças no processo de fresamento

É importante conhecer as forças que atuam durante os processos de usinagem, não somente para se estimar a potência de corte requerida, mas também porque estas devem ser consideradas para o projeto de máquinas e de seus componentes (COSTA, 1997; MANGONI, 2004; POLLI, 2005).

A força de usinagem é definida como a força resultante F que atua sobre o gume da ferramenta durante a usinagem. Essa força é responsável pela deformação local do material e, conseqüentemente, formação de cavaco. A força F é decomposta em três outras forças: força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p), conforme pode ser observado na Figura 2-12 (CIMM, 2007; MANGONI, 2004).

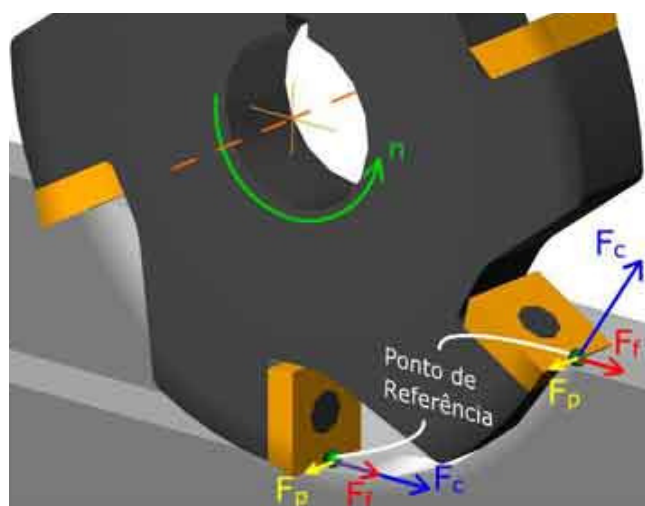


Figura 2-12 – Componentes da força de usinagem no processo de fresamento (CIMM, 2007).

- a) **Força de corte (F_c):** é a força que está no sentido da v_c e é responsável pela maior parte da potência de corte.
- b) **Força de avanço (F_f):** atua no sentido do avanço é a maior responsável pela deflexão da ferramenta.

- c) **Força passiva (F_p):** é perpendicular ao plano de trabalho (P_f); se a ferramenta tiver gumes retos ($k_r=90^\circ$ e $\lambda_s=0^\circ$), em alguns casos, é menor do que às outras duas.

Durante o processo de fresamento, cada dente ou inserto da fresa recebe uma carga de impacto quando entra na região de corte. A intensidade dessa carga depende do material da peça, da posição da ferramenta, dos parâmetros de usinagem e da geometria da ferramenta. As forças no fresamento são cíclicas e proporcionais à espessura de corte em cada posição (MANGONI, 2004), como pode ser visto na Figura 2-13.

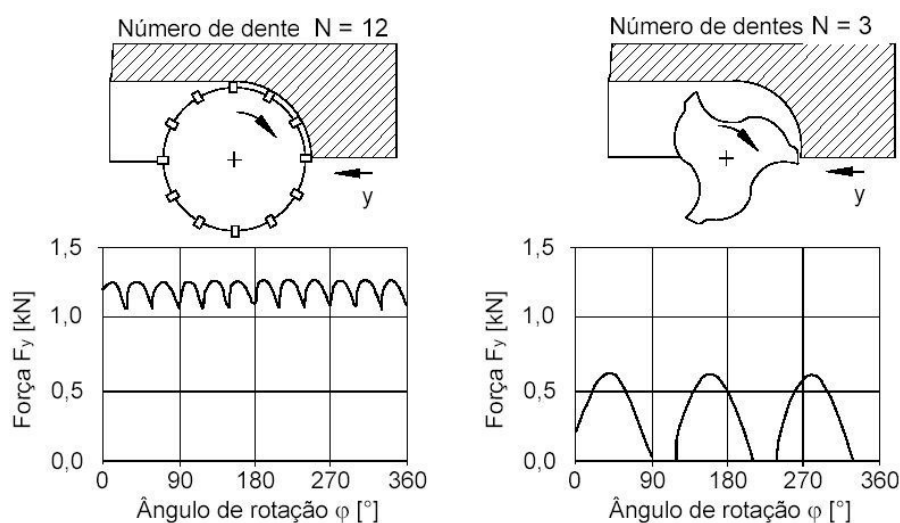


Figura 2-13 – Perfil instantâneo da força (MANGONI, 2004)

2.6.2 Fatores que influenciam nas forças de usinagem

Costa (1996) cita Machado et al. (1986, 1987), o qual relacionou alguns fatores de influência na força de usinagem, que são:

- a) **Material da peça:** quanto maior a resistência ao cisalhamento do material durante a usinagem, maior será a força de usinagem;
- b) **Material da ferramenta:** está relacionada à afinidade química do material da ferramenta com o da peça; se o material de peça apresentar grande tendência de aderência na ferramenta, a força de usinagem será maior, se a tendência for de diminuição do atrito evitando grande aderência, a força de usinagem será menor;
- c) **Velocidade de corte:** com o aumento da velocidade de corte, tem-se aumento do calor gerado durante a usinagem, reduzindo a resistência

do material da peça ao cisalhamento, o que tende a diminuir a força de usinagem;

- d) Avanço e profundidade de corte:** aumentando-se esses dois fatores, dos quais a profundidade de corte exerce maior influência, ocorre aumento na força de usinagem, por aumentar a área de contato entre o cavaco e a ferramenta;
- e) Geometria da ferramenta:** o ângulo que exerce maior influência é o ângulo de saída (γ_0), pois, quanto menor este for, maior é a área de contato da ferramenta com a peça e maior será a força de usinagem; aumentando-se o ângulo de direção do gume (χ_r), não alterando o ângulo de direção do gume lateral (χ'_r), percebe-se uma pequena redução na força de usinagem; o ângulo de folga (α_0) exerce influência se apresentar valores bem pequenos ($< 3^\circ$), aumentando, nesse caso, o atrito naquela região e, conseqüentemente, a força de usinagem;
- f) Estado de afiação da ferramenta:** em virtude do aumento do desgaste de flanco e/ou de cratera na ferramenta de corte, a área de contato entre a ferramenta e o cavaco (peça) aumenta, em geral aumentando a força de usinagem;
- g) Uso de fluido de corte:** depende da ação do fluido, pois se este atuar predominantemente como lubrificante, reduz a área de contato, reduzindo a força de usinagem; caso atue predominantemente como refrigerante, pode aumentar a força, pois aumenta a resistência ao cisalhamento do material da peça.

2.6.3 Tipos de desgaste de ferramentas de corte

Existem diversos tipos de avarias e desgastes que acontecem em uma ferramenta de usinagem, sendo os principais, conforme Diniz, Marcondes e Coppini (1999):

a) Desgaste de flanco: ocorre no flanco da ferramenta causado pelo contato entre ferramenta e peça, conforme pode ser visto na Figura 2-14.

b) Desgaste de cratera: é o tipo de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco. Quando o desgaste de cratera encontra o desgaste de flanco, gera o colapso da ferramenta de corte. Deve-se levar em consideração que a cratera gerada pode constituir uma

região de concentração de tensões, sendo um causador de quebras de ferramentas (Figura 2-14).

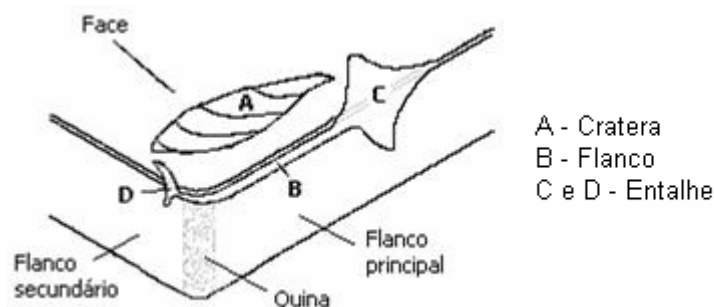


Figura 2-14 – Ilustração do desgaste de flanco, cratera e entalhe em uma ferramenta de corte (MACHADO e SILVA, 1999; STEMMER, 2005a).

c) Deformação plástica do gume de corte – é um tipo de avaria de ferramenta, que ocorre em virtude da pressão aplicada à sua quina, somada à alta temperatura, conforme Figura 2-15 (a). Tal deformação provoca deficiências do controle de cavacos e deterioração do acabamento da superfície da peça. O crescimento dessa deformação pode gerar a quebra do gume da ferramenta. Evita-se isso com o emprego de uma ferramenta com maior dureza a quente, maior resistência à deformação plástica, ou pela mudança das condições de usinagem e/ou geometria da ferramenta, visando à diminuição dos esforços e da temperatura de corte.

d) Lascamento – acontece quando partículas maiores são retiradas de uma só vez. Ocorrem principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando o gume da ferramenta é pouco reforçado (Figura 2-15 (b)).

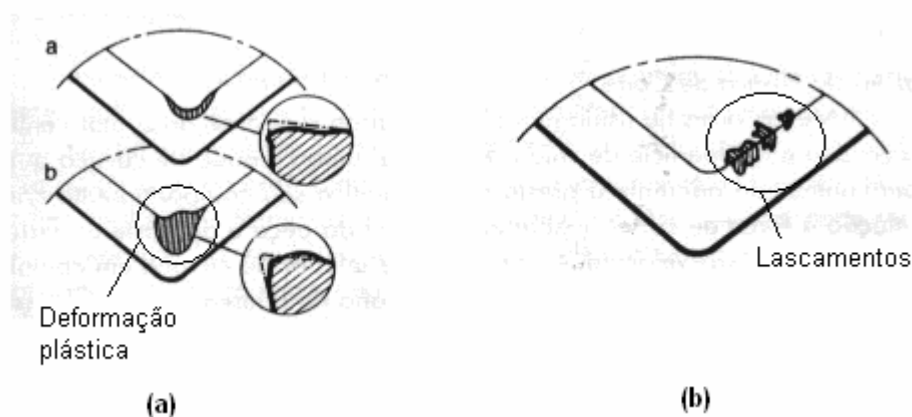


Figura 2-15 – (a) deformação plástica; (b) lascamentos, Diniz e outros (1999).

e) Trincas – são causadas pela variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos. Quando as trincas têm origem térmica (variação da temperatura), elas ocorrem perpendicularmente ao gume e, quando têm origem mecânica, são paralelas ao gume, conforme ilustradas na Figura 2-16.

f) Quebra – algumas vezes, a quebra pode ocorrer inesperadamente, em consequência de alguns fatores como: ferramenta muito dura; carga excessiva sobre a ferramenta; raio de quina; ângulo de quina ou ângulo de cunha pequeno; corte interrompido; parada instantânea do movimento de corte; entupimento de canais de expulsão de cavacos ou dos bolsões de armazenamento dos cavacos; entre outros. Pode-se verificar um exemplo de quebra na ilustração da Figura 2-16.

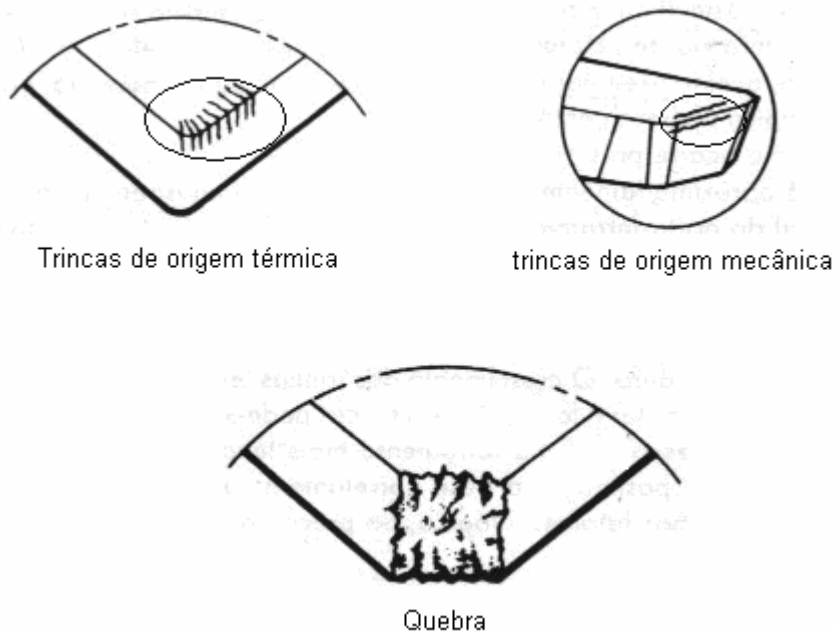


Figura 2-16 – Figuras ilustrativas de trincas de origem térmica e mecânica e quebra de ferramentas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

2.6.4 Causas de desgaste de ferramentas de corte

Dentre os mecanismos causadores de desgaste os principais são (STEMMER, 2005a; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999):

a) Abrasão mecânica – a abrasão mecânica é uma das principais causas de desgaste da ferramenta. Tanto o desgaste de flanco quanto o desgaste de cratera podem ser gerados pela abrasão. No entanto, cabe destacar que ela se faz mais proeminente no desgaste de flanco, já que a superfície de folga entra em atrito

com um elemento rígido (peça), enquanto a face entra em atrito com um elemento flexível (cavaco).

O desgaste gerado pela abrasão é intensificado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte que reduz a dureza da ferramenta. Com isso, partículas da ferramenta são arrancadas à alta pressão e temperatura, em razão do atrito entre ferramenta e peça. Assim, quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior será sua resistência ao desgaste por abrasão.

b) Aderência – se duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas, sob baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, forma-se entre elas um extrato metálico que provoca aderência. A resistência desse extrato é elevada a tal ponto que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre ruptura em um dos metais e não na superfície de contato. Assim, partículas da superfície de um metal migram para a superfície de outro.

O fenômeno da aderência está presente na formação da gume postiço de corte, mas pode-se ter desgaste por aderência mesmo sem a formação deste. Tal fenômeno também é importante na formação do desgaste de entalhe. Além disso, a utilização adequada do fluido de corte (principalmente com efeito lubrificante) bem como o revestimento da ferramenta com matérias de baixo coeficiente de atrito (como o nitreto de titânio) têm grande influência na diminuição desse tipo de desgaste (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

c) Difusão – a difusão entre ferramenta e cavaco é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal a outro, dependendo da temperatura, da duração do contato e da afinidade físico-química dos dois metais envolvidos na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário). A difusão é responsável, sobretudo pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

d) Oxidação – a exposição a altas temperaturas e a presença de ar e água (contida nos fluidos de corte) gera oxidação para a maioria dos metais. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades de contato cavaco/ferramenta, em virtude do acesso do ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe (STEMMER, 2005a; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

e) Choques mecânicos – nos choques mecânico, a ferramenta entra em contato de forma brusca com alguma outra parte da máquina-ferramenta ou da

peça, podendo acarretar um lascamento ou quebra da ferramenta, ou até mesmo deformá-la (STEMMER, 2005a).

f) Choques térmicos – a ferramenta sofre uma brusca variação de temperatura (em um curto intervalo de tempo), em geral, por estar em alta temperatura e entrar em contato com uma peça de trabalho a uma temperatura muito mais baixa, ou pelo uso de fluidos lubri-refrigerantes de forma intermitente (STEMMER, 2005a).

Os mecanismos causadores de desgaste têm a influência direta de alguns fatores, como as condições de usinagem, sendo a velocidade de corte o mais importante, seguida pelo avanço e pela profundidade de corte. Além das condições de corte, a geometria da ferramenta e o material da peça a ser usinado também são fatores influentes no desgaste da ferramenta de corte.

Na Figura 2-17 é possível observar a ocorrência desses mecanismos de desgaste em razão da temperatura de corte, considerando a influência da velocidade de corte, do avanço e dos outros parâmetros de corte.

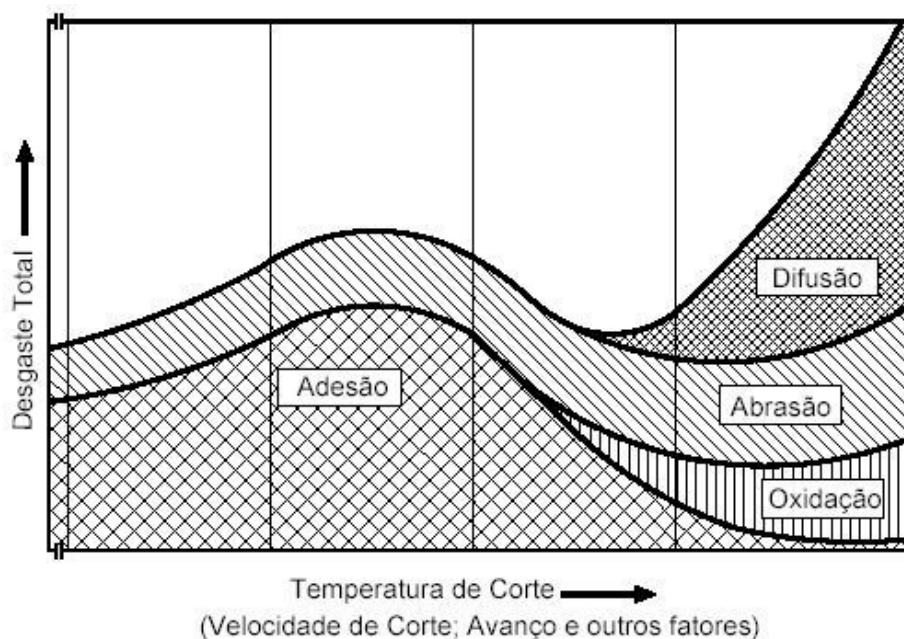


Figura 2-17 – Mecanismos de desgaste em consequência da temperatura de corte (KÖNIG, 1997 citado por ANDRADE, 2005).

O tipo de desgaste que uma ferramenta apresenta influencia diretamente nas forças envolvidas durante a usinagem, as quais irão influenciar tanto na deformação e ruptura do cavaco quanto nas tolerâncias geométricas da peça (deformações, erros de forma). Considerando esses pontos, no item a seguir, são expostos alguns aspectos relacionados à deformação nos processos de usinagem.

2.7 Deformação dos metais

Normalmente, o principal objetivo, ao se medir tensões e deformações, é conhecer o nível de carregamento que atua sobre determinados elementos estruturais, para, assim, verificar sua segurança nas condições de operação. Isso torna a atividade de medição de tensões e deformações imprescindível, tanto para a realização de manutenções quanto para a realização de atividades de projeto e desenvolvimento de novos produtos. É importante destacar que determinadas propriedades de materiais também podem ser conhecidas por intermédio dessas medições (WILLEMANN, 2002).

Quando aplicada uma carga a um componente de máquina ou elemento estrutural, este se deforma com maior intensidade na direção do carregamento. Em virtude disso, pontos individuais do componente se deslocam acompanhando os esforços aplicados à estrutura. Esse movimento de cada ponto, descrito com relação a um sistema de referência conveniente de eixos, é um vetor conhecido como deslocamento.

No entanto, esses deslocamentos não significam exatamente ocorrência de deformação no material, pois, em alguns casos, eles podem existir sem que exista deformação, uma vez que são associados a translações e/ou rotações do corpo em sua totalidade.

Assim, uma vez que o tamanho ou forma do corpo não é alterado por esse tipo de deslocamento, eles não têm significado na análise de tensões e deformações. Tais deslocamentos, que não alteram a forma ou o tamanho do corpo, são conhecidos como deslocamentos de corpo rígido (RILEY, 1985 citado por WILLEMANN, 2002).

Quando os deslocamentos ocorrem em conseqüência de uma carga aplicada ou de uma mudança de temperatura, pontos individuais do corpo movimentam-se uns em relação aos outros, de maneira que altera a forma e/ou tamanho do corpo. Esse tipo de situação é conhecida como uma deformação total (δ).

Já a deformação específica (ϵ), ou simplesmente deformação, é a quantidade usada para representar a intensidade da deformação de forma relativa, ou seja, deformação total por unidade de comprimento. Autores como Van Vlack (2004) dividem a deformação dos metais em elástica e plástica.

2.7.1 Deformação em processos de usinagem

Como exposto no item anterior, a deformação em componentes ocorre em virtude de estes terem sido submetidos a algum tipo de carregamento. Nos processos de usinagem, esse carregamento é em consequência das forças de usinagem (descritas no item 2.6.1).

Em geral, quando se trata de deformação nos processos de usinagem, lembra-se da deformação que ocorre plasticamente, com o material da peça na zona de corte, acarretando rompimento de fragmentos do material da peça (cavaco). Também, pode ocorrer a deformação da própria ferramenta pelos esforços excessivos durante o corte.

Outra linha de pesquisa relacionada ao assunto tem como foco os erros de forma gerados nas peças usinadas, em razão das forças e temperaturas excessivas durante a usinagem.

Como exemplo, Tang e Hiroyuki (2007), em seu trabalho, explicam que a falta de cilindricidade no cilindro usinado de blocos de motores piora a performance dos motores, por causa do aumento do atrito e desgaste excessivo dos anéis dos pistões. Esse tipo de problema ocorre no processo de mandrilamento dos cilindros, principalmente, em consequência das forças de corte e das temperaturas geradas durante a operação.

Entre os processos de fresamento, o periférico é o mais estudado com relação à ocorrência de erros de forma, em virtude da sua grande utilização na usinagem de paredes finas. Budak (2006) explica que as deflexões da ferramenta e da peça ficam marcadas na superfície, resultando em erros de forma, conforme pode ser visto na Figura 2-18, em que, $\delta_y(z)$ é a deflexão da ferramenta na posição axial z e $y_p(x,z)$ é a deflexão da peça na posição (x,z) .

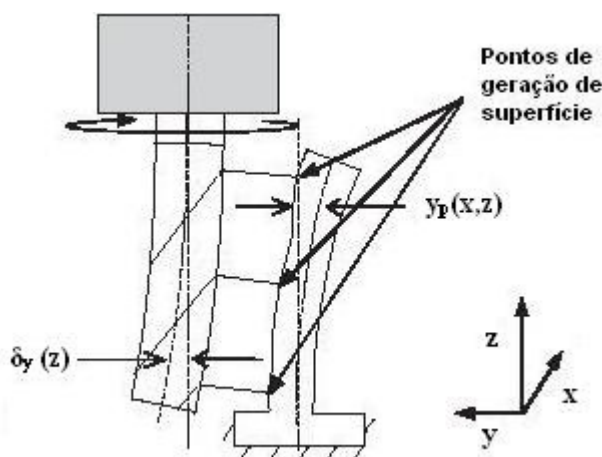


Figura 2-18 – Geração da superfície no fresamento periférico (modificado de BUDAK, 2006).

Desde o início da década de 1980, outros trabalhos foram realizados, com o intuito de investigar os erros de forma no fresamento periférico, conforme cita Tsai e Liao (1999).

Em seu artigo, os autores destacam alguns fatores que influenciam na deformação e nos erros dimensionais da peça, tais como parâmetros de corte, material da ferramenta, material da peça e deflexão da ferramenta e da peça.

Os erros dimensionais e de forma ocorrem sobretudo em razão das deflexões da ferramenta e da peça durante o processo de fresamento. Se a peça é bastante rígida e sua fixação também é, sua deformação é pequena e pode ser desconsiderada sua contribuição para erros dimensionais e de forma. Contudo, quando se considera o corte periférico de um componente bastante flexível (parede fina e alta), como ilustrado na Figura 2-19, as deflexões da ferramenta e da peça podem acarretar em um desvio de forma considerável (TSAI; LIAO, 1999).

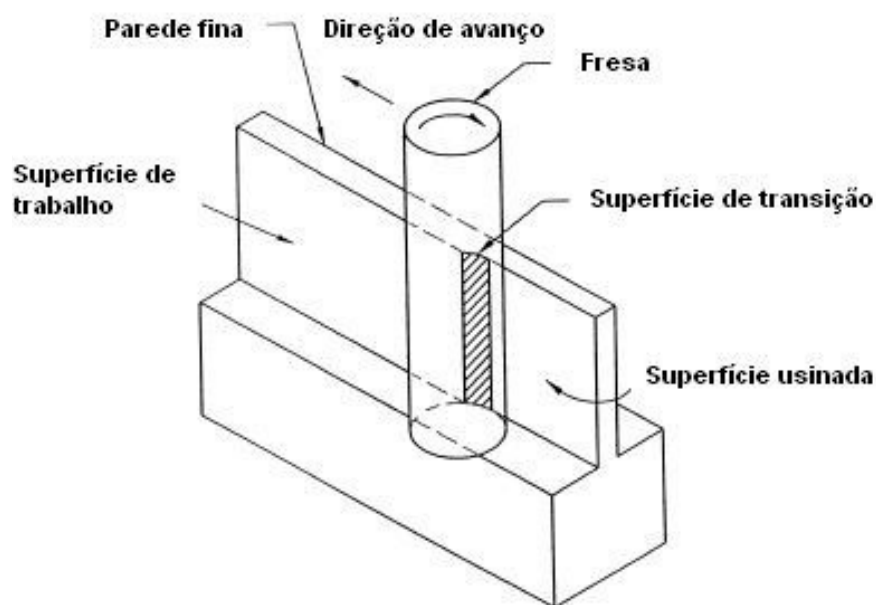


Figura 2-19 – Fresamento periférico concordante em peça de parede fina (modificado de TSAI; LIAO, 1999).

Portanto, o que influencia na deformação de peças em processos de usinagem são as forças e as temperaturas envolvidas no processo, e estas, por sua vez, são influenciadas pela geometria e material da ferramenta, bem como pelo material da peça, parâmetros de corte e ocorrência ou não de deflexão da ferramenta e da peça.

2.8 Fatores geradores de calor nos processos de usinagem

A usinagem dos metais ainda não foi completamente entendida, em virtude de ser um processo de natureza não-linear e, também, em razão da complexa ligação entre as áreas de deformação e temperatura.

O processo de deformação durante a usinagem está fortemente concentrado em uma zona muito pequena, e as temperaturas geradas nessa zona de deformação afetam tanto a peça quanto a ferramenta.

As altas temperaturas de corte têm grande influência no desgaste da ferramenta, na vida da ferramenta, na integridade da superfície da peça, bem como nos mecanismos de formação do cavaco, e contribuem para a deformação térmica da ferramenta de corte, sendo este um fator de grande importância na origem de erros nos processos de usinagem (ABUKHSHIM; MATIVENGA; SHEIKH, 2006).

Durante o processo de usinagem, a ferramenta executa o corte, superando a resistência ao corte do material da peça. Dessa forma, ocorre grande geração de calor na peça, o que resulta em uma região de alta concentração de deformação termomecânica na zona de corte. As temperaturas na zona de corte afetam, de maneira considerável a relação tensão/deformação, ruptura e escoamento do material da peça. Geralmente, quando se aumenta a temperatura, a resistência do material da peça diminui, o que faz aumentar a sua ductilidade.

É consenso que quase todo o trabalho realizado pela ferramenta bem como a energia inserida durante o processo de usinagem são convertidos em calor (ABUKHSHIM; MATIVENGA; SHEIKH, 2006).

Sendo assim, é importante destacar que a transferência de calor ocorre no processo de usinagem de três maneiras bem conhecidas: condução, radiação e convecção (BRANDÃO, 2006).

- a) **condução:** é um processo no qual a temperatura flui de local com temperatura mais elevada para local de menor temperatura dentro de um meio, sólido, líquido ou gasoso, ou entre meios diferentes em contato direto;
- b) **radiação:** ocorre quando, por intermédio da transmissão de ondas eletromagnéticas, a energia emitida por um corpo se propaga até outro, por meio do espaço que os separa, ou seja, não exige um meio material para acontecer;

- c) **convecção:** é o processo de transferência de energia que ocorre mediante ação combinada da condução do calor, armazenamento da energia e movimento de um meio. A convecção é mais importante como mecanismo de transferência de calor entre um sólido e um líquido, ou entre um sólido e um gás.

As principais regiões onde o calor é gerado durante o processo de corte ortogonal são mostradas na Figura 2-20. Primeiramente, o calor é gerado na zona de deformação primária, em consequência da deformação plástica no plano de corte. O aquecimento local nessa zona resulta em temperaturas muito elevadas e, dessa forma, o material amolece, permitindo grande deformação. Em seguida, o calor é gerado na zona secundária de deformação, em virtude do final do processo de deformação do cavaco e também do atrito gerado no movimento do cavaco na superfície de saída da ferramenta. Finalmente, na zona de deformação terciária, o calor é gerado na interface ferramenta/peça, por intermédio do atrito entre a superfície do flanco da ferramenta e a superfície recém-usinada da peça.

Em relação ao calor gerado e às temperaturas atingidas nas zonas primária e secundária, tem-se que estas dependem muito das condições de corte, enquanto a zona terciária é bastante influenciada pelo desgaste de flanco da ferramenta (ABUKHSHIM; MATIVENGA; SHEIKH, 2006; BRANDÃO, 2006).

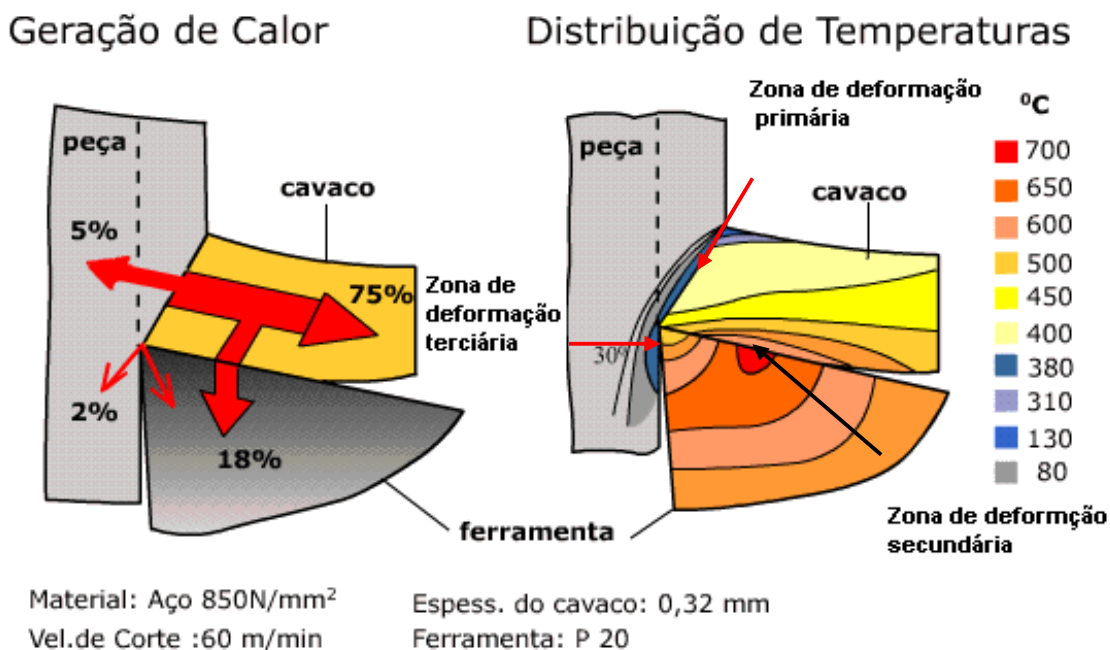


Figura 2-20 – Geração de calor, distribuição de temperaturas e zonas de geração de calor durante a usinagem (modificado de CIMM, 2007).

Durante o processo de usinagem, a maior parte do calor gerado é dissipado pelo cavaco e uma quantidade menor é liberada pela própria peça. O restante do calor (uma pequena parcela) não se dissipa, gerando aumento significativo na temperatura da ferramenta, podendo alcançar até 1.100°C , comprometendo a resistência desta (COSTA, 1997).

Vários foram os trabalhos realizados para investigar a geração de calor e de temperatura na interface ferramenta/peça ou da ferramenta/cavaco. Como o interesse deste trabalho é investigar a distribuição da temperatura ao longo da parede de uma peça, destaca-se o trabalho de Tang e Hiroyuki (2007), no qual foi investigado o comportamento térmico das paredes do cilindro em ferro fundido FC 250, durante o mandrilamento. Foram utilizados para o estudo termopares do tipo K (*Chromel/Alumel*), fixados na peça em quatro pontos (A, B, C, D), em uma distância do topo de 5, 50, 100 e 150 mm (comprimento do cilindro 160 mm), conforme se visualiza na Figura 2-21.

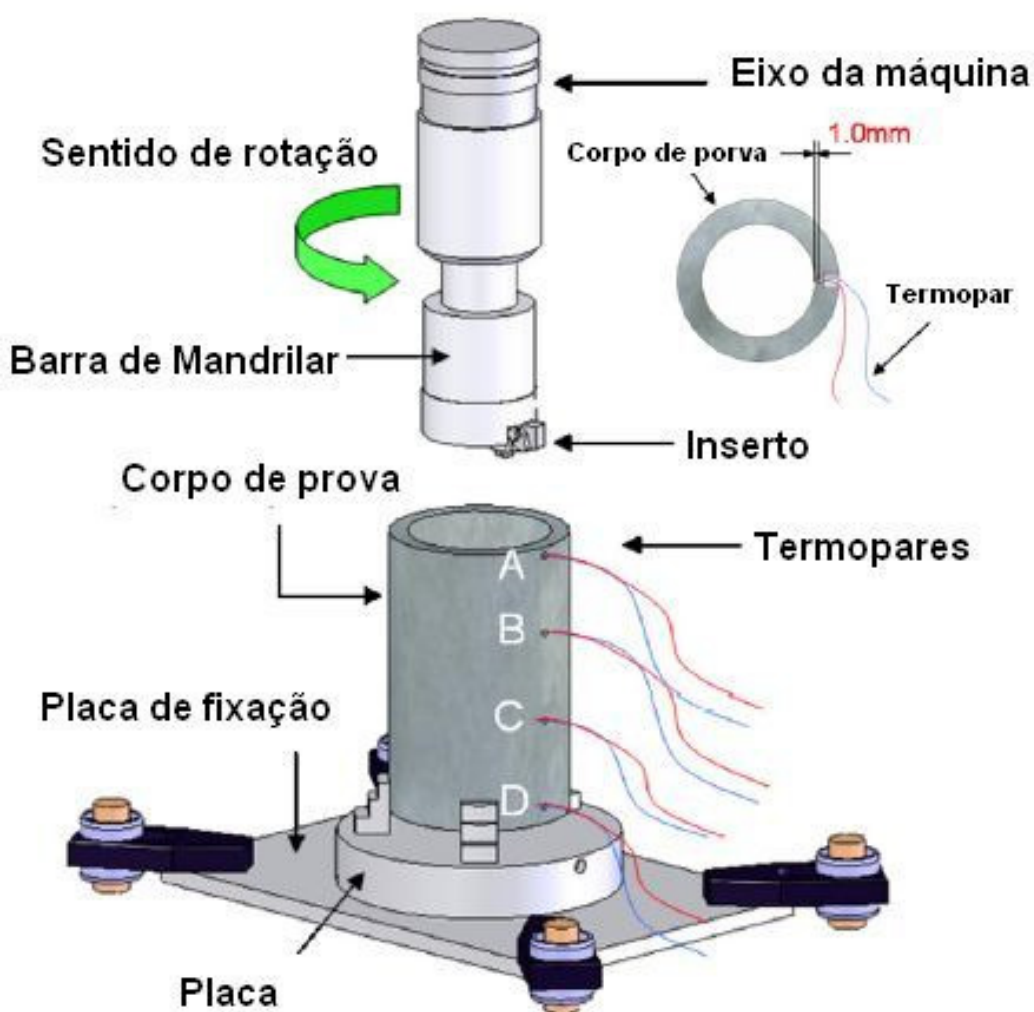


Figura 2-21 – Fixação dos termopares à peça (modificado de TANG; HIROYUKI, 2007).

Tang e Hiroyuki (2007) realizaram seus experimentos com e sem fluido de corte, com três velocidades de corte diferentes, utilizando insertos de CBN. Os resultados obtidos no trabalho estão expostos nos gráficos da Figura 2-22.

Verifica-se pelos resultados obtidos que, com o aumento da velocidade de corte, tanto no corte a seco quanto no corte com fluido, ocorre diminuição na temperatura, provavelmente em virtude de o calor gerado ser rapidamente retirado pelo cavaco, a altas velocidades de corte. O uso do fluido de corte também tem efeito significativo na redução da temperatura durante o processo, como pode ser visto na Figura 2-22 (b).

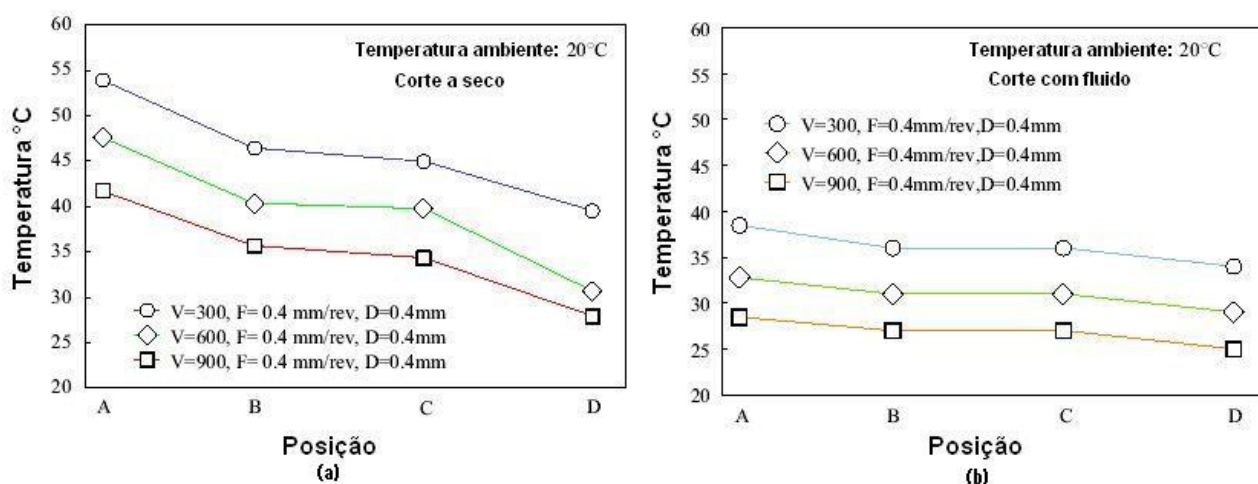


Figura 2-22 – Efeito da velocidade de corte na temperatura no mandrilamento de cilindros, (a) corte a seco e (b) corte com fluido (modificada de TANG; HIROYUKI, 2007).

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 (SILVA et al., 2001).

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 2-23, 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-refrigerante.

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).

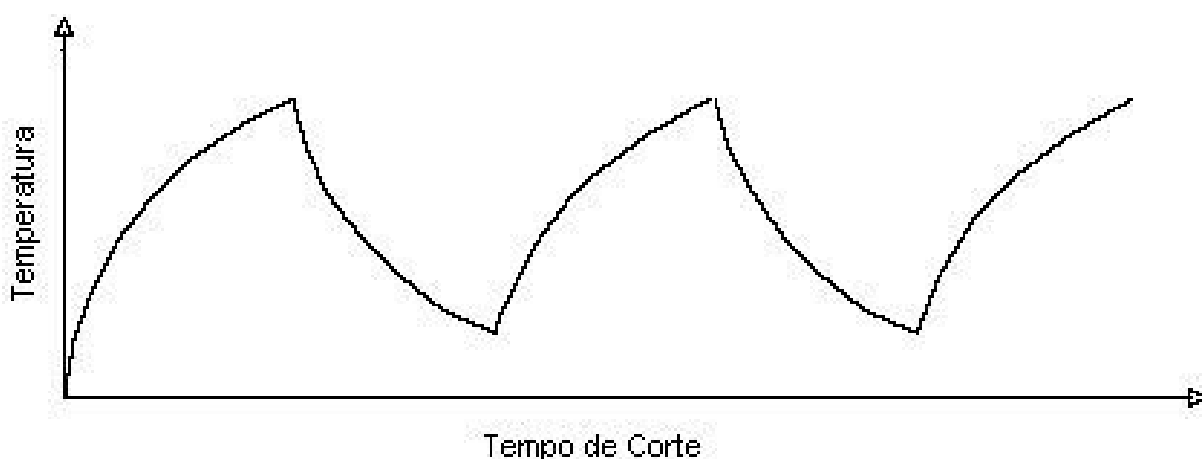


Figura 2-23 – Variação cíclica da temperatura no corte interrompido (SILVA et al., 2001).

Considerando os fatores expostos, no item a seguir, são apresentados alguns métodos para medir a temperatura em processos de usinagem.

2.8.1 Métodos para medir temperatura em usinagem

Entre os vários métodos utilizados para se medir a temperatura durante o processo de usinagem, Ay e outros (1998) destacam cinco: termopares inseridos na peça; termopares inseridos na ferramenta; termovisão ou infravermelho; técnica metalográfica; e tintas termosensíveis.

Algumas dessas técnicas fornecem a temperatura real e outras, uma temperatura próxima da real.

Neste estudo, são abordadas duas técnicas; a primeira com termopares e a segunda com termovisão, tendo em vista o fato de essas duas serem as mais utilizadas, por sua facilidade prática e adequada precisão nas medições.

1 - Método com termopares

Os termopares são os sensores de temperatura mais utilizados. Sua simplicidade e confiabilidade são o maior apelo à sua utilização, além do baixo custo e larga faixa de temperatura de operação.

A maioria dos princípios básicos da termometria já eram conhecidos por volta de 1900, mas só recentemente tornou-se clara a verdadeira fonte do potencial termoelétrico (MOREIRA, 2002).

O termopar consiste em dois condutores metálicos de natureza distinta, na forma de metais puros ou ligas homogêneas. Seus fios são ligados em um extremo, que recebe o nome de “junta quente” ou “junta de medição”. A outra extremidade é conectada a uma unidade de aquisição de dados, fechando um circuito elétrico, por onde flui a corrente elétrica. Esse ponto conectado ao equipamento é chamado de “junta fria” ou “referência” (TERMOPARES, 2007).

Existem três categorias de termopares: padronizados de metal nobre (R, S e B), termopares padronizados de metal base (K, J, N, E, T) e termopares não definidos por letras. Na prática, a distinção entre “base” e “nobre” é que metais nobres contêm platina e metais base contêm níquel.

O uso dos termopares para se medir a temperatura durante a usinagem, normalmente é realizado de duas formas: fixando-os mesmos na ferramenta de corte ou fixando-os na peça a ser usinada.

A sua utilização requer calibração prévia. Uma técnica bastante utilizada é soldar um termopar tipo K na ferramenta e medir sua força eletromotriz pelo fio de Alumel. Dessa forma, a temperatura pode ser medida pelo termopar no ponto onde a ferramenta e o cavaco estarão em contato. Uma tocha de oxiacetileno é, em geral, usada para aplicar o calor semelhante ao gerado durante a usinagem.

Outra técnica bastante empregada para a calibração de termopares é por meio de banhos termostáticos.

As aplicações para os termopares são as mais variadas possíveis, tendo como principal limite a tolerância do processo que se vai medir. Para a medição de temperaturas acima de 500°C, eles são a única escolha quando se trata de termômetros de contato (MOREIRA, 2002). Na Tabela 2-6 e Tabela 2-7, há a faixa de temperatura de trabalho e aplicação dos tipos de termopares.

Tabela 2-6 – Faixa de utilização e limite de erro de acordo com ASTM E-230 com junção de referência a 0°C (MOREIRA, 2002).

Sensor	Faixa de utilização (°C)	Limite de erro (Escolher o maior)	
		Padrão	Especial
E	0 - 870 -200 a 30	± 1.7 °C ou 0,5% ± 1.7 °C ou 1%	± 1 °C ou 0,4% -
J	0 - 760	± 2,2 °C ou 0,75%	± 1,1 °C ou 0,4%
K, N	0 - 1260 -200 a 30	± 2,2 °C ou 0,75% ± 2,2 °C ou 2%	± 1,1 °C ou 0,4% -
T	0 - 370 -200 a 30	± 1 °C ou 0,75% ± 1 °C ou 1,5%	± 0,5 °C ou 0,4% -
R, S	0 - 1480	± 1.5 °C ou 0,25%	± 0,6 °C ou 0,4%
B	870 - 1700	± 0,5%	-

Tabela 2-7 – Aplicação dos tipos de termopares (MOREIRA, 2002).

Tipo	Ambiente	Comentário	Temperatura máxima (°C)
B	Oxidante, inerte, vácuo por períodos curtos	Evitar contato com metal. Mais adequado para alta temperatura. Possui tensão baixa à temperatura ambiente.	1700
E	Oxidante, Inerte	Adequado para temperatura abaixo de zero. Maior tensão dos termopares comuns.	870
J	Oxidante, inerte, redutor em vácuo parcial	O ferro oxida rapidamente.	760
K	Oxidante, inerte	Sujeito a "Green rot" em algumas atmosferas.	1260
N	Oxidante, inerte	Mais estável que o tipo K, em altas temperaturas.	1260
R e S	Oxidante, inerte	Evitar contato com metal.	1400
T	Oxidante, inerte, redutor em vácuo parcial	Temperaturas abaixo de zero. Tolera umidade.	370

2 - Termovisão ou Infravermelho

Radiômetros ou pirômetros de radiação operam essencialmente segundo a lei de Stefan-Boltzmann. São os sistemas de medição mais simples, em que a radiação é coletada por um arranjo óptico fixo e dirigida a um detector do tipo termopilha (associação em série) ou do tipo semicondutor, nos mais modernos, no qual gera um sinal elétrico no caso da termopilha, ou altera o sinal elétrico no caso do semicondutor.

Por não possuírem mecanismo de varredura próprio, o deslocamento do campo de visão instantâneo é realizado pela movimentação do instrumento em sua totalidade.

Os radiômetros são, em geral, portáteis, mas podem ser empregados também no controle de processos a partir de montagens mecânicas fixas ou móveis (AMPERES AUTOMATION, 2007). Um exemplo esquemático do funcionamento de um pirômetro de radiação pode ser visto na Figura 2-24.

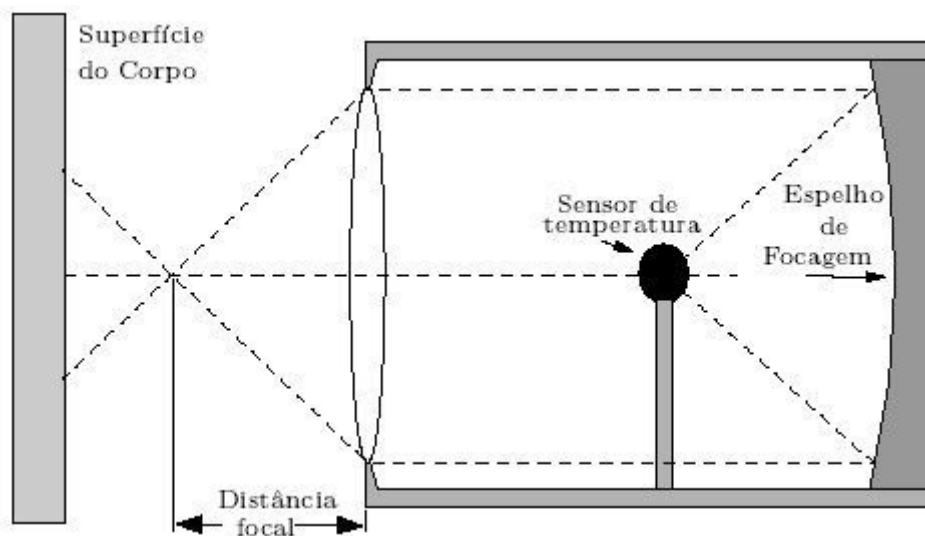


Figura 2-24 – Ilustração de um pirômetro de radiação (ROCHA, 1998).

Segundo Amperes Automation (2007), sua utilização na indústria ocorre quando:

- a) as temperaturas estão acima da faixa de operação prática dos termopares;
- b) a atmosfera do processo for prejudicial aos pares termoelétricos, causando medidas falsas e pequena durabilidade ao par;
- c) no interior de fornalhas a vácuo ou pressão, onde os sensores de temperatura danificam o produto;
- d) o objeto cuja temperatura se vai medir está em movimento;
- e) em locais onde os termopares não podem ser instalados por causa de vibrações, choques mecânicos ou impossibilidade de montagem.

Devem-se levar em consideração os seguintes aspectos quanto a uma determinada aplicação (AMPERES AUTOMATION, 2007):

- a) a temperatura do alvo e a temperatura normal de operação;

- b) o sinal de saída é independente da distância do alvo, desde que o campo de visão do sistema óptico esteja preenchido totalmente pelo alvo;
- c) o material da fonte e sua emitância;
- d) ângulos do campo de visão quando aplicado em corpo não-negro (deve-se restringir o ângulo para uma abertura de 45°, ou menos, da perpendicular);
- e) as condições do ambiente, da temperatura e poeira;
- f) velocidade do alvo.

De acordo com a mesma fonte, os radiômetros operam numa faixa entre 30°C a 4.000°C, respondendo em 0,1 ou 0,2 segundos a 98% da mudança de temperatura com precisão de $\pm 1\%$ da faixa medida.

A maioria dos equipamentos que utilizam esse tipo de técnica trabalham com uma câmera infravermelha, regulada para detectar um espectro de onda na faixa de temperatura de 0° a 600°C, em que se tem um comprimento de onda 8 a 12 μm (DEWES et al., 1999).

Atualmente, existem equipamentos para a aquisição desse tipo de imagem, os quais são muitas vezes utilizados para monitorar a temperatura da parte elétrica de equipamentos industriais, pois são portáteis e fornecem imagens de boa qualidade e confiabilidade e também podem ser utilizados para fins de pesquisa na área de usinagem. Na Figura 2-25, tem-se um exemplo desse tipo de equipamento, bem como a imagem térmica fornecida por ele.

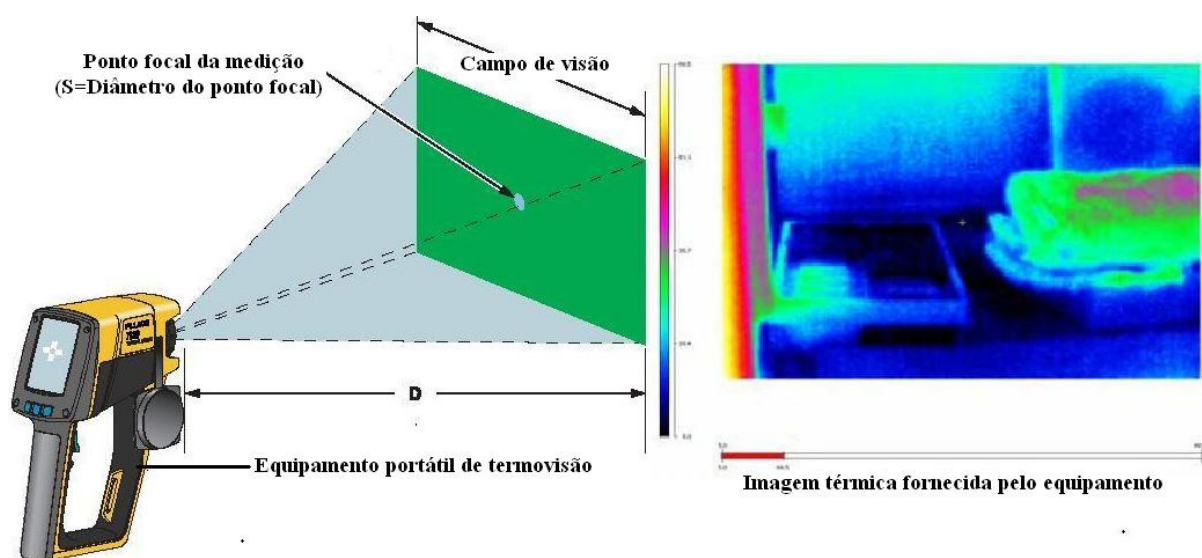


Figura 2-25 – Exemplo de equipamento portátil para medir temperatura por termovisão (FLUKE, 2007).

3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E METÓDOS

Neste trabalho, foram realizados três tipos de experimentos, sendo o primeiro para avaliar a usinabilidade do ferro fundido vermicular em relação ao ferro fundido cinzento, por meio de ensaios de longa duração, utilizando como critério de avaliação o desgaste de flanco das ferramentas em microscópio de ferramentaria.

No segundo, foram feitos ensaios para avaliar a ocorrência de deformação nas paredes dos corpos-de-prova, efetuando a medição destes antes e depois da usinagem, com uma máquina de medição tridimensional.

Já o terceiro e último experimento consistiu na medição da temperatura nas paredes dos corpos-de-prova durante a usinagem, com termopares fixados nas paredes dos mesmos, conforme se passará a descrever a seguir.

Para os experimentos, foram utilizados dois tipos de ferro fundido, uma liga em vermicular e uma em cinzento. Também, foram utilizados dois materiais de ferramentas, metal-duro e cerâmica. As características dos ferros fundidos e das ferramentas serão apresentadas no capítulo 4.

Os três tipos de experimentos foram realizados em um centro de usinagem de 4 eixos, disponibilizado pela empresa Tupy Fundições. Os ensaios foram realizados na empresa por não se ter uma máquina disponível no laboratório USICON da UFSC, bem como em razão dos corpos-de-prova estarem disponíveis na empresa.

3.1 Máquinas-ferramenta

Como mencionado, para a realização dos três tipos de experimentos foi utilizado um centro de usinagem de 4 eixos modelo WOMAT V2, fabricado pela empresa WOTAN, com rotação máxima de 7.500 rpm, potência máxima instalada de 27 Kw. Os detalhes da máquina-ferramenta podem ser visualizados na Figura 3-1.

Também, foi utilizada uma fresadora universal para a pré-usinagem das paredes dos corpos-de-prova, uma furadeira radial para efetuar os furos destinados à fixação dos mesmos na máquina WOTAN, e à fixação dos termopares, sendo ambas pertencentes ao laboratório USICON-UFSC. Esse procedimento foi adotado apenas para os corpos-de-prova que foram utilizados no segundo e terceiro tipo de experimentos.

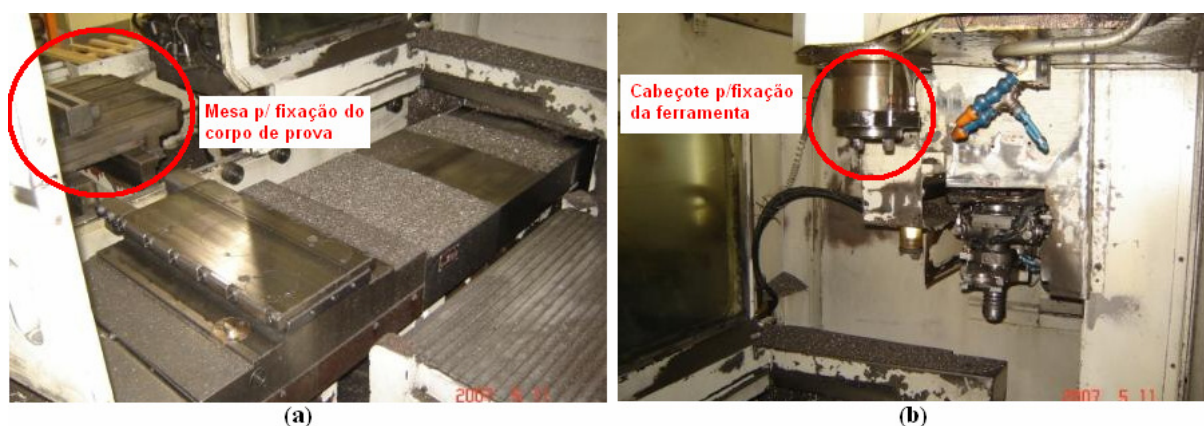


Figura 3-1 – Detalhes da máquina utilizada nos ensaios, (a) vista interna com visão parcial da mesa de fixação, (b) vista interna com visão do cabeçote da máquina.

3.2 Fixação dos corpos-de-prova e cabeçote porta-ferramenta

3.2.1 Fixação dos corpos-de-prova

Para os referidos experimentos, foram utilizados dois sistemas de fixação, um para o primeiro tipo, utilizado nos ensaios de usinabilidade, e outro para o segundo e terceiro tipo, utilizado nos ensaios para medir temperatura e deformação.

Para o primeiro caso, o sistema de fixação utilizado consistiu em três encostos fixos e dois excêntricos. Os três encostos fixos serviram para dar apoio e alinhamento ao corpo-de-prova, os dois encostos excêntricos forneceram o aperto necessário para a fixação dos corpos-de-prova, com a rigidez e estabilidade necessárias para o experimento, conforme Figura 3-2.

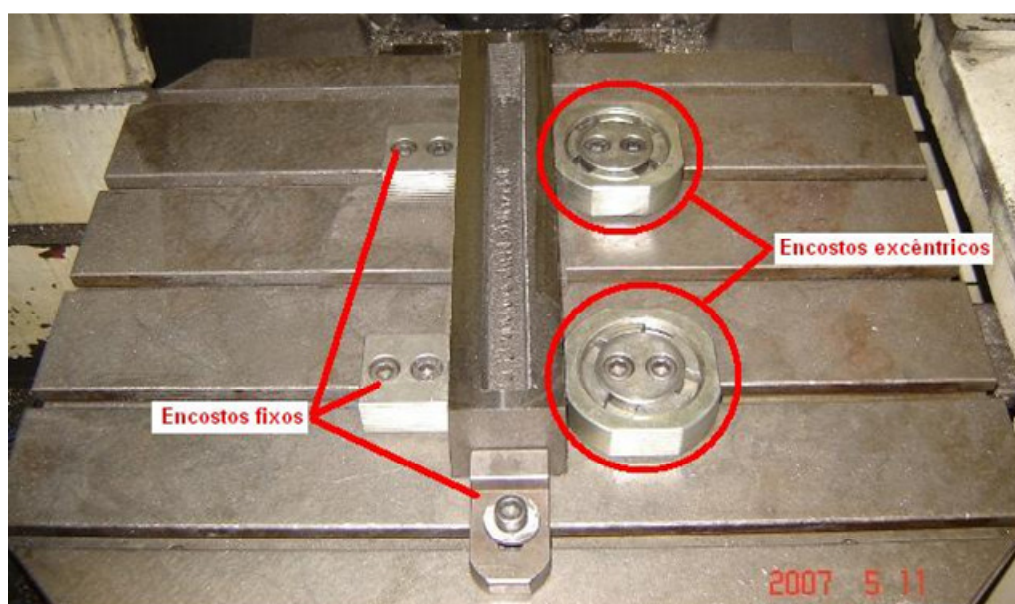


Figura 3-2 – Sistema de fixação utilizado na primeira etapa de ensaios.

Foi utilizado esse sistema, porque a máquina WOTAN foi disponibilizada por poucos dias para a realização dos ensaios de usinabilidade. Como os corpos-de-prova não estavam disponíveis na UFSC, para a sua preparação (realização de furos de fixação e pré-usinagem das faces e paredes), optou-se por realizar apenas a pré-usinagem das faces inferior e superior deles, possibilitando, assim, a realização dos ensaios de usinabilidade dentro do tempo disponibilizado.

Para os dois tipos de experimentos posteriores, foram realizados furos para a fixação dos corpos-de-prova, pois essas duas etapas exigiam uma pré-usinagem das paredes dos corpos-de-prova. Assim, estes foram enviados à UFSC, o que possibilitou efetuar também a furação para a fixação dos corpos-de-prova na máquina. Na Figura 3-3, pode ser visto o segundo sistema de fixação utilizado em detalhe.

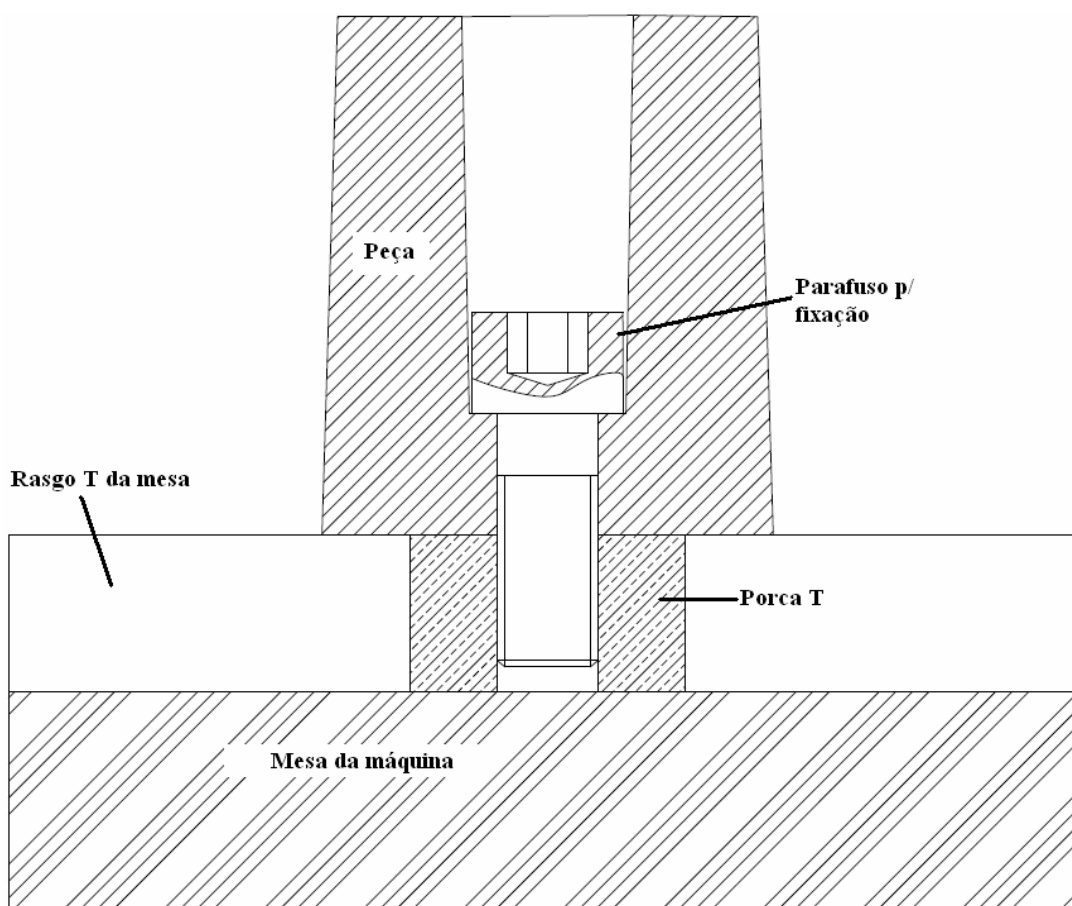


Figura 3-3 – Sistema de fixação utilizado no segundo e no terceiro experimento.

3.2.2 Cabeçote porta-ferramenta

Em todos os experimentos, foi utilizado o cabeçote F2146.B27.80.Z10.R000, com diâmetro de 80 mm, fornecido pela empresa Walter, cedido pela empresa Tupy Fundições, com capacidade de fixação de até 10 insertos, com cone/extensor para

fixação na máquina, pois esta não possuía curso suficiente no eixo z. O cabeçote pode ser visto na Figura 3-4.

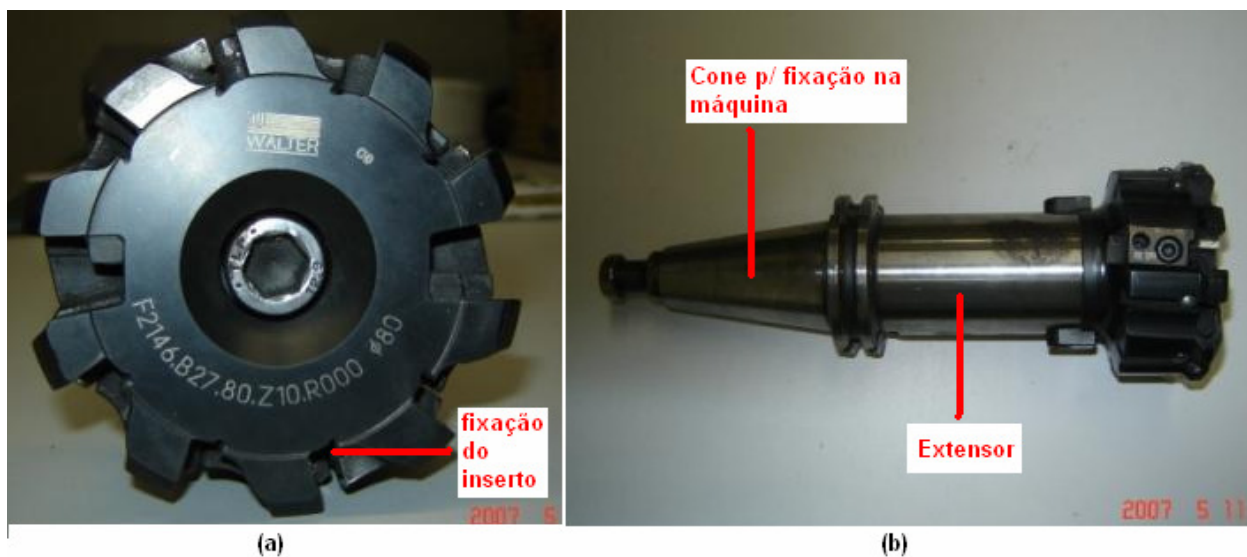


Figura 3-4 – Vistas do cabeçote utilizado, (a) frontal, (b) superior.

3.3 Microscópios utilizados

No total, foram utilizados três microscópios para este trabalho. O primeiro foi empregado para medição do desgaste nas ferramentas, da marca Nikon, modelo Measurescope, com resolução no fuso da mesa micrométrica de 0,001 mm, pertencente ao laboratório USICON-UFSC. O referido microscópio foi cedido por um curto período de tempo para a utilização nos ensaios realizados na empresa Tupy Fundições. O equipamento pode ser visualizado na Figura 3-5.

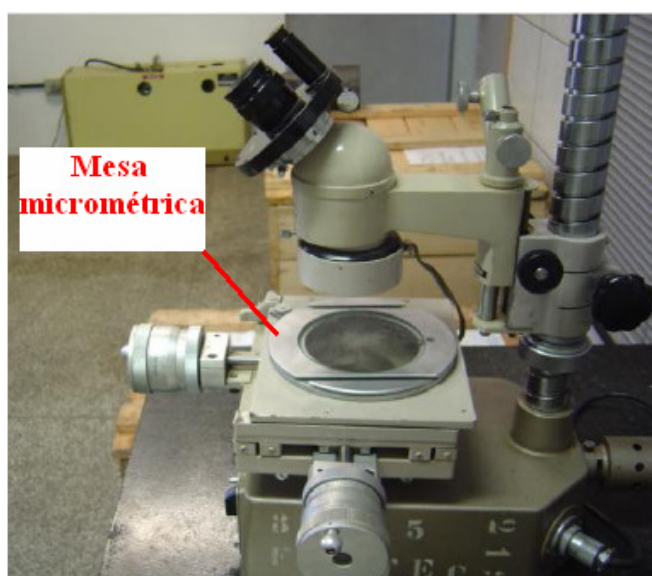


Figura 3-5 – Microscópio para medir o desgaste das ferramentas.

O segundo tipo de microscópio foi utilizado para a aquisição das imagens dos gumes das ferramentas, após os ensaios de avaliação de desgaste, sendo este da marca Olympus, modelo S261, com câmera Mediacybernetics, modelo PLA662, e com uma unidade de transferência para microcomputador Olympus, modelo LG-PS2, pertencente à empresa Tupy Fundições, conforme Figura 3-6.

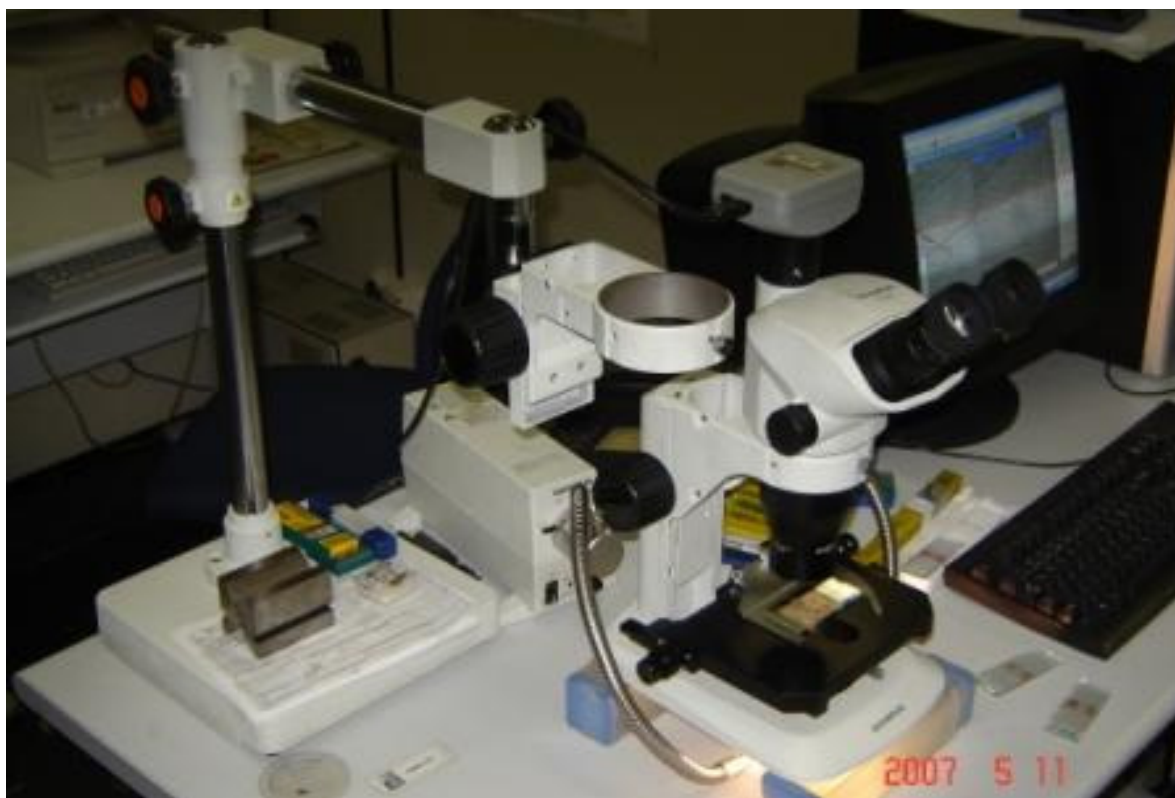


Figura 3-6 – Microscópio para aquisição de imagens.

Ao final, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), para aprofundar o estudo sobre os desgastes ocorridos nas ferramentas, sendo este da marca Philips, modelo XL30, pertencente ao laboratório de materiais da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), alocado especificamente no laboratório de caracterização microestrutural.

A aquisição de imagens por intermédio do MEV acontece através de um feixe fino de elétrons de alta energia, que incide na superfície da amostra, ocorrendo uma interação; parte do feixe é refletido e coletado, gerando a imagem (LABMAT, 2007), a qual possibilita verificar o mecanismo causador de desgaste na ferramenta. Ocorre também a emissão de raio-X, que fornece a composição química dos elementos presentes em uma região da superfície. O equipamento utilizado pode ser visualizado na Figura 3-7.

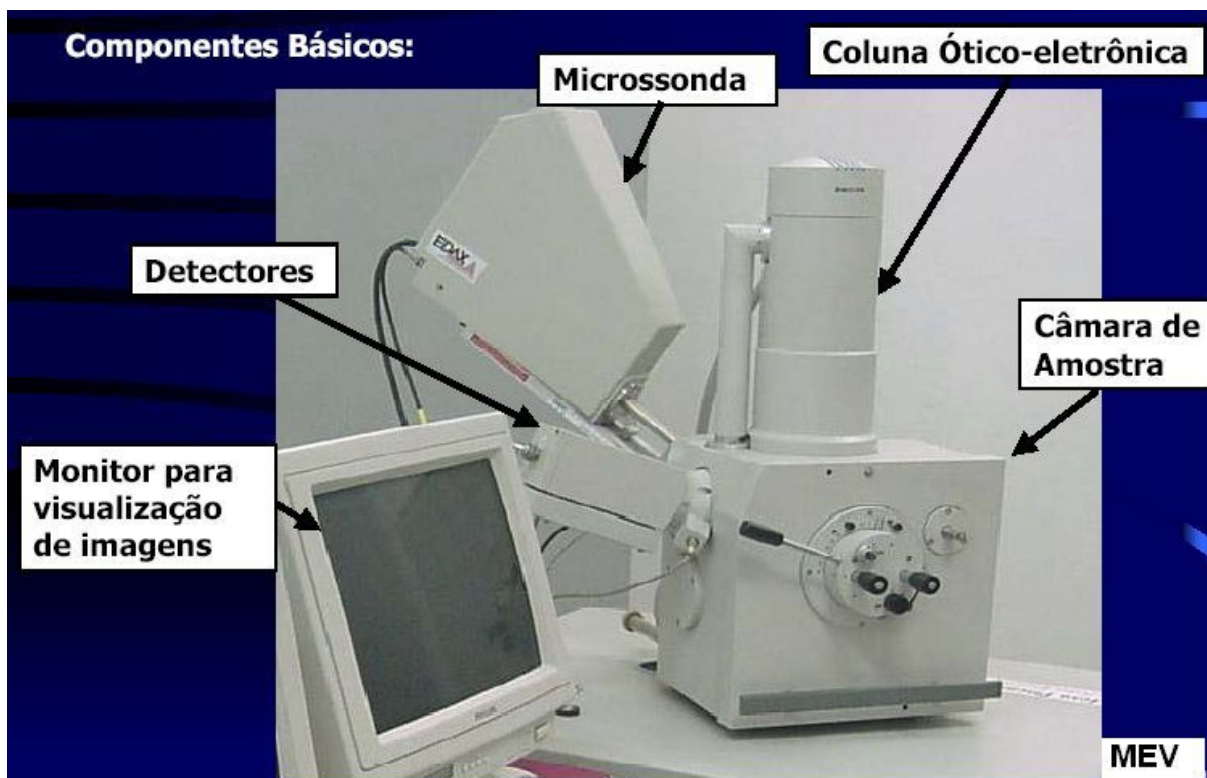


Figura 3-7 – Foto ilustrativa do MEV (Labmat, 2007).

3.4 Máquina de medição tridimensional

Para avaliar a deformação das peças, foram feitas medições das paredes dos corpos-de-prova em uma máquina de medição tridimensional; tais medições foram efetuadas antes e depois dos corpos serem usinados.

As especificações da máquina e do sistema de apalpação utilizados são:

a) máquina:

- fabricante/modelo: Mitutoyo Beyond Apex A916,
- tipo: portal móvel,
- volume de medição: 900 x 1600 x 600 (X, Y, Z; mm),
- resolução: 0,0001 mm,
- especificação (ISO 10360-2): $MPE_E = (3,9 \pm 250/L) @18-22^\circ\text{C}$, L em mm,
- Software: Mitutoyo Cosmos v2.4 R8 Edition 10;

b) sistema de Apalpação:

- fabricante/modelo: Renishaw TP200,
- tipo: comutador,
- especificação (ISO 10360-2): $P = 0,65 \mu\text{m}$;

O equipamento pertence ao Centro de Metrologia e Instrumentação (CMI) da fundação CERTI.

As medições foram efetuadas por um técnico do CMI. Na Figura 3-8 é possível visualizar a máquina e o sistema de apalpação em detalhe.



Figura 3-8 – (a) Máquina de medição tridimensional sendo preparada para início da medição, (b) detalhe do sistema de apalpação.

Para garantir a precisão das medições, os corpos-de-prova foram fixados na mesa da máquina de medição tridimensional por parafusos, de forma semelhante ao ilustrado na Figura 3-3; no entanto, com a diferença de que, na máquina tridimensional, a própria mesa possui furos com rosca, para fixação de componentes a serem medidos.

3.5 Equipamentos para a medição da temperatura

Como mencionado, o terceiro tipo de experimento consistiu na medição da temperatura dos corpos-de-prova durante a usinagem.

Primeiramente, (ainda durante os experimentos de usinabilidade) foi medida a temperatura com o auxílio de um equipamento de termovisão da marca Fluke, modelo Ti20.

Com esse equipamento, foi possível tirar fotos térmicas, as quais possibilitaram avaliar inicialmente as temperaturas que poderiam ser atingidas, tanto pela ferramenta quanto pelo corpo-de-prova durante a usinagem. O equipamento pode ser observado na Figura 3-9.

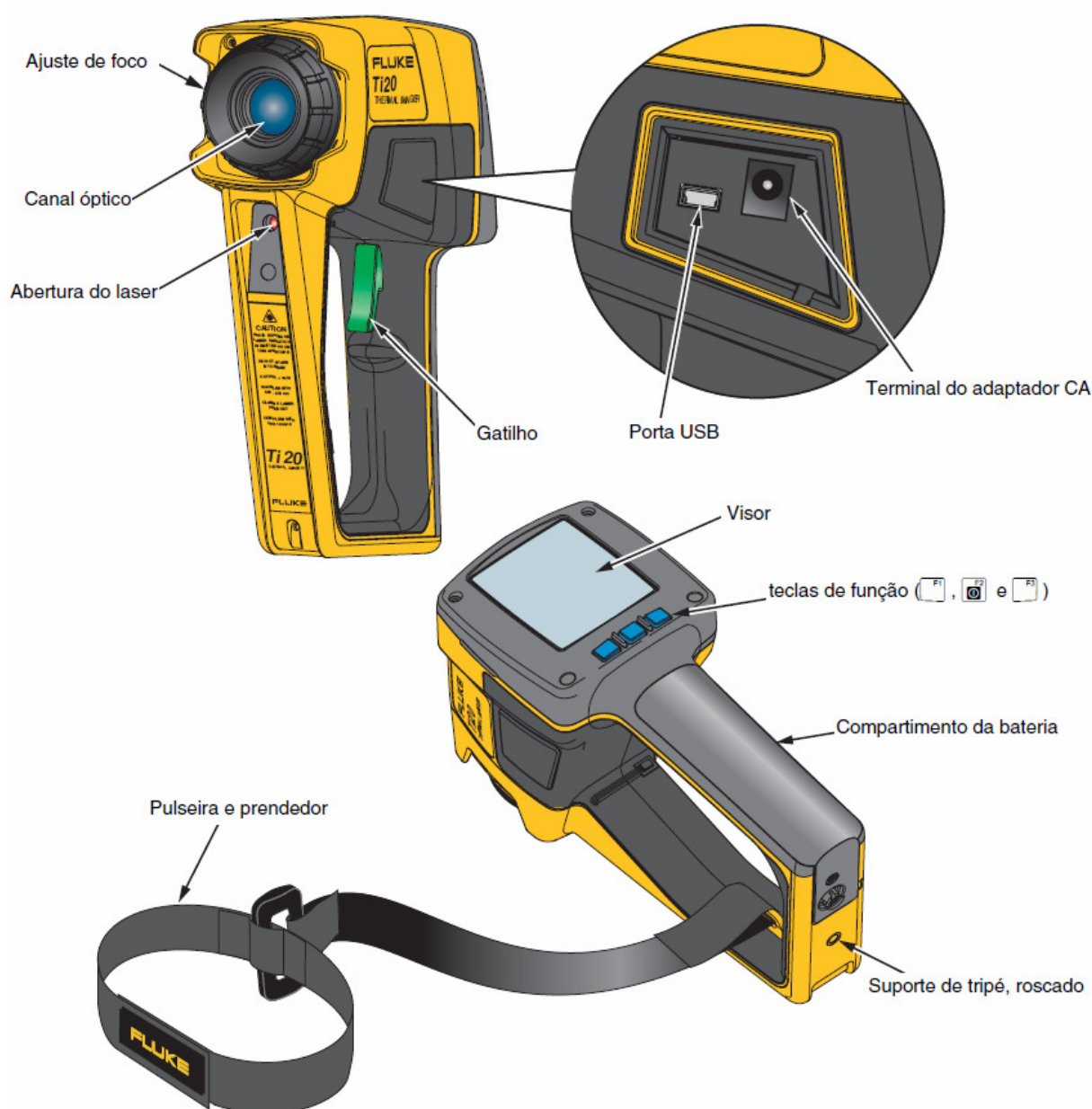


Figura 3-9 – Equipamento de termovisão Fluke Ti20 (FLUKE, 2007).

As especificações do equipamento são as seguintes:

- a) gama de temperaturas: -10 °C a 350 °C ;
- b) tipo de detector: Microbolómetro não-refrigerado, com sistema FPA (Focal Plane Array) de elemento térmico 128×96 ;
- c) precisão: $\pm 2\%$ ou $\pm 2\text{ °C}$;
- d) precisão (entre -10 °C e 0 °C): $\pm 3\text{ °C}$;
- e) repetibilidade: $\pm 1\%$ ou $\pm 1\text{ °C}$;
- f) Noise Equivalent Temperature Difference (NETD): 200 mK ;
- g) resolução da indicação de temperatura: $0,1\text{ °C}$.

Objetivando obter valores mais precisos da elevação da temperatura dos corpos-de-prova durante a usinagem, optou-se pela utilização de termopares fixados nos mesmos, utilizando-se das imagens térmicas como parâmetro para determinar o tipo de termopar a ser utilizado nos experimentos.

Os termopares utilizados foram do tipo T de cobre/constantan, com comprimento de 4 m, do fabricante Consistec.

Para evitar problemas, como a perda da junta fria dos termopares, optou-se por adquiri-los com cabeça de aço inox com rosca 1/8" NPTF, pois era necessário fixá-los e retirá-los do corpo-de-prova para serem reutilizados. Na Figura 3-10, observar-se o desenho com os elementos do termopar utilizado.

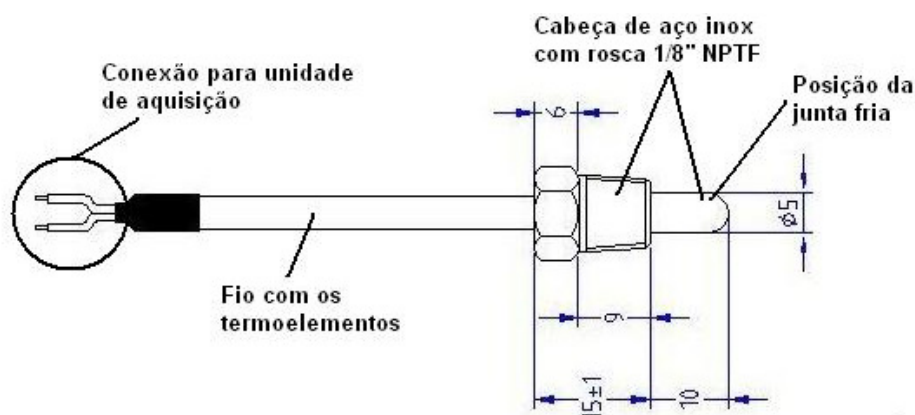


Figura 3-10 – Termopar utilizado nos experimentos.

Para a fixação dos termopares nas paredes dos corpos-de-prova, foram feitos furos a 45 mm do topo do corpo-de-prova, com profundidade de 15 mm, com rosca 1/8" NPTF, conforme ilustrado na Figura 3-11.

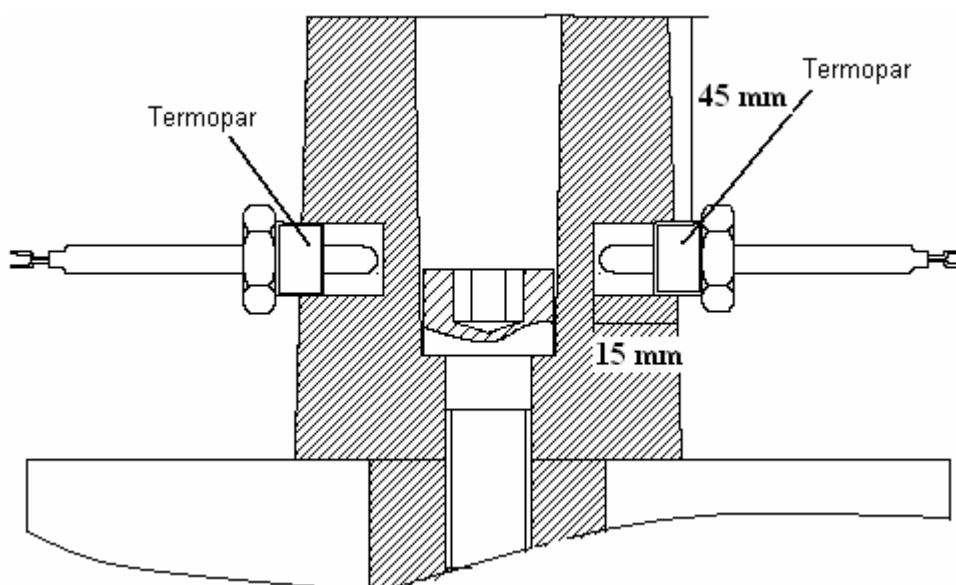


Figura 3-11 – Termopares fixados nos corpos-de-prova.

Para a coleta e o armazenamento dos sinais gerados pelos termopares, foi utilizada uma unidade de aquisição de dados portátil, da marca Lynxs, modelo ADS0500 com 8 canais, alimentação 12V, com conversor A/D e condicionador de sinais integrado, pertencente ao laboratório GRANTE da UFSC. Tal equipamento foi conectado a um *notebook*, da marca Toshiba, modelo M115-S1061, para leitura e armazenamento. Para tanto, foi instalado *software* licenciado da Lynxs, AqDados 7.02. O sistema de aquisição está ilustrado na Figura 3-12.

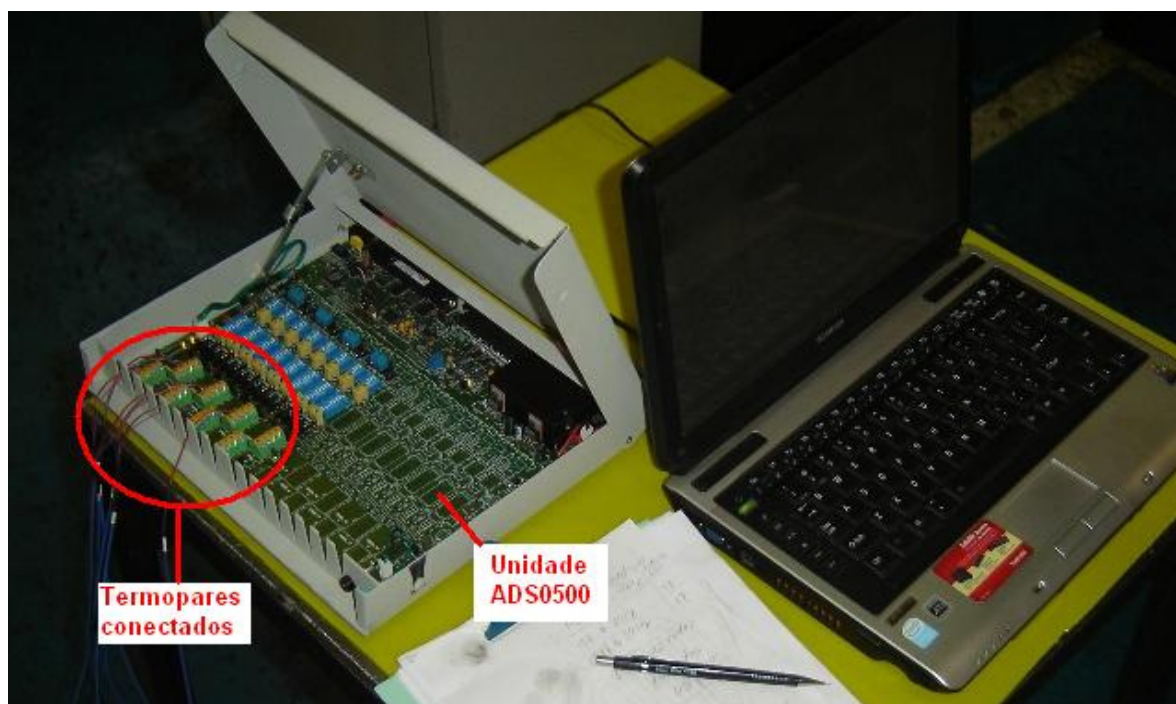


Figura 3-12 – Sistema de aquisição de dados utilizado.

Todo o sistema de aquisição, unidade ADS0500, termopares e PC, foram calibrados pela fundação CERTI.

3.6 Geometria dos corpos-de-prova

A geometria dos corpos-de-prova foi escolhida em função de dois aspectos principais:

- a) simular o fresamento da “face de fogo” do bloco de motor;
- b) variar a espessura das paredes.

Com relação ao primeiro aspecto, a “face de fogo” do bloco possui os furos para os cilindros e outras cavidades. O corpo-de-prova na forma de “cochinho” utilizado, conforme ilustrado na Figura 3-13, foi desenvolvido pelo instituto PTW da Alemanha, visando justamente simular esse processo, pois favorece o controle da

liga durante a fundição e apresenta menor custo, por não apresentar cavidades complexas, favorecendo o estudo desse processo, que apresenta corte interrompido.

O segundo aspecto, porém não pode ser levado em consideração, em razão de uma limitação do processo de fundição, pois, em consequência do controle da solidificação da liga, não foi possível variar a espessura das paredes dos corpos-de-prova.

Diante dessa limitação, optou-se, então, por uma espessura de parede padrão, focando o trabalho nas diferenças entre os dois tipos de ferros fundidos utilizados. Na Figura 3-13, pode-se visualizar a figura com as dimensões dos corpos-de-prova utilizados.

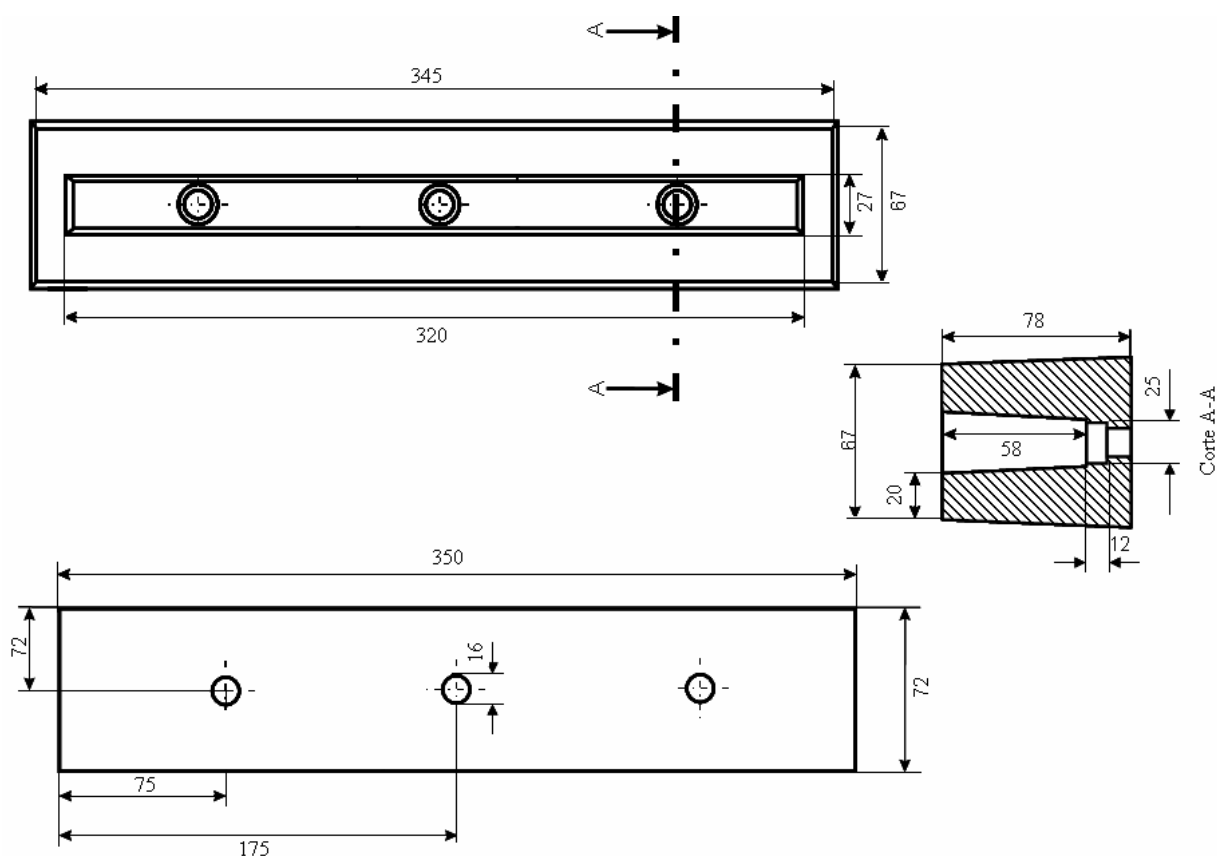


Figura 3-13 – Desenho corpo-de-prova utilizado

3.7 Metodologia para estudar a usinabilidade dos materiais

Inicialmente, este estudo se direcionou a verificar a usinabilidade do ferro fundido vermicular em relação à do ferro fundido cinzento no fresamento. Essa propriedade dos referidos materiais foi caracterizada com base no desgaste e vida

das ferramentas utilizadas no experimento. Foram realizados experimentos em condições de usinagem utilizadas na produção industrial.

3.7.1 Parâmetros de corte

Utilizaram-se dois tipos de materiais de ferramenta de corte, uma de metal-duro e outra cerâmica, ambas comerciais, do mesmo fabricante e com mesma geometria. Ambas também são utilizadas na linha de usinagem da empresa, para o fresamento da “face de fogo” dos blocos de motores, tanto no vermicular quanto no cinzento, motivo pelo qual se utilizaram esses dois tipos de ferramentas.

Os parâmetros de corte foram definidos com base nos parâmetros utilizados na produção, no catálogo do fabricante e com base em pesquisas anteriormente realizadas, com fresamento de ferro fundido vermicular e cinzento. Na Tabela 3-1, estão descritos os parâmetros utilizados, e a denominação das ferramentas.

Tabela 3-1 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.

Parâmetros de Corte			
Parâmetros	Metal-Duro WAK15	Cerâmica WSN10	Cerâmica WSN10
v_c (m/min)	200	400	400
v_f (mm/min)	238	477	955
f_z (mm/gume)	0,15	0,15	0,30
a_p (mm)	0,5	2	2
a_e (mm)	67	67	67
n (rpm)	796	1592	1592
d (mm)	80	80	80
nº de gumes	2	2	2

Os parâmetros da Tabela 3-1 foram utilizados para os três tipos de experimentos: usinabilidade, deformação e temperatura.

3.7.2 Procedimento experimental

Antes da realização dos experimentos de usinabilidade, os corpos-de-prova foram pré-usinados, tanto na face inferior, para que a peça estivesse nivelada para sua fixação na mesa, quanto na parte superior, para remover a camada bruta,

evitando, assim, a sua influência no desempenho das ferramentas. A camada removida em ambas as faces foi de 3 mm.

Para esse experimento, não foi realizada a usinagem das paredes dos corpos-de-prova, em virtude da falta de tempo para tanto, pois a máquina-ferramenta utilizada na empresa foi disponibilizada por apenas 2 dias para a realização dos ensaios de usinabilidade.

As faces superior e inferior dos corpos-de-prova, ainda brutas e posteriormente usinadas, podem ser vistas nas Figura 3-14 e Figura 3-15, respectivamente.

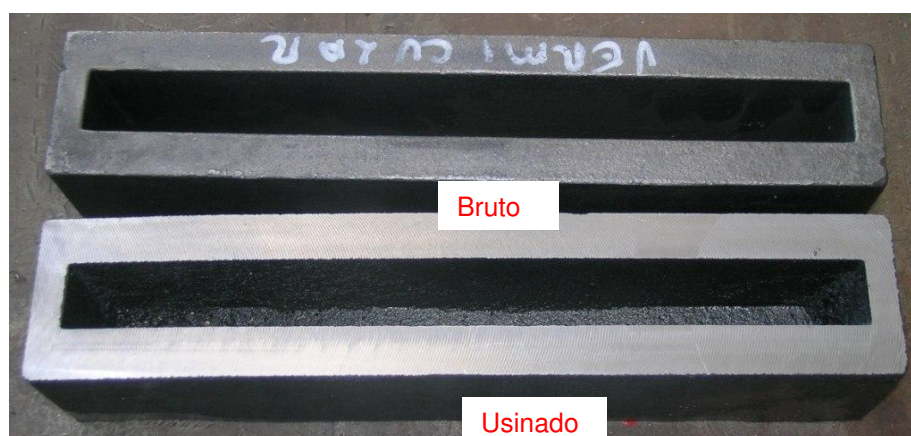


Figura 3-14 – Face superior do corpo-de-prova usinada e em bruto de fundição.

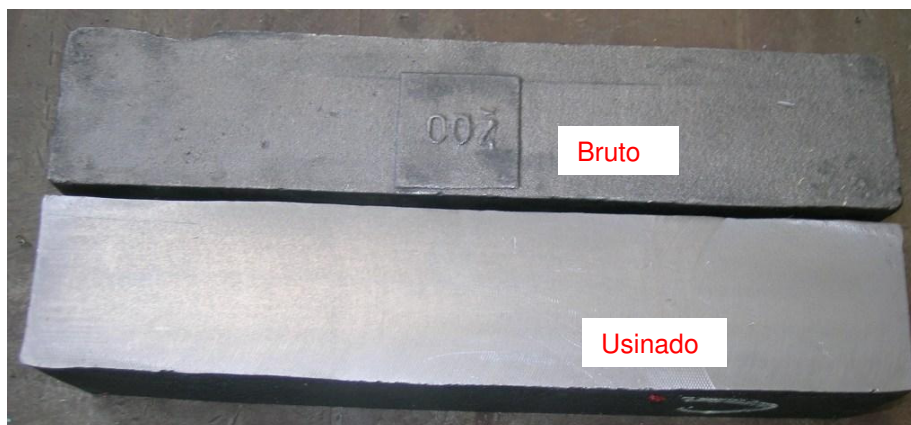


Figura 3-15 – Face inferior do corpo-de-prova usinada e em bruto de fundição.

Para cada ensaio, foram utilizados dois insertos, colocados a 180° entre si no cabeçote fresador, para se ter balanceamento e também se obter resultados de desgaste de dois gumes em um mesmo ensaio.

Foram realizadas duas repetições com a ferramenta de metal-duro em cada ferro fundido, duas com a ferramenta de cerâmica com avanço de 0,15 mm/gume

em cada ferro fundido e uma repetição em cada ferro fundido com a ferramenta cerâmica com avanço de 0,30 mm/gume.

Nesse último ensaio com a ferramenta cerâmica, foi realizada apenas uma repetição por causa da falta de tempo, pois a máquina-ferramenta foi disponibilizada por 5 dias para a realização dos experimentos de usinabilidade.

O procedimento para os ensaios foi:

- a) verificar a condição dos gumes antes do início de cada novo ensaio, com o microscópio óptico (Figura 3-5);
- b) efetuado o primeiro passe, media-se o desgaste inicial dos dois gumes;
- c) no caso da ferramenta de metal-duro, em razão da profundidade de corte (a_p) ser de 0,5 mm, ao se medir o desgaste após o primeiro passe, procedia-se às medições de dois em dois passes; sendo estável o desgaste, procedia-se às medições de quatro em quatro, assim, caso ocorresse nova estabilidade, media-se de oito em oito, até atingir o critério de final de vida; para a ferramenta cerâmica, por ser o a_p de 2 mm, media-se o desgaste a cada passe;
- d) como critério de final de vida, foi adotado o desgaste no flanco principal (VB_{max}), sendo este 0,3 mm para a ferramenta de metal-duro e de 0,6 mm para a ferramenta cerâmica; este critério foi adotado com base na literatura;
- e) foi acompanhado o desgaste de ambos os gumes, até que um atingisse o critério de final de vida adotado;
- f) atingido o critério e encerrado o ensaio, ambos os insertos eram depositados separadamente dentro de um pequeno saco plástico e identificados.

Após, foram adquiridas imagens dos gumes no microscópio da empresa descrito no item 3.3 deste capítulo.

3.8 Metodologia para estudar a deformação e temperatura dos materiais

A fim de avaliar a deformação das paredes dos corpos-de-prova, optou-se por medi-los mesmos em uma máquina de medição tridimensional da Fundação CERTI, antes e depois da usinagem.

Já para a medição da temperatura durante a usinagem, optou-se pela utilização de termopares. Em virtude disso, foi necessário pré-usinar as paredes dos corpos-de-prova, tendo-se, dessa forma, uma superfície regular e melhor acabada, para, então proceder à medição tridimensional dos corpos-de-prova.

Nessa pré-usinagem, também foram realizados os furos para fixação dos termopares. Para a análise estatística dos resultados, optou-se por utilizar a média aritmética dos resultados, pois o tamanho da amostra é pequeno.

3.8.1 Pré-usinagem

Na pré-usinagem, foram retirados de 2 a 3 mm de cada parede do corpo-de-prova, a fim de garantir a remoção de toda a camada bruta e uniformizar as paredes, utilizando-se de uma fresadora universal do laboratório USICON-UFSC.

Os furos para fixação dos termopares e para fixação dos corpos-de-prova na máquina utilizada para os experimentos foram feitos em uma furadeira radial, pertencente ao mesmo laboratório. Na Figura 3-16, é possível visualizar o corpo-de-prova antes e depois dessa usinagem.

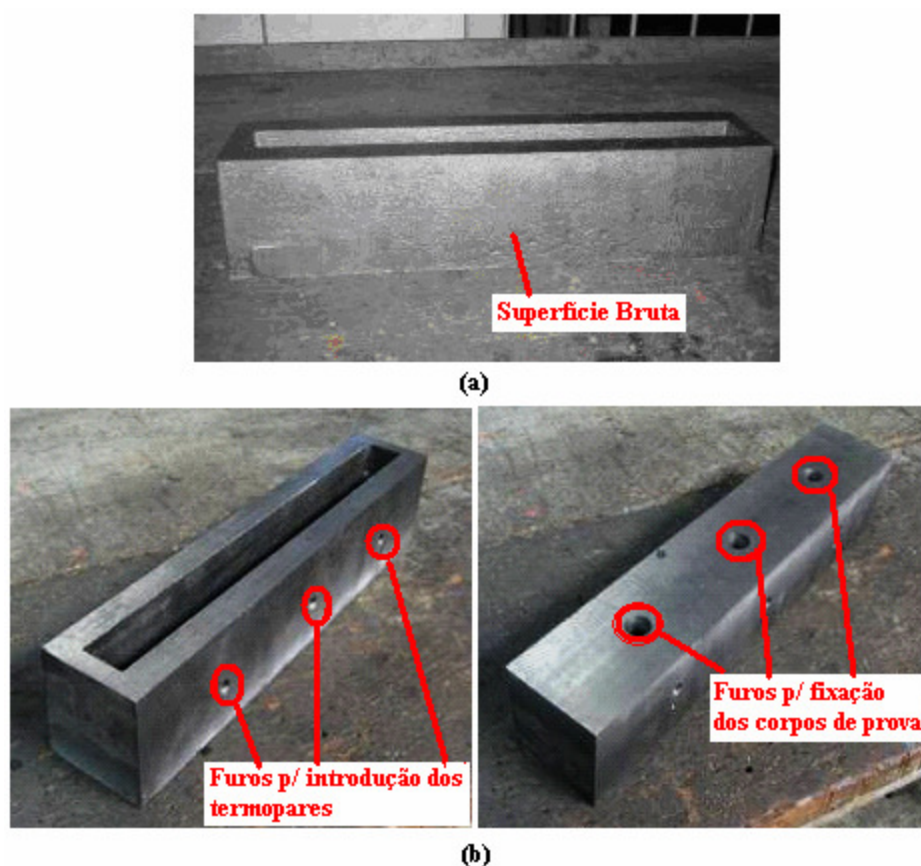


Figura 3-16 – (a) corpo-de-prova em bruto; (b) com as paredes usinadas, com os furos de fixação dos termopares e para a fixação do corpo-de-prova na máquina.

3.8.2 Procedimento para medição da deformação

Os corpos-de-prova foram medidos antes e depois da usinagem a uma temperatura de $20,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

A medição foi realizada da seguinte maneira:

- a) foi realizado um pré-alinhamento em modo CNC para cada peça;
- b) foram realizados três ciclos de medição por peça, os quais incluíram a medição dos pontos avaliados e das referências;
- c) as peças foram posicionadas no mesmo volume da máquina nas medições anteriores e posteriores à usinagem, alinhadas com os eixos da máquina;
- d) a fixação foi feita utilizando-se um parafuso no furo central da peça;
- e) a referência primária (rotações em torno de X e Y; translação em Z) foi definida por um plano por mínimos quadrados com seis pontos, medido sobre o desempenho;
- f) a referência secundária (rotação em torno de Z e translação de Y) foi definida por uma reta de simetria entre duas retas, por mínimos quadrados, com três pontos cada, medida nas laterais maiores, a 5 mm de altura em relação à referência primária;
- g) a referência terciária (translação em X) foi definida por um ponto de simetria entre dois pontos medidos nas laterais menores, a 5 mm de altura em relação à referência primária;
- h) foram medidos 10 pontos igualmente espaçados nas laterais maiores (coordenada Y), a 70 mm de altura em relação à referência primária (Figura 3-17);
- i) foram medidos 4 pontos igualmente espaçados nas laterais maiores (coordenada X), a 70 mm de altura em relação à referência primária (Figura 3-17 e Figura 3-18).

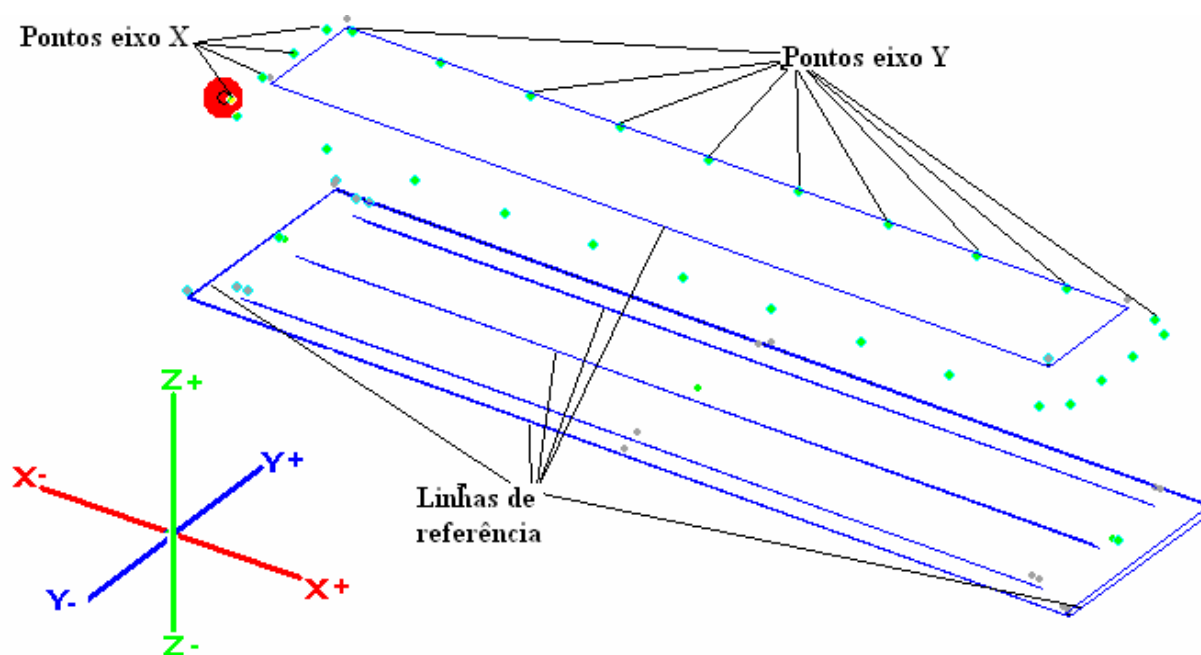


Figura 3-17 – Figura ilustrando o sentido das coordenadas nos três eixos, pontos de medição e linhas de referência.

3.8.3 Procedimento da usinagem para análise de deformação

A usinagem das peças, para sua posterior medição e avaliação tridimensional, ocorreu da seguinte forma:

- a) foram utilizados os três parâmetros de corte utilizados para os experimentos de usinabilidade (Tabela 3-1);
- b) para cada parâmetro, foram utilizados seis corpos-de-prova, sendo três em ferro fundido vermicular e três em ferro fundido cinzento, totalizando 18 corpos-de-prova. Isso porque, em cada parâmetro de corte utilizado, foram removidas três quantidades diferentes de material, 2 mm, 4 mm e 6 mm, para se ter três situações de deformação, conforme pode ser visto na Figura 3-18;
- c) o procedimento de usinagem consistia em remover 2 mm de altura no primeiro corpo-de-prova, no segundo 4 mm e no terceiro 6 mm; esse procedimento foi realizado para cada parâmetro de corte e em cada tipo de ferro fundido;
- d) tomou-se o cuidado de virar ou mesmo trocar o inserto a cada novo ensaio, garantindo as mesmas condições iniciais.

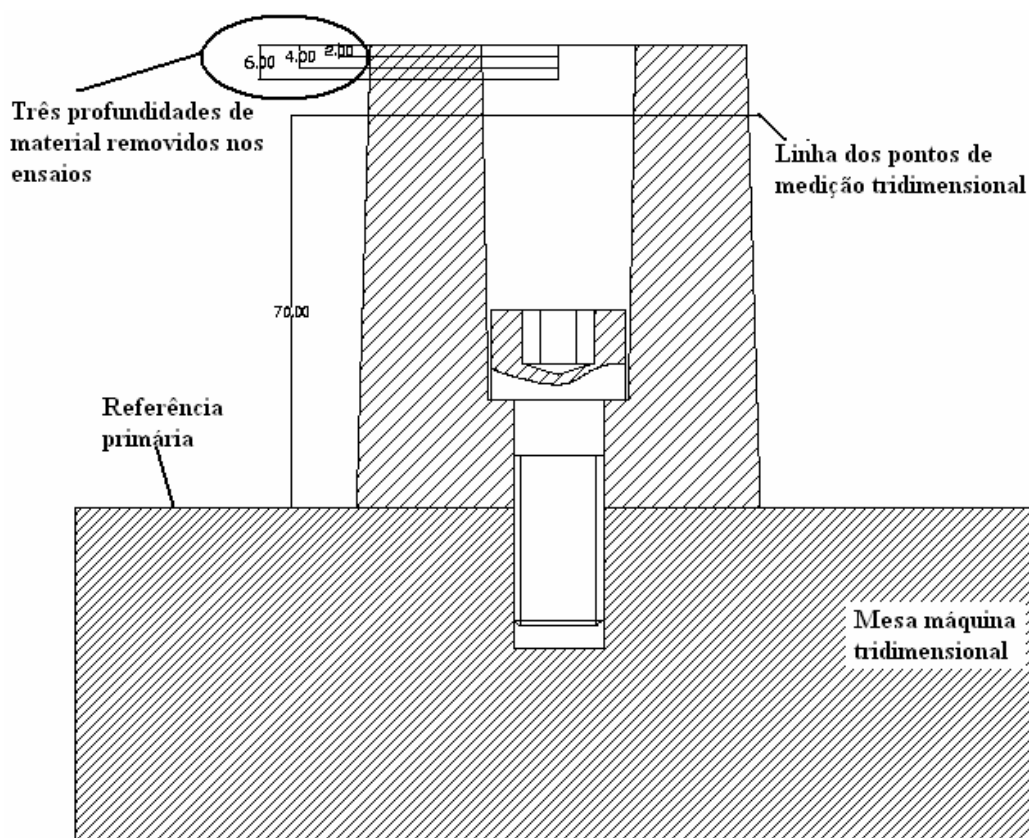


Figura 3-18 – Desenho esquemático ilustrando a quantidade de material removido e altura dos pontos de medição de deformação.

Foram utilizados os códigos mostrados na Tabela 3-2, para identificar os corpos-de-prova submetidos à usinagem de 2, 4 e 6 mm.

Tabela 3-2 – Codificação das peças ensaios deformação.

Ferro fundido Vermicular	Ferro fundido Cinzento
VER-MD-2 - vermicular metal-duro 2 mm	CIN-MD-2 - cinzento metal-duro 2 mm
VER-MD-4 - vermicular metal-duro 4 mm	CIN-MD-4 - cinzento metal-duro 4 mm
VER-MD-6 - vermicular metal-duro 6 mm	CIN-MD-6 - cinzento metal-duro 6 mm
VER-CER015-2 - vermicular cerâmica 2 mm	CIN-CER015-2 - cinzento cerâmica 2 mm
VER-CER015-4 - vermicular cerâmica 4 mm	CIN-CER015-4 - cinzento cerâmica 4 mm
VER-CER015-6 - vermicular cerâmica 6 mm	CIN-CER015-6 - cinzento cerâmica 6 mm
Ferro fundido Vermicular	Ferro fundido Cinzento
VER-CER030-2 - vermicular cerâmica 2 mm	CIN-CER030-2 - cinzento cerâmica 2 mm
VER-CER030-4 - vermicular cerâmica 4 mm	CIN-CER030-4 - cinzento cerâmica 4 mm
VER-CER030-6 - vermicular cerâmica 6 mm	CIN-CER030-6 - cinzento cerâmica 6 mm

Assim, MD significa ferramenta de metal-duro, CER015 significa ferramenta cerâmica ensaiada, com avanço de 0,15 mm/gume e CER030 significa ferramenta cerâmica, ensaiada com avanço de 0,30 mm/gume. Nesse caso, foi utilizado um conjunto de parâmetros de corte para metal-duro e dois para cerâmica.

3.8.4 Procedimento de usinagem para medição de temperatura

Para esses experimentos, foram utilizados seis corpos-de-prova, sendo três de cada tipo de ferro fundido, utilizando-se um de cada por parâmetro de corte. A taxa de aquisição de dados utilizada foi de 20 Hz.

O procedimento para usinar e captar os dados ocorreu da seguinte maneira:

- a) fixação do corpo-de-prova na máquina-ferramenta e fixação dos termopares naqueles (Figura 3-11);
- b) efetuar a leitura e o registro preliminar da temperatura do corpo-de-prova, antes do início da usinagem (o tempo de cada amostragem foi de acordo com o tempo de usinagem para cada parâmetro de corte);
- c) iniciar a usinagem, a leitura e o registro dos dados; cada passe efetuado equivale a uma amostragem com dados de temperatura equivalente ao tempo de usinagem de cada passe;
- d) cada corpo-de-prova foi usinado até ser removido 34 mm de sua altura, fazendo com que no último passe a ferramenta efetuasse o corte próximo ao termopar (a 6 mm de distância), para que os termopares não fossem usinados;
- e) após o término da usinagem, efetuava-se mais uma coleta de dados;
- f) ao final, retiravam-se os termopares e repetia-se o procedimento com outro corpo-de-prova; quando da mudança de parâmetros de corte, eram feitas alterações na programação da máquina-ferramenta e também no tempo de amostragem para aquisição dos dados.

Assim, como nos experimentos para análise da deformação, para cada novo ensaio, os insertos foram virados ou mesmo trocados, para que todos os ensaios iniciassem com gumes novos, garantindo as mesmas condições iniciais para todos.

4 MATERIAIS UTILIZADOS

4.1 Caracterização dos materiais utilizados

Neste capítulo, são apresentados dados referentes à composição química, microestruturas e propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzento e vermicular utilizados nos ensaios, bem como dados referentes às ferramentas utilizadas para usinar tais materiais.

4.1.1 Composição química dos ferros fundidos utilizados

As composições químicas dos dois ferros fundidos utilizados nos experimentos são mostradas na Tabela 4-1. A caracterização dos dois materiais foi realizada com base em amostras retiradas de cada lote de corpos-de-prova produzidos.

Tabela 4-1 – Composição química nominal dos ferros fundidos utilizados.

Elemento	Composição em %	
	Vermicular	Cinzento
Cobre (Cu)	1,29	0,86
Estanho (Sn)	0,078	0,094
Manganês (Mn)	0,36	0,44
Cromo (Cr)	0,038	0,27
Titânio (Ti)	0,010	0,010
Enxofre (S)	0,014	0,093
Fósforo (P)	0,043	0,060

4.1.2 Análise microestrutural dos ferros fundidos utilizados

A análise das microestruturas dos materiais foi realizada pelo laboratório metalúrgico e mecânico da empresa Tupy Fundições Ltda. Foram retiradas amostras dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios.

Por intermédio da análise metalográfica, foram determinadas as microestruturas dos referidos materiais. Já as imagens das referidas microestruturas foram obtidas com um microscópio óptico, da marca Nikon, por meio de um sistema de aquisição de imagens acoplado. Com base nessas imagens, foi possível

determinar a forma da grafita, o grau de nodularização no caso do ferro fundido vermicular e a quantidade de ferrita e de perlita dos materiais. Foram analisadas duas amostras de ferro fundido vermicular e quatro amostras de ferro fundido cinzento, retiradas dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios. A codificação das amostras para análise foi feita da seguinte maneira:

- a) **amostra 1** – Ensaio nº1 com ferramenta de metal-duro no vermicular;
- b) **amostra 2** – Ensaio nº2 com ferramenta de metal-duro no vermicular;
- c) **amostra 3** – Ensaio nº2 com ferramenta de cerâmica no cinzento;
- d) **amostra 4** - Ensaio nº3 com ferramenta de cerâmica no cinzento;
- e) **amostra 5** - Ensaio nº1 com ferramenta de metal-duro no cinzento;
- f) **amostra 6** - Ensaio nº2 com ferramenta de metal-duro no cinzento.

O resultado da análise das imagens quanto à porcentagem de nódulos, forma da grafita e matriz metálica dos dois materiais é exibido na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 – Características dos ferros fundidos com base nas imagens obtidas.

Material	Grafita Vermicular	Grafita Nodular	Grafita Lamelar	Forma grafita	Perlita	Ferrita
Vermicular	94%	6%	-	III e IV	98%	2%
Cinzento	-	-	100%	I	100%	0%

Nas Figura 4-1 e Figura 4-2, podem-se observar as micrografias das amostras 1 e 2 respectivamente, que foram retiradas de dois corpos-de-prova utilizados nos experimentos de usinabilidade com ferro fundido vermicular. As imagens da esquerda são sem ataque e da direita com ataque, nital 3%.

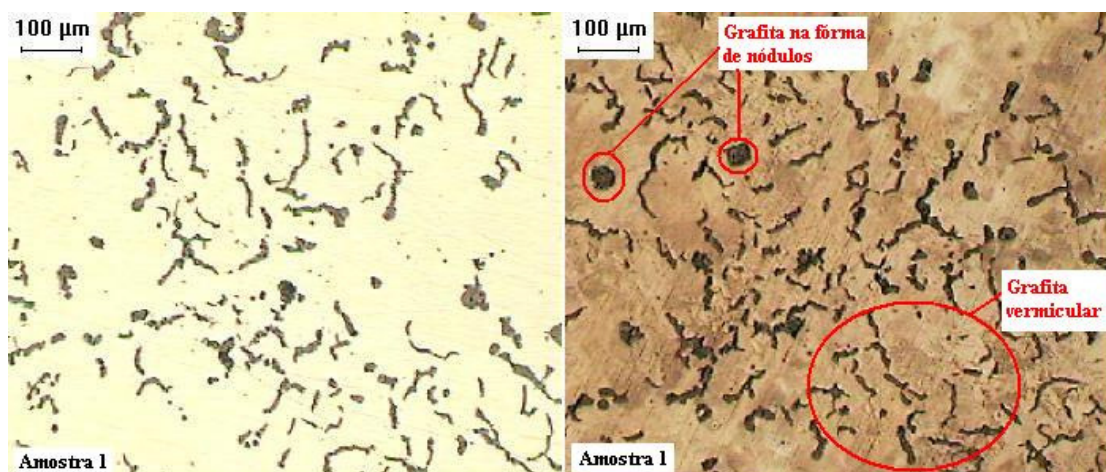


Figura 4-1 – Micrografias ferro fundido vermicular amostra 1.

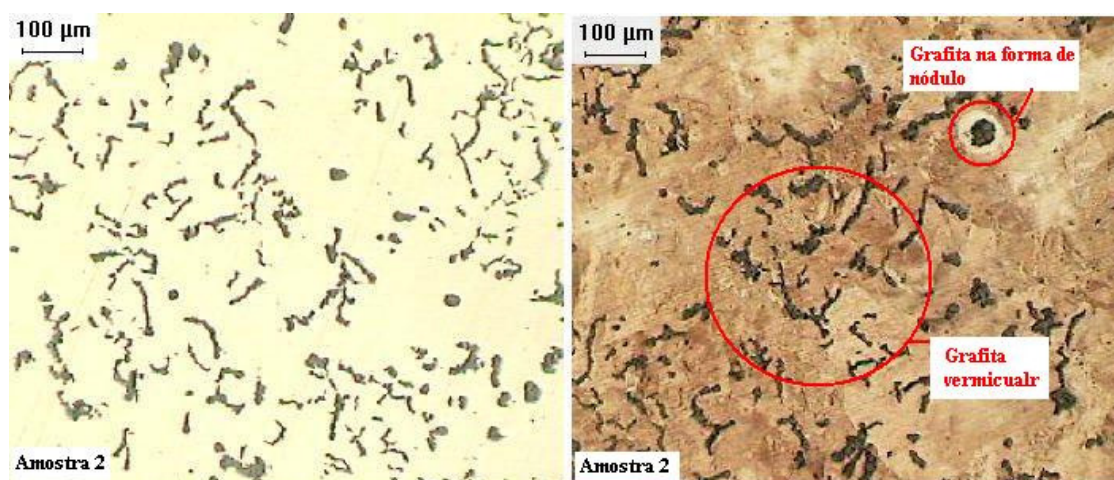


Figura 4-2 – Micrografias ferro fundido vermicular amostra 2.

Observa-se nas imagens que a diferença com relação à caracterização das amostras 1 e 2 é muito pequena. Entretanto, na Figura 4-3, constata-se que houve a formação de carbonetos durante a fundição em ambas as amostras.

A formação desses carbonetos pode ser explicada pela diminuição da inoculação para a obtenção de uma liga com uma quantidade baixa de grafita nodular, ocorrendo a precipitação de carbonetos, que podem influenciar significativamente na usinabilidade do ferro fundido vermicular (DORÉ, 2007).

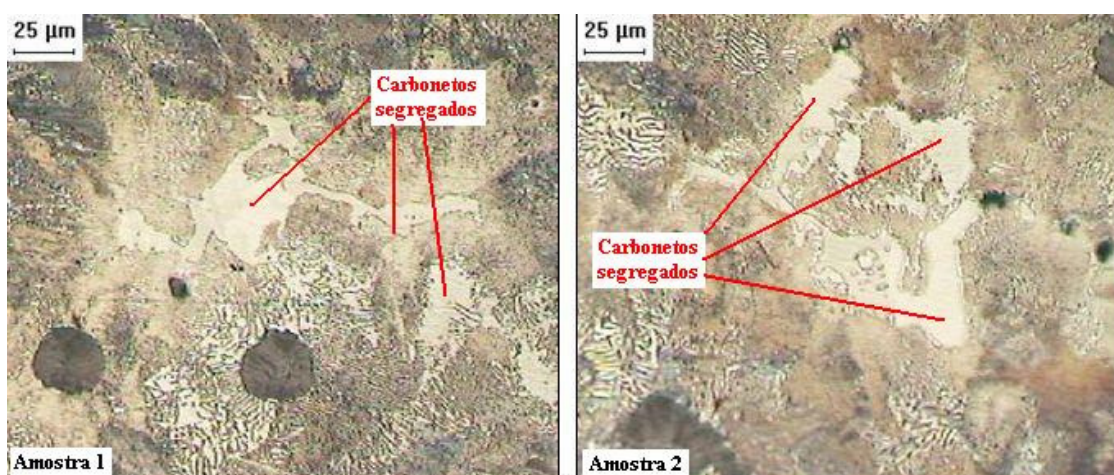


Figura 4-3 – Micrografia das amostras 1 e 2 do ferro fundido vermicular evidenciando a presença de carbonetos de segregação.

Assim como no ferro fundido vermicular, o ferro fundido cinzento foi submetido à mesma análise; neste último, foram analisadas quatro amostras. Na Figura 4-4, é possível visualizar a micrografia dessas quatro amostras com ataque nital 3%. A grafita lamelar e a matriz perlítica podem ser visualizadas com maior

clareza na Figura 4-5, onde se tem as micrografias das amostras 3 e 4, evidenciando as lamelas de grafita e a matriz perlítica (as amostras 5 e 6 apresentaram micrografias semelhantes).

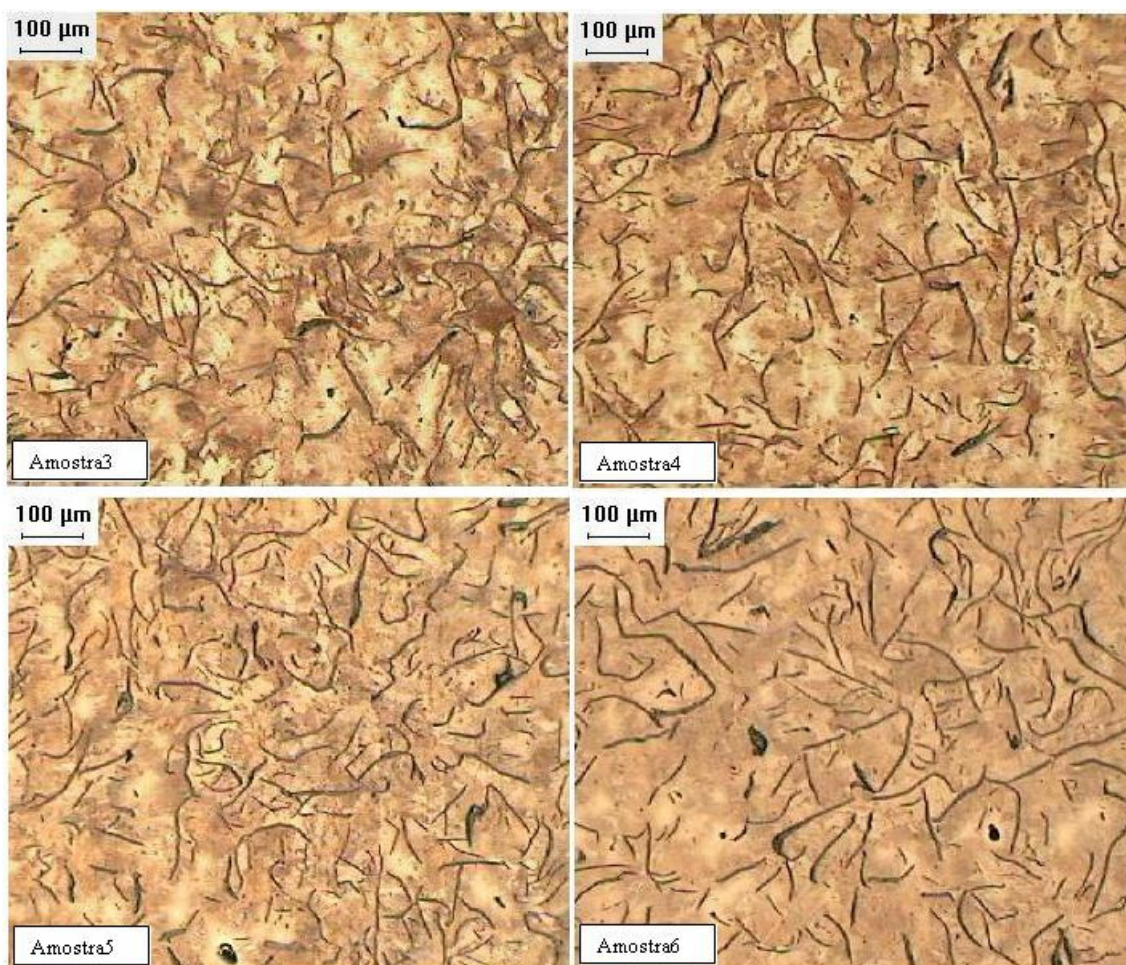


Figura 4-4 – Micrografias do ferro fundido cinzento de quatro amostras retiradas de quatro corpos-de-prova utilizados nos ensaios.

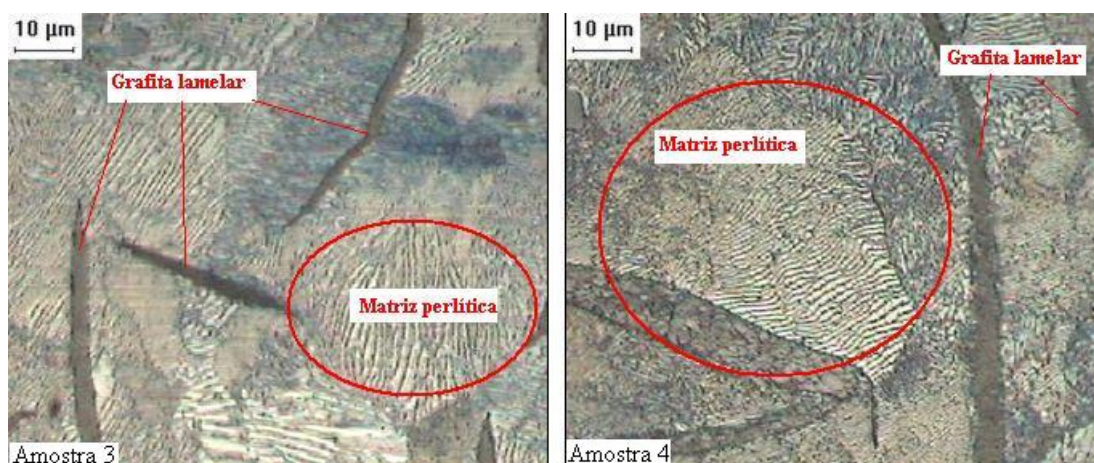


Figura 4-5 – Micrografias das amostras 3 e 4 do ferro fundido cinzento evidenciando as lamelas de grafita e a matriz perlítica.

Não se observou nas micrografias das quatro amostras de ferro fundido cinzento a presença de carbonetos ou outras inclusões, entretanto verificou-se que as amostras de ambos os materiais apresentaram grãos de sílica aderidos à superfície bruta de fundição.

Esse aspecto pode ser visto nas Figura 4-6 e Figura 4-7, nas quais há imagens de MEV da superfície bruta de fundição das amostras e, também, a análise química que demonstra a alta quantidade de silício, que indica a presença de grãos de sílica aderidos ao corpo-de-prova.

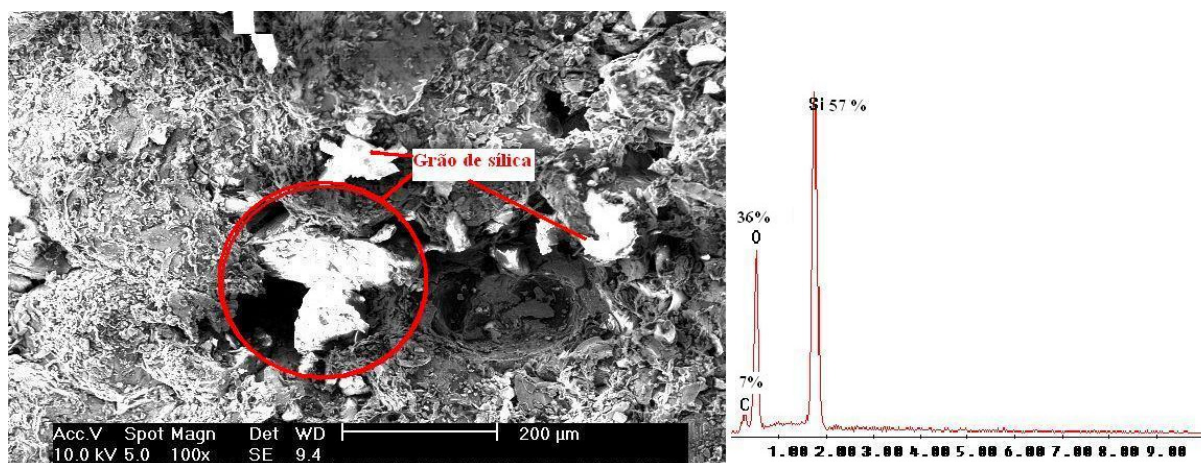


Figura 4-6 – Imagem obtida em MEV da superfície bruta da amostra 3, evidenciando a possível presença de areia residual de fundição.

Pela Figura 4-6, observam-se grãos de sílica aderidos à superfície fundida da amostra 3. Quanto à análise química, verifica-se que esta apresenta um pico elevado de silício (Figura 4-6), indicando grande probabilidade de ser areia residual de fundição.

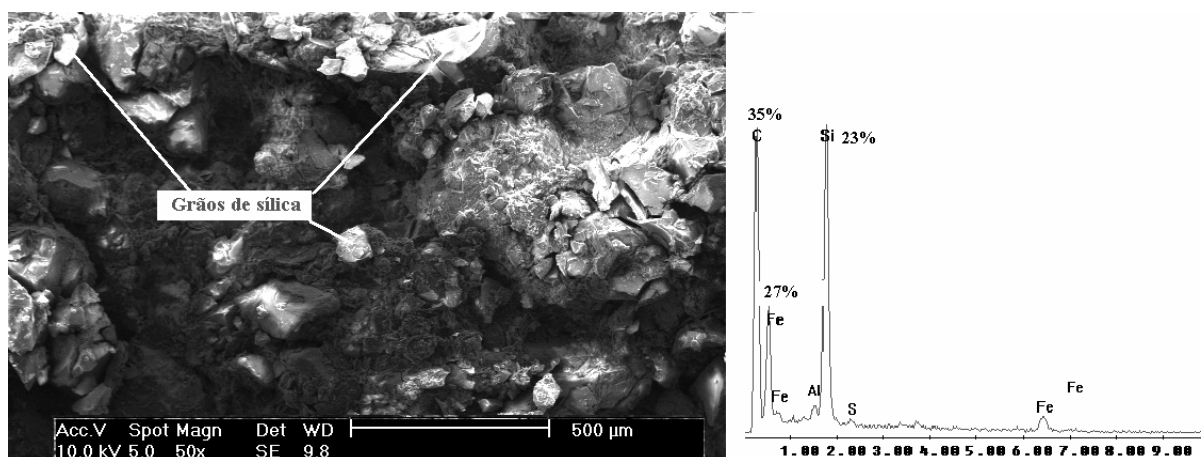


Figura 4-7 – Imagem obtida em MEV da superfície bruta da amostra 4, evidenciando a possível presença de areia residual de fundição.

Isso também ocorre nas amostras 4 e 5, mas com um teor de silício menor, como pode ser visualizado na Figura 4-7. Verifica-se nessa figura que o teor de silício é bem menor na amostra 4 do que o apresentado na amostra 3, além de apresentar uma pequena quantidade de alumínio e de enxofre e uma quantidade razoável de Fe. Quanto à amostra 5, percebe-se que esta se apresentou bastante semelhante à amostra 4, tanto visualmente como nos resultados da análise química.

As amostras de ferro fundido vermicular apresentaram um teor de silício na superfície bruta bem menor do que o apresentado no ferro fundido cinzento, e que na amostra 1 (Si = 4%) o teor de silício foi maior do que o da amostra 2 (Si = 1 %).

4.1.3 Determinação da dureza e propriedades mecânicas

A medição da dureza e determinação das propriedades mecânicas dos dois ferros fundidos foi realizada no laboratório metalúrgico e mecânico da empresa Tupy Fundições Ltda.

Para a medição da dureza da superfície e do núcleo, foi utilizado um Durômetro Wolpert, com uma esfera de 0,5 mm de diâmetro e uma carga de 750 kgf, sendo a medição na escala Brinell (HB). Já para medição da microdureza da perlita, na escala Vickers (HV), foi utilizado um Microdurômetro Zwick, com uma pirâmide de diamante de base quadrada e uma carga de 0,5 kgf.

Para determinar as propriedades mecânicas, utilizou-se uma máquina universal de ensaios Kratos, disponível no mesmo laboratório. Os corpos-de-prova foram preparados seguindo a norma NBR 6916. Os resultados da medição de dureza e das propriedades mecânicas podem ser vistos na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos ensaiados.

Material	Microdureza na Perlita (HV 01)	Dureza Brinell (HB)		Limite de resistência (Mpa)	Limite de escoamento (Mpa)	Alongamento (%)
Vermicular	321 a 350	263		515	407	2,3
Cinzento	296 a 350	Superfície	Núcleo	313	-	-
		240	227			

Observando os resultados, constata-se que, apesar das durezas dos dois materiais serem próximas, o ferro fundido vermicular apresenta limite de resistência

significativamente maior. Em virtude da forma da grafita desse material, a nucleação e propagação de trincas tornam-se muito mais difíceis do que no ferro fundido cinzento, conferindo-lhe maior resistência.

4.2 Materiais e geometria das ferramentas de corte

Quanto às ferramentas de corte, foram utilizados dois tipos de materiais de ferramentas, uma de metal-duro revestido e outra de cerâmica, ambas fabricadas pela Walter (2006) e com mesma geometria. As ferramentas são as mesmas utilizadas pela empresa Tupy Fundições Ltda., para o fresamento dos blocos de motores.

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.

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 (STEMMER, 2005a), proporcionando alta resistência ao desgaste. Na Tabela 4-4, tem-se o substrato e os tipos de revestimento da ferramenta de metal-duro, com suas respectivas espessuras em micrômetros.

Tabela 4-4 – Substrato e revestimentos da ferramenta de metal-duro.

Ferramenta	Substrato	Camadas de revestimentos
Metal-duro WAK15	WK1 (WC-Co)	TiCN - 9 μm
		Al_2O_3 - 6 μm
		TiN aproximadamente 1 μm

As características de cada revestimento são:

- a) **Nitreto de titânio (TiN)**: é o revestimento de menor espessura, sendo ele a primeira camada da ferramenta (camada externa); atua na redução do desgaste na face e no flanco da ferramenta, pois apresenta alta dureza; também, diminui a aderência do material da peça na ferramenta (STEMMER, 2005a);
- b) **Óxido de alumínio (Al_2O_3)**: é a segunda camada de revestimento (entre a de TiN e TiCN); fornece boa resistência ao desgaste, a ataques químicos e à oxidação mesmo exposta a altas temperaturas;

- c) **Carbonitreto de titânio (TiCN):** o revestimento de TiCN é a maior camada, vindo após a de Al_2O_3 , ou seja, é a camada sobreposta diretamente no substrato. Considerado um revestimento múltiplo de TiC e TiN, ela combina as características de resistência ao desgaste por abrasão do TiC, e de resistência à oxidação do TiN.

Podem-se visualizar as duas ferramentas utilizadas na Figura 4-8.

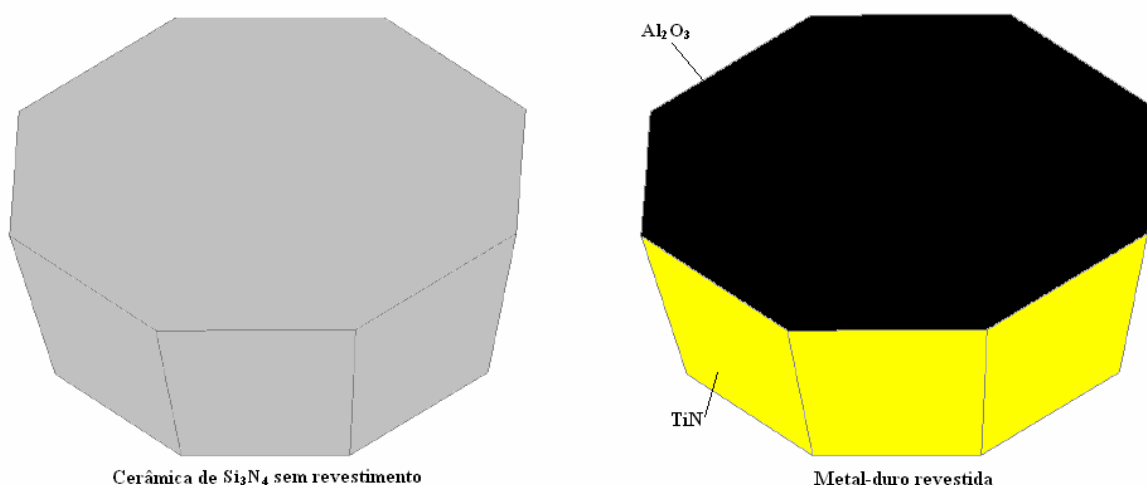


Figura 4-8 – Inseros de cerâmica (esquerda) e metal-duro (direita) utilizados nos ensaios.

Quanto à geometria, ambas são octogonais positivas, com oito gumes, com um ângulo de saída efetivo de 14° . Na Figura 4-9, é possível observar o desenho ilustrativo retirado do catálogo da Walter, com as dimensões dos inseros, em milímetros.

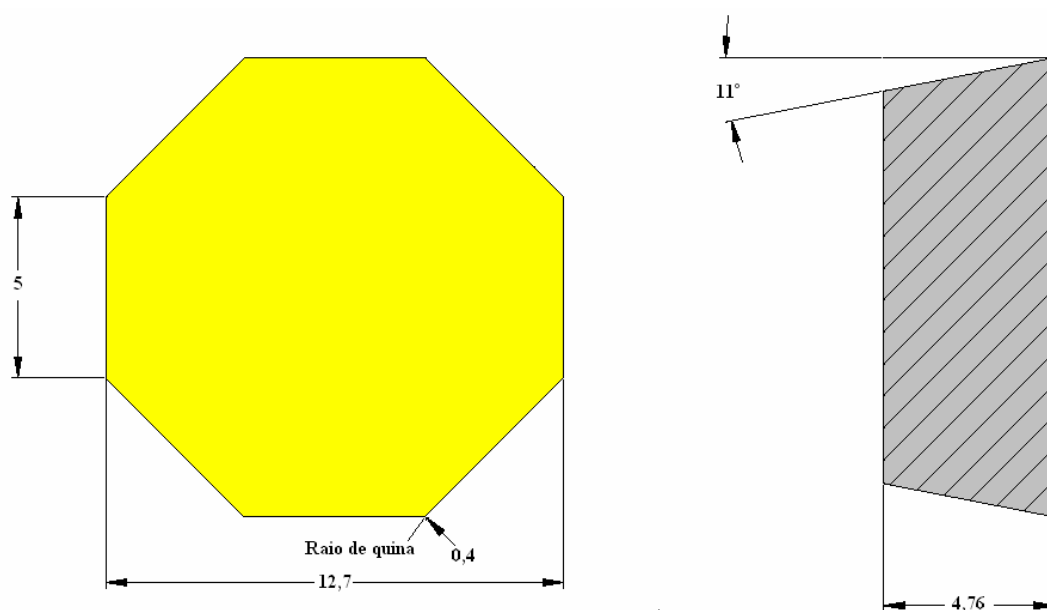


Figura 4-9 – Desenho ilustrativo com as dimensões dos inseros.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Como descrito no capítulo 4, foram utilizados dois tipos de ferramentas para os três tipos de experimentos com ferro fundido vermicular (VER) e ferro fundido cinzento (CIN), sendo uma de metal-duro (MD) e outra de cerâmica (CER).

Para a ferramenta CER, foram utilizados dois parâmetros de corte, nos quais a diferença foi o avanço por gume. Já para a ferramenta MD, foi utilizado apenas um parâmetro de corte, conforme se verifica na Tabela 3-1.

Nos três itens a seguir, são expostos e discutidos os resultados obtidos em cada um dos três tipos de experimentos realizados neste trabalho.

5.1 Análise comparativa da usinabilidade do ferro fundido vermicular e do ferro fundido cinzento com ferramenta de metal-duro e cerâmica

5.1.1 Análise de usinabilidade do VER com a ferramenta de metal-duro

Foram realizados dois ensaios (EN1 e EN2) no VER com a ferramenta MD, a uma velocidade de corte (v_c) de 200 m/min, profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm e avanço por gume (f) de 0,15 mm, tendo como critério de final de vida o desgaste no flanco principal do gume da ferramenta, VB_{max} de 0,3 mm.

Foram utilizados dois gumes para cada ensaio e foi acompanhada a evolução do desgaste de ambos, sendo encerrado o ensaio assim que um dos gumes atingi-se o critério VB determinado. Para a análise dos resultados, foi feita a média dos valores de desgaste dos dois gumes utilizados em cada ensaio.

Na Figura 5-1, observar-se o comportamento de desgaste da ferramenta MD. No ensaio 1 (MD-VER-EN1), a ferramenta apresentou uma vida de 43,2 min e, no ensaio 2, (MD-VER-EN2) esta apresentou uma vida de aproximadamente 71 min, ou seja, há um aumento de aproximadamente 64% na vida do primeiro para o segundo ensaio.

Essa diferença significativa entre os dois ensaios pode ser atribuída, à maior presença de areia residual de fundição (picos de silício) na superfície das paredes do corpo-de-prova do ensaio 1 ($Si = 4\%$), em relação ao corpo-de-prova utilizado no ensaio2 ($Si = 1\%$). Também, deve-se considerar a elevada presença de carbonetos no corpo-de-prova do ensaio 1, pois em ambos foi verificada a presença destes (Figura 4-3 do item 4.1.2).

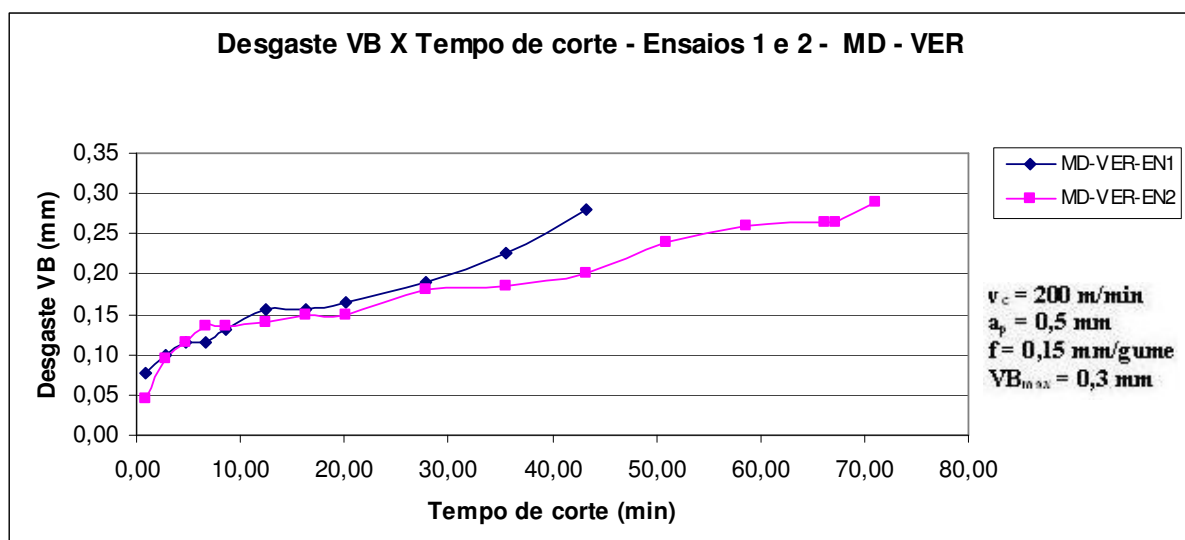


Figura 5-1 – Comportamento do desgaste da ferramenta MD no VER.

Com uma análise prévia dos gumes das ferramentas, em um microscópio óptico de aquisição de imagens, verificou-se que o principal mecanismo de desgaste foi por abrasão. Conforme consta neste trabalho, esse tipo de desgaste é responsável tanto pelo desgaste de flanco quanto pelo desgaste de cratera. No entanto, esse fator se faz mais predominante no desgaste de flanco, pois a superfície de folga entra em atrito com um elemento rígido, que é a peça, enquanto que a face atrita com um elemento flexível, que é o cavaco.

O desgaste gerado pela abrasão é incentivado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte que reduz a dureza da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999 e STEMMER, 2005a). Para a confirmação dessa hipótese, foram feitas imagens em microscópio eletrônico de varredura (MEV), do gume 1 do ensaio 1 e gume 2 do ensaio 2, pois estes foram os que atingiram o critério de final de vida estabelecido. As imagens dos gumes podem ser visualizadas na Figura 5-2.

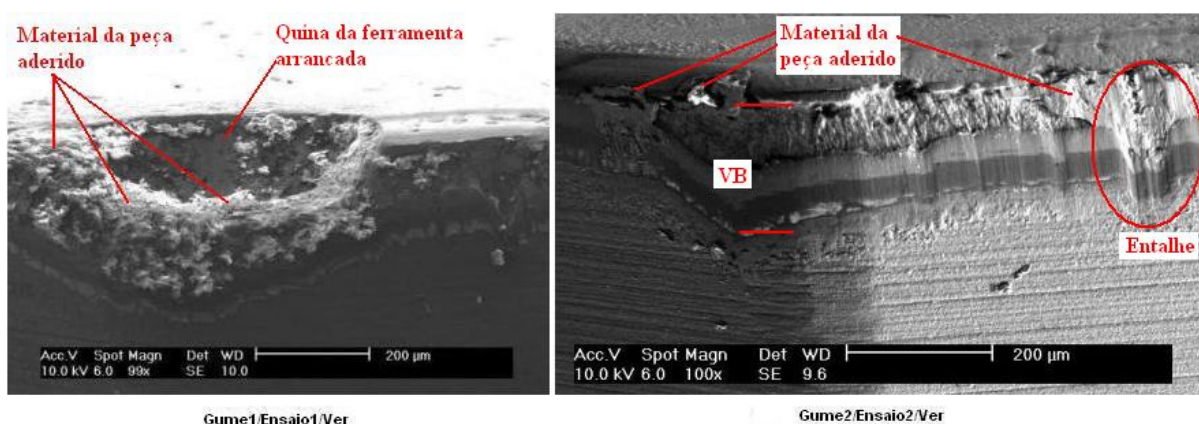


Figura 5-2 – Desgaste dos gumes dos ensaios 1 e 2 no VER observados no MEV.

Pelas imagens de MEV, observa-se com maior clareza o desgaste abrasivo ocorrido no flanco das ferramentas, principalmente no ensaio 2, no qual se observam as camadas de revestimento e o substrato exposto da ferramenta, bem como o material da peça aderido aos gumes.

No caso do gume do ensaio 1, este teve a quina da ferramenta arrancada, apresentando o material da peça aderido no local. Isso ocorreu em consequência do mecanismo de desgaste por aderência, pois, quando duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, forma-se entre elas um extrato metálico que provoca aderência. A resistência desse extrato é elevada a tal ponto que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre ruptura em um dos metais e não na superfície de contato (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

O fenômeno da aderência aliado ao desgaste abrasivo, choques mecânicos e térmicos (característicos do corte intermitente) contribuíram para o arrancamento do material da ferramenta. A presença dessa avaria foi o principal motivo para o final da vida da ferramenta.

Com relação ao gume do ensaio 2, que teve uma vida 64% maior do que o gume do ensaio 1, este igualmente apresentou a abrasão como principal mecanismo de desgaste, aliado ao fenômeno da aderência. Esse segundo mecanismo de desgaste se confirma ao observar o gume na Figura 5-2, pois, além de apresentar as marcas características do desgaste abrasivo, apresenta também material da peça aderido ao gume, além de uma marca de desgaste de entalhe, que também pode ocorrer em virtude do mecanismo de aderência.

5.1.2 Análise de usinabilidade do CIN com a ferramenta de metal-duro

Para essa análise, foram utilizados os mesmos parâmetros de corte do VER para os ensaios em CIN. Na Figura 5-3, observar-se que, assim como aconteceu no VER, a vida da ferramenta no ensaio 2 (MD-CIN-EN2) foi superior à obtida no ensaio 1 (MD-CIN-EN1). No ensaio 1, o tempo efetivo de corte obtido foi de 58,3 min e, no ensaio 2, foi de 127,7 min, portanto, nesse caso, o aumento da vida do segundo em relação ao primeiro ensaio foi de aproximadamente 118%.

A causa dessa diferença acentuada entre os dois ensaios foi atribuída à presença de areia residual de fundição em maior quantidade nas paredes em bruto do corpo-de-prova utilizado para no ensaio 1, pois esse fator aumenta em muito o desgaste por abrasão na ferramenta.

Meurer (2007) realizou um estudo sobre a usinabilidade de discos de freio em ferro fundido cinzento, com ferramenta de metal-duro e cerâmica, para analisar a vida das ferramentas quando da remoção da camada bruta de fundição e pós-remoção. Nos resultados desse estudo, o autor observou que a vida da ferramenta reduz significativamente comparada aos resultados pós-remoção da camada bruta, destacando como causas a variação da qualidade de limpeza na superfície do fundido e variação da presença de carboneto de ferro (F_3C) nos discos de freio.

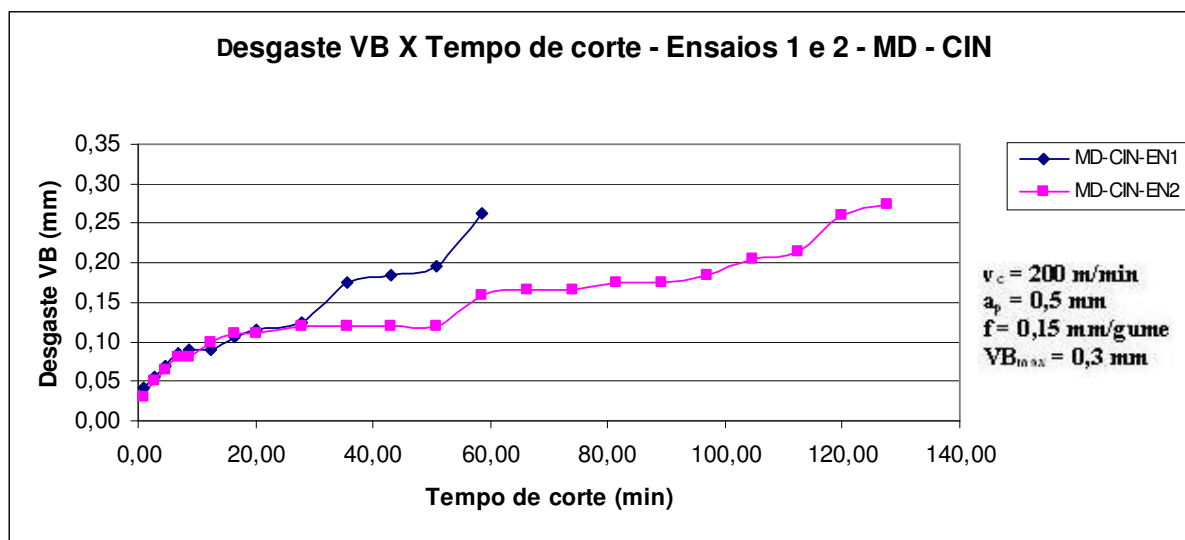


Figura 5-3 – Comportamento do desgaste da ferramenta MD no CIN.

Destaca-se ainda que, conforme mencionado no capítulo anterior, a areia residual se apresenta na forma de silício, a porcentagem desse elemento encontrada em alguns pontos na amostra retirada do corpo-de-prova do ensaio 1 foi de aproximadamente 28%, enquanto na amostra do corpo-de-prova do ensaio 2 foi de 2,4%. Como as micrografias são muito semelhantes e não foi observada a presença de carbonetos, isso indica que a presença de maior teor de areia residual no corpo-de-prova do ensaio 1 em relação ao do ensaio 2 é a principal causa na diferença da vida da ferramenta entre os dois ensaios.

Nos ensaios em CIN, como nos ensaios em VER, também foram analisados no MEV os gumes que atingiram o critério de final de vida no ensaio 1 e 2. O principal mecanismo de desgaste observado nos ensaios com CIN também foi a abrasão, aliada à aderência; isso porque, tanto no ensaio 1 quanto no ensaio 2, constatou-se arrancamento de material no gume, sendo este mais significativo no gume do ensaio 1, bem como material da peça aderido ao gume. As imagens de MEV dos gumes podem ser observadas na Figura 5-4.

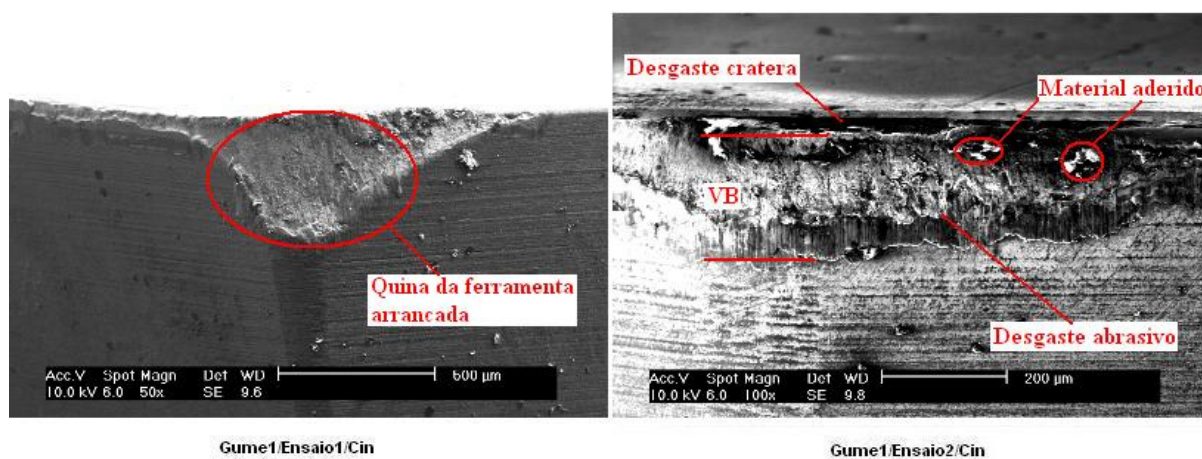


Figura 5-4 – Desgaste dos Gumes 1 dos ensaios 1 e 2 no cinzento observados no MEV.

Pelas imagens obtidas no MEV, observar-se que no gume do ensaio 1, a quina da ferramenta foi arrancada, deixando o substrato exposto e a ferramenta sem condições de corte, semelhante ao ocorrido no ensaio 1 com VER.

Portanto, também nesse caso, o fenômeno da aderência, aliado ao desgaste abrasivo, potencializado pela maior presença de areia residual de fundição e a ocorrência de choques mecânicos e térmicos, contribuíram para o arrancamento do material da ferramenta, ocasionando o final prematuro da vida da ferramenta, comparada com a obtida no ensaio 2.

Quanto ao gume do ensaio 2, percebe-se a presença de material aderido ao gume da ferramenta, bem como presença de desgaste de cratera na superfície de saída da ferramenta, resultante dos mesmos mecanismos de desgaste ocorridos no ensaio1, porém em menor intensidade. Esse resultado ocorreu em virtude de as paredes em bruto do corpo-de-prova utilizado nesse ensaio apresentarem areia residual de fundição em quantidade bem menor do que a encontrada no corpo-de-prova do ensaio 1.

5.1.3 Comparativo dos resultados entre VER e CIN com metal-duro

Na Figura 5-5 é apresentada a média dos resultados obtidos em relação ao tempo de corte (min), empregando-se a ferramenta MD para as duas séries de ensaios, em cada tipo de ferro fundido.

Comparando a média dos resultados das duas repetições realizadas com o CIN e a média das duas repetições com o VER, tem-se que o primeiro apresenta uma vida aproximadamente 63% superior à do segundo. Essa diferença evidencia a menor usinabilidade do VER em comparação ao CIN.

Como consta neste trabalho, um dos fatores determinantes para essa diferença é a formação de sulfeto de manganês no CIN. O sulfeto de manganês se deposita na superfície da ferramenta de corte, garantindo lubrificação local e, conseqüentemente, reduzindo o coeficiente de atrito na interface cavaco/ferramenta, proporcionando menor desgaste da ferramenta (GASTEL et al., 2000, PEREIRA; BOEHS; GUESSER, 2006). Outro fator a ser considerado é a presença de carbonetos no VER, os quais não foram observados no CIN, que aumentam a ação abrasiva do material.

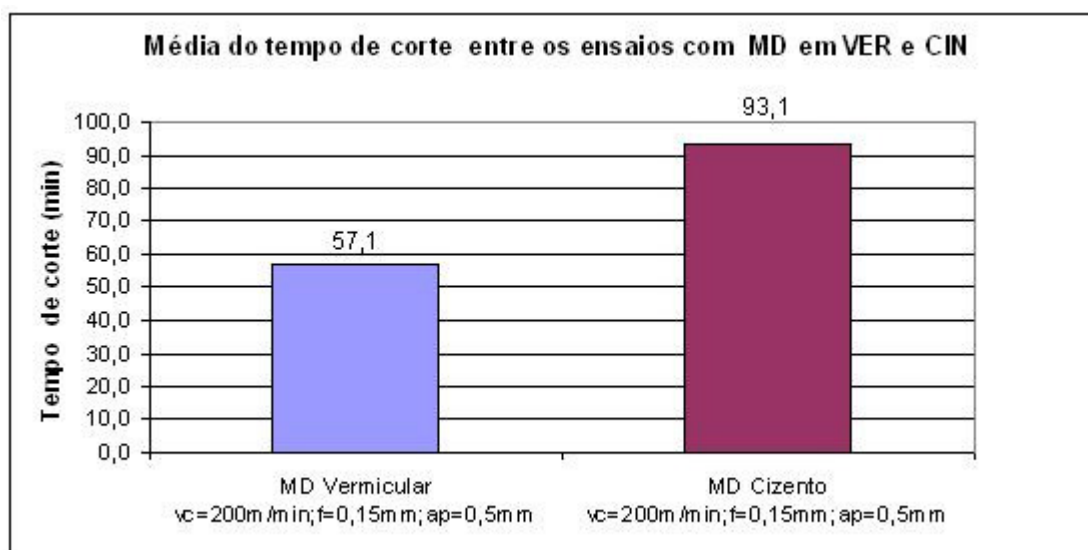


Figura 5-5 – Comportamento da vida da ferramenta MD em VER e CIN em virtude do tempo de corte.

Reuter e outros (2000, 2001) realizaram ensaios com ferramenta MD, com velocidades de corte de 250 m/min e 150 m/min, $a_p = 2$ mm e $f = 0,15$ mm/gume em VER e CIN, com características próximas às ligas utilizadas neste trabalho. Os resultados apresentaram uma vida de ferramenta usinando o VER 50% inferior à vida da ferramenta usinando o CIN, confirmando os resultados obtidos neste trabalho, embora não tenha sido possível fazer uma comparação direta com os resultados apresentados pelo referido autor, pois neste trabalho o a_p utilizado foi de 0,5 mm.

Compararam-se os resultados deste trabalho (corte interrompido) com resultados de corte contínuo de Xavier (2003) e Doré (2007), que realizaram ensaios de torneamento com ferramenta MD em uma liga de VER de baixa nodularidade com propriedades similares à utilizada neste trabalho, em que os autores utilizaram velocidade de corte de 160 m/min, f de 0,2 mm/rot e a_p de 0,5 mm. Xavier (2003) obteve como melhor resultado de vida de ferramenta 43 min, enquanto Doré (2007)

obteve como melhor resultado 29 min. Comparativamente, a média dos resultados de vida de ferramenta obtidos neste trabalho usando VER foi de 57,1 min, ou seja, 33% superior à obtida por Xavier (2003) e 97% superior à obtida por Doré (2007).

Sendo assim, confirma-se a maior dificuldade em se usar o VER em processos de corte contínuo. Isso ocorre em virtude, principalmente, do menor tempo de contato ferramenta/peça no corte interrompido, que reduz a ação do desgaste abrasivo na ferramenta.

5.1.4 Análise de usinabilidade do VER com a ferramenta de cerâmica

Nos ensaios com a ferramenta CER, tanto no VER como no CIN, foi utilizada velocidade de corte (v_c) de 400 m/min, profundidade de corte (a_p) de 2 mm e avanço por gume de 0,15 mm e feita uma repetição em cada material com avanço por gume de 0,3 mm, sendo o critério de final de vida o desgaste de flanco VB_{max} de 0,6 mm.

Assim como foi feito com a ferramenta MD, foram utilizados dois gumes por ensaio e acompanhado o desgaste de ambos, sendo encerrado o ensaio, assim que um dos gumes atingia o critério VB determinado. Também, foi utilizada a média dos valores de desgaste dos gumes, para análise dos resultados. Na Figura 5-6, estão expostos os resultados de desgaste da ferramenta CER dos três ensaios realizados no VER.

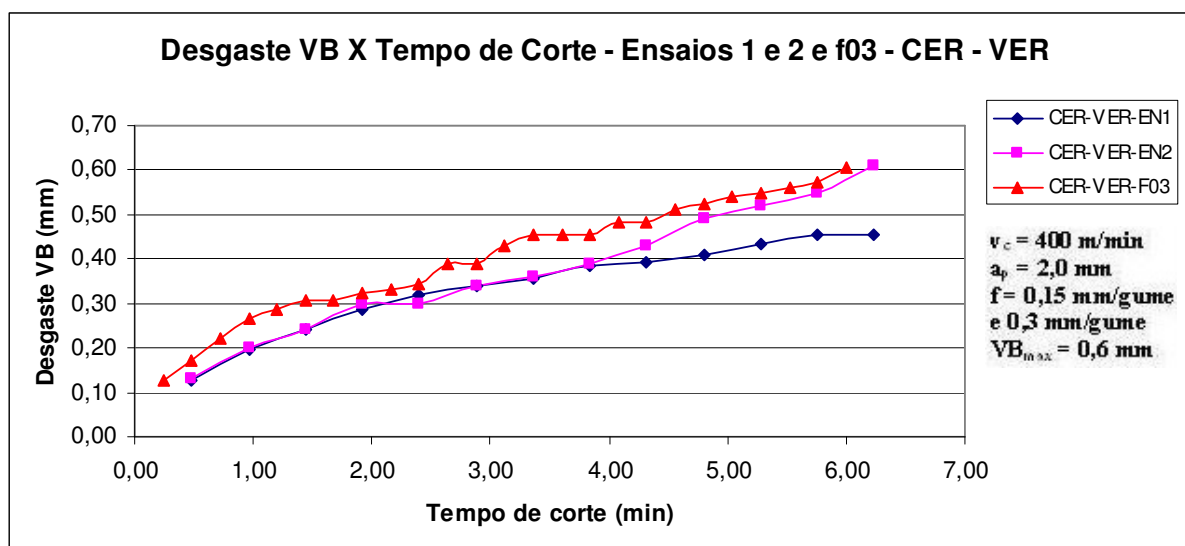


Figura 5-6 – Comportamento do desgaste da ferramenta CER em VER.

Tanto no ensaio 1 (CER-VER-EN1) quanto no ensaio 2 (CER-VER-EN2), com o avanço de 0,15 mm/gume, obteve-se o mesmo tempo de corte. Contudo, no ensaio 1, não foi atingido o critério VB_{max} de 0,6 mm, pois observou-se grande

presença de lascamento em ambos os gumes, sobretudo no gume dois (como pode ser observado na Figura 5-8), sendo este o critério de final de vida adotado nesse caso.

Quando comparado o resultado obtido com avanço de 0,3 mm/gume (CER-VER-F03) com os dois ensaios com avanço de 0,15 mm/gume, verifica-se que o tempo de corte foi 4% menor. Todavia, a sua produtividade foi significativamente maior, pois, com praticamente o mesmo tempo de corte, o volume de material removido foi 92% superior ao volume removido nos outros dois ensaios, como pode ser visto no gráfico da Figura 5-7. Isso ocorre em virtude de se diminuir o tempo de corte por passe, quando se aumenta o avanço. Em consequência, reduz-se o tempo de contato ferramenta/peça, reduzindo o desgaste da ferramenta e, portanto, removendo-se mais material com o mesmo tempo de corte.

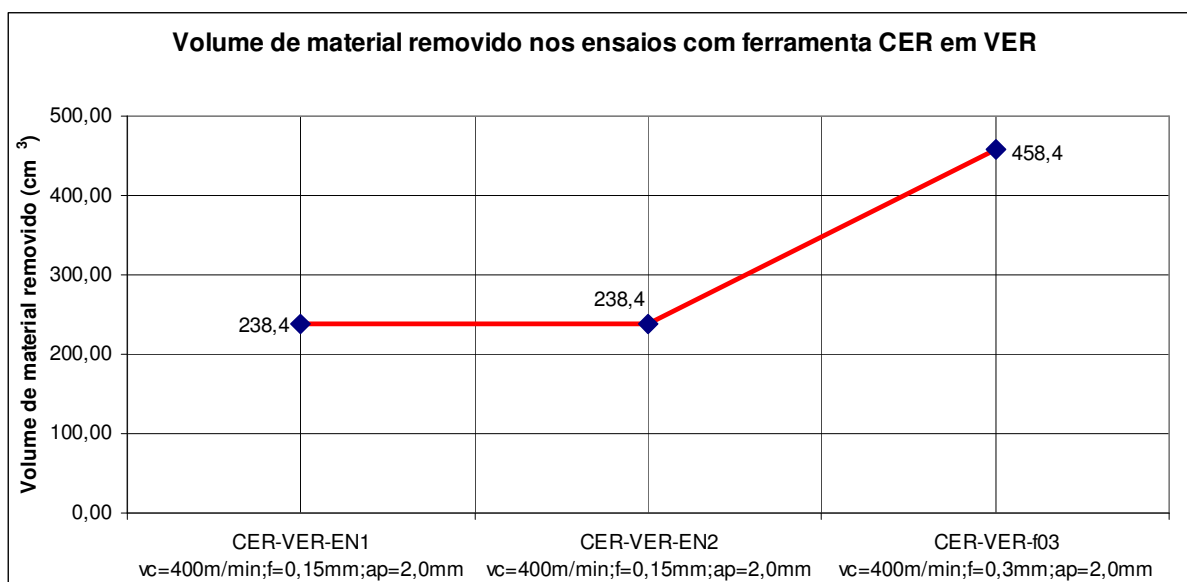


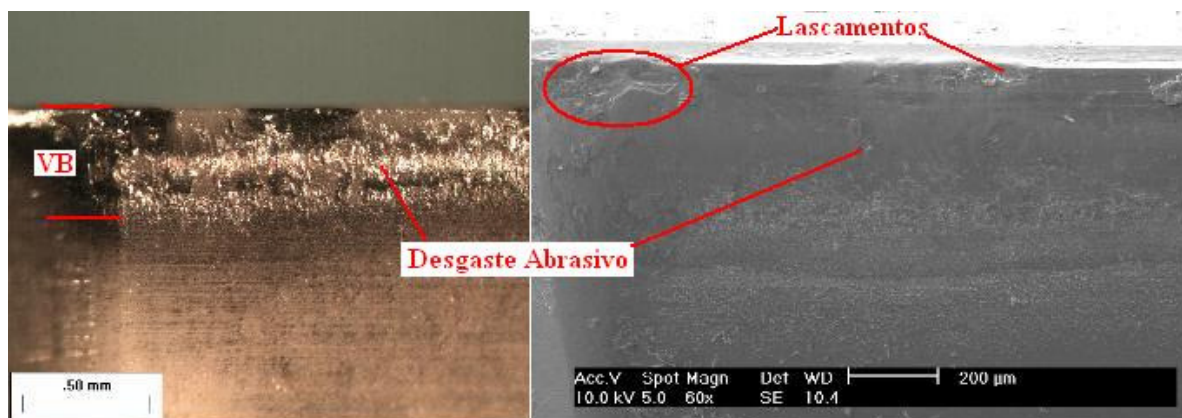
Figura 5-7 – Volume de material removido com ferramenta CER em VER.

Quanto aos mecanismos de desgaste ocorridos com a ferramenta CER, assim como com a ferramenta MD, o principal destes foi por abrasão, ocorrendo lascamentos nos gumes, como pode ser observado na Figura 5-8, na qual há as imagens dos gumes utilizados nos ensaios.

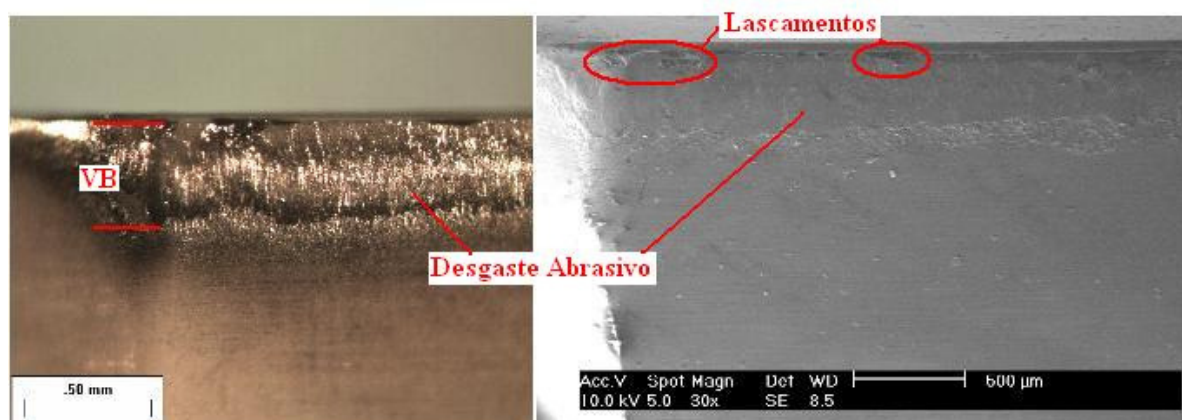
Observando as imagens de MEV dos gumes, verifica-se que o desgaste por abrasão não é tão evidente como no caso da ferramenta MD, porque a ferramenta CER apresenta alta dureza a quente e baixo coeficiente de atrito (STEMMER, 2005a), proporcionando alta resistência ao desgaste, porém possui grande fragilidade e baixa condutividade térmica, tornando-a sensível a variações de

temperatura (STEMMER, 2005a). Tal fato explica a maior ocorrência de lascamentos nos gumes, em consequência dos choques mecânicos e térmicos, característicos do fresamento (corte intermitente), aos quais os gumes foram submetidos durante os ensaios.

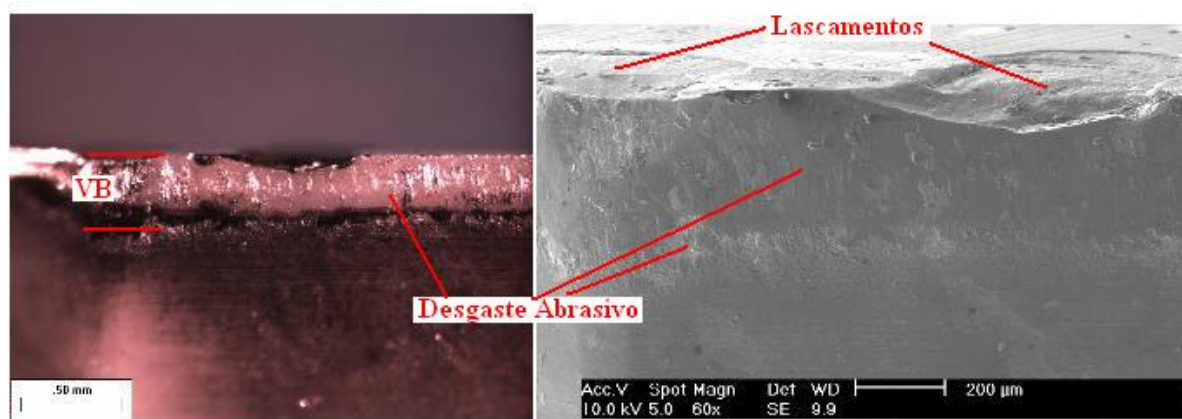
Não foi observado material aderido aos gumes, em razão da maior estabilidade química da ferramenta CER em relação à ferramenta MD, que a torna resistente contra a ocorrência de difusão e oxidação (STEMMER, 2005a).



Gume2/CER-VER-EN1



Gume2/CER-VER-EN2



Gume2/CER-VER-F03

Figura 5-8 – Imagens do desgaste dos gumes utilizados nos ensaios em VER.

5.1.5 Análise de usinabilidade do CIN com a ferramenta de cerâmica

Foram realizados três ensaios em CIN com a ferramenta CER, com avanço de 0,15 mm/gume. Isso porque, nas paredes em bruto do corpo-de-prova utilizado no ensaio 1 (CER-CIN-EN1) e no ensaio 2 (CER-CIN-EN2), observou-se uma alta concentração de areia residual de fundição, resultando em um tempo de corte bastante reduzido, sendo este até menor do que os resultados apresentados pela ferramenta CER em vermicular. Esse fato levou à realização de um terceiro ensaio, tomando-se o cuidado de efetuar limpeza mais cuidadosa no corpo-de-prova utilizado no ensaio 3 (CER-CIN-EN3).

Os resultados dos três ensaios com avanço de 0,15 mm/gume e do ensaio com avanço de 0,3 mm/gume podem ser observados no gráfico exposto na Figura 5-9.

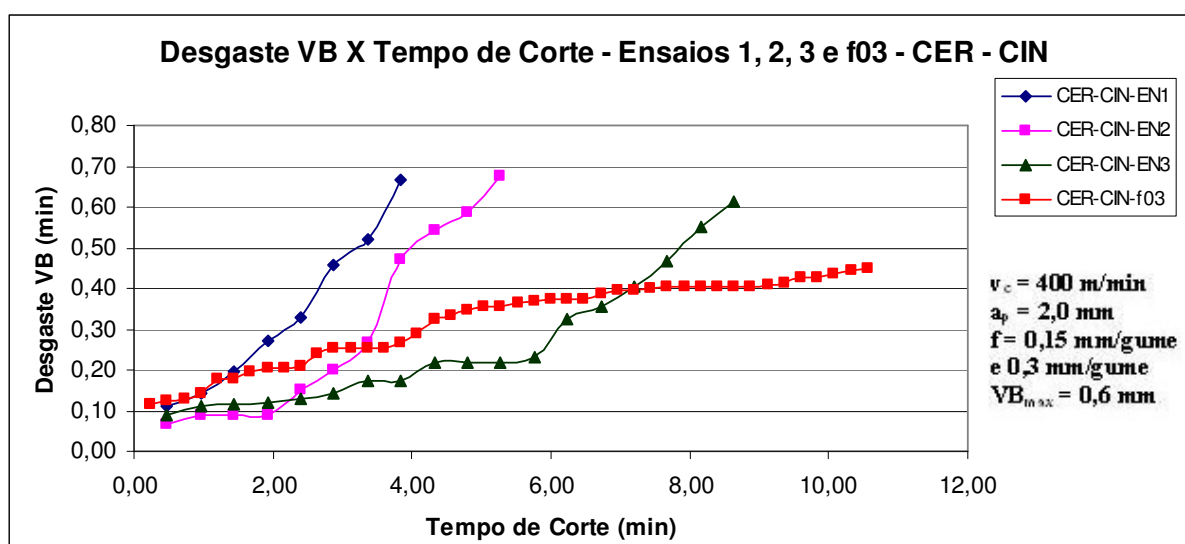


Figura 5-9 – Comportamento do desgaste da ferramenta CER em CIN.

Comparando os resultados dos ensaios 1 e 2 com os obtidos no ensaio 3, este obteve uma vida 125% superior em relação ao ensaio 1 e 65% superior à obtida no ensaio 2.

Quando aumentado o avanço para 0,3 mm/gume no ensaio f03 (CER-CIN-f03), obteve-se um aumento na vida da ferramenta em relação aos três ensaios anteriores com avanço de 0,15 mm/gume, mesmo com a ferramenta não atingindo o critério de final de vida VB 0,6 mm. Isso porque, com o aumento do avanço, houve aumento da vibração durante a usinagem, tendo inclusive ocorrido risco de colisão, o que forçou o encerramento do ensaio. Mesmo assim, verificou-se que o aumento

do avanço propicia a redução do tempo de contato ferramenta/peça, reduzindo o desgaste da ferramenta, ocasionando o aumento da vida dessa.

O aumento da vida da ferramenta com avanço de 0,3 mm/gume em relação aos ensaios com avanço de 0,15 mm/gume, foi de 22% em relação ao ensaio 3 e de 175% e 100% em relação aos ensaios 1 e 2, respectivamente.

Outro ponto constatado foi o aumento significativo na produtividade com o aumento do avanço, observado pelo maior volume de material removido, conforme pode ser visto na Figura 5-10. Esse aumento foi de 144% em relação ao ensaio 3 e de 450% e 300% em relação aos ensaios 1 e 2, respectivamente.

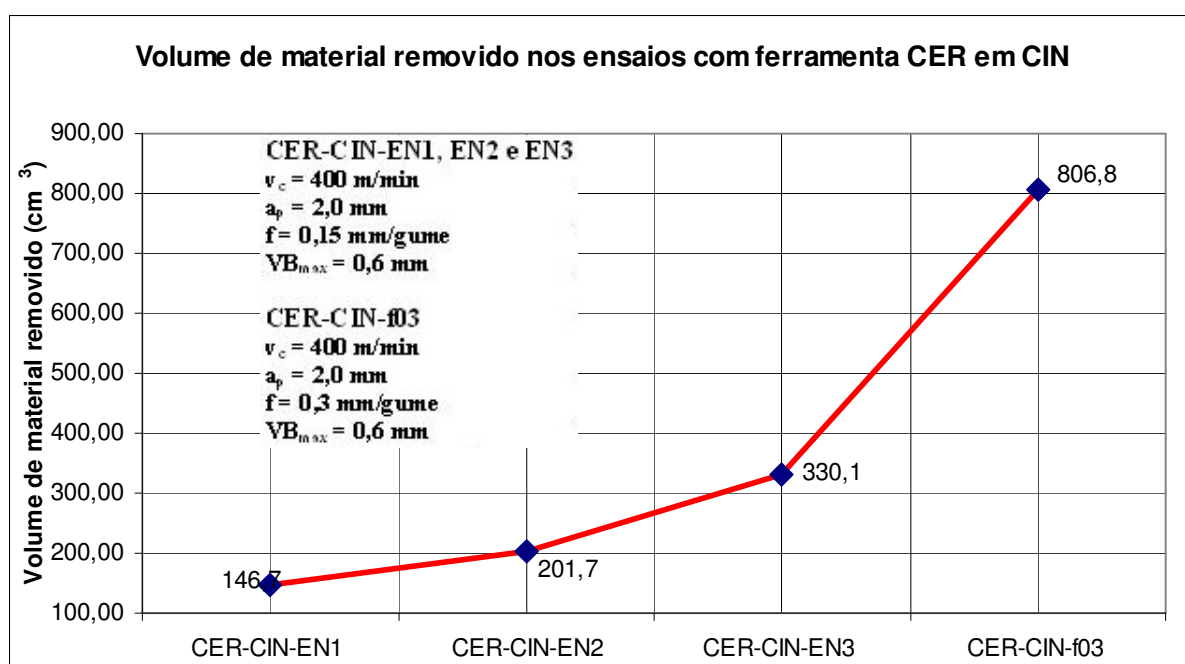
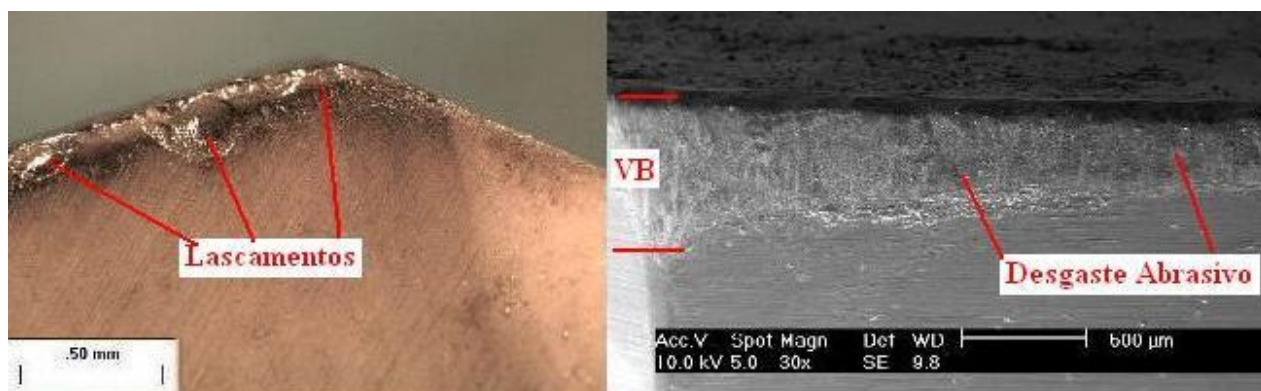


Figura 5-10 – Volume de material removido com ferramenta CER em CIN.

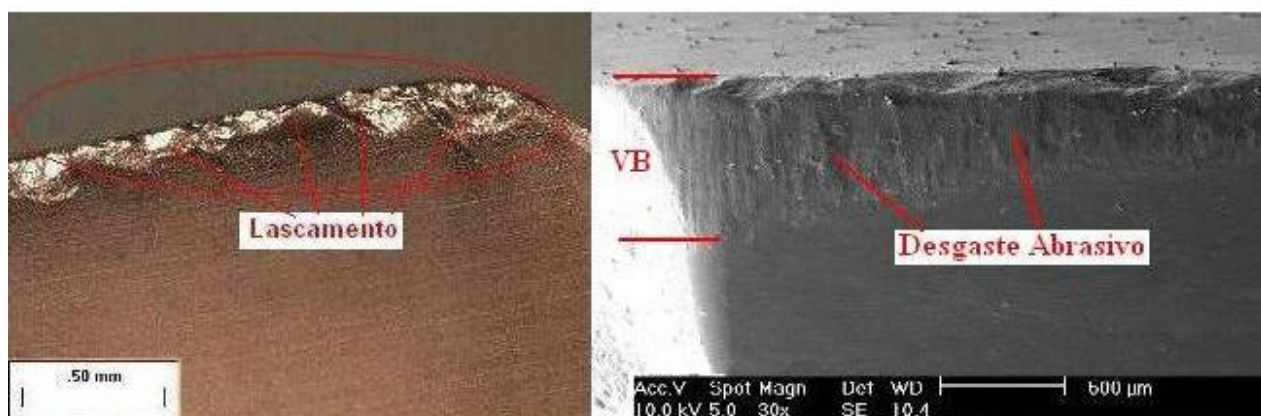
Ao investigar a causa dessa diferença nos resultados, constatou-se que o principal fator foi a presença de areia residual de fundição em grande quantidade nas paredes dos corpos-de-prova do ensaio 1 e 2 em relação ao corpo-de-prova utilizado no ensaio 3 e do ensaio f03, visto que não foram observados carbonetos nas amostras em CIN.

Essa diferença na quantidade de areia residual, como explicado anteriormente no item 4.1.2, apresenta-se na forma de silício. Observa-se isso nas Figura 4-6 e Figura 4-7 deste trabalho, nas quais estão expostas imagens em MEV das superfícies brutas dos corpos-de-prova do ensaio 2 e ensaio 3, bem como a análise química pontual, que mostra a maior concentração de silício no corpo-de-prova utilizado no ensaio 2 (57%) em relação ao utilizado no ensaio 3 (23%).

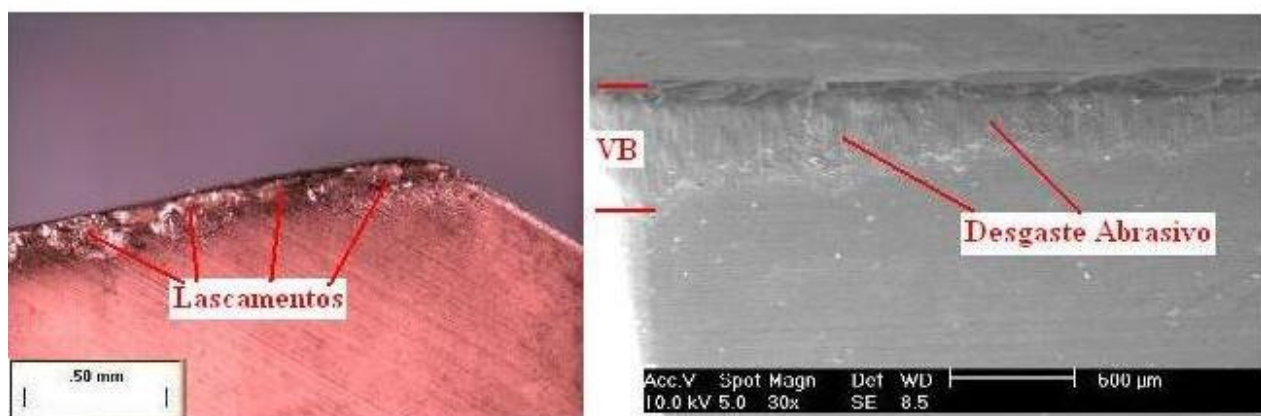
A presença da areia residual de fundição em grande quantidade aumenta o desgaste por abrasão na ferramenta e, conseqüentemente, reduz a vida dela. As imagens dos gumes utilizados nos ensaios 1 a 3, são apresentadas na Figura 5-11.



CER-CIN-EN1



CER-CIN-EN2



CER-CIN-EN3

Figura 5-11 – Imagens do desgaste dos gumes utilizados nos ensaios 1,2 e 3 em CIN

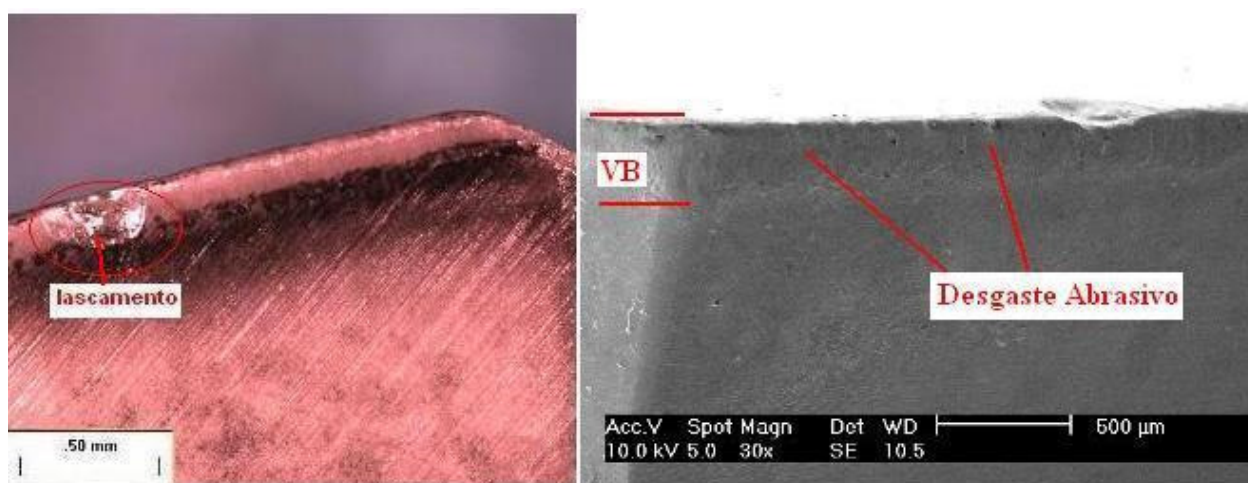
Conforme se observa nas imagens dos gumes na Figura 5-11, o principal mecanismo de desgaste ocorrido na ferramenta CER nos ensaios 1 a 3 em CIN,

assim como ocorrido usinando o VER, também foi por abrasão, apresentando da mesma forma lascamentos nos gumes.

Observando as imagens de MEV dos gumes, verifica-se que o desgaste por abrasão é mais evidente do que o ocorrido nos ensaios em VER, pois se observa, com clareza, no flanco da ferramenta, os “riscos” característicos desse mecanismo de desgaste. Isso torna evidente o aumento da abrasividade do CIN, em virtude da presença da areia residual de fundição nas paredes dos corpos-de-prova utilizados nesses ensaios.

Também constatou-se maior ocorrência de lascamentos nos gumes em relação ao ocorrido nos ensaios em VER. Tal fato ocorreu em consequência dos choques mecânicos e térmicos, possivelmente potencializados pelo aumento da abrasividade do material usinado, exigindo maior esforço da ferramenta para realizar o corte. Nos ensaios em CIN, também não foi observado material aderido aos gumes.

Analisando o gume utilizado no ensaio f03, na Figura 5-12, nota-se que ocorreu o mesmo mecanismo de desgaste ocorrido nos outros três ensaios, porém menos agressivo, apresentando apenas um pequeno lascamento no gume. Isso ocorreu em razão de se diminuir o tempo de corte por passe quando se aumenta o avanço, reduzindo o tempo de contato ferramenta/peça e reduzindo o desgaste da ferramenta.



CER-CIN-f03

Figura 5-12 – Imagens do gume utilizado no ensaio com avanço de 0,3 mm/gume em CIN.

5.1.6 Comparativo dos resultados entre VER e CIN com cerâmica

Na Figura 5-13, apresenta-se a média dos resultados obtidos com relação ao tempo de corte (min), empregando-se a ferramenta CER em cada tipo de ferro fundido, com os dois avanços utilizados.

Comparando-se a média dos resultados com o CIN e a média com o VER, utilizando avanço de 0,15 mm/gume, verifica-se que a vida da ferramenta foi praticamente igual. Isso ocorre em virtude da influência da alta concentração de areia residual de fundição nos corpos-de-prova em CIN utilizados nos ensaios, o que aumentou a abrasividade do material, gerando maior desgaste abrasivo na ferramenta e acarretando no final de vida prematuro em ambos os casos.

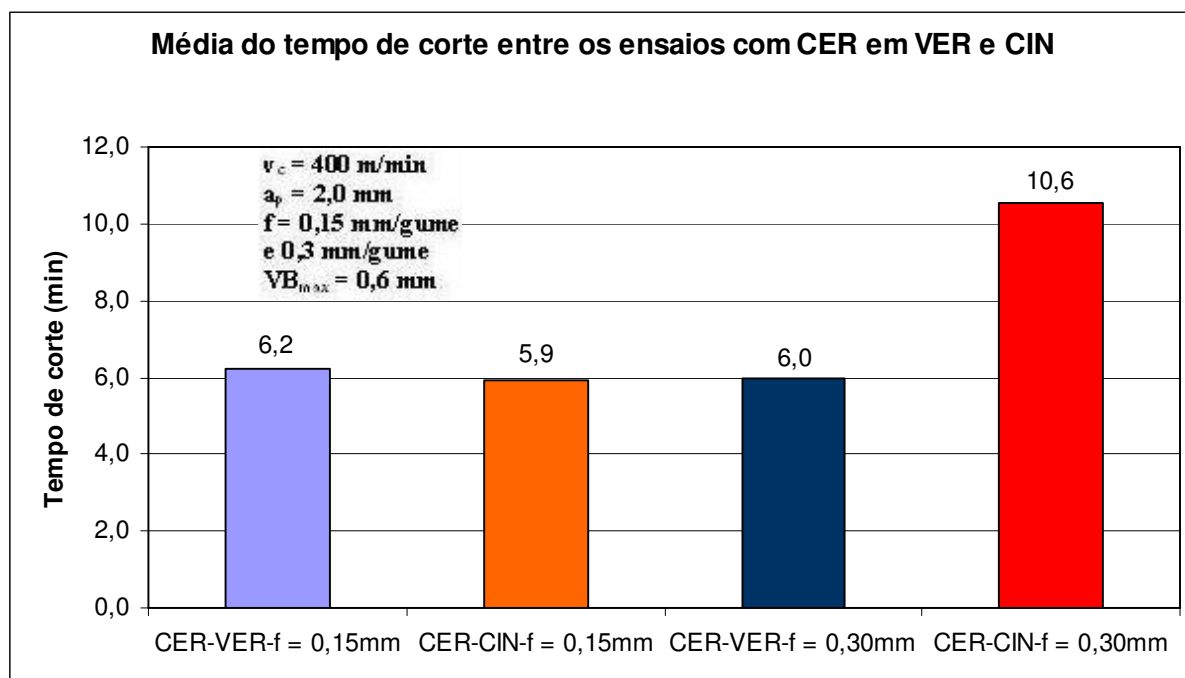


Figura 5-13 – Comportamento da vida da ferramenta CER em VER e CIN em razão do tempo de corte.

Quando confrontados os resultados em CIN e VER, com avanço de 0,30 mm/gume, o CIN apresentou uma vida de ferramenta 76% superior à obtida com o VER, confirmando resultados obtidos em outras pesquisas, em que o VER apresenta menor usinabilidade que o CIN. Vale lembrar ainda que, no ensaio em CIN, este não atingiu o critério de final de vida VB_{max} de 0,6 mm em razão do aumento da vibração durante o corte.

No entanto, destaca-se que o aumento do avanço no processo de fresamento melhora o desempenho da ferramenta, pois diminui o tempo de contato ferramenta/peça e, conseqüentemente, a ação do desgaste.

Observando os resultados obtidos por Reuter e outros (2000, 2001), que realizaram ensaios com ferramenta CER, com velocidade de corte de 400 m/min, $a_p = 2$ mm e $f = 0,15$ mm/gume em VER e CIN, com características próximas às ligas utilizadas neste trabalho, verifica-se que os resultados apresentaram uma vida de ferramenta usinando o VER 50% inferior à vida da ferramenta usinando o CIN. Esse fato não se refletiu nos resultados obtidos neste trabalho, quando utilizados os mesmos parâmetros do referido autor, em razão da alta presença de areia residual nos ensaios 1 e 2 com CIN, o que influenciou de forma direta nos resultados.

Por outro lado, comparando o resultado obtido com VER neste trabalho com o obtido com VER de Reuter e outros (2000, 2001), verifica-se que os resultados foram muito próximos, confirmando os resultados obtidos nesta pesquisa.

Analisando comparativamente os resultados obtidos neste trabalho (corte interrompido) com a ferramenta CER com os resultados obtidos por Xavier (2003), que realizou ensaios de torneamento (corte contínuo) com ferramenta CER de Si_3N_4 em uma liga de VER similar à utilizada neste trabalho, utilizando velocidade de corte de 500 m/min, avanço de 0,2 mm/rot e profundidade de corte de 0,5 mm. constatou-se que o referido autor obteve como melhor resultado de vida de ferramenta o valor de 5 min. Assim, comparativamente, a média dos resultados de vida de ferramenta obtidos neste trabalho usinando o VER foi de 6 min, ou seja, 20% superior à obtida por Xavier (2003).

Essa diferença mostra que, mesmo com o fato de a ferramenta CER apresentar alta fragilidade (mais suscetível a choques térmicos e mecânicos), desaconselhando a sua utilização no fresamento, os resultados obtidos foram melhores do que os apresentados no corte contínuo por Xavier (2003). Isso demonstra que a maior abrasividade do VER é o fator predominante no desgaste da ferramenta, o qual é atenuado no fresamento, em conseqüência do menor tempo de contato ferramenta/peça.

De maneira geral, os resultados obtidos tanto com ferramenta MD quanto com ferramenta CER reproduzem os resultados de outras pesquisas, confirmando uma pior usinabilidade do VER em relação ao CIN. Além disso, também confirma o bom desempenho da ferramenta MD para o fresamento de acabamento, mostrando boa evolução na aplicação industrial.

Os resultados obtidos com a ferramenta CER possibilitam mostrar que a sua aplicação no fresamento do VER em nível industrial ainda é restrita, pois não se verificou grande evolução em relação a resultados anteriores obtidos em outras pesquisas.

5.2 Análise do aumento da temperatura dos corpos-de-prova em ferro fundido vermicular e cinzento durante o processo de fresamento

Como descrito no item 3.5, antes da realização dos ensaios de medição de temperatura com termopares (ainda durante os ensaios de usinabilidade), foram adquiridas imagens térmicas. O objetivo foi avaliar a temperatura durante o processo e, com isso, determinar quais os termopares a serem utilizados, bem como a calibração deles.

Por intermédio das fotos térmicas, é possível visualizar uma característica importante do corte interrompido, que é o resfriamento da ferramenta enquanto esta não está em contato com a peça (choque térmico).

Na Figura 5-14, verifica-se o momento em que um dos gumes está em contato com o corpo-de-prova, apresentando temperatura de 126 °C na região de corte, enquanto a temperatura na região onde não há contato da ferramenta com o corpo-de-prova é em torno de 37 °C.



Figura 5-14 – Imagem térmica com um gume em contato com o corpo-de-prova.

Na Figura 5-15, observam-se a saída de um dos gumes e a entrada do outro no corpo-de-prova. Notam-se, claramente, as diferenças de temperatura na entrada e saída do gume.

Tal fato ocorre, porque as temperaturas desenvolvidas na ferramenta no corte interrompido variam ciclicamente, ou seja, aumentam durante o tempo ativo (ferramenta em contato com a peça) e diminuem durante o tempo inativo (ferramenta não está em contato com a peça) (DA SILVA; LOPES; LOY, 2001).

Portanto, no processo de fresamento, a partir do momento em que a ferramenta não está em contato, há um resfriamento desta, até que o ciclo se inicie novamente.

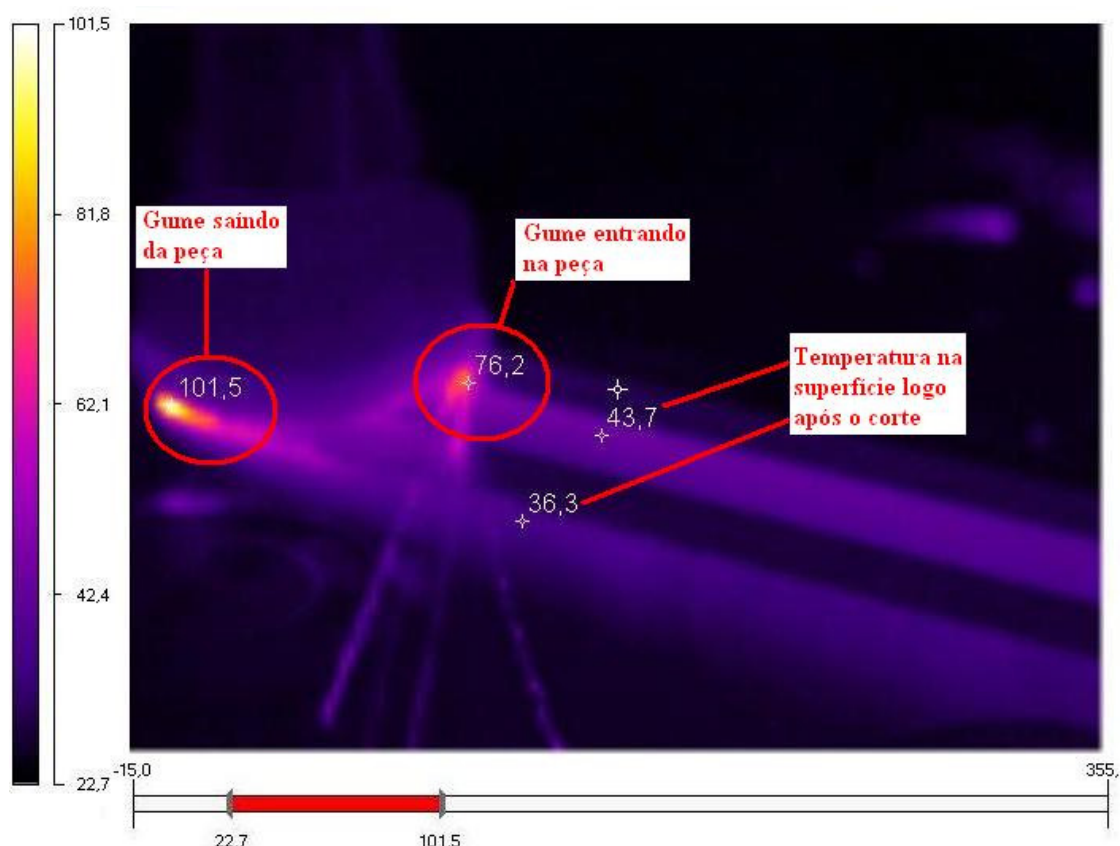


Figura 5-15 – Imagem térmica com um gume saindo e o outro entrando no corpo-de-prova.

Para aprofundar o estudo da temperatura durante o processo de fresamento, baseado nas imagens térmicas e na literatura, optou-se pelo uso do termopar tipo T, e a calibração do sistema foi realizada na faixa de medição de 10 a 80 °C.

Como descrito no item 3.8.4, foram fixados a cada corpo-de-prova seis termopares para se medir a temperatura e removidos 34 mm da altura de cada corpo-de-prova, tendo-se, assim, dados para se traçar a curva de aquecimento dos resultados obtidos em cada ensaio.

Os ensaios foram feitos dessa maneira, pois permitiam a realização de várias medições em um curto espaço de tempo, tendo em vista o período disponibilizado para a utilização da máquina-ferramenta, para a realização dos ensaios, ser limitado.

O tempo do ciclo de medição da temperatura foi realizado de acordo com o tempo de usinagem de cada passe, ou seja, o número de ciclos de medição foi definido de acordo com o número de passes necessários para se remover os 34 mm, em cada ensaio realizado, com conjunto de parâmetros de corte diferente.

Foram realizados seis ensaios, dois com a ferramenta MD no VER e CIN, dois com a ferramenta CER com avanço de 0,15 mm/gume no VER e CIN e dois com a ferramenta CER com avanço de 0,30 mm/gume no VER e CIN.

Os resultados obtidos nos ensaios com a ferramenta MD no VER (VER-MD) e CIN (CIN-MD), utilizando os parâmetros de corte especificados na Tabela 3-1, estão expostos na Figura 5-16.

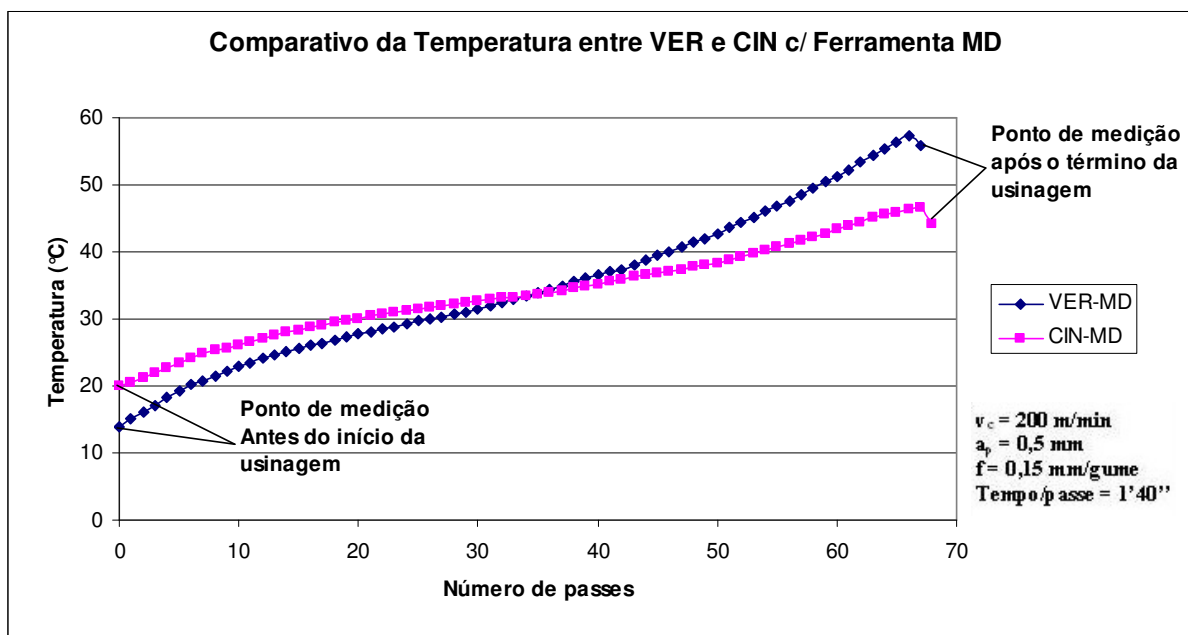


Figura 5-16 – Gráfico dos resultados de medição de temperatura obtidos nos ensaios em VER e CIN com a ferramenta MD.

Pelos resultados obtidos, verifica-se que o aquecimento no VER é maior do que no CIN para um mesmo número de medições. Isso ocorre em virtude do CIN apresentar uma condutividade térmica cerca de 27% maior do que a apresentada pelo VER. Fato esse que se reflete na diferença percentual entre as temperaturas finais atingidas pelos dois materiais, pois o VER apresentou um aquecimento 23%

superior ao do CIN, sendo próximo da diferença entre as condutividades térmicas dos dois materiais.

Outro fator que explica o maior aumento da temperatura do VER em relação ao CIN é a maior resistência ao corte do primeiro em relação ao segundo, pois a maior resistência ao corte do material da peça gera maior esforço de corte, ocasionando o aumento da temperatura.

Tais fatores ficam mais claros quando verificado o aumento de temperatura do VER e do CIN, considerando a diferença entre a temperatura inicial e final do ensaio em VER e do ensaio em CIN; no corpo-de-prova em VER o aumento da temperatura foi de 317% e, no corpo-de-prova em CIN, de 136%.

Ao verificar a taxa de resfriamento dos materiais, por meio da medição da temperatura logo após o término da usinagem, o VER apresentou queda em torno de 2,5% na temperatura imediatamente após o término da usinagem e, no CIN, essa queda foi de 5,5%, o que reflete a sua maior condutividade térmica. Porém, um fator importante que deve ser considerado é que as temperaturas iniciais de ambos os corpos-de-prova apresentaram diferença em consequência da variação da temperatura ambiente, o que aumentou ao longo dos ensaios, resultando em aumento na temperatura inicial do corpo-de-prova do ensaio com CIN.

Levando-se em consideração esse fator, foi realizada uma simulação, considerando apenas a taxa de aumento de temperatura por passe do ensaio em CIN. Com essa taxa de aumento por passe, foi considerada a temperatura inicial do ensaio com VER e, com base nessa temperatura inicial, foi traçada uma nova curva de aquecimento para o CIN. Isso foi feito em razão da impossibilidade da realização de novo ensaio. Na Figura 5-17, tem-se a curva de aquecimento do VER com a nova curva de aquecimento do CIN.

Por intermédio do gráfico da referida figura, verifica-se uma diferença importante em comparação com o gráfico da Figura 5-16, ou seja, as curvas se cruzam em virtude da diferença na temperatura inicial, o que não ocorre considerando a mesma temperatura inicial. Isso porque, tendo em vista a taxa de aumento da temperatura no CIN ser menor do que no VER, as curvas tendem a afastar-se ao longo do tempo.

Esse fator reflete na diferença percentual entre as temperaturas finais, que nesse caso é de aproximadamente 29%, ou seja, o valor é mais próximo da diferença percentual entre as suas condutividades (27%) do que o obtido na primeira situação apresentada, que foi de 23%.

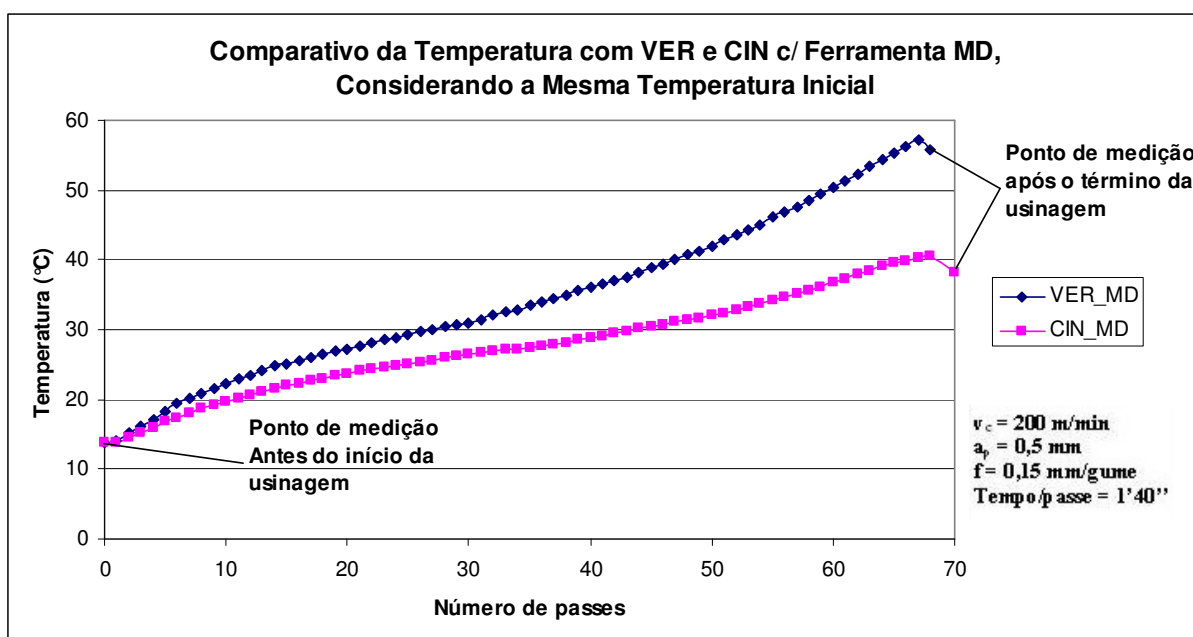


Figura 5-17 – Gráfico dos resultados de medição de temperatura do VER comparados com a simulação do CIN com a ferramenta MD.

A tendência de afastamento das curvas de aquecimento desses dois materiais pode ser melhor visualizada nos resultados obtidos nos ensaios com a ferramenta CER, nos quais a temperatura inicial foi igual para ambos os materiais, como pode ser visto nas Figura 5-18 e Figura 5-19.

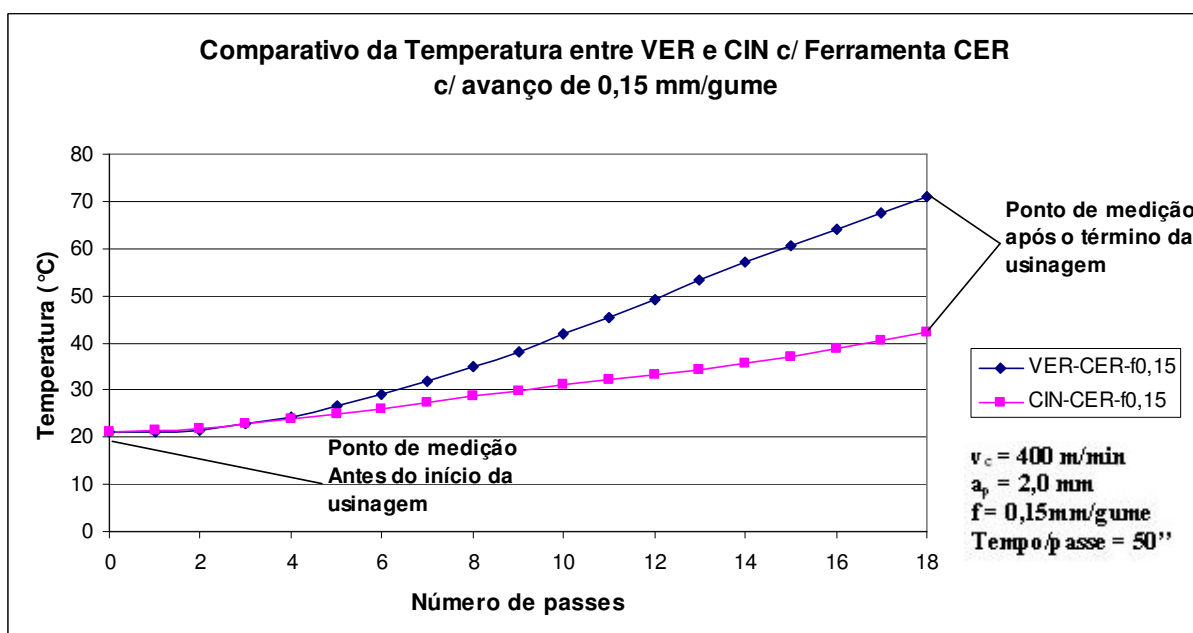


Figura 5-18 – Gráfico dos resultados de medição de temperatura obtidos nos ensaios em VER e CIN, com a ferramenta CER, com avanço de 0,15 mm/gume.

Assim, analisando a Figura 5-18, onde estão expostas as curvas de aquecimento dos ensaios em VER e CIN, utilizando avanço de 0,15 (VER-CER-f0,15 e CIN-CER-f0,15), verifica-se que, inicialmente, ambas as curvas têm uma variação muito próxima, mas, à medida que a temperatura aumenta, a diferença entre as duas se acentua.

A temperatura atingida pelo VER foi 31% superior à atingida pelo CIN, em virtude das diferenças de condutividade térmica e das propriedades mecânicas entre os dois materiais. Nota-se que a diferença percentual entre as temperaturas também foi próxima à diferença percentual entre as suas condutividades térmicas.

Esse fato é comprovado ao se verificar a diferença entre as temperaturas finais atingidas por cada material, que também são 55% maiores do que as verificadas no ensaio com a ferramenta MD, em razão dos parâmetros de corte mais agressivos utilizados nos ensaios com a ferramenta CER.

Ao se medir a temperatura imediatamente após o término da usinagem, ambos os materiais não tenderam a estabilizar ou reduzir a temperatura, mas, sim, mantiveram o aumento, sendo este em torno de 5% no VER e de 4% no CIN.

Todavia, esse fato não ocorreu nos ensaios com avanço de 0,30 mm/gume (VER-CER-f0,30 e CIN-CER-f0,30), como pode ser visto na Figura 5-19. Nesse segundo caso, as temperaturas tenderam a estabilizar-se, com uma ligeira queda na temperatura, sendo esta de aproximadamente 2% para o VER e CIN.

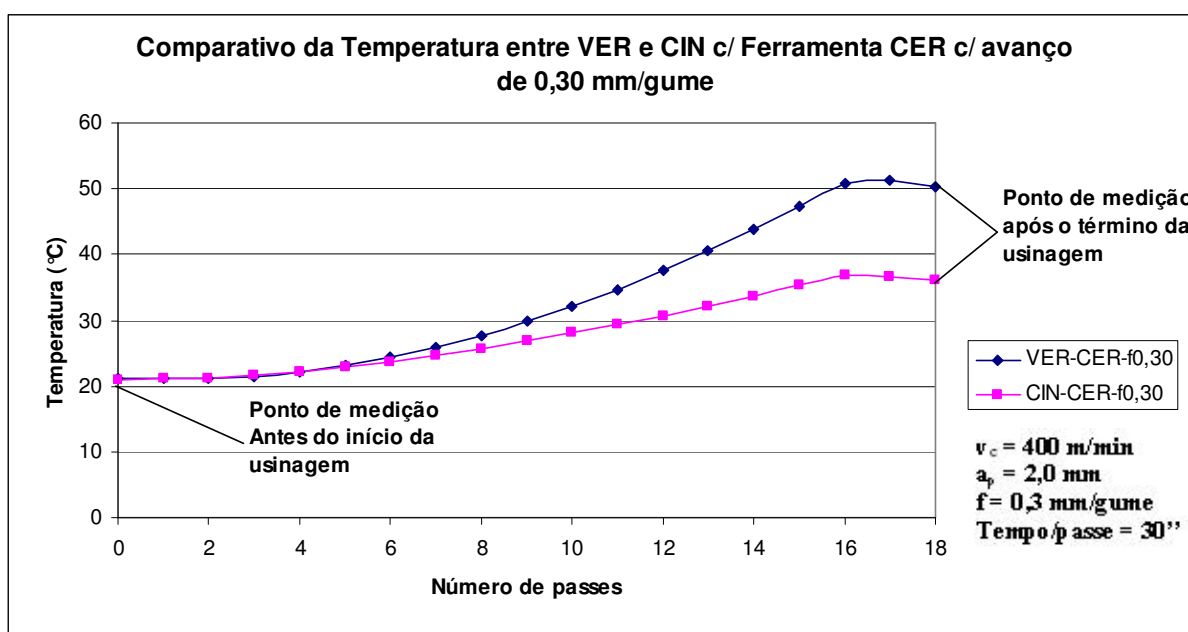


Figura 5-19 – Gráfico dos resultados de medição de temperatura obtidos nos ensaios em VER e CIN, com a ferramenta CER, com avanço de 0,30 mm/gume.

Outro ponto importante é em relação à comparação entre os ensaios com a ferramenta CER, com avanço de 0,15 mm/gume e 0,30 mm/gume. Nos ensaios com avanço de 0,3 mm/gume, as curvas apresentaram proximidade na variação de temperatura por um período um pouco maior (até o 8° passe), enquanto, no ensaio com avanço de 0,15 mm/gume, a temperatura se manteve apenas até o 6° passe.

Contudo, os resultados obtidos nos ensaios VER-CER-f0,30 e CIN-CER-f0,30 apresentaram a mesma tendência de afastamento ao longo do tempo. O aquecimento foi menor em relação aos ensaios VER-CER-f0,15 e CIN-CER-f0,15. A diferença percentual entre as temperatura finais dos ensaios VER-CER-f0,30 e CIN-CER-f0,30 foi de 10%, menor do que nos ensaios anteriores com menor avanço. Isso porque, com avanço maior, diminui-se o tempo de contato ferramenta/peça e, conseqüentemente, o atrito, refletindo menor temperatura durante o corte.

Para melhor entendimento, na Figura 5-20 pode-se visualizar claramente a diferença percentual entre os ensaios com avanço de 0,15 e 0,30 mm/gume, tanto com VER como com o CIN. Nesses ensaios, foram tomadas como valor base as temperaturas finais obtidas nos ensaios com avanço de 0,15 mm/gume.

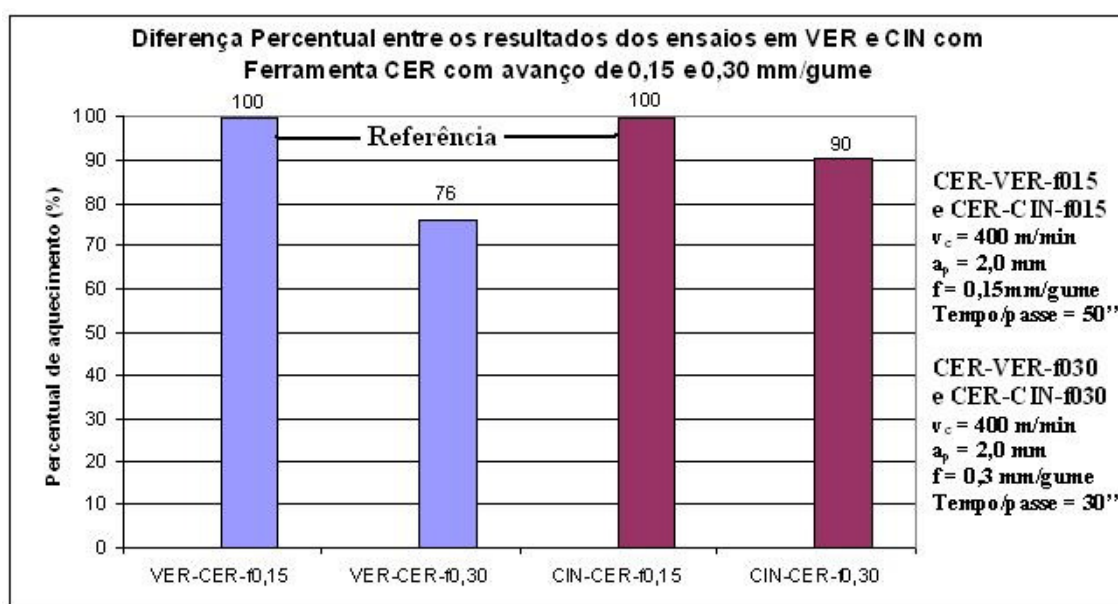


Figura 5-20 – Diferença percentual das temperaturas obtidas nos ensaios realizados com ferramenta CER em VER e CIN.

Nos ensaios com VER, o ensaio CER-VER-f0,15 alcançou uma temperatura 24% superior ao ensaio CER-VER-f0,30. Já nos ensaios em CIN, a temperatura alcançada pelo ensaio CIN-CER-f0,15 foi 10% superior à alcançada no ensaio CIN-CER-f0,30.

Esse fato mostra que o aumento do avanço exerce influência significativa no aumento da temperatura dos corpos-de-prova, tanto em VER como em CIN.

Fazendo-se uma análise geral dos resultados, observa-se pela Figura 5-21 que as temperaturas atingidas foram maiores nos ensaios com ferramenta CER, tendo o dobro da velocidade utilizada nos ensaios com a ferramenta MD e, também, com uma profundidade de corte quatro vezes maior, mantendo-se o mesmo avanço.

Nesse caso, mesmo com um tempo de contato menor, a temperatura atingida foi maior, isso em virtude da velocidade de corte e profundidade de corte utilizadas serem maiores, ocasionando maior influência na diferença percentual entre as temperaturas finais dos ensaios com as duas ferramentas, com valores de aproximadamente 15% no VER e de 9% no CIN.

Quando comparados os resultados obtidos com a ferramenta MD e os resultados obtidos com a ferramenta CER com avanço de 0,30 mm/gume, os resultados se invertem, pois, neste último caso, o avanço exerce influência significativa, pelo fato de o tempo de usinagem ser 70% menor que o tempo de usinagem com a ferramenta MD.

Assim, a temperatura atingida pelo VER com MD é aproximadamente 40% maior do que com CER030 e, no CIN com MD, a temperatura atingida é cerca de 28% maior do que com CER030.

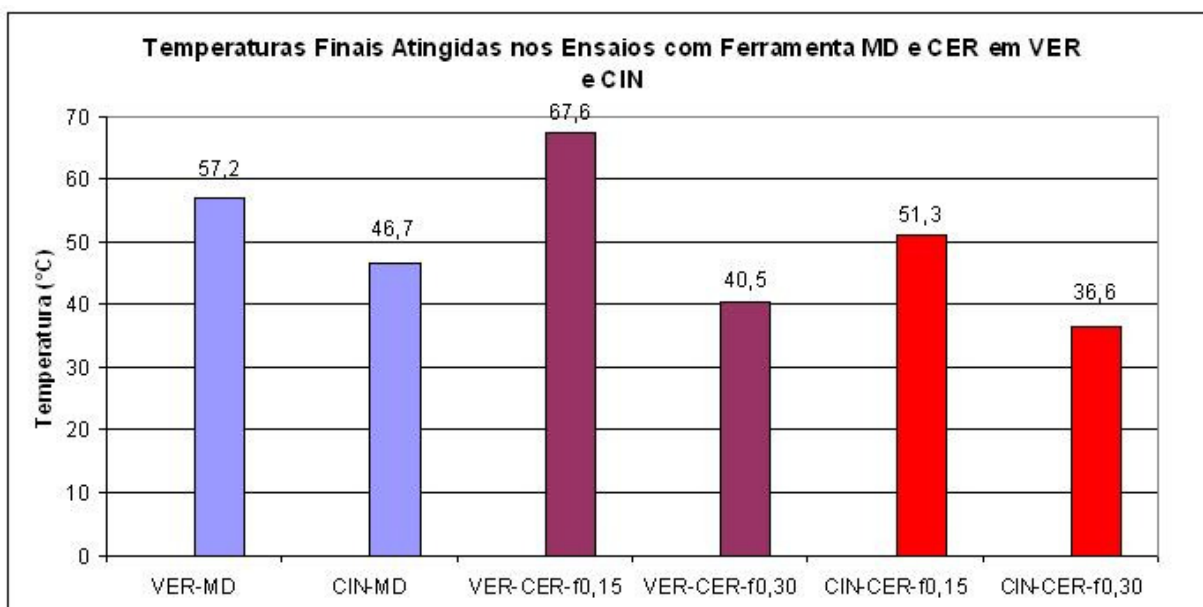


Figura 5-21 – Comparativo dos resultados obtidos em todos os ensaios realizados para medição de temperatura.

Observando os resultados obtidos (Figura 5-21), constata-se que os parâmetros de corte são os fatores de maior influência nas temperaturas atingidas durante a usinagem (velocidade de corte, profundidade de corte e avanço).

Tal fator é comprovado pelas temperaturas finais atingidas em cada ensaio, pois, com mesmo avanço ($f = 0,15$ mm/gume) e com velocidades de corte diferentes (200 m/min para MD e 400 m/min para CER), verifica-se que, com a velocidade de corte maior, a temperatura final atingida também foi maior.

No entanto, os resultados obtidos com a ferramenta CER não foram os mesmos, pois percebeu-se que, com maior avanço, as temperaturas finais atingidas foram menores, e isso é em razão, principalmente, do menor tempo de contato ferramenta/peça proporcionado pelo maior avanço.

Os resultados apresentados refletiram a menor condutividade térmica do VER em relação ao CIN, e que a diferença entre as temperaturas alcançadas por cada material se apresentou proporcional à diferença entre as suas condutividades térmicas. Entretanto, não se pode afirmar como único fator a condutividade térmica, para explicar as diferenças de temperaturas atingidas pelos dois materiais. Isso porque o VER e o CIN apresentam diferenças microestruturais como forma da grafita, porcentagem de nódulos e composição química. Tais diferenças conferem maior resistência ao corte ao VER em relação ao CIN, gerando maior esforço de corte para o primeiro, ocasionando o aumento da temperatura.

Analisando especificamente o processo de fresamento, pôde-se observar, pelas fotos térmicas expostas (Figura 5-14 e Figura 5-15), a diferença de temperatura quando o gume da ferramenta está em contato com a peça e quando não o está, deixando, assim, bem caracterizado o choque térmico que a ferramenta sofre em consequência do corte interrompido.

De maneira geral, os resultados obtidos possibilitam mostrar que as temperaturas atingidas pela peça no processo de fresamento não são elevadas a ponto de provocar distorções geométricas nas peças que tenham paredes de espessura não tão esbeltas.

Tal fato poderá ser observado no item a seguir, no qual estão expostos os resultados de medição da deformação das paredes dos corpos-de-prova em VER e CIN.

5.3 Análise de deformação dos corpos-de-prova em ferro fundido vermicular e cinzento em virtude do processo de fresamento

Neste item, são descritos os resultados das medições de deformação das paredes dos corpos-de-prova em ferro fundido vermicular (VER) e em ferro fundido cinzento (CIN).

Os corpos-de-prova foram medidos antes e depois da usinagem em uma máquina de medição tridimensional, no Centro de Metrologia e Instrumentação (CMI) da Fundação CERTI. Tal medição teve como objetivo estabelecer as variações geométricas ocorridas nos corpos-de-prova por causa da usinagem, bem como verificar qual o grau dessas variações e sua significância na geometria da peça. Os parâmetros de corte foram os mesmos utilizados nos ensaios para determinação da usinabilidade e medição da temperatura (Tabela 3-1).

As medições foram efetuadas em 10 pontos, em ambas as paredes maiores (sentido do comprimento do corpo-de-prova) e em 4 pontos em ambas as paredes menores (sentido da largura do corpo-de-prova), conforme pode ser observado na Figura 5-22 (a).

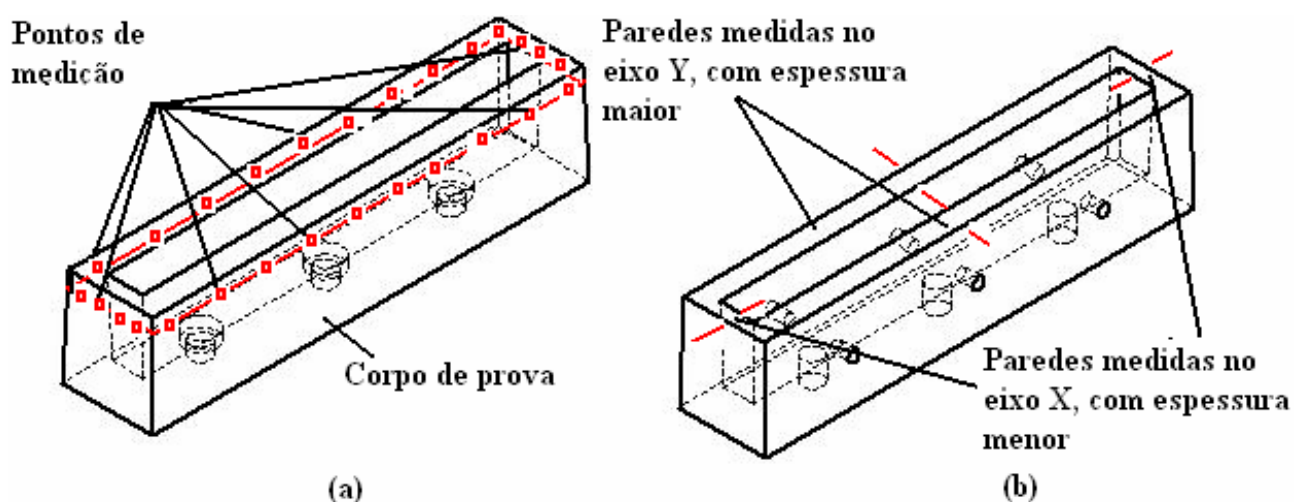


Figura 5-22 – (a) pontos de medição nas paredes do corpo-de-prova; (b) diferença de espessura entre as paredes.

Nos itens a seguir, são apresentados os resultados das medições de deformação, os quais são as variações dimensionais entre os pontos medidos antes e depois da usinagem, nos eixos X e Y.

5.3.1 Análise de deformação dos corpos-de-prova em VER e CIN utilizados nos ensaios com metal-duro

Com a ferramenta MD, foram usinadas seis peças, sendo três em VER e três em CIN, seguindo o procedimento de remover-se 2, 4 e 6 mm dos corpos-de-prova, conforme explicado no item 3.8.3.

Na Figura 5-23, podem ser vistos os resultados obtidos nas medições dos pontos no eixo Y, dos três corpos-de-prova em VER, sendo VER-MD-2 o corpo-de-prova que foi removido 2 mm, VER-MD-4 o que foi removido 4 mm e VER-MD-6 o que foi removido 6 mm.

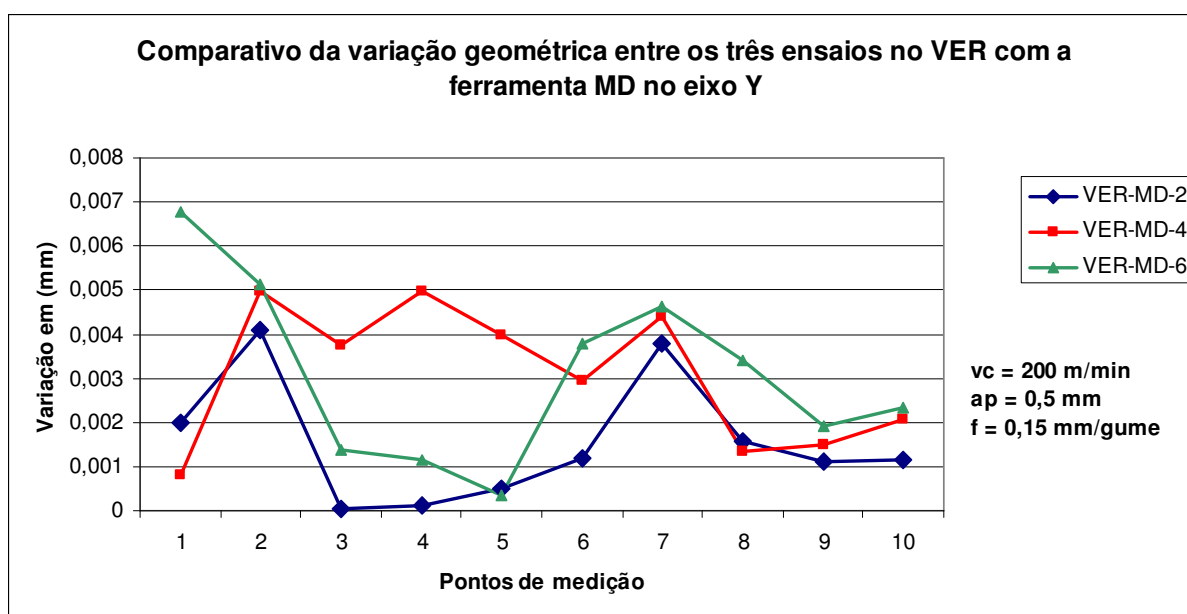


Figura 5-23 – Variação dos três corpos-de-prova em VER, usinados com a ferramenta MD no eixo Y.

Pelos resultados apresentados, verifica-se que a variação no eixo Y, nos corpos-de-prova em VER, foi muito pequena, sendo de milésimos de milímetros. Mesmo assim, observa-se que as variações ocorridas nos três corpos-de-prova seguem a mesma tendência entre os pontos, salvo o corpo-de-prova VER-MD-4 que apresenta uma variação um pouco maior.

Os corpos-de-prova VER-MD-2 e VER-MD-6 apresentaram a mesma tendência; na média a deformação do segundo foi maior do que no primeiro.

Analisando os resultados expostos na Figura 5-24, em relação às medições dos pontos no eixo Y, relativos aos três corpos-de-prova em CIN (sendo CIN-MD-2 o corpo-de-prova que foi removido 2 mm, CIN-MD-4 que foi removido 4 mm e CIN-MD-

6 que foi removido 6 mm), percebe-se que a variação foi maior do que a obtida nos corpos-de-prova em VER, nas mesmas condições.

Isso significa que os corpos-de-prova em CIN se mostraram mais susceptíveis aos esforços de usinagem, tendo, conseqüentemente, variação geométrica maior.

Esse fato é em conseqüência, principalmente da menor resistência do CIN em relação ao VER, pois os parâmetros de corte utilizados e os procedimentos para os ensaios foram os mesmos para os corpos-de-prova de ambos os materiais.

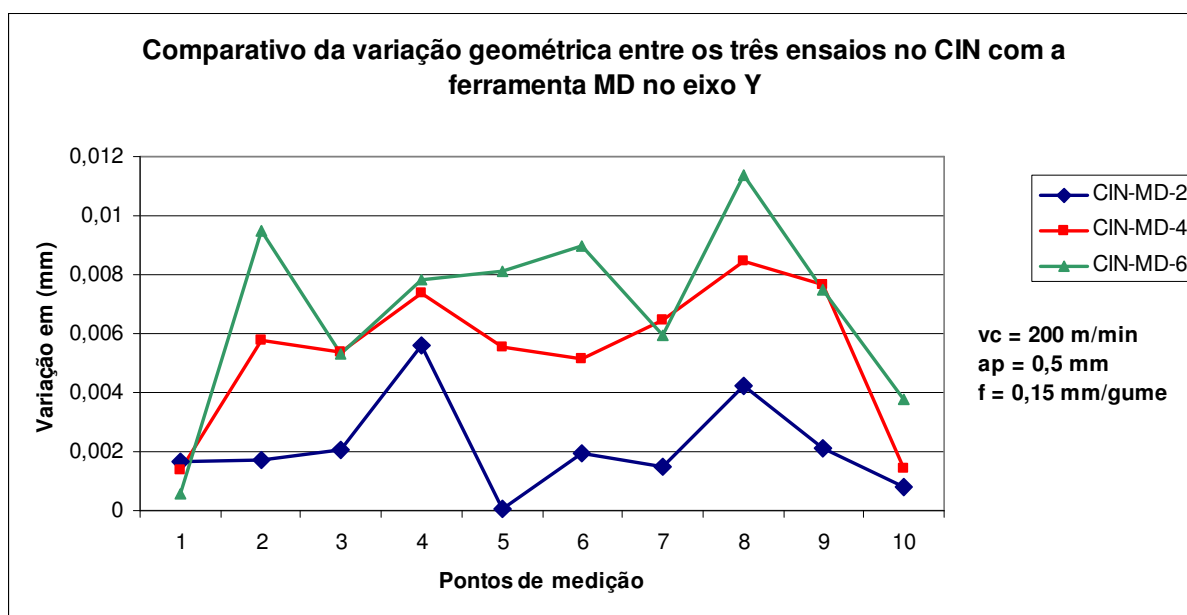


Figura 5-24 – Variação dos três corpos-de-prova em CIN, usinados com a ferramenta MD no eixo Y.

Quando observados os resultados obtidos nos mesmos ensaios em VER, no eixo X, Figura 5-25, constata-se que a variação foi maior do que a ocorrida no eixo Y. Isso é em virtude de as paredes medidas em relação ao eixo X apresentarem espessuras menores do que as paredes medidas em relação ao eixo Y, conforme observado na Figura 5-22 (b).

A maior deformação entre os três corpos-de-prova ocorreu no ensaio VER-MD-4; este também apresentou variação muito próxima entre os pontos medidos, formando quase que uma reta, mostrando que a deformação foi uniforme ao longo das paredes.

Isso ocorreu por causa da existência de uma maior regularidade do material ao longo das paredes deste corpo-de-prova, em relação aos outros dois (VER-MD-2 e VER-MD-6).

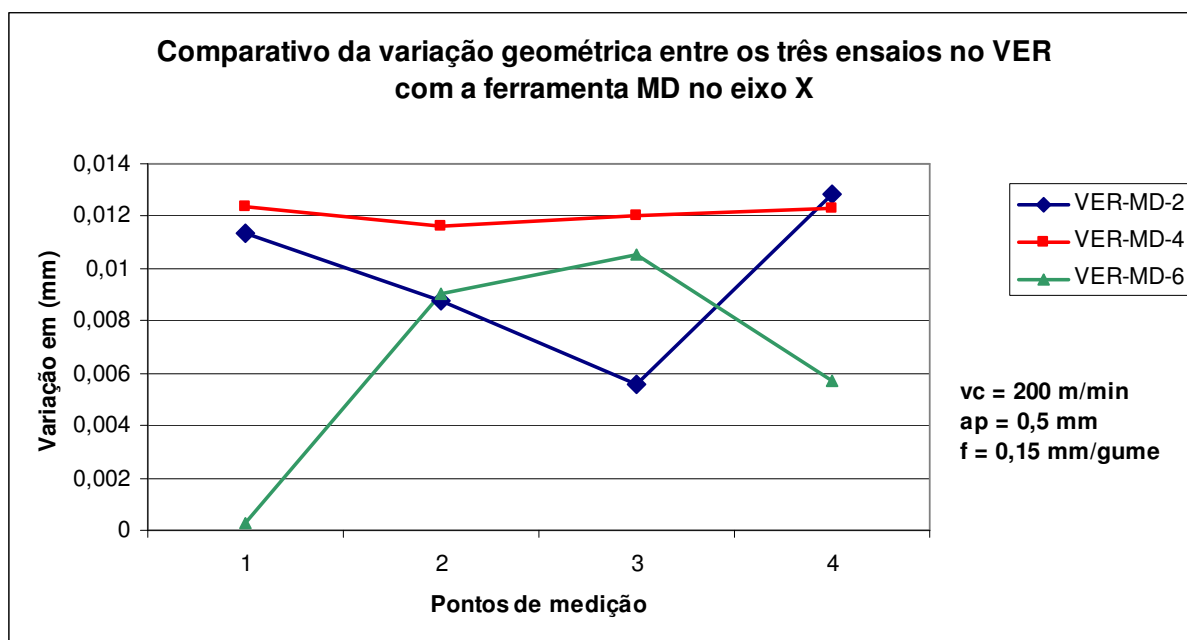


Figura 5-25 – Variação dos três corpos-de-prova em VER, usinados com a ferramenta MD no eixo X.

Nas medições no eixo X, nos corpos-de-prova em CIN, Figura 5-26, verifica-se a mesma tendência das medições realizadas no VER, ou seja, uma variação maior do que a apresentada no eixo Y. Isso também é em virtude de a espessura das paredes medidas nesse eixo ser menor do que a espessura das paredes medidas com relação ao eixo Y.

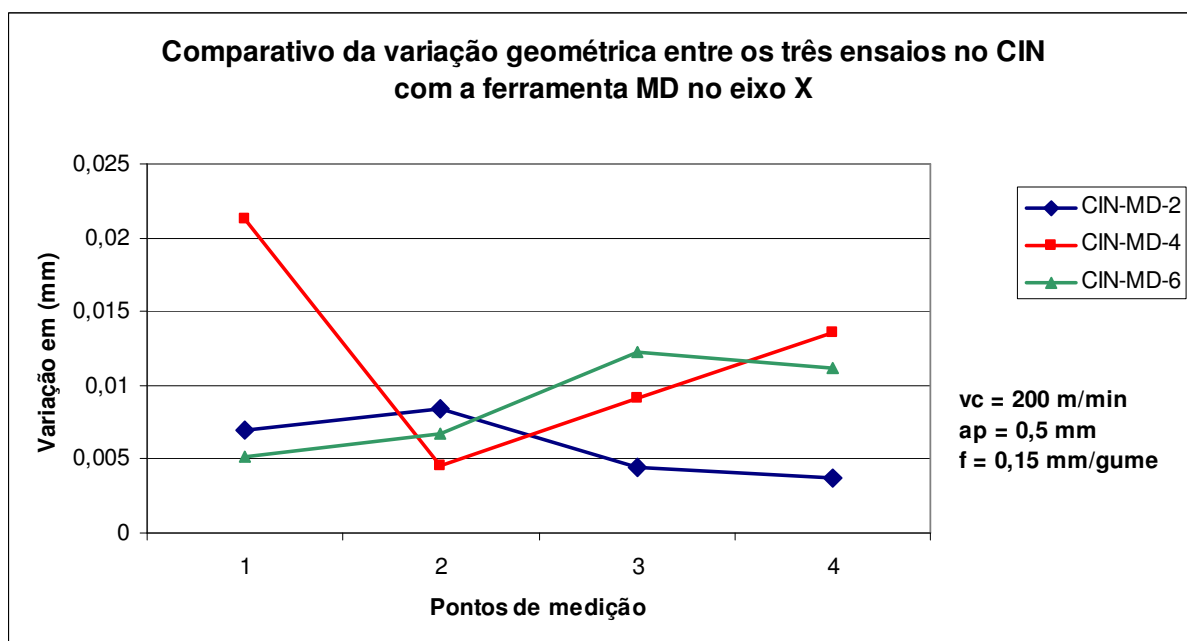


Figura 5-26 – Variação dos três corpos-de-prova em CIN, usinados com a ferramenta MD no eixo X.

O corpo-de-prova CIN-MD-4 apresentou a maior deformação, assim como o seu similar VER-MD-4, e a deformação ocorrida nos dois foi praticamente igual, pois o CIN apresentou 0,55% a mais de deformação, ou seja, uma diferença pouco significativa.

No corpo-de-prova CIN-MD-2, a deformação foi menor em relação ao CIN-MD-4 e CIN-MD-6. Tal fato pode ser explicado em razão da menor quantidade de material removido, tendo, conseqüentemente, menor tempo de exposição aos esforços de usinagem, sofrendo menos influência das deflexões ocorridas durante a usinagem.

Entretanto, não pode ser considerado tal fato como única explicação, pois isso não se repete nos resultados com o corpo-de-prova VER-MD-2 nos resultados apresentados no eixo X, porque existem pequenas variações nas espessuras das paredes de um corpo-de-prova para outro, as quais também exercem influência na maior ou menor deformação dos corpos-de-prova.

Quanto ao corpo-de-prova CIN-MD-6, este apresentou deformação menor do que no CIN-MD-4, ocorrendo o inverso dos pontos medidos no eixo Y, em conseqüência de variações na espessura das paredes entre os corpos-de-prova de cada ensaio.

Os resultados apresentados nas medições no eixo X mantiveram a mesma tendência dos resultados das medições no eixo Y, ou seja, no CIN a deformação foi maior que no VER. Esse fato evidencia que há menor resistência do CIN em relação ao VER, ocasionando diferença não apenas nas condições de trabalho das peças, mas também na melhor qualidade geométrica de peças em VER em relação às peças em CIN.

5.3.2 Análise de deformação dos corpos-de-prova em VER e CIN utilizados nos ensaios com cerâmica com avanço de 0,15 mm/gume

Nos ensaios com a ferramenta CER foram utilizados dois conjuntos de parâmetros de corte, e a diferença entre os dois foi o avanço. Neste item, são apresentados os resultados obtidos com avanço de 0,15 mm/gume e, no item a seguir, os resultados com avanço de 0,30 mm/gume.

Assim como nos ensaios com a ferramenta MD, também foram utilizados seis corpos-de-prova para os ensaios com avanço de 0,15 mm/gume, com a ferramenta CER (três em VER e três em CIN, sendo realizado o mesmo procedimento de se remover 2, 4 e 6 mm dos corpos-de-prova). Os procedimentos

de medição também foram os mesmos, sendo efetuadas as medições antes e depois da usinagem, no eixo X e Y.

Na Figura 5-27, podem ser vistos os resultados das medições dos três corpos-de-prova em VER, com a ferramenta CER, sendo VER-CER015-2 o corpo-de-prova que foi removido 2 mm, VER-CER015-4 o corpo-de-prova que foi removido 4 mm e VER-CER-015-6 o corpo-de-prova que foi removido 6 mm.

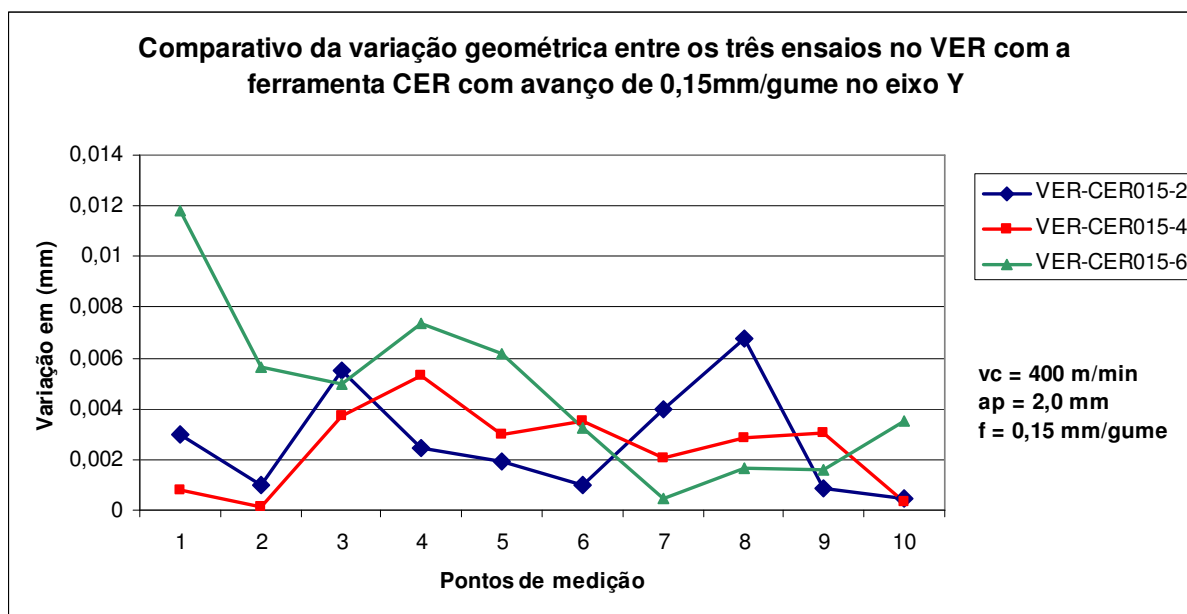


Figura 5-27 – Variação dos três corpos-de-prova em VER, usinados com a ferramenta CER com avanço de 0,15 mm/gume, no eixo Y.

Analisando o gráfico da Figura 5-27, verifica-se que os resultados apresentaram a mesma tendência de variação apresentada nos resultados dos corpos-de-prova em VER no eixo Y, usinados com a ferramenta MD. Entretanto, os resultados de deformação apresentados pelos corpos-de-prova usinados com a ferramenta CER com avanço de 0,15 mm/gume foram em média 27% maiores do que os apresentados nos corpos-de-prova usinados com a ferramenta MD; a maior diferença ocorreu entre os corpos-de-prova VER-CER015-2 e VER-MD-2.

Como o avanço utilizado nesse caso para CER e MD foi igual, a maior profundidade de corte utilizada para a ferramenta CER teve maior influência do que a velocidade de corte, resultando no aumento das forças durante o corte e, conseqüentemente, na deformação da peça, porque o aumento da profundidade de corte aumenta a força de usinagem, por aumentar a área de contato entre o cavaco e a ferramenta. Já com o aumento da velocidade de corte, tem-se aumento do calor gerado durante a usinagem, reduzindo a resistência do material da peça ao

cisalhamento, o que tende a diminuir a força de usinagem (MACHADO et al., 1986, 1987 citados por COSTA, 1997).

O mesmo acontece com os resultados apresentados no eixo Y com os corpos-de-prova em CIN, usinados com a ferramenta CER, com avanço de 0,15 mm/gume, em comparação aos seus similares usinados com MD.

Os resultados podem ser vistos na Figura 5-28, em que no CIN-CER015-2 foi removido 2 mm, no CIN-CER015-4 foi 4 mm e no CIN-CER-015-6 foi 6 mm.

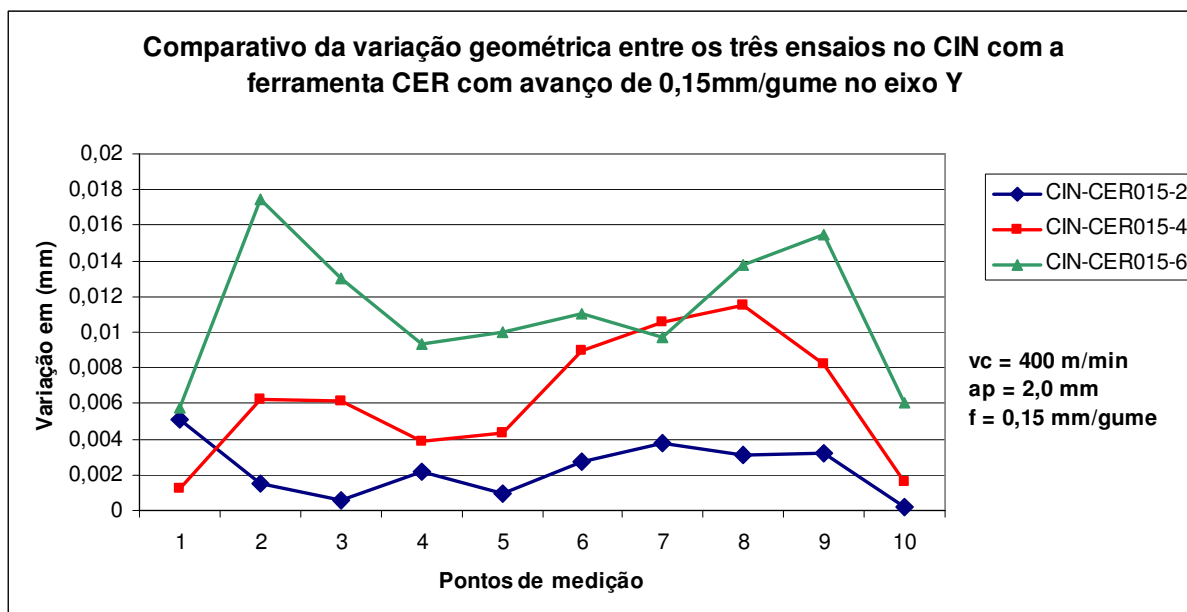


Figura 5-28 – Variação dos três corpos-de-prova em CIN, usinados com a ferramenta CER com avanço de 0,15 mm/gume, no eixo Y.

Assim como nos corpos-de-prova em CIN usinados com a ferramenta MD, nos usinados com a ferramenta CER, a variação é maior do que nos corpos-de-prova em VER; a variação nos corpos-de-prova em CIN é em média o dobro da ocorrida nos corpos-de-prova em VER, evidenciando a maior resistência do VER em relação ao CIN.

Quando comparados esses resultados obtidos no eixo Y com os corpos-de-prova em CIN usinados com a ferramenta CER com os resultados dos corpos-de-prova em CIN, porém usinados com a ferramenta MD, percebe-se que a maior profundidade de corte foi o fator de maior influência para o aumento da deformação.

Dessa forma, comparando-se os resultados das medições dos corpos-de-prova em CIN usinados com CER com os usinados com MD, verifica-se que a deformação foi maior quando usinado com CER do que quando usinado com MD, sendo a deformação dos corpos-de-prova usinados com CER em média 36%

superior aos usinados com MD, evidenciando a influência da maior profundidade de corte na maior deformação do material.

Contudo, os resultados das medições no eixo X não apresentaram a mesma tendência, tanto para o VER quanto para o CIN, como pode ser observado nos respectivos gráficos nas Figura 5-29 e Figura 5-30, porque em ambos os materiais a variação no eixo X nos corpos-de-prova usinados com CER foi menor do que nos usinados com MD.

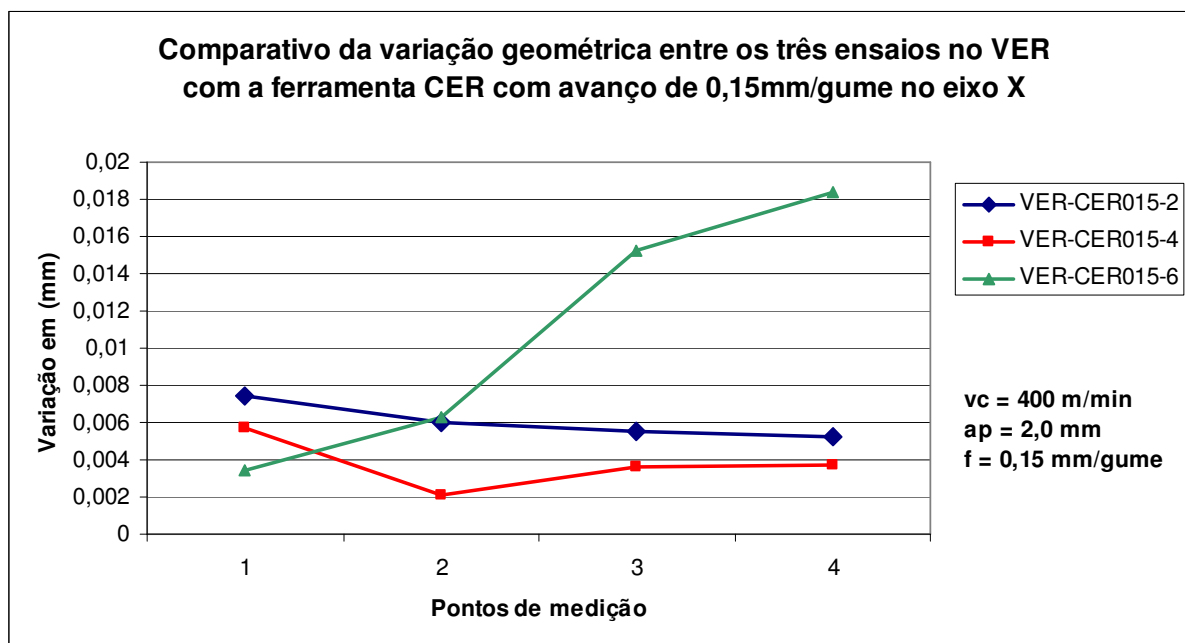


Figura 5-29 – Variação dos três corpos-de-prova em VER, usinados com a ferramenta CER com avanço de 0,15 mm/gume, no eixo X.

Esse fato ocorreu, provavelmente, porque as paredes em que foram medidos os pontos no eixo X se encontram na entrada e saída da ferramenta (Figura 5-22), portanto seu tempo de contato com a ferramenta é bastante reduzido, se comparado com as paredes em que foram medidas em relação ao eixo Y.

A explicação para tal fato é variação na espessura das paredes entre os corpos-de-prova usinados com CER e com MD, porque uma diferença de espessura de 1 ou 2 décimos de milímetro para mais ou para menos influencia diretamente na maior ou menor deformação do material; nesse caso, a influência dessa variação na espessura foi mais significativa do que a dos parâmetros de corte.

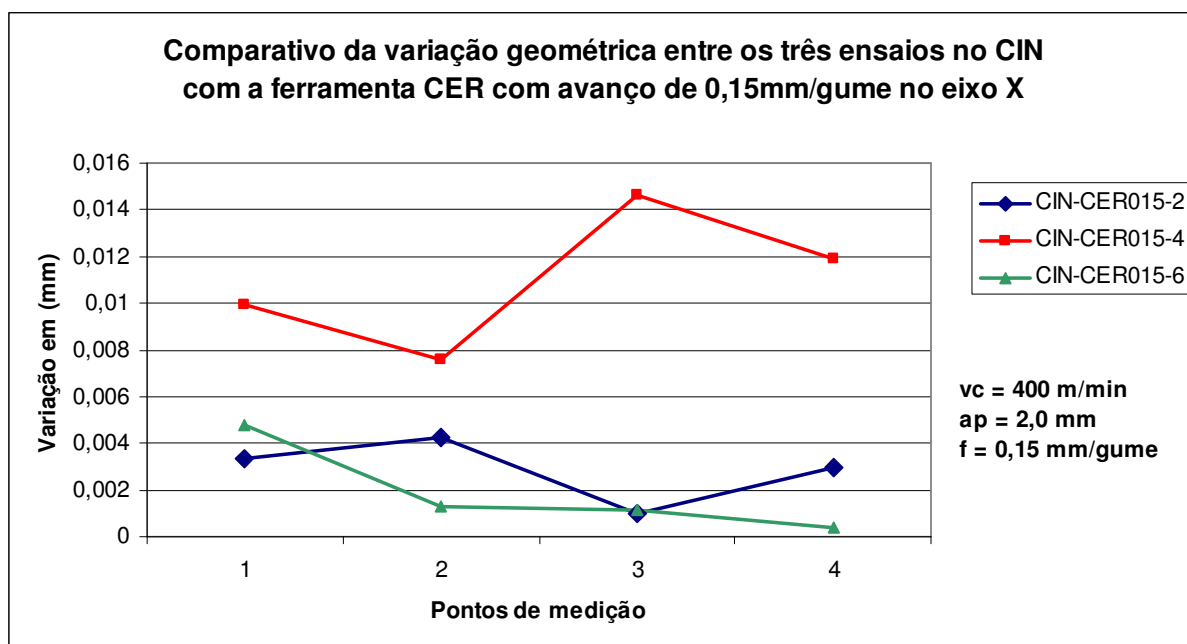


Figura 5-30 – Variação dos três corpos-de-prova em CIN, usinados com a ferramenta CER com avanço de 0,15 mm/gume, no eixo X.

Quando comparados os resultados de deformação medidos no eixo X dos corpos-de-prova em VER e CIN usinados com a ferramenta CER com os seus respectivos resultados medidos no eixo Y, percebe-se a mesma tendência apresentada nos corpos-de-prova usinados com a ferramenta MD, ou seja, a deformação no eixo X foi maior do que no eixo Y. Isso ocorreu em razão da menor espessura das paredes medidas no eixo X em relação às paredes medidas no eixo Y.

Outro fator a ser destacado é que, nos resultados apresentados no eixo X, a deformação apresentada pelo CIN foi menor do que no VER, sendo esta em média 30% menor. Essa inversão de resultados é, provavelmente, em virtude de uma variação na espessura das paredes dos corpos-de-prova de cada material, medidas no eixo X.

5.3.3 Análise de deformação dos corpos-de-prova em VER e CIN utilizados nos ensaios com cerâmica com avanço de 0,30 mm/gume

Como nos dois experimentos anteriores, nesse também foram utilizados seis corpos-de-prova para os ensaios com avanço de 0,30 mm/gume com a ferramenta CER (três em VER e três em CIN), sendo realizado o mesmo procedimento de se remover 2, 4 e 6 mm dos corpos-de-prova. Os procedimentos de medição também

foram os mesmos, sendo efetuadas as medições antes e depois da usinagem, no eixo X e Y.

Na Figura 5-31, podem ser vistos os resultados das medições dos três corpos-de-prova em VER, usinados com a ferramenta CER, com avanço de 0,30 mm/gume. Pelos resultados da Figura 5-31, verifica-se que os valores medidos apresentam a mesma tendência de variação apresentada nos resultados dos corpos-de-prova usinados com a ferramenta MD em VER no eixo Y, ou seja, com os valores apresentando variações de milésimos de milímetro. Entretanto, nesse caso, a maior variação foi do corpo-de-prova VER-CER030-6, seguida do VER-CER030-4 e do VER-CER030-2.

Portanto, com o aumento da quantidade de material removido, houve também o aumento da deformação, porque a maior quantidade de material removido representa maior tempo de usinagem, que reflete maior desgaste da ferramenta, o qual reflete no aumento das forças de usinagem e, conseqüentemente, aumento da deformação. Tal fato não ficou caracterizado em todas as medições, em virtude de variações nas espessuras dos corpos-de-prova.

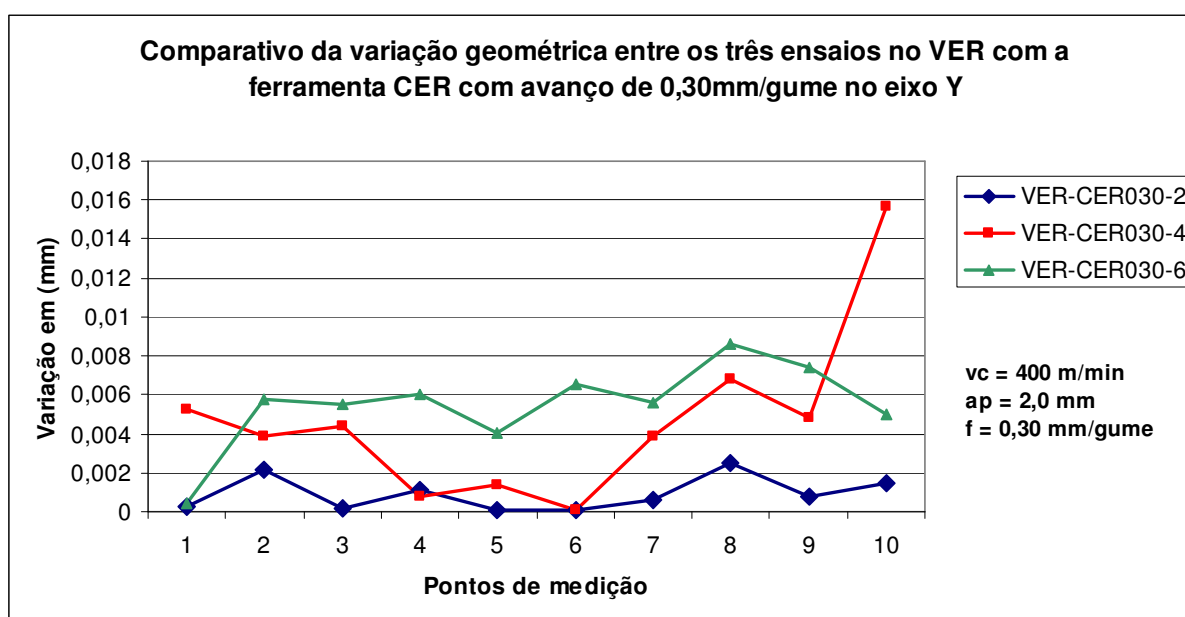


Figura 5-31 – Variação dos três corpos-de-prova em VER, usinados com a ferramenta CER com avanço de 0,30 mm/gume, no eixo Y.

Os resultados das medições de deformação dos corpos-de-prova usinados com CER com avanço de 0,30 mm/gume foram em média 40% maiores do que dos corpos-de-prova usinados com a ferramenta MD.

Portanto, a maior profundidade de corte aliada ao aumento do avanço tiveram maior influência do que a velocidade de corte, resultando no aumento das forças durante o corte e, conseqüentemente, na deformação da peça, pois o aumento da profundidade e do avanço implica no aumento das forças de corte.

Sendo assim, constata-se que esse fator se evidencia quando comparados esses resultados com os resultados anteriores com a ferramenta CER com avanço de 0,15 mm/gume), pois o aumento do avanço para 0,30 mm/gume ocasionou o aumento da deformação em relação aos mesmos ensaios com 0,15 mm/gume; a deformação apresentada nos corpos-de-prova usinados com CER030 foi em média de 13% superior à deformação dos usinados com CER015.

Analisando os resultados apresentados no eixo Y dos corpos-de-prova em CIN, que podem ser vistos na Figura 5-32, observa-se que a sua variação foi maior do que nos em VER, assim como ocorrido nos corpos-de-prova usinados com a ferramenta MD e nos usinados com a ferramenta CER, com 0,15 mm/gume; sendo a deformação nos corpos-de-prova em CIN em média 13% superior à apresentada nos corpos-de-prova em VER.

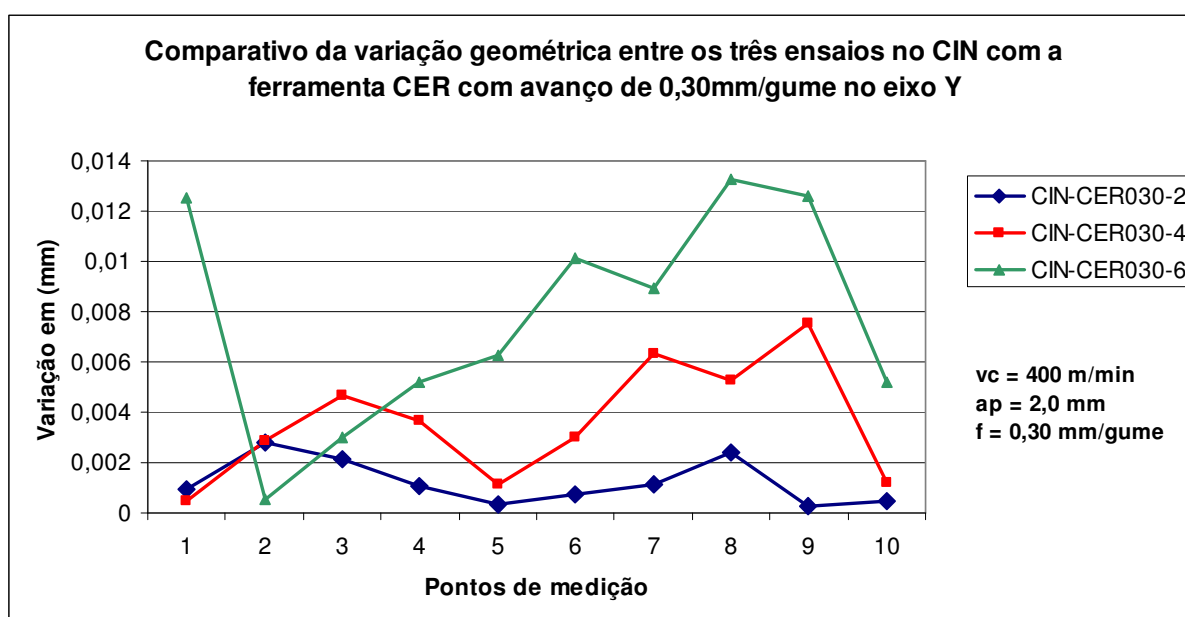


Figura 5-32 – Variação dos três corpos-de-prova em CIN, usinados com a ferramenta CER com avanço de 0,30 mm/gume, no eixo Y.

Quando comparados os resultados no eixo Y dos corpos-de-prova em CIN usinados com a ferramenta CER, com avanço de 0,30 mm/gume, em relação aos usinados com a ferramenta MD, nota-se que a deformação foi maior nos corpos-de-prova usinados com a ferramenta MD, sendo esta em média 15% superior. Esse fato

é em virtude, principalmente, das diferenças nas espessuras das paredes dos corpos-de-prova.

Analisando os resultados das medições no eixo X, com avanço de 0,30 mm/gume, dos corpos-de-prova em VER e CIN, que podem ser observados respectivamente nos gráficos da Figura 5-33 e Figura 5-34, percebe-se a mesma tendência apresentada nos ensaios anteriores com MD e CER015. Portanto, também nesse caso, a deformação no eixo X é maior do que a apresentada no eixo Y, confirmando que a menor espessura das paredes medidas em relação ao eixo X foram mais afetadas pelas forças de corte; em média, a deformação no eixo X foi o dobro da apresentada pelas paredes medidas no eixo Y.

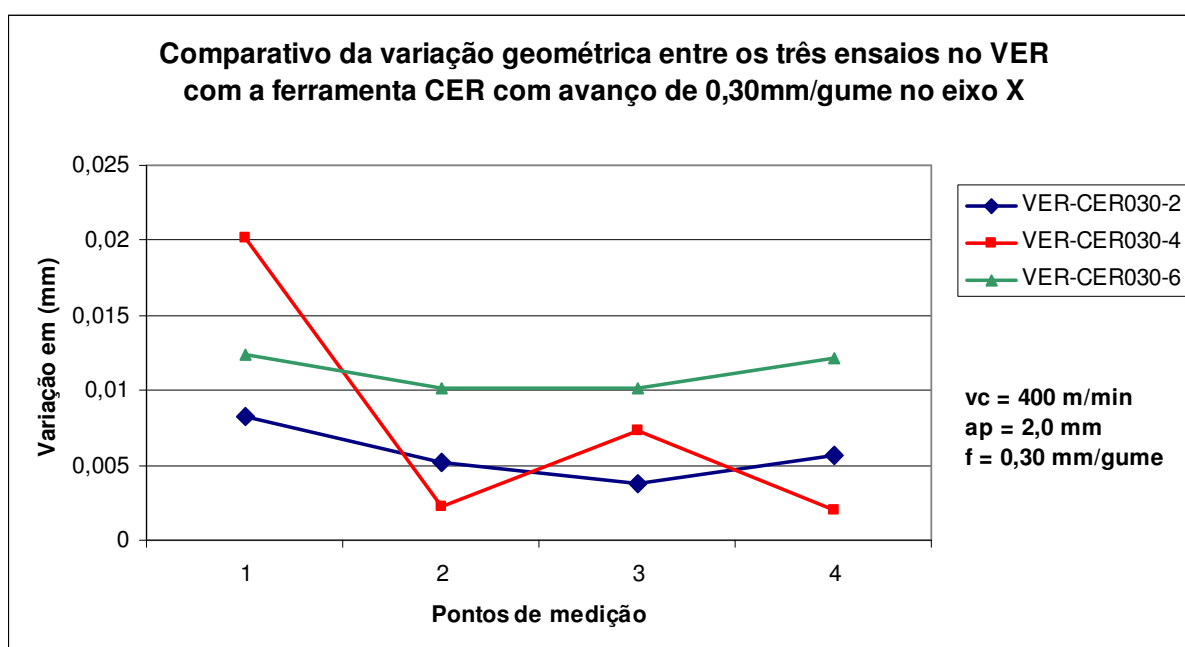


Figura 5-33 – Variação dos três corpos-de-prova em VER, usinados com a ferramenta CER com avanço de 0,30 mm/gume, no eixo X.

observa-se também, que, com maior avanço, a deformação no eixo X seguiu a mesma tendência dos resultados obtidos no eixo X com MD. Fazendo o comparativo desses resultados no eixo X com os resultados obtidos nos corpos-de-prova usinados com MD, medidos no mesmo eixo, constata-se que a deformação nos corpos-de-prova em VER usinados com CER com avanço de 0,30 mm/gume é menor, e a diferença média dos resultados é de 13%. Porém, destaca-se que, nos resultados em CIN, isso se inverte, ou seja, com maior avanço, maior velocidade e maior profundidade de corte, a deformação é maior nos corpos-de-prova usinados

com CER030 em relação aos usinados com MD, sendo a diferença média entre os resultados de 20%.

Portanto, a menor resistência do CIN comparada a do VER, aliada ao aumento das forças de corte, em consequência do aumento do avanço e da profundidade de corte, acarretaram maior deformação nos corpos-de-prova usinados com CER030 em relação aos ensaios com MD.

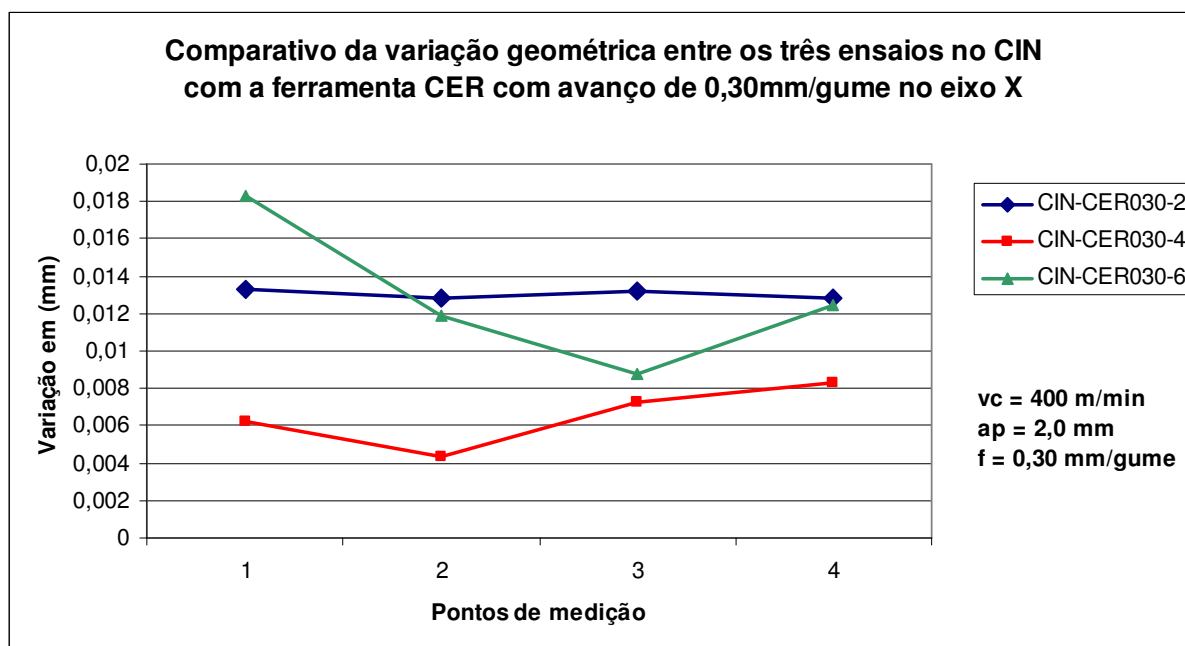


Figura 5-34 – Variação dos três corpos-de-prova em CIN, usinados com a ferramenta CER com avanço de 0,30 mm/gume, no eixo X.

Quando comparados os resultados no eixo X com os resultados obtidos nos corpos-de-prova usinados com CER015, medidos no mesmo eixo, verifica-se que a deformação com avanço de 0,30 mm/gume é maior, tanto no VER como no CIN.

Os corpos-de-prova em VER usinados com CER030 apresentaram uma deformação em média 20% superior à obtida nos corpos-de-prova em VER usinados com CER015. Já nos corpos-de-prova em CIN usinados com CER030, a deformação média foi o dobro da deformação apresentada nos corpos-de-prova em CIN usinados com CER015.

Dessa forma, tem-se que a menor resistência do CIN comparada a do VER, aliada ao aumento das forças de corte, em razão do aumento do avanço e da profundidade de corte, acarretaram maior deformação nos ensaios com CER030, em relação aos ensaios com CER015.

5.3.4 Resumo dos resultados de deformação

De maneira geral, os resultados de deformação obtidos possibilitam mostrar que a deformação não é significativa para a integridade da peça, pois, como já explicado no transcorrer deste trabalho, os valores de deformação são da ordem de milésimos de milímetro.

Outro fator constatado foi a maior deformação nas paredes medidas em relação ao eixo X (paredes menores, Figura 5-22), deixando evidente que a menor espessura dessas paredes ofereceu menor rigidez ao ser usinada, tornando estas mais suscetíveis à deformação, em virtude dos esforços durante a usinagem.

Comparando os resultados obtidos nas medições entre VER e o CIN, observa-se que o CIN apresentou maior deformação em relação ao VER, verificando-se que a menor resistência do CIN em relação ao VER refletiu-se nos resultados.

Fazendo-se uma analogia dos resultados de deformação com os resultados de temperatura, verificou-se que o aumento da temperatura não foi significativo a ponto de exercer influência na deformação das paredes dos corpos-de-prova, porque as temperaturas medidas nos corpos-de-prova em VER e em CIN, quando removido 2, 4 e 6 mm, variaram entre 21 e 26°C, não sendo, portanto, fator influente na deformação.

Contudo, assim como a menor resistência do CIN em relação ao VER teve reflexo nos resultados de deformação, a menor condutividade térmica do VER em relação ao CIN, também se refletiu nos resultados de temperatura.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Como citado inicialmente, este trabalho foi baseado nos resultados de três tipos de experimentos: análise da usinabilidade do ferro fundido vermicular e do cinzento; avaliação da elevação da temperatura durante a usinagem nos dois materiais; análise da deformação das paredes dos corpos-de-prova, em virtude da usinagem em ambos os materiais. Com bases nesses resultados, foi possível concluir alguns pontos, os quais estão expostos a seguir.

6.1 Conclusões sobre a análise da usinabilidade

Em relação aos resultados obtidos nos ensaios de usinabilidade com a ferramenta de metal-duro e de cerâmica, é possível concluir que:

- a) Os resultados de usinabilidade apresentados pela ferramenta de metal-duro reproduzem os resultados de outras pesquisas realizadas sobre o assunto, evidenciando a maior dificuldade na usinagem do ferro fundido vermicular, em relação ao ferro fundido cinzento, em consequência das diferenças nas suas características microestruturais. Tal fato é comprovado pela vida de ferramenta obtida com o ferro fundido cinzento na ordem de 60% superior à obtida com o ferro fundido vermicular.
- b) Quanto aos mecanismos de desgaste apresentados pela ferramenta de metal-duro, o principal foi por abrasão mecânica, com arrancamento de material no gume da ferramenta e também com presença de material aderido, caracterizando o desgaste por aderência.
- c) Com ferramenta cerâmica, os resultados de usinabilidade apresentaram duas características distintas: a primeira em relação à influência da superfície bruta de fundição, em que o ferro fundido cinzento apresentou menor usinabilidade que o ferro fundido vermicular (35% menor do que com vermicular) e a segunda em relação ao aumento do avanço auxiliar na melhora do desempenho da ferramenta, principalmente na sua produtividade, isso em razão da redução do tempo de contato ferramenta/peça.

- d) Conclui-se que o aumento do avanço melhora o desempenho da ferramenta, pois, usinando o ferro fundido vermicular, a vida foi 4% menor do que com avanço de 0,15 mm/gume, porém o volume de cavaco removido foi 90% maior quando utilizado com avanço de 0,30 mm/gume. Usinando-se o ferro fundido cinzento, a vida foi em torno de 20% superior ao resultado obtido com menor avanço, e o volume de material removido foi cerca de 140% superior ao obtido com menor avanço. Evidenciando-se, assim, que o menor tempo de contato ferramenta/peça, melhora o desempenho da ferramenta no processo de fresamento.
- e) Na ferramenta cerâmica, o mecanismo de desgaste predominante também foi a abrasão mecânica, destacando-se a presença de lascamentos nos gumes, tanto nos ensaios em ferro fundido vermicular como em ferro fundido cinzento.
- f) Outra conclusão importante é que, no processo de fresamento (corte interrompido), a usinagem do ferro fundido vermicular se apresenta menos agressiva para a ferramenta, ou seja, apresenta desgaste menor do que o apresentado no corte contínuo (torneamento e mandrilamento). Isso porque a vida da ferramenta de metal-duro foi 33% maior que a obtida por Xavier (2003) e 97% maior do que a obtida por Doré (2007). Com cerâmica, a vida foi 20% superior à obtida por Xavier (2003); ambos os autores desenvolveram trabalhos com torneamento de ferro fundido vermicular. Isso vem de encontro aos resultados trazidos pela literatura com Reuter e outros (2000, 2001).
- g) Analisando os resultados das duas ferramentas, não é possível afirmar qual é a mais indicada para a usinagem do vermicular, em virtude da ferramenta de metal-duro ter sido analisada em condições de acabamento e a cerâmica em condições de desbaste. Pode-se afirmar que a ferramenta de metal-duro apresentou bons resultados para a usinagem do ferro fundido vermicular; sendo necessário se fazerem ensaios nas mesmas condições (acabamento e desbaste) para ambas as ferramentas.
- h) Um ponto importante com relação aos resultados de usinabilidade é a influência da superfície bruta de fundição, pois esta apresentou,

principalmente no ferro fundido cinzento, excesso de areia residual, o que influenciou diretamente nos resultados, reduzindo a vida em até 125%, entre um ensaio e outro nesse material com a ferramenta cerâmica.

6.2 Conclusões sobre a análise da temperatura

Por intermédio da análise dos resultados de temperatura observou-se que as temperaturas atingidas foram:

- a) Cerca de 50% maiores nos ensaios com ferramenta cerâmica com avanço de 0,15 mm/gume, velocidade de 400 m/min e profundidade de corte de 2 mm do que as temperaturas atingidas nos ensaios com a ferramenta de metal-duro, com velocidade de 200 m/min e profundidade de corte de 0,5 mm. Nesse caso, mesmo com tempo de contato menor, a temperatura atingida foi maior, isso significa que a velocidade de corte e profundidade de corte mais agressivos foram os fatores determinantes para o maior aumento da temperatura nos ensaios com a ferramenta cerâmica com avanço de 0,15 mm/gume.
- b) Comparando os resultados obtidos com a ferramenta de metal-duro com os resultados obtidos com a ferramenta cerâmica com avanço de 0,30 mm/gume, os resultados se invertem, ou seja, as temperaturas nos ensaios com metal-duro foram maiores, em razão de o maior avanço reduzir em 70% o tempo de contato ferramenta/peça. Assim, a temperatura atingida pelo VER com MD é de 40% maior do que com CER030 e, no CIN com MD, a temperatura atingida é em torno de 27% maior do que com CER030.
- c) A velocidade de corte e o avanço são os fatores de maior influência nas temperaturas atingidas durante a usinagem, fato esse comprovado pelas temperaturas finais atingidas em cada ensaio, pois, com mesmo avanço ($f = 0,15$ mm/gume), porém com velocidades de corte diferentes (200 m/min e 400 m/min), verificou-se que, com a velocidade de corte maior, a temperatura final atingida foi maior. Já com maior avanço, mantendo-se a mesma velocidade de corte, as temperaturas finais atingidas foram menores, sendo o principal motivo o menor tempo de contato ferramenta/peça proporcionado pelo maior avanço.

- d) Os resultados apresentados se mostraram coerentes com a diferença entre as condutividades térmicas do ferro fundido vermicular e do ferro fundido cinzento; a diferença entre as temperaturas alcançadas por cada material se apresentou proporcional à diferença entre as suas condutividades térmicas. Entretanto, não se pode afirmar como único fator a condutividade térmica, para explicar as diferenças de temperaturas atingidas pelos dois materiais, porque o ferro fundido vermicular e o ferro fundido cinzento apresentam diferenças microestruturais como forma da grafita, porcentagem de nódulos e composição química. Tais diferenças, além de interferirem na maior ou menor condutividade térmica do ferro fundido vermicular, conferem maior resistência ao corte em relação ao ferro fundido cinzento, gerando maior esforço de corte para o primeiro, ocasionando o aumento da temperatura durante a usinagem.
- e) Analisando especificamente o processo de fresamento, pôde-se verificar a diferença de temperatura quando o gume da ferramenta está em contato com a peça e quando não está, deixando bem caracterizado o choque térmico que a ferramenta sofre em razão do corte interrompido.

6.3 Conclusões sobre a análise da deformação

Após a análise dos resultados referente à deformação do material, obtidos por meio de medições nas paredes dos corpos-de-prova, com máquina de medição tridimensional, antes e depois da usinagem, pode-se concluir que:

- a) A menor resistência do ferro fundido cinzento em relação ao ferro fundido vermicular se refletiu nos resultados, pois o cinzento apresentou maior deformação do que o ferro fundido vermicular, o que demonstra a sua menor resistência, influenciando não apenas nas condições de trabalho das peças, mas também na qualidade geométrica destas.
- b) Os resultados de deformação mostram que esta não é significativa para a integridade da peça, pois os valores referentes à deformação são da ordem de milésimos de milímetro.
- c) Os valores medidos nas paredes com menor espessura, em relação ao eixo X, apresentaram maior deformação que no eixo Y. Isso deixa

evidente que a menor espessura dessas paredes ofereceu menor rigidez, tornando estas mais suscetíveis à deformação, em virtude dos esforços durante a usinagem.

- d) Quanto ao aumento da temperatura dos corpos-de-prova durante a usinagem, verificou-se que esse fator não exerceu influência significativa na deformação dos corpos-de-prova, porque as temperaturas medidas nos corpos-de-prova, tanto em ferro fundido vermicular quanto em ferro fundido cinzento, quando removidos 2 mm, 4 mm e 6 mm de material, variaram entre 21 °C e 26 °C, sendo, portanto, temperaturas muito baixas para influenciarem na deformação da peça.

Por fim, é importante salientar que os resultados e as conclusões obtidos nos três tipos de experimentos realizados neste trabalho apontam que os objetivos da pesquisa foram alcançados, contudo abrem uma série de questionamentos importantes que carecem de respostas em trabalhos futuros.

6.4 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir, estão expostas algumas sugestões para trabalhos futuros, relacionados a esta linha de pesquisa. É importante lembrar que tais sugestões levaram em consideração os resultados obtidos neste trabalho e os problemas para a realização dele.

- a) Pesquisar as diferenças na usinabilidade entre o ferro fundido vermicular e cinzento no processo de fresamento, mantendo-se constantes os parâmetros de avanço e profundidade de corte, variando-se a velocidade de corte.
- b) Estudar as diferenças na usinabilidade entre o ferro fundido vermicular e nodular, variando-se o teor de nodularização no vermicular.
- c) Verificar a influência da geometria das ferramentas de corte na vida destas, no processo de fresamento.
- d) Desenvolver um corpo-de-prova que propicie uma simulação mais próxima o possível das condições reais do fresamento da face de fogo dos blocos de motores.

- e) Fazer um estudo comparativo do aumento de temperatura no ferro fundido vermicular, cinzento e nodular durante a usinagem, utilizando-se de análise de elementos finitos.
- f) Verificar a deformação, em razão da usinagem de peças, com paredes finas em ferro fundido vermicular e cinzento, medindo as forças envolvidas, captando as variações na peça por meio da técnica extensometria e medição por coordenadas, analisando os resultados por elementos finitos.

7 REFERÊNCIAS

ABUKHSHIM, N. A.; MATIVENGA, M. A.; SHEIKH, M. A. **Heat Generation and Temperature prediction in Metal Cutting: A Review and Implications for High Speed Machining**. International Journal of machine Tools & Manufacture, n. 46, p. 782-800, 2006.

AMPERES AUTOMATION. **Instrumentação temperatura**. 2007. Disponível em: <www.amperesautomation.hpg.ig.com.br/temp.html>. Acesso em: dez. 2007.

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

AY, H.; YANG, W. **Heat Transfer and Life of Metal Cutting Tools in Turning**. Int. Heat Mass Transfer, vol. 41, n° 3, p. 613-623, 1998.

ASM HANDBOOK. **Metallography and Microstructures**. 9. ed. Metal Handbook, 1992. v-9.

BRANDÃO, L. C. **Estudo experimental da condução de calor no fresamento de materiais endurecidos utilizando altas velocidades de corte**. 2006. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BUDAK, E. **Analytical Models for High Performance Milling. Part I: Cutting Forces, Structural Deformations and Tolerance Integrity**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, p 1478-1488, 2006.

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

CIMM – **Centro de Informação Metal Mecânica**. 2007. Disponível em: <www.cimm.com.br>. Acesso em: nov. 2007.

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 ROCHA, J. G. V. **Protótipo de um Pirômetro Autocalibrado Independente da Emissividade**. 1998. Dissertação (Mestrado em Eletrônica Industrial) - Universidade do Minho, Braga, 1998.

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. **Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design**. Werkstoff und automobilartrieb (Materials in powertrain), VDI (Verein Deutscher Ingenieure). Dresden, Germany, 1999.

DAWSON, S. **Process Control for the Production of Compacted Graphite Iron**. Based on a presentation made at the 106th AFS Casting Congress Kansas City, 4-7, May 2002.

DAWSON, S.; HOLLINGER, I.; ROBBINS, M.; DAETH, J.; REUTER, U.; SHUULZ, H. **The effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron**. Society of Automotive Engineers, Inc., 2001, p.1-18.

DAWSON, S.; SCHROEDER, T. **Practical Applications for Compacted Graphite Iron**. AFS Transactions, American Foundry Society, Des Plaines, USA: Paper 04-047, 2004, p.1-9.

DEWES, R. C.; NG, E.; CHUA, K. S.; NEWTON, P. G.; ASPINWALL, D. K. **Temperature Measurement When High Speed Machining Hardened Mould/Die Steel**. Journal of Materials Processing Technology, 92-93, p. 293-301, 1999.

DINIZ, A. E.; FERRER, J. A. G. **A comparison between silicon nitride-based ceramic and coated carbide tools in the face milling of irregular surfaces**. Journal of Materials Processing technology: Protec-11739, 2008.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo, Editora MM, 1999.

DORÉ, C. **Influência da Variação da Nodularidade na Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular Classe 450**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

DOS SANTOS, A. L. B. **Otimização de Ensaios Utilizados na Determinação dos Coeficientes da Equação de Taylor Expandida**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1996.

ELEFThERIOU, E.; BATES, C.E. **Effect of Inoculation on Machinability of Gray Cast Iron**. AFS Transactions, 1999, p. 659-669.

FILHO, F. T. P. **Avaliação de Sistemas de Medição de Tensões e Tensões Residuais em Dutos**. 2004. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

FLUKE. **Manual do Usuário**. 2007. Disponível em: <www.fluke.com.br/manuais/insideirumpor0100.pdf>. Acesso em: dez. 2007.

FREIRE, J. M.. **Tecnologia do Corte**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1977.

GASTEL, M.; KONETSCHNY, C.; REUTER, U.; FASEL, C.; SCHULZ, H.; RIEDEL, R.; ORTNER, H. M. **Investigation of the Wear Mechanism of Cubic Boron Nitrate Tools Used for the Machining of Compacted Graphite Iron and Grey Cast Iron.** International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, n. 18, p 287-296, 2000.

GODINHO, A. F. **Análise do Mandrilamento de Cilindros de Blocos de Motor 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.

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

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. L.; MASIERO, I.; MELLERAS, E.; CABEZAS, C.S. **Thermal Conductivity of Gray Iron and Compacted Graphite Iron Used for Cylinder Heads.** Revista Matéria, v. 10, n. 2, p. 265-272, Jun. 2005.

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.

HOLMGREN, D.; KÄLLBOM, R.; SVENSSON, I. L. **Influences of the Graphite Growth Direction on the Thermal Conductivity of Cast Iron.** The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, 2007.

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, 2004.

LABMAT-UFSC. **Microscópio Eletrônico de varredura.** 2007. Disponível em <www.materiais.ufsc.br/lcm>. Acesso em: Dez. 2007.

LIANG, S. Y.; SU, J. C. **Residual Stress Modeling in Orthogonal Machining.** Annals of the CIRP n. 56, 2007.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. **Usinagem dos metais.** 4. ed. Uberlândia: Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – UFU, 214 p. apostila, 1999.

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.

MARQUEZE, C. M. **Análise por Ultra-Som da Textura dos Materiais e Tensões Residuais em Juntas Soldadas.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

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. **Desenvolvimento de Tecnologia para Brunimento de Cilindros de Blocos de Motores em Ferro Fundido Vermicular**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MOREIRA, L. **Medição de Temperatura Usando-se Termopar**. Cerâmica Industrial, p 51-53, 2002.

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

PEREIRA, A. A.; BOEHS, L. **Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento com Inclusões de MnS**. Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 11., 2004, Nova Friburgo.

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, p. 26-30, 2005.

PEREIRA, A. A.; BOEHS, L.; GUESSER, W. L. **The Influence of Sulfur on the Machinability of Grey Cast Iron FC25**. Journal of Materials Processing Technology, p. 1-7, 2006.

PIESKE, A.; CHAVES FILHO, L. M.; REIMER, J. F. **Ferros Fundidos de Alta Qualidade**. Sociedade Educacional Tupy, Joinville, 1974.

POLLi, M. L. **Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades de Corte**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, 2005.

RYU, S. H.; CHU, C. N. **The Form Error Reduction in Side Wall Machining Using Successive Down and Up Milling**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, p. 1523-1530, 2005.

SERBINO, E. M. **Um Estudo dos Mecanismos de Desgaste em Disco de Freio Automotivo Ventilado de Ferro Fundido Cinzento Perlítico com Grafita Lamelar**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia

Metalurgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SILVA, L. C.; DE MELO, A. C. A.; MACHADO, Á. R.; SOUZA JÚNIOR, A. M. . **Utilização de um Planejamento Fatorial Completo para Análise da Altura da Rebarba Formada no Fresamento Frontal de Blocos de Motores em Ferro Fundido Cinzento.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 3., 2005, Joinville. Anais, Joinville, 2005.

SOUZA SANTOS, A. B.; CASTELO BRANCO, C. H. **Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares.** São Paulo: IPT, 1977.

SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida – parte 1.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório Mecânica de Precisão, 2002. Apostila.

SPECTRU – **Instrumental Científico Ltda.** 2007. Disponível em: <<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/Nova%20pasta2/vermicular.pdf>>. Acesso em: nov. 2007.

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

STEMMER, G. E. **Ferramentas de Corte II.** 3. ed. Florianópolis: Ed. UFSC, 2005b.

SUTERIO, R. **Medição de Tensões Residuais por Indentação Associada a Holografia Eletrônica.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TANG, Y.; HIROYUKI, S. **Investigation of Thermal Behavior on Cylinder Liner during Its Boring Process.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, n. 47, p. 2162-2171, 2007.

TERMOPARES. 2007. Disponível em: <www.termopares.com.br>. Acesso em nov. 2007.

TSAI, J.-S.; LIAO, C.-L. **Finite-Element Modeling of Static Surface Errors in the Peripheral Milling of Thin-Walled Workpieces.** Journal of Materials Processing Technology, p. 235-246, 1999.

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

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

WALTER. **News II 2º Suplemento ao Catálogo Geral.** Catálogo Walter Brasil, 2006, p. 116.

WILLEMANN, D. P. **Desenvolvimento de uma Roseta Óptica para Medição de Tensões e Deformações utilizando Holografia Eletrônica.** 2002. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.