



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS CORTZ

VINICIUS MOREIRA SILVA BERTOLINI

**AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DE FERROS FUNDIDOS CINZENTO  
E VERMICULAR ATRAVÉS DE ENSAIO DE RISCAMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

(Tcc2 – Nº de Inscrição – 49)

CURITIBA

2016

MATHEUS CORTZ

VINICIUS MOREIRA SILVA BERTOLINI

## **AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA EM FERRO FUNDIDO CINZENTO E VERMICULAR ATRAVÉS DE ENSAIO DE RISCAMENTO**

Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Me. João Luiz do Vale

Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva

CURITIBA

2016

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA EM FERRO FUNDIDO CINZENTO E VERMICULAR ATRAVÉS DE ENSAIO DE RISCAMENTO", realizado pelo aluno(s) MATHEUS CORTZ E VINICIUS MOREIRA SILVA BERTOLINI, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Me. João Luiz do Vale  
COEME, UTFPR - LD  
Orientador

Prof. Dr. Julio Cesar Klein das Neves  
DAMEC, UTFPR - CT  
Avaliador

Prof. Dr. Ossimar Maranhão  
DAMEC, UTFPR - CT  
Avaliador

Curitiba, 26 de junho de 2016.

## RESUMO

BERTOLINI, Vinicius M. S. & CORTZ, Matheus. **Avaliação tribológica de ferros fundidos cinzento e vermicular através de ensaio de riscamento**. 2016. 99 f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento tribológico de ferros fundidos em ensaio de riscamento. As amostras utilizadas neste estudo foram obtidas a partir de blocos de motores de combustão interna fabricados em ferros fundidos cinzento e vermicular. Duas espessuras de parede do cilindro foram avaliadas. Na primeira etapa do trabalho, realizaram-se ensaios de riscamento com ferramenta de corte e identador Rockwell a fim de determinar a influência de cada geometria nas propriedades dos riscos e os parâmetros a serem utilizados. Os resultados mostram que existe uma grande diferença nos mecanismos de desgaste dos identadores, de forma que a ferramenta de corte com geometria definida foi escolhida para a continuidade dos estudos, assim como a carga normal de 0,6 N. Nos ensaios finais foram realizados sulcos na direção usual de brunimento, avaliando o coeficiente de atrito (COF), largura e profundidade dos riscos e influência da grafita para os diferentes materiais estudados. Dessa forma, verificou-se que o tipo de material e a espessura de parede tiveram pouca influência na largura média dos sulcos. Além disso, através da sobreposição do gráfico do COF com as metalografias, observou-se a variação deste parâmetro em áreas com alta concentração de grafita, sendo que nestas regiões há um aumento localizado do COF. Notou-se variação da largura do sulco em regiões com maior presença de grafita, as quais estão associadas às descontinuidades na matriz. Constatou-se que o COF e a macrodureza dos materiais apresentaram forte correlação positiva, enquanto o COF e o número de grafitas mostraram-se inversamente correlacionados.

**Palavras-chave:** Ferro fundido cinzento; Ferro fundido vermicular; Ensaio de riscamento; Grafita; Mecanismos de desgaste; Metal dobrado.

## ABSTRACT

BERTOLINI, Vinicius M. S. & CORTZ, Matheus. **Avaliação tribológica de ferros fundidos cinzento e vermicular através de ensaio de riscamento**. 2016. 99 f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This study aims to evaluate the tribological behavior of cast irons in scratching test. The samples used in this study were obtained from internal combustion engine blocks made of gray and compacted graphite iron. Two cylinder wall thicknesses were evaluated. In the first stage of the work, scratch tests were performed with a cutting tool and a Rockwell indenter to determine the influence of each geometry in scratch properties as well as the parameters to be used. The results showed a great difference in wear mechanisms of indenters, so that the cutting tool with defined geometry was chosen for further study, as well as the normal load of 0.6 N. The final tests were performed in the usual honing direction, evaluating the coefficient of friction (COF), width and depth of the grooves and graphite's effect for different materials studied. In this way, it was found that the type of material and the wall thickness have minimal effect on the average width of the grooves. Furthermore, by overlaying COF graph and metallography results, there was variation in this parameter in areas with high concentration of graphite, wherein these regions have a localized increase of COF. It was noted change in groove width in regions with greater presence of graphite, which are associated with discontinuities in the matrix. It was found that the COF and materials' macro hardness have positive correlation, while the COF and the quantity of graphite were inversely correlated.

**Keywords:** *Gray cast iron; Compacted graphite iron; Scratching test; Graphite; Wear mechanisms; Folded metal.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática de um MCI. (a) Localização do cilindro, (b) conjunto de anéis, cilindro e pistão e (c) contato anéis – pistão.....	12
Figura 2 – Seção longitudinal na região do cilindro de um MCI. ....	16
Figura 3 - Explicação para forma da grafita: (a) Estrutura hexagonal da grafita (b) Direções cristalográficas (c) Crescimento da grafita em nódulos – plano basal (b) Crescimento da grafita em veios - plano prismático.....	18
Figura 4 - Exemplos dos tipos de grafita: Respectivamente (A), (B), (C), (D), (E). ...	19
Figura 5 - Exemplos dos tamanhos de grafita em FOFO cinzento, respectivamente: (a) tamanho 1, (b) tamanho 3, (c) tamanho 8.....	19
Figura 6 - Microscopia óptica típica de ferro fundido vermicular. ....	20
Figura 7 – Microscopia óptica típica de ferro fundido cinzento.....	21
Figura 8 - Representação esquemática de uma ferramenta de brunimento cilíndrico interno. ....	23
Figura 9 – Esquema representativo dos movimentos da ferramenta de brunimento.	24
Figura 10 - Imagem de uma superfície de platô obtida por IDBL. ....	25
Figura 11 – Perfil de rugosidade nas etapas de brunimento de cilindro de motor fabricado em ferro fundido vermicular. ....	25
Figura 12 – Imagens de superfícies brunidas com presença de diferentes níveis de FM obtidas por MEV.....	26
Figura 13 – Ilustração da área de contato real entre sólidos.....	27
Figura 14 – Representação esquemática das componentes do atrito (a) adesão (b) deformação. ....	28
Figura 15 – Mecanismos de desgaste por abrasão. (a) Microsulcamento, (b) Microcorte, (c) Microfadiga e (d) Microlascamento.....	29
Figura 16 – Representação esquemática do ensaio de riscamento.....	30
Figura 17 – Média do percentual de grafita e número de grafita nas amostras. ....	31
Figura 18 – Topografia típica da superfície brunida: (a) Imagem obtida por Interferometria de luz branca (b) Quantificação de sulcos e metal dobrado por rotina em <i>MATLAB</i> ®. ....	32
Figura 19 – Quantificação de FM e sulcos nas amostras de FOFO.....	33

Figura 20 – Percentual de sulcos obstruídos e largura dos sulcos de amostras de ferro fundido vermicular e cinzento. ....	34
Figura 21 - Localização das amostras retiradas no bloco do motor. ....	36
Figura 22 - Esquema da orientação do corte e posicionamento das amostras de cilindro após embutimento.....	37
Figura 23 – Aparato usado para realização dos ensaios tribológicos. ....	37
Figura 24 – (a) Modelo esquemático 3D e (b) vista explodida do dispositivo para tribômetro. ....	38
Figura 25 – Dispositivo montado sobre a base do tribômetro ....	39
Figura 26 – Detalhe dos penetradores utilizados: (a) Inserto de metal duro montado no porta ferramenta; (b) Identador Rockwell. ....	40
Figura 27 – Detalhe dos penetradores: (a) Ferramenta; (b) Rockwell.....	41
Figura 27 – Imagens obtidas por microscopia óptica dos materiais sem ataque químico.....	45
Figura 28 - Imagens obtidas por microscopia óptica dos materiais com ataque químico de Nital.....	46
Figura 29 – Resultados das medições de dureza Vickers para as quatro amostras com carga de 20 kgf.....	47
Figura 30 – Posição dos riscos nas amostras: (a) Ferramenta - Cin-PG; (b) Identador Rockwell - Cin-PF.....	47
Figura 31 – Coeficiente de atrito em função da distância (CinPF): (a) Ferramenta; (b) Identador Rockwell. ....	48
Figura 32 - Tendência de variação do COF em função da carga.....	50
Figura 33 – (a) Largura média; (b) Profundidade média dos sulcos.....	51
Figura 34 – Razão largura-profundidade para ambos os penetradores ....	51
Figura 36 – Topografia “3D” dos sulcos feitos com ferramenta e identador Rockwell: (a) Ferramenta – 0,6 N (b) Rockwell – 0,6 N; (c) Ferramenta – 1 N (d) Rockwell – 1 N; (e) Ferramenta – 2 N (f) Rockwell – 2 N. ....	53
Figura 37 – Perfil topográfico para ensaio com carga de 1 N: (a) Ferramenta; (b) Identador Rockwell.....	54
Figura 38 – Comparação da área de <i>pile-up</i> por tipo de identador em função da carga. ....	55

Figura 39 – MEV típica de cada ensaio com carga de 2 N: (a) Ferramenta; (b) Identador Rockwell.....	56
Figura 40 – Aumento da largura do risco com ferramenta .....	57
Figura 41 – Diminuição da largura do risco com ferramenta.....	58
Figura 42 – Formação de proa com o uso de ferramenta .....	59
Figura 43 – Formação de metal dobrado na amostra Cin-PG e carga de 1 N com ferramenta.....	59
Figura 44 – Arrancamento de grafita no ensaio com ferramenta e carga de 2 N.....	60
Figura 45 – Expulsão de grafita com o uso do identador Rockwell e carga de 1 N...61	
Figura 46 – Gráfico resultante do ensaio de riscamento no qual são mostrados o COF, força normal ( $F_z$ ) e força na direção de riscamento ( $F_x$ ). .....	62
Figura 47 - Correlação entre o coeficiente de atrito, número de grafitas por $\text{mm}^2$ e percentual de grafita.....	63
Figura 48 - Correlação entre o coeficiente de atrito e a macrodureza HV20.....	64
Figura 49 - Correlação do COF, imagem do risco obtida por microscopia óptica e interferometria: CinPF. ....	65
Figura 50 - Correlação do COF, imagem do risco obtida por microscopia óptica e interferometria: CinPG.....	65
Figura 51 - Correlação do COF, imagem do risco obtida por microscopia óptica e interferometria: VerPF. ....	65
Figura 52 - Correlação do COF, imagem do risco obtida por microscopia óptica e interferometria: VerPG. ....	65
Figura 53 – (a) Representação da seção da superfície avaliada em 3D e (b) ampliação do sulco em 2D. ....	67
Figura 54 – (a) Vista tridimensional de um risco obtida por IDBL e (b) esquema para a determinação da largura do risco. ....	68
Figura 55 – Largura média dos sulcos para as amostras.....	69
Figura 56 – Exemplo esquemático da medição de profundidade do sulco a partir de uma interpolação dos resultados.....	69
Figura 57 – Profundidade média dos sulcos para as amostras.....	70
Figura 58 – Variação da largura do sulco em uma amostra CinPG. ....	71
Figura 59 - Variação da largura do sulco e marcas de desgaste abrasivo em uma amostra VerPF. ....	72



Figura 60 – Formação de metal dobrado sobre um veio de grafita em uma amostra CinPF. ....	73
Figura 61 - Formação de metal dobrado sobre um veio de grafita em uma amostra VerPG. ....	74
Figura 62 – Exemplos de cobertura e exposição de grafita .....	75
Figura 63 - Exemplo de (a) remoção e (b) extrusão de grafita. ....	76
Figura 64 – Detalhe da aresta de corte das ferramentas de metal duro utilizada no riscamento.....	76
Figura 65 – Imagem obtida por MEV mostrando a face de saída de cavaco da ferramenta e utilização do EDX.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos estudados.....	35
Tabela 2 - Nomenclatura dos corpos de prova utilizados. ....	36
Tabela 3 – Lista de condições para ensaio preliminar de riscamento.....	41
Tabela 4 – Lista de condições para ensaios de riscamento .....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ASTM - Sociedade americana para testes e materiais (*American Society for Testing and Materials*);

Cin-PF - Ferro fundido cinzento retirado do quadrante de menor espessura;

Cin-PG - Ferro fundido cinzento retirado do quadrante de maior espessura;

COF - Coeficiente de atrito cinético (*Coefficient of friction*);

FFC - Ferro fundido cinzento;

FFV - Ferro fundido vermicular;

FOFO - Ferro fundido;

FM - Metal dobrado (*Folded Metal*);

IDLB - Interferometria de luz branca;

LASC - Laboratório de Superfícies e Contato;

MCI - Motor de combustão interna;

MEV - Microscopia eletrônica de varredura;

PF - Material retirado do quadrante de menor espessura;

PG - Material retirado do quadrante de maior espessura;

PPGEM – Programa de pós-graduação em engenharia mecânica e materiais da UTFPR;

Ver-PF - Ferro fundido vermicular retirado do quadrante de menor espessura;

Ver-PG - Ferro fundido vermicular retirado do quadrante de maior espessura;

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	Contexto do Tema .....	12
1.2	Oportunidade .....	13
1.3	Objetivos .....	14
1.4	Justificativa .....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	15
2.1	Ferros fundidos.....	15
2.1.1	Ferro fundido vermicular.....	20
2.1.2	Ferro fundido cinzento.....	21
2.2	Brunimento .....	22
2.2.1	Metal dobrado.....	26
2.3	Fundamentos de tribologia .....	26
2.3.1	Atrito .....	27
2.3.2	Desgaste abrasivo .....	28
2.3.3	Ensaio de riscamento .....	30
2.4	Caracterização dos materiais realizada por Vale (2016) .....	31
2.4.1	Quantificações de grafita .....	31
2.4.1.1	Grafita .....	31
2.4.1.2	Quantificação da superfície brunida.....	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	35
3.1	Materiais .....	35
3.1.1	Corpo de prova.....	35
3.2	Equipamento para ensaio tribológico.....	37
3.2.1	Dispositivo para posicionamento da amostra .....	38
3.3	Planejamento dos ensaios de riscamento preliminares.....	40
3.3.1	Ensaio de riscamento .....	41
3.4	Caracterizações.....	42
3.4.1	Metalografia.....	42
3.4.2	Macro dureza.....	42
3.4.3	Microscopia eletrônica por varredura .....	42
3.4.4	Análise topográfica .....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1	Caracterização dos materiais .....	44
4.1.1	Microestrutura.....	44
4.1.2	Macro dureza.....	46
4.2	Ensaio preliminares de riscamento .....	47
4.3	Ensaio de riscamento .....	62
4.3.1	Coeficiente de atrito x propriedades dos materiais.....	62
4.3.2	Coeficiente de atrito x distância de riscamento .....	64
4.3.3	Largura e profundidade dos sulcos .....	66
4.3.4	Mecanismos de desgaste .....	71
4.3.5	Análise das ferramentas de corte utilizadas .....	76
5	CONCLUSÕES.....	78

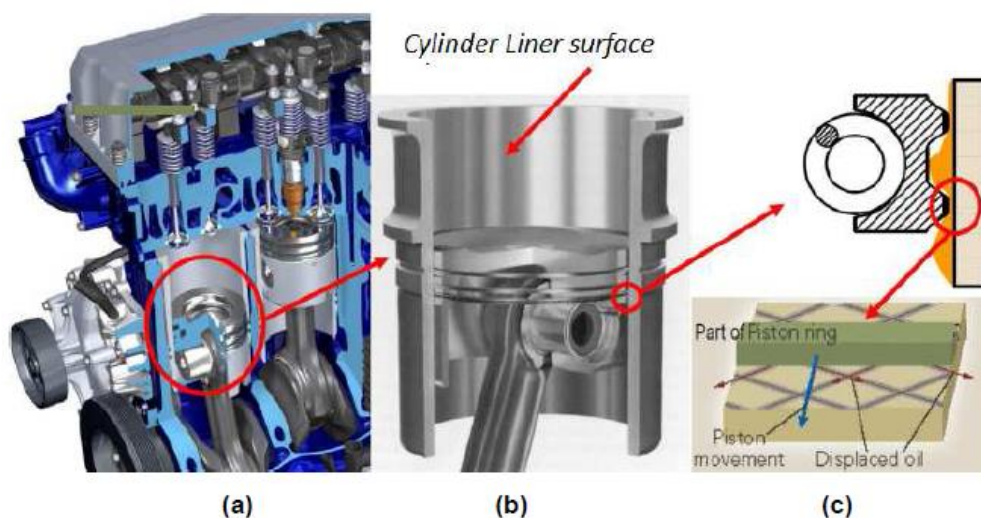
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
APÊNDICE A – Projeto do dispositivo para tribômetro .....	83
APÊNDICE B – Artigo submetido ao CONEM .....	87

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto do Tema

No desenvolvimento e construção de motores de combustão interna (MCIs) são estudados diversos aspectos relacionados a fenômenos como: combustão, trocas térmicas, dimensionamento estrutural e condições de atrito e desgaste. Especialmente estes dois últimos são discutidos neste trabalho para os ferros fundidos utilizados na fabricação de MCIs.

Do ponto de vista da tribologia, um dos pontos mais críticos de um MCI é o contato entre a parede do cilindro e os anéis do pistão (STACHOVIAK; BATCHELOR, 2001). A Figura 1 mostra detalhes da montagem desse sistema tribológico o qual está diretamente relacionado com a eficiência do motor. Perdas de eficiência mecânica relacionadas ao atrito ficam atrás somente da energia dissipada como calor (WILL, 2012). A partir disso fica evidente que estudos relacionados ao coeficiente de atrito (COF), desgaste e caracterização dos materiais envolvidos neste sistema tribológico podem contribuir para a eficiência dos MCIs.



**Figura 1 – Representação esquemática de um MCI. (a) Localização do cilindro, (b) conjunto de anéis, cilindro e pistão e (c) contato anéis – pistão.**

**Fonte: Adaptado de Dimkovski, 2011.**

Devido às características dos ferros fundidos, estes são amplamente empregados na fabricação de MCI (CHIAVERINI, 2012). Essas características são influenciadas significativamente pela presença de grafita na matriz do material.

O processo de fabricação também é determinante na funcionalidade destas superfícies de contato. Os cilindros de blocos de motores, normalmente recebem sua forma final por meio do processo de brunimento (MOCELLIN, 2007). Este processo apesar de garantir características desejáveis à superfície pode gerar defeitos como o metal dobrado nos sulcos (*folded metal*) na parede do cilindro, influenciando também na eficiência e durabilidade do equipamento (DIMKOVSKI, 2012). Esta superfície brunida comumente tem sua textura caracterizada pela presença de platôs e sulcos, sendo assim essencial para a retenção de óleo na parede e lubrificação dos componentes móveis no contato entre o anel e o cilindro (CABANETTES *et al.*, 2014; MOCELLIN, 2007).

Em um estudo recente, que está em desenvolvimento no PPGEM, Vale (2016) avaliou dois materiais de bloco de MCI, a saber: ferros fundidos vermicular e cinzento, com acabamento brunido. Para cada material foram estudadas duas espessuras de parede. Através de técnicas de análise de imagens foram realizadas quantificações de morfologia e distribuição de grafita, caracterização de sulcos e de metal dobrado nas superfícies brunidas. Os resultados mostraram uma forte correlação estatística entre a fração de grafita com a quantidade de metal dobrado.

## 1.2 Oportunidade

Diante de resultados da pesquisa realizada por Vale (2016), observou-se a oportunidade de realizar este estudo visando ampliar as discussões através da caracterização dos mesmos materiais em ensaios de riscamento com ferramenta de geometria definida. Devido à anisotropia microestrutural causada pela presença de fase grafita os ensaios foram realizados em uma das direções dos sulcos de brunimento.

Como os materiais são os mesmos, estas análises servirão de base para corroborar e auxiliar nas discussões dos resultados, obtidos por Vale (2016), de quantificação de grafita e caracterização de superfícies brunidas.

Ademais, o aprofundamento no estudo do coeficiente de atrito e de mecanismos de desgaste pode ser útil para um melhor entendimento da influência da grafita na formação de metal dobrado no processo de sulcamento.

### **1.3 Objetivos**

O principal objetivo do trabalho foi avaliar o comportamento tribológico dos ferros fundidos vermicular e cinzento retirados dos cilindros em regiões de espessuras de parede distintas de um mesmo bloco de motor, utilizando para isto ensaios de riscamento (esclerometria).

Para tanto, alguns objetivos secundários são listados:

- ✓ Projeto e execução de base para tribômetro que permita ensaios de riscamento em direções angulares definidas;
- ✓ Caracterização dos mecanismos de desgaste envolvidos no processo de riscamento;
- ✓ Discussão para correlacionar os resultados dos ensaios de riscamento com resultados de quantificação de grafita obtidos por Vale (2016).

### **1.4 Justificativa**

O presente trabalho justifica-se a partir da oportunidade de expandir as discussões realizadas no trabalho de Vale (2016). Além disso, este estudo e caracterização são relevantes do ponto de vista do desenvolvimento de motores e outros equipamentos que utilizam o ferro fundido, o que permite um melhor conhecimento dos mecanismos tribológicos envolvidos e a influência da grafita nestas condições.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção objetiva-se apresentar um embasamento teórico que possibilite a compreensão dos conceitos utilizados e que fundamente as discussões realizadas ao longo do trabalho.

### 2.1 Ferros fundidos

Ferros fundidos, segundo Callister (2007), são ligas ferrosas compostas de ferro, carbono e silício, dentre outros elementos que estão presentes em menor quantidade. Usualmente os ferros fundidos apresentam concentração de carbono (em massa) maior que 2,14% (CALLISTER, 2007). O silício, o qual pode estar presente em concentrações maiores que o carbono e tem grande influência na decomposição do carboneto de ferro (CHIAVERINI, 2012). Estas ligas são amplamente utilizadas na indústria em diversas aplicações, dentre elas destacam-se: bases para máquinas, blocos de motores, eixos, carcaças, dentre outras utilizações. São algumas das características dos ferros fundidos:

- ✓ Materiais pouco dúcteis;
- ✓ Possuem boa capacidade de amortecimento de vibrações;
- ✓ Ponto de fusão mais baixo que o do aço;
- ✓ Matéria prima de baixo custo.

Usualmente os ferros fundidos são divididos em famílias as quais estão relacionadas à microestrutura ou determinadas propriedades mecânicas da liga. Dentre as principais pode-se destacar:

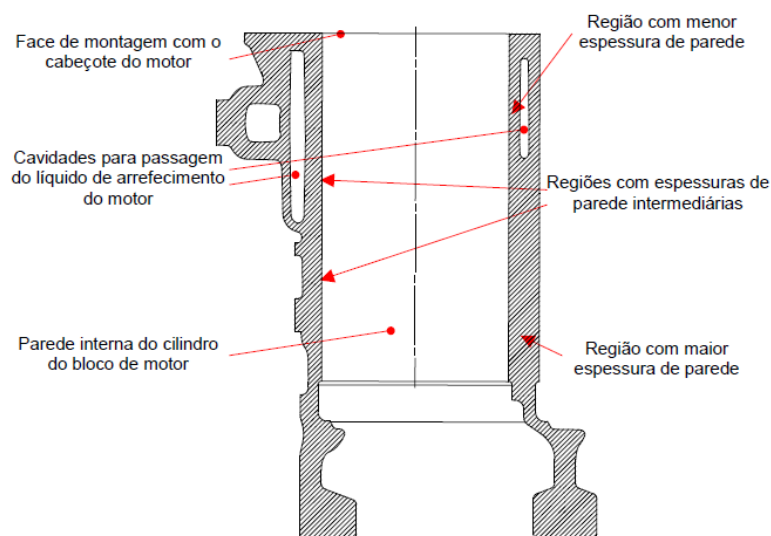
- ✓ Ferro fundido cinzento;
- ✓ Ferro fundido nodular;
- ✓ Ferro fundido branco;
- ✓ Ferro fundido maleável;
- ✓ Ferro fundido vermicular.

Estas ligas podem ter como principais microconstituintes a ferrita, perlita, cementita, martensita (similar aos aços) e também, como destaque, a grafita (CHIAVERINI, 2012). A formação da grafita, em particular, é resultado da concentração de carbono na liga. Concentração, esta, maior do que solubilidade do elemento na austenita.

A grafita possui uma significativa influência nas propriedades mecânicas dos ferros fundidos, pois este microconstituente promove a descontinuidade da matriz do material. Sua morfologia e distribuição são afetadas principalmente pelo processo de fabricação (taxa de resfriamento, tratamento térmico) e pelos outros elementos presentes na liga (Mg, Si, S, P e Mn). (CHIAVERINI, 2012).

Durante o resfriamento do ferro fundido, observa-se a decomposição da cementita em ferrita e grafita. Quando a velocidade de resfriamento é alta há uma tendência que ocorra a inibição da decomposição o que acarreta em uma menor formação de grafita na matriz do material. Essa taxa de resfriamento é influenciada por fatores como: material do molde de fundição, e espessura da parede do fundido (COLPAERT, 1974).

No caso de um bloco de um MCI, especialmente na região do cilindro, esses fatores têm significativa influência. Conforme se observa na Figura 2 o bloco possui grandes variações na espessura do fundido, resultando em diferentes padrões de quantidade, morfologia e distribuição da grafita ao longo da peça. Paredes mais espessas tendem a uma maior formação de grafita (MOCELLIN, 2007; VALE, 2016).



**Figura 2 – Seção longitudinal na região do cilindro de um MCI.**

Fonte: Mocellin, 2007.

Devido ao fato dos ferros fundidos serem ligas complexas constituídas por diferentes elementos, é utilizado o conceito de carbono equivalente (CE), calculado segundo a Equação (1). Este método tem por objetivo considerar os efeitos de alguns elementos de liga na solubilidade do carbono no ferro fundido,

transformando-os em carbono equivalente, possibilitando assim a utilização do diagrama Ferro-Carbono para análises destas ligas.

$$CE = C + \frac{(Si+P)}{3} \quad (1)$$

Onde:

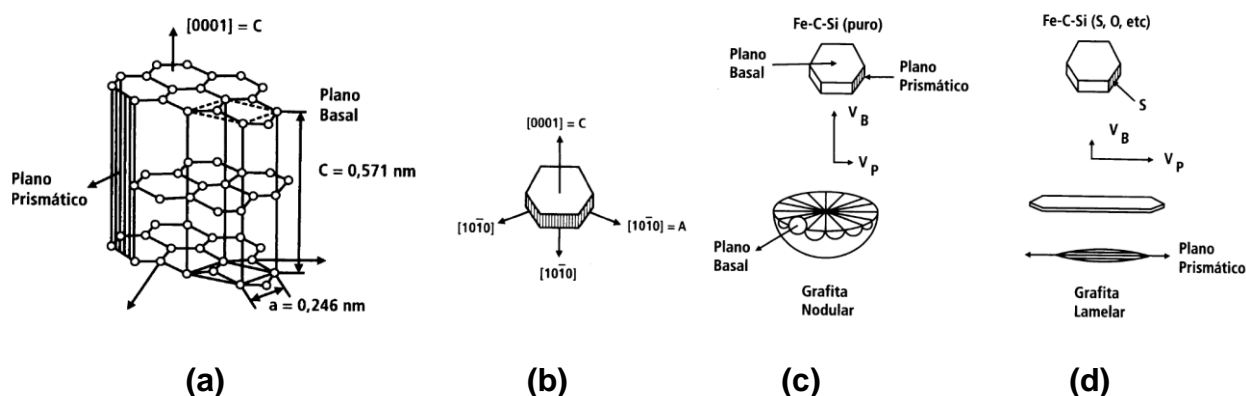
C: % em massa de carbono;

Si: % em massa de silício;

P: % em massa de fósforo.

A grafita é formada durante a solidificação da liga metálica a partir da precipitação do carbono na fase que está sofrendo a transformação. Este carbono é proveniente principalmente de dendritas de austenita que tem sua concentração de carbono diminuída durante o resfriamento (CHIAVERINI, 2012). Ela é composta de carbono e possui estrutura hexagonal, porém dependendo da direção do crescimento, pode possuir as formas nodular ou lamelar (GUESSER, 2009). De acordo com a Figura 3 é possível observar as direções preferenciais de crescimento da grafita.

Segundo Guesser (2009), para ligas puras de Fe-C a direção preferencial de crescimento é a basal devido à baixa energia interfacial com o líquido. Com a adição de elementos de liga, como enxofre e oxigênio, ocorre a diminuição da energia interfacial do plano prismático (valores de energia menores que do plano basal) o que favorece o surgimento de grafita lamelar.



**Figura 3 - Explicação para forma da grafita: (a) Estrutura hexagonal da grafita (b) Direções cristalográficas (c) Crescimento da grafita em nódulos – plano basal (b) Crescimento da grafita em veios - plano prismático.**

Fonte: Vale, 2016. (Adaptado de Guessser, 2007, Gruzleski, 2000 e McSwain; Bates, 1974).

É possível controlar a forma das grafitas através da inclusão de outros elementos de liga. O magnésio possui um grande poder dessulfurante e desoxidante, sendo assim utilizado para obtenção de grafitas com a forma nodular (GUESSER, 2009).

Durante a solidificação dos ferros fundidos também é possível que ocorra a formação de cementita ( $Fe_3C$ ). Assim como nos aços, este microconstituente de elevada dureza pode afetar significativamente a usinabilidade do material (GUESSER, 2009). Elevadas taxas de resfriamento e elementos de liga como o cromo, podem intensificar a formação desses carbonetos. A partir da adição de elementos inoculantes é possível favorecer a precipitação da grafita, aumentando o número de nódulos e evitando a formação de grafita de superresfriamento associada à matriz ferrítica com baixa resistência (GUESSER, 2009).

O superaquecimento do metal fundido também tem influência na formação da grafita. Temperaturas em torno de  $1500^{\circ}C$  a  $1700^{\circ}C$  diminuem a temperatura em que se inicia a grafitização, promovendo assim grafitas mais finas e menores (CHIAVERINI, 2012).

Por se tratar do principal constituinte do ferro fundido, a grafita é classificada segundo a norma ASTM nos seguintes tipos, como pode ser observado na Figura 4:

- ✓ A – Irregular desorientada;
- ✓ B – Em roseta;
- ✓ C – Desigual irregular;

- ✓ D – Interdendrítica desorientada;
- ✓ E – Interdendrítica orientada.



**Figura 4 - Exemplos dos tipos de grafita: Respectivamente (A), (B), (C), (D), (E).**

**Fonte: Adaptado de Colpaert, 1974.**

A classificação também é feita segundo o tamanho da grafita, sendo 1 para as de tamanhos maiores e 8 para as menores. Alguns exemplos estão mostrados na Figura 5.



**Figura 5 - Exemplos dos tamanhos de grafita em FOFO cinzento, respectivamente: (a) tamanho 1, (b) tamanho 3, (c) tamanho 8.**

**Fonte: Adaptado de Colpaert, 1974.**

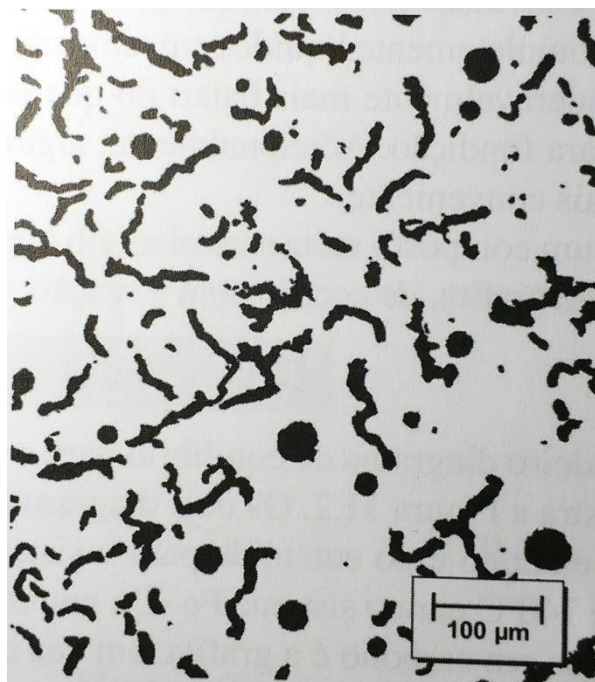
Na sequência é feita uma abordagem dos dois tipos de ferros fundidos que são objetos de discussão do presente trabalho.

### 2.1.1 Ferro fundido vermicular

Também conhecido como ferro fundido de grafita compactada (CHIAVERINI, 2012), esta liga recebe esta nomenclatura devido ao formato característico de suas grafitas, em forma de vermes (ou compacta). Segundo Callister (2007) esta liga possui teores de carbono de 3,1% a 4,0% e silício na faixa de 1,7% a 3,0%, sendo um material relativamente dúctil e maleável, dentre os ferros fundidos.

A grafita está distribuída em uma matriz que pode ser ferrítica ou perlítica. A formação da grafita está intimamente ligada às reações químicas complexas que envolvem aditivos e elementos de liga como o magnésio e cério (CALLISTER, 2007). A partir destes elementos de liga é possível prevenir a formação de flocos de grafita (com extremidade afiada e pontiaguda) e o surgimento da forma vermicular.

Na Figura 6 observa-se a forma característica da grafita dessa liga, mostrando a presença de alguns nódulos.



**Figura 6 - Microscopia óptica típica de ferro fundido vermicular.**  
Fonte: Callister, 2007.

Esta liga, que é relativamente nova em relação aos outros ferros fundidos, tem aplicações principalmente na fabricação de blocos de motores e coletores de escapamentos (GUESSER, 2009).

### 2.1.2 Ferro fundido cinzento

O nome “cinzento” se deve ao aspecto visual da fratura desse material. Esta liga é composta principalmente por grafitas em formas de veios que fornecem boa condutibilidade térmica que garantem uma boa resistência à fadiga térmica e amortecimento de vibrações. Dentre as principais utilizações destacam-se: blocos de motores, carcaças, tambores de freios e bases de máquinas (GUESSER, 2009). Isso se deve ao fato que essa liga possui uma boa fluidez na temperatura de fusão, o que permite seu vazamento em moldes de fundição que possuam uma geometria relativamente complexa (CALLISTER, 2007).

Nestas ligas, a concentração de carbono (em massa) está na faixa de 2,5% e 4,0% e o teor de silício de 1,0% a 3,0%. Quando submetidos à tração esse tipo de ferro fundido é relativamente pouco resistente. Isso se deve ao formato pontiagudo dos veios de grafita que funcionam como pontos concentradores de tensão (CALLISTER, 2007).

Na Figura 7 temos uma típica imagem de uma microscopia óptica do ferro fundido cinzento, na qual é possível observar a forma característica da grafita.



**Figura 7 – Microscopia óptica típica de ferro fundido cinzento.**

**Fonte: Callister, 2007.**

O ferro fundido cinzento é normalmente composto por uma matriz composta de perlita, mas que também pode ser ferrítica. Estes materiais apresentam

normalmente valores de resistência à tração que variam de 150 a 300 Mpa (GUESSER, 2009).

## 2.2 Brunimento

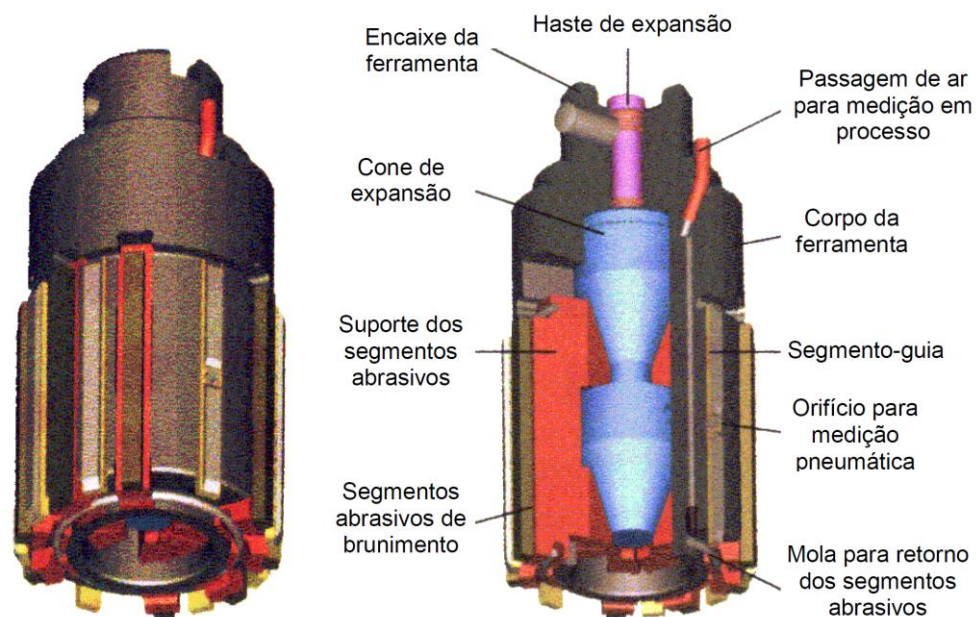
Nos componentes automotivos são utilizados diversos processos de fabricação. Quando se trata de blocos de motores, pode-se destacar o processo de brunimento que é definido como um processo de usinagem com ferramenta de geometria não definida (STEMMER, 2001).

O brunimento é um processo de usinagem na qual a remoção de material ocorre por meio do deslocamento relativo de partículas abrasivas e o material usinado. Como a velocidade de corte é relativamente baixa, da ordem de 60 m/min (VRAC *et al.*, 2012) comparada com outros processos, problemas relacionados ao aquecimento do material podem ser evitados, defeitos estes que são comuns em processos como a retificação, como o surgimento de trincas e alterações metalúrgicas (ASM Handbook, 1989).

O material abrasivo depende do material que está sendo usinado (STEMMER, 2001). Os materiais comumente utilizados são: óxido de alumínio, carboneto de silício, diamante e nitreto de boro cúbico (CBN), estes dois últimos conhecidos como superabrasivos. No caso de blocos de motores de FOFO é comum o uso de partículas de diamante (MOCELLIN, 2007) que proporciona uma boa durabilidade da ferramenta e um bom corte.

Estes grãos abrasivos estão unidos por um ligante, que pode ser metálico, cerâmico ou resinoide (STEMMER, 2001). Esse ligante permite que o abrasivo tenha uma sustentação e possa ser acoplado à ferramenta conforme se observa na Figura 8. Para abrasivos como diamante e CBN, comumente é utilizado ligantes de metal sinterizado como bronze e metais nobres (MOCELLIN, 2007; NAGEL, 1990).





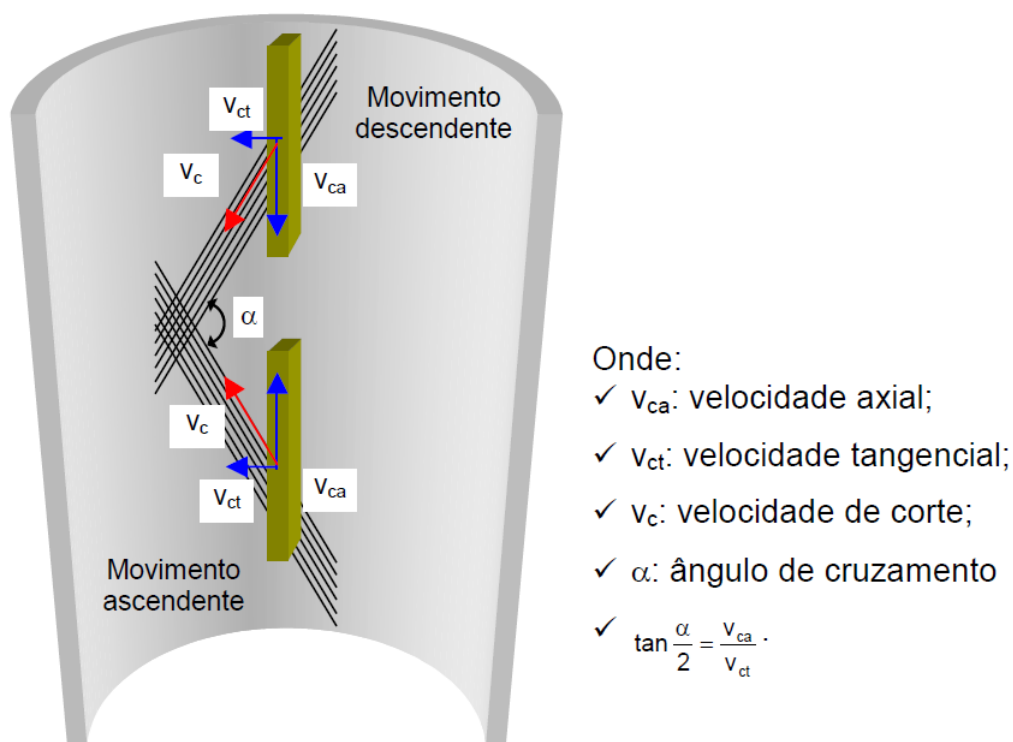
**Figura 8 - Representação esquemática de uma ferramenta de brunimento cilíndrico interno.**

Fonte: Mocellin, 2007 (WEIGMANN, 2005).

Este tipo de ferramenta funciona com dois movimentos principais: movimento rotativo e movimento axial (ao longo do eixo do cilindro). As pastilhas, ou pedras de brunimento, contam também com um movimento radial que compensa a remoção de material do furo e promove a pressão necessária para que ocorra o corte. Este sistema de expansão normalmente possui um acionamento pneumático ou hidráulico.

Tolerâncias dimensionais, de formas geométricas (cilindricidade, circularidade, conicidade) e acabamento superficial (rugosidade) normalmente estão presentes nos projetos de blocos de motores. Estas tolerâncias de fabricação usualmente são da ordem de alguns micrometros, porém através do processo de brunimento é possível alcançá-las. Superfícies obtidas por brunimento usualmente contam com rugosidade ( $R_a$ ) da ordem de 0,80 a 0,20  $\mu\text{m}$  (ASM Handbook, 1989).

Devido à dinâmica do processo, o brunimento tem um acabamento superficial característico, conforme observado na Figura 9.

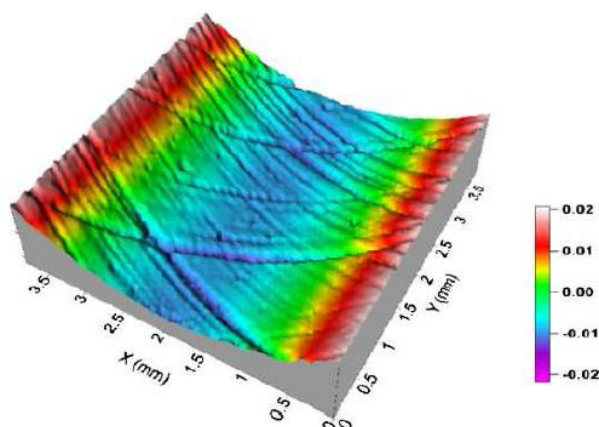


**Figura 9 – Esquema representativo dos movimentos da ferramenta de brunimento.**

Fonte: Mocellin, 2007 (Konig, 1989).

Este acabamento superficial é composto por sulcos em forma de “X” (sulcos cruzados) resultante dos movimentos da ferramenta, citados anteriormente. Estes sulcos são caracterizados por um ângulo de cruzamento ( $\alpha$ ) que é resultado das velocidades de rotação (tangencial) e axial (MOCELLIN, 2007).

Outra característica importante de uma superfície de um cilindro é o platô. Esse tipo de superfície obtida por um brunimento de platô tem direta relação com o consumo de óleo lubrificante do motor (MOCELLIN, 2007) e performance da interface tribológica cilindro-anel do pistão de um MCI (MEZGANI et. al., 2013). Uma típica representação de uma superfície de platô é mostrada na Figura 10.



**Figura 10 - Imagem de uma superfície de platô obtida por IDBL.  
Fonte: Adaptado de Sabeur et al. (2013).**

Os sulcos mostrados na Figura 10 são responsáveis pela retenção de óleo na parede do cilindro (PAWLUS *et al.*, 2014), o que garante uma boa lubrificação do par tribológico (CABANETTES *et al.*, 2014). Normalmente este tipo de superfície brunida é obtida através de três passes de remoção de material, que se inicia com uma remoção maior de material (pré-brunimento) para a correção de defeitos de processos anteriores, e por fim uma remoção pequena de sobre metal (brunimento final) (VRAC *et al.*, 2012) para atingir um nível de rugosidade adequado. Um exemplo de um perfil de rugosidade bidimensional durante as etapas de brunimento é mostrado na Figura 11.

<p>Brunimento de desbaste</p> <p><math>R_a=3,729\mu\text{m}</math>  <math>R_z=26,7\mu\text{m}</math>  <math>R_t=35,2\mu\text{m}</math></p>	
<p>Brunimento de base</p> <p><math>R_a=1,278\mu\text{m}</math>  <math>R_z=11,0\mu\text{m}</math>  <math>R_t=13,1\mu\text{m}</math></p>	
<p>Brunimento platô</p> <p><math>R_a=0,470\mu\text{m}</math>  <math>R_z=4,29\mu\text{m}</math>  <math>R_t=5,34\mu\text{m}</math></p>	

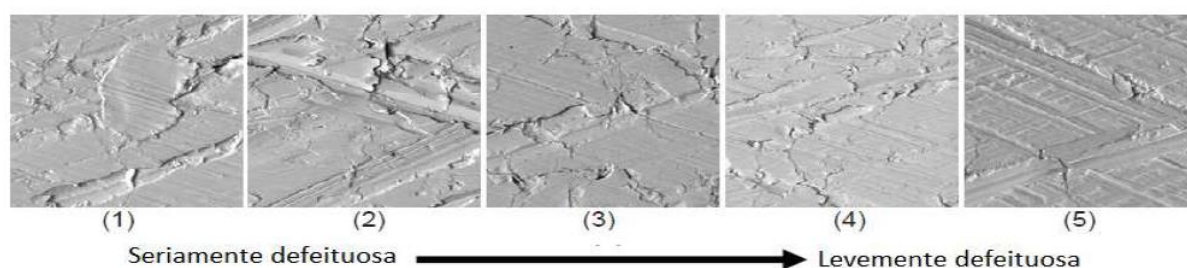
**Figura 11 – Perfil de rugosidade nas etapas de brunimento de cilindro de motor fabricado em ferro fundido vermicular.  
Fonte: Adaptado de Mocellin, 2007.**

### 2.2.1 Metal dobrado

O termo metal dobrado ou em inglês *folded metal* (FM), também conhecido como *blechmantel*, usualmente é citado quando são realizados estudos sobre superfícies brunidas. De acordo com Gupte (2011) este termo foi utilizado por Hesling em 1936, quando estudava o amaciamento destas superfícies. Em uma tradução livre podemos trata-lo como uma “cobertura de metal” que normalmente ocorre nos sulcos de superfícies brunidas na forma de uma dobra (TUNG e EMLEY, 2002).

Segundo Dimkovski (2012) esta porção de material dobrado pode ter significativa influência no funcionamento do conjunto cilindro – anel, pois pode interromper os sulcos característicos de uma superfície de platô, dificultando a lubrificação e causando aumento do desgaste da superfície do cilindro.

A formação desses defeitos é proveniente da deformação plástica causada pela ferramenta de corte. Partes de material que foram removidos previamente também podem ser empurrados para dentro dos sulcos (GRIFFITHS, 1986). Diante disso é necessário desenvolver técnicas que minimizem a formação de FM para conseguir melhor performance de cilindros de MCI (DIMKOVSKI, 2012). Na Figura 12 é mostrado exemplos de superfícies nas quais há presença de FM.



**Figura 12 – Imagens de superfícies brunidas com presença de diferentes níveis de FM obtidas por MEV.**

**Fonte: Adaptado de Wang e Leon, 2011.**

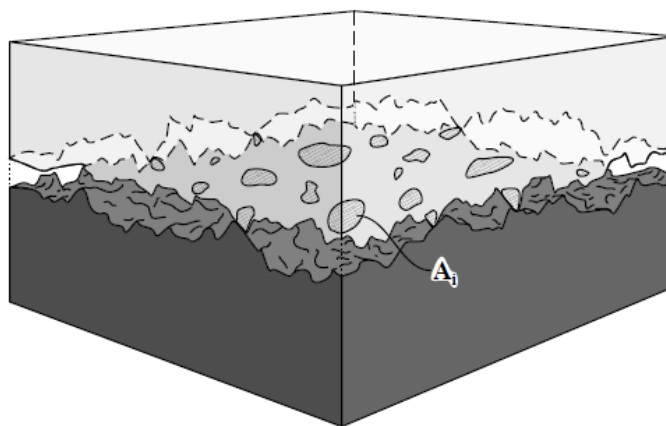
### 2.3 Fundamentos de tribologia

A tribologia é uma área que a tempos é de grande interesse de pesquisadores e engenheiros, porém só foi reconhecida como ciência em 1966 (JOST, 2006). Esta ciência está diretamente relacionada com outras áreas de conhecimento das quais podemos citar: física, química e a ciência dos materiais; ciência a qual tem por

objetivo estudar a interação entre as superfícies em contato (ABEL; FERRANTE, 2001). Em linhas gerais a tribologia tem a preocupação com três fatores que possui grande influência em componentes mecânicos, que são: desgaste, lubrificação e atrito. Na sequência é feita uma abordagem com foco no atrito, sendo assim necessária para a análise dos ensaios tribológicos.

### 2.3.1 Atrito

Comumente o atrito é definido como uma força de resistência quando um corpo desliza sobre outro (STACHOVIAK; BATCHELOR, 2001). Esta força de atrito, normalmente está relacionada com o carregamento normal entre as superfícies de contato e um coeficiente de atrito ( $\mu$ ). Do ponto de vista tribológico também existem outros fatores nesta força como, por exemplo, a velocidade de deslizamento e a área de contato real. Como se observa na Figura 13, a área de contato efetiva é menor do que a área de contato aparente. Esta área está intimamente ligada ao carregamento normal aplicado entre as partes e a topografia (asperezas) das superfícies (STACHOVIAK; BATCHELOR, 2001).



**Figura 13 – Ilustração da área de contato real entre sólidos.**

Fonte: Stachoviak e Batchelor (2001).

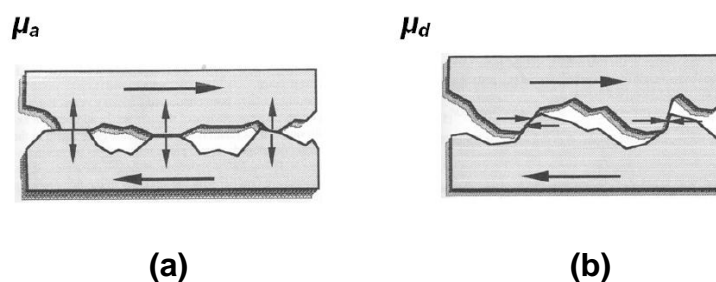
Carregamentos maiores causam uma maior deformação dos “picos topográficos” que estão em contato, possibilitando assim que a área de contato efetiva seja proporcional à força normal (STACHOVIAK; BATCHELOR, 2001).

As teorias que remetem a caracterização do coeficiente de atrito,  $\mu$ , tratam este parâmetro como a soma de duas componentes, das quais uma delas é representada por uma componente de adesão,  $\mu_a$ , e outra devido à deformação,  $\mu_d$ , presente no

contato deslizante (LUDEMA; TABOR, 1966). Este modelo de atrito é descrito pela Equação (2).

$$\mu = \mu_a + \mu_d \quad (2)$$

Uma ilustração destas componentes do atrito é mostrada na Figura 14.



**Figura 14 – Representação esquemática das componentes do atrito (a) adesão (b) deformação.**  
**Fonte: Vale, 2014 (Blau, 1996).**

A força de atrito devido à adesão normalmente está associada com ligações fracas secundárias como as de hidrogênio e de Van Der Waals (UNAL *et al.*, 2004). Um aumento da junção de contato nos metais está intimamente ligado à um incremento do coeficiente de atrito devido a esta parcela (HUTCHINGS, 1992).

Já a componente de deformação está fortemente correlacionada ao acabamento superficial, principalmente a rugosidade. Por melhor acabamento que as superfícies tenham, sempre existirão picos e vales que, no contato, irão promover esta resistência (STACHOVIK; BATCHELOR, 2001).

### 2.3.2 Desgaste abrasivo

O desgaste pode ser entendido como o dano que ocorre em superfícies em contato sujeitas a um movimento relativo, principalmente do que tange a remoção de material (STACHOVIK; BATCHELOR, 2001). São vários os mecanismos que promovem o desgaste de uma superfície: erosivo, por cavitação, adesivo, abrasivo, entre outros. Como o presente trabalho busca avaliar o comportamento do COF para ensaio de riscamento, cujo ensaio é descrito na seção 2.3.3, a discussão será estendida para o mecanismo de abrasão.

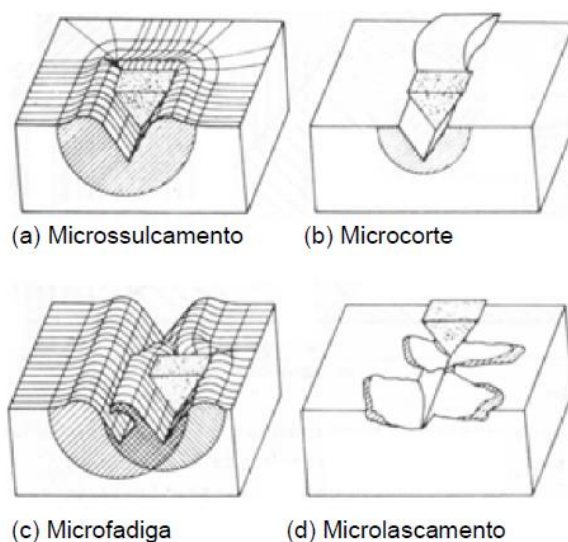
O desgaste por abrasão normalmente está presente quando partículas de maior ou igual dureza se deslocam sobre outra superfície mais mole (STACHOVIK;

BATCHELOR, 2001). Dentro desta interação existe uma tendência que o material mais duro remova partes do material com menor dureza.

O desgaste abrasivo normalmente é dividido na literatura em quatro tipos, sejam eles: microcorte, microsulcamento, microfadiga e microlascamento (ZUM-GAHR, 1987), os quais estão apresentados na Figura 15.

Em linhas gerais o microsulcamento é caracterizado por promover uma elevada área de deformação plástica do material formando, na borda dos sulcos, uma região conhecida como área de *pile up*. Este mecanismo é mais característico em materiais dúcteis e também tem influência da partícula abrasiva, seja uma aspereza do material ou a ponta de um identador (STACHOVIK; BATCHELOR, 2001).

Já no microcorte, a característica mais significativa é a existência de uma grande deformação, com conseqüente remoção do material por cisalhamento (com formação de cavaco). Assim, uma baixa formação de áreas de *pile up* é esperada. A deformação no material de base tende a ser menor que o do microsulcamento, como é possível visualizar na Figura 15 (b) em comparação com a 13(a).



**Figura 15 – Mecanismos de desgaste por abrasão. (a) Microsulcamento, (b) Microcorte, (c) Microfadiga e (d) Microlascamento.**

**Fonte: Do Vale, 2014 (Zhum-Gahr, 1987).**

A microfadiga é característica de sistemas tribológicos onde a partícula mais dura (abrasiva) passa repetidas vezes pelo material de sustentação causando assim um dano, conforme esquematizado na Figura 15 (c). Por fim no microlascamento,

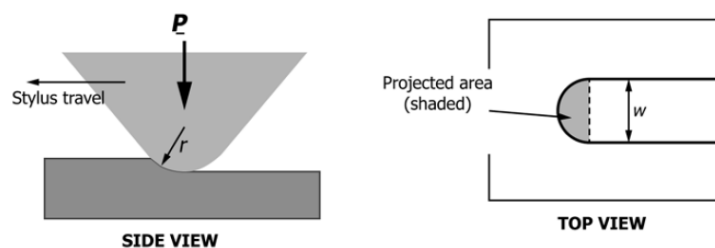
Figura 15 (d), a tendência é que ocorra uma remoção de uma partícula (ou grão) do material mais mole do par em contato (STACHOVIK; BATCHELOR, 2001).

### 2.3.3 Ensaio de riscamento

Uma das formas de realizar a quantificação do coeficiente de atrito cinético é através do ensaio de riscamento. Este ensaio é realizado através de um aparato de medição tribológica, no qual é possível controlar parâmetros como carregamento normal e velocidade de deslocamento do indentador. O aparelho, chamado de tribômetro, é capaz de determinar o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) através da razão entre a força de atrito ( $F_{at}$ ) e a força normal ( $F_N$ ) medidos através de célula de carga do aparelho, conforme definido pela Equação (3).

$$\mu = \frac{F_{at}}{F_N} \quad (3)$$

A norma ASTM G171 (2009) propõe uma metodologia para que seja realizado este teste a partir de um indentador de diamante com uma geometria conhecida. Esta geometria é definida como um cone com ângulo de  $120^\circ (\pm 5^\circ)$  e um raio na ponta de  $0,2 \text{ mm } (\pm 0,01 \text{ mm})$ , conforme esquematizado na Figura 16.



**Figura 16 – Representação esquemática do ensaio de riscamento.**

Fonte: ASTM, 2009.

O preparo das amostras para o ensaio também deve seguir alguns requisitos para que os resultados obtidos a partir do ensaio sejam confiáveis e possuam uma boa repetibilidade. As amostras devem apresentar uma rugosidade  $R_a$  da ordem de  $0,02$  a  $0,05 \mu\text{m}$ , acabamento este característico de uma superfície polida (ASTM G171, 2009). Segundo a norma, também é necessário que as amostras estejam limpas e livres de resíduos.

Quanto à ponta de prova para o riscamento, a norma recomenda que esta deva ser inspecionada e estar isenta de trincas e cavacos. Outra orientação da ASTM é



que as células de carga sejam regularmente calibradas e possuam um erro máximo de 1% do valor do carregamento normal.

## 2.4 Caracterização dos materiais realizada por Vale (2016)

### 2.4.1 Quantificações de grafita

A seguir são apresentados os resultados obtidos por Vale (2016), os quais são relevantes para este trabalho. Estes resultados mostrados nesta seção possibilitaram discussões nas seções finais deste trabalho, assim enriquecendo o entendimento dos fenômenos avaliados.

#### 2.4.1.1 Grafita

A Figura 17 mostra o resultado da quantificação da grafita, compilação de doze imagens, para as quatro amostras de FOFO. As amostras de FOFO são subclassificadas em parede grossa (PG) e parede fina (PF) de acordo com a espessura da parede do cilindro do MCI que foram removidas. Os resultados corroboram as informações presentes na literatura (GUESSER, 2009), de que as amostras submetidas a uma menor taxa de resfriamento (PG) tendem a apresentar uma maior formação de grafita em sua matriz. Também é possível constatar uma significativa redução no número de grafitas por milímetro quadrado para o material de FOFO vermicular em comparação ao cinzento.

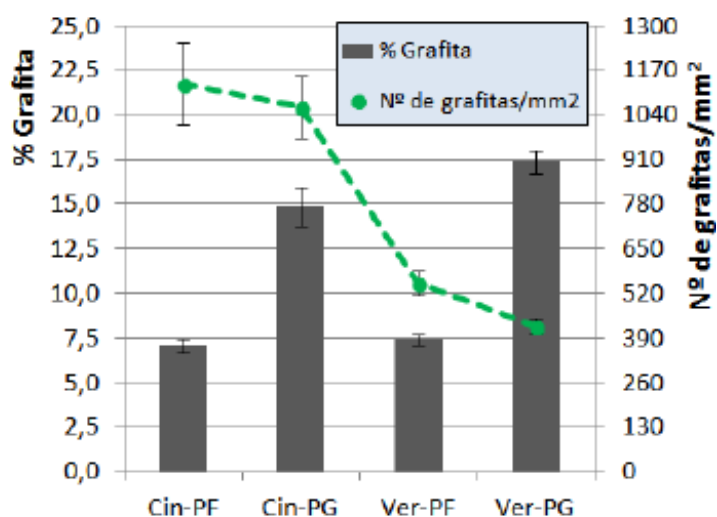
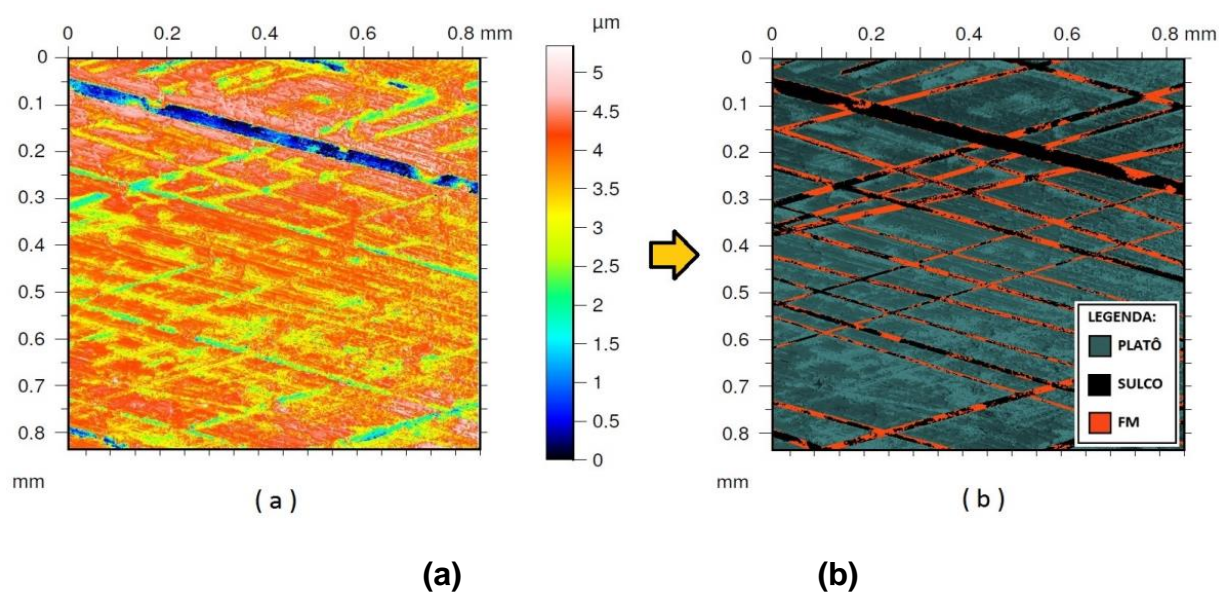


Figura 17 – Média do percentual de grafita e número de grafita nas amostras.

Fonte: Vale, 2016.

### 2.4.1.2 Quantificação da superfície brunida.

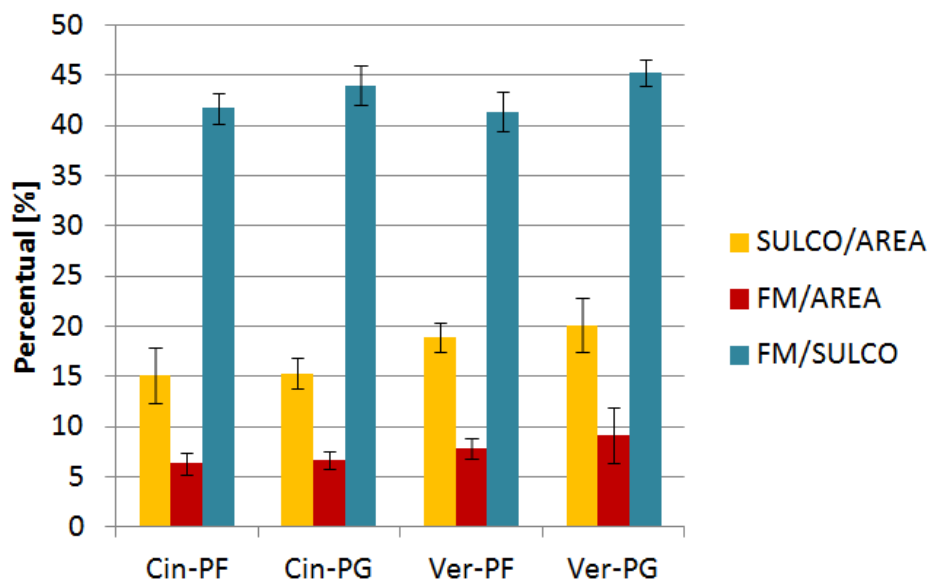
Utilizando técnicas de análise de imagens, Vale (2016) desenvolveu uma rotina em *MATLAB*®, baseando-se em procedimentos descritos por Dimkovski (2011), para quantificação das superfícies brunidas. A Figura 18(a) apresenta uma imagem obtida por interferometria de luz branca (IDBL), e a Figura 18(b) mostra o resultado da quantificação da rotina. Pode-se observar o Platô (em ciano) com os sulcos identificados (em preto). O metal dobrado é destacado em laranja e evidencia tendência de obstrução dos sulcos.



**Figura 18 – Topografia típica da superfície brunida: (a) Imagem obtida por Interferometria de luz branca (b) Quantificação de sulcos e metal dobrado por rotina em *MATLAB*®.**

**Fonte: Adaptado de Pretko *et al.*, 2015.**

Resultados da quantificação do percentual de sulco e de FM por área é apresentado na Figura 19. O autor destaca que o % de FM segue a tendência do % de sulcos. Ou seja, quanto mais sulco detectado pela rotina, maior é a região de amostragem para contar FM. Assim, impor a padronização de %FM/sulco foi realizado. Deste modo, o %FM/sulco são menores para as paredes finas, com valores estatisticamente iguais. Comparando as paredes grossas, o vermicular tem maior valor. Através de um teste de correlação entre %FM/sulco e %fração de grafita, foi constatado correlação positivamente forte, com coeficiente de correlação de 0,992.

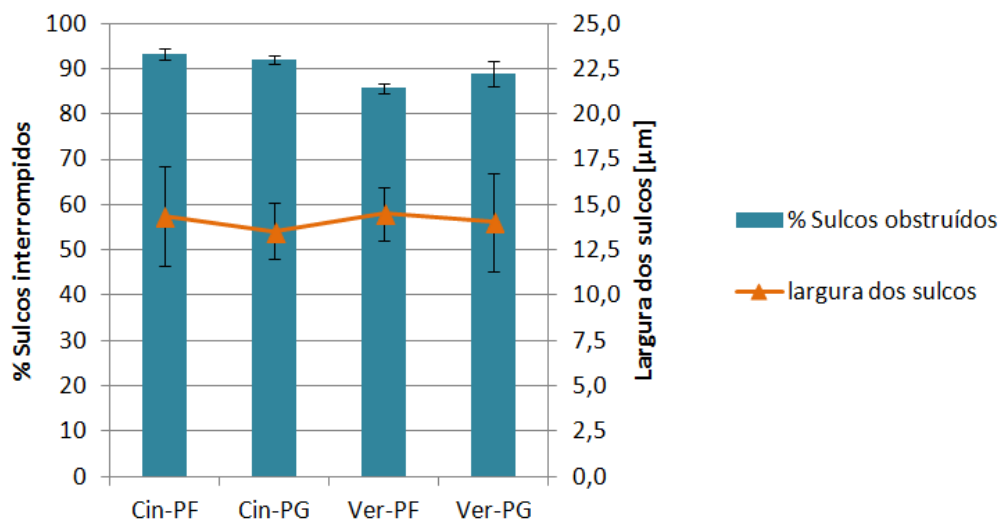


**Figura 19 – Quantificação de FM e sulcos nas amostras de FOFO.**  
**Fonte: Vale, 2016.**

Ainda, apresenta-se o resultado da largura e percentual de sulcos obstruídos na Figura 20. Conclui-se que as larguras dos sulcos de todas as amostras são estatisticamente iguais. O processo de brunimento, que neste caso foi realizado com pedras de diamante de D151 e D15 para desbaste e acabamento, respectivamente, não provocou mudanças significativas na largura dos sulcos de brunimento. Assim, houve iteração entre os abrasivos com geometria não definida e as matrizes dos materiais. Deste modo, a igualdade estatística de largura pode não representar corretamente a resposta do material ao processo de formação de sulcos.

Este resultado traz à tona a segunda oportunidade de estudo descrita neste trabalho, em que se busca avaliar a geração destes sulcos com ferramentas de geometria definida, eliminando assim a variação da geometria dos abrasivos.

Ainda, um interessante resultado obtido é o elevado percentual de sulcos interrompidos encontrados nos corpos de prova, com uma tendência de menor ocorrência para os ferros fundidos vermiculares.



**Figura 20 – Percentual de sulcos obstruídos e largura dos sulcos de amostras de ferro fundido vermicular e cinzento.**

**Fonte: Do Vale, 2016.**

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados para os ensaios foram amostras de ferro fundido obtidas a partir de blocos de motores de combustão interna (MCI). Para os ensaios tribológicos foi necessário realizar um projeto e fabricação de um dispositivo auxiliar para o tribômetro. Os ensaios de riscamento foram realizados a seco em superfícies com acabamento polido.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Corpo de prova

Para os estudos realizados foram utilizadas amostras de ferro fundido, as quais foram providas pela empresa Tupy S.A. Estas amostras são de blocos de MCI, modelo Ford Lion V8, cujos cilindros possuem diâmetro nominal de 83 mm. As amostras são de dois tipos de materiais: ferro fundido cinzento (FC 250) e ferro fundido vermicular (GJV 250) cujas propriedades mecânicas estão listadas na Tabela 1.

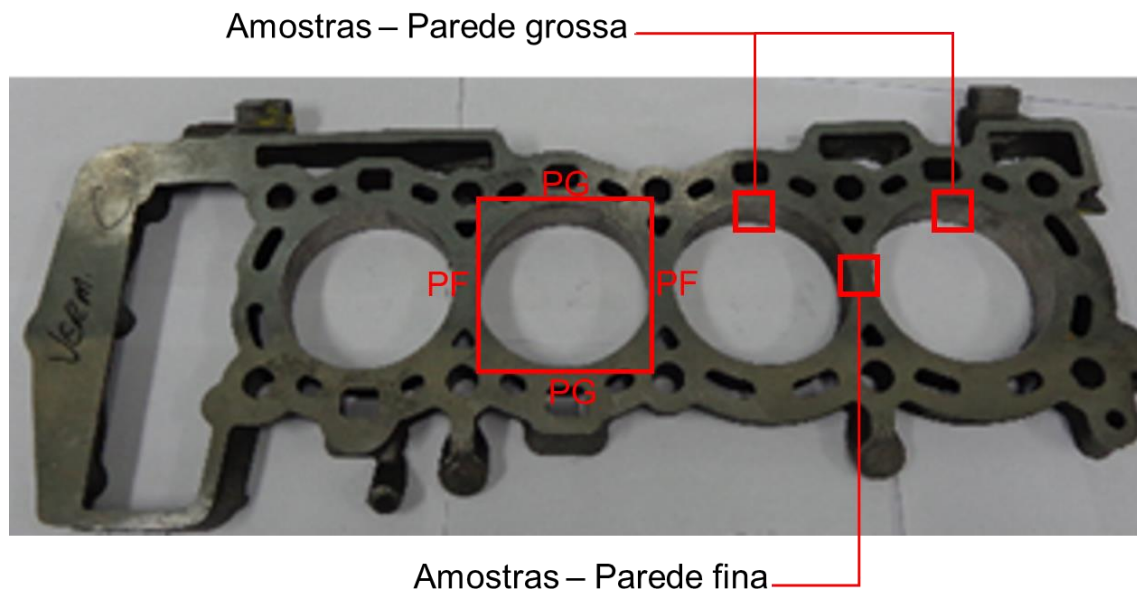
**Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos estudados**

<b>Propriedade mecânica</b>	<b>FC 250 (FFC)</b>	<b>GJV 450 (FFV)</b>
<b>Limite de resistência à tração [MPa]</b>	250 – 330 <sup>1</sup>	450 – 525 <sup>1</sup>
<b>Limite de escoamento [MPa]</b>	166 – 228 <sup>1</sup>	340 – 415 <sup>1</sup>
<b>Alongamento [%]</b>	0,3 – 0,8 <sup>1</sup>	1,0 – 2,5 <sup>1</sup>
<b>Módulo de elasticidade [GPa]</b>	103 – 118 <sup>1</sup>	135 – 145 <sup>1</sup>
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0,26 <sup>2</sup>	0,27 <sup>3</sup>

**Fonte:** Guessser<sup>1</sup> (2009); Lee<sup>2</sup> *et al.* (2010); Keller<sup>3</sup> *et al.* (2009).

Neste bloco de MCI, como o ilustrado na Figura 2, existem regiões com paredes de espessuras diferentes. De maneira que os quadrantes superior e inferior vistos na Figura 21 possuem paredes com espessuras maiores que aquelas dos quadrantes laterais. Portanto, a partir de duas seções (uma de FFC e uma de FFV) iguais a ilustrada na Figura 21, foram retiradas amostras dos quadrantes superiores e laterais, caracterizando corpos de prova de parede grossa (PG) e fina (PF), respectivamente. As amostras de parede grossa apresentaram espessura de 7,4 (±

0,4) mm, enquanto esta medida para as amostras de parede fina foi de 3,9 ( $\pm 0,6$ ) mm. A nomenclatura e quantidade de amostras estão listada no **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

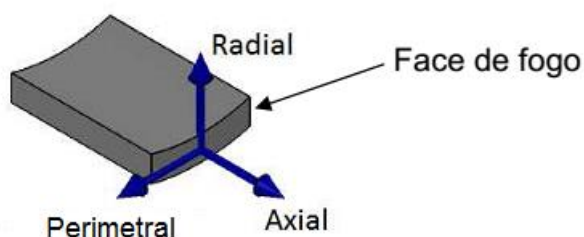


**Figura 21 - Localização das amostras retiradas no bloco do motor.**  
**Fonte: Adaptado de Tupy S.A.**

**Tabela 2 - Nomenclatura dos corpos de prova utilizados.**

<b>Material</b>	<b>Denominação</b>	<b>Quantidade</b>
FFC	Cin-PG	2
FFC	Cin-PF	2
FFV	Ver-PG	2
FFV	Ver-PF	2

Em seguida, as amostras foram embutidas obedecendo a um padrão de posicionamento pré-estabelecido. Tal processo teve como objetivo preservar o posicionamento do corpo de prova, identificando o sentido axial do cilindro mantendo como referência a face de fogo, ou seja, a superfície superior do bloco em contato com o cabeçote. Isso é importante para a correta avaliação das imagens e dos índices de anisotropia (Vale, 2016). O posicionamento descrito pode ser observado na Figura 22.

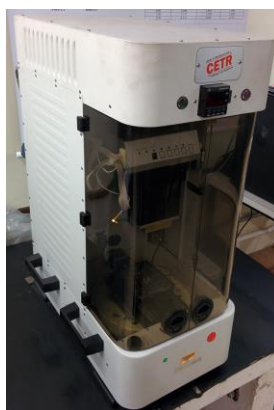


**Figura 22 - Esquema da orientação do corte e posicionamento das amostras de cilindro após embutimento.**

**Fonte: Vale (2016).**

### 3.2 Equipamento para ensaio tribológico

O ensaio de riscamento foi executado com o auxílio de equipamento disponível no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da UTFPR, o qual é apresentado na Figura 23; CETR-UMT- Bruker (*Center for Tribology Research – Universal Materials Tester*).



**Figura 23 – Aparato usado para realização dos ensaios tribológicos.**

Foi projetado um dispositivo para ser adaptado sobre a base de deslocamento linear do aparato para que houvesse fixação adequada dos corpos de prova, mantendo, assim, a consistência dos ensaios. O projeto e características de tal dispositivo estão descritos na seção 3.2.1. Optou-se pela utilização da célula de carga de 10 N, cuja carga efetiva máxima é de 8,5 N.

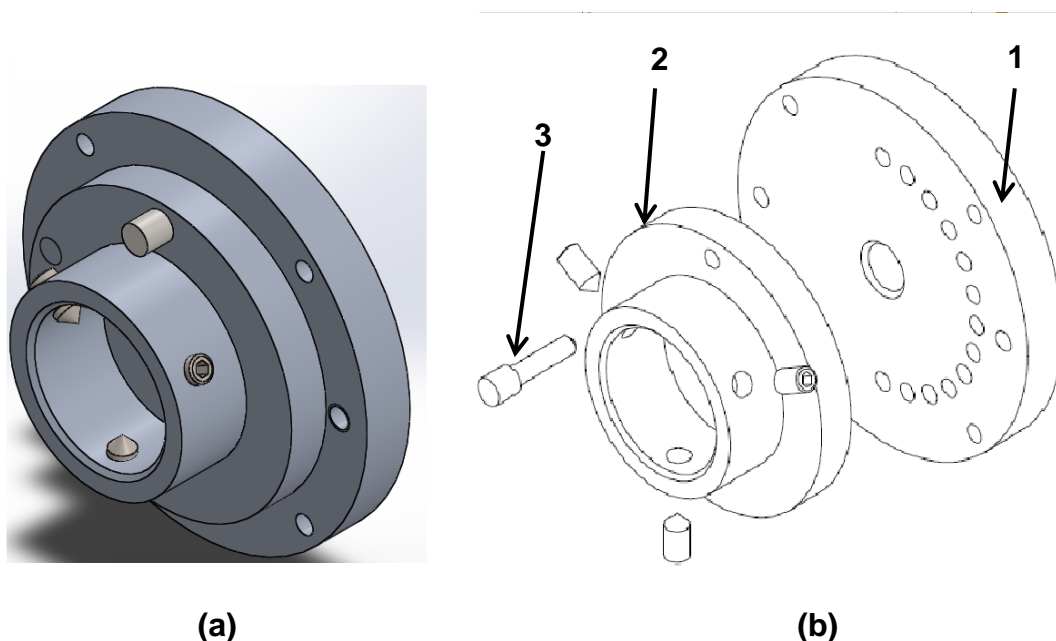
A frequência de aquisição de dados do equipamento é de 1 kHz. O intervalo de aquisição é, portanto, de 0,001 s. Os dados obtidos em cada instante de tempo são: tempo ( $t$  [s]), força normal ( $F_N$  [N]), força de atrito ( $F_{at}$  [N]), coeficiente de atrito

cinético ( $\mu$  [-]) e a posição da base ( $x$  [mm]). Para o cálculo do coeficiente de atrito cinético foi usado o modelo de Da Vinci, tal como na Equação (3), (p. 30).

Adotou-se dois tipos diferentes de indentadores para a realização do ensaio de riscamento: inserto de metal duro e penetrador Rockwell. O uso dos indentadores é descrito mais detalhadamente na seção 3.3.

### 3.2.1 Dispositivo para posicionamento da amostra

Para a realização dos ensaios de riscamento propostos no trabalho, se fez necessário a criação de um dispositivo que permitisse a fixação das amostras ao tribômetro. A ideia inicial partiu do princípio que era essencial controlar o ângulo de posicionamento dos corpos de prova no momento que estivessem sendo acoplados na base do tribômetro. Tal dispositivo, ilustrado na Figura 24, consiste de três componentes principais: base (1), porta amostra (2) e pino (3), que serão detalhados na sequência.



**Figura 24 – (a) Modelo esquemático 3D e (b) vista explodida do dispositivo para tribômetro.**

- ✓ Base: A base foi projetada com o conceito de que o conjunto pudesse ser fixado adequadamente na base do tribômetro, na qual já existe uma furação predeterminada. Nesta parte também estão dispostos os furos que permitem a localização dos ângulos para a realização dos ensaios. No total, a base possui treze furos que permitem o posicionamento da amostra em incrementos de  $15^\circ$ , numa faixa entre  $0$  e  $180^\circ$ . A precisão de posicionamento

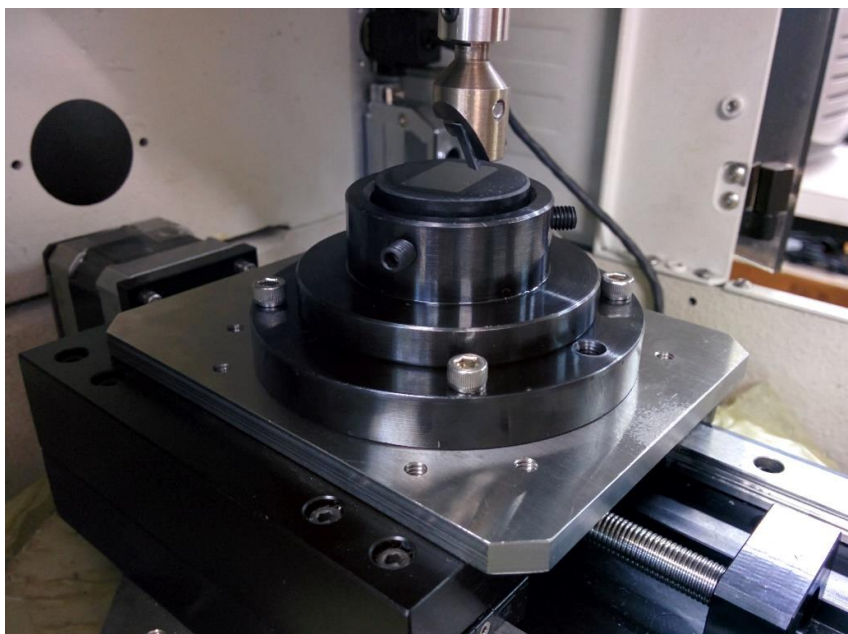


destes furos é de  $\pm 0,25^\circ$ . Estima-se que a precisão de posicionamento das amostras é de  $\pm 1^\circ$ , considerando a tolerância de fabricação e o posicionamento manual do corpo de prova no porta amostra.

- ✓ Porta amostra: Esta parte foi desenhada para que seja possível um fácil acoplamento do corpo de prova, embutido em baquelite com 30 mm de diâmetro, no tribômetro. Uma preocupação foi que a parte superior ficasse livre para permitir o deslocamento do porta ferramenta e identador.
- ✓ Pino: Permite selecionar de forma fácil os ângulos de posicionamento do corpo de prova.

Um ponto importante no projeto foi definir adequadamente as tolerâncias de fabricação para um bom funcionamento do conjunto sem folgas mecânicas excessivas, o que poderia acarretar desvios nos resultados das medições do tribômetro.

Todo o conjunto foi construído de aço ABNT 1020 e revestido superficialmente com oxidação negra para evitar oxidação. Detalhes da fabricação podem ser visualizados no projeto disponível no Anexo A. A Figura 25 mostra o dispositivo montado sobre a base do tribômetro durante um dos ensaios.

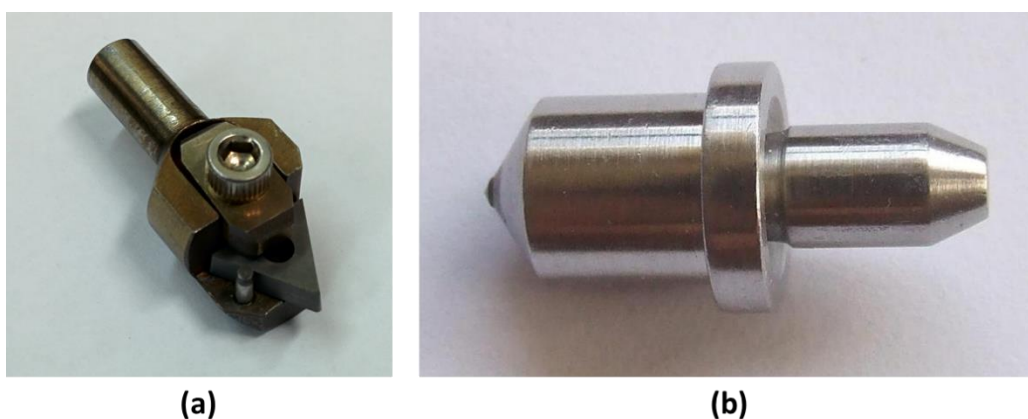


**Figura 25 – Dispositivo montado sobre a base do tribômetro**

### 3.3 Planejamento dos ensaios de riscamento preliminares

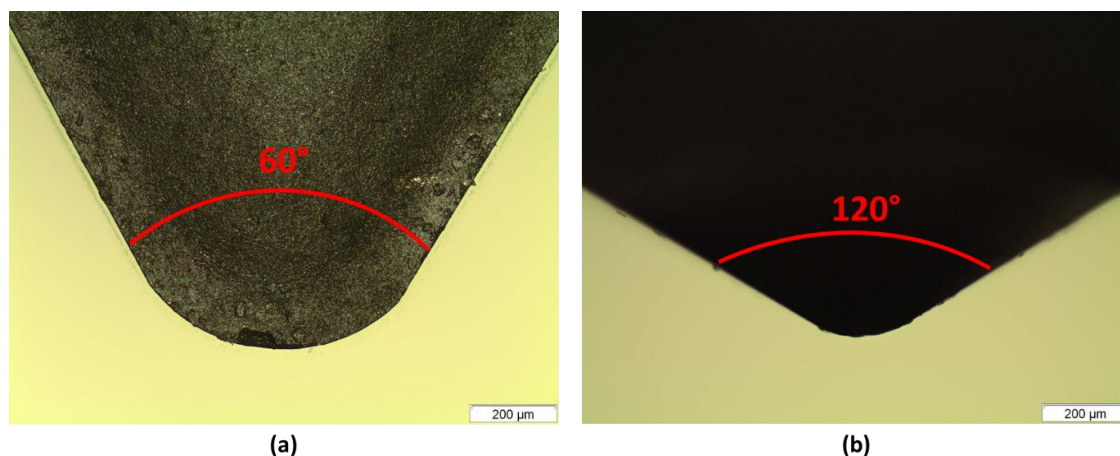
Inicialmente, optou-se por realizar estudos preliminares para estabelecer parâmetros que serviram de base para a definição dos ensaios de riscamento. Verificou-se a necessidade desta etapa devido às dúvidas na definição de condições de ensaio e tipo de riscador. Assim, duas amostras foram selecionadas arbitrariamente para tal análise: uma Cin-PG e uma Cin-PF.

Determinou-se que os ensaios preliminares seriam realizados com penetradores Rockwell e com ferramenta de usinagem. Tal escolha teve como objetivo verificar qual penetrador iria gerar melhores resultados. Arbitrou-se, que para estes ensaios, a amostra Cin-PG fosse utilizado o inserto de metal duro e, por conseguinte, para a amostra de Cin-PF o ensaio seria conduzido com o uso do penetrador Rockwell. Na Figura 26, observa-se, em detalhe, os penetradores utilizados para o ensaio de riscamento.



**Figura 26 – Detalhe dos penetradores utilizados: (a) Inserto de metal duro montado no porta ferramenta; (b) Identador Rockwell.**

A Figura 27 mostra, em detalhe, os penetradores utilizados. O ângulo da ponta da ferramenta é de  $60^\circ$  com um raio de 0,4 mm, enquanto do identador Rockwell é de  $120^\circ$  e raio 0,2 mm.



**Figura 27 – Detalhe dos penetradores: (a) Ferramenta; (b) Rockwell.**

Os parâmetros dos ensaios são apresentados na Tabela 3. A pré-carga para este ensaio foi selecionada como sendo 2 N. Os carregamentos utilizados foram: 0,6, 1, 2 e 4N, sendo o valor de 0,6 o menor valor possível para a célula de carga utilizada. A amostra foi posicionada à um ângulo de 15° em relação ao eixo axial (Figura 22) da amostra. O comprimento do risco e a velocidade de avanço da base foram definidos como 5 mm e 0,17 mm/s e constantes para todas as repetições. Foram realizadas, nestes ensaios, duas repetições.

**Tabela 3 – Lista de condições para ensaio preliminar de riscamento**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>			
	<i>Carga [N]</i>	0,6	1	2
<i>Pré-carga [N]</i>		2		
<i>Ângulo [ °]</i>		15		
<i>Comprimento do risco [mm]</i>		5		
<i>Velocidade de avanço [mm/s]</i>		0,17		
<i>Repetições [-]</i>		2		

A partir dos valores de COF obtidos nos ensaios, foi aplicada uma média móvel de nove pontos, a fim de filtrar os resultados e melhorar a análise destes.

### 3.3.1 Ensaios de riscamento

Após os ensaios preliminares, foram definidos os parâmetros para os ensaios de riscamento. A ferramenta utilizada no riscamento foi de metal duro, com geometria triangular e raio da ponta de 0,4 mm, a partir da qual foi usada uma aresta de corte diferente para cada amostra ensaiada. A pré-carga e a força normal para os

ensaios foram de 2 e 0,6 N, respectivamente. A amostra foi posicionada à um ângulo de 15° em relação ao eixo axial da amostra. O comprimento do risco e a velocidade de avanço foram definidos como 2,5 mm e 0,17 mm/s, respectivamente. Realizaram-se cinco repetições em cada amostra. O resumo dos parâmetros utilizados está listado na Tabela 4.

**Tabela 4 – Lista de condições para ensaios de riscamento**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
<i>Carga [N]</i>	0,6
<i>Pré-carga [N]</i>	2
<i>Ângulo [°]</i>	15
<i>Comprimento do risco [mm]</i>	2,5
<i>Velocidade de avanço [mm/s]</i>	0,17
<i>Repetições [-]</i>	5

### **3.4 Caracterizações**

#### **3.4.1 Metalografia**

Após o embutimento as amostras foram lixadas para a remoção da curvatura do cilindro e posteriormente polidas. Em seguida foram capturadas imagens, com e sem ataque, em microscópio óptico. Para o ataque foi utilizado reagente nital 2% durante 10 segundos.

#### **3.4.2 Macro dureza**

Para a medição da dureza foi utilizado o equipamento disponibilizado pela UTFPR. O durômetro foi parametrizado para realizar a medição de dureza Vickers HV20. Foram realizadas cinco medições em cada amostra para a obtenção do valor de dureza de cada uma.

#### **3.4.3 Microscopia eletrônica por varredura**

Realizaram-se avaliações de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em microscópio modelo EVO-MA15, da marca Zeiss, da UTFPR. As imagens foram capturadas sobre locais aleatórios ao longo da extensão dos riscos.

#### **3.4.4 Análise topográfica**

Para a análise topográfica da seção riscada da amostra foi utilizado o interferômetro de luz branca, modelo CCI Talysurf Lite, fabricado pela Taylor

Hobson, da UTFPR. A verificação topográfica foi realizada sobre um segmento aleatório de cada risco.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são apresentados tanto os ensaios preliminares realizados em um material, as caracterizações e bem como os ensaios definidos para a avaliação dos materiais. Os resultados dos ensaios de riscamento foram submetidos ao Congresso Nacional de Engenharia Mecânica de 2016 (CONEM 2016), que se encontra no Apêndice B.

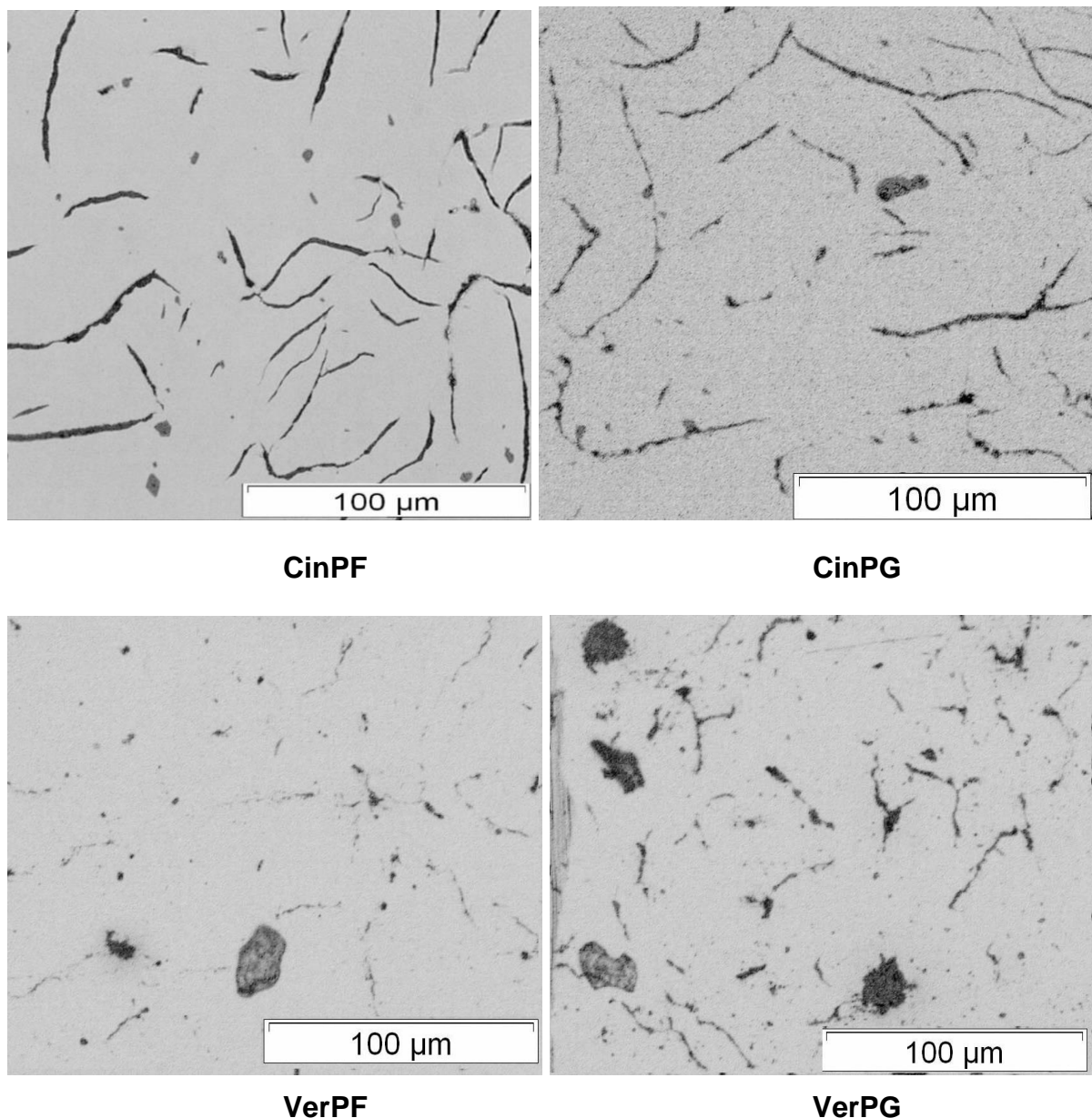
### **4.1 Caracterização dos materiais**

#### **4.1.1 Microestrutura**

Na Figura 28 estão apresentadas as imagens obtidas por metalografia sem ataque químico. Através da análise das imagens é possível identificar a grafita presente em cada material.

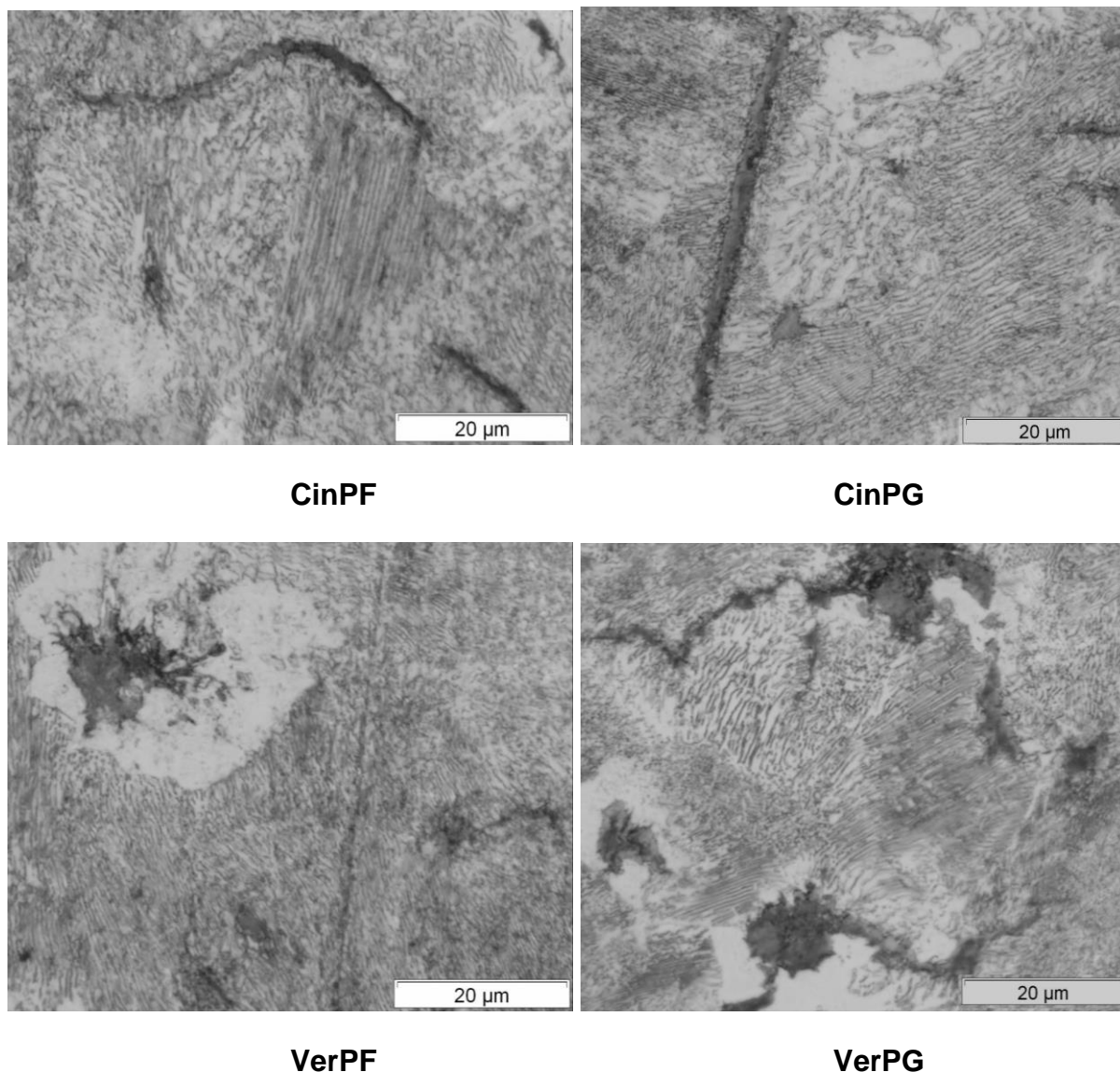
No caso do ferro fundido cinzento identificaram-se as lamelas de grafita pontiagudas características deste tipo de FOFO. Conforme é descrito na literatura (Guesser, 2009) também se nota o maior crescimento dos veios de grafita na amostra de parede grossa (CinPG), submetidas a uma menor taxa de resfriamento. Isso também corrobora os resultados apresentados por Vale (2016) de quantificação de grafita através das imagens.

No caso do ferro fundido vermicular, observou-se as grafitas em forma de vermes, de modo predominante, com alguns nódulos. Para a amostra de parede grossa deste material (VerPG) também se constatou um maior crescimento dos veios de grafita.



**Figura 28 – Imagens obtidas por microscopia óptica dos materiais sem ataque químico.**

Os resultados das imagens com ataque químico estão apresentados na Figura 29. Para os quatro materiais observou-se uma microestrutura em sua maioria constituída pela perlita com a presença de algumas áreas de maior concentração de ferrita. Conforme apresenta-se na literatura (GUESSER, 2009) estas regiões de ferrita podem estar presentes em torno dos nódulos de grafita. Esta característica é vista mais nitidamente para o ferro fundido vermicular (VerPF e VerPG). No caso do ferro fundido cinzento estas áreas de ferrita estão menos presentes, comparando-se ao vermicular.

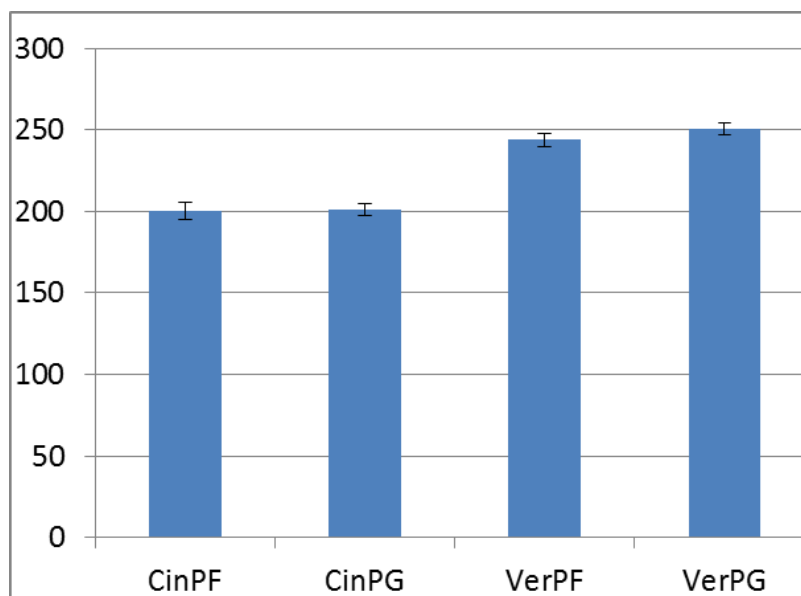


**Figura 29 - Imagens obtidas por microscopia óptica dos materiais com ataque químico de Nital.**

#### **4.1.2 Macro dureza**

A seguir são apresentados os resultados de dureza Vickers na Figura 30. Verifica-se que na média a dureza foi maior para o ferro fundido vermicular comparando-se ao cinzento. Não foi verificada alterações significativas deste parâmetro comparando-se as amostras de parede fina e parede grossa. Este maior valor de dureza para o ferro fundido vermicular está associado a um maior valor de resistência a tração do material, conforme a Tabela 1, e corroborando as informações presentes na literatura (GUESSER, 2009). A medição deste parâmetro neste trabalho possibilitou determinar uma correlação com o coeficiente de atrito, conforme é detalhado na seção 4.3.1.

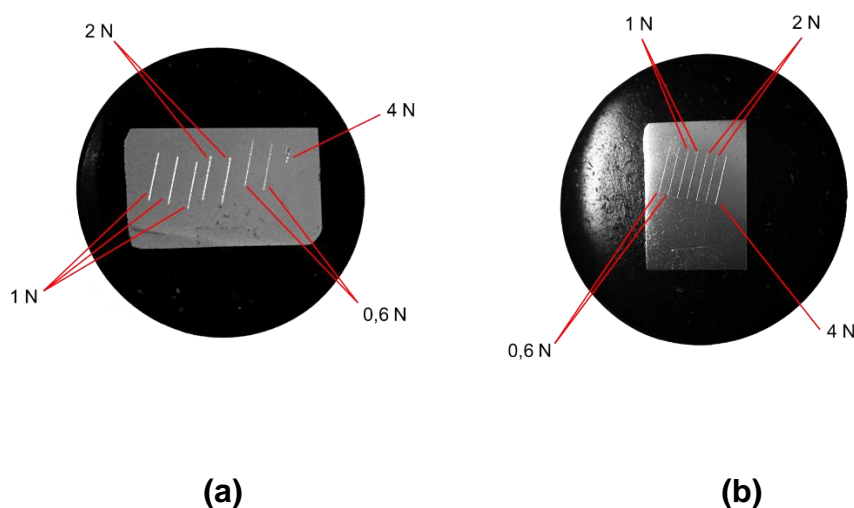




**Figura 30 – Resultados das medições de dureza Vickers para as quatro amostras com carga de 20 kgf.**

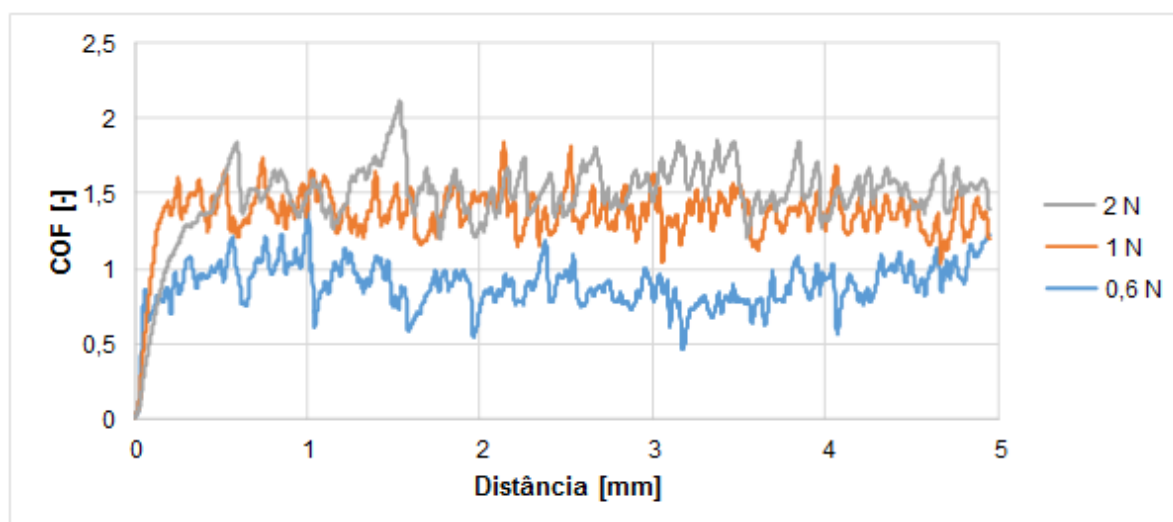
#### 4.2 Ensaios preliminares de riscamento

Durante a realização dos ensaios houve um problema com a condição da carga de 4 N e identador ferramenta. O equipamento acusou que o limite máximo da célula de carga foi atingido. Com isso testes com esta carga foram descartados. Posteriormente, no ensaio da amostra Cin-PF com uso do identador Rockwell, optou-se por realizar apenas uma repetição com a carga de 4 N. A Figura 31 ilustra a posição dos riscos com a respectiva carga em cada uma das amostras.

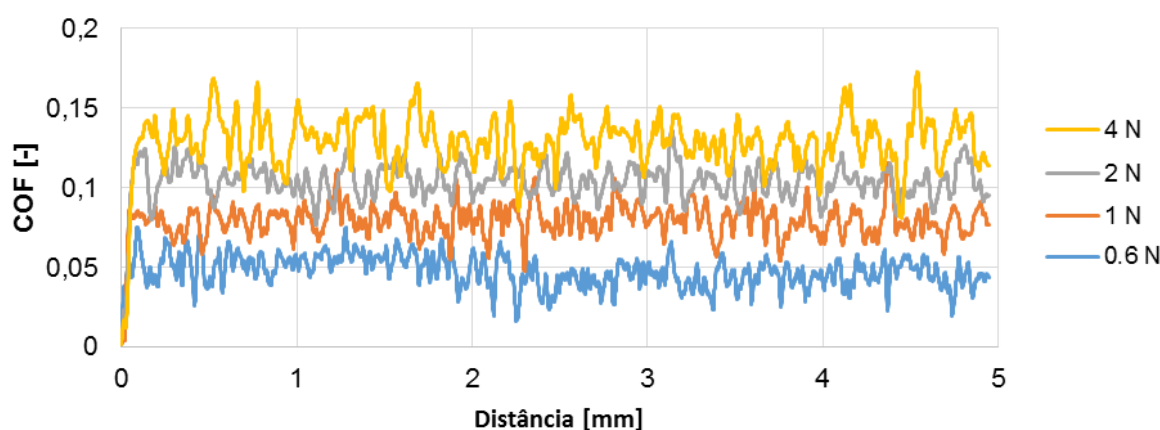


**Figura 31 – Posição dos riscos nas amostras: (a) Ferramenta - Cin-PG; (b) Identador Rockwell - Cin-PF.**

A Figura 32 apresenta o comportamento do COF em função da distância ao longo de cada risco feito com a ferramenta e identador Rockwell. Neste caso, preferiu-se não usar os valores obtidos no ensaio com carga de 4 N e ferramenta, pelo fato deste ter sido interrompido e, conseqüentemente, fornecer dados inconclusivos. Observa-se que após um período de crescimento, o coeficiente de atrito tende a oscilar em torno de um valor aproximadamente constante. A estabilização ocorre alguns décimos de milímetro após o início do risco. Além disso, nota-se que a distância de estabilização para o identador Rockwell (b) é mais rápida se comparada àquela da ferramenta (a), pois esta tende a uma maior penetração na peça, formando uma rampa de entrada no material.



(a)



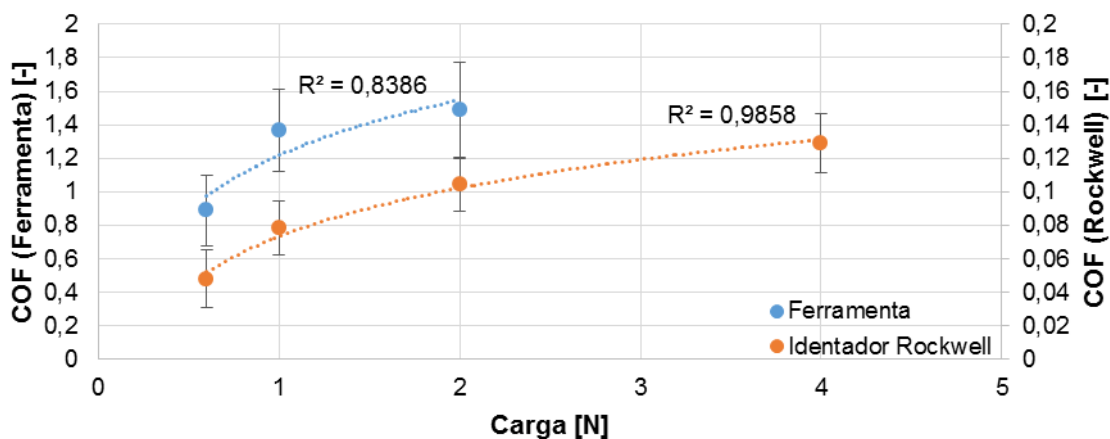
(b)

Figura 32 – Coeficiente de atrito em função da distância (CinPF): (a) Ferramenta; (b) Identador Rockwell.

Analisando a Figura 32 (b), correspondente ao ensaio com identador Rockwell, observam-se valores de COF muito abaixo daqueles encontrados no ensaio anterior (Figura 32 (a)). Acredita-se que tal diferença se deve ao fato dos penetradores proporcionarem mecanismos de desgaste diferentes. De forma que o uso de ferramenta promove remoção do material através de cisalhamento, ou seja, é efetuado um micro corte no corpo de prova, conforme o mecanismo mostrado na Figura 15 (b). Isto está associado a altos níveis de tensão e a uma parcela maior de deformação da Equação (2) do COF. Por outro lado, o uso do identador Rockwell provoca o microsulcamento da amostra, o que requer um menor esforço, mantendo o COF mais baixo.

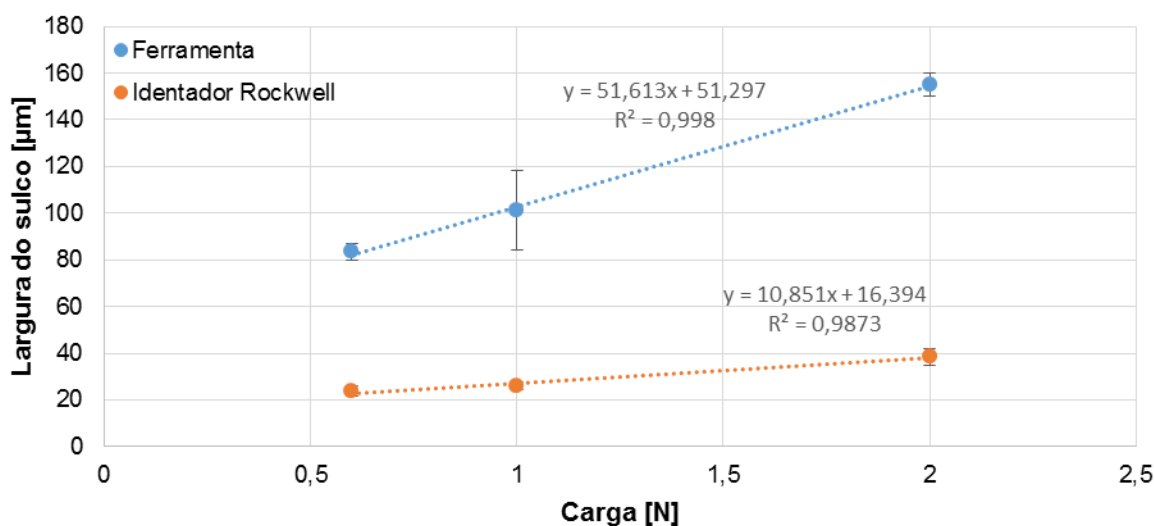
Apesar do microsulcamento implicar em um menor COF, ainda assim os valores encontrados estão abaixo do esperado. Uma explicação para este comportamento atípico pode ser a extrusão da grafita do material, formando um filme que atua como lubrificante sólido, diminuindo o atrito. Este mecanismo é tratado mais detalhadamente ainda nesta seção.

A Figura 33 compara o coeficiente de atrito médio para cada condição ensaiada. A partir destes valores, foram traçadas linhas de tendência logarítmica para cada um dos casos. Nota-se que para ambos os casos há um crescimento do COF em função da carga até um momento de estabilização, cuja condição foi experimentada para a ferramenta a partir de 1 N. Chama-se a atenção que a aproximação para a ferramenta tem menor representatividade (valor de R2 menor). Isso se deve, supostamente, ao fato de terem sido usados apenas três pontos ao invés de quatro. Apesar disso, esperava-se que o COF tendesse a estabilizar para carregamentos maiores, semelhante ao ensaio com identador Rockwell.

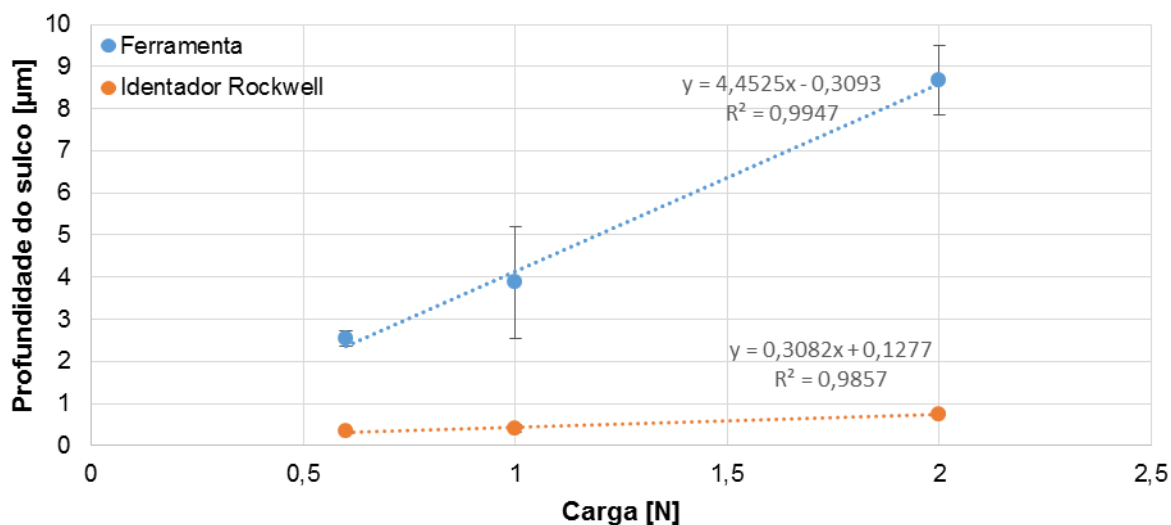


**Figura 33 - Tendência de variação do COF em função da carga.**

Os valores de largura e profundidade dos sulcos foram organizados conforme observado na Figura 34 (a) e (b), respectivamente. As dimensões do sulco feito com ferramenta têm crescimento mais acentuado se comparadas às dimensões da amostra na qual foi usado o identador Rockwell. Este fato pode ser percebido ao comparar os coeficientes angulares das linhas de tendência indicados nos respectivos gráficos. Ainda, chama-se a atenção para a alta representatividade da linha de tendência linear.



**(a) Largura média**



### (b) Profundidade média

Figura 34 – (a) Largura média; (b) Profundidade média dos sulcos.

No entanto, a razão largura-profundidade do sulco tende a diminuir conforme a carga aumenta, como ilustrado na Figura 35. Nota-se, também, que apesar das larguras e profundidades medidas para o identador Rockwell serem inferiores às daquelas dos sulcos feitos com a ferramenta, a razão destas é superior para as três cargas testadas com este penetrador.

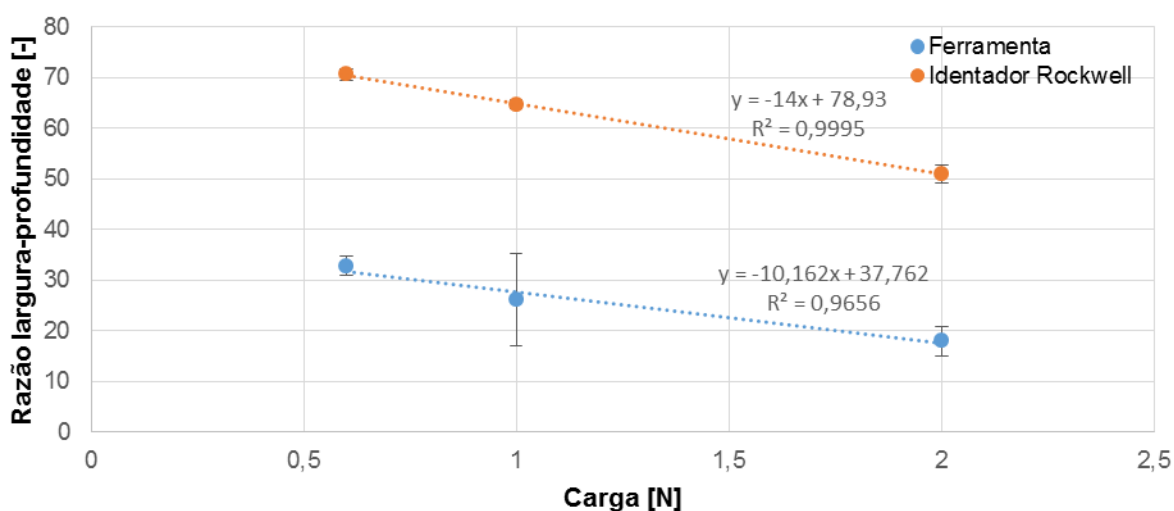
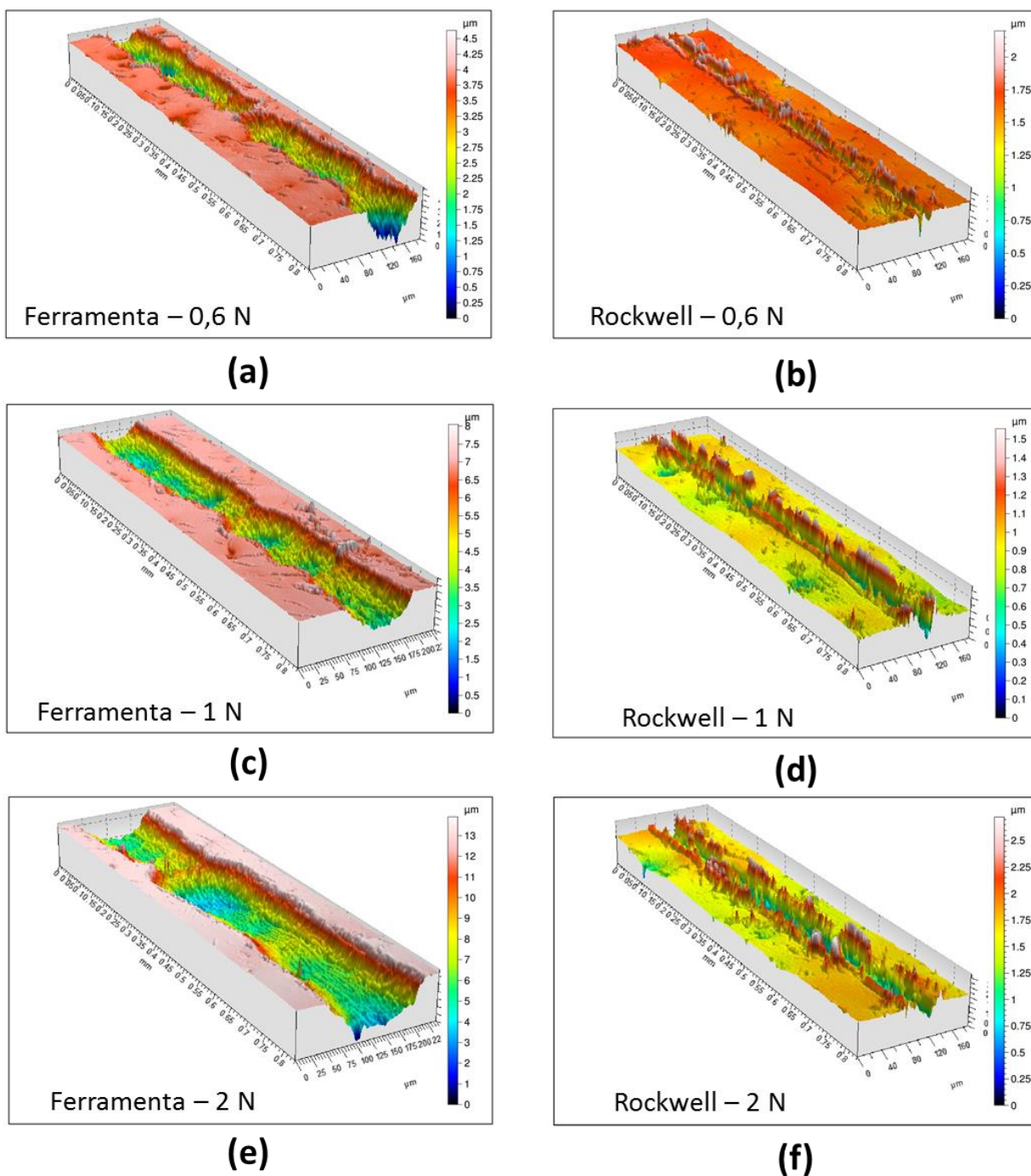


Figura 35 – Razão largura-profundidade para ambos os penetradores

Ainda, os coeficientes angulares das retas da Figura 35 são bastante próximos, -14 e -10, para o indentador Rockwell e para a ferramenta de corte, respectivamente. Ou seja, a carga tem uma menor influência na variação da razão largura-profundidade entre os ensaios. Portanto, a hipótese levantada é de que dois fatores podem estar relacionados a este fenômeno: recuperação elástica e geometria do penetrador. No entanto, após discussão, por hipótese, conclui-se que a primeira não é significativa neste caso.

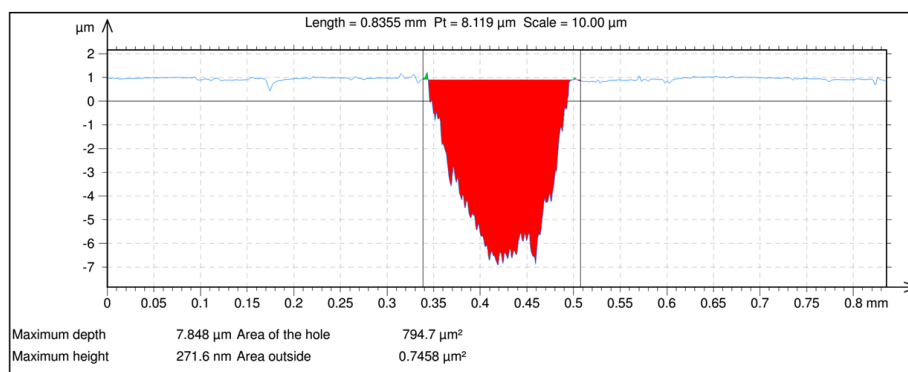
A partir disso, notou-se que o Rockwell possui uma razão largura-profundidade maior devido ao fato do ângulo da ponta do penetrador ser maior que o da ferramenta, como observado na Figura 27. Isso gera para o indentador uma menor profundidade de sulco se comparado à causada pela ferramenta.

Na Figura 36 é apresentada a topografia típica dos riscos nas amostras, obtidas por interferometria de luz branca (IDLB). Ao comparar as imagens, fica claro que existe uma maior formação de borda, ou *pile-up*, às margens do sulco quando foi usado o indentador Rockwell. Além disso, fica bastante claro que as dimensões do risco feito pela ferramenta são significativamente superiores.

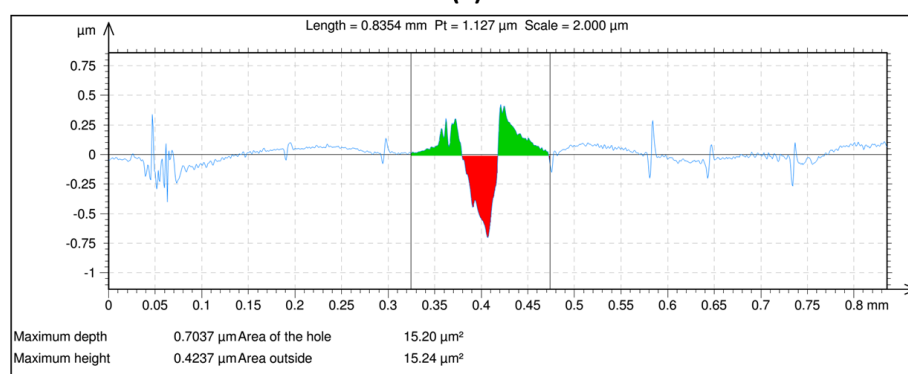


**Figura 36 – Topografia “3D” dos sulcos feitos com ferramenta e indentador Rockwell: (a) Ferramenta – 0,6 N (b) Rockwell – 0,6 N; (c) Ferramenta – 1 N (d) Rockwell – 1 N; (e) Ferramenta – 2 N (f) Rockwell – 2 N.**

Ainda através de IDLB, foi possível determinar o perfil de rugosidade da amostra, como o mostrado na Figura 37. Com isso, foram definidas características tais como a área do sulco (em vermelho) e a área externa, ou de *pile-up* (em verde). Observando tal figura pode-se corroborar a afirmativa de que a área de *pile-up* gerada pelo uso do indentador Rockwell é maior que a da ferramenta.



(a)

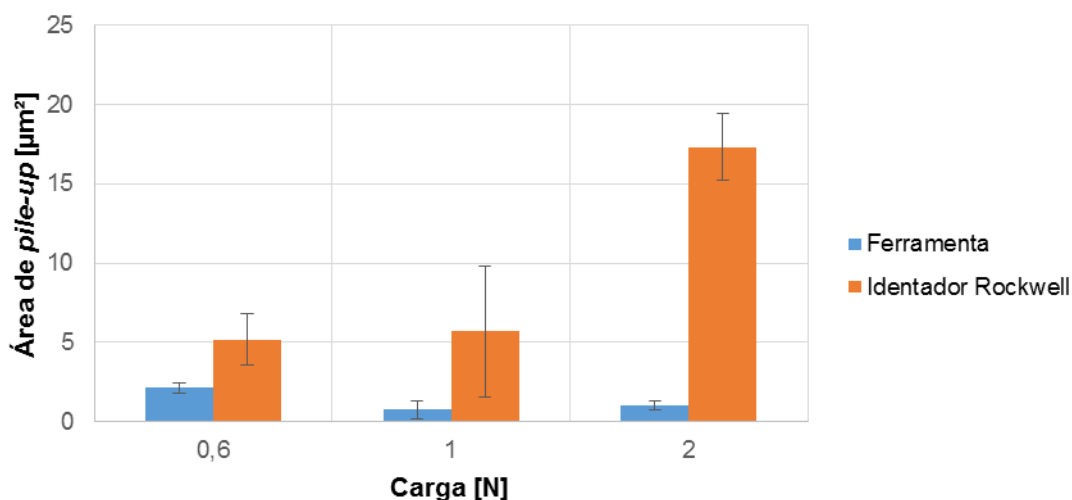


(b)

**Figura 37 – Perfil topográfico para ensaio com carga de 1 N: (a) Ferramenta; (b) Identador Rockwell.**

A partir dos valores da área de *pile-up* foi construído o gráfico da Figura 38 a fim de comparar ambos penetradores em relação a este fenômeno. É imediato ao analisar este gráfico que a área de *pile-up* para a ferramenta se manteve praticamente constante, independente da carga aplicada. Por outro lado, para o identador Rockwell, observa-se um aumento considerável de *pile-up* associado ao aumento da carga.





**Figura 38 – Comparação da área de *pile-up* por tipo de indentador em função da carga.**

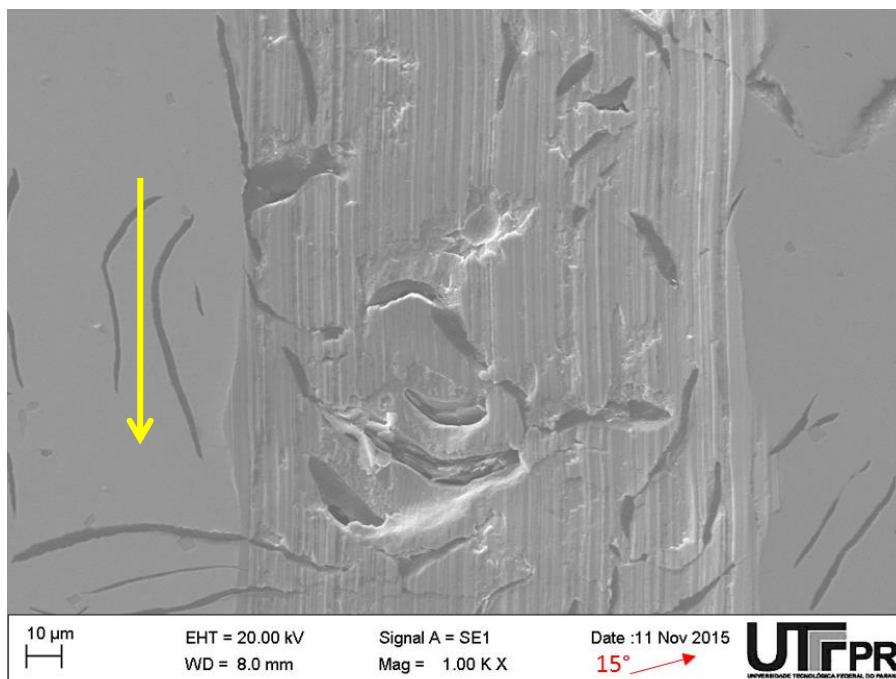
Ao analisar as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), observou-se alguns fenômenos que estão resumidos no Quadro 1 que serão tratados com mais detalhes ainda nesta seção.

<b><i>Fenômeno</i></b>	<b><i>Ensaio com ferramenta</i></b>	<b><i>Com indentador</i></b>	<b><i>Figura</i></b>
<i>Extrusão da grafita</i>	Não observado	Observado	47
<i>Microcorte</i>	Observado	Não observado	41 (a)
<i>Microsulcamento</i>	Não observado	Observado	41 (b)
<i>Formação de proa</i>	Observado	Não observado	44
<i>Metal dobrado</i>	Observado	Não observado	45

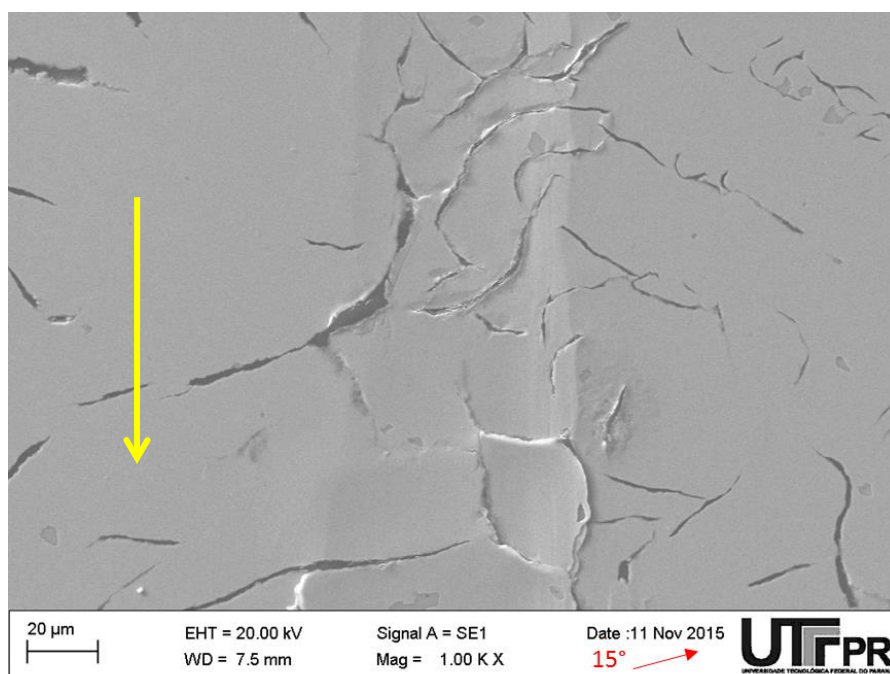
**Quadro 1 – Resumo dos fenômenos observados no riscamento.**

Na Figura 39 é apresentada uma comparação, dos riscos para ambos penetradores. A seta vermelha indica o sentido axial das amostras que, nos ensaios preliminares, está posicionada à um ângulo de 15° em relação à direção perimetral, enquanto a seta amarela indica a direção de deslocamento dos penetradores. Aparentemente, ao analisar a imagem (a), houve remoção significativa de material e aparecimento de marcas abrasivas dentro do sulco. Enquanto em (b) o sulco é muito mais sutil, não apresentando marcas de abrasão e conta com bordas menos definidas. Isso validada a hipótese que o uso de penetradores diferentes implicou

em mecanismos de desgaste diferentes. Pode-se também, relacionar esta imagem com aquelas da Figura 37, corroborando que a profundidade de (a) é superior à de (b).



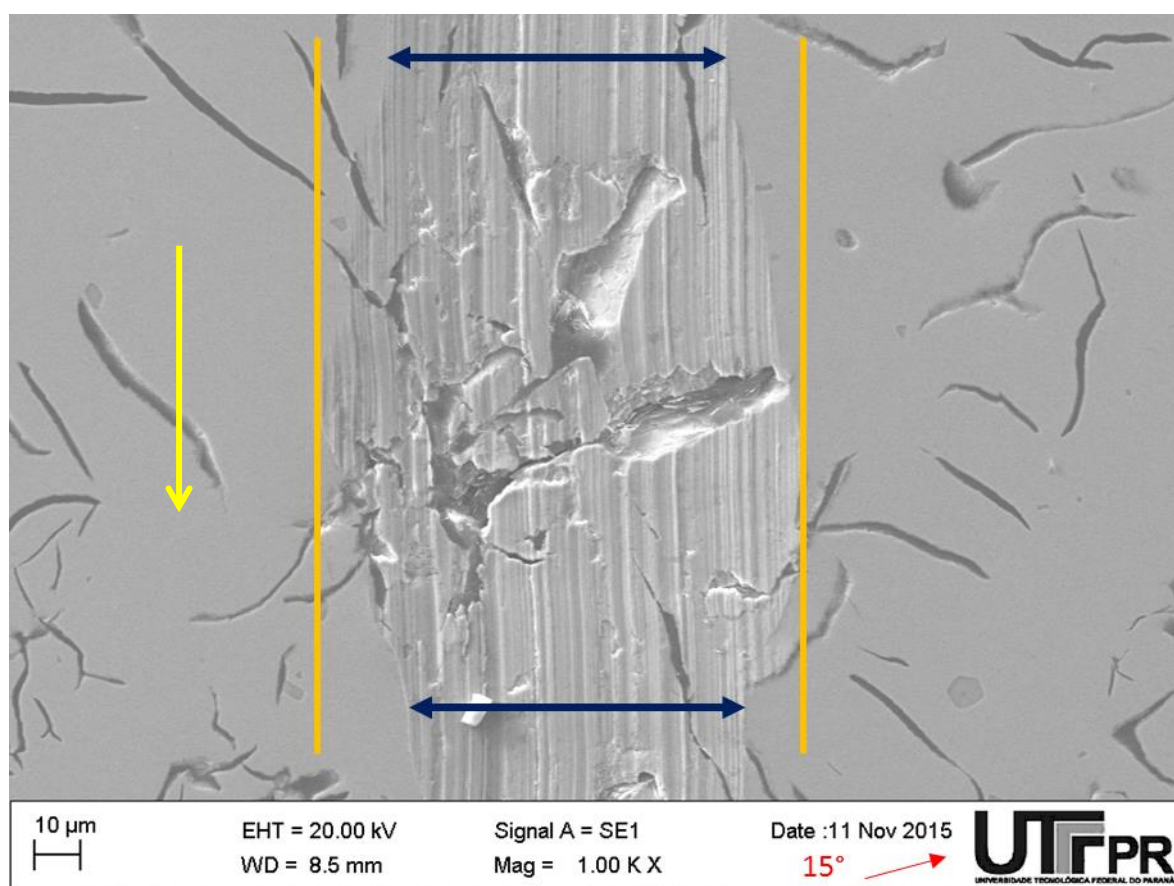
(a)



(b)

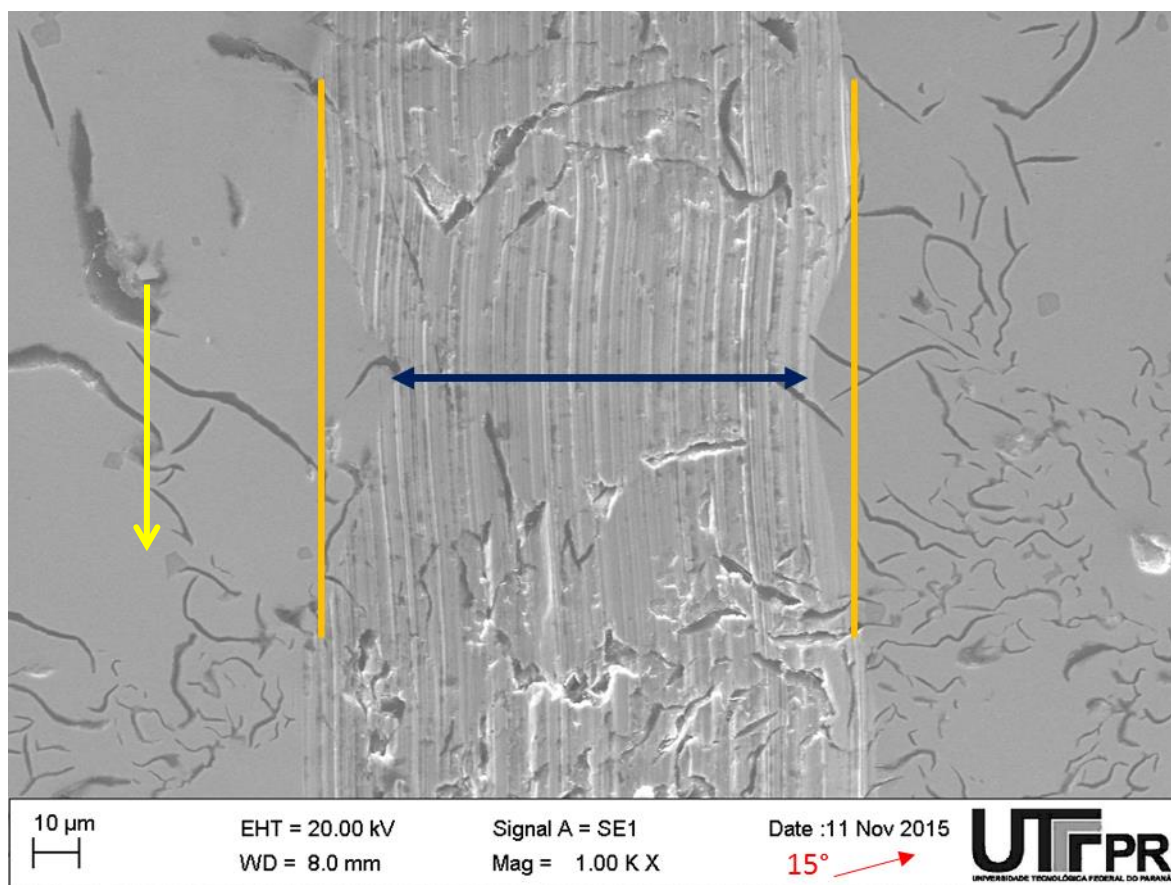
**Figura 39 – MEV típica de cada ensaio com carga de 2 N: (a) Ferramenta; (b) Identador Rockwell.**

Verifica-se na Figura 40 que, em alguns dos ensaios com ferramenta, existem partes ao longo do risco onde há variação na largura do sulco. Acredita-se que este fenômeno está relacionado à quantidade de grafita no caminho do penetrador. Ou seja, regiões com maior concentração de grafita, que oferece menor resistência, tendem a permitir que o indentador penetre mais na amostra aumentando a largura do sulco. Neste caso, observa-se que a ferramenta gerava um sulco de certa largura (seta azul) e, ao passar por uma região com uma quantidade maior de grafita, a largura do risco aumentou (linhas amarelas). Ao sair desta região, a largura do sulco retornou para um valor aproximadamente igual ao anterior, pois a ferramenta atingiu uma região de maior rigidez.



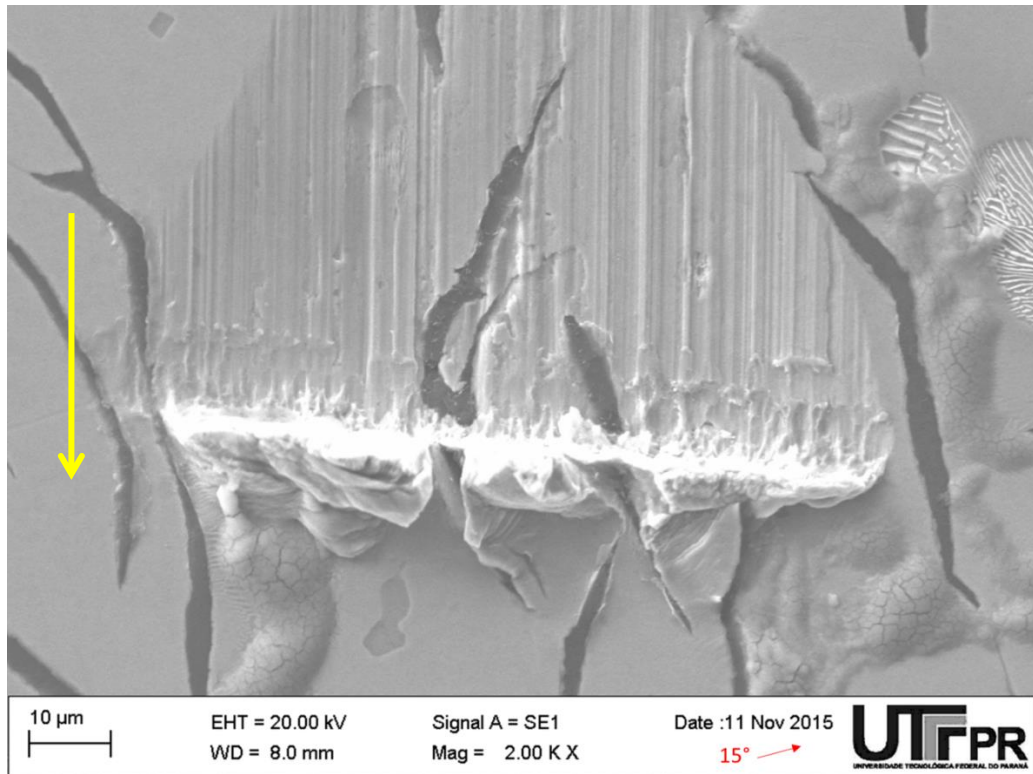
**Figura 40 – Aumento da largura do risco com ferramenta**

O contrário deste fenômeno também foi observado. A Figura 41 mostra que o risco tinha certa largura e, quando a ferramenta cruzou uma região na qual existia baixa quantidade de grafita, a largura do risco diminuiu devido à maior resistência oferecida pelo material. Este fenômeno não foi percebido nos ensaios com indentador Rockwell devido à dificuldade de identificação das bordas dos sulcos.



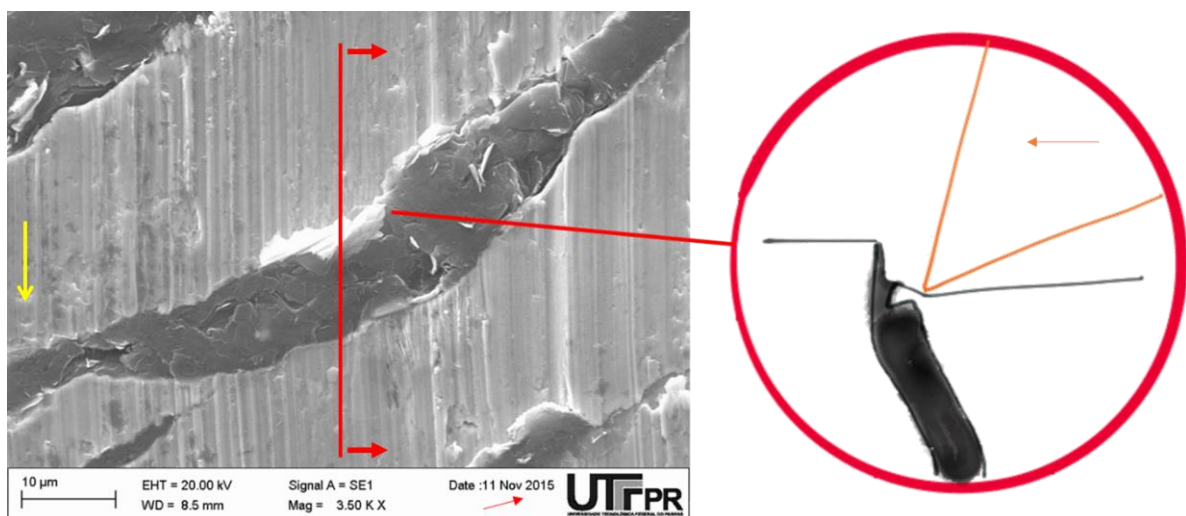
**Figura 41 – Diminuição da largura do risco com ferramenta**

A Figura 42 mostra a formação de proa ao final do risco com o uso de ferramenta. Esta ilustração deixa bastante clara a deformação gerada pela ferramenta durante a passagem e consolida os motivos pelo qual o coeficiente de atrito para este caso é mais elevado.



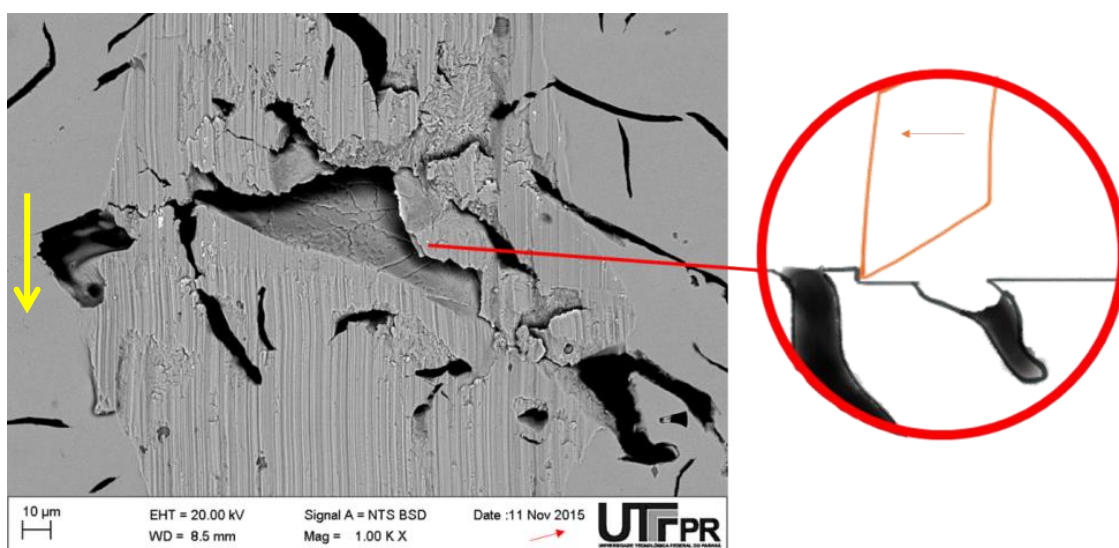
**Figura 42 – Formação de proa com o uso de ferramenta**

Um efeito interessante foi observado nos contornos da grafita. O microconstituente (descontinuidade) não oferece resistência suficiente para que ocorresse o corte do material. A partir disso é esquematizado na Figura 43 o fenômeno de dobramento da borda, similar ao metal dobrado.



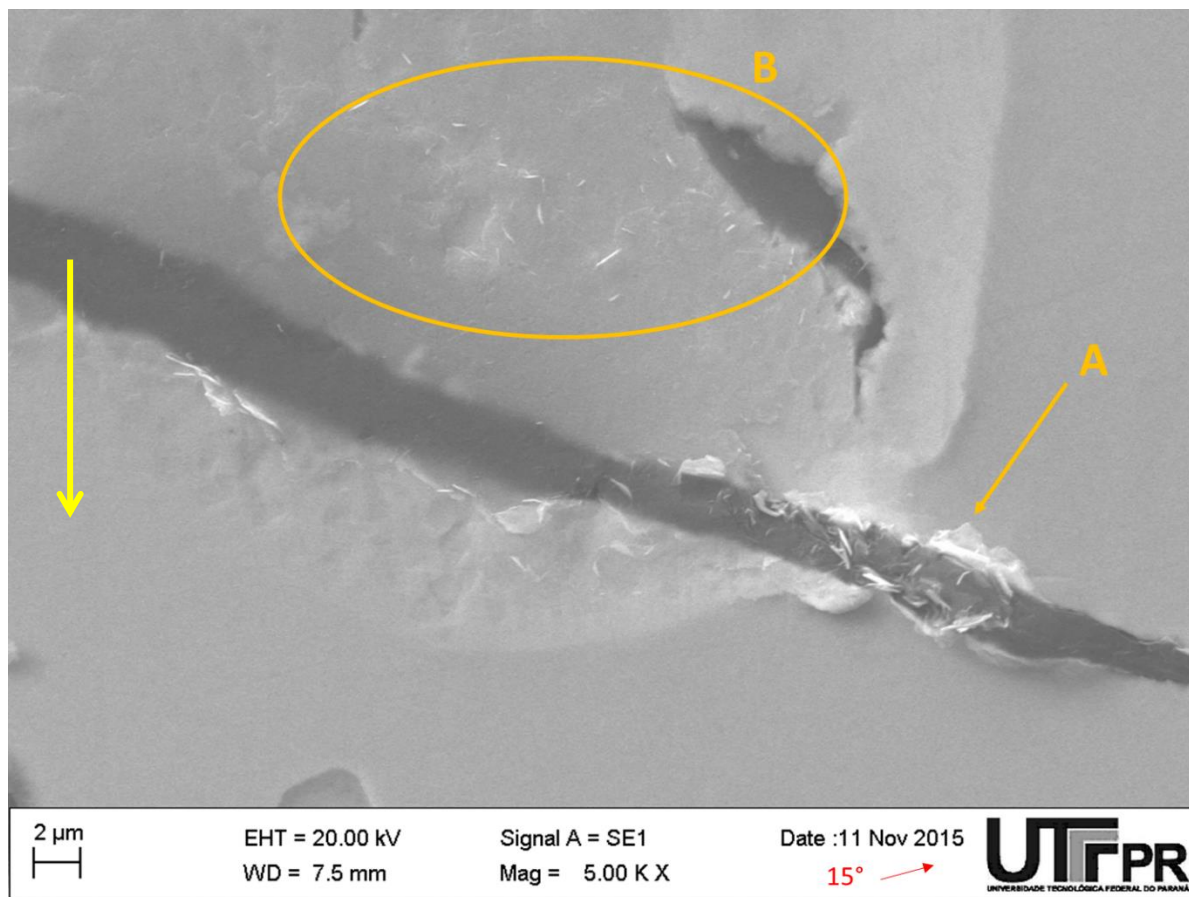
**Figura 43 – Formação de metal dobrado na amostra Cin-PG e carga de 1 N com ferramenta.**

Outro fato evidenciado foi o arrancamento de grafita durante a passagem da ferramenta conforme é observado na Figura 44. Isso pode estar relacionado ao nível de carregamento normal e geometria da ferramenta. O posicionamento da grafita em relação à superfície também pode facilitar seu arrancamento. Como evidenciado na imagem e ilustrado no detalhe a grafita tende a ser arrancada quando está inclinada em relação a superfície.



**Figura 44 – Arrancamento de grafita no ensaio com ferramenta e carga de 2 N.**

Observa-se na Figura 45 que o deslocamento do indentador e a deformação causada por este, propiciaram a expulsão de grafita do material. No detalhe A da figura, percebe-se a existência de grafita sendo expulsa à frente do indentador, enquanto no detalhe B estão destacadas partículas de grafita espalhadas sobre o caminho que o penetrador percorreu. Tal fenômeno pode estar associado aos baixos valores do COF para o uso do indentador Rockwell evidenciados na Figura 32 (b). Desta forma, a grafita estaria agindo como um lubrificante sólido entre o material e o indentador.



**Figura 45 – Expulsão de grafita com o uso do indentador Rockwell e carga de 1 N.**

Além disso, percebe-se que esta figura representa o final de um risco, assim como a Figura 42, mas dessa vez para o indentador Rockwell. Está claro que não há formação de proa ao término do ensaio, novamente, diferenciando os mecanismos de desgaste para diferentes penetradores.

Em virtude destes resultados preliminares, optou-se por realizar o sulcamento das amostras utilizando a ferramenta de corte ao invés do indentador Rockwell. Isso pois o sulco gerado pela ferramenta é característico de um processo de corte semelhante ao brunimento. Quanto aos parâmetros utilizados no tribômetro escolheu-se a carga de 0,6 N para os ensaios finais. Apesar da largura do sulco ser maior que um sulco de brunimento para título de comparação entre as amostras esta escolha se mostrou satisfatória. Como 0,6 N é a menor carga possível de ser utilizada no tribômetro e com as ferramentas disponíveis para o ensaio, foi a condição mais próxima de um sulco de brunimento que conseguimos alcançar neste trabalho.

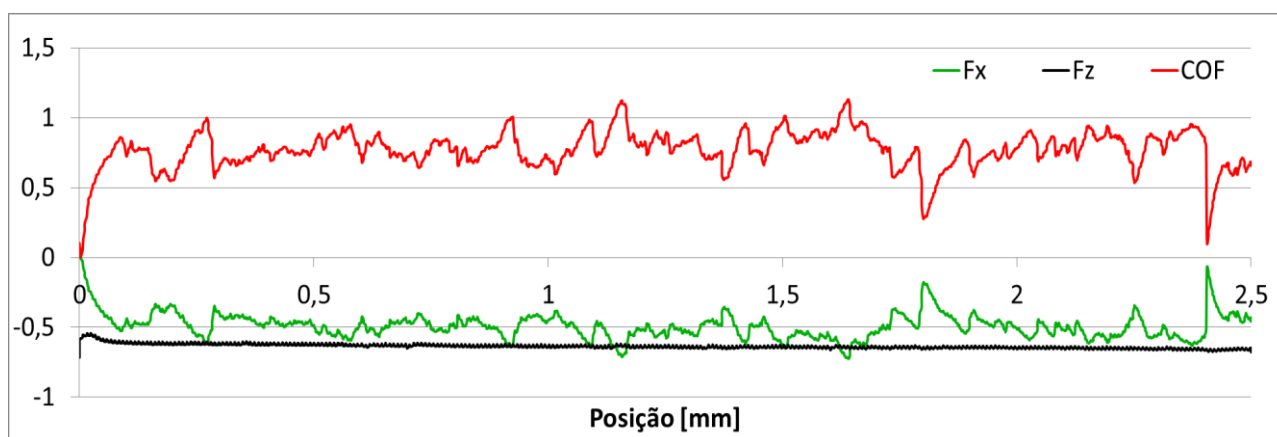
### 4.3 Ensaios de riscamento

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios realizados com a ferramenta de corte em um ângulo definido ( $15^\circ$ ) e com as condições de ensaios apresentados na Tabela 4.

#### 4.3.1 Coeficiente de atrito x propriedades dos materiais

Uma análise que é válida realizar é referente as forças que atuaram durante o ensaio de riscamento. Na Figura 46, é apresentado um exemplo em que mostra a força na direção normal  $F_z$ , a força na direção do riscamento  $F_x$  e o coeficiente de atrito COF. Verificou-se que no início do ensaio a  $F_x$  apresenta um comportamento crescente até determinado patamar. Neste mesmo período também nota-se uma variação na  $F_z$ . Este comportamento pode ser explicado pela aceleração do equipamento até que se atinja a velocidade pré-determinada. Juntamente a isso também se tem o início do corte na qual há um aprofundamento da ferramenta no material.

Em virtude destas considerações apresentadas, ressalta-se que para o cálculo do coeficiente de atrito médio apresentado na Figura 47 e Figura 48, foram considerados 80% dos dados coletados ao longo do risco (2,5 mm), sendo que 10% a partir do início e 10% antes do final foram desconsiderados.



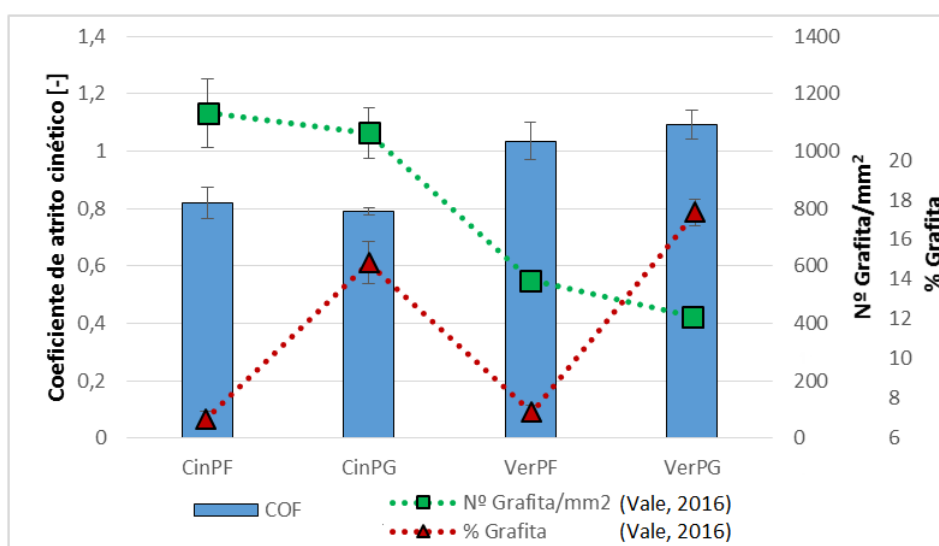
**Figura 46 – Gráfico resultante do ensaio de riscamento no qual são mostrados o COF, força normal ( $F_z$ ) e força na direção de riscamento ( $F_x$ ).**

Verificou-se também que ao longo do risco existe uma variação da força normal ( $F_z$ ). Contudo esta variação é decorrente do sistema de controle de carga do tribômetro e se demonstrou muito menor que a variação da  $F_x$ . Através desta análise



entende-se que a variação do COF apresentado nas figuras anteriores (Figura 49 à Figura 52) é decorrente da variação da  $F_x$ . Isso corrobora as discussões apresentadas de que a estrutura do material e suas descontinuidades estão fortemente correlacionadas ao COF.

Na Figura 47 são apresentados os resultados do COF obtidos dos ensaios de riscamento para as quatro amostras avaliadas. O resultado apresenta valores diferentes do coeficiente de atrito maiores para as amostras de ferro fundido vermicular em relação as amostras de ferro fundido cinzento. Realizando uma comparação entre o mesmo material, para as duas espessuras de parede, não foi constatada significativa diferença, pois os resultados são estatisticamente iguais, com 95% de confiança.

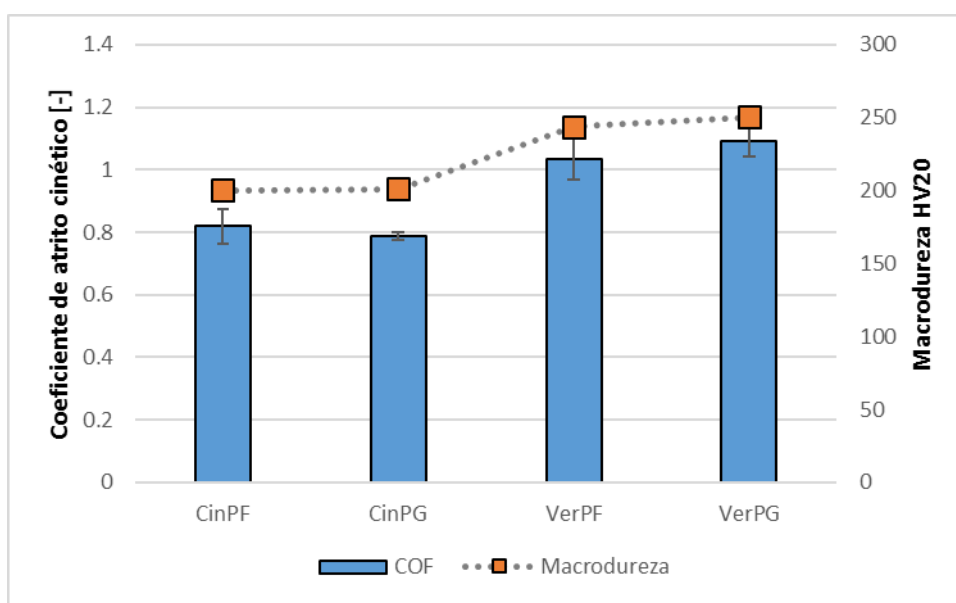


**Figura 47 - Correlação entre o coeficiente de atrito, número de grafitas por mm<sup>2</sup> e percentual de grafita.**

Em sobreposição ao COF, são plotados também os resultados da quantificação de grafita obtidos por Vale (2016) (Figura 47). Com o objetivo de entender e comportamento do COF, foram realizados testes de correlação entre estes parâmetros. Determinou-se uma forte correlação negativa entre o COF e o número de grafitas. O valor obtido para o coeficiente de correlação foi de -0,987, o que mostra a forte dependência do COF em relação ao número de grafitas por mm<sup>2</sup>. No caso do ferro fundido cinzento, que apresenta um maior número de grafitas, o COF foi cerca de 20% menor comparado as amostras de ferro fundido vermicular. Outra correlação estudada foi entre o COF e o percentual de grafita, na qual foi obtido um valor de 0,23. De fato, comprovou-se que existe uma influência da grafita no

coeficiente de atrito, sendo esta mais relacionada ao número de grafitas por área do que a fração total de grafita da amostra.

Outro parâmetro característico de um material é a dureza. Na Figura 48 observa-se os resultados do COF juntamente com a macrodureza Vickers das amostras.

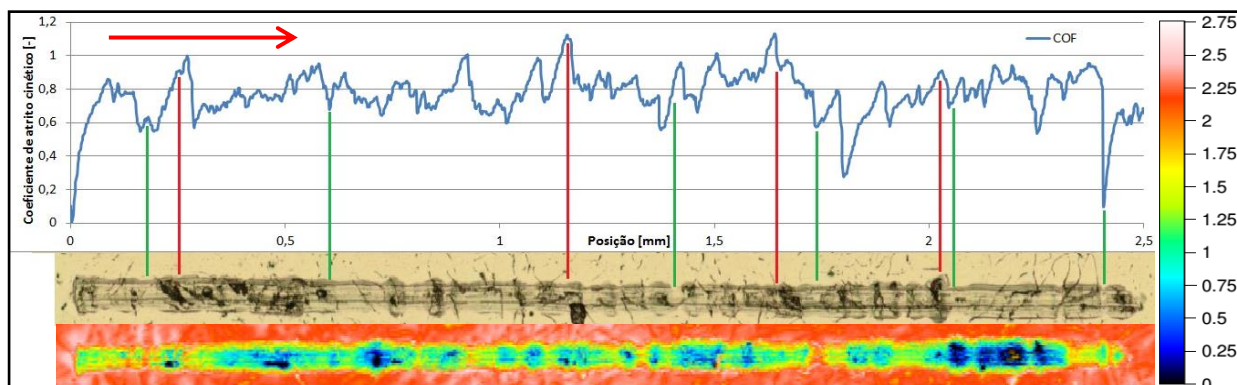


**Figura 48 - Correlação entre o coeficiente de atrito e a macrodureza HV20.**

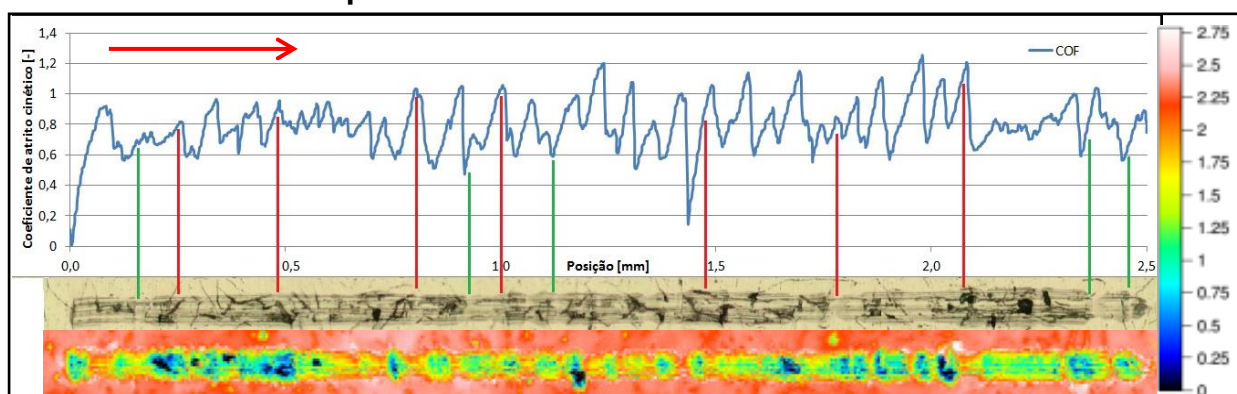
A correlação entre o COF e a macrodureza também apresentou-se forte e positiva, com um valor de 0,994. Assim corrobora-se o fato de que o material com maior dureza, no caso o ferro fundido vermicular, apresenta uma maior resistência ao corte, ocasionando um maior COF em relação as amostras de ferro fundido cinzento. De certa forma este comportamento já era esperado devido a correlação da dureza do material com a tensão última de resistência à tração (CALLISTER, 2007).

#### 4.3.2 Coeficiente de atrito x distância de riscamento

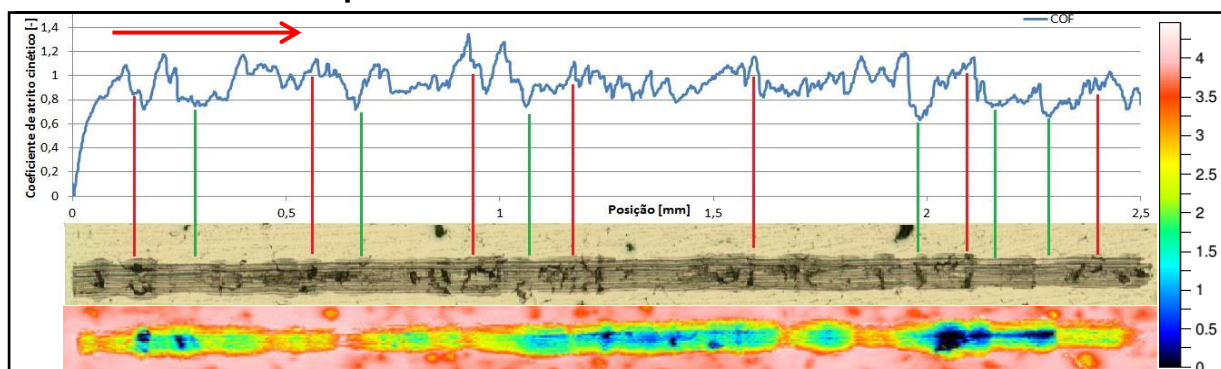
As Figura 49, Figura 50, Figura 51 e Figura 52 apresentadas a seguir mostram o comportamento do COF ao longo de todo o risco (2,5mm). A seta em vermelho no canto superior esquerdo das figuras indica a direção de riscamento. Abaixo de cada gráfico foram plotadas as suas respectivas metalografias e também as imagens obtidas por interferometria. As linhas verticais em vermelho representam pontos nos quais houve um aumento localizado do COF, já as linhas em verde representam pontos de diminuição deste parâmetro.



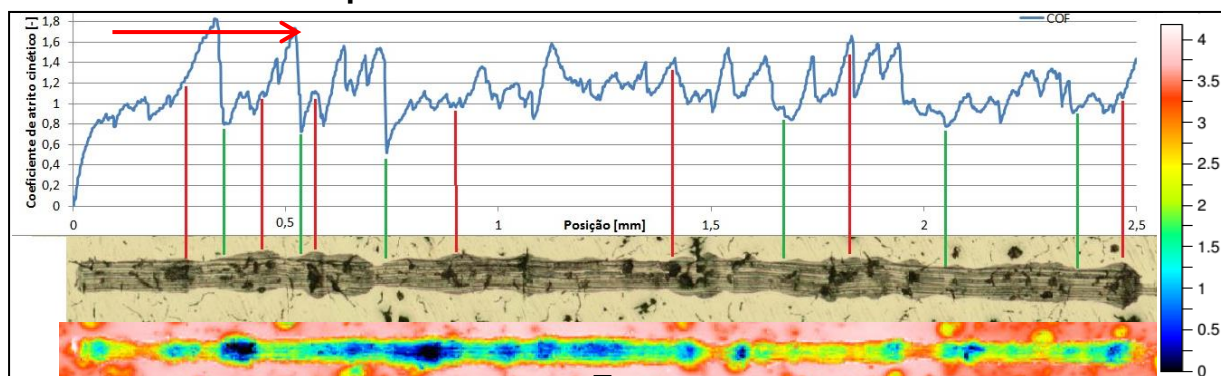
**Figura 49 - Correlação do COF, imagem do risco obtida por microscopia óptica e interferometria: CinPF.**



**Figura 50 - Correlação do COF, imagem do risco obtida por microscopia óptica e interferometria: CinPG.**



**Figura 51 - Correlação do COF, imagem do risco obtida por microscopia óptica e interferometria: VerPF.**



**Figura 52 - Correlação do COF, imagem do risco obtida por microscopia óptica e interferometria: VerPG.**

A partir das figuras apresentadas anteriormente, é possível observar que o COF sofreu variação ao longo do risco. Constatou-se que esta variação está relacionada a presença da grafita principalmente em regiões de transição de maior ou menor concentração deste microconstituente. Nas regiões onde há uma maior concentração de grafita, observa-se um aumento localizado da largura do risco associado a um aumento do COF (linhas em vermelho). Já as regiões que apresentam visualmente um menor número de grafitas contam com uma diminuição localizada da largura do risco associada a uma queda do COF (linhas em verde).

Como o ensaio de riscamento foi realizado com uma ferramenta de geometria definida, o aumento da largura do risco implica em um aumento de profundidade. Isso pode ser observado pelas imagens de interferometria através da paleta de cores.

Realizando uma comparação visual entre os gráficos do coeficiente de atrito, verificou-se que para o ferro fundido cinzento de parede grossa (Figura 50) os picos e vales são mais acentuados, comparando-se ao mesmo material de parede fina (Figura 50). Relaciona-se esta diferença as diferentes taxas de resfriamento que foram submetidas cada amostra, o que pode levar a uma maior formação de grafita na amostra de maior espessura. Conforme descrito na literatura (COLPAERT, 1974) esta menor taxa de resfriamento pode levar a uma maior formação de grafita gerando assim mais descontinuidades na matriz do material, acarretando em maior variação do COF.

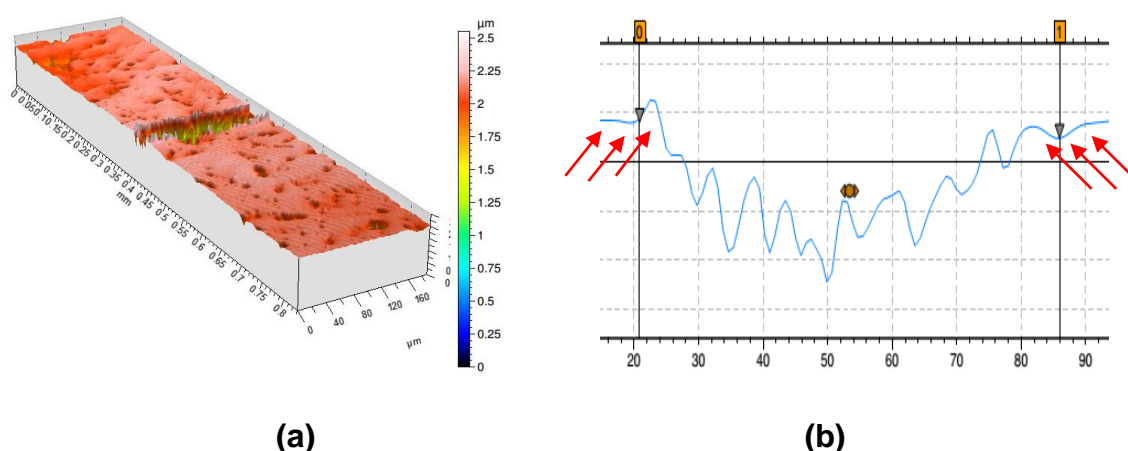
Comparando as amostras de ferro fundido vermicular, também se constatou o mesmo comportamento dos gráficos. Na amostra de ferro fundido vermicular de parede grossa (Figura 53) a variação de largura associada ao COF fica ainda mais clara. Quando a ferramenta sai de uma área de concentração de grafita existe uma tendência de queda localizada do COF. Associa-se este fato a uma remoção de grafita que pode atuar como um lubrificante sólido. Neste ponto também observa-se um estreitamento do risco devido a maior resistência local ao processo de sulcamento.

#### **4.3.3 Largura e profundidade dos sulcos**

A partir da interferometria de luz branca (IDBL) foram obtidos os resultados para a largura e profundidade dos sulcos. Esta técnica de análise de imagens

permitiu a representação tridimensional das superfícies avaliadas. A partir do software de análise disponível no equipamento foi possível traçar as seções e ampliações necessárias para a realização das medições, conforme apresentado na Figura 53 (a). No entanto, após a compilação dos resultados, foi verificado que a dispersão de resultados era muito alta para cada risco. Essa dispersão ocorre devido ao fato que o posicionamento do cursor para a medição é realizado de forma manual e não existe uma representação exata do ponto que é a borda do sulco, conforme mostrado pelas setas em vermelho na Figura 53 (b). Isso foi relevante tanto para a medição de largura quanto de profundidade.

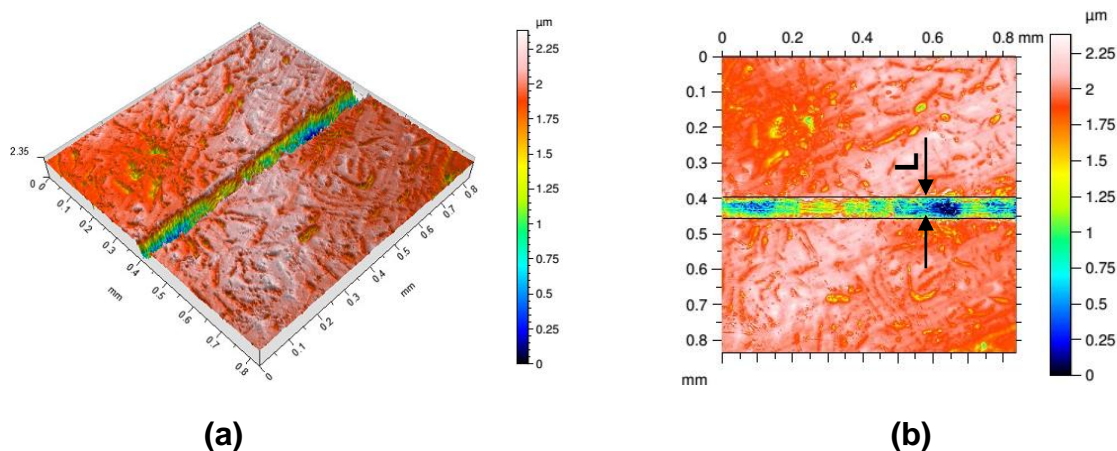
Outro fator de forte influência na medição é que podem ser feitas diversas seções ao longo do risco. Mesmo que seja uma mesma pessoa, e com um mesmo método (critério) realizando a medição, essa variação continua a existir, pois na resolução disponível de medição, a cada seção tem-se um valor diferente de largura e profundidade.



**Figura 53 – (a) Representação da seção da superfície avaliada em 3D e (b) ampliação do sulco em 2D.**

A fim de diminuir essa variação, que neste caso é fortemente influenciado pela percepção do operador do software, decidiu-se realizar a medição de largura a partir de duas linhas médias. Utilizando como base a imagem tridimensional (Figura 54) desta vez com uma área maior do risco, traçou-se 2 linhas médias para a cálculo da largura. Desta forma não é eliminado a possível variação da medição em função do homem, porém conta com um espaço amostral maior a partir da linha média e não de uma seção isolada. Desta forma acredita-se conseguir uma caracterização mais

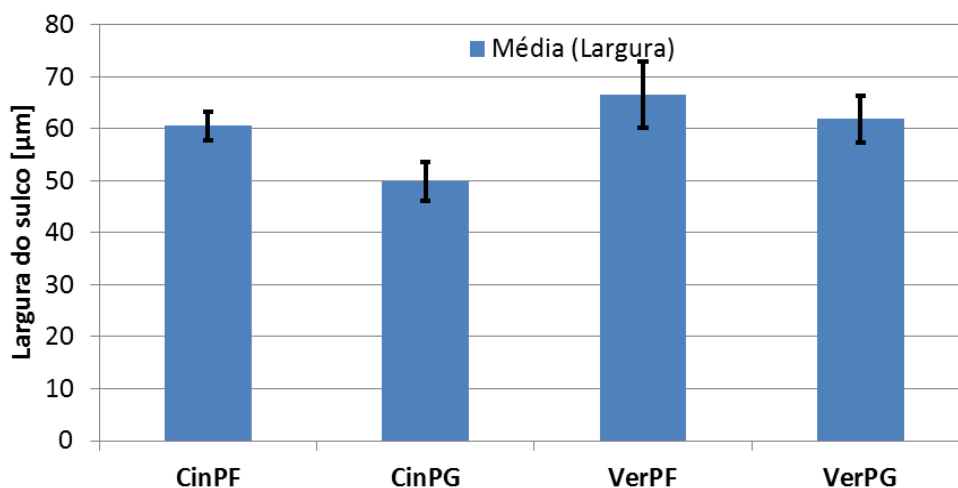
correta deste parâmetro de largura, para fins de comparação entre as quatro amostras.



**Figura 54 – (a) Vista tridimensional de um risco obtida por IDBL e (b) esquema para a determinação da largura do risco.**

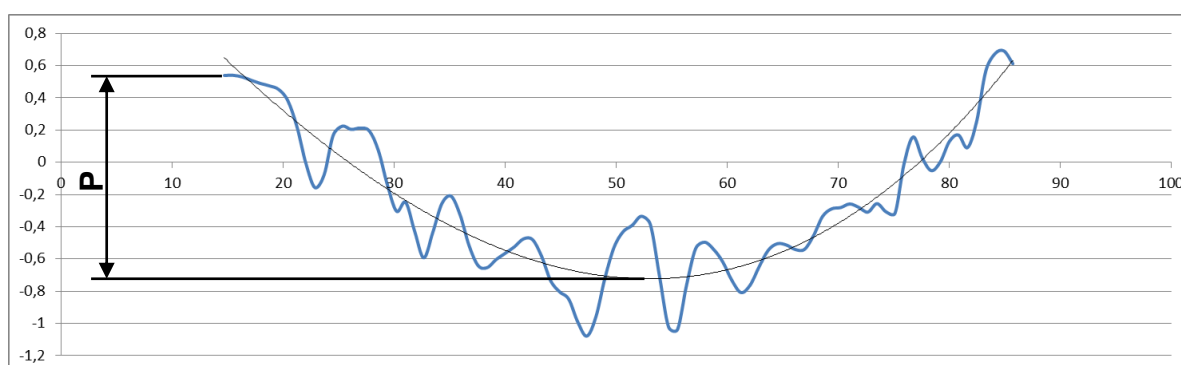
A seguir na Figura 55 são apresentados os resultados para a largura média dos sulcos. Observou-se uma tendência para as amostras de parede grossa ter uma largura de sulco menor em relação as de parede fina. Somente a amostra de ferro fundido cinzento parede grossa (CinPG) foi a que teve um valor de largura estatisticamente diferente no parâmetro de largura.

Conforme discutido por Vale (2016) este parâmetro de largura demonstrou ser pouco afetado pela variação de material ou diferenças de espessura das amostras. No caso dos estudos de Vale (2016) ressalta-se o fato de que os gumes de corte possuíam geometria indefinida (processo de brunimento), já nestes resultados do presente trabalho as condições de sulcamento (velocidade, carga normal e geometria da ferramenta de corte) foram controladas. Mesmo assim a largura dos sulcos demonstrou-se pouco influenciada pela matriz do material. Contudo conforme foi já apresentado nas Figura 49 à Figura 52, esta variação está mais relacionada com a presença de grafita de forma localizada.



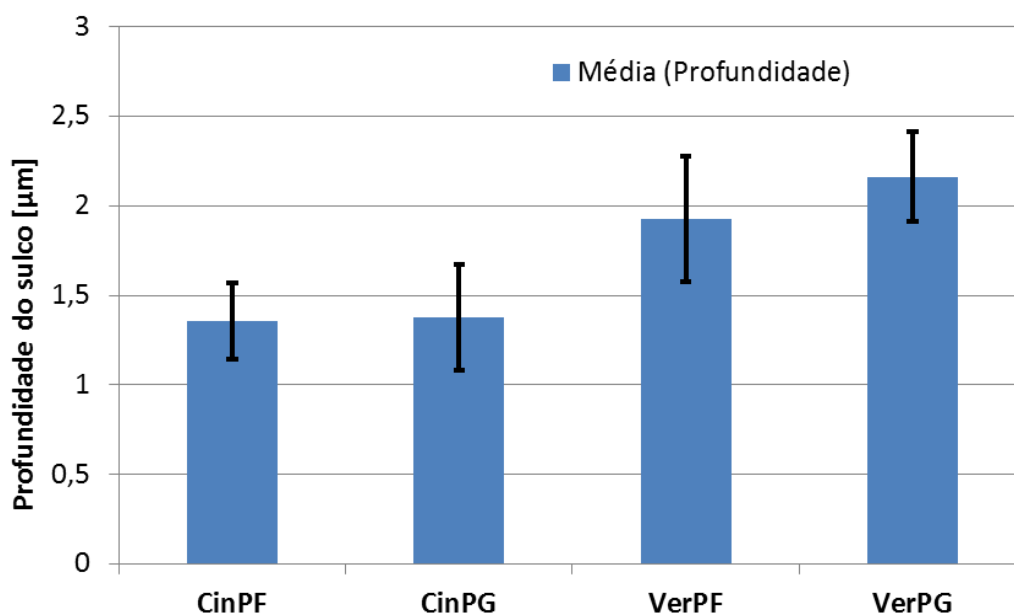
**Figura 55 – Largura média dos sulcos para as amostras.**

Para os resultados de profundidade também constatou-se grande variação nos valores obtidos a partir do software do interferômetro, conforme discutido para a largura e mostrado na Figura 54 (b). Neste caso optou-se por realizar uma interpolação de um polinômio de terceiro grau a partir dos dados extraídos do interferômetro (seção transversal do sulco). Como se trata de uma de sulco obtido a partir de uma geometria conhecida de corte, realizar a medição de profundidade baseado em uma linha de tendência se mostra razoável. Dessa forma a medição foi realizada conforme é apresentado na Figura 56 e representado pela letra “P”.



**Figura 56 – Exemplo esquemático da medição de profundidade do sulco a partir de uma interpolação dos resultados.**

Os resultados de profundidade dos sulcos estão apresentados na Figura 57. É possível notar que não há diferença significativa comparando as amostras de parede grossa em relação à de parede fina. Contudo, fica evidente que as amostras de ferro fundido vermicular (VerPF e VerPG) tem apresentam uma tendência em uma maior profundidade. Isso também corrobora uma análise visual das escalas de cores apresentadas nas Figura 49 à Figura 52. Nestas figuras para o ferro fundido cinzento a escala indica uma profundidade máxima de 2,75  $\mu\text{m}$ , enquanto para o ferro fundido vermicular a profundidade máxima está próximo aos 4  $\mu\text{m}$ .



**Figura 57 – Profundidade média dos sulcos para as amostras.**

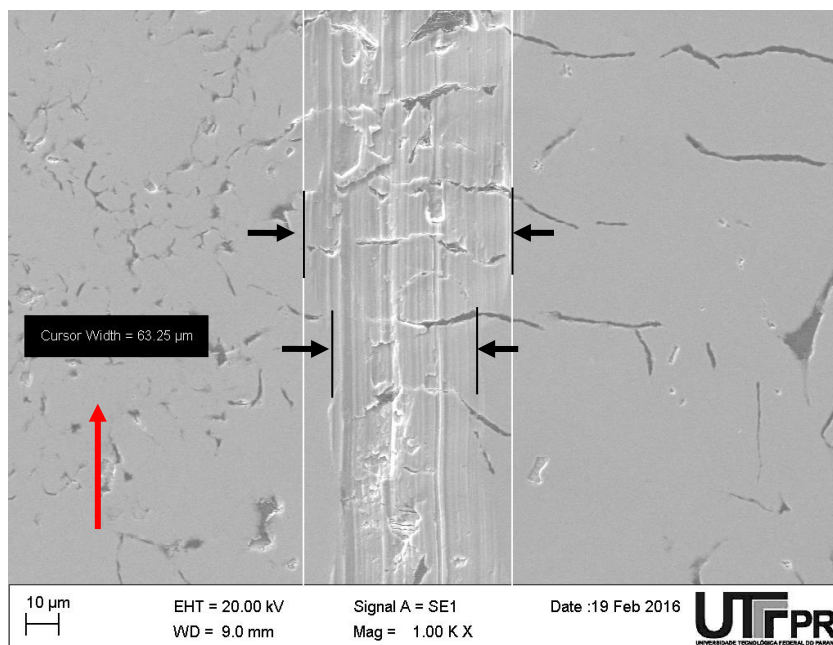
É válido lembrar que os valores de largura determinados por Vale (2016) na Figura 20 a partir de sulcos de brunimento, cerca de 12  $\mu\text{m}$ , são menores que os valores obtidos após os ensaios realizados neste trabalho, por volta de 60  $\mu\text{m}$ . Isso se deve ao fato de não ser possível utilizar uma carga menor no tribômetro durante o ensaio de riscamento. O raio da ferramenta de corte também é maior que um abrasivo de uma ferramenta de brunimento, o que também levaram a estas dimensões dos sulcos. Contudo isso não desmerece os resultados obtidos nos ensaios pois mesmo os sulcos tendo um tamanho maior, o objetivo principal era de realizar uma comparação entre as diferentes amostras sob condições controladas de sulcamento. Nos ensaios também foram desconsiderados a recuperação elástica do material após ensaio de riscamento.



#### 4.3.4 Mecanismos de desgaste

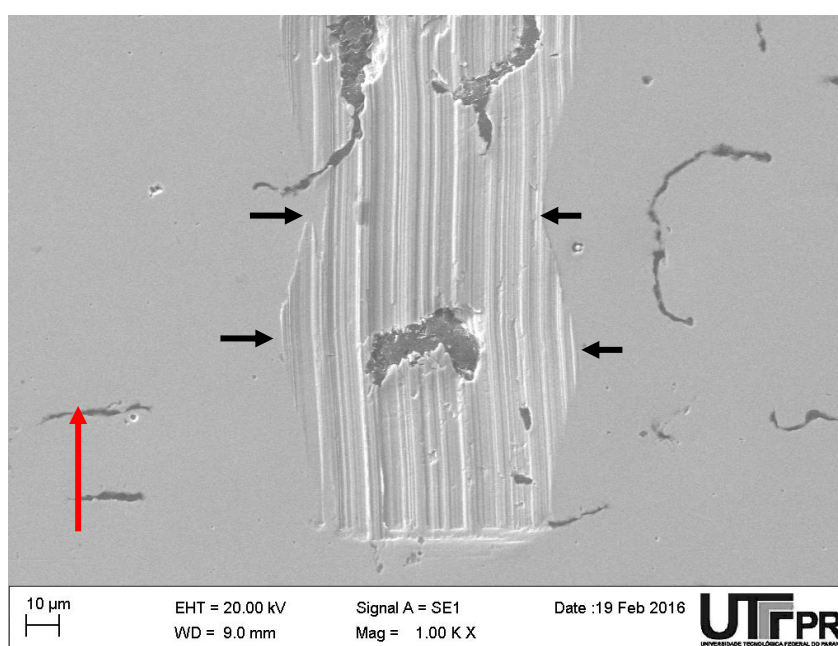
Durante o processo de riscamento ocorrem diversas interações entre a grafita, matriz metálica e ferramenta. Uma forma de poder observar os fenômenos e mecanismos envolvidos é através de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Através destas imagens é possível verificar o que ocorreu, com elevada nitidez, durante os ensaios no material. Isso possibilita a discussão dos mecanismos de desgaste presentes no processo. A grafita é um microconstituente menos rígido que a matriz, normalmente, perlítica destes materiais, levando a presença de descontinuidades ao longo do material.

O efeito mais notável deste microconstituente foi a variação de largura do risco em regiões com alta concentração de grafita, conforme já discutido na Seção 4.3.2. Nas figuras a seguir as setas em vermelho, no canto inferior esquerdo da imagem, representam a direção de riscamento. Na Figura 58 é mostrado um aumento da largura do sulco em uma amostra de CinPF. Neste caso a largura saiu de 48,1  $\mu\text{m}$  para 63,3  $\mu\text{m}$ .



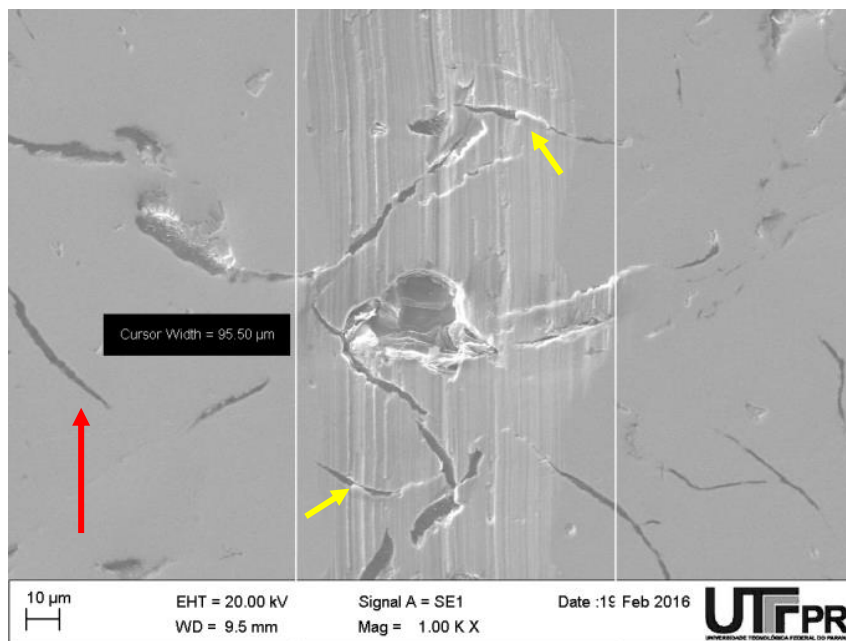
**Figura 58 – Variação da largura do sulco em uma amostra CinPG.**

Outro exemplo ainda mais nítido deste fenômeno é apresentado na Figura 59. Neste caso a largura do sulco passa de 90,3  $\mu\text{m}$  para 69,2  $\mu\text{m}$ . Nesta imagem também nota-se os típicos riscos de abrasão dentro dos sulcos. Estas marcas confirmam as informações presentes na literatura que caracterizam o desgaste abrasivo para o ensaio de riscamento (Stachoviak e Batchelor, 2001). Esta variação de largura está associada a áreas de presença de grafita, na qual a resistência mecânica a remoção de material é menor, permitindo também maior penetração da ferramenta no material.



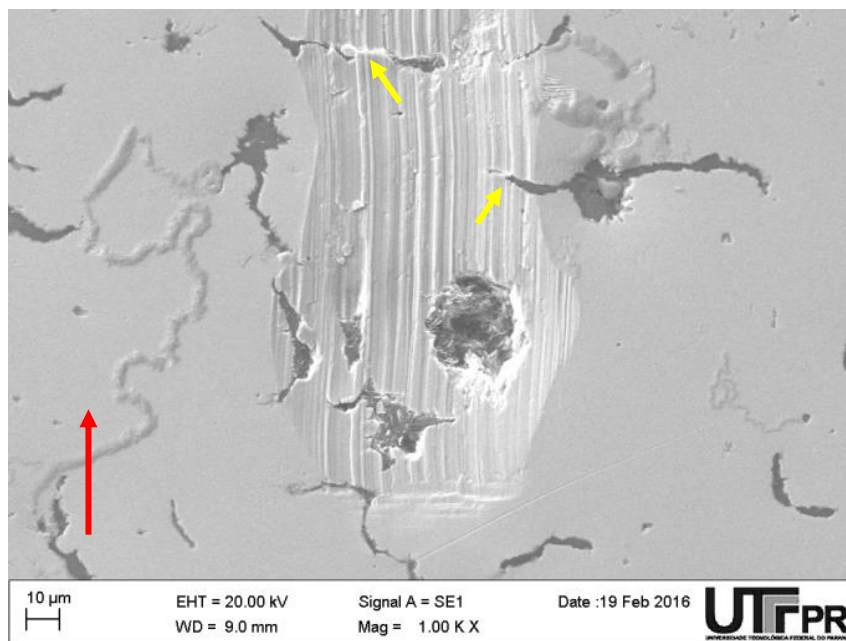
**Figura 59 - Variação da largura do sulco e marcas de desgaste abrasivo em uma amostra VerPF.**

Observou-se também a partir das imagens obtidas por MEV a formação do metal dobrado (*folded metal*), associado com a grafita, para os dois tipos de materiais e espessuras de parede. Na Figura 60, em destaque pelas setas em amarelo, constata-se o dobramento de uma parte de material para dentro do veio de grafita em para o ferro fundido cinzento. A direção de dobramento é coerente com o sentido do processo de riscamento. Apesar de se observar a formação de metal dobrado para as quatro amostras, vale comentar que o ferro fundido cinzento foi mais suscetível para a ocorrência deste fenômeno.



**Figura 60 – Formação de metal dobrado sobre um veio de grafita em uma amostra CinPF.**

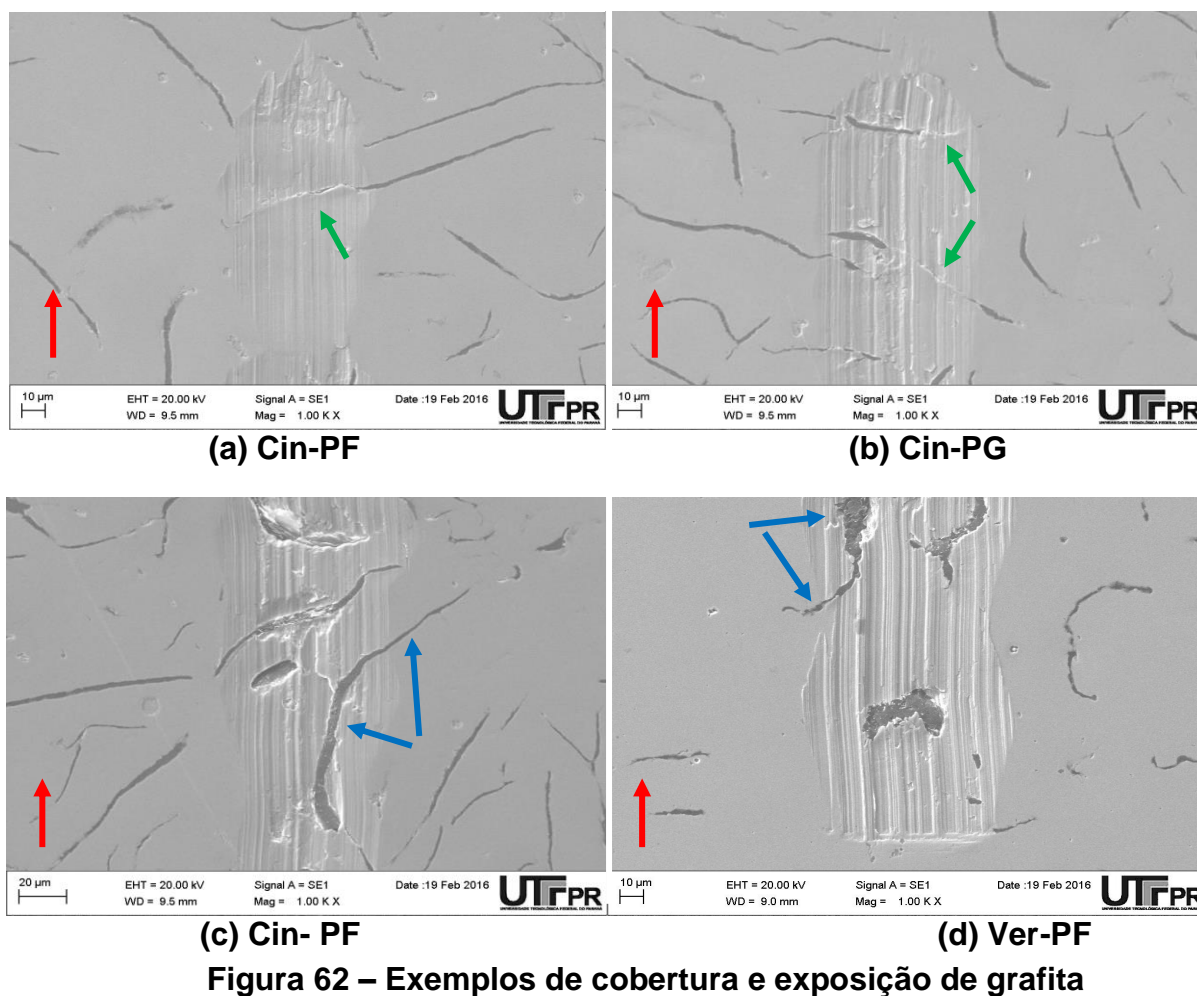
Outro exemplo deste fenômeno está ilustrado na Figura 61. Desta vez para uma amostra de ferro fundido vermicular. Esta fração de material dobrado está atrelada a menor resistência mecânica da grafita ao processo de corte. Isso é tratado na literatura como "*burnishing action*", Griffiths (1986), na qual uma porção de material é deformada plasticamente em direção ao veio de grafita. Comenta-se também que a direção que o veio de grafita está contribui para a ocorrência deste fenômeno. Os veios de grafita que se encontram de forma perpendicular a riscamento estão mais sujeitos s formação do metal dobrado. Esta evidencia de metal dobrado associada ao a grafita corrobora as conclusões apresentadas por Vale (2016) da correlação entre o percentual de grafita e u metal dobrado.



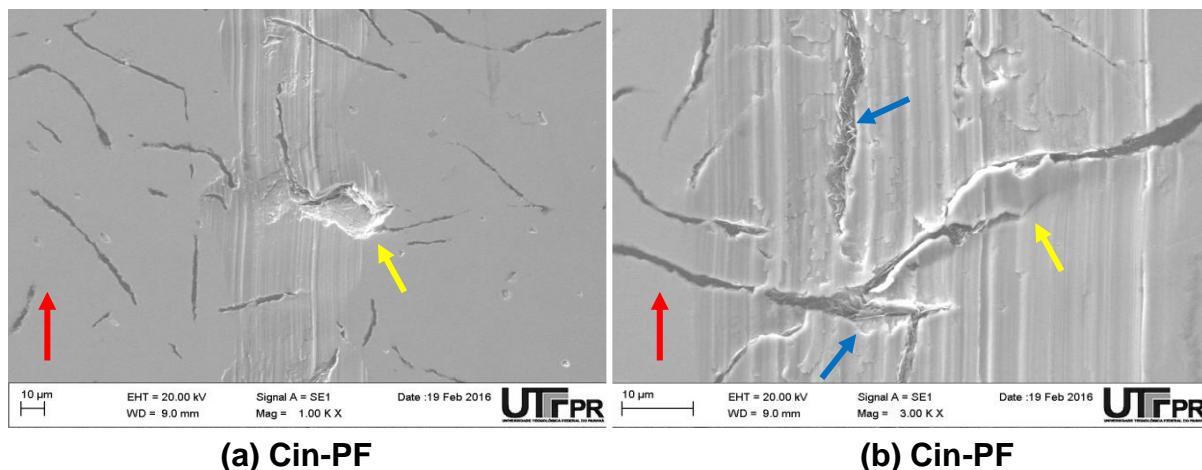
**Figura 61 - Formação de metal dobrado sobre um veio de grafita em uma amostra VerPG.**

Dessa interação entre grafita e a matriz outro fenômeno também foi observado. Conforme se pode observar na Figura 62 (a) e (b), em alguns pontos ocorreu a cobertura total de um veio de grafita indicado pelas setas em verde. Esta constatação foi mais evidente nas amostras de ferro fundido cinzento. Por hipótese este tipo de fenômeno foi mais facilmente observado neste material devido a característica geométrica dos veios de grafita que foram recobertos, os quais possuem uma forma mais alongada.

Também se observou o oposto. Alguns veios de grafita que estavam sob a camada de material metálico, foram revelados após o sulcamento, conforme indicado pelas setas em azul da Figura 62 (c) e (d). Percebe-se que o mesmo veio de grafita tem uma largura maior na parte que se encontra dentro do sulco. Como a estrutura da grafita é tridimensional (COLPAERT, 1974), após a passagem da ferramenta fica revelado uma região mais espessa do veio.



Para as amostras também se observou outro mecanismo de desgaste, o lascamento. Na Figura 63 (a), indicada pela seta amarela, verifica-se uma cratera onde existia uma porção de grafita. Essa grafita foi arrancada após a passagem da ferramenta. Conforme já discutido, também nota-se um aumento da largura dos sulcos nesta região. Esta imagem também corrobora a discussão apresentada na Sessão 4.3.2, na qual ocorre uma queda do coeficiente de atrito em função do efeito de lubrificação sólida causada pela grafita (HUTCHINGS, 1992). Já na Figura 63 (b), indicado pela seta em amarelo, é identificada uma seção de material propícia ao lascamento. Ela está sobre um veio de grafita, o qual é responsável por esta descontinuidade do material. Nesta mesma imagem, desta vez indicada pela seta em azul, verifica-se a exposição de um fragmento de grafita, no qual possivelmente ocorreu uma extrusão deste microconstituente. Neste pode acontecer também a influência como lubrificante no contato entre a ferramenta e o material.



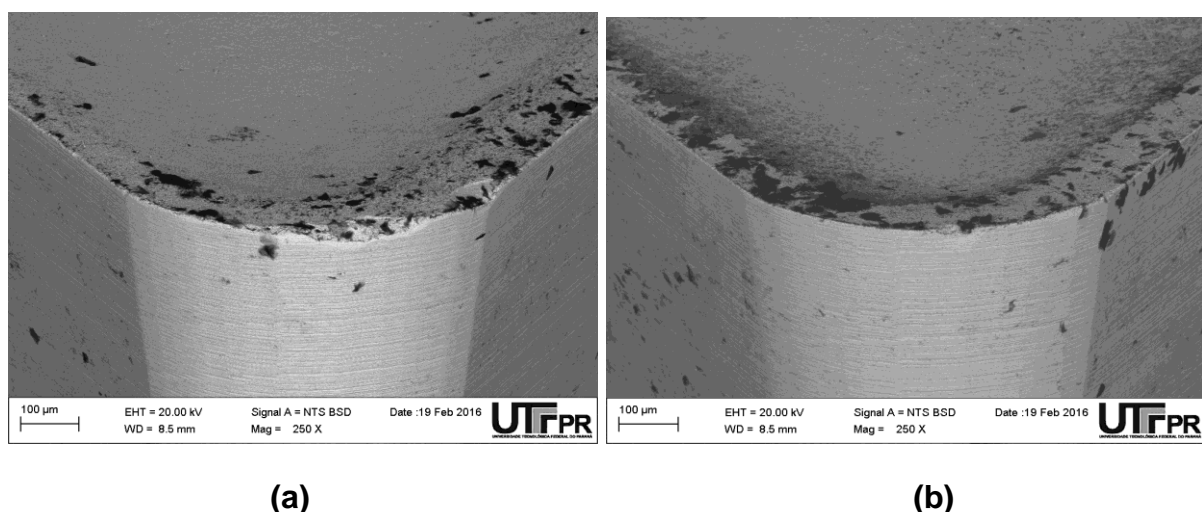
(a) Cin-PF

(b) Cin-PF

**Figura 63 - Exemplo de (a) remoção e (b) extrusão de grafita.**

#### 4.3.5 Análise das ferramentas de corte utilizadas

Utilizando-se também da microscopia eletrônica de varredura foram obtidas imagens que detalham a aresta de corte da ferramenta utilizada, conforme apresentado na Figura 64. Foi identificado em uma das ferramentas utilizadas um lascamento da aresta de corte conforme Figura 64 (a). Na outra ferramenta não foi identificada nenhuma alteração significativa da aresta de corte após realização dos ensaios. Chama-se a atenção, novamente, que se utilizou uma aresta de corte para cada material.



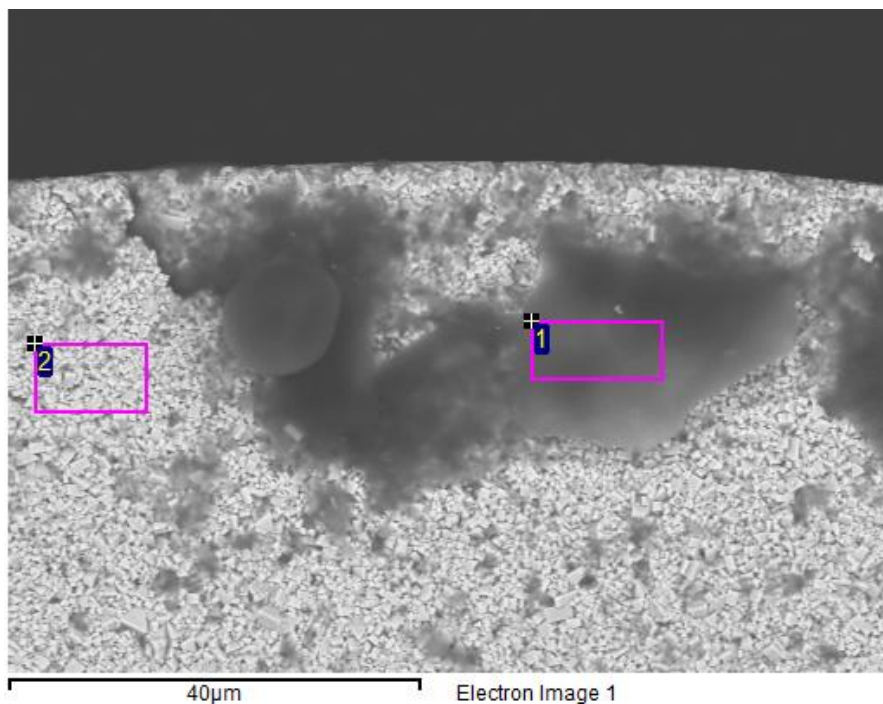
(a)

(b)

**Figura 64 – Detalhe da aresta de corte das ferramentas de metal duro utilizada no riscamento.**

Na Figura 65 foi realizada também uma análise via EDX (*energy dispersive x-ray*) a fim de identificar os elementos presentes na ferramenta. Na região identificada

pelo número “2”, determinou-se um percentual, em massa, 80,77% de tungstênio e 15,9% de carbono, como principais elementos químicos. Já na região mais escura, indicada pelo número “1” determinou-se 39,95% de carbono e 36,61% de tungstênio. Esta caracterização reforça ainda mais a discussão levantada sobre a remoção de grafita durante o sulcamento, a qual neste caso ficou aderida na ferramenta.



**Figura 65 – Imagem obtida por MEV mostrando a face de saída de cavaco da ferramenta e utilização do EDX.**

## 5 CONCLUSÕES

Deste estudo em que foi avaliado o comportamento tribológico de ferros fundidos em ensaio de riscamento, pôde-se concluir que:

- ✓ A presença de grafita teve influência significativa no coeficiente de atrito (COF) e nos mecanismos de desgaste observados neste estudo;
- ✓ Comprovou-se uma forte correlação entre o número de grafitas do material e o COF, sendo estes dois inversamente proporcionais. No caso do ferro fundido vermicular (com menor número de grafitas por área) obteve-se um maior valor médio do coeficiente do atrito;
- ✓ A diferença de espessura de parede do cilindro, entre amostras do mesmo material, pouco influenciou nos resultados de COF, sendo estes estatisticamente iguais. Isto está associado ao percentual de grafita em cada amostra, demonstrando uma fraca correlação com o COF.
- ✓ O COF e a macrodureza dos materiais apresentaram forte correlação positiva;
- ✓ Através da sobreposição do gráfico do COF com as metalografias verificou-se a variação do COF em áreas com alta concentração de grafita, sendo que nestas regiões há um aumento localizado do coeficiente de atrito, seguido pela queda deste;
- ✓ Associado as áreas de concentração de grafita foi constatado a variações da largura dos sulcos. Este fato corrobora as informações presentes na literatura de que a grafita promove uma descontinuidade da matriz do material, oferecendo assim menor resistência ao avanço da ferramenta;
- ✓ As amostras de parede grossa apresentaram maiores variações de COF ao longo do risco, o que está associado a maior formação de descontinuidades (grafitas) nestes materiais;
- ✓ Para o ferro fundido vermicular houve uma tendência de um maior valor médio de profundidade dos sulcos, comparando ao cinzento;
- ✓ O tipo de material ou espessura de parede tiveram pouca influência na largura média dos sulcos;
- ✓ O mecanismo de desgaste característico dos sulcos foi o microcorte, no qual estão presentes níveis de tensão mais elevados;



- ✓ Ficou evidente a característica predominantemente abrasiva da ferramenta de corte, evidenciada com os riscos dentro do sulco e formação de proa;
- ✓ Foi evidenciado a formação de metal dobrado nos contornos da grafita, devido a menor resistência deste microconstituente, permitindo assim o dobramento da matriz. Este fenômeno foi observado para todos os materiais, mas de modo mais recorrente para o ferro fundido cinzento;
- ✓ Observou-se forte correlação entre o COF e o número de grafitas, os quais são inversamente proporcionais;
- ✓ Houve influência da orientação da grafita para formação do metal dobrado, sendo que veios de grafitas perpendiculares ao sentido de riscamento foram mais suscetíveis a formação deste fenômeno;
- ✓ Foi constatado a extrusão da grafita pela passagem da ferramenta de corte. Desse modo supõem-se que a grafita deve ter atuado como lubrificante sólido durante o processo de sulcamento. Ressalta-se que a posição da grafita em relação ao sulco teve influência para este fenômeno;
- ✓ A verificação da ocorrência de metal dobrado, relacionado diretamente com a presença da grafita, corrobora estudos de Vale (2016) que encontrou forte correlação positiva entre a quantidade de metal dobrado e a fração de grafita.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEL P. B.; FERRANTE J. **Modern Tribology Handbook**, Bhushan, B. (ed), v. 2, CRC Press, New York, 2001.

ANDERBERG, C.; CABANETTES, F.; DIMKOVSKI, Z.; OHLSSON, R.; ROSÉN, B.G. **The cylinder liners and consequences of improved honing**". 12<sup>th</sup> Nordic Symposium in Tribology. Helsingor, Denmark, 2006.

ASM Handbook Volume 18 – **Friction, Lubrication and Wear Technology**. USA: 1992.

BULSARA , M. A.; BHATT, D. V.; MISTRY, K. N. Measurement of oil film thickness between piston ring and liner using strain gauge . **Industrial Lubrication and Tribology**. v. 65, p. 297 -304, 2013.

CABANETTES, F. **Characterization of Cylinder Liners by Image Analysis**. Masterthesis, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne – Halmstad University, Halmstad, Sweden, 2005.

CALLISTER, William D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: Características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: AMB, 2012.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3a. Ed. São Paulo, SP: E. Blücher. ISBN 8521200374. 1974.

DIMKOVSKI, Z. **Surface of Honed Cylinder Liners**. 2011. 75f. Tese de Doutorado – Chalmers University of Technology. Gothenburg, 2011.

DIMKOVSKI, Z.; ANDERBERG, C.; OHLSSON, R.; ROSÉN, B. G. THOMAS, T. R. Quantification of the cold worked material inside the deep honing grooves on cylinder liner surfaces and its effect on wear. **Wear**. v. 267, p. 2235-2242, 2009.

GUPTA, P. S. , WANG, Y. , MILLER, W. , BARBER, G. C. , YAO, C. , ZHOU, B. ANDZOU, Q. A Study of Torn and Folded Metal (TFM) on Honed Cylinder Bore Surfaces. **Tribology Transactions**. v. 51, p. 784-789, 2008.

GRIFFITHS, B.J. Problems in Measuring the Topography of Machined Surfaces Produced by Plastic Deformation Mechanisms. **Wear**. v. 109, p. 195–205, 1986.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo, SP: Blucher, 336 p. ISBN 9788521205012. 2009.

HUTCHINGS, Ian M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Cambridge: Butterworth Heinemann, 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 945-1: Microstructure of cast irons – Part 1: Graphite classification by visual analysis**, 2010.

JOST H. P. Tribology : How a word was coined 40 years ago. **Tribology & lubrication technology**. v. 62, no3, p 24-28, 2006.

KONIG, Wilfried. **Tecnologia da fabricação II: Retificação, brunimento e lapidação**. v. 2. Tradução: Walter Lindolfo Weingaertner. Florianópolis: UFSC. [19??]. Título original: Fertigungsverfahren 2: Schielfen, Honen und Lappen. 1980.

Leon, F. P. Evaluation of Honed Cylinder Bores. **Annals of CIRP**. v. 51/1, p 503-506., 2002.

MEZGHANI, S.; DEMIRCI, I.; ZAHOUANI, H.; MANSORI, M. L. The effect of groove texture patterns on piston-ring pack friction. **Precision Engineering**. v. 36, p. 210-217, 2012.

MOCELLIN, F. **Desenvolvimento de tecnologia para brunimento de cilindros de blocos de motores em ferro fundido vermicular**. 2007. 264 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

PRETKO, W. C. Avaliação da alteração de topografia e *folded metal* em ferro fundido vermicular imposta por ensaio de desgaste. **VII Mostra de pesquisa na pós-graduação**. Curitiba, 2015.

SABEUR, M.; IBRAHIM, D.; MOHAMED, E. M.; HASSAN, Z. Energy efficiency optimization of engine by frictional reduction of functional surfaces of cylinder ring-pack system. **Tribology International**. v. 59, p. 240-247, 2013.

SILLS, K.; BONE, G. B.; CAPSON, D. Defect identification on specular machined surfaces. **Machine Vision and Applications**. v. 25, p. 377–388, 2014.

STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W. **Engineering Tribology**. 2. ed. EUA: Butterworth Heinemann, 2001.

TAYLOR, C. M. Automobile engine tribology - Design considerations for efficiency and durability. **Wear**. v.221, p. 1-8, 1998.

TUNG, S.; EMLEY, J. Impacts of Bore Surface Finish and Coating Treatment on Tribological Characteristics of Engine Cylinder Bores. **SAE Technical Paper**. Paper number: 2002-01-1638. 2002.

VALE, J. L. **Estudo do comportamento tribológico do politetrafluoretileno em deslizamento sem lubrificação contra aço inoxidável**. 2014. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

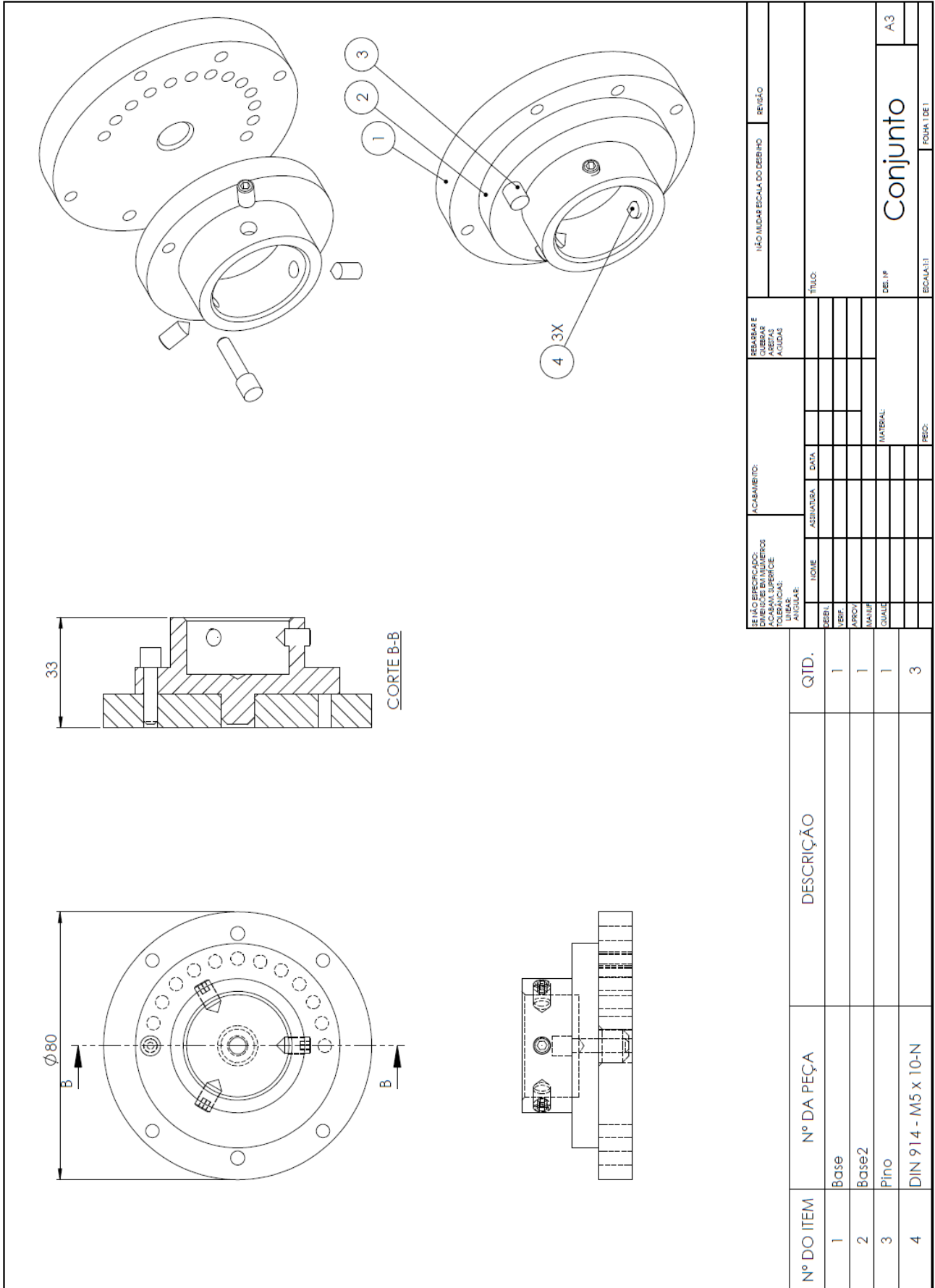
VALE, J. L. **Influência da microestrutura de ferros fundidos na ocorrência de folded metal e no coeficiente de atrito em superfícies brunidas**. 2015. Projeto de Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, *no prelo* 2016.

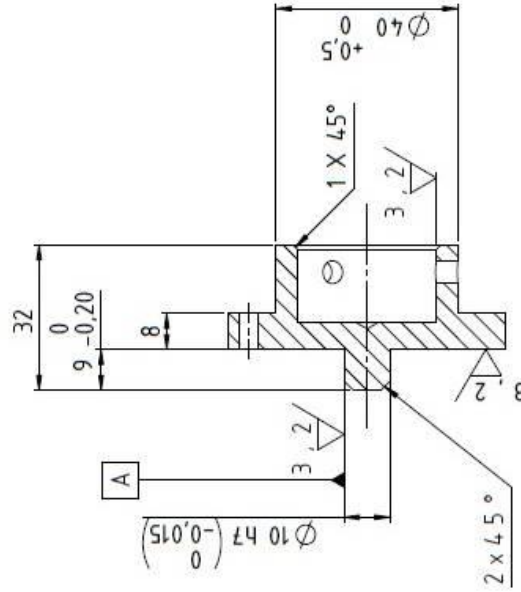
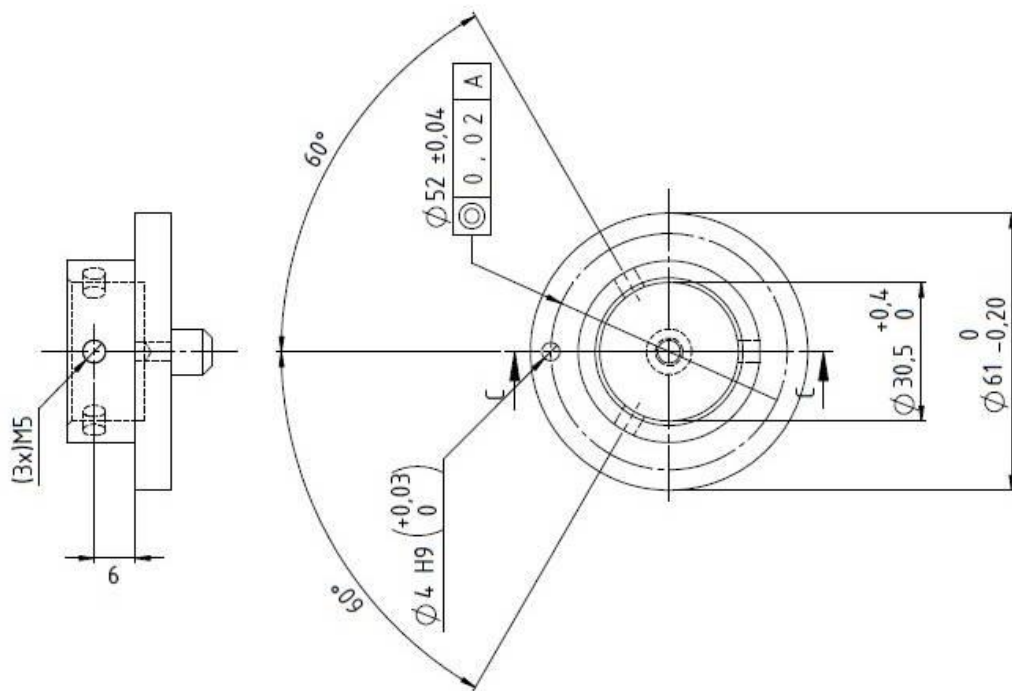
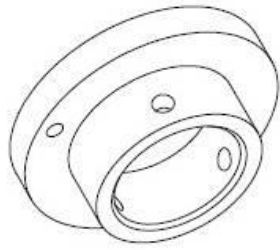
WILL, F. Fuel conservation and emission reduction through novel waste heat recovery for internal combustion engines. **Fuel**. v. 102, p. 247-255, 2012.

WANG, L.; LEON, F. P. Local Analysis of Honed Surfaces in Microscopic Images. **SENSOR e TEST Conferences 2011 - OPTO Proceedings**. section 3.4, p. 80-84, 2011.

WANG, L. **Image Analysis and Evaluation of Cylinder Bore Surfaces in Micrographs**. 2013. 134 f. Dissertação – Karlsruher Institut für Technologie (KIT). KIT Scientific Publishing, 2013.

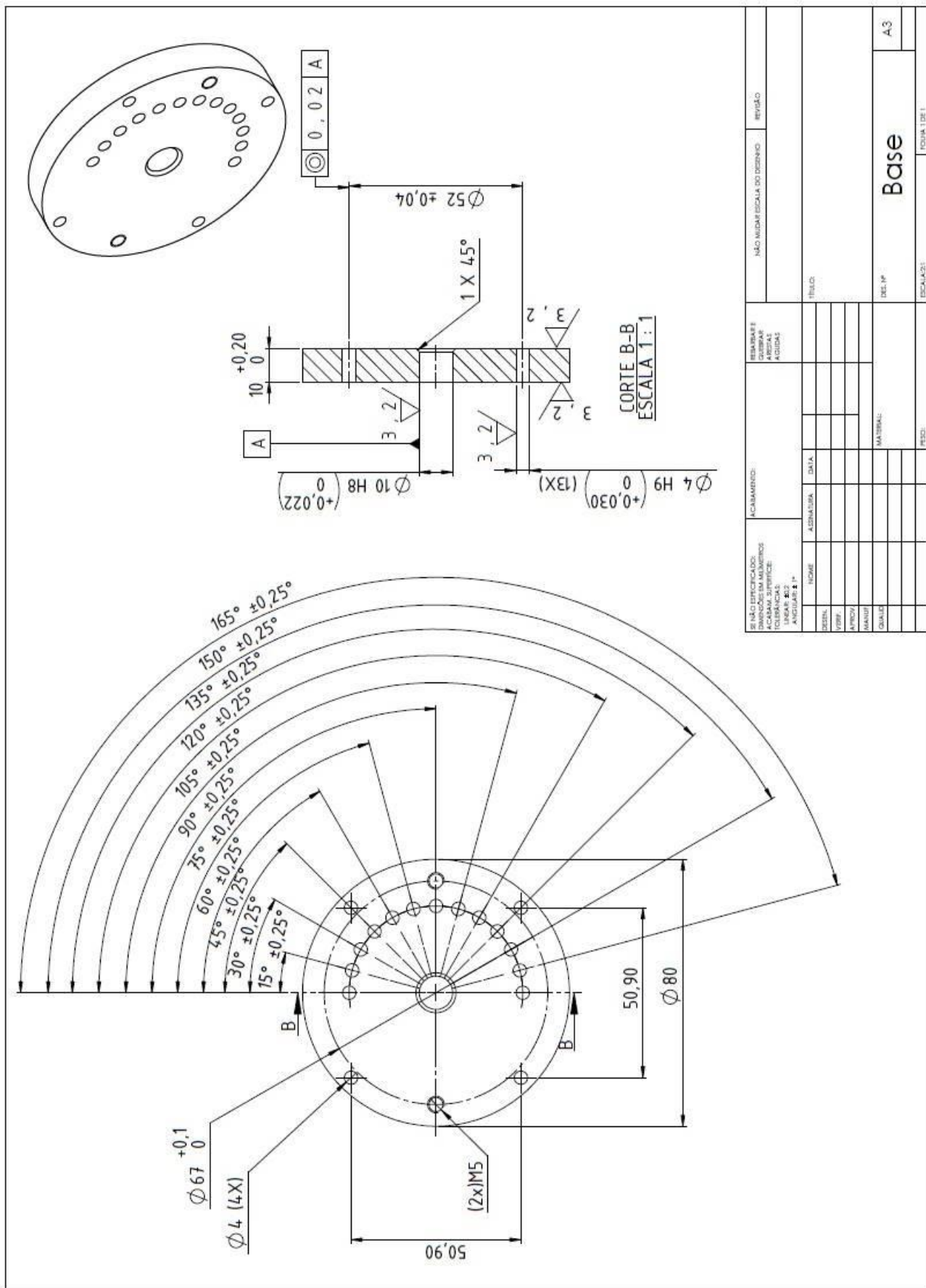
# APÊNDICE A – Projeto do dispositivo para tribômetro

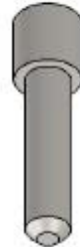
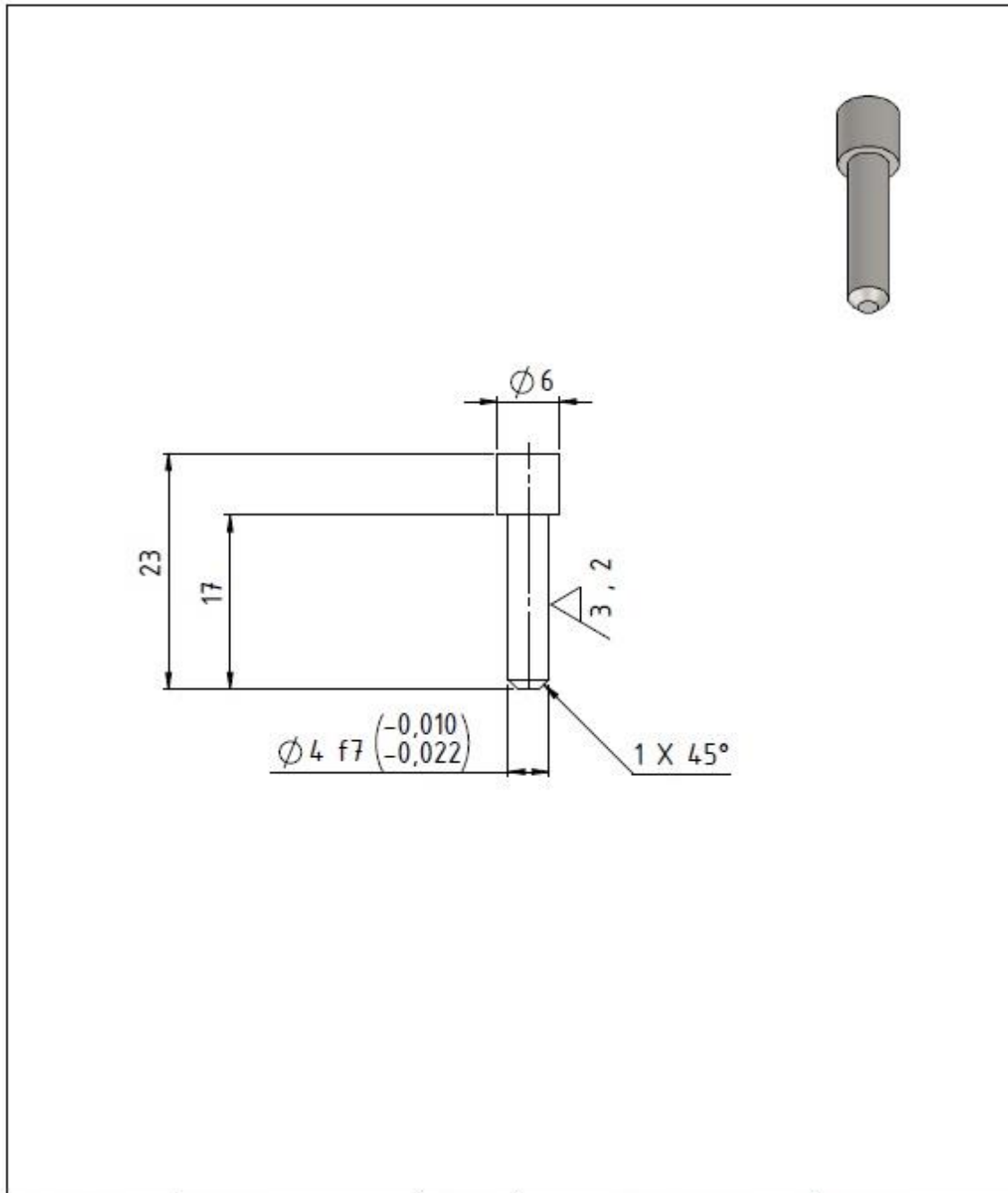




CORTE C-C

SINOPSE TÉCNICA:		ACABAMENTO:		REBARBE E		NÃO MEDIDA ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
ACABAMENTO SUPERFÍCIES:		ACABAMENTO SUPERFÍCIES:		ARREDE		NÃO MEDIDA ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
TOLERÂNCIA:		TOLERÂNCIA:		ARREDE		NÃO MEDIDA ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
ANGULARIDADE:		ANGULARIDADE:		ARREDE		NÃO MEDIDA ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
ANGULARIDADE:		ANGULARIDADE:		ARREDE		NÃO MEDIDA ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO						
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									
APROVAÇÃO									
QUALIDADE									
MATERIAL									
DESENHO									
VERIFICAÇÃO									





SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: $\pm 0,2$ ANGULAR: $\pm 1^\circ$				ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
								TÍTULO:			
NOME				ASSINATURA		DATA					
DES.											
VERIF.											
APROV.											
MANUF.											
QUALID.						MATERIAL:		DES. Nº		Pino	
										A4	
						PESO:		ESCALA: 1:1		FOLHA 1 DE 1	



## APÊNDICE B – ARTIGO SUBMETIDO AO CONEM



### AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DOS FERROS FUNDIDOS CINZENTO E VERMICULAR EM ENSAIO DE RISCAMENTO

Matheus Cortz, matheusc32@hotmail.com<sup>1</sup>

Vinicius Moreira Silva Bertolini, vini.bertolini@gmail.com<sup>1</sup>

Carlos Henrique da Silva, carloschs@utfpr.edu.br<sup>1</sup>

João Luiz do Vale, joaovale@utfpr.edu.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba.

<sup>2</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Londrina.

**Resumo:** A superfície brunida dos cilindros de um motor a combustão interna (MCI), possui uma topografia típica dividida em platôs e sulcos. Em especial, os sulcos estão associados à lubrificação e funcionam como reservatórios, permitindo que o óleo flua entre os platôs. Estudos recentes que avaliaram superfícies brunidas de ferro fundido cinzento e vermicular, com duas espessuras de parede, mostram que a largura dos sulcos de brunimento apresentaram grande dispersão e valores estatisticamente iguais. Ainda, constataram-se diferenças na fração e número de grafitas e forte correlação entre a fração de grafita e ocorrência de metal dobrado. Diante disso, verificar a resposta tribológica proveniente do estudo do processo de riscamento nestas mesmas amostras, mostrou-se uma oportunidade. Neste trabalho foram realizados ensaios de riscamento (scratch test) utilizando uma ferramenta de corte com geometria definida feita de carbetto de tungstênio. Os riscos foram realizados em uma das direções convencionais de brunimento em relação ao eixo axial do cilindro. A carga normal utilizada no tribômetro foi de 0,6 N com uma velocidade de 0,17 mm/s resultando em um risco de 2,5 mm de comprimento. Para as demais caracterizações utilizou-se: microscópio óptico, interferômetro de luz branca e microscópio eletrônico de varredura. Verificou-se que a grafita teve significativa influência nos ensaios, causando grande variação do coeficiente de atrito (COF) e na largura dos sulcos, marcadamente em transições de regiões de menor para maior fração localizada de grafita. O COF médio mostrou correlação direta com o número de grafitas e inversa com a macrodureza dos materiais. Observaram-se que devido a presença da grafita ocorreram fenômenos de exposição e recobrimento desta e lascamento de porções da matriz do material próximos a veios de grafita. Por fim, verificou-se a formação de metal dobrado relacionado diretamente com a grafita, mostrando que esta fase tem relação direta com a ocorrência deste fenômeno.

**Palavras-chave:** Ferro fundido cinzento; Ferro fundido vermicular; Ensaio de riscamento, Grafita; Mecanismos de desgaste; Metal dobrado.

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos aspectos estudados no projeto e construção de um motor de combustão interna (MCI) destaca-se neste trabalho o sistema tribológico formado entre a parede do cilindro e os anéis do pistão. Segundo Stachoviak e Batchelor (2001) grande parte das perdas de rendimento por atrito de um motor ocorrem neste par.

O atrito, no par cilindro-anel, está diretamente relacionado com o acabamento das superfícies em contato, especialmente a do cilindro (Mocellin, 2007). Esta superfície comumente é obtida por brunimento, tendo como características de sua textura os platôs e sulcos. Em especial, os sulcos são de grande importância para a lubrificação do sistema uma vez que permite que o óleo flua entre os platôs (Cabannes *et al.*, 2014), sendo responsáveis também pela retenção de óleo na parede (Mocellin, 2007). Esta topografia, também está relacionado ao desgaste, a vida útil e a emissão de poluentes de um MCI (Mezghaniet. *al.*, 2013).

Outro importante aspecto a ser observado é o material de construção do cilindro. Frequentemente, os ferros fundidos são utilizados na fabricação dos cilindros, os quais possuem características que podem influenciar no atrito com o anel (Chiaverini, 2012). Estas características são fortemente influenciadas pela fase grafita, a qual pode atuar como lubrificante sólido no par tribológico e também é responsável por causar uma descontinuidade na matriz do material. Alguns fatores como o material do molde de fundição e a espessura da parede da peça fundida podem afetar a formação da grafita. Os blocos de MCI comumente apresentam diferentes espessuras de parede, ao longo do eixo axial, e consequentemente diferentes taxas de resfriamento em cada seção. Paredes mais espessas tendem a sofrer um resfriamento mais lento, propiciando uma maior decomposição da cementita em ferrita e grafita; com isso, observa-se maior fração de grafitas em maiores espessuras (Mocellin, 2007).

Estudo recente de Vale (2016) avaliou amostras de ferro fundido cinzento e vermicular com duas espessuras de parede obtidas a partir de blocos de MCIs. Através de uma técnica de análise de imagem proposta foi verificado que as larguras dos sulcos são estatisticamente iguais e com grande dispersão. Isso foi associado ao processo de fabricação no qual os gumes de corte da ferramenta de brunimento possuem uma geometria indefinida. Ainda, observaram-se grande obstrução de sulcos de brunimento por material dobrado (*folded metal*) e forte correlação entre esta grandeza e a fração de grafita para os materiais avaliados (Vale, 2016). Segundo Mezghani *et al.* (2007) o metal dobrado tende a aumentar o COF; e caso seja removido durante a operação pode causar abrasão a três corpos resultando em riscos axiais no cilindro (Papadopoulos, 2007). Estudos de Pretko *et al.* (2014) apresentaram resultados de redução de metal dobrado em ensaios de desgaste de cilindro-anel realizado em ferro fundido vermicular.

Diante disso, verificar a resposta tribológica, dos mesmos materiais avaliados por Vale (2016), em um processo de riscamento, mostrou-se uma oportunidade. Este estudo objetiva avaliar os fenômenos ocasionados por um processo de riscamento em uma das direções de sulcos de brunimento, a partir de uma superfície plana e polida. Além das avaliações de geometria de sulco e de coeficiente de atrito, buscou-se a caracterização dos fenômenos de remoção de material e sua correlação com grafita e propriedades da matriz dos materiais. Ao contrário do processo de brunimento, neste estudo, propõe-se realizar o riscamento com uma ferramenta de corte com geometria definida, permitindo assim uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos diante de uma geometria de corte conhecida e condições de corte controladas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

As amostras foram retiradas de cilindros de MCI de dois materiais distintos: ferro fundido cinzento (FC 250) e ferro fundido vermicular (GJV 250) cujas informações sobre as respectivas propriedades mecânicas estão disponíveis em Guesser (2009).

Neste bloco de MCI existem regiões com paredes de espessuras diferentes. Assim, as amostras foram retiradas de dois quadrantes dos cilindros, de forma que os corpos de prova tivessem espessuras distintas. As amostras de parede grossa (PG) apresentaram espessura de 7,4 ( $\pm 0,4$ ) mm, enquanto esta medida para as amostras de parede fina (PF) foi de 3,9 ( $\pm 0,6$ ) mm.

As amostras foram embutidas obedecendo a um padrão de posicionamento pré-estabelecido. Tal processo teve como objetivo preservar a direção axial do cilindro para que todas as análises realizadas mantivessem como referência a face de fogo (superfície superior do cilindro na qual é montado o cabeçote).

### 2.2. Metodologia dos ensaios de riscamento

Os ensaios de riscamento foram executados em equipamento CETR-UMT- Bruker (*Comprehensive Materials Testing for Mechanical Tribological Properties*), apresentado na Figura 1 (a) e disponível no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da UTFPR. Além disso, para permitir a fixação adequada dos corpos de prova na base do tribômetro, um dispositivo foi projetado e construído, o qual é apresentado na Figura 1(b).

Utilizou-se a célula de carga de 10 N com frequência de aquisição de dados de 1 kHz e com intervalo de aquisição do equipamento de 0,001 s. Os dados obtidos em cada instante de tempo são: tempo ( $t$  [s]), força normal ( $F_N$  [N]), força de atrito ( $F_{at}$  [N]), coeficiente de atrito cinético (COF [-]) e a posição da base ( $x$  [mm]).



(a) (b)

**Figura 1. (a) Aparato utilizado para realização dos ensaios. (b) Dispositivo montado sobre a base do tribômetro.**

A ferramenta utilizada no riscamento foi de carbeto de tungstênio (WC), com geometria triangular e raio da ponta de 0,4 mm. A pré-carga e a força normal para os ensaios foram de 2 e 0,6 N, respectivamente. A amostra foi posicionada à um ângulo de 15° em relação ao eixo axial da amostra. Esta direção foi escolhida, pois é um dos ângulos dos sulcos de brunimento. Entende-se que este procedimento é importante devido à anisotropia destes materiais. O comprimento do risco e a velocidade de avanço foram definidos como 2,5 mm e 0,17 mm/s, respectivamente. Realizaram-se cinco repetições em cada amostra.

### 2.3. Caracterização das amostras

A quantificação da grafita foi realizada aplicando-se rotina desenvolvida em MATLAB® em imagens metalográficas sem ataque químico. Foram avaliados dois parâmetros: a fração de grafita e o número de grafitas. Uma discussão e quantificação mais ampla, para estes materiais, podem ser encontrados em Vale (2016). Os resultados apresentados são médias e desvios padrão de 12 imagens.

Realizaram-se medições de macrodureza Vickers - HV 20, conforme norma NBR NM 188-1 ABNT (1999). Utilizou-se carga de 196,1 N e tempo de aplicação de carga de 10s. Devido à elevada dispersão dos dados para as amostras de cilindros, realizaram-se maior número de medições, em um total de 20. Esta dispersão é resultado da influência da grafita, que pode estar próxima a indentação ou logo abaixo da superfície. Para a apresentação dos dados, o 1° e 4° quartis foram desconsiderados com o intuito de eliminar medições muito afastadas da média.

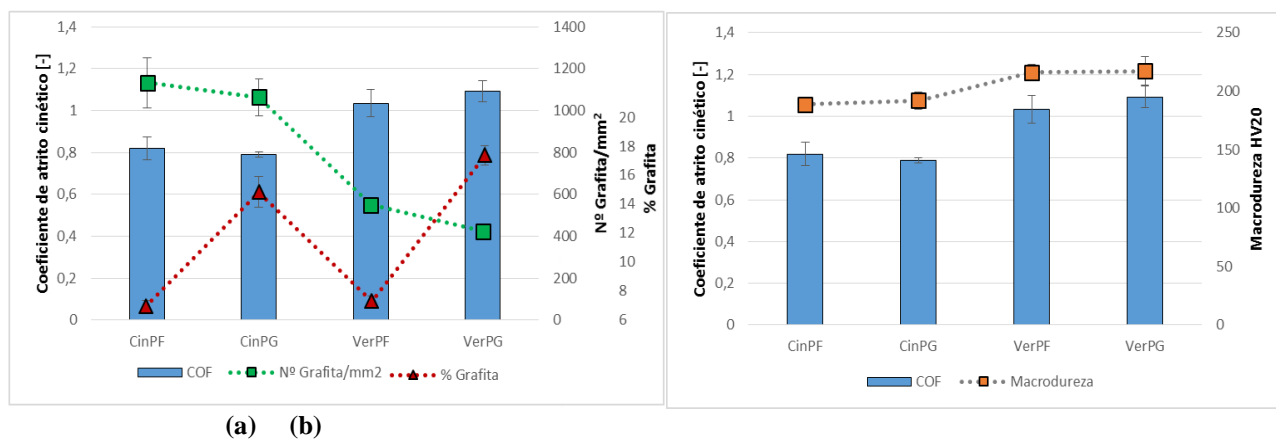
Também, realizaram-se caracterizações nos riscos com microscopia eletrônica por varredura (MEV), em equipamento da Zeiss modelo EVO-MA15; e análise topográfica por interferometria de luz branca, em equipamento da Taylor Hobson modelo CCI Talysurf Lite. Em especial a interferometria foi realizada ao longo de todo risco.

Uma avaliação interessante foi conseguida através da discussão do comportamento do COF ao longo de todo risco. Além disso, cada resultado deste foi confrontado com as respectivas imagens metalográficas (microscopia ótica) e topográficas (interferômetro). Esse procedimento foi realizado em um único risco de cada material.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1. Coeficiente de atrito em função das propriedades dos materiais

O resultado do coeficiente de atrito (COF) médio é apresentado na Figura 2. Observa-se que este parâmetro foi diferente para cada material com maiores valores para o ferro fundido vermicular. Contudo, o COF mostrou-se independente da espessura do material com valores estatisticamente iguais, com 95% de confiança.



**Figura 2. Correlação entre o COF e (a) número de grafitas por mm<sup>2</sup> e % de grafita; e (b) a macrodureza HV<sub>20</sub>.**

Buscando explicar o comportamento do COF, realizaram-se testes de correlação entre esta grandeza e os resultados de quantificação da grafita e da macrodureza dos materiais. Com isso, algumas conclusões relevantes foram obtidas. Verificou-se o COF teve forte correlação negativa com o número de grafitas, com valor de -0,987. Desta forma, o ferro fundido cinzento, que possui uma maior quantidade de grafita por mm<sup>2</sup>, obteve os menores valores de COF nos ensaios de riscamento, conforme é mostrado na Figura 2 (a). Todavia, o teste mostrou baixa correlação entre o COF e a fração de grafita, com valor de 0,23. De fato, a presença da grafita mostrou grande influencia nos ensaios de riscamento; e as discussões e evidências apresentadas nas seções seguintes, sugerem que as interações em regiões com maior número de grafitas foram mais efetivas na perturbação do COF e nos mecanismos observados na remoção de material.

Também, comprovou-se forte correlação, mas agora positiva, entre o COF e a macrodureza dos materiais, com valor de 0,977, conforme Figura 2 (b). Assim, amostras com valores menores de dureza (ferro fundido cinzento) ofereceram menor resistência ao avanço da ferramenta durante o riscamento, de forma que o COF médio é inferior nestes casos. Este comportamento era esperado já que a macrodureza mantém uma relação com a tensão última a tração (Callister, 2007).

### 3.2. Coeficiente de atrito em função da distância

As Figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam os resultados de COF, para um risco realizado em cada material, em função do comprimento do risco, juntamente com suas respectivas imagens metalográficas e de topografias.

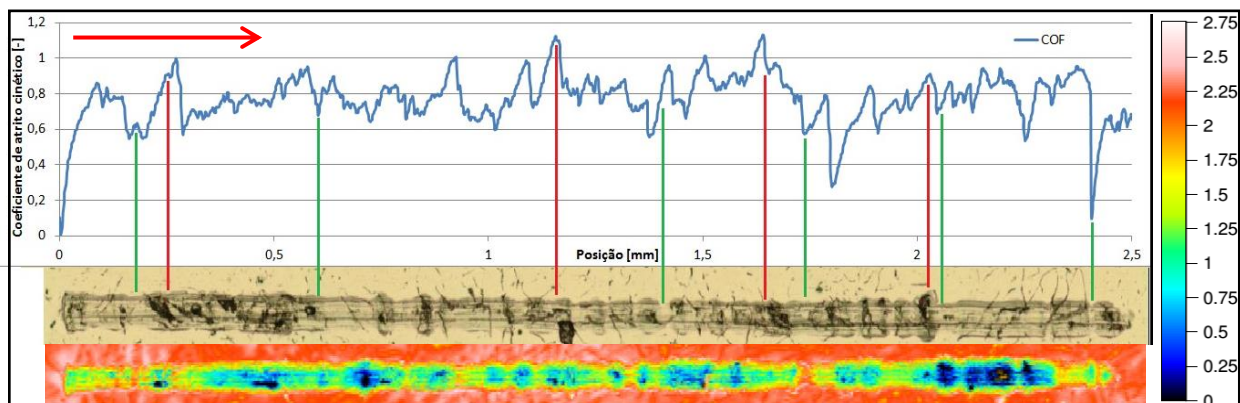


Figura 3. Correlação do COF, imagem do risco obtida por microscopia ótica e interferometria: CinPF.

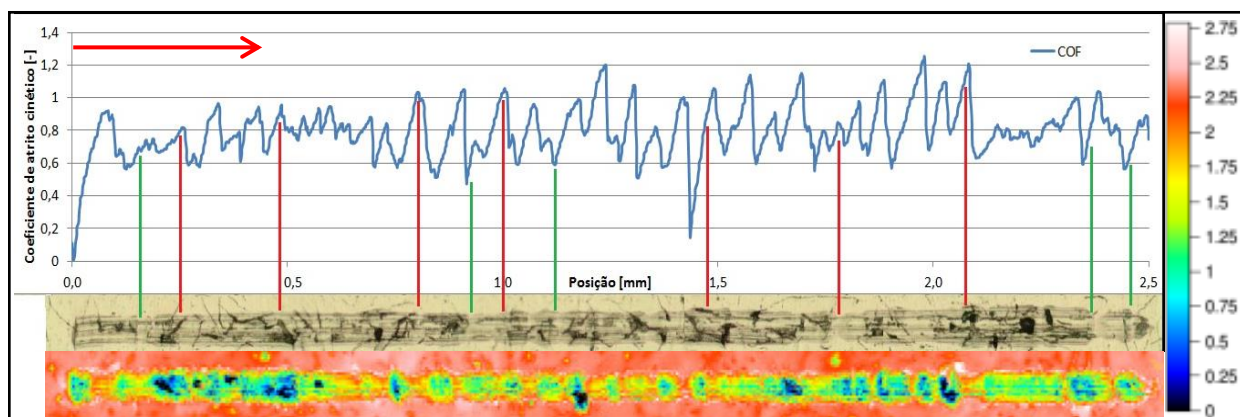


Figura 4. Correlação do COF, imagem do risco obtida por microscopia ótica e interferometria: CinPG.

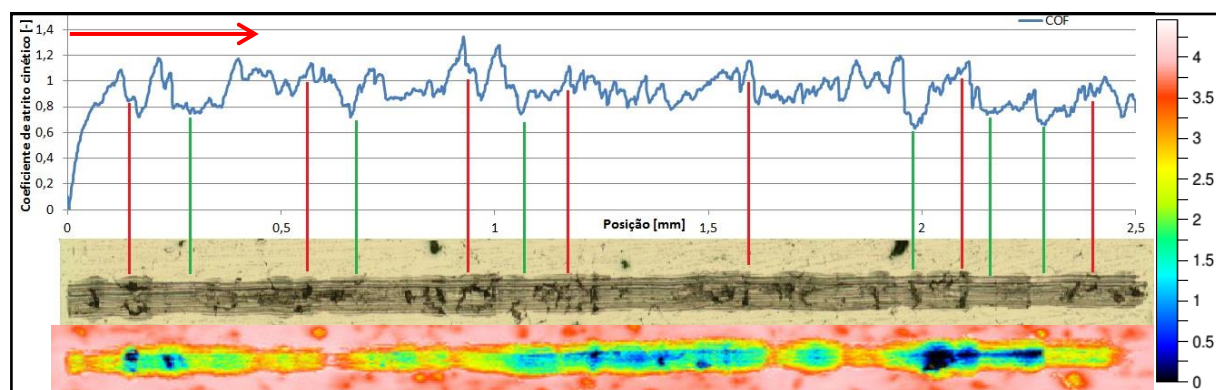


Figura 5. Correlação do COF, imagem do risco obtida por microscopia ótica e interferometria: VerPF.

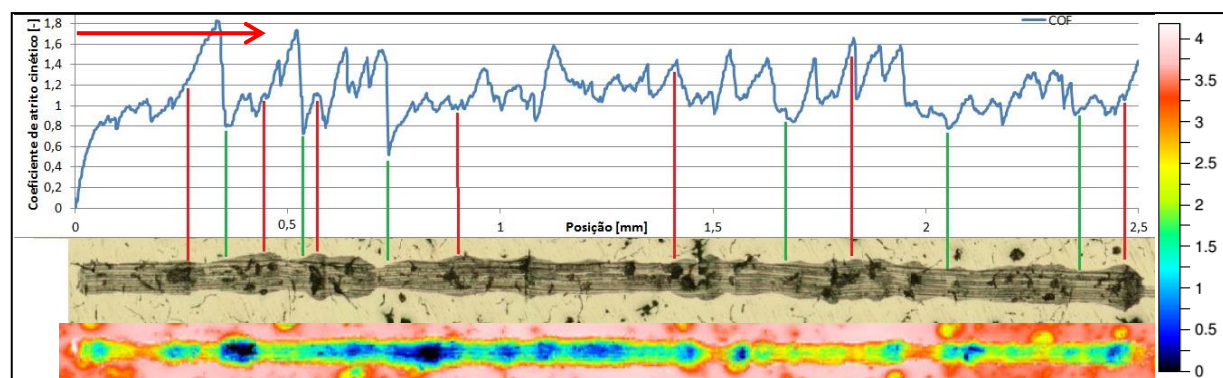


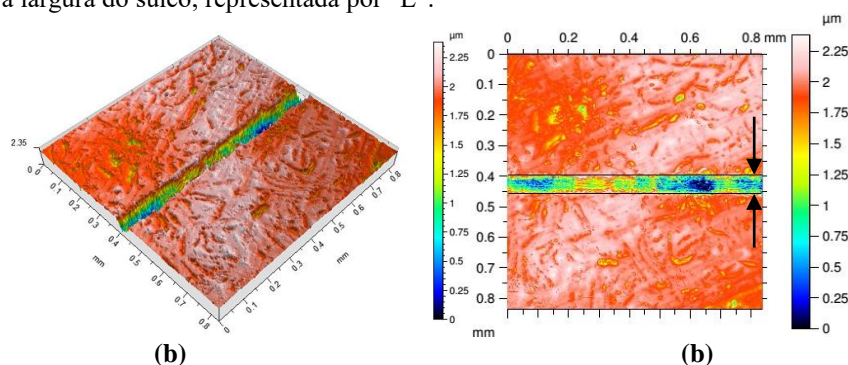
Figura 6. Correlação do COF, imagem do risco obtida por microscopia ótica e interferometria: VerPG.

Observa-se que o COF, de modo característico apresentou grande variação ao longo do ensaio de riscamento para todos os materiais. Chama-se a atenção para a grande influência que as grafitas tem no comportamento do COF. Causando mudanças bruscas em transições de regiões com menor número de grafitas, para uma região com maior quantidade. Também, verifica-se que regiões com mais grafitas tiveram a tendência de ter maiores larguras e profundidades de sulcos. Estas regiões são identificadas, nas figuras, com linhas verdes (menor concentração) e vermelhas (maior concentração de grafita).

Nota-se que na amostra de ferro fundido cinzento parede grossa (CinPG) são mais nítidos os picos e vales do gráfico do COF, comparando com o mesmo material de parede fina (CinPF). De forma geral, esta variação pode estar associada com uma maior formação de grafita na amostra de parede grossa. Este maior percentual de grafita tende a causar mais descontinuidades da matriz levando assim a quedas mais bruscas do coeficiente de atrito, de forma localizada.

Para as amostras de ferro fundido vermicular os resultados obtidos foram similares ao do cinzento. Especialmente na amostra de parede grossa (VerPG), mostrada na Figura 6, é nítido as quedas do COF associada a uma variação de largura do sulco. Como se trata de uma ferramenta de corte com geometria definida esta variação de largura está atrelada a um aprofundamento da ferramenta em zonas de maior concentração de grafita. Após a saída da ferramenta desta zona, o risco tende a um estreitamento e uma queda do COF, possivelmente decorrente da remoção de grafita. Através da escala de cores verificou-se também que para o ferro fundido vermicular (Figuras 5 e 6) a profundidade máxima ao longo do risco foi maior do que para o ferro fundido cinzento (Figuras 3 e 4), porém apresentando grande variação para todos os materiais.

Utilizando a técnica de interferometria de luz branca (IDLB), conforme mostrado na Figura 7 (a), foi possível realizar a medição de largura do sulco. Devido a grande variação de largura em cada seção transversal do sulco optou-se por traçar uma linha média a fim de representar a borda do sulco, conforme é apresentado na Figura 7 (b), e representar com menor dispersão a largura do sulco, representada por “L”.



**Figura 7. (a) Imagem em 3D obtida por interferometria e (b) detalhe da medição de largura (L) do sulco.**

Os resultados de largura são apresentados na Figura 8. Estatisticamente, somente a amostra de ferro fundido cinzento parede grossa (CinPG) apresentou um valor de largura significativamente menor, muito embora seja possível verificar a tendência de materiais de parede fina ter menor largura de sulco.

Os resultados de largura de sulcos, a exemplo de quantificações das superfícies brunidas (Vale 2016), sugerem pouca influência da matriz do material para sulcamento com ferramenta de geometria definida e condições de ensaio controladas. Ainda, os valores de largura de sulco, conforme constatação nas Figuras 3-6, apresentam relação com a fração local de grafita durante a interação ferramenta-material.

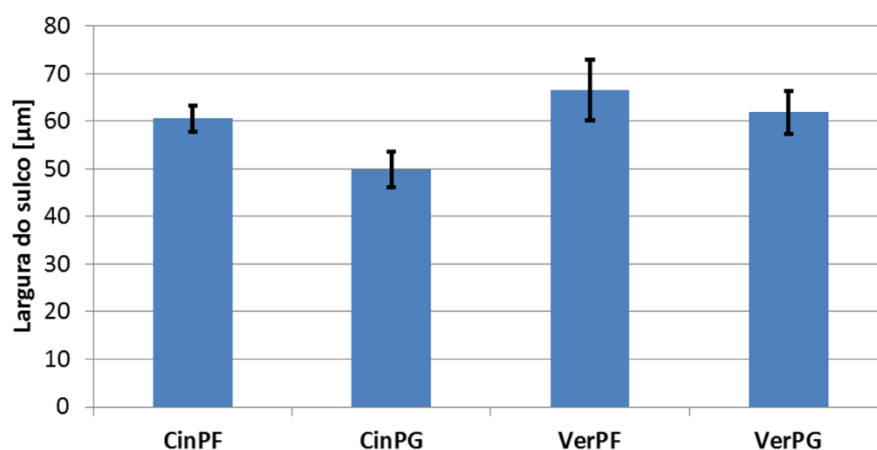


Figura 8. Média das larguras dos sulcos nas amostras.

### 3.3. Grafita versus mecanismos de desgaste

A presença de grafita nos materiais estudados teve papel fundamental para a ocorrência de alguns fenômenos durante o riscamento. A grafita sendo uma fase menos rígida que a matriz perlítica dos ferros fundidos estudados (Guesser, 2009), acaba atuando como uma descontinuidade para o material. Assim, durante a interação da ferramenta-material observaram-se alguns mecanismos e fenômenos que são apresentados a seguir.

O efeito mais evidente da grafita durante o riscamento foi as alterações na largura do sulco e no COF, conforme apresentado na seção anterior. A Figura 9 (a) mostra um exemplo de aumento da largura do risco para Cin-PG, de 48,1 para 63,3 μm. Observa-se que o aumento da largura aconteceu em uma região do material com maior fração de grafita, associada, então, com uma menor resistência mecânica. Outro exemplo relevante, apresentado na Figura 9 (b), é um estreitamento 90,3 para 69,2 μm, em uma região isenta de grafita.

Chama-se atenção para a presença de riscos de abrasão nas regiões de riscamento, associado ao mecanismo de desgaste abrasivo, que é característico nestes tipos de ensaio (Stachoviak e Batchelor, 2001).

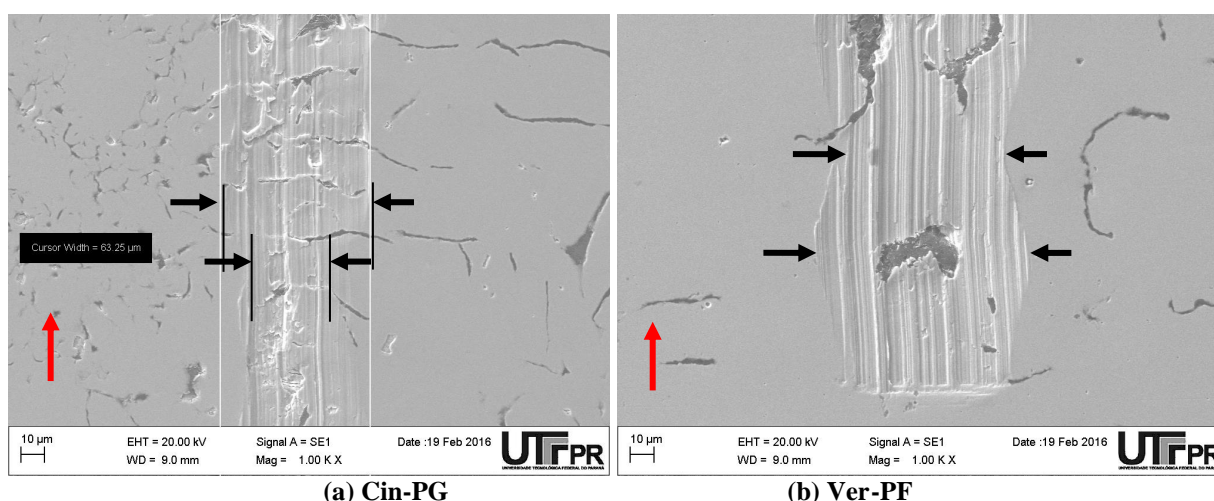
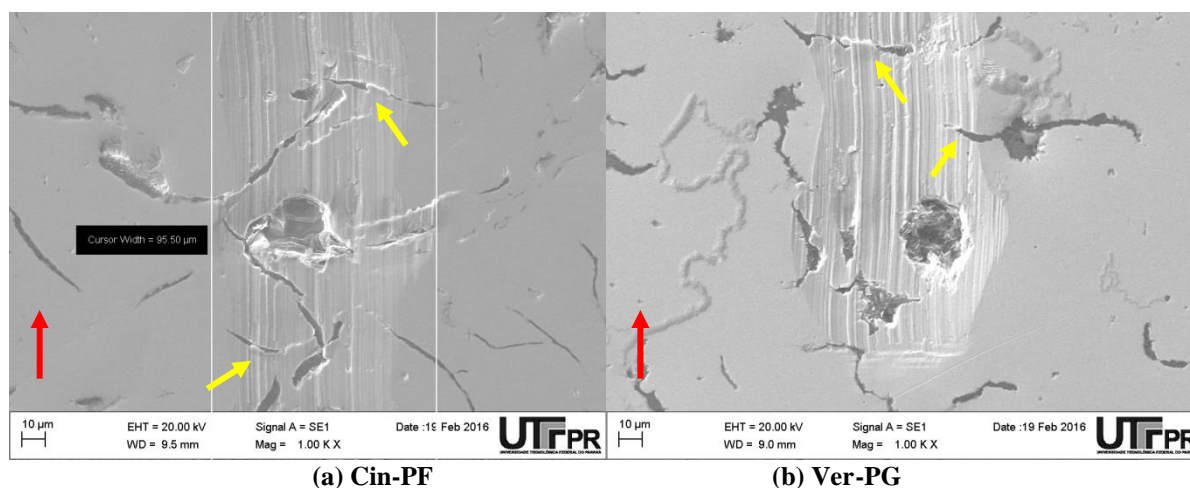


Figura 9. Exemplos de variação de largura do risco.

Outro fenômeno diretamente relacionado com a presença da grafita foi a ocorrência de metal dobrado durante o processo de riscamento. Este fenômeno foi observado nos quatro tipos de materiais estudados e de modo recorrente. A Figura 10 mostra exemplos de ocorrência de metal dobrado para o CinPF e VerPG. Pode-se observar que o metal dobrado, indicado pelas setas amarelas, teve a tendência de cobrir a grafita. Ainda, chama-se a atenção que o metal dobrado se apresentou como porções de material conectados a uma das bordas da grafita e o sentido em que se dá a cobertura desta é o mesmo sentido do riscamento, o qual é indicado pelas setas vermelhas. Entende-se, desta forma, que

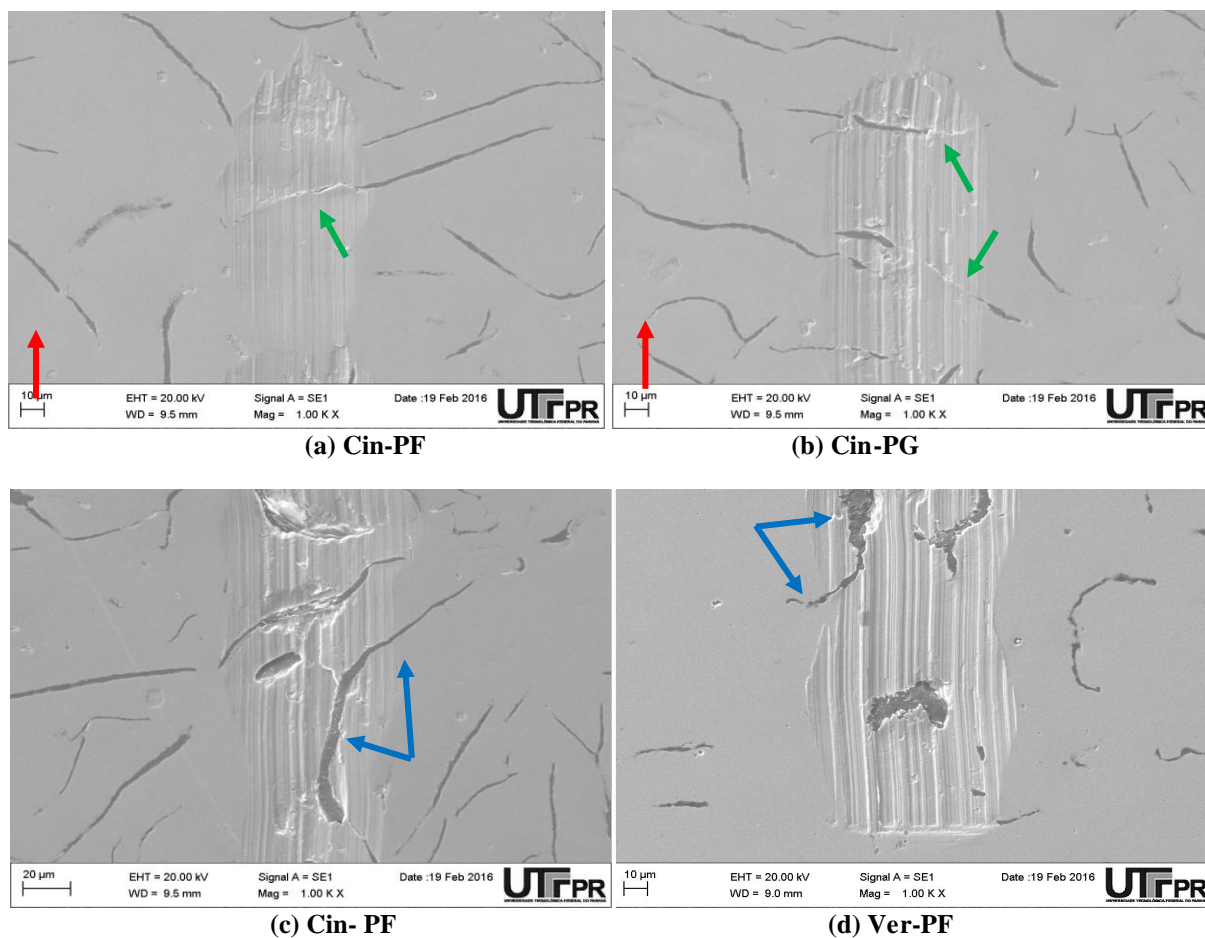
a descontinuidade da matriz, devido à grafita, faz com que haja perda de eficiência de corte; e através de um processo de "*burnishing action*" (Griffiths, 1986) essas porções de material são forçadas para dentro da grafita, por mecanismos de deformação plástica. Vale ressaltar que a orientação do veio de grafita, em relação ao sentido de riscamento, teve influência na ocorrência do metal dobrado; sendo que o fenômeno ocorre de modo predominante quando a grafita tende a estar perpendicular ao sentido do risco. A evidência da ocorrência de metal dobrado, associado diretamente à presença de grafita, corrobora conclusões em Vale (2016) que apresentou resultados em que houve forte correlação entre a fração de grafita e o percentual de metal dobrado para os mesmos materiais.



**Figura 10. Exemplos de formação de metal dobrado: (a) Cin-PF (b) Ver-PG**

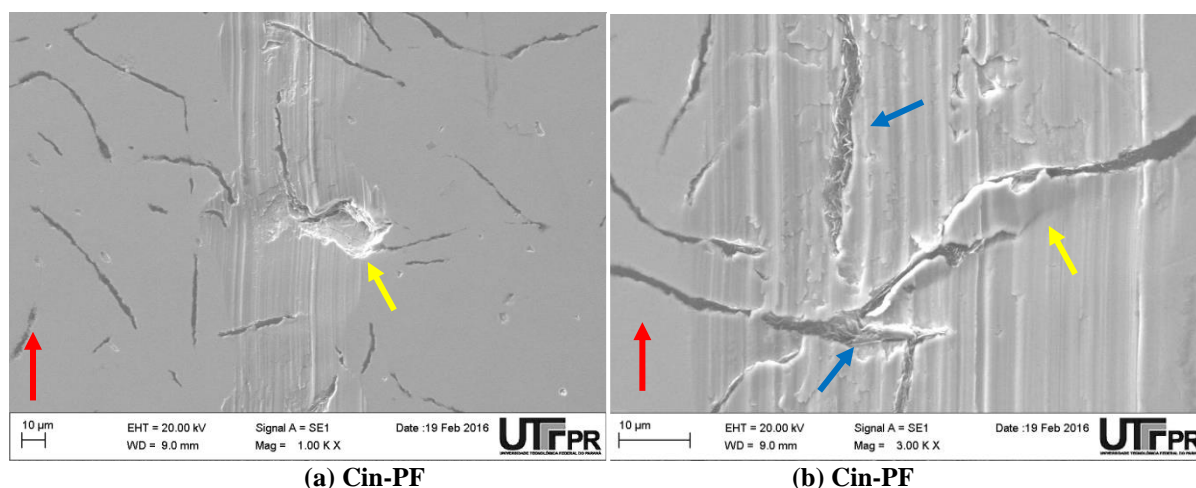
Verificou-se também a tendência de recobrimento total da grafita, conforme apresentado na Figura 11 (a) e (b). Este fenômeno, indicado pelas setas verdes foi mais efetivo nas amostras de ferro fundido cinzento. Outro fenômeno, com ocorrência para todos os materiais e com efeito contrário ao anterior, foi a exposição da grafita, causada principalmente pela remoção de material sobre os veios desta. A Figura 11 (c) e (d) mostram alguns exemplos, indicados com setas azuis. Chama-se a atenção para a diferença de largura dos veios, que são maiores para a região do risco.





**Figura 11. Exemplos da ocorrência dos fenômenos de recobrimento e exposição da grafita.**

Observou-se também lascamento com remoção de fragmentos da matriz. Um exemplo mostrado na Figura 12 (a) possibilita verificar que o lascamento aconteceu sobre um veio de grafita, o qual deve ter contribuído para a redução da seção, com conseqüente aumento de tensão localizada e remoção preferencial de um fragmento de material, ao invés do processo de corte. Ainda na Figura 12 (b), verifica-se uma porção de material, indicada pela seta amarela, que está sobre um veio de grafita e fracamente solidário à matriz. Entende-se que porções de material nestas condições foram propícias para o lascamento. Por fim, chama-se atenção que houve a exposição da grafita, como indicada na Figura 12 (b), com possível extrusão desta. Entende-se que a grafita no contato pode ter atuado como lubrificante sólido durante o processo de riscamento (Hutchings, 1992).



(a) Cin-PF

(b) Cin-PF

**Figura 12. Exemplos do mecanismo de lascamento.**

#### 4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados do presente trabalho, em que se avaliou os ferros fundidos cinzento e vermicular em ensaios de riscamento, concluiu-se que:

- Não foi observada variação significativa do COF relacionada à espessura de parede do cilindro. Todavia, esse parâmetro foi distinto para cada material, apresentando maiores valores para o ferro fundido vermicular;
- Através de testes de correlação, O COF manteve forte correlação positiva com a macrodureza dos materiais; e forte correlação negativa com o número de grafitas.
- A presença de grafita teve considerável influência nos resultados dos ensaios de riscamento. Observou-se grande variação de COF e de largura dos riscos, principalmente em regiões de transição de menor para maior quantidade de grafita.
- Verificou-se que a grafita teve influencia nos mecanismos de dano observados durante o ensaio de riscamento. Citam-se: exposição e recobrimento total da grafita, lascamento de regiões próximas a veios de grafita e formação de metal dobrado. Em especial, a constatação de formação de metal dobrado, relacionado diretamente com a fase grafita, é uma conclusão relevante deste trabalho, corroborando resultados de pesquisas recentes sobre o tema.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM), ambos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTPPR, Campus Curitiba. Em especial ao Laboratório de Microscopia Eletrônica pelo apoio.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira De Normas Técnicas, Materiais metálicos – Dureza Vickers – Parte 1: Medição da dureza Vickers: NBR NM 188 – 1, Rio de Janeiro, 1999, p. 11.
- Cabanettes, F., 2005, “Characterization of Cylinder Liners by Image Analysis”, Masterthesis, Ecole Nationale d’Ingénieurs de Saint-Etienne – Halmstad University, Halmstad, Sweden.
- Callister, William D., 2007, “Materials Science and Engineering: An Introduction. 7. Ed”, New York: John Wiley & Sons.
- Chiaverini, V., 2012, “Aços e ferros fundidos: Características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos”, 7. ed., São Paulo: AMB.
- Dimkovski, Z., 2011, “Surface of Honed Cylinder Liners”, 2011. 75f. Tese de Doutorado – Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Griffiths, B.J., 1986, “Problems in Measuring the Topography of Machined Surfaces Produced by Plastic Deformation Mechanisms”, Wear. v. 109, p. 195–205.
- Guesser, W. L., 2009, “Propriedades mecânicas dos ferros fundidos”, São Paulo, SP: Blucher, 336 p. ISBN 9788521205012.
- Hutchings, I.M., 1992, “Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials”, Edward Arnold.
- Mezghani, S.; Demirci, I.; Zahouani, H.; Mansori, M. L., 2012, “The effect of groove texture patterns on piston-ring pack friction”, Precision Engineering. v. 36, p. 210-217.

- Mocellin, F., 2007, “Desenvolvimento de tecnologia para brunimento de cilindros de blocos de motores em ferro fundido vermicular”, 2007. 264 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Papadopoulos P., Priest M. and Rainforth WM., 2007, “Investigation of fundamental wear mechanisms at the piston ring and cylinder wall interface in internal combustion engines”, Proc. Inst. Mech. Eng., Part J: J. Eng. Tribol; 221: 333-343.
- Pretko, W. C.; Pintaude, G.; Carlos, H. S.; Vale, J. L., 2014, “Avaliação da alteração de topografia e de *folded metal* em ferro fundido vermicular imposta por ensaio de desgaste”, VII Mostra de pesquisas após-graduação, Curitiba.
- Sabeur, M.; Ibrahim, D.; Mohamed, E. M.; Hassan, Z., 2013, “Energy efficiency optimization of engine by frictional reduction of functional surfaces of cylinder ring– pack system”, Tribology International. v. 59, p. 240-247.
- Stachowiak, G. W.; Batchelor, A. W., 2001, “Engineering Tribology”, 2 ed. EUA: ButterworthHeinemann.
- Vale, J. L., 2016, “Influência da microestrutura de ferros fundidos na ocorrência de *folded metal* e no comportamento tribológico em superfícies brunidas”, Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia de Mecânica e de Materiais). UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, *no prelo* 2016.

## 7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# TRIBOLOGICAL EVALUATION OF GRAY CAST IRON AND COMPACTED GRAPHITE CAST IRON BY SCRATCH TEST

Matheus Cortz, [matheusc32@hotmail.com](mailto:matheusc32@hotmail.com)<sup>1</sup>

Vinicius Moreira Silva Bertolini, [vini.bertolini@gmail.com](mailto:vini.bertolini@gmail.com)<sup>1</sup>

Carlos Henrique da Silva, [carloshs@utfpr.edu.br](mailto:carloshs@utfpr.edu.br)<sup>1</sup>

João Luiz do Vale, [joaovale@utfpr.edu.br](mailto:joaovale@utfpr.edu.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal University of Technology – UTFPR – Campus Curitiba.

<sup>2</sup> Federal University of Technology – UTFPR – Campus Londrina.

**Abstract:** *The honed surface of the cylinders of an internal combustion engine (ICE) has a texture that can be divided into plateaus and grooves. In particular, the grooves act as lubricant reservoirs, allowing the oil to flow between the plateaus. Recent studies of honed surfaces of gray and compacted graphite cast iron, with two different wall thicknesses, show that the width of the honing grooves have great dispersion and are statistically equal. Also, it was found differences in the fraction and number of graphite in addition to a strong correlation between the fraction of graphite and folded metal occurrence. Therefore, checking the tribological response from the scratching process on these samples proved to be an opportunity. This work carried out scratching tests using a cutting tool with a defined geometry made of tungsten carbide. Grooves were made in one of the conventional honing directions relatively to the cylinder axis. The normal load used on the tribometre was 0.6 N at a speed of 0.17 mm / sec resulting in a groove of 2.5 mm in length. For other characterizations were used: optical microscope, white light interferometre and scanning electron microscope. It was observed that graphite had a significant influence on the tests, causing great variation in the coefficient of friction (COF) and width of the grooves, particularly during the transition of regions with low to high fraction of graphite. The average COF showed a direct correlation to the number of grafitas and inverse to macrohardness of the materials. It was observed that due to the presence of graphite occurred phenomena of exposure and chipping of material near the graphite flakes. Finally, it was found that the folded metal formation is directly related to the graphite, showing that this phase has a direct relationship with the occurrence of this phenomenon.*

**Keywords:** *Gray cast iron; Compacted graphite iron; Scratching test, Graphite; Wear mechanisms; Folded metal.*