

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GUSTAVO TAKEHARA

**INFLUÊNCIA DA GRAFITA NA FORMAÇÃO DE METAL DOBRADO
EM CILINDROS DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DE
FERRO FUNDIDO CINZENTO E VERMICULAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

(Tcc2 - Nº de Inscrição - 05)

CURITIBA

2015

GUSTAVO TAKEHARA

**INFLUÊNCIA DA GRAFITA NA FORMAÇÃO DE METAL DOBRADO
EM CILINDROS DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DE
FERRO FUNDIDO CINZENTO E VERMICULAR**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 – Tcc2 - do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde

Co-orientador: Prof. MScs. João Luiz do Vale

CURITIBA

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “INFLUÊNCIA DA GRAFITA NA FORMAÇÃO DE METAL DOBRADO EM CILINDROS DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DE FERRO FUNDIDO CINZENTO E VERMICULAR”, realizado pelo aluno Gustavo Takehara, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde

DAMEC, UTFPR Câmpus Curitiba

Orientador

Prof. MScs. João Luiz do Vale

COEME, UTFPR Câmpus Londrina

Co-orientador

Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva

DAMEC, UTFPR Câmpus Curitiba

Avaliador

Prof. Dr. Walter Luís Mikos

DAMEC, UTFPR Câmpus Curitiba

Avaliador

Curitiba, 16 julho de 2015.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde por todo o aprendizado e confiança ao longo dos últimos três anos.

Ao Prof. MScs. João Luiz por todo o auxílio e pela disponibilização da rotina de sobreposição de imagens.

A Daphene Solis e a Fernanda Kouketsu por todo o apoio e sinceridade, além da amizade.

A Marina Grabarski e ao Jorge Tonella pelo auxílio nas preparações metalográficas.

Ao Prof. Dr. Walter Luís Mikos e ao Prof. Dr. Carlos Henrique pelas contribuições para a conclusão deste projeto.

E a minha família pelo suporte dado durante todo o curso de Engenharia Mecânica.

RESUMO

TAKEHARA, Gustavo. Influência da grafita na formação de metal dobrado em cilindros de motores de combustão interna de ferro fundido cinzento e vermicular. 2015. 123 f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Este trabalho discute a influência da grafita na formação de metal dobrado nos sulcos de brunimento de cilindros de motores de combustão interna de ferro fundido cinzento e vermicular, utilizando-se de técnicas de sobreposição de imagem de modo a se avaliar a existência da relação entre o metal dobrado e a presença, forma e distribuição da grafita. Foram analisadas duas regiões de cada cilindro, em quadrantes oposto, que apresentam diferentes espessuras de parede. Medições de topografia 3D via interferometria de luz branca, visando a obtenção dos dados topográficos e de parâmetros de rugosidade 3D, foram realizadas, além de preparações metalográficas para identificação das grafitas. A quantificação de metal dobrado foi realizado com a rotina computacional desenvolvida ao longo deste trabalho. Em termos da avaliação dos parâmetro de rugosidade 3D não há diferenças relevantes entre as diferentes espessuras dos cilindros e nem em relação ao uso dos dois tipos de materiais. Mostrou-se a existência de diferentes percentuais de metal dobrado tanto em relação aos materiais quanto a variação de espessura. A morfologia e distribuição da grafita também apresentaram diferenças significativas ao se variar a espessura do cilindro, além da evidente diferenças entre os materiais. Utilizando análises de regressões lineares e usando-se os dados obtidos da sobreposição de imagens, obteve-se que a grafita, apesar de se manifestar de forma diferentes em relação a variação de espessura e de material assim como o metal dobrado, apresenta baixa correlação com a formação de metal dobrado, indicando que outros fatores são mais influentes para a ocorrência do metal dobrado.

Palavras-chave: Cilindro. Grafita. Metal dobrado.

ABSTRACT

TAKEHARA, Gustavo. Influência da grafita na formação de metal dobrado em cilindros de motores de combustão interna de ferro fundido cinzento e vermicular. 2015. 123 f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

This study aimed to discuss the influence of graphite on formation of folded metal in the honing grooves of cylinder blocks of grey cast iron and compacted graphite iron, using image overlay technique, in order to assess the existence the relationship between folded metal and the presence, form and graphite distribution. Two regions of each cylinder were analyzed, in opposite quadrants that represent different wall thickness. Measurements of 3D topography were made by white light interferometry, in order to obtain topographic and 3D roughness parameters data, in addition to the metallographic preparations for identification of graphite. The quantification of folded metal was made with computational routine developed throughout this work. In terms of assessing of 3D roughness parameters, there are no significant differences between different cylinder thicknesses, or in regarding the use of two kinds of material. The tests showed the existence of different percentages of folded metal in relation to material and thickness variation. The morphology and the distribution of the graphite also showed significant differences when there was variation to the cylinder thickness, in addition to the obvious differences between the materials. The study showed that utilizing analyses of linear regressions and using the obtained data of image overlay, it is possible to verify that the graphite, although to manifest in different ways in relation to thickness and material variation as well as folded metal, it presents low correlation with the formation of folded metal, so we can see that other factors are most influential for occurrence to the folded metal.

Keywords: Cylinder. Graphite. Folded metal.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – (a) Vista em corte de um MCI; (b) Conjunto pistão-anel-cilindro; (c) Interface entre o anel raspador de óleo e a superfície do cilindro	16
Figura 2.1: Bloco e cilindro em um único componente (Bloco integral)	21
Figura 2.2: Bloco de um MCI com camisas	21
Figura 2.3: Produção de blocos de MCI na Europa.....	22
Figura 2.4: (a) Microestrutura típica de um FFC; (b) Aspecto 3D de uma grafita lamelar	24
Figura 2.5: Seção transversal de um bloco integral na região do cilindro	25
Figura 2.6: Influência da espessura na resistência a tração para cinco percentuais típicos de carbono equivalente em FFCs	26
Figura 2.7: (a) Microestrutura típica de um FFV com 10% de nodularização; (b) Aspecto 3D de uma grafita vermicular (roxo)	28
Figura 2.8: Microestrutura de um FFV com espessura de (a) 3 mm e (b) 13-mm.....	29
Figura 2.9: Processo de brunimento de um cilindro de MCI.....	31
Figura 2.10: Representação da remoção de picos (linhas tracejadas) pelo brunimento de platô	32
Figura 2.11: Perfil de rugosidade da superfície do cilindro antes (a) e após o amaciamento (b)	33
Figura 2.12: Exemplicação do (a) critério dos oito vizinhos e da (b) identificação dos cumes.....	34
Figura 2.13: Diferença física entre dois valores de Ssc	35
Figura 2.14: Determinação dos parâmetros Sk, Spk, Svk, Sr1 e Sr2.....	35
Figura 2.15: Presença de FM em uma superfície brunida	38
Figura 2.16: Superfície desgastada de um cilindro após ensaio tribológico.....	39
Figura 2.17: Efeito das interrupções de fluxo de lubrificante nos sulcos no coeficiente de atrito	40

Figura 2.18: Topografia 3D de uma superfície brunida	41
Figura 2.19: Perfil 2D gerado a partir da topografia 3D da Figura 2.11	42
Figura 2.20: Binarização e identificação das linhas via transformada de Hough	42
Figura 2.21: Identificação das regiões de sulcos e de FM pela utilizando a rotina de Dimkovski (2011).....	43
Figura 2.22: (a) Topografia; (b) Superfície com as regiões orientadas em relação ao ângulo de brunimento.....	44
Figura 2.23: (a) Binarização e identificação das potenciais regiões de sulcos ideais (pixels azuis); (b) Identificação do FM (pixels brancos) no interior dos sulcos	45
Figura 3.1: Bloco de motor Ford Lion V8.....	47
Figura 3.2: Identificação dos cilindros antes do corte do bloco	47
Figura 3.3: Fluxo das etapas de preparação e de análises.....	49
Figura 3.4: Corte dos corpos de prova axiais	49
Figura 3.5: Corpos de prova axiais.....	50
Figura 3.6: Plano de medições. Dimensões em milímetros	51
Figura 3.7: Plano de corte dos corpos de prova axiais. Dimensões em milímetros ..	52
Figura 3.8: Representação das marcações nas amostras embutidas. Dimensões em milímetros.....	53
Figura 3.9: Método de análise para o cálculo do fator de aspecto	55
Figura 3.10: Procedimento inicial para a sobreposição	56
Figura 3.11: Planos utilizados para quantificação de FM	58
Figura 4.1: Identificação de FM e sulcos interrompidos nos sulcos de brunimento (MEV)	63
Figura 4.2: Comparação entre as alturas dos planos das rotinas de Obara (2013), Dimkovski (2011) e os planos da rotina desenvolvida.....	64
Figura 4.3: (a) Topografia gerada via WLI e as (b) Imagem binarizada dos pixels com altura inferior a profundidade mínima (pixels pretos). Rotina desenvolvida. Área = 0,835x0,835 mm.....	64

Figura 4.4: (a) Regiões orientadas em relação ao ângulo de brunimento; (b) Imagem binarizada dos pixels com altura inferior a profundidade mínima (pixels pretos). Rotina Obara (2013). Área = 0,835x0,835 mm.....	65
Figura 4.5: (a) Identificação das regiões de sulcos ideais utilizando o método proposto por Obara (2013) e (b) o método desenvolvido. Área = 0,835x0,835 mm.....	66
Figura 4.6: Identificação de FM pela rotina (a) Obara (2013) e a (b) desenvolvida. Área = 0,835x0,835 mm.....	66
Figura 4.7: Comparação geral entre a rotina de Obara (2013) e a desenvolvida. FM representados em azul e sulcos em preto. Área = 0,835x0,835 mm	68
Figura 4.8: Variação da presença de FM em função do plano de identificação. Área = 0,835x0,835 mm.....	69
Figura 4.9: Sequência de análises de quantificação de FM.	70
Figura 4.10: Identificação de FM e sulcos interrompidos em uma topografia 3D	73
Figura 4.11: Identificação de FM da região ampliada da Figura 4.8(a)	74
Figura 4.12: FM recobrando transversalmente um sulco do cilindro de FFV 7.8. MEV	78
Figura 4.13: Micrografias das amostras: (a) FFV 7.8 e (b) FFV 3.8.	80
Figura 4.14: Micrografias das amostras: (a) FFC 7.8 e (b) FFC 3.8.....	82
Figura 4.15: Composição das imagens para sobreposição do FM e grafita para amostra FFC 7.8. Área = 0,835x0,835 mm	85
Figura 4.16: Composição das imagens para sobreposição do FM e grafita para amostra FFC 3.8. Área = 0,835x0,835 mm	86
Figura 4.17: Composição das imagens para sobreposição do FM e grafita para amostra FFV 7.8. Área = 0,835x0,835 mm	88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1: Percentual de FM em relação a área de amostragem no plano Sr1	71
Gráfico 4.2: Percentual de FM em relação a área de amostragem no plano Sk/2	71
Gráfico 4.3: Percentual de FM em relação a área de amostragem no plano Sr2.....	72
Gráfico 4.4: Percentual de FM em relação a área dos sulcos ideais no plano Sk/2...	75
Gráfico 4.5: Percentual de sulcos em relação a área de amostragem	77
Gráfico 4.6: RA das amostras em FFC e FFV	82
Gráfico 4.7: AMG das amostras em FFC e FFV	83
Gráfico 4.8: QG das amostras em FFC e FFV	83
Gráfico 4.9: FG das amostras em FFC e FFV	84
Gráfico 4.10: Correlação entre o %FM em relação a área dos sulcos ideais e a QG para a amostra FFC 7.8	87
Gráfico 4.11: Correlação entre o %FM em relação a área de amostragem e a FG para a amostra FFC 3.8	87
Gráfico 4.12: Correlação entre o %FM em relação a área de amostragem e a AMGN para a amostra FFV 7.8	89
Gráfico 4.13: Relação entre o percentual de FM em relação a área de amostragem e a fração de pixels coincidentes para a amostra FFC 7.8	90
Gráfico 4.14: Relação entre o percentual de FM em relação a área de amostragem e a fração de pixels coincidentes para a amostra FFC 3.8	90
Gráfico 4.15: Relação entre o percentual de FM em relação a área de amostragem e a fração de pixels coincidentes para a amostra FFV 7.8.....	91
Gráfico 4.16: Relação entre o percentual de FM em relação a área de amostragem e a fração de pixels coincidentes para a amostra FFV 3.8.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Efeito da variação de espessura nas propriedades mecânicas e na nodularização da grafita em um FFV	29
Tabela 3.1: Propriedades mecânicas do FFC FC 250 e do FFV GJV 450	46
Tabela 3.2: Variação de espessura dos cilindros no sentido axial	48
Tabela 4.1: Parâmetros de rugosidade dos corpos de prova axiais em FFC e FFV	61
Tabela 4.2: Parâmetros de distribuição da grafita no cilindro de FFV	79
Tabela 4.3: Parâmetros de distribuição da grafita no cilindro de FFC	81

LISTA DE SIGLAS

AMG – Área média da grafita

AMGN – Área média da grafita nodular

FF – Ferro fundido

FFC – Ferro fundido cinzento

FFV – Ferro fundido vermicular

FM – Metal dobrado (*Folded metal*)

EAA – Associação Europeia do Alumínio (*European Aluminium Association*)

FG – Fração de grafita

FGN – Fração de grafita nodular

GN – Grau de nodularidade

MCI – Motores de combustão interna

NMM – Número mínimo de medições

QG – Quantidade de grafitas por milímetro quadrado

QGN – Quantidade de grafitas nodulares por milímetro quadrado

RA – Razão de aspecto

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

WLI – Interferometria de luz branca (*White light interferometer*)

LISTA DE ACRÔNIMOS

ANOVA – Análise de variância (*Analysis of variance*)

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

LISTA DE SÍMBOLOS

SiC – Carboneto de silício

Sq – *Root mean square height* - Raiz quadrada média da altura

Sk – *Core height* - Altura central

Sdq – *Root mean square slope* - Raiz quadrada média da inclinação

Sds – *Density of summits* - Densidade de cume

Ssc – *Arithmetic mean summit curvature* - Média aritmética da curvatura de cume

Spk – *Reduced peak height* - Altura de pico reduzida

Svk – *Reduced valley height* - Altura de vale reduzida

Sr1,Sr2 – Fração de contato

σ – Desvio padrão

\bar{E} – Erro amostral

$Z_{\alpha/2}$ – Valor da distribuição-t para um determinado intervalo de confiança e graus de liberdade

H – Hipótese nula do teste F

R^2 – Coeficiente de determinação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
	1.1 Objetivo	19
	1.2 Justificativa	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
	2.1 Materiais típicos utilizados na fabricação de cilindros de MCI	21
	2.2 Ferros Fundidos - Generalidades	23
	2.2.1 Ferros Fundidos Cinzentos	24
	2.2.2 Ferros Fundidos Vermiculares	27
	2.3 Brunimento em cilindros de MCI	30
	2.4 Topografia em superfície brunidas de cilindros MCI	32
	2.5 Desgaste em cilindros de MCI	36
	2.5.1 Metal dobrado (FM)	37
	2.6 Quantificação de metal dobrado em superfícies brunidas	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
	3.1 Cilindros	46
	3.2 Etapas de preparação e caracterização	48
	3.2.1 Corte dos cilindros em corpos de prova axiais	49
	3.2.2 Análises topográficas 3D dos corpos de prova axiais	50
	3.2.3 Particionamento dos corpos de prova axiais	52
	3.2.4 Embutimento e delimitação da região de análise	52
	3.2.5 Topografias 3D	53
	3.2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	54
	3.2.7 Caracterização e quantificação das grafitas	54
	3.2.8 Quantificação de FM	56
	3.2.9 Sobreposição das imagens de FM e de grafitas	56

3.3 Desenvolvimento da rotina de quantificação de FM	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1 Avaliação dos parâmetros 3D de rugosidade	60
4.2 Comparativo entre a rotina Obara (2013) e a rotina desenvolvida	62
4.3 Análise do FM na superfície dos cilindros	70
4.3.1 Análise dos resultados de quantificação de FM em relação a área de amostragem	70
4.3.2 Identificação do FM nos planos de avaliação	73
4.3.3 Quantificação de FM em relação a área dos sulcos ideais	75
4.4 Distribuição e morfologia da grafita	78
4.4.1 Distribuição e morfologia da grafita no cilindro de FFV	79
4.4.2 Distribuição e morfologia da grafita no cilindro de FFC	80
4.4.3 Comparativo entre as distribuições de grafita dos cilindros de FFV e FFC	82
4.5 Análise da relação entre FM e grafita	84
5 CONCLUSÕES	93
REFERÊNCIAS	95
APÊNDICE A – ROTINA PARA QUANTIFICAÇÃO DE METAL DOBRADO	100
ANEXO A – ROTINA PARA SOBREPOSIÇÃO DE IMAGENS	101

1 INTRODUÇÃO

A parte mais importante de um cilindro de motor de combustão interna (MCI), é a sua superfície após o processo de acabamento (MICHALSKI *et al.*, 1994a). Em especial, o conjunto pistão-anel-cilindro, exemplificado na Figura 1.1, é considerado por diversos pesquisadores, tais como Pawlus (1997), Taylor (1998) e Priest *et al.* (2000), como o sistema tribológico de maior importância em um MCI. Em um único ciclo de funcionamento este conjunto é submetido a rápidas variações de carga, temperatura e condições de lubrificação (PRIEST *et al.*, 2000).

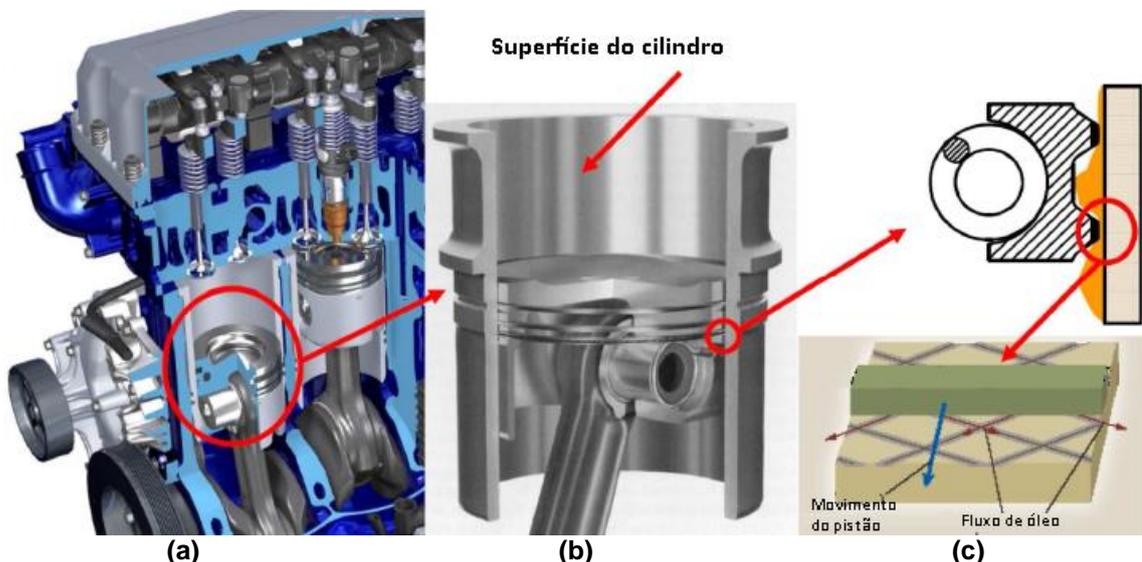


Figura 1.1 – (a) Vista em corte de um MCI; (b) Conjunto pistão-anel-cilindro; (c) Interface entre o anel raspador de óleo e a superfície do cilindro

Fonte: Dimkovski, 2011.

Taylor (1998) estipula que as perdas associadas ao atrito do conjunto pistão-anel-cilindro, possam representar 45% das perdas mecânicas nos MCI. Estima-se que a redução em 10% das mesmas implicaria na economia de 1,5% de combustível (PRIEST *et al.*, 2000).

De acordo com dados divulgados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos no ano de 1999, a redução do atrito e do desgaste nos MCI e nos sistemas de

transmissão acarretaria na economia de aproximadamente US\$ 120 bilhões por ano (FESSLER, 1999 *apud* TUNG *et al.*, 2004)¹.

Logo, o controle do desgaste e do atrito entre o anel e a parede do cilindro se torna um ponto crucial para o aumento da eficiência dos MCI.

Corroborando com Michalski *et al.* (1994a), Tung *et al.* (2004) considera que o processo de acabamento na superfície interna do cilindro pode influir consideravelmente no desgaste e no atrito do conjunto, significando o sucesso ou fracasso do MCI.

Outros fatores, não menos relevantes para o controle da taxa de desgaste no conjunto, são: a dureza e a microestrutura dos materiais em que são fabricados os componentes (cilindro e anéis), além das condições de lubrificação (MICHALSKI *et al.*, 1994b).

Existem diversas técnicas que podem ser empregadas no acabamento da superfície interna dos cilindros. Entretanto, todas possuem o mesmo objetivo: promover a retenção de lubrificante na superfície e minimizar o desgaste e o atrito (TUNG *et al.*, 2004).

É desejável que o processo de acabamento utilizado no interior dos cilindros apresente elevada precisão dimensional e geométrica, além de gerar determinadas características funcionais para o desempenho da superfície, como meios para retenção e escoamento do lubrificante. Dentre os processos de acabamento existentes, o mais comumente utilizado e que atende os requisitos citados anteriormente, é o processo de brunimento (ASM, 1989).

A textura da superfície proveniente do processo de brunimento, em especial as características microgeométricas geradas após esta etapa, afetam diversas características fundamentais dos motores, que vão além do atrito e do desgaste no conjunto pistão-anel-cilindro, tais como: consumo de óleo, retenção de óleo na superfície, modificação da superfície do cilindro após o amaciamento (*running-in*) e a emissão de gases poluentes (LEÓN, 2002; PAWLUS, 1997).

Dado que a manufatura de MCI está inserida em um mercado de alta competitividade, com margens de lucros apertadas, existe uma pressão contínua para

¹ FESSLER, R. US Department of Energy Workshop on industrial research needs for reducing friction and wear. Argonne National Laboratory, 1999

a redução dos custos de fabricação. Como a usinagem dos cilindros representa uma fração significativa deste custo, o decréscimo no tempo de brunimento é um fator considerável na sua diminuição (DIMKOVSKI *et al.*, 2009).

Os processos convencionais de brunimento utilizando pedras abrasivas de carboneto de silício (SiC) vem ao longo dos anos sendo substituídas pelas pedras diamantadas, reduzindo-se o tempo de usinagem. Entretanto, tais pedras não apresentam características de auto afiação e a pressão exercida contra a superfície do cilindro é maior em comparação as pedras de SiC (SABRI *et al.*, 2010).

Devido a estas características negativas, as pedras diamantadas podem deformar plasticamente o material do cilindro ao invés de cortá-lo (SABRI *et al.*, 2010). Este material deformado plasticamente, formando uma fina camada na superfície do cilindro, é denominado de metal dobrado (FM – *folded metal*).

O FM quando localizado no interior do sulco gerado pelo processo de brunimento, que é o caso mais comum, pode recobri-los, favorecendo o desgaste da superfície do cilindro no período de amaciamento, diminuindo a vida útil do motor (PAPADOPOULOS *et al.*, 2007), aumentando o consumo de óleo lubrificante e o nível de emissão de gases poluentes (DIMKOVSKI *et al.*, 2009), além de ocasionar o aumento do coeficiente de atrito entre o anel do pistão e a parede do cilindro (MEZGHANI *et al.*, 2012).

Em função de todas estas peculiaridades, alguns autores desenvolveram algoritmos que buscam determinar quanto de FM há em uma superfície brunida. Dimkovski (2011), Obara (2013) e Obara *et al.* (2014) desenvolveram rotinas computacionais dedicadas a superfícies de cilindros de MCI, que determinam o percentual de FM em relação a uma dada área de análise.

Atualmente, a maioria dos cilindros são produzidos em ferro fundido (FF), com destaque para o FF cinzento (FFC) puros ou com a adição de elementos de liga (TUNG *et al.*, 2004). Os principais atributos dos FFCs são: excelente usinabilidade, boa resistência ao desgaste, capacidade elevada de amortecimento, baixa temperatura de fusão e fácil moldagem (CHIAVERINI, 2012). Apesar destas qualidades, o que de fato torna o FFC o material mais atraente, é que o mesmo está entre os materiais metálicos mais baratos que existem (CALLISTER *et al.*, 2012).

Ao longo dos últimos anos a indústria automobilística vem pesquisando novos materiais em substituição ao FFC para a fabricação do bloco do motor como um todo ou apenas do cilindro, com foco principal na combinação peso (redução) e resistência mecânica (aumento), de modo a minimizar o consumo de combustível e aumentar a eficiência dos motores. Algumas destas empresas utilizam ligas de alumínio para os blocos, sendo que na cavidade do cilindro uma camisa de FF, geralmente cinzento, é acoplada. Entretanto, tal processo agrega maiores custos ao produto, além de diminuir a resistência mecânica do bloco (TUNG *et al.*, 2004).

Um material que vem sendo empregado ao longo dos últimos anos com relativo sucesso na substituição dos FFCs na fabricação de blocos, em especial aqueles destinados a MCI que utilizam diesel como combustível, é o FF vermicular (FFV), também chamado de FF de grafita compactada (*Compacted Graphite Iron*). As suas propriedades mecânicas são superiores aos dos FFCs, preservando as propriedades de condutibilidade e expansão térmica dos mesmos.

Essas vantagens do FFV em relação ao FFC permitem que os motores trabalhem com maiores pressões de combustão, propiciando a diminuição no consumo de combustível, aumentando a eficiência térmica e reduzindo a emissão de gases poluentes (GUESSER *et al.*, 2001).

Por tais características e benefícios, o FFV é visto como uma tecnologia inovadora pela indústria automotiva, que está sempre à procura de componentes de menor massa e maior durabilidade (TUPY S.A., 2009).

1.1 Objetivo

Este estudo busca avaliar a influência da grafita do FFV e do FFC na formação de FM no interior dos sulcos em superfícies brunidas de cilindros de blocos de MCI que apresentam variação de espessura de parede.

Em paralelo, propõem-se o desenvolvimento de uma rotina computacional específica para identificação e quantificação de FM no interior dos sulcos.

Os objetivos secundários são:

- Analisar a rugosidade 3D nos cilindros de FFC e FFC em diferentes espessuras de parede;
- Quantificar o FM no interior dos sulcos nos cilindros de FFC e FFC em diferentes espessuras de parede;
- Analisar a morfologia e distribuição da grafita nos cilindros de FFC e FFV em diferentes espessuras de parede;
- Analisar a relação direta entre o FM e a grafita utilizando rotina computacional de sobreposição de imagens desenvolvida na tese de doutorado (em andamento) de João Luiz do Vale, cujo o título é: “Influência da microestrutura de ferros fundidos na ocorrência de folded metal e no comportamento tribológico para superfícies brunidas”.

1.2 Justificativa

Dado que a formação de FM influi em diversas características dos MCI, tanto mecânicas quanto ambientais, é de interesse acadêmico, social e econômico a avaliação da relação entre os materiais empregados nos cilindros dos MCI e o FM.

Como mencionado anteriormente, o uso do FFV pela indústria automobilística, em especial no setor de motores, é recente e sua produção ainda é pequena em comparação aos motores em FFC. Logo, poucos são os estudos que visam analisar possíveis defeitos de superfície gerados no processo de brunimento atrelados as características microestruturais dos FFVs, ou mesmo em relação aos FFCs no que tange a presença de FM.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais típicos utilizados na fabricação de cilindros de MCI

Os cilindros dos MCI podem ser parte integral do bloco, ou seja, o cilindro e o bloco são um único componente, denominado doravante de bloco integral, ilustrado na Figura 2.1, ou ainda o cilindro pode ser constituído por uma camisa, que de modo simplificado é um tubo cilíndrico inserido no bloco. A Figura 2.2 ilustra esse segundo tipo.



Figura 2.1: Bloco e cilindro em um único componente (Bloco integral)

Fonte: Ford Racing Parts².

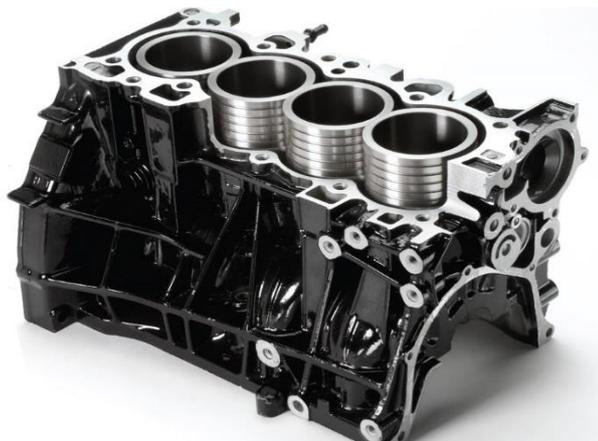


Figura 2.2: Bloco de um MCI com camisas

Fonte: L.A. Sleeves³.

²Disponível em: <http://www.fordracingparts.com/circletrack/pdf/FR_347_Sealed_Engine_Hand_book_2010-2.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2015

³Disponível em: <http://www.lasleeve.com/imagesnews_imageslasleeve-performance-opendeck-sleeves-inline-4.jpg>. Acesso em: 11 jan. 2015

Independentemente do tipo de projeto de cilindro, o material tradicionalmente empregado é o FFC, sendo que vermicular vem ganhando mercado ao longo dos últimos anos (GUESSER, 2009).

Há casos em que o material do bloco pode ser diferente do material dos cilindros. Dados da Associação Europeia de Alumínio (EAA - *European Aluminium Association*) referentes ao de 2005 indicam a substituição gradativa dos blocos de FF por blocos de alumínio no continente europeu, como mostra a Figura 2.3.

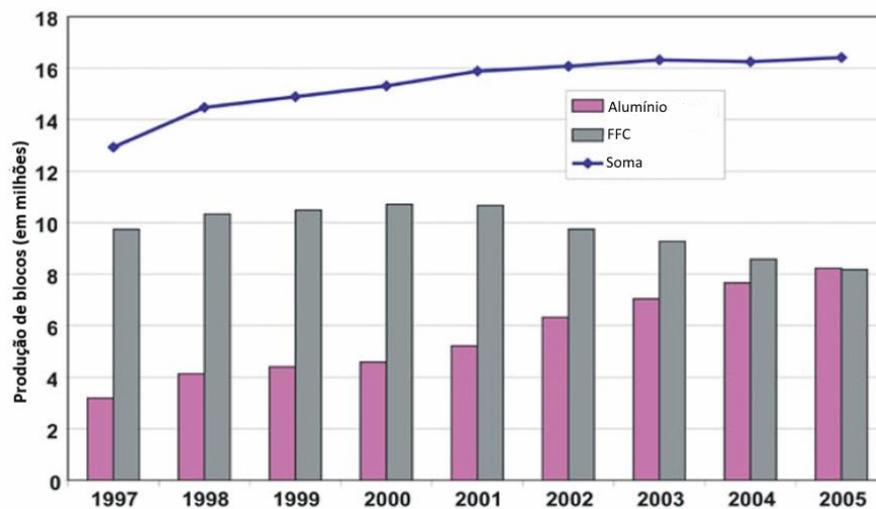


Figura 2.3: Produção de blocos de MCI na Europa

Fonte: (EAA, 2011).

O crescimento da produção de blocos em alumínio é impulsionado principalmente pelos motores a gasolina (EAA, 2011). Entretanto, independentemente do tipo de material utilizado na fabricação dos blocos, os cilindros permanecem utilizando o FF como matéria-prima, seja cinzento ou vermicular.

Já nos motores a diesel, onde as pressões de combustão podem chegar a 250 bar (especialmente nos MCI de veículos pesados), os blocos em alumínio deixam de ser uma opção viável (GUESSER, 2009). A crescente exigência pela diminuição do consumo de combustível e das emissões de gases poluentes, acompanhada da necessidade de aumento de potência e torque, tende a aumentar ainda mais as pressões de combustão (DAWSON *et al.*, 2007).

É neste cenário que os blocos de FFC e FFV, sendo que este último vem substituindo os cinzentos devido as suas melhores propriedades mecânicas, permanecem sendo os principais materiais empregados.

Maiores detalhes sobre os recentes avanços, tendências e pesquisas no desenvolvimento de novos materiais para blocos e cilindros podem ser encontradas em Guesser (2009) e Tung *et al.* (2004).

2.2 Ferros Fundidos - Generalidades

Os FFs são ligas Fe-C-Si, contendo ainda manganês, enxofre e fósforo, podendo adicionalmente apresentar elementos de ligas diversos (GUESSER, 2009).

Na literatura, os teores de carbono destes materiais geralmente estão acima de 2,14%, em quantidade superior a que é retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar em carbono parcialmente livre na forma de grafita (CHIAVERINI, 2012). Na prática, a maioria dos FFs apresentam teor de carbono entre 3 à 4% (CALLISTER *et al.*, 2012).

O silício, em alguns casos em concentrações superiores ao do carbono, tem a finalidade de promover ou facilitar a grafitação da microestrutura (CALLISTER *et al.*, 2012; GUESSER, 2009).

Os cinco principais tipos (ou famílias) de FFs, de acordo com Callister *et al.* (2012) e Guesser (2009), são: branco, cinzento, nodular, maleável e vermicular. Chiaverini (2012) e Stefanescu (1992) consideram que, além desses cinco tipos, o FF mesclado tem importância semelhante as das demais famílias.

O FFC, branco e mesclado recebem tal designação em função do aspecto (coloração) de suas superfícies fraturadas (STEFANESCU, 1992). O nodular e o vermicular em função da morfologia da grafita (GUESSER, 2009). Já o termo FF maleável ou é devido ao tratamento térmico que o mesmo submetido é (maleabilização) (CHIAVERINI, 2012) ou ao fato de ser o FF mais maleável entre os cinco tipos (GUESSER, 2009).

Dentre os componentes microestruturais a grafita é, possivelmente, o elemento principal, tal que a sua distribuição e morfologia impactam diretamente sobre

as propriedades dos FFs (CHIAVERINI, 2012). Sob o enfoque das propriedades mecânicas, a sua presença pode ser compreendida como uma descontinuidade na matriz ferrosa, e também como um concentrador de tensões (GUESSER, 2009).

Os FFCs e FFVs, por se tratarem dos materiais comumente empregados em cilindros de MCI, serão abordados em maiores detalhes nas seções seguintes.

2.2.1 Ferros Fundidos Cinzentos

O FFC é uma classe dos FFs que tem como principal característica microestrutural a presença de grafita na forma de lamelas em uma matriz metálica, geralmente perlítica ou ferrítica (CRAIG *et al.*, 1992). A Figura 2.4(a) mostra a microestrutura típica de um FFC e a Figura 2.4(b) o aspecto tridimensional das lamelas.

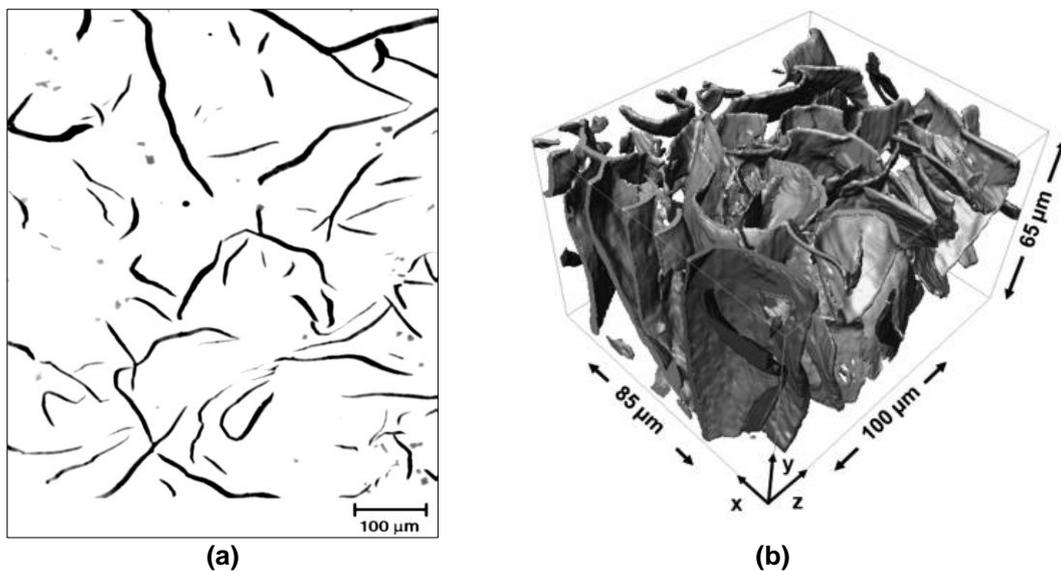


Figura 2.4: (a) Microestrutura típica de um FFC; (b) Aspecto 3D de uma grafita lamelar

Fonte: (a) Craig *et al.*, 1992; (b) Velichko, 2008.

Os teores típicos de carbono e silício (em massa) nos FFCs comerciais variam, respectivamente, entre 2,5 – 3,5% e 1,8 – 2,4% (CRAIG *et al.*, 1992).

Outro elemento químico que é adicionado intencionalmente a composição do FFC é o manganês, que tem como finalidade impedir a formação inclusões de sulfetos

de ferros (que são frágeis e tem baixo ponto de fusão) nos contornos de grão, promovendo a formação de sulfetos de manganês, que são mais estáveis (CRAIG *et al.*, 1992).

Como mencionado anteriormente, a presença da grafita (tanto sua forma quanto sua distribuição) tende a modificar as propriedades mecânicas do FFC. Além da composição química, a taxa de resfriamento também influi consideravelmente na formação da grafita.

Por sua vez, a taxa de resfriamento é afetada pela espessura da seção da peça fundida. Taxas elevadas de resfriamento (seções finas) podem propiciar características similares aos dos FFs brancos, ou seja, peças com pouca quantidade de grafita, enquanto que taxas lentas (seções espessas) geram grafitas em excesso (CHIAVERINI, 2012).

No caso de um bloco integral de um MCI, a espessura do material do bloco em relação ao cilindro tende a variar tanto no sentido radial quanto axial. A Figura 2.5 ilustra tal situação.

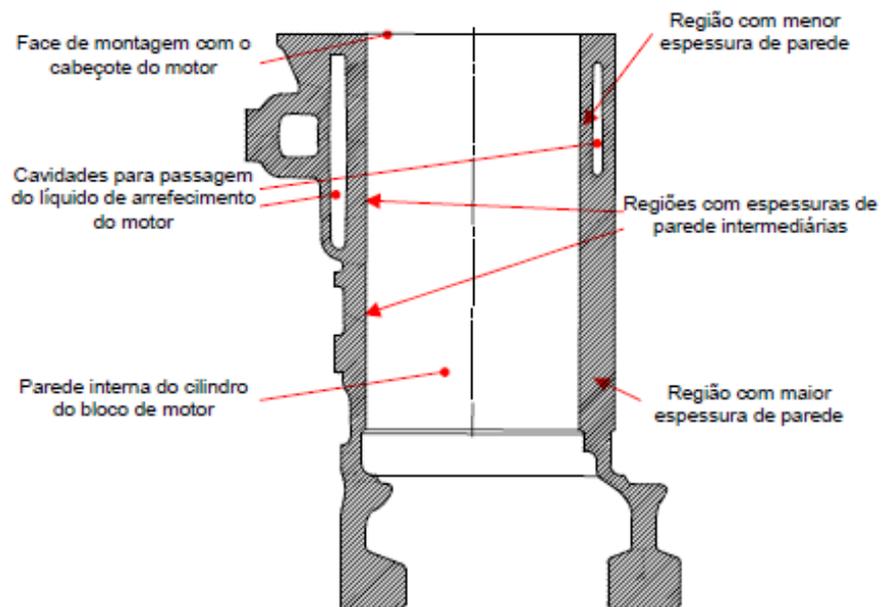


Figura 2.5: Seção transversal de um bloco integral na região do cilindro

Fonte: Mocellin, 2007.

A Figura 2.6 apresenta o comportamento da resistência a tração em função da variação da espessura, para cinco teores de carbono normalmente encontrados em FFCs.

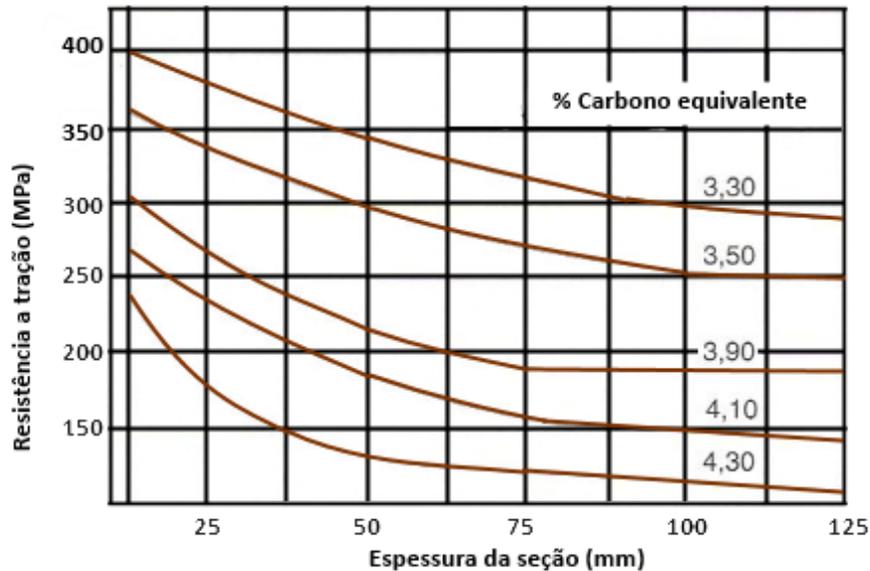


Figura 2.6: Influência da espessura na resistência a tração para cinco percentuais típicos de carbono equivalente em FFCs

Fonte: Adaptado de Chiaverini, 2012.

Em relação as propriedades mecânicas, os FFCs destacam-se pela elevada usinabilidade, devido a presença das lamelas de grafita que atuam tanto como lubrificante sólido para as ferramentas de corte, como descontinuidades na matriz metálica, facilitando a quebra do cavaco (CRAIG *et al.*, 1992).

Outro fator importante no que tange a usinabilidade dos FFCs é a presença de inclusões de sulfeto de manganês. Durante o processo de usinagem, em especial os de geometria definida, as inclusões de sulfeto de manganês formam uma película sobre a ferramenta de corte, reduzindo o seu desgaste e atenuando os esforços de corte (PEREIRA, 2010).

Outra propriedade relevante aos FFCs, que está intimamente relacionada com as lamelas de grafita, é a sua capacidade de amortecimento. Essa capacidade é atribuída ao atrito entre a grafita e a matriz metálica (GUESSER, 2009).

A resistência ao desgaste do FFC também é considerada uma característica importante deste material. Tal fato é respaldado em aplicações práticas, como o uso

em partes móveis de máquinas. Novamente, a grafita é um fator importante para essa característica, devido a mesma atuar como um lubrificante entre as superfícies em contato (CHIAVERINI, 2012).

2.2.2 Ferros Fundidos Vermiculares

O FFV, também chamado de FF de grafita compactada, foi obtido acidentalmente devido a baixa presença de magnésio na fundição de FFs nodulares, em meados de 1940 (STEFANESCU *et al.*, 1992). A sua produção à época era extremamente limitada devido, principalmente, a dificuldade de se manter o controle do teor de magnésio, visto que durante a fusão do metal o mesmo evaporava (ROSA *et al.*, 2010).

O magnésio, por ser um elemento que contribui para a formação de nódulos, deve ter o seu teor reduzido para a obtenção do FFV (em comparação ao teor para obtenção do FF nodular), entretanto, quando muito baixo ou inexistente, a grafita pode se apresentar na forma lamelar ao invés da vermicular.

No caso de peças de seções finas, alguns estudos mostram que mesmo níveis de magnésio próximo a 0,01% da massa já ocasionam alto grau de nodularização, inviabilizando a obtenção do FFV (GÓRNY *et al.*, 2012).

Somente na década de noventa do século passado, com o desenvolvimento de técnicas eletrônicas de análise de composição química, seguido do desenvolvimento de técnicas de fundição específicas, é que a produção do FFV ganhou proporções industriais (DAWSON *et al.*, 2007).

Um dos meios atuais utilizados para evitar a nodularização das grafitas é a adição de elementos químicos, tais como: alumínio, bismuto, zircônio, titânio e antimônio, que provocam a degradação dos nódulos, possibilitando a formação das grafitas vermiculares (CHIAVERINI, 2012).

Nos processos atuais, o titânio tem sido acrescido a composição dos FFVs em concentrações que variam entre 0,1 e 0,15%, dificultando o crescimento da grafita nodular. Em paralelo, o magnésio adquire a função de impedir a formação da grafita lamelar. Desde modo, é garantido a formação da grafita vermicular (GUESSER *et al.*, 2001).

A microestrutura típica do FFV apresenta grafita tanto na forma de vermes (ou compacta) quanto de nódulos. De fato, um FFV só é aceitável se não houver a presença de grafita na forma de lamelas e a quantidade de nódulos deve ser inferior a 20% de toda a grafita (STEFANESCU *et al.*, 1992). Na Figura 2.7(a) é apresentada uma microestrutura típica de um FFV, e na Figura 2.7(b) tem-se uma reconstrução tridimensional da forma de uma partícula de grafita vermicular.

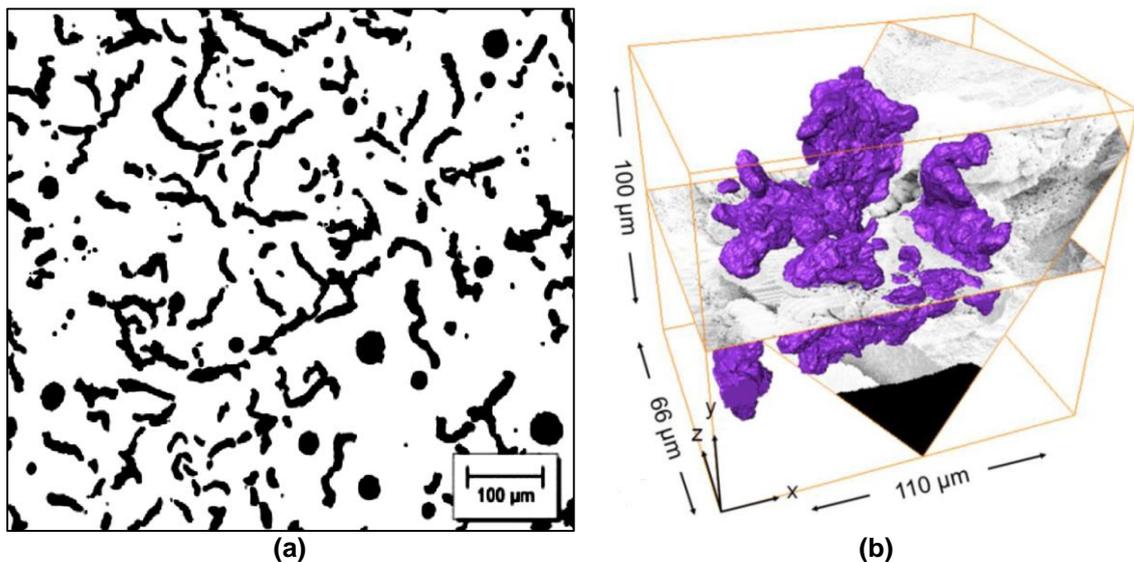


Figura 2.7: (a) Microestrutura típica de um FFV com 10% de nodularização; (b) Aspecto 3D de uma grafita vermicular (roxo)

Fonte: (a) Guesser *et al.*, 2001; (b) Velichko, 2008.

Assim como nos FFC, a espessura da seção da peça de FFV, que influencia na taxa de resfriamento, tende a ocasionar modificações na morfologia e distribuição da grafita, principalmente no que tange a quantidade de nódulos. No estudo apresentado por GÓRNY *et al.* (2012), o aumento da taxa de resfriamento (diminuição da espessura) tende a aumentar o número de nódulos, aumentando o limite de resistência a tração e a dureza do material.

A Tabela 2.1 apresenta um breve resumo dos resultados obtidos por GÓRNY *et al.* (2012). Observa-se que nas espessuras inferiores a 13 mm, o grau de nodularização é superior ao limite de 20%.

Tabela 2.1: Efeito da variação de espessura nas propriedades mecânicas e na nodularização da grafita em um FFV

Espessura (mm)	Grau de nodularização (%)	Limite de resistência a tração (MPa)	Dureza (Brinell)
3	46	622	232
5	29	466	181
13	17	387	160

Fonte: Adaptado de GÓRNY *et al.*, 2012.

Na Figura 2.8 são apresentadas as micrografias obtidas por GÓRNY *et al.*(2012) para o FFV com seção de 3 mm e de 13 mm. A diferença, tanto no que se refere a distribuição quanto a morfologia da grafita, são visualmente perceptíveis.

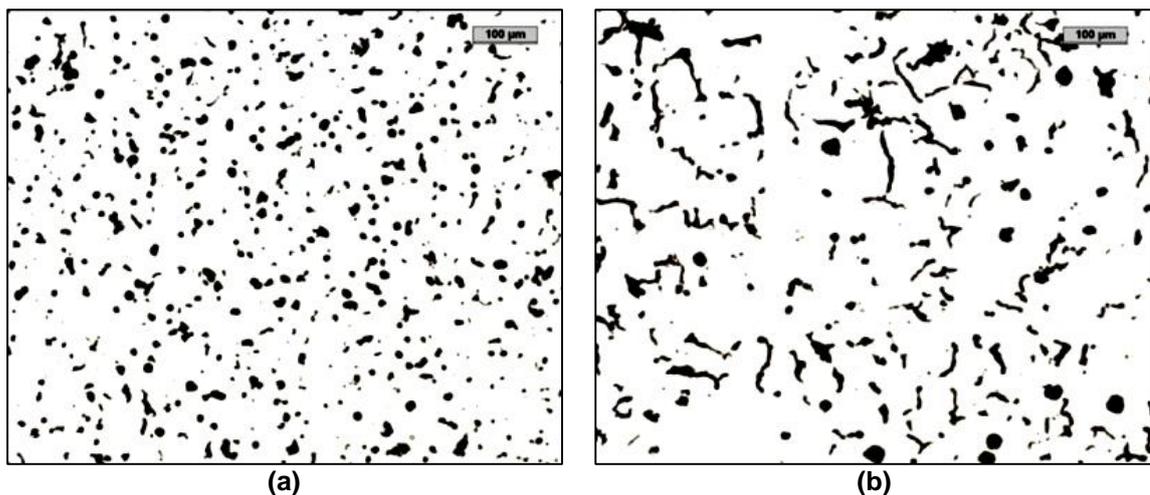


Figura 2.8: Microestrutura de um FFV com espessura de (a) 3 mm e (b) 13 mm

Fonte: Adaptado de GÓRNY *et al.*, 2012.

Em relação às propriedades mecânicas, os FFVs se assemelham aos FFs nodulares, enquanto que as propriedades físicas (expansão e condutividade térmica) e as propriedades para altas temperaturas (fadiga térmica e choque térmico) são mais próximas as dos FFCs (STEFANESCU *et al.*, 1992).

Quando comparado ao FFC a resistência a tração do FFV é até 75% maior, módulo de elasticidade de 30-40% superior e o dobro do limite de resistência a fadiga (GUESSER *et al.*, 2001).

A principal desvantagem do uso de FFVs na fabricação de blocos de MCI do ponto de vista técnico é em relação a usinabilidade. Visto que a resistência do FFV é superior a do FFC, inexistência do sulfeto de manganês devido aos baixos teores de enxofre admitido no processo, e a formação de inclusões de carboneto de titânio de alta dureza, as forças de cortes envolvidas no processo, assim como o desgaste, são maiores em relação ao FFC, ocasionando menor durabilidade das ferramentas, além de maiores tempos de usinagem (GUESSER, 2009).

Como esse é um dos principais entraves para a ampliação do uso dos FFVs, há uma intensa concentração em estudos para o desenvolvimento de ferramentas de corte e revestimentos destinados a usinagem dos mesmos (MOCELLIN *et al.*, 2004; ROSA *et al.*, 2010; HECK *et al.*, 2008).

2.3 Brunimento em cilindros de MCI

Em um processo típico de usinagem de cilindros de MCI, as características de forma e textura da superfície são definidas pela etapa de brunimento. É essa operação que define as características tribológicas do cilindro (MOCELLIN, 2007).

Klocke (2009) define o brunimento como um processo de usinagem que utiliza ferramentas abrasivas de grãos ligados (ferramentas de corte de geometria não definida), visando à melhoria de forma, da precisão dimensional e da qualidade superficial.

Ainda segundo Klocke (2009), é possível separar os tipos de brunimento em três grupos: de engrenagens, de curso curto e por fim, o de brunimento de curso longo que é o utilizado nos cilindros dos MCI.

No processo de brunimento de curso longo, a ferramenta de brunir desloca-se no sentido axial, em movimentos alternados, rotacionando em relação a seu próprio eixo, descrevendo deste modo uma trajetória helicoidal, responsável por gerar os sulcos na superfície do cilindro. A ferramenta de brunir ainda possui mecanismos que possibilitam o deslocamento radial das pedras, permitindo que as mesmas sejam pressionadas contra a parede do cilindro. A Figura 2.9 busca ilustrar esse procedimento.

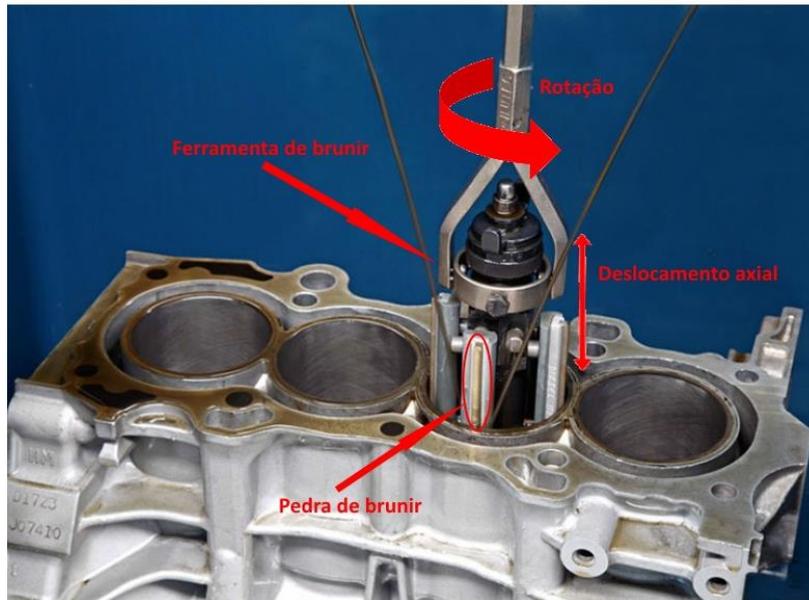


Figura 2.9: Processo de brunimento de um cilindro de MCI

Fonte: Adaptada de Brunitec⁴.

As tolerâncias dimensionais e as especificações de rugosidade são atingidas geralmente após duas ou três etapas (desbaste, semi-acabamento e acabamento) de brunimento, a depender das especificações do cilindro (MOCELLIN, 2007).

A última etapa, de acabamento, apresenta diversas vertentes, tais como o processo de brunimento em deslizamento helicoidal (*Helical Slide Honing*), brunimento fino (*Fine Honing*), e o mais tradicional, brunimento de platô (MOCELLIN, 2007).

Esse último tipo é caracterizado pela remoção de picos (ou cumes, em se tratando de análise topográfica 3D), mantendo-se os vales da superfície, que atuaram como reservatórios de óleo. A remoção dos cumes propicia aumento da área de contato entre os anéis do pistão e a parede do cilindro, diminuindo o tempo de amaciamento (ASM, 1989; KLOCKE, 2009). Uma representação simbólica da superfície antes (linhas tracejadas) e após o brunimento de platô é apresentada na Figura 2.10.

⁴ Disponível em: < <http://www.brunitec.com.br/ferramentas/bloco-de-motor.jpg>>. Acesso em: 20 jan. 2015

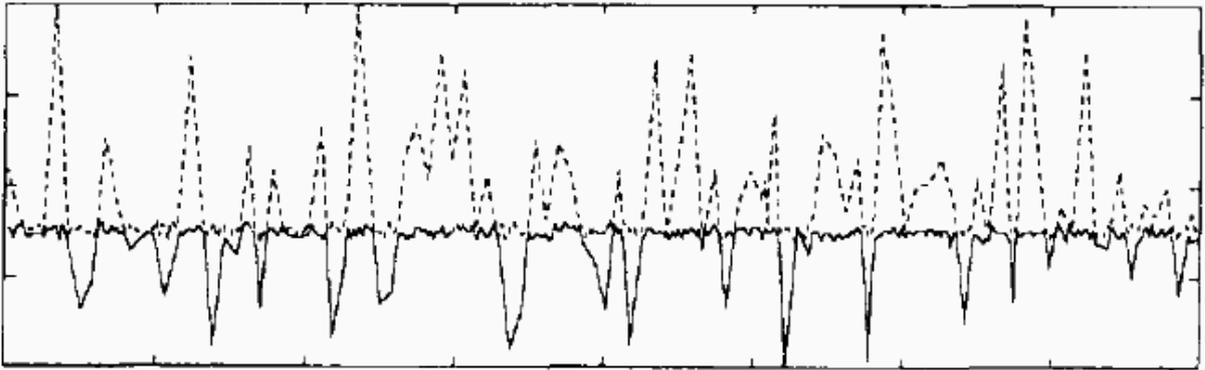


Figura 2.10: Representação da remoção de picos (linhas tracejadas) pelo brunimento de platô

Fonte: Malburg *et al.*, 1993.

Informações sobre a influência das variáveis dos processos de brunimento, máquinas, tipos de ferramentas, tipos de brunimento, assim como demais assuntos não abordados e que fogem ao escopo deste projeto, encontram-se disponíveis na literatura (MOCELLIN, 2007; KLOCKE, 2009; ASM, 1989).

2.4 Topografia em superfície brunidas de cilindros MCI

A influência da topografia da superfície dos cilindros de MCI no comportamento do conjunto pistão-anel-cilindro vem sendo estudado ao longo de décadas. Diversos autores ressaltam a importância dessa caracterização, principalmente em termos de rugosidade, no período de amaciamento do MCI. A superfície antes e após essa etapa influi consideravelmente no controle de emissão de gases poluentes, consumo de óleo lubrificante e combustível, atrito, lubrificação, eficiência e na vida útil dos MCI (PAWLUS, 1994; TAYLOR, 1998; PRIEST *et al.*, 2000).

Por amaciamento entenda-se a suavização das superfícies, em especial a na parede do cilindro, através de mecanismos de desgaste no período inicial de funcionamento do motor operando em baixa carga, de modo a propiciar lubrificação suficiente (aumento da espessura do filme lubrificante) para evitar o contato entre as asperezas do anel do pistão e do cilindro na região de deslizamento e, estabilização do coeficiente de atrito (ÇAVDAR *et al.*, 1991; BLAU, 1992).

A Figura 2.11 mostra a variação do perfil de rugosidade no sentido de deslocamento do pistão antes e após o amaciamento.

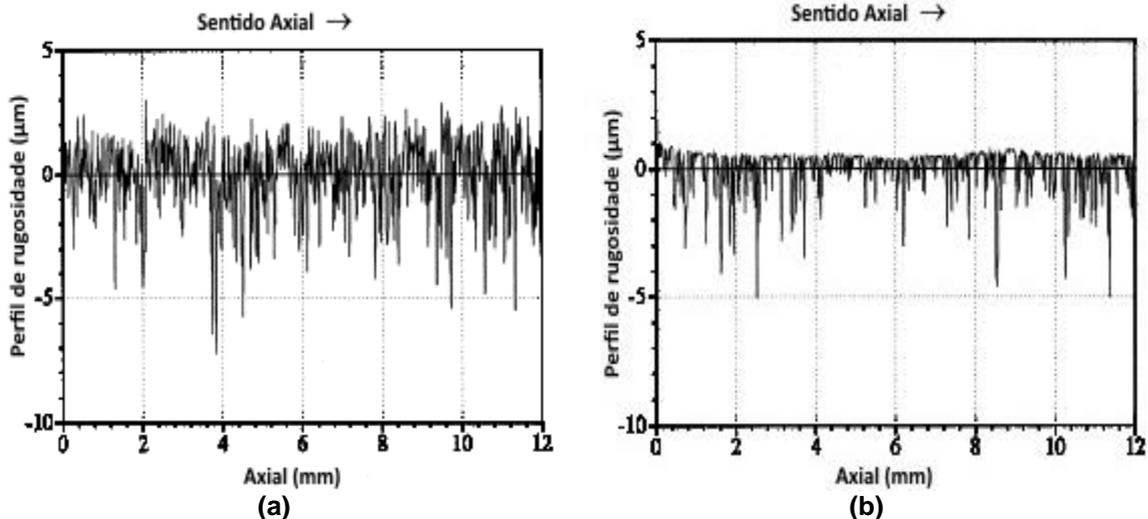


Figura 2.11: Perfil de rugosidade da superfície do cilindro antes (a) e após o amaciamento (b)

Fonte: Adaptado de Priest (1996) *apud* Priest *et al.* (2000)⁵.

Papadopoulos *et al.* (2007) considera que a rugosidade só é uma característica a ser considerada na fase inicial de funcionamento do motor, ou seja, no período de amaciamento. Portanto, é a rugosidade que irá garantir que ocorra o desgaste adequado da superfície, promovendo o correto amaciamento (PAWLUS, 1994).

Visando determinar quais os parâmetros de rugosidade 3D que apresentam alta correlação na otimização das superfícies dos cilindros, Dimkovski *et al.* (2012) sugere a utilização dos parâmetros S_q (*Root mean square height* - Raiz quadrada média da altura), S_k (*Core height* - Altura central), S_{dq} (*Root mean square slope* - Raiz quadrada média da inclinação), S_{ds} (*Density of summits* - Densidade de cume) e S_{sc} (*Arithmetic mean summit curvature* - Média aritmética da curvatura de cume) como ferramentas para o controle de qualidade.

A S_q é um parâmetro de amplitude que representa uma estimativa da altura média da aspereza. Fisicamente, pode ser entendido como grau de interferência mecânica entre as asperezas de superfícies em contato (DONG *et al.*, 1994).

A S_{ds} é um parâmetro espacial, definida como o número de cumes por unidade de área, tal que um ponto da superfície é dito como sendo um cume se e

⁵ PRIEST, M. The wear and lubrication of piston rings. 1996. 246 f. Thesis (Ph.D.) - University of Leeds, Leeds, United Kingdom, 1996.

somente se tal ponto for maior que os seus oito vizinhos mais próximos (STOUT *et al.*, 1994).

Na Figura 2.12(a) é apresentada, de modo simplificado, a matriz de dados numéricos de alturas de uma superfície qualquer, onde C é o cume de maior altura em relação aos oito cumes vizinhos representados por CV, e na Figura 2.12(b), as setas indicam as regiões identificadas como cumes.

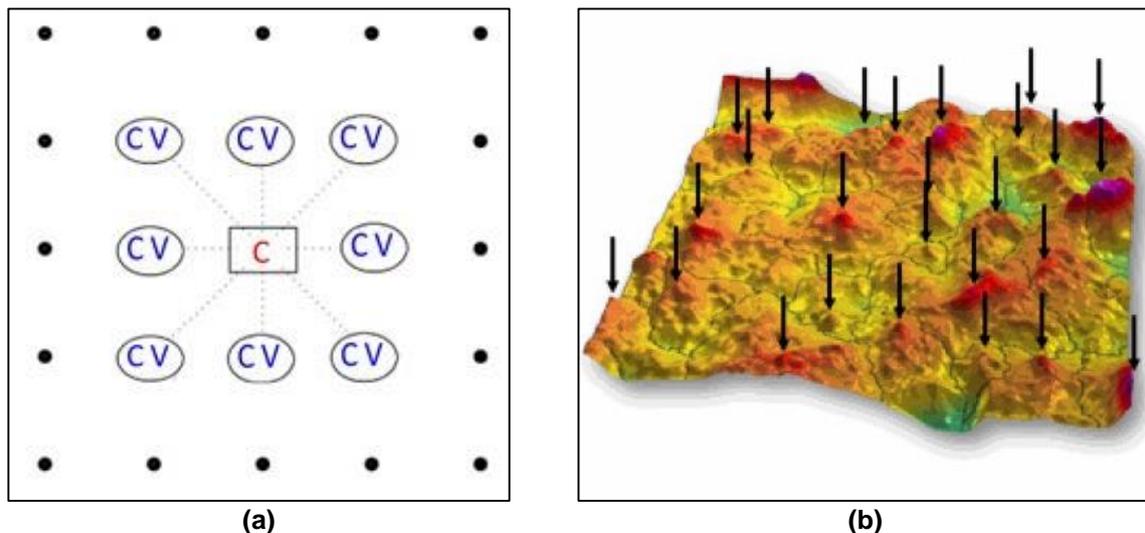


Figura 2.12: Exemplicação do (a) critério dos oito vizinhos e da (b) identificação dos cumes

Fonte: (a) Autoria própria; (b) TalyMap 3D.

A Sdq representa o desvio médio quadrático da inclinação da superfície dentro da área de amostragem, enquanto que a Ssc é média das curvaturas dos cumes (STOUT *et al.*, 1994). Tanto a Sdq quanto a Ssc são definidas como sendo parâmetros híbridos, que por sua vez, são uma combinação dos parâmetros de amplitude e espaciais.

A Ssc pode também ser entendida como o inverso do raio médio dos cumes. O significado físico da Ssc , para um único cume, é exemplificado na Figura 2.13, onde Ssc_1 é maior que Ssc_2 .

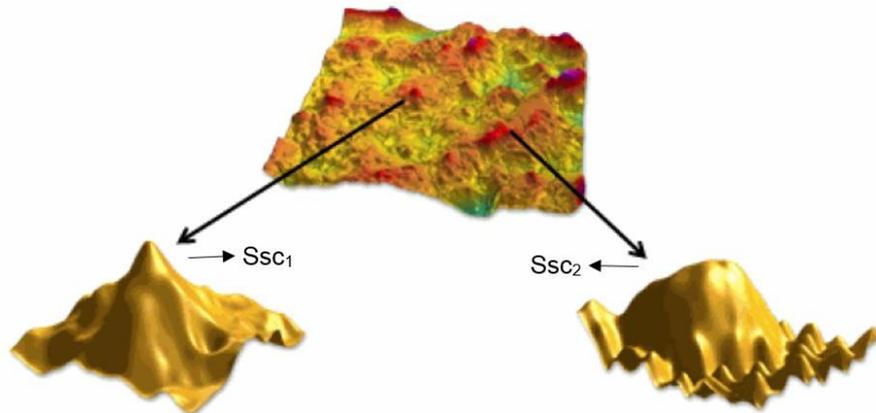


Figura 2.13: Diferença física entre dois valores de Ssc

Fonte: TalyMap 3D.

Os chamados parâmetros funcionais, em especial os parâmetros ditos da família K, tais como o S_k , S_{vk} (*Reduced valley height* – Altura de vale reduzida), S_{pk} (*Reduced peak height* – Altura de pico reduzida), além das frações de contato Sr_1 e Sr_2 apresentam elevada importância para caracterização de superfícies brunidas, influenciando o consumo de óleo, emissão de gases e a vida útil do motor (FENG *et al*, 2003). Tais parâmetros são calculados a partir da curva Abbott-Firestone, que é a curva de distribuição de altura de cumes, e são padronizados pela ISO 13565-2 (1998). Na Figura 2.14 é ilustrado a relação entre os parâmetros funcionais mencionados e a curva de Abbott-Firestone.

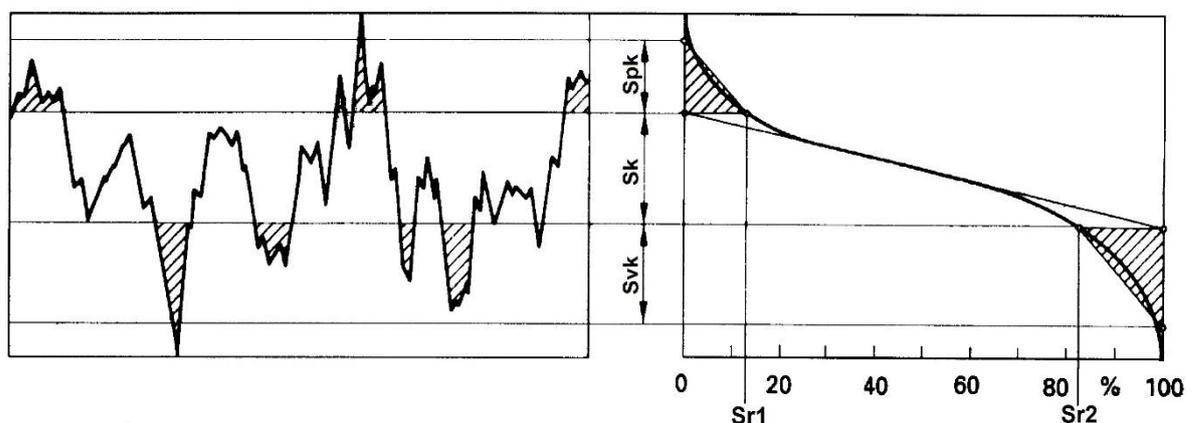


Figura 2.14: Determinação dos parâmetros S_k , S_{pk} , S_{vk} , Sr_1 e Sr_2

Fonte: Adaptado de ISO 13565-2, 1998.

A rugosidade S_k é compreendida como sendo a rugosidade da região de apoio ou central, que após o amaciamento suporta a maior parte da carga.

A S_{pk} é uma estimativa da altura de pico acima da região central. Durante o período de amaciamento estes picos são desgastados ou quebrados. É desejável, no caso dos cilindros, que o valor de S_{pk} seja o menor possível (DONG *et al.*, 1994).

Já a S_{vk} é a altura (ou profundidade) de vales que se estendem abaixo da região central. Através do S_{vk} , é possível obter informações a respeito da capacidade de retenção de lubrificante na parede do cilindro (DONG *et al.*, 1994).

A fração de contato Sr_1 representa a fração da superfície que é constituída por cumes acima da região de central. O Sr_1 é compreendido desde o cume mais alto até o início da região central (início do S_k) (BLUNT *et al.*, 2003).

O Sr_2 é a fração de contato da superfície que irá suportar a carga por praticamente toda a vida do componente. Alternativamente, $(100\% - Sr_2)$ é a fração da superfície que consiste de vales profundos responsáveis pela retenção de lubrificante. O Sr_2 é delimitado pelo final da região central (fim do S_k ou início do S_{vk}) até o vale mais profundo (BLUNT *et al.*, 2003).

2.5 Desgaste em cilindros de MCI

O desgaste nos cilindros pode ser dividido em três estágios: inicial, ou seja, no período de amaciamento; progressivo ao longo da vida útil do cilindro; e por fim, o catastrófico (SUDARSHAN *et al.*, 1983; PAPADOPOULOS *et al.*, 2007). Dos diferentes tipos de mecanismos de desgaste envolvidos em cada estágio, os três mais significantes são: adesão, abrasão e corrosão (PAPADOPOULOS *et al.*, 2007).

O desgaste por adesão em cilindros de MCI ocorre geralmente nos primeiros ciclos de funcionamento do motor e é influenciado por diversos fatores como a folga entre os anéis do pistão e parede do cilindro, natureza dos materiais em contato, rugosidade e, principalmente a espessura do filme lubrificante ou ainda a falta deste nos primeiros ciclos (SUDARSHAN *et al.*, 1983).

Devido a falta de lubrificante, ou quando a espessura do filme não é suficiente para impedir o contato entre as asperezas, ocorre a deformação plástica e a soldagem entre as asperezas (SUDARSHAN *et al.*, 1983).

A reação triboquímica se torna o principal mecanismo de desgaste quando a temperatura de operação é baixa ou muito elevada (SUDARSHAN *et al.*, 1983). Tal fenômeno ocorre quando a superfície de deslizamento entre anel do pistão e a parede do cilindro é atacada por algum meio corrosivo ou oxidante (PAPADOPOULOS *et al.*, 2007). Em geral, os produtos da combustão são os que mais contribuem para a oxidação da superfície (SUDARSHAN *et al.*, 1983).

Abrasão é o mecanismo de desgaste predominante nos cilindros, em especial a do tipo três corpos, gerado por partículas de elevada dureza que se interpõem entre as superfícies do anel do pistão e do cilindro (PAPADOPOULOS *et al.*, 2007).

Tais partículas podem ser oriundas dos sistemas de ar, combustível, lubrificante ou ainda relacionadas a defeitos superficiais gerados no processo de manufatura (SUDARSHAN *et al.*, 1983).

Na parede dos cilindros, o desgaste abrasivo é usualmente caracterizado por uma série de riscos regulares no sentido de deslocamento do pistão (SUDARSHAN *et al.*, 1983).

Dentre os diversos fatores que contribuem para o riscamento da superfície do cilindro, e de particular interesse neste estudo, está o defeito superficial denominado de FM, que será abordado no tópico seguinte.

2.5.1 Metal dobrado (FM)

A ocorrência de FM pode ser considerada um tipo de *smearing*, que por sua vez é definido como a remoção mecânica de material de uma superfície (do cilindro) em contato com outra (da pedra de brunimento), normalmente envolvendo deformação plástica, e sua deposição na forma de uma fina camada em uma ou ambas as superfícies envolvidas no processo (BLAU, 1992).

Com o objetivo de reduzir os custos na usinagem dos cilindros, as pedras de brunimento diamantadas vêm sendo empregadas no lugar das tradicionais pedras de

SiC (DIMKOVSKI *et al.*, 2009). Contudo, devido a menor friabilidade, ou seja, menor tendência dos grãos sofrerem fraturas, associada a baixa capacidade de gerar novas arestas de corte, as pedras diamantadas exercem maiores pressões na parede do cilindro, podendo ocasionar a deformação plástica da superfície ao invés do corte (SABRI *et al.*, 2010).

Essas características contribuem para a maior quantidade de FM na superfície (DIMKOVSKI *et al.*, 2009).

A Figura 2.15 ilustra a presença de FM em uma superfície brunida qualquer. A seta na cor verde indica um sulco gerado no processo de brunimento, já a seta vermelha indica o sentido de deslizamento do anel sobre o cilindro, e por fim, as setas em amarelo indicam algumas das regiões da superfície onde está presente o FM.

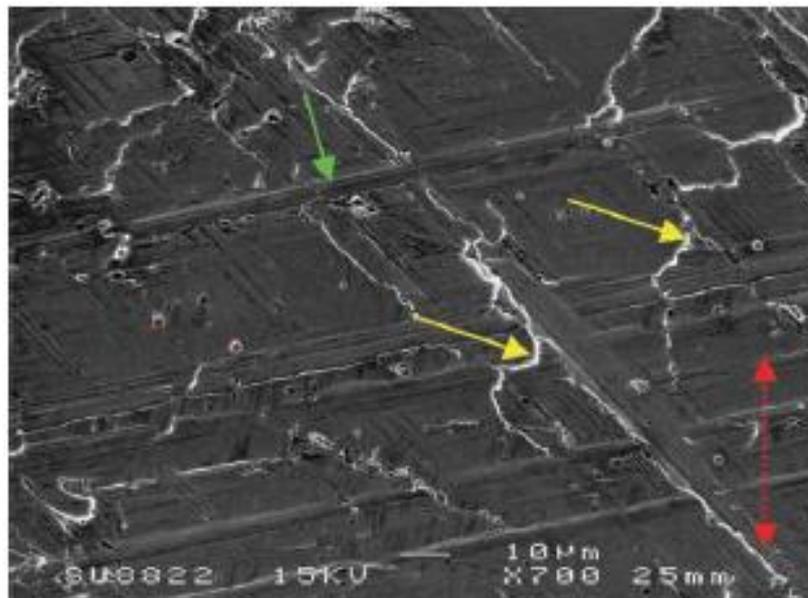


Figura 2.15: Presença de FM em uma superfície brunida

Fonte: Adaptado de Papadopoulos *et al.*, 2007.

Na Figura 2.15 pode-se observar ainda que o FM pode estar presente tanto dentro quanto fora dos sulcos. Quando no interior, que é o tipo mais comum, o FM pode recobrir parcialmente ou totalmente os sulcos, ocasionando a interrupção dos mesmos.

E dado que as arestas que recobrem os sulcos são extremamente frágeis e finas, estas podem se quebrar durante o período de amaciamento, atuando como

partículas de elevada dureza, que ocasionam o desgaste abrasivo da parede do cilindro na forma de riscos/ranhuras no sentido de deslizamento do pistão (DIMKOVSKI *et al.*, 2009; PAPADOPOULOS *et al.*, 2007). Na Figura 2.16 é possível observar a presença de riscos no mesmo sentido de deslocamento do anel após um ensaio tribológico.

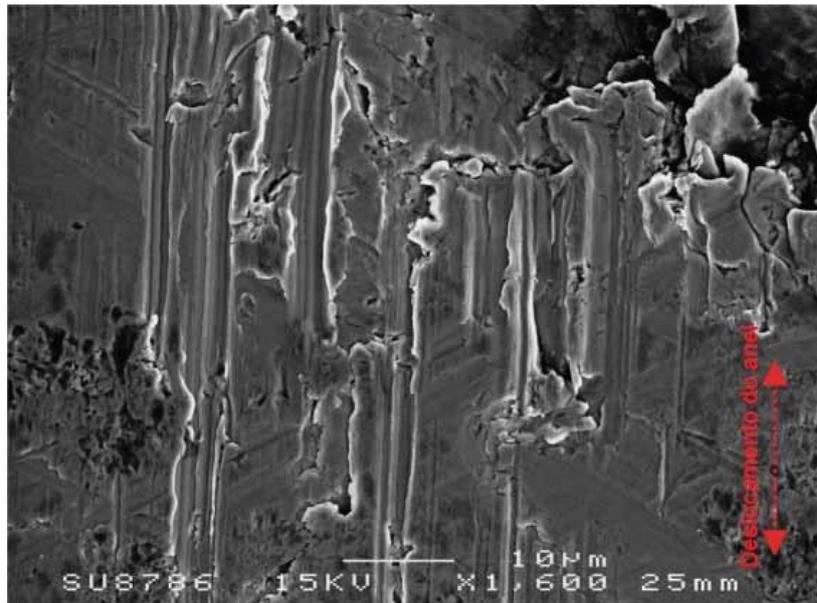


Figura 2.16: Superfície desgastada de um cilindro após ensaio tribológico

Fonte: Adaptado de Papadopoulos *et al.*, 2007.

Estas ranhuras, por sua vez, podem atuar como vias direta de óleo lubrificante para a câmara de combustão, aumentando o consumo de óleo e o nível de emissões. As partículas desprendidas podem ainda causar o desgaste de outros componentes do motor, devido que as mesmas podem circular juntamente com o lubrificante (DIMKOVSKI *et al.*, 2009).

A interrupção do sulco pelo FM tende a ocasionar o aumento do coeficiente de atrito entre o anel do pistão e a superfície do cilindro. Mezghani *et al.* (2012), através de simulações numéricas, demonstrou que a interrupção do fluxo de óleo lubrificante através dos sulcos pode elevar o coeficiente em 50% em relação a uma superfície em que não há interrupções. A Figura 2.17 mostra a variação do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento do anel sobre a superfície do cilindro para os dois casos.

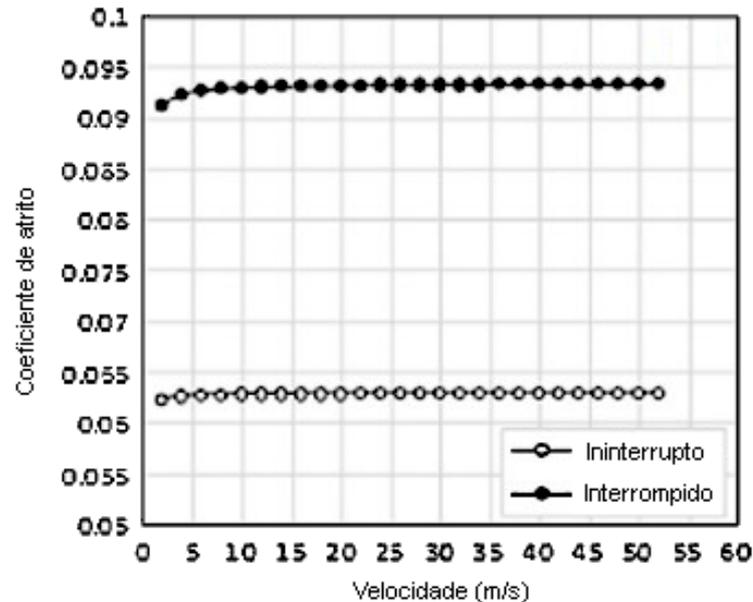


Figura 2.17: Efeito das interrupções de fluxo de lubrificante nos sulcos no coeficiente de atrito

Fonte: Adaptado de Mezghani *et al.*, 2012.

2.6 Quantificação de metal dobrado em superfícies brunidas

A quantificação de FM em superfícies brunidas é algo recente. Um dos primeiros métodos de avaliação é descrito no Guia de Brunimento da empresa alemã AE Goetze, publicado em 1988. Tal método consistia na comparação de imagens-padrão obtidas da superfície via microscopia eletrônica de varredura (MEV), com imagens padrão contidas no guia. As avaliações dessas imagens eram realizadas manualmente por técnicos, tornando os resultados dependentes do indivíduo que realizava tais comparações (BEYERER *et al.*, 2001; ANDERBERG *et al.*, 2006; DIMKOVSKI, 2011).

Anderberg *et al.* (2006) propôs o uso do método de processamento de imagem de Beyerer *et al.* (2001) para inspeção automatizada das imagens obtidas via microscopia eletrônica de varredura, combinado com medições topográficas 2D da superfície para a quantificação de FM. Entretanto, a utilização de dois instrumentos, somada ao longo tempo de análise, dificilmente poderá ser empregado em um processo de inspeção automatizado (DIMKOVSKI, 2011).

Recentemente, o uso de técnicas de topografia 3D vem sendo utilizadas nas caracterizações de superfícies brunidas, permitindo uma análise tridimensional das características dos cilindros. Dentre os estudos desenvolvidos para quantificação de

FM utilizando tal metodologia, destacam-se os algoritmos desenvolvidos por Dimkovski (2011) e por Obara *et al.* (2014).

Em seu estudo, Dimkovski (2011), utilizou técnicas de topográficas 3D via interferometria para avaliar não somente a presença de FM, mas também para a caracterização dos sulcos em termo de quantidade, largura e distância entre sulcos, entre outros parâmetros, além de fazer a diferenciação de sulcos interrompidos devido ao processo de fabricação e aqueles recobertos por FM.

O processamento de dados utilizados por Dimkovski (2011) pode ser resumido em:

- Obtenção da topografia 3D por interferometria (Figura 2.18);

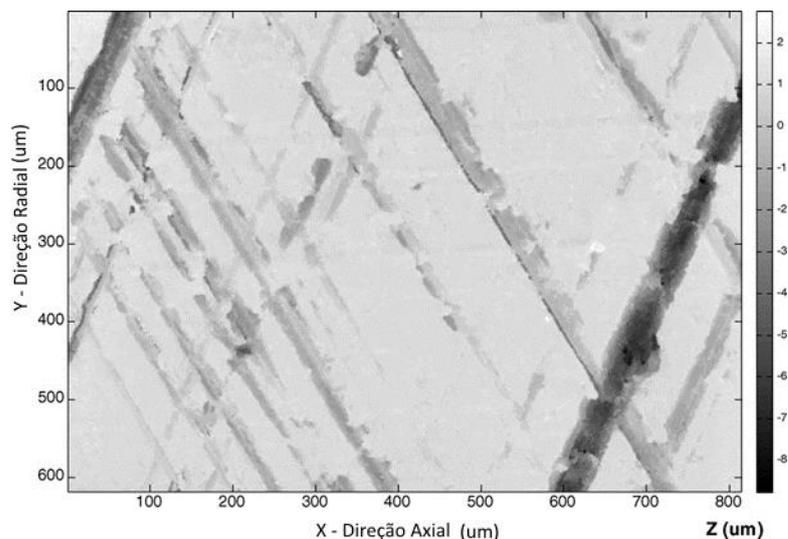


Figura 2.18: Topografia 3D de uma superfície brunida

Fonte: Dimkovski, 2011.

- Conversão dos dados 3D em 2D (geração de perfis 2D) para a determinação da profundidade máxima de cada sulco, tendo como referência uma profundidade mínima baseada no parâmetro de rugosidade Sr_2 (Figura 2.19);
- Ainda no perfil 2D, são determinados o pontos mais altos a direita e a esquerda do ponto de maior profundidade, tendo como referência um determinado valor de altura em relação a linha média do perfil;
- A distância entre o ponto a esquerda e o ponto a direita é definido como sendo a largura do sulco em questão;

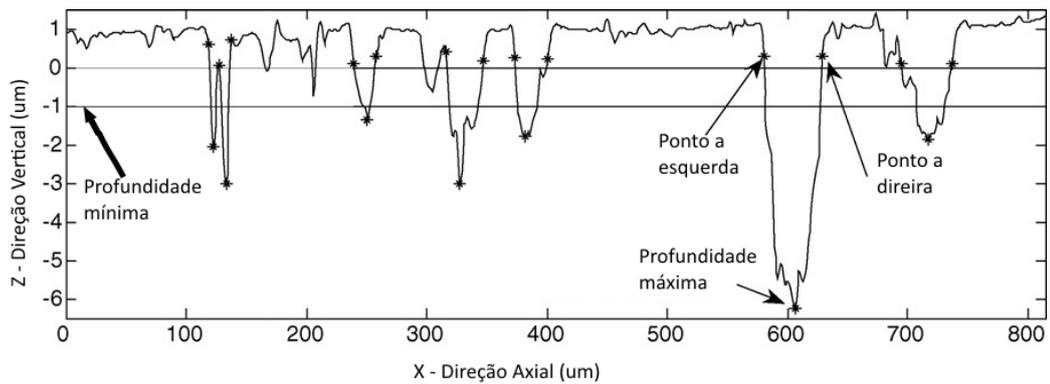


Figura 2.19: Perfil 2D gerado a partir da topografia 3D da Figura 2.11

Fonte: Dimkovski, 2011.

- Binarização da topografia 3D em termos dos pontos de profundidade máxima, denominada como sendo as potenciais regiões de sulco;
- Utilização da transformada de Hough nas imagem das potenciais regiões de sulco para determinação do ângulo de brunimento, assim como para a formação de linhas que passem pelas pontos definidos na imagem binária;

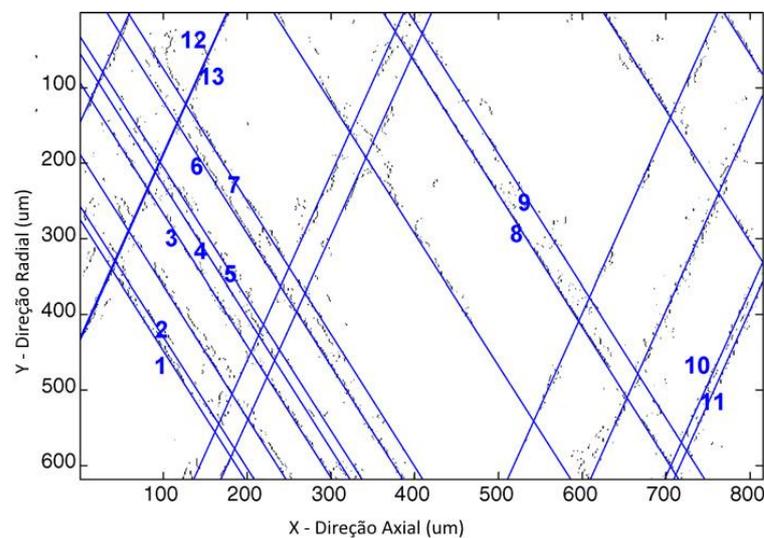


Figura 2.20: Binarização e identificação das linhas via transformada de Hough

Fonte: Dimkovski, 2011.

- Com base nas larguras de sulcos, são determinadas as regiões de sulcos ideais, assim como a união de linhas próximas (identificadas pelos números de 1 a 13 na Figura 2.20);

- Um sulco ideal é aquele que não apresenta nenhum tipo de defeito (sem interrupções ou FM), sendo constante ao longo de toda a superfície tanto em termos de largura, profundidade e ângulo;
- Os pixels das regiões de sulcos ideais (limitadas pelas linhas verdes da Figura 2.21) recebem valor 1, e as demais 0;
- A superfície original é também binarizada em função do parâmetro de rugosidade Sr_2 (que é o altura inicial do parâmetro Svk ou a altura final do Sk) sendo que os pixels com altura inferior a Sr_2 recebem valor 0 e os com alturas maiores, recebem valor 1;
- Por fim, são comparadas as imagens binarizada dos sulcos ideais com a imagem binarizada da superfície, sendo que o pixels que representam o FM seguem a seguinte lógica:
 - Para uma mesma coordenada espacial, se o pixel da imagem de sulcos ideais é 1 e o pixel da superfície original binarizada também é 1, então o pixel é um ponto de FM;
 - Demais situação, o pixel não representa um FM.
- Os pixels mais claros, dentro das regiões de sulcos, da Figura 2.21 são as regiões de FM;

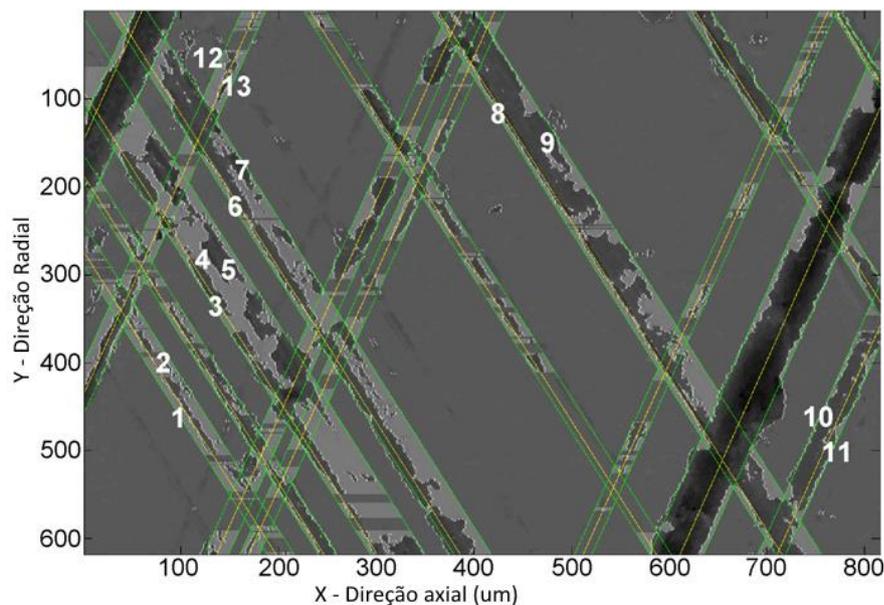


Figura 2.21: Identificação das regiões de sulcos e de FM pela utilizando a rotina de Dimkovski (2011)

Fonte: Dimkovski, 2011.

- O percentual de FM é a razão entre o pixels de identificados como FM pela quantidade total de pixels da imagem;

Obara *et al.* (2014), em complemento ao estudo iniciado por Obara (2013), também desenvolveram rotinas para quantificação de FM utilizando imagens 3D obtidas via interferometria.

O sequenciamento do processo de quantificação de FM, utilizando o método proposto por Obara *et al.* (2014) e Obara (2013), segue basicamente as seguintes etapas:

- Obtenção da topografia 3D (Figura 2.22(a));
- Determinação do ângulo de brunimento através da transformada de Radon;
- Utilizando a transformada de Radon inversa, é gerada a imagem (Figura 2.22(b)) com as regiões da superfície que estão orientadas em relação ao ângulo de brunimento;

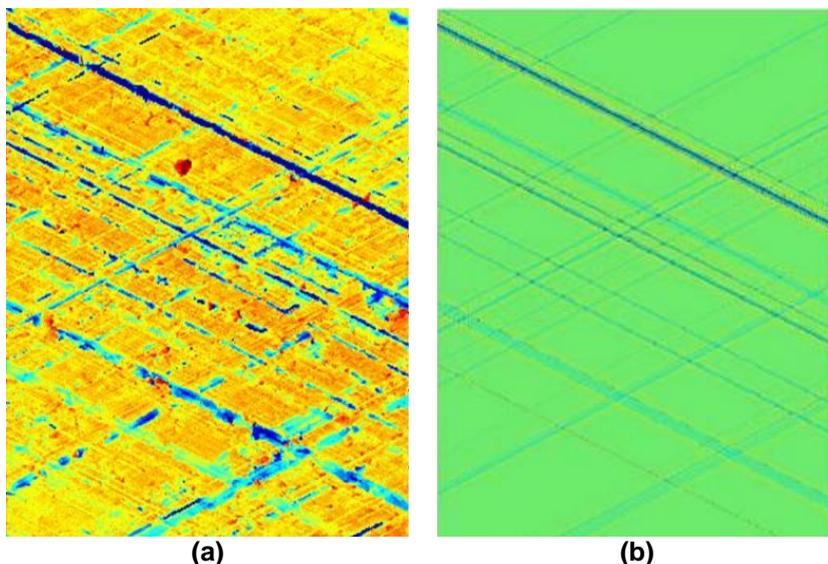


Figura 2.22: (a) Topografia; (b) Superfície com as regiões orientadas em relação ao ângulo de brunimento

Fonte: Obara, (2013).

- A profundidade mínima do sulco é dada pela altura de $0,5 \cdot S_k$ acima do plano topográfico;
- Como critério para definir um sulco ideal, é realizada uma varredura dentro de cada região orientada, de modo a avaliar se no mínimo 30% dos pixels

dentro destas regiões correspondem aos pixels da topografia que apresentam a profundidade mínima de sulco;

- A imagem resultante do processo anterior é a imagem binarizada das regiões de sulco ideais, mostrada na Figura 2.23(a);

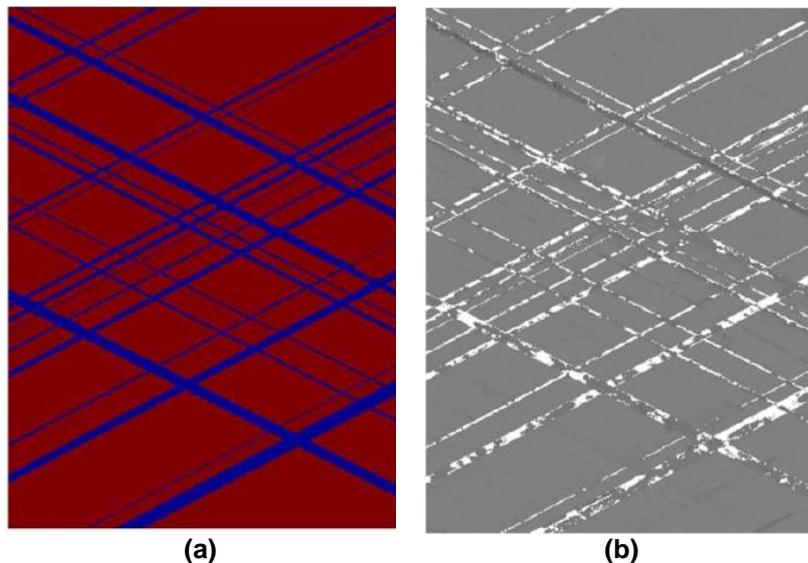


Figura 2.23: (a) Binarização e identificação das potenciais regiões de sulcos ideais (pixels azuis); (b) Identificação do FM (pixels brancos) no interior dos sulcos

Fonte: Obara, (2013).

- A identificação do FM, Figura 2.23(b), e o percentual de FM são determinados de modo semelhante ao proposto por Dimkovski (2011), com a diferença que o critério adotado para a identificação é de $0,5 \times S_k$ em relação ao plano topográfico ao invés do valor do S_r .

Em sua rotina de cálculo, Obara *et al.* (2014) e Obara (2013), não fazem a diferenciação dos sulcos recobertos pelo FM e os sulcos interrompidos devido ao processo, sendo este último, então, considerado como FM recobrindo o sulco.

As principais vantagens desses algoritmos, tanto quanto o desenvolvido por Obara (2013) e quanto o por Dimkovski (2011) em relação aos outros métodos citados são: rotinas automáticas de quantificação de FM baseadas em medições topográficas 3D, tempo de análise curto e independência em relação ao indivíduo que realiza o controle.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritas as etapas de caracterização para análise microestrutural, quantificação de FM e da topografia dos cilindros de MCI.

Também são descritas as modificações do algoritmo de quantificação de FM, assim como os meios para sua respectiva avaliação, e o método empregado para a sobreposição de imagens.

3.1 Cilindros

Para a realização deste estudo foram analisados dois cilindros de MCI, providos pela empresa Tupy S.A., sendo um de FFV e outro de FFC.

Os cilindros são oriundos do modelo de bloco Ford Lion V8, com diâmetro interno de 83 mm. As classes dos FFs utilizados são: FC 250 (norma ABNT NBR 6589) para cilindro em FFC e GJV 450 (norma ISO 16112) para o cilindro em FFV. As propriedades mecânicas típicas de ambos são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas do FFC FC 250 e do FFV GJV 450

Propriedade mecânica	FC 250	GJV 450
Limite de resistência a tração (MPa)	250 - 330	450 - 525
Limite de escoamento (MPa)	165 - 228	340 - 415
Alongamento (%)	0,3 - 0,8	1 - 2,5
Módulo de elasticidade (GPa)	103 - 118	135 - 145

Fonte: Adaptado de Guessser, 2009.

Um dos blocos de MCI utilizado, já posicionado na mesa da brunidora, é mostrado na Figura 3.1. Na mesma figura é indicado, em vermelho, a região do bloco do qual foram extraídos os cilindros.

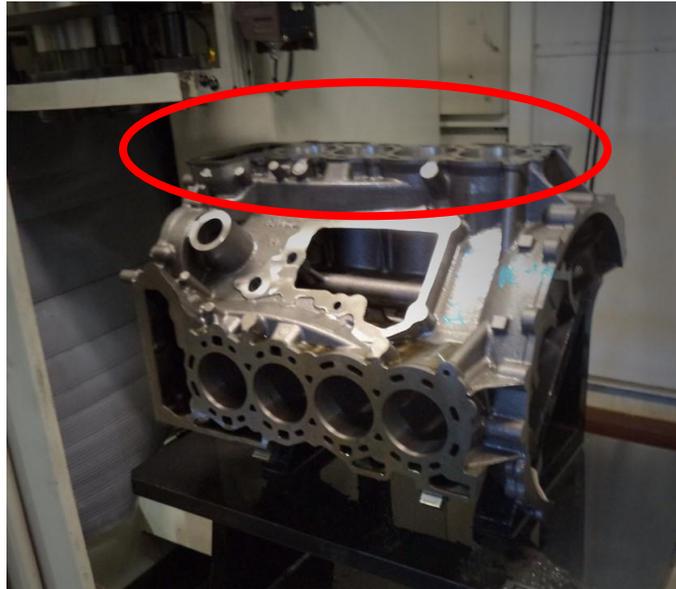


Figura 3.1: Bloco de motor Ford Lion V8⁶

Todos os cilindros foram brunidos com pedras diamantadas e com acabamento de platô. Visando obter a mesma rugosidade para todos os cilindros foram realizadas mudanças nos parâmetros de brunimento ao se trocar o material dos blocos. Ressalta-se que todos os processos de usinagem, inclusive o corte dos blocos, foram realizados pela Tupy S.A.

O sistema adotado para a identificação dos cilindros e dos quadrantes é mostrado na Figura 3.2.

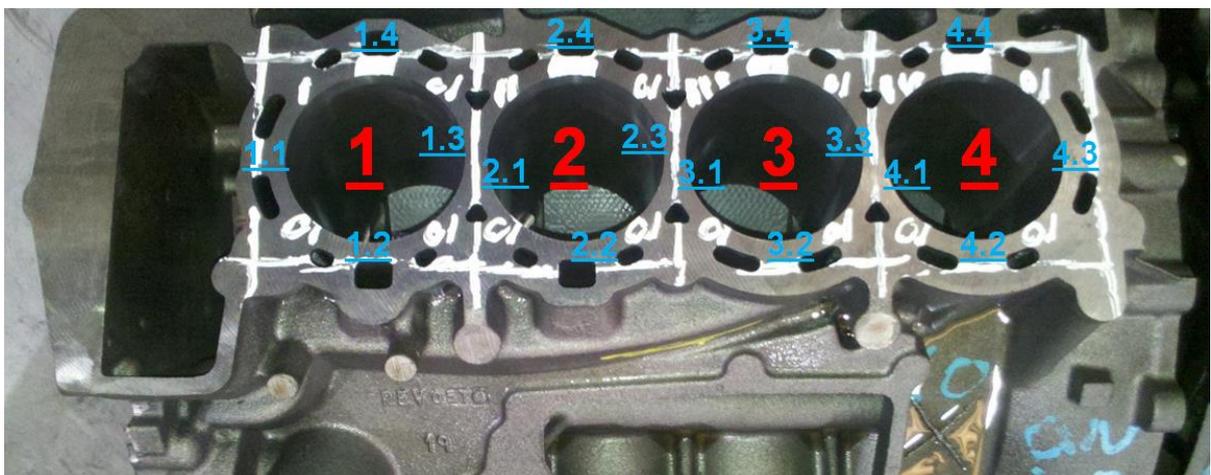


Figura 3.2: Identificação dos cilindros antes do corte do bloco

⁶ As ilustrações, tabelas e quadros sem indicação de fonte são de autoria própria

Neste estudo foi utilizado o cilindro 1, tanto em FFC quanto em FFV. Não há nenhum motivo em particular para a escolha deste cilindro, visto que todos apresentam regiões de maior e menor espessura equivalentes entre si.

A identificação “1.1” se refere a região de maior espessura e a região “1.3”, a de menor espessura. Regiões estas localizadas em quadrantes opostos.

A Tabela 3.2 apresenta os valores de espessura em função da distância da face de montagem com o cabeçote.

Tabela 3.2: Variação de espessura dos cilindros no sentido axial

Distância da face de montagem com o cabeçote (mm)	Região 1.1 (mm)	Região 1.3 (mm)
10	7,2	3,4
70	7,6	4,3

A região 1.1 do cilindro será denominada ao longo deste trabalho como “7.4” e o quadrante oposto como “3.8”, em referência a espessura média de cada amostra.

A quantificação da espessura para uma distância inferior a 10 mm ou superior a 70 mm não é considerada, devido ao fato de se tratarem de regiões de união (continuidade) entre os cilindros ou em relação as demais partes do bloco.

Será assumida a hipótese que a variação na espessura compreendida entre 10 mm e 70 mm, partindo-se da face de montagem, é desprezível. No sentido radial será considerado que não ocorre variação de espessura a uma de distância de 5 mm tangencial ao ponto de menor espessura, logo, o comprimento de arco será de aproximadamente 10 mm.

3.2 Etapas de preparação e caracterização

As etapas de preparação e caracterização dos cilindros adotadas neste projeto estão sequenciadas conforme a Figura 3.3 e são descritas na sequência deste capítulo. Em paralelo a preparação das amostras, serão realizados os procedimentos que visam a avaliação e as modificações no código de quantificação de FM.

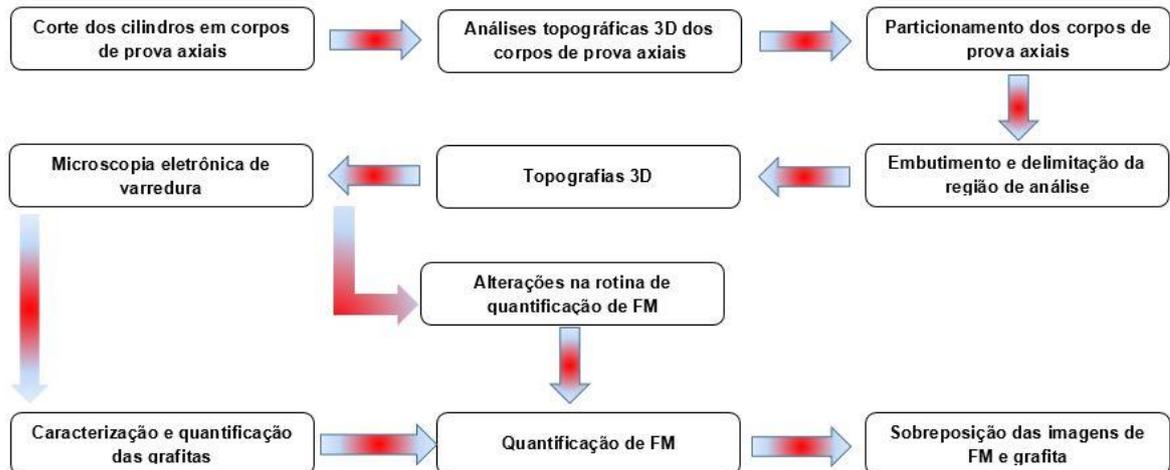


Figura 3.3: Fluxo das etapas de preparação e de análises

3.2.1 Corte dos cilindros em corpos de prova axiais

Nesta etapa, os cilindros foram cortados no mesmo sentido de deslocamento do pistão (axial). Tais cortes foram realizados de modo a separar as regiões “7.8” e “3.8” do restante do cilindro, de modo a permitir as demais análises.

O processo foi realizado utilizando-se a serra fita horizontal, disponível no laboratório de usinagem da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

As amostras resultantes receberam a denominação de corpos de prova axiais. Na Figura 3.4 é possível visualizar uma das etapas de corte dos cilindros, e na Figura 3.5 os corpos de prova axiais.



Figura 3.4: Corte dos corpos de prova axiais

Todos os corpos de prova apresentam comprimento de $70^{\pm 1}$ mm, referenciados em relação a face de montagem com o cabeçote.



Figura 3.5: Corpos de prova axiais

3.2.2 Análises topográficas 3D dos corpos de prova axiais

Tal procedimento teve como objetivo avaliar a existência da variação dos parâmetros de rugosidade entre as regiões “7.8” e “3.8”, assim como da obtenção das topografias para a avaliação da presença de FM nos mesmos.

As topografias dos corpos de prova foram obtidas utilizando o interferômetro de luz branca (WLI - *white light interferometer*), modelo CCI Lite, marca Taylor Hobson, com resolução vertical de 0,01 nm, utilizando-se a opção de resolução lateral de 0,816 μ m, disponível no laboratório de metrologia da UTFPR.

Todos os corpos de prova foram previamente submetidos a limpeza por ultrassom (20 minutos), e a temperatura e umidade relativa do local de medição foram controlados (20°C e 70% umidade relativa).

O número de mínimo de medições (NMM) foi determinado utilizando-se a distribuição-t para um intervalo de confiabilidade de 95%, assumindo-se um erro amostral de 10% em relação à média. O NMM é dado pela equação (1):

$$NMM = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \sigma}{\bar{E}} \right)^2 \quad (1)$$

onde:

σ = Desvio padrão;

\bar{E} = Erro amostral;

$Z_{\alpha/2}$ = Valor da distribuição-t para um determinado intervalo de confiança e graus de liberdade.

No caso em questão, tem-se que $Z_{\alpha/2}$ é igual a 2,04.

O NMM determinado foi de 30 medições por corpo de prova, onde cada medição representa uma área de 0,835 x 0,835 mm. Na Figura 3.6 é apresentado o um plano de medições adotado. As regiões em vermelho representam os locais de medição.

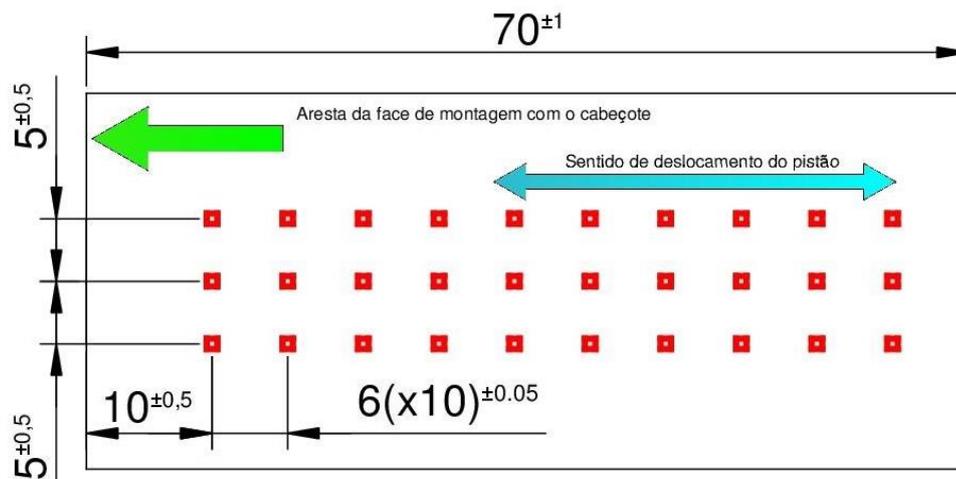


Figura 3.6: Plano de medições. Dimensões em milímetros

O descarte dos 10 mm iniciais se deve as questões de espessura já salientadas anteriormente.

Os parâmetros de rugosidade 3D mensurados foram os sugeridos por Dimkovski *et al.* (2012), em conjunto com os parâmetros funcionais: Sq, Sk, Spk, Svk, Sr1, Sr2, Ssc, Sds e Sdq.

3.2.3 Particionamento dos corpos de prova axiais

Realizada as medições de topografia, os corpos de prova axiais foram particionados conforme ilustra o plano de corte da Figura 3.7. As regiões hachuradas representam as amostras que foram geradas após esta etapa.

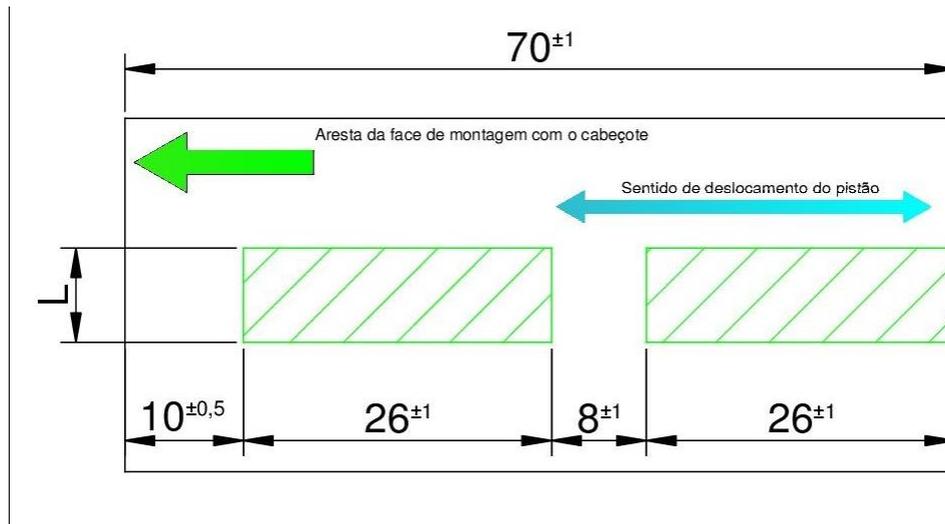


Figura 3.7: Plano de corte dos corpos de prova axiais. Dimensões em milímetros

Este procedimento foi realizado utilizando-se equipamentos disponíveis no laboratório de materiais da UTFPR.

Não será realizada nenhuma distinção entre as duas amostras obtidas de cada corpo de prova axial.

As dimensões adotadas, no quesito comprimento, foram estabelecidas de modo a permitir o embutimento das mesmas. No que tange a largura (cota L da Figura 3.7), as mesmas apresentam apenas um limite máximo de 10 mm (da hipótese de espessura constante), com limite inferior de 5 mm.

3.2.4 Embutimento e delimitação da região de análise

O procedimento de embutimento foi realizado com o intuito de facilitar as demais etapas de preparação e análise.

Para delimitação da região de interesse foram realizadas três impressões mecânicas na superfície de cada amostra, resultando em duas regiões de análises, que são consideradas idênticas entre si, tanto em termo de rugosidade, microestrutura e quantidade de FM, de modo que não haverá uma distinção entre as mesmas. Tais impressões foram obtidas através do ensaio de dureza *Rockwell A*. A Figura 3.8 ilustra a disposição das impressões (pontos em vermelho) na superfície de uma amostra já embutida.

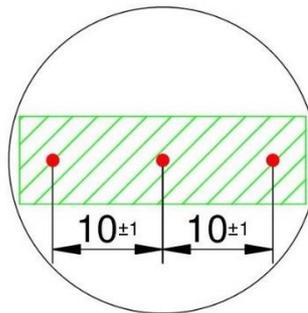


Figura 3.8: Representação das marcações nas amostras embutidas. Dimensões em milímetros

A escolha do ensaio *Rockwell A* se deve que a profundidade da impressão é superior a quantidade de material removida para a caracterização das grafitas (capítulo 3.2.7), logo, a mesma continua visível após a remoção de material.

A distância de 10 mm foi estabelecida em função da limitação da área de análise do WLI. Posteriormente, as mesmas atuaram como pontos de referência para a sobreposição das imagens contendo FM e grafita.

Esta etapa também foi realizada no laboratório de materiais da UTFPR.

3.2.5 Topografias 3D

As topografias 3D também foram obtidas via WLI, com a mesma resolução lateral da etapa de análise. Neste caso, a área de varredura apresenta largura de 0,835 mm, com o comprimento limitado pelas impressões na superfície de cada amostra. Ressalta-se que, nesta etapa, o foco está apenas na obtenção dos valores de altura da superfície, ou seja, na topografia, sem interesse na rugosidade da mesma.

As topografias serão utilizadas no processo de sobreposição de imagem entre FM e grafita.

Assim como na etapa 3.2.2, todas as amostras foram previamente submetidas a limpeza por ultrassom (20 minutos), e a temperatura e umidade do local de medição foram controlados (20°C, 70% umidade relativa).

3.2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A MEV foi realizada visando dois objetivos: identificação do FM e outras peculiaridades das superfícies em questão na região compreendidas pelas impressões de dureza.

As imagens obtidas via MEV foram realizadas na UTFPR utilizando-se o microscópio eletrônico de varredura marca Zeiss, modelo EVO-MA15.

3.2.7 Caracterização e quantificação das grafitas

Para caracterização e quantificação da grafita, as oito amostras foram submetidas ao processo de preparação metalográfica, utilizando-se para tal, tanto no que diz respeito ao lixamento quanto ao polimento, a politriz-lixadeira semiautomática, modelo AutoMet 250, marca Buehler, disponível no laboratório de materiais da UTFPR.

Tal procedimento foi realizado de modo que a distância entre a superfície utilizada para a caracterização topográfica e a superfície para identificação e caracterização da grafita não fosse superior $0,15 \pm 0,05$ mm.

A identificação da grafita e suas características morfológicas foram realizadas utilizando o microscópio óptico de observação direta, em conjunto com o *software Image-Pro Plus*, também disponíveis no laboratório de materiais da UTFPR, sendo que as características avaliadas foram:

- Razão de aspecto (RA): A razão entre a maior (a) e menor aresta (b) de um retângulo de área mínima que contenha a projeção da forma da grafita (Figura 3.9);

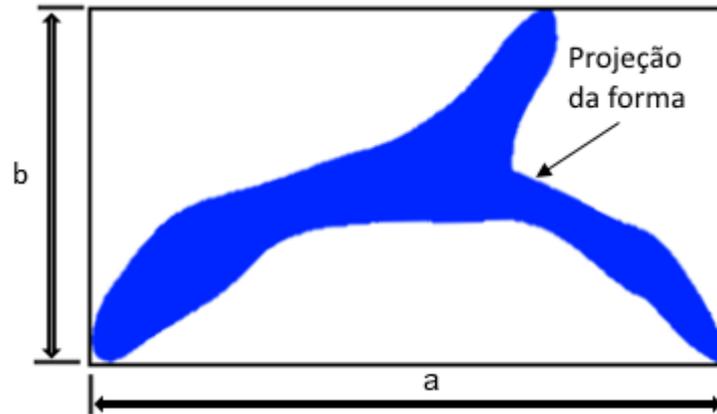


Figura 3.9: Método de análise para o cálculo do fator de aspecto

Fonte: Adaptado de Wojnar, 1999.

- Grau de nodularidade (GN): Razão entre a quantidade de grafitas nodulares pelo total de grafitas;
 - Uma grafita é considerada nodular se a RA for inferior a 1,53 (IMASOGIE *et al.*, 2004).
- Quantidade de grafitas por milímetro quadrado (QG);
- Fração de grafita (FG): Razão entre a área total das grafita pela área de amostragem;
- Fração de grafita nodular (FGN): Razão entre a soma das áreas das grafitas nodulares pela área total das grafitas;
- Área média da grafita (AMG);
- Área média da grafita nodular (AMGN).

Para a filtragem das inclusões da superfície, foi imposta a restrição de que uma partícula só seria considerada uma grafita se possuísse área com valor superior ou igual a $9 \mu\text{m}^2$.

A área superficial avaliada de cada amostra foi limitada pelas impressões presentes nas mesmas, utilizando-se para tal micrografias obtidas na ampliação de 160x em conjunto com o *software* livre *Image Composite Editor*, que por sua vez, tem a finalidade de sobrepor a imagens adquiridas de modo a gerar uma única imagem que compreenda as duas impressões mecânicas de cada região, para a então avaliação da grafita no *software Image-Pro Plus*.

3.2.8 Quantificação de FM

A quantificação de FM é realizada com o algoritmo desenvolvido e disponível no Apêndice A. A rotina é compilada no *software Matlab*.

3.2.9 Sobreposição das imagens de FM e de grafitas

Para a sobreposição das imagens e identificação das regiões coincidentes de grafita e FM foi utilizado a rotina desenvolvida em *Matlab* na tese de doutorado (em andamento) de João Luiz do Vale (Influência da microestrutura de ferros fundidos na ocorrência de folded metal e no comportamento tribológico para superfícies brunidas), disponível no Anexo A. Os seguintes procedimentos são realizados para a sobreposição das imagens:

- Determinação dos centroides e da distância entre as impressões, assim como do ângulo entre a horizontal e uma reta que passa pelos centroides, em ambas as imagens: da topografia obtida via WLI e da imagem das grafitas obtidas por microscopia óptica. A Figura 3.10 ilustra este primeiro procedimento;

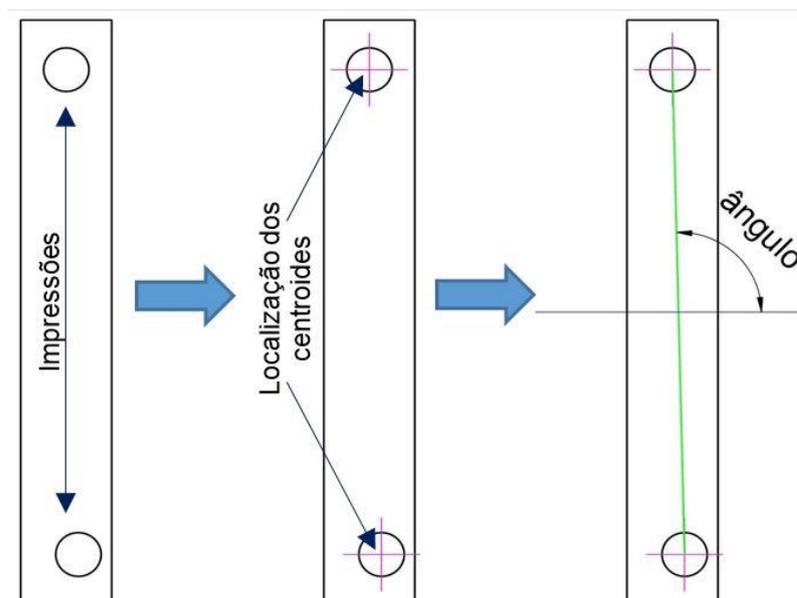


Figura 3.10: Procedimento inicial para a sobreposição

- Em seguida, a imagem da microscopia óptica é sujeitada a procedimentos de rotação e aplicação de escala, de modo ajustar o tamanho de pixel e ângulo em relação a imagem da topografia;
- Adequação do tamanho da imagem das grafitas de modo que ambas as imagens tenham a mesma quantidade de pixels;
- Eliminação das impressões e regiões próximas. Para tanto, retirou-se 2,5 vezes o diâmetro das impressões, a partir do centroide;
- Separação dos pares de imagens (topografia e grafita) com dimensões de 0,835 x 0,835 mm;
- Compilação da rotina de quantificação de FM desenvolvida em função do plano $Sk_{1/2}$;
- Identificação dos pixels coincidentes de FM e grafita.

São feitas novas avaliações das características da distribuição e forma das grafitas nas imagens geradas pela rotina de sobreposição, utilizando-se os mesmos recursos descritos no item 3.2.7, de modo a se ter um par de informações (FM e grafitas) correspondentes a mesma região de análise, visando identificar a possível correlação entre os parâmetros de distribuição e forma da grafita com o FM.

3.3 Desenvolvimento da rotina de quantificação de FM

Utilizando como referência a rotina desenvolvida por Obara (2013), foi implementada uma nova rotina de quantificação de FM no interior dos sulcos para a realização deste trabalho. A rotina desenvolvida, assim como a proposta por Obara (2013), utiliza como dados de entrada a matriz de altura da superfície gerada via WLI.

As principais diferenças entre a rotina desenvolvida e de Obara (2013) na metodologia para identificação dos sulcos ideais são listadas a seguir:

- Identificação dos pixels pertencentes aos sulcos (potenciais regiões de sulco) baseada na altura de início do parâmetro de rugosidade Svk , que é altura referente ao Sr_2 (vide Figura 2.14), igual ao proposto por Dimkovski (2011), antes do processo de binarização dos sulcos ideais;
- O cálculo da altura de início do Svk é realizado dentro da rotina desenvolvida;

- As regiões de sulcos ideais serão identificadas através de retas orientadas de acordo com o ângulo de brunimento, de modo que se 30% dos pixels dessa reta coincidirem com os pixels pertencentes as potenciais regiões de sulco, todos os pixels da reta serão admitidos como pixels pertencentes a um sulco ideal;
- Somente após as etapas acima é gerada a imagem binarizada dos sulcos ideais, para a posterior quantificação do FM.

O algoritmo para o cálculo do ângulo de brunimento da rotina desenvolvida é idêntica da rotina de Obara (2013) e Obara *et al* (2014).

No que se refere a quantificação de FM, o algoritmo foi desenvolvido de modo a permitir a identificação de FM em três planos, compreendidas entre o início, meio e fim da zona do parâmetro Sk , ou ainda, a altura referente ao parâmetro $Sr1$ (início do Sk), $Sr2$ (fim do Sk) e o metade da altura do Sk , que é dada por:

$$Sk_{1/2} = \frac{Altura_{Sr1} + Altura_{Sr2}}{2} \quad (2)$$

. A Figura 3.11 ilustra estas regiões, assim como a designação adotada para cada plano.

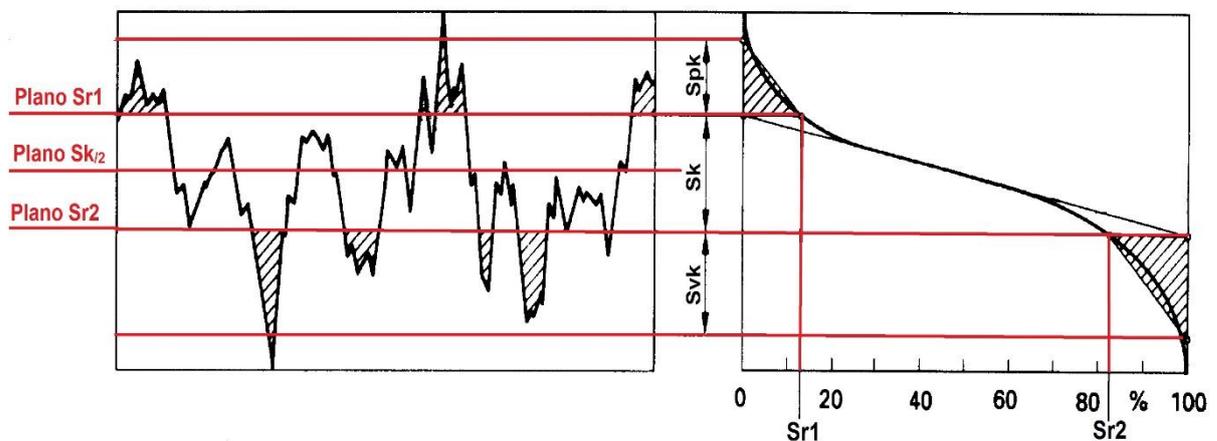


Figura 3.11: Planos utilizados para quantificação de FM

Fonte: Adaptado de ISO 13565-2, 1998.

A adição destes planos tem por finalidade avaliar, qualitativamente, em qual dos três a identificação do FM ocorre de modo mais realístico. A lógica de identificação dos pixels de FM se manteve a mesma da proposta de Obara (2013) e Dimkovski (2011).

No que tange as regiões de sulco interrompido devido ao processo, estes continuaram sendo consideradas regiões de FM.

Além do cálculo do percentual de FM em relação a área total, é adicionado o cálculo do percentual de FM em relação a área pertencentes aos sulcos ideais (razão entre o número de pixels de FM pelo número de pixels pertencentes aos sulcos ideais), além do percentual de sulcos ideais em relação a área de amostragem.

Toda a rotina foi desenvolvida com o auxílio do *software Matlab*.

A análise do código desenvolvido terá caráter qualitativo, de modo a utilizar as imagens obtidas via WLI, em conjunto com as imagens geradas pela a rotina de Obara (2013) e comparando-se as mesmas com as imagens obtida através da nova rotina.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste projeto são abordados em cinco frentes:

- Avaliação dos parâmetros 3D de rugosidade;
- Comparativo entre a rotina Obara (2013) e a rotina desenvolvida;
- Análise do FM na superfície dos cilindros;
- Distribuição e morfologia da grafita;
- Análise da relação entre FM e grafita.

4.1 Avaliação dos parâmetros 3D de rugosidade

Para a avaliação das diferenças de rugosidade dos cilindros em termos da espessura, foi utilizado o método de análise de variância (ANOVA – *Analysis of variance*) de fator único, de modo a avaliar a hipótese de que as regiões de diferentes espessuras, considerando-se um mesmo material, pertencem a mesma população.

A ANOVA foi realizada para um nível de significância de 5%, considerando-se separadamente os parâmetros S_q , S_k , S_{pk} , S_{vk} , S_{r1} , S_{r2} , S_{ds} , S_{dq} e S_{sc} .

A Tabela 4.1 apresenta os dados obtidos dos corpos de prova axiais. A designação '7.8' se refere a parede de maior espessura, enquanto '3.8' é referente a de menor espessura. Os valores destacados em vermelhos são referentes aos parâmetros de rugosidade em que foram encontradas diferenças significativas de acordo com a ANOVA, ou seja, onde a hipótese nula, H_0 , do teste F foi rejeitada pela ANOVA.

Tabela 4.1: Parâmetros de rugosidade dos corpos de prova axiais em FFC e FFV

Parâmetro	Material	Corpo de prova	Média	Coefficiente de variação (%)	Teste F
Sq (μm)	FFC	7.4	$0,6 \pm 0,1$	19	H = 0
		3.8	$0,7 \pm 0,2$	24	H = 0
	FFV	7.4	$0,7 \pm 0,1$	13	H = 0
		3.8	$0,7 \pm 0,1$	15	H = 0
Sk (μm)	FFC	7.4	$1,0 \pm 0,1$	13	H = 0
		3.8	$1,1 \pm 0,3$	23	H = 0
	FFV	7.4	$1,1 \pm 0,1$	7	H = 0
		3.8	$1,1 \pm 0,2$	21	H = 0
Spk (μm)	FFC	7.4	$0,47 \pm 0,03$	7	H = 0
		3.8	$0,5 \pm 0,1$	26	H = 0
	FFV	7.4	$0,41 \pm 0,03$	7	H \neq 0
		3.8	$0,43 \pm 0,02$	6	H \neq 0
Svk (μm)	FFC	7.4	$1,3 \pm 0,3$	22	H = 0
		3.8	$1,3 \pm 0,3$	21	H = 0
	FFV	7.4	$1,4 \pm 0,3$	19	H = 0
		3.8	$1,3 \pm 0,2$	15	H = 0
Sr1 (%)	FFC	7.4	$9,4 \pm 0,9$	9	H = 0
		3.8	$8,7 \pm 0,9$	10	H = 0
	FFV	7.4	$8,0 \pm 0,6$	8	H = 0
		3.8	8 ± 1	16	H = 0
Sr2 (%)	FFC	7.4	83 ± 2	2	H = 0
		3.8	82 ± 2	2	H = 0
	FFV	7.4	81 ± 2	2	H = 0
		3.8	81 ± 2	2	H = 0
Sds ($1/\text{mm}^2$)	FFC	7.4	51583	3	H = 0
		3.8	52480	4	H = 0
	FFV	7.4	56308 ± 1479	3	H = 0
		3.8	55804 ± 1691	3	H = 0
Sdq	FFC	7.4	$0,44 \pm 0,03$	7	H = 0
		3.8	$0,43 \pm 0,03$	8	H = 0
	FFV	7.4	$0,43 \pm 0,02$	6	H \neq 0
		3.8	$0,45 \pm 0,03$	6	H \neq 0
Ssc ($1/\text{mm}$)	FFC	7.4	751 ± 50	7	H = 0
		3.8	761 ± 56	7	H = 0
	FFV	7.4	756 ± 32	4	H = 0
		3.8	769 ± 53	7	H = 0

Para o cilindro de FFC, a ANOVA indica que não há diferenças significativas entre as médias dos parâmetros avaliados. Logo, em termos dos parâmetros de rugosidade mensurados, as duas seções podem ser consideradas equivalentes.

Já para o cilindro em FFV, a ANOVA dos parâmetros Spk e Sdq indica que há diferenças estatisticamente significativas entre as duas espessuras. Essa

discrepância está associada aos baixos coeficientes de variação apresentados pelos parâmetros Spk e Sdq, visto que a diferença percentual entre as médias não é superior a 6% para o Spk e de 3% no Sdq. Logo, apesar da indicação da ANOVA, é plausível assumir que ambos os corpos de prova axiais de FFV são semelhantes entre si, baseando-se no fato dos valores médios serem próximos e nos baixos desvios apresentados.

Outra informação a ser observada em relação aos parâmetros de rugosidade mensurados, é que o desvio padrão, ou o coeficiente de variação, no cilindro em FFV é sempre inferior ao do FFC, sendo até quatro vezes menor em determinadas situações, indicando maior uniformidade e qualidade do processo de brunimento no FFV.

A ANOVA também foi realizada visando avaliar as diferenças nos parâmetros de rugosidade entre cilindros, já considerando que não há diferenças significativas no que tange a variação de espessura. A análise foi realizada para um nível de significância de 5%, sendo que o único parâmetro a apresentar diferença foi Sds, com diferença entre as médias de 7% e com coeficiente de variação inferior a 4% em ambos os cilindros. Assim como na avaliação do cilindro de FFV em relação a variação de espessura, assume-se que as diferenças na rugosidade entre os cilindros não é significativa.

4.2 Comparativo entre a rotina Obara (2013) e a rotina desenvolvida

Ambas as rotinas tem a finalidade de identificar a presença de FM no interior dos sulcos, assim como a identificação de sulcos interrompidos, sendo que este último acaba por ser considerado como um FM que recobre o sulco.

Na MEV da Figura 4.1 são indicadas as algumas regiões de sulco (vermelho), FM (verde) e de sulco interrompido (amarelo), que são os focos de identificação das rotinas.

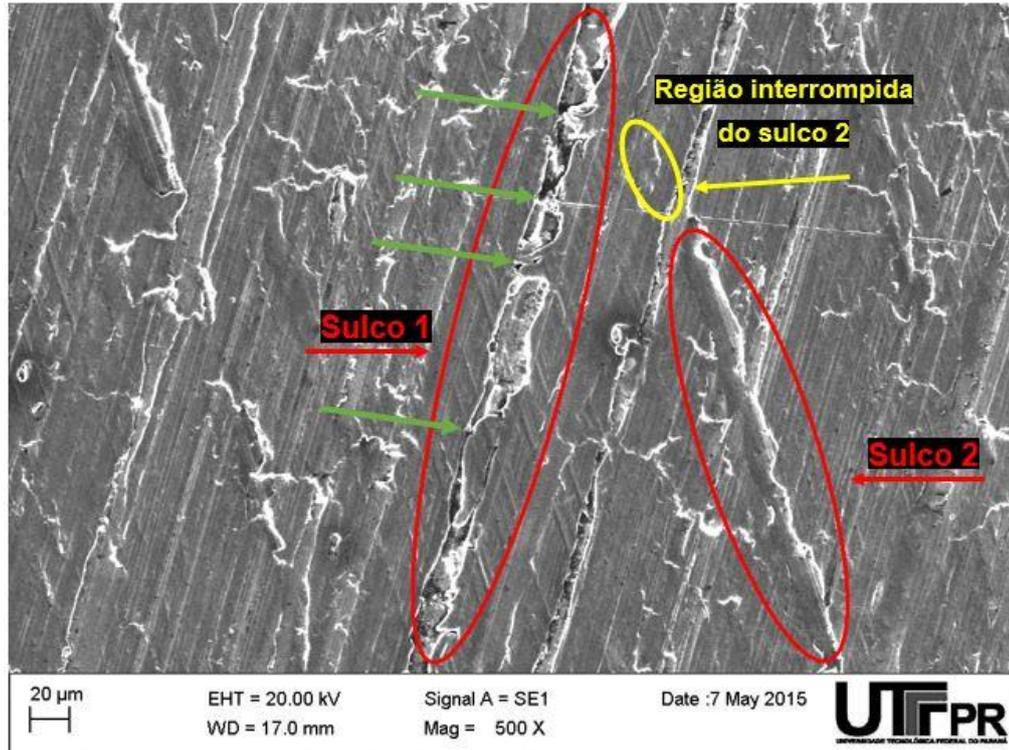


Figura 4.1: Identificação de FM e sulcos interrompidos nos sulcos de brunimento (MEV)

A primeira modificação implementada tem como finalidade definir as possíveis regiões de sulco em termos de uma altura mínima, ou seja, em termos de uma profundidade mínima de sulco que caracterizasse um possível pixel (ou ponto) que de fato fizesse parte de um sulco.

Para a rotina desenvolvida, como já mencionado, foi utilizado como critério a altura de início da região de vale, que é equivalente a altura do parâmetro Sr_2 , conforme ilustrado na Figura 3.11. Na Figura 4.2 é ilustrado a disposição dos planos para identificação da profundidade mínima em função da curva de distribuição de altura, assim como a diferença entre os demais planos entre as rotinas de Obara (2013), Dimkovski (2011) e a desenvolvida.

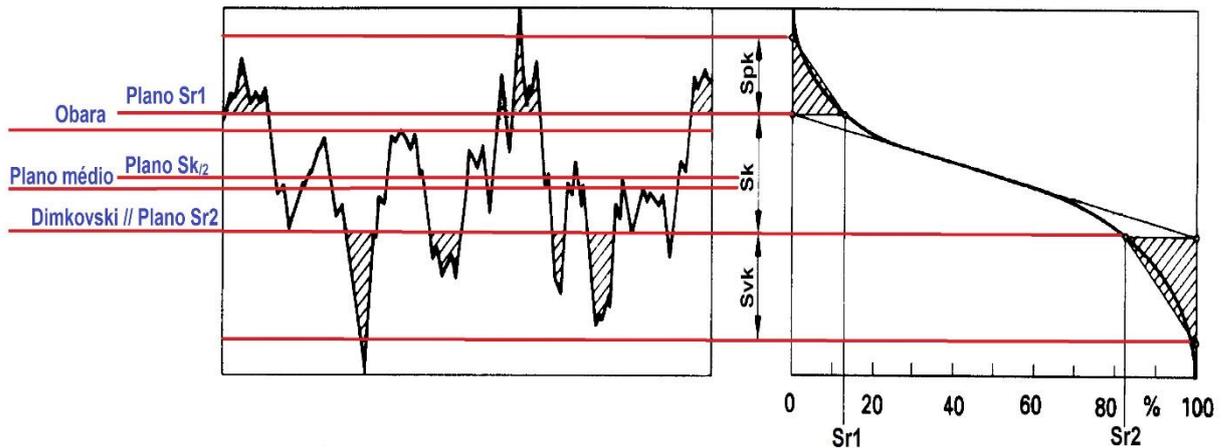


Figura 4.2: Comparação entre as alturas dos planos das rotinas de Obara (2013), Dimkovski (2011) e os planos da rotina desenvolvida

Fonte: Adaptado de ISO 13565-2, 1998.

A Figura 4.3(a) mostra uma topografia obtida via WLI e a imagem binarizada, Figura 4.3(b), após a varredura para a identificação dos pixels com profundidade mínima.

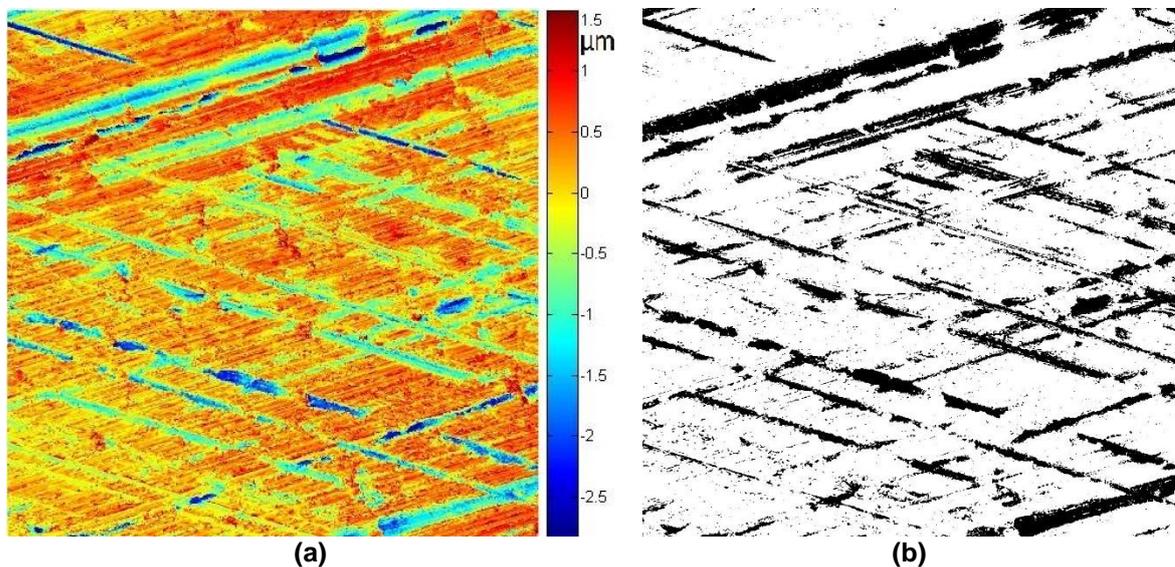


Figura 4.3: (a) Topografia gerada via WLI e as (b) Imagem binarizada dos pixels com altura inferior a profundidade mínima (pixels pretos). Rotina desenvolvida. Área = 0,835x0,835 mm

No código proposto por Obara (2013) e Obara *et al.*(2014), primeiramente são detectadas todas as regiões que estão orientadas em relação ao ângulo de brunimento, para só então ser realizada a verificação da profundidade. A Figura 4.4(a) mostra as regiões orientadas obtidas pelo código de Obara (2013) e a Figura 4.4(b) a

identificação dos pixels que satisfazem a condição de profundidade mínima. Ambas figuras são relativas a topografia da Figura 4.3(a)

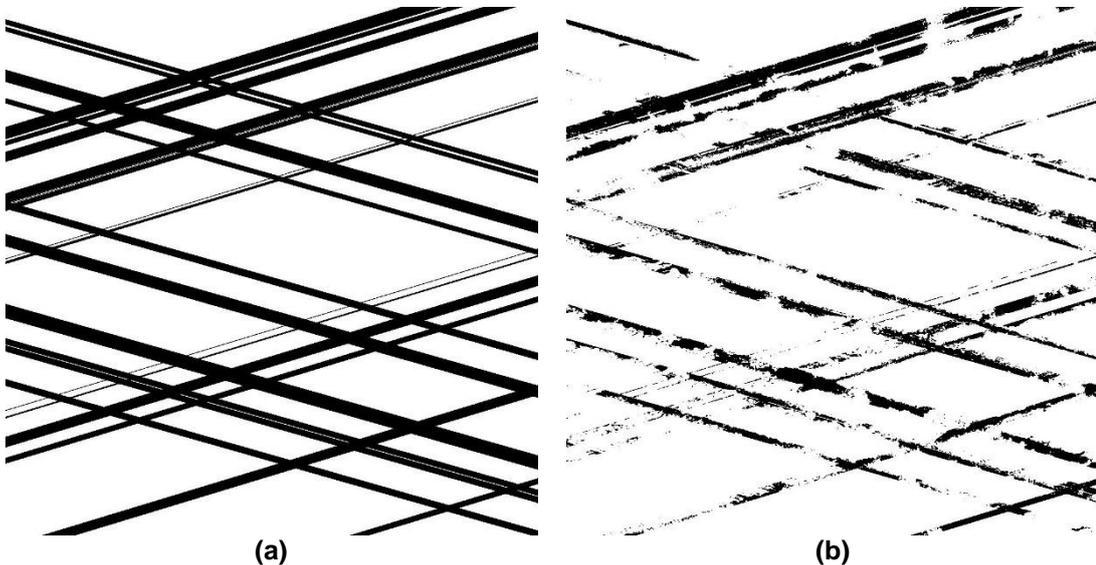


Figura 4.4: (a) Regiões orientadas em relação ao ângulo de brunimento; (b) Imagem binarizada dos pixels com altura inferior a profundidade mínima (pixels pretos). Rotina Obara (2013). Área = 0,835x0,835 mm

Apesar da imagem da Figura 4.4(b) se apresentar mais “limpa” em relação a Figura 4.3(b), visto que a filtragem só ocorre dentro das regiões que estão orientadas, é visível que determinadas regiões de sulco, que são visíveis na topografia e na Figura 4.3(b), deixaram de ser identificadas.

Em relação a determinação das regiões de sulco ideais, o código desenvolvido apresentou maior quantidade de sulcos, principalmente nos sulcos presentes nas bordas das topografias, como mostra a Figura 4.5(b), que também tem como referência a topografia da Figura 4.3(a). Isso por sua vez está associado a identificação primeiramente da possíveis regiões de sulco ao invés da determinação das regiões orientadas baseadas puramente na transformada de Radon.

Dado que a identificação das regiões de sulcos ideais é dependente da regiões potenciais de sulco, que são aquelas que apresentam a mínima profundidade, sendo que esta última é mais nítida no código desenvolvido, é plausível assumir que haverá uma maior quantidade de sulcos ideais identificados na rotina modificada.

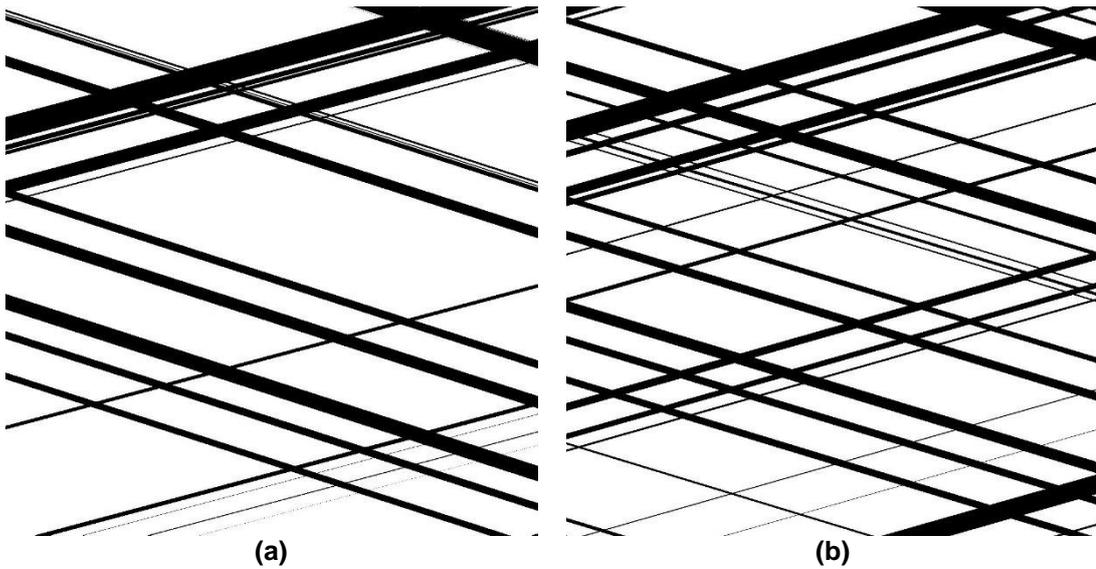


Figura 4.5: (a) Identificação das regiões de sulcos ideais utilizando o método proposto por Obara (2013) e (b) o método desenvolvido. Área = 0,835x0,835 mm

Como a quantificação de FM é dependente da identificação dos sulcos ideais, existiram diferenças significativas entre as duas rotinas. Na Figura 4.6(a) é mostrado a imagem da quantificação de FM utilizando a rotina antes das modificações e na Figura 4.6(b) após as modificações propostas, onde os pixels em azul representam os pontos identificados como FM. No caso, a quantificação mostrada foi realizada em relação ao plano $Sk_{/2}$ para a área de amostragem.

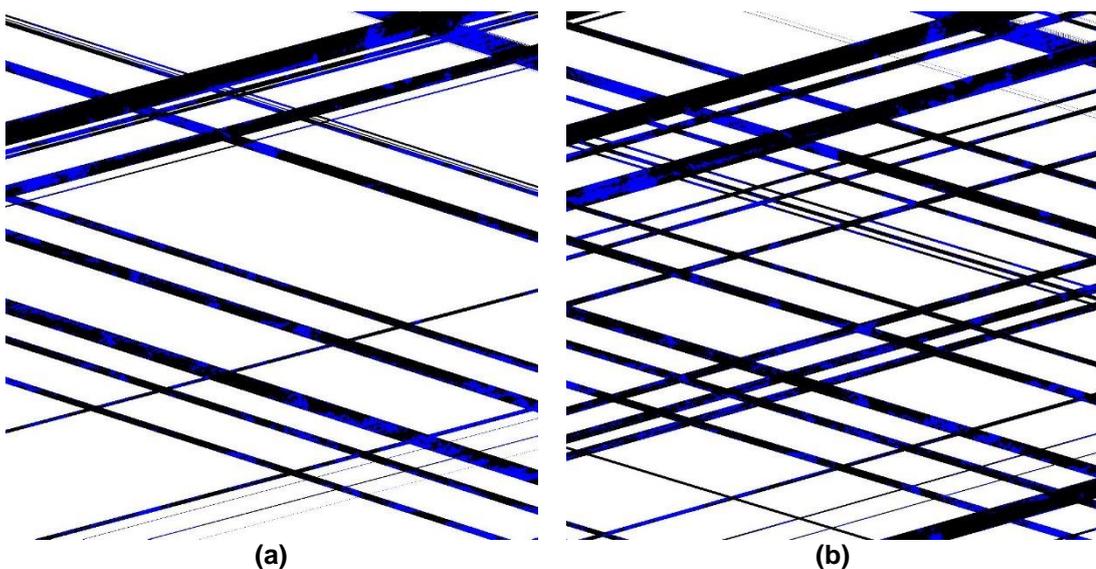


Figura 4.6: Identificação de FM pela rotina (a) Obara (2013) e a (b) desenvolvida. Área = 0,835x0,835 mm

O percentual de FM na versão desenvolvida é de 8,0%, enquanto que na original a quantificação apresentou 6,8%. Tal resultado é esperado, devido que há um número maior de sulcos identificados, condizentes com a topografia, aumentando assim a região de análise (ou varredura) para determinação do FM.

Finalizando a parte de avaliação, a Figura 4.7 apresenta uma última comparação geral entre a rotina de Obara (2013) e a desenvolvida.

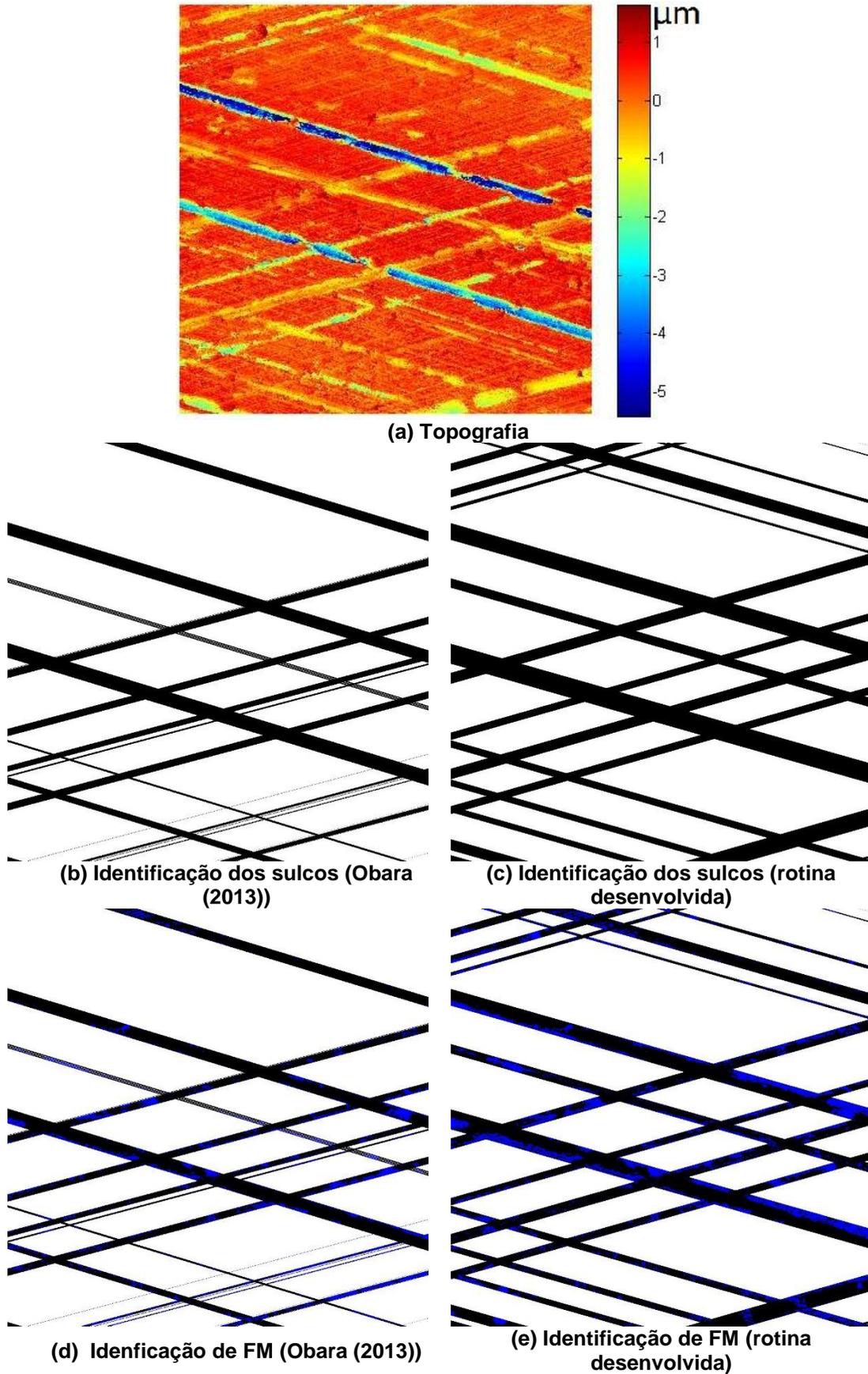


Figura 4.7: Comparação geral entre a retina de Obara (2013) e a desenvolvida. FM representados em azul e sulcos em preto. Área = 0,835x0,835 mm

É perceptível que na atual configuração ocorre a identificação de sulcos em maior quantidade, apresentando maior de semelhança com a imagem topográfica obtida por interferometria, enquanto que na versão de Obara (2013) é nítido que há uma supressão de alguns sulcos.

Conforme já citado, a quantificação de FM tenderá sempre a apresentar valores maiores na atual rotina devido a maior quantidade de sulcos, sendo estes valores mais condizente com a superfície real. No caso, a Figura 4.7(d) apresentou 3,1% e a Figura 4.7(e) 6,0%.

No código desenvolvido também foi incrementado a quantificação de FM em três níveis: no início (plano Sr1), meio (plano Sk₂) e fim da região (plano Sr2) do Sk, conforme ilustrava a Figura 3.11. Como é de supor, há uma diferença visualmente considerável na identificação de FM.

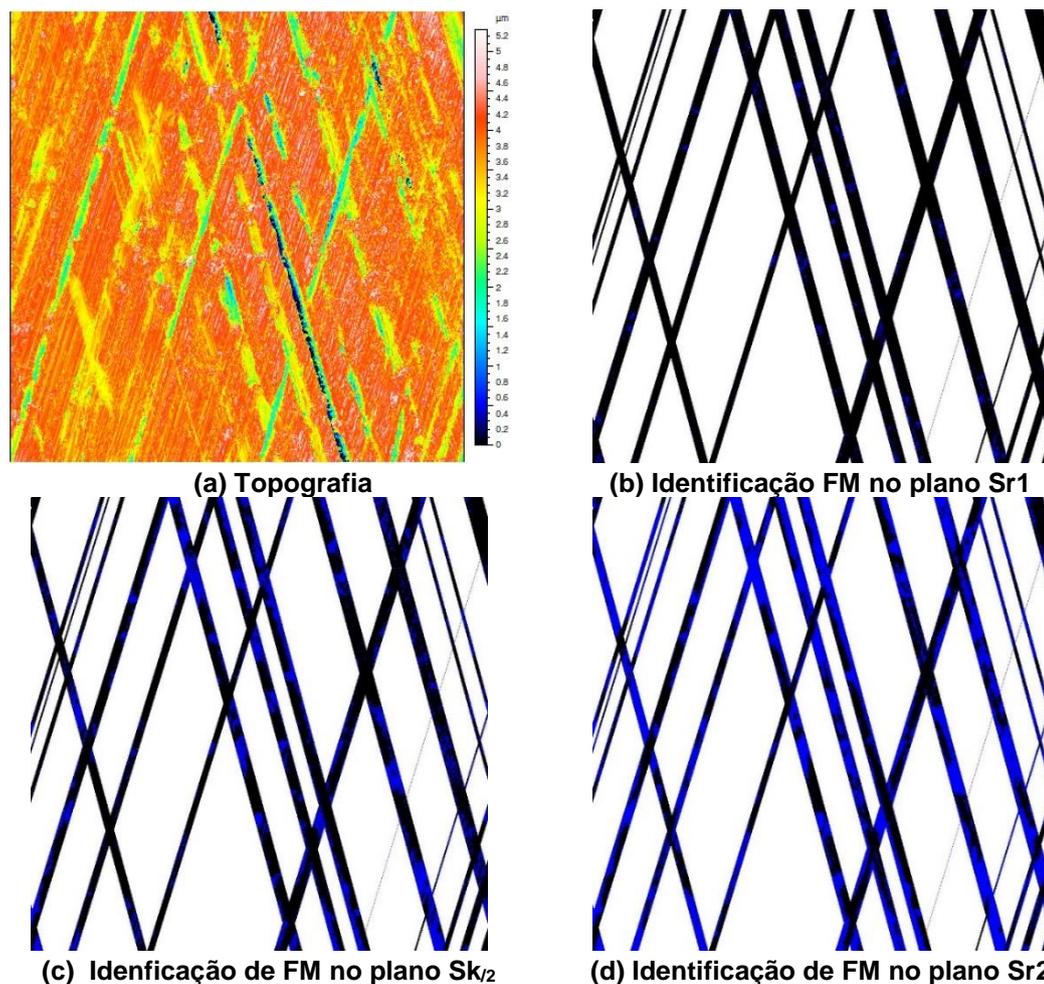


Figura 4.8: Variação da presença de FM em função do plano de identificação. Área = 0,835x0,835 mm

A discussão mais aprofundada em termo de valores e variação do FM nos planos de avaliação se dá no próximo tópico.

4.3 Análise do FM na superfície dos cilindros

Nesta seção são apresentados os resultados da avaliação de FM dos corpos de prova de FFC e FFV em termos da área de amostragem para os três planos de avaliação, em conjunto com a discussão de qual dos planos a identificação do FM apresenta melhor desempenho, e a quantificação de FM em relação a área dos sulcos ideais para o plano $Sk_{1/2}$, conforme ilustra a Figura 4.9.

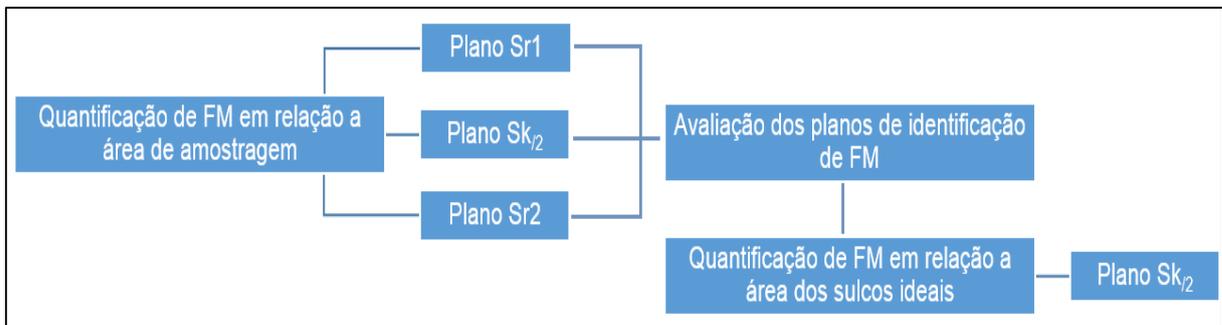


Figura 4.9: Sequência de análises de quantificação de FM.

Todas as quantificações foram realizadas com a rotina desenvolvida deste trabalho.

4.3.1 Análise dos resultados de quantificação de FM em relação a área de amostragem

Os valores obtidos da quantificação de FM em relação a área de amostragem, ou ainda, em relação ao número total de pixels que constituem a topografia 3D, são apresentados nos Gráfico 4.1, Gráfico 4.2 e Gráfico 4.3 em relação ao planos superior, médio e inferior, respectivamente.

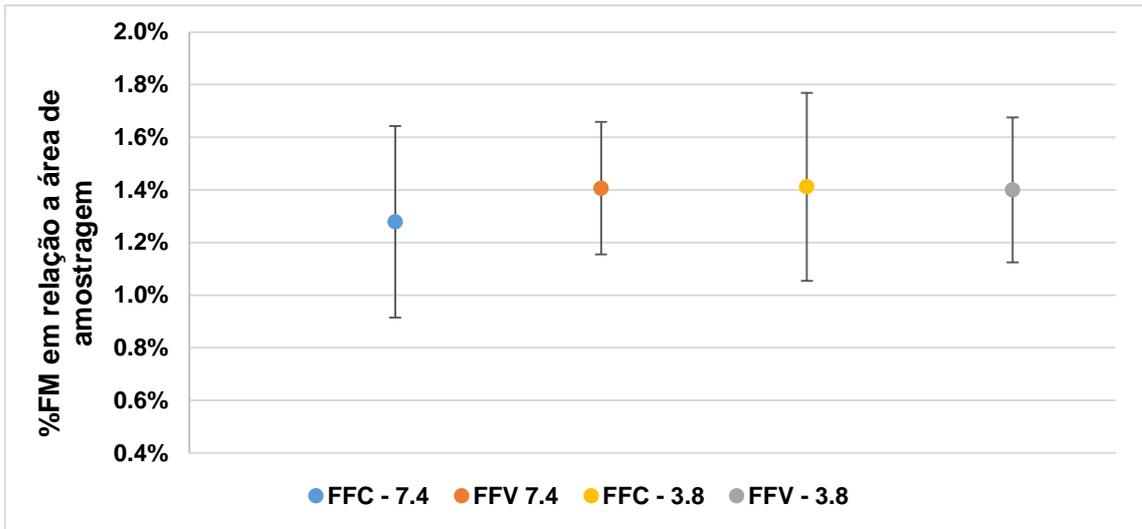


Gráfico 4.1: Percentual de FM em relação a área de amostragem no plano Sr1

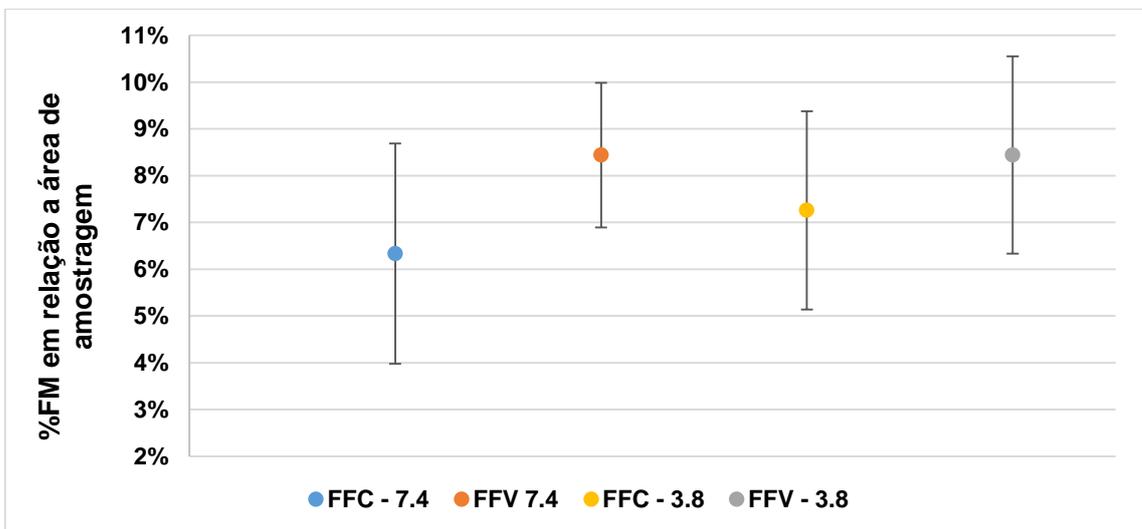


Gráfico 4.2: Percentual de FM em relação a área de amostragem no plano $SK_{/2}$

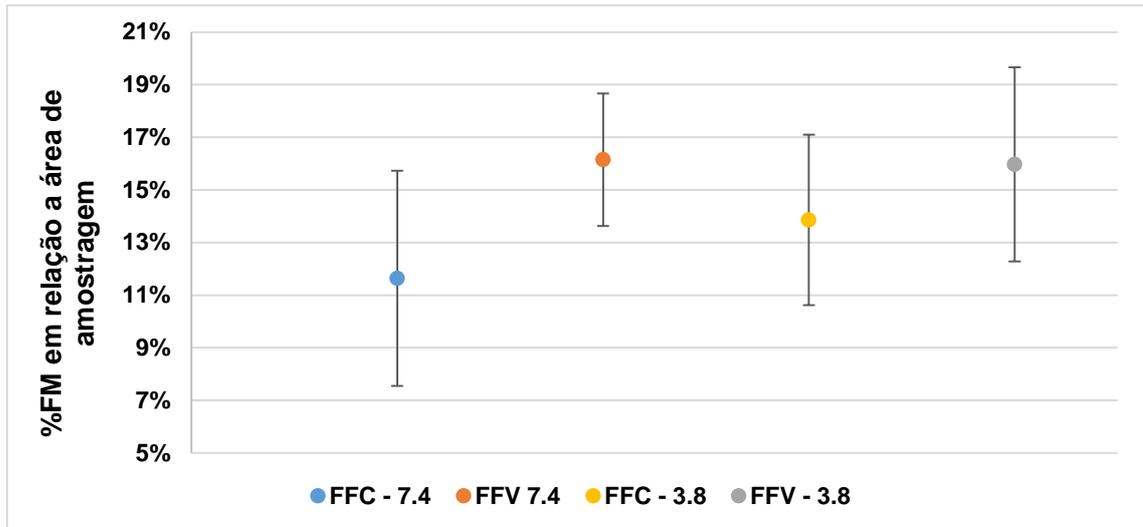


Gráfico 4.3: Percentual de FM em relação a área de amostragem no plano Sr2

Para a quantificação em relação ao plano Sr1, Gráfico 4.1, observado os valores de desvios e médias há uma indicação clara que não existem diferenças entre os valores de FM, tanto no que tange a variação de espessura quanto a diferença nos materiais, o que é corroborado pela ANOVA realizada a um nível de significância de 5%.

Para o plano Sk₂, a ANOVA indica que não há diferenças quando considerada a variação de espessura no mesmo cilindro. Partindo então do pressuposto desta última afirmação, tal que o FFV 7.8 e 3.8 constituem uma única amostra e o FFC 7.8 e 3.8 outra amostra, a ANOVA indica que ao variar o material dos corpos de prova ocorrem diferenças significativas entre os valores médios, com maior percentual de FM nos corpos de prova axiais de FFV (8% ± 2 contra 6% ± 1).

Análise semelhante é assimilada no plano Sr2, com a ressalva que ocorre uma diferença significativa entre as médias do FM em relação a variação de espessura do FFC, proporcionando a formação de três populações com percentual de FM distintos:

- FFV 7.8 e FFV 3.8 → 16,1% ± 0,1;
- FFC 7.8 → 12% ± 4 ;
- FFC 3.8 → 14% ± 3.

Dados as diferenças apresentadas para as análises descritas em termos de percentual de FM em função do plano de avaliação, cabe-se uma discussão em

relação a precisão da identificação do FM em cada um dos planos, que é abordado no tópico seguinte.

4.3.2 Identificação do FM nos planos de avaliação

A presença de FM no plano Sr1 tenderá sempre há um valor menor que nos demais planos, visto que a lógica empregada para identificação do FM consiste na detecção de pontos acima de tal plano, logo, se terá uma quantidade inferior de pontos a serem avaliados dos quais a grande parte estará fora da região dos sulcos.

Na Figura 4.8, inserida na seção 4.2, tem-se uma sequência de imagens de FM geradas a partir de uma topografia qualquer. Visualmente, como já foi comentado, é perceptível que há uma diferença considerável na quantidade de FM detectada (pixels azuis). Numericamente, esta diferença é exposta em termos dos seguintes valores: 1,2% no plano Sr1, 6,7% no médio e 14% no inferior, em relação a área de amostragem.

Para expor a diferença na identificação do FM em termos reais, na Figura 4.10 é feita uma ampliação de parte da topografia da Figura 4.8(a), para sua representação tridimensional e são indicados alguns pontos de FM, assim como uma região de sulco interrompido.

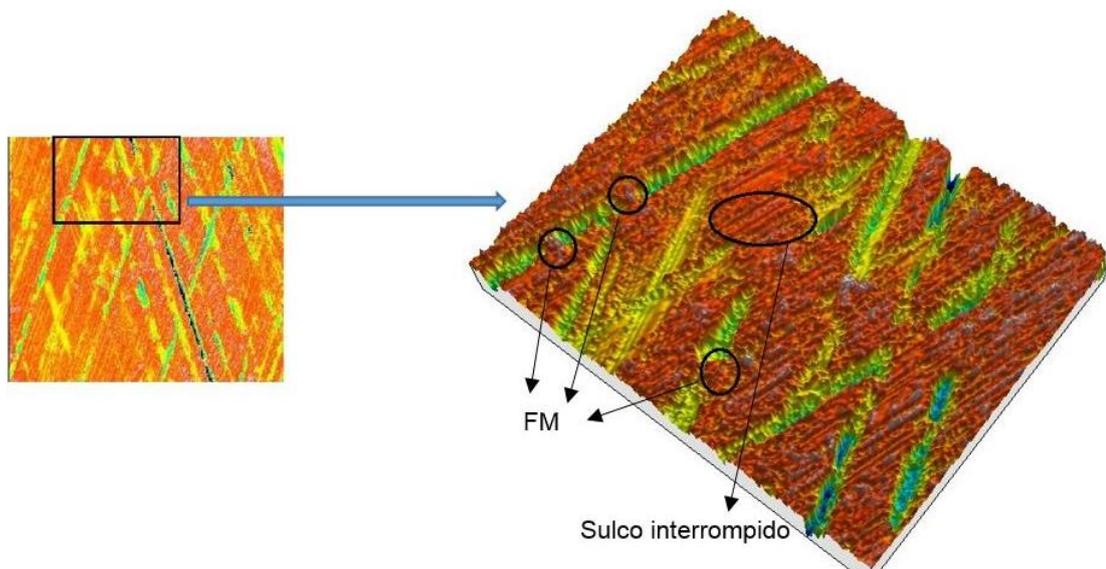


Figura 4.10: Identificação de FM e sulcos interrompidos em uma topografia 3D

No conjunto de imagens da Figura 4.11, são mostradas as respectivas quantificações de FM em termos dos três planos.

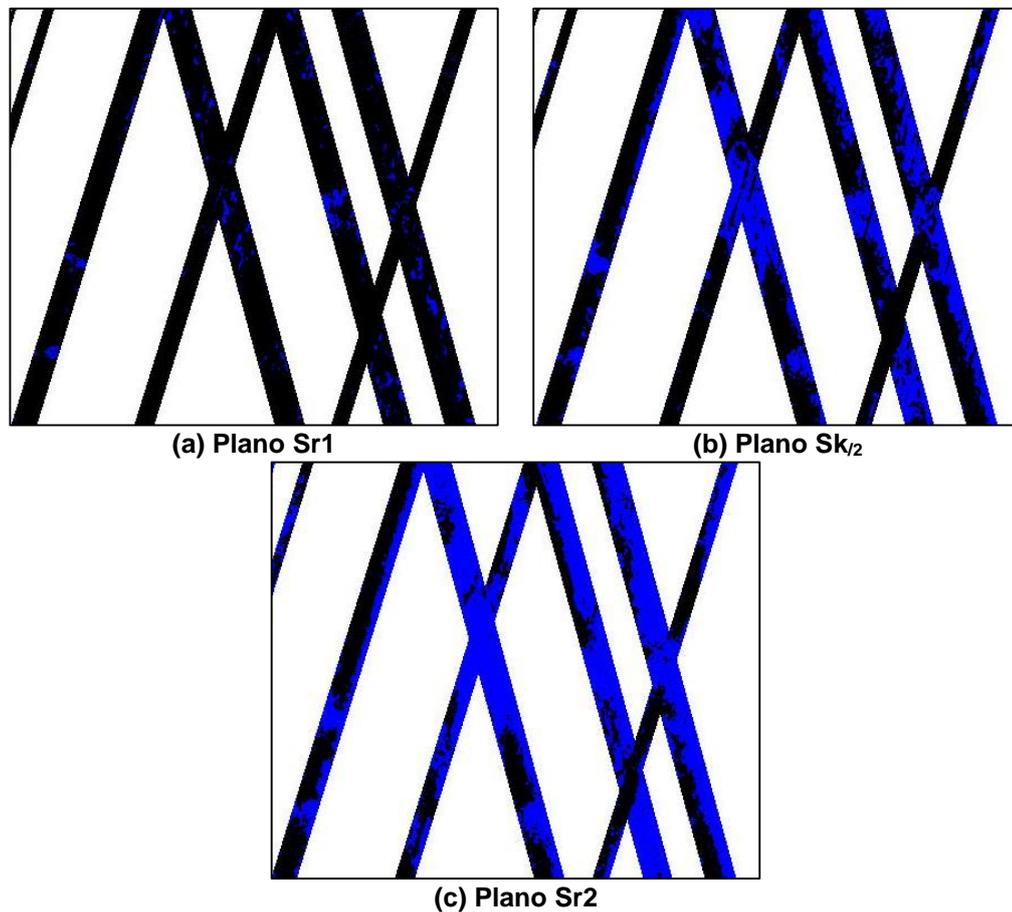


Figura 4.11: Identificação de FM da região ampliada da Figura 4.8(a)

Para a quantificação realizada no plano Sr1, Figura 4.11(a), percebe-se que as regiões de FM indicadas na Figura 4.10, e mesmo aquelas não indicadas mas que são visíveis pontos de FM ou de sulco interrompido, se apresentam de forma sutil, com apenas alguns pixels.

Já na quantificação realizada em relação ao plano Sr2, Figura 4.11(c), ocorre nitidamente um excesso na identificação de pixels como pertencentes ao FM. Alguns sulco que na topografia 3D são plenamente visíveis, se apresentam com um alto nível de interrupção devido ao FM. De fato, com base nesta análise, a maior dos sulcos se encontrariam preenchidas pelo FM.

No caso da Figura 4.11(b), que representa a quantificação em relação ao plano Sk₂, a presença do FM e do sulco interrompido indicado na Figura 4.10 são

perceptíveis, ao contrário da Figura 4.11(a), e com um nível significativamente menor de FM ao apresentado pela Figura 4.11(b), logo se trata de uma avaliação mais próxima da realidade apresentada pela topografia 3D, e portanto, será o plano utilizado nas demais discussões ao longo deste trabalho.

É evidente que ainda existam regiões em que há uma clara identificação de FM que não estão presentes na topografia. Isso se deve que os sulcos que são utilizados para verificação do FM são ideais e, portanto, não apresentam os desvios que ocorrem nos sulcos reais, tais como a variação da largura e do ângulo de brunimento ao longo do seu perfil. Logo, é inevitável, ao menos no código desenvolvido e nas rotinas de Obara (2013) e Obara *et al.* (2014), que ocorra a identificação de algumas das bordas dos sulcos reais como FM.

4.3.3 Quantificação de FM em relação a área dos sulcos ideais

Nesta seção são apresentados os resultados da quantificação de FM em relação aos sulcos, que nada mais é que a razão entre a quantidade de pixels de FM pelos pixels pertencentes aos sulcos. O Gráfico 4.4 apresenta os resultados gerados através dessa avaliação realizada em função do plano $Sk_{1/2}$.

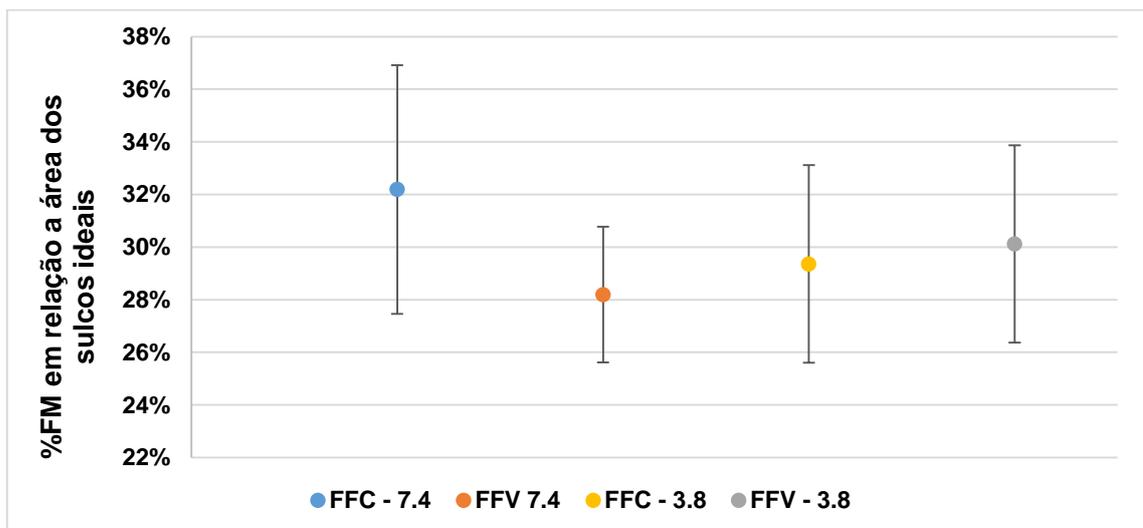


Gráfico 4.4: Percentual de FM em relação a área dos sulcos ideais no plano $Sk_{1/2}$

Os resultados dos corpos de prova axiais FFC 3.8 e FFV 3.8 apresentam comportamento semelhante àqueles obtidos em termos da área de amostragem, mas com valores médios similares. Já o FFC 7.8 e o FFV 7.8, se apresentam de modo oposto ao que foi apresentado em relação a área de amostragem.

O FFV 7.8, que na quantificação por área de amostragem apresentava-se com o maior valor médio, agora apresenta o menor valor entre os quatro corpos de prova. Enquanto que o FFC 7.8, que tinha o menor percentual de FM, agora é o que possui maior percentual de FM.

Em relação a ANOVA, esta também se apresenta diferente em relação a quantificação anterior, de modo que são encontradas diferenças estatisticamente significativas nas médias de FM em relação a variação da espessura em ambos os materiais, sendo que os corpos de prova de menor espessuras são estatisticamente iguais e diferentes do corpo de prova FFC 7.8, que também é diferente do corpo de prova FFV 7.8. Tem-se então três populações com base na ANOVA para um nível de significância de 5%:

- FFC 3.8 e FFV 3.8 $\rightarrow 29,7\% \pm 0.4$;
- FFC 7.8 $\rightarrow 33\% \pm 4$;
- FFV 7.8 $\rightarrow 30 \pm 4$.

Uma informação relevante e que está intimamente ligada aos resultados apresentados nesta seção, é o percentual da área de sulcos ideais em relação a área de amostragem, ou simplesmente a fração de sulcos ideais, que é dada no Gráfico 4.5.

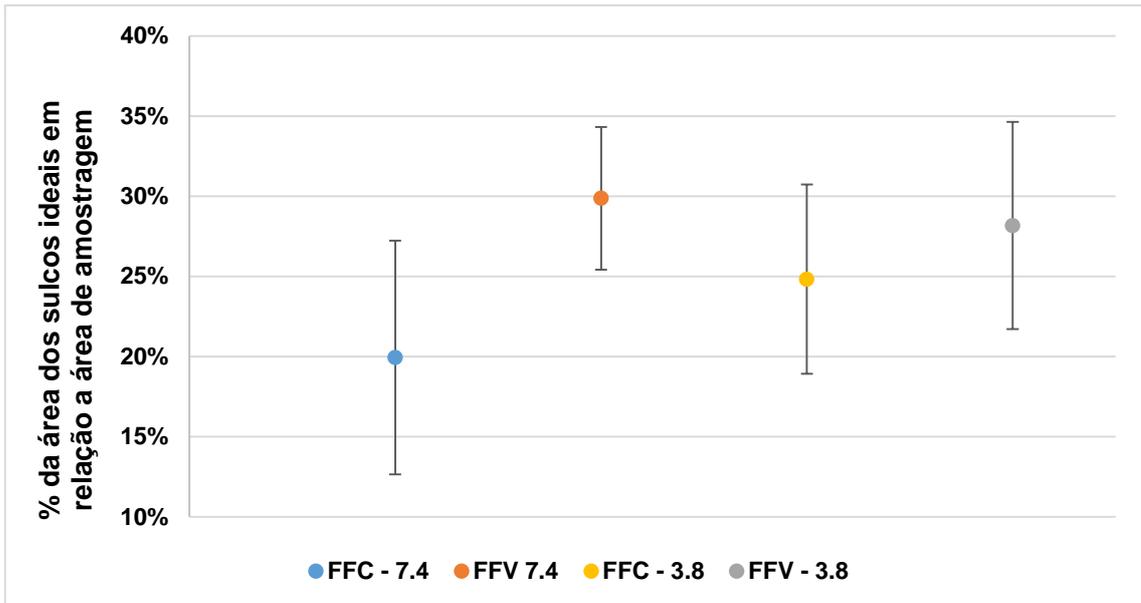


Gráfico 4.5: Percentual de sulcos em relação a área de amostragem

De modo geral, o fração de sulcos dos corpos de prova axiais de FFV são maiores que os dos de FFC, com comportamentos inversos em relação a variação de espessura. Nos corpos de prova axiais de FFV, não há diferenças significativas baseando-se na ANOVA, e os valores médios divergem em menos de 2%. Já no FFC as médias são estatisticamente diferentes, sendo que o corpo de prova FFC 3.8 apresenta 9% a mais de sulcos.

Apesar de se tratar do percentual de sulcos ideais a análise se estende de modo análogo aos sulcos reais, visto que mesmo estão relacionados diretamente aos sulcos ideais.

Logo, ao se avaliar a quantidade de FM distribuída ao longo de toda a superfície, é de se supor que quanto maior a quantidade de sulcos por unidade de área, o que por sua vez melhora as condições de lubrificação entre a parede do cilindro e os anéis do pistão, maior será o percentual de FM em relação a área total, visto que o mesmo é identificado e gerado em função dos sulcos.

Na situação oposta, a ocorrências de poucos sulcos, que diminuem a eficiência dos MCI, podem ocasionar um percentual baixo de FM ao longo da superfície.

Já em termos do percentual de FM em relação a área dos sulcos ideais, maiores valores de FM podem indicar que os sulcos se encontram interrompidos ou

recobertos transversalmente pelo FM, como lustra a MEV da Figura 4.12, e não mais segmentados ao longo do sulco.

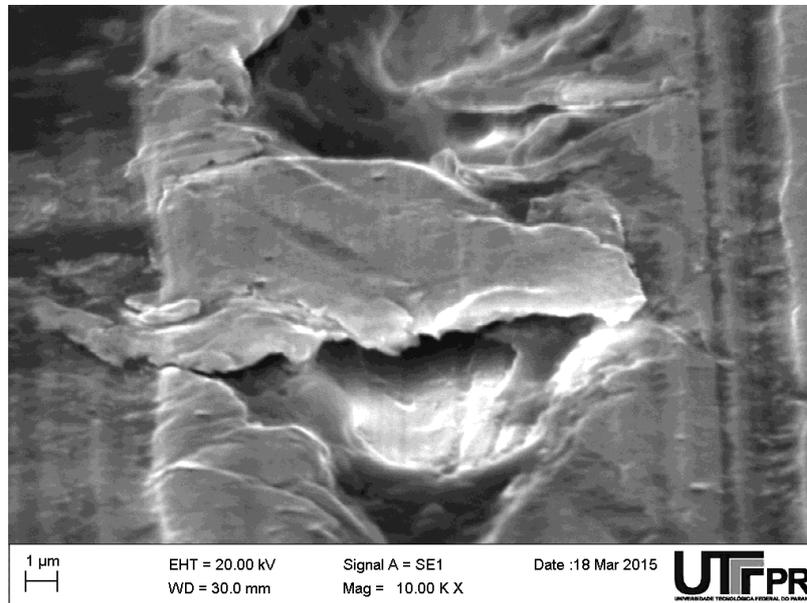


Figura 4.12: FM recobrindo transversalmente um sulco do cilindro de FFV 7.8. MEV

Para os cilindros em questão, há uma indicação que o corpo de prova axial FFV 7.8 apresente maior quantidade de sulcos, com maior percentual de FM em relação a área de amostragem, e com o FM melhor distribuído ao longo dos sulcos, portanto com menos interrupções, ao contrário do que ocorre no corpo de prova de FFC de maior espessura.

Já os corpos de prova axiais de menor espessura se situam no meio termo em relação aos outros dois, com percentuais de FM em relação a área de amostragem e em relação aos sulcos semelhantes entre si (diferença de 1%), com maior percentual de sulcos na FFV 3.8.

4.4 Distribuição e morfologia da grafita

Nesta seção são avaliadas a distribuição e as características morfológicas da grafita do FFV e FFC, em um primeiro momento numa análise individual, e posteriormente, uma breve comparação entre ambas as microestruturas. Todas análises são baseadas na ANOVA para um nível de significância de 5%.

4.4.1 Distribuição e morfologia da grafita no cilindro de FFV

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros quantificados da grafita presente no cilindro de FFV.

Tabela 4.2: Parâmetros de distribuição da grafita no cilindro de FFV

Parâmetro	FFV 7.8	FFV 3.8
AMG (μm^2) (Área média da grafita)	328 \pm 48	290 \pm 16
AMGN (μm^2) (Área média da grafita nodular)	373 \pm 57	391 \pm 38
RA (Razão de aspecto)	2,4 \pm 0,1	2,3 \pm 0,1
QG (1/mm ²) (Quantidade de grafitas)	373 \pm 18	474 \pm 12
QGN (1/mm ²) (Quantidade de grafitas nodulares)	54 \pm 2	79 \pm 11
FG (%) (Fração de grafita)	12 \pm 2	13 \pm 1
GN (%) (Grau de nodularidade)	15 \pm 1	16 \pm 2
FGN (%) (Fração de grafita nodular)	17 \pm 1	23 \pm 2

Os parâmetros FG, GN, RA e AMGN não apresentam diferenças significativa entre as duas espessuras.

Ressalta-se que o GN obtido em ambas as amostras foi inferior a 20%, que é o valor máximo admitido em FFV, e que apesar da relação entre espessuras ser de aproximadamente 2:1, e ainda se tratando de amostras com baixa espessura, os valores do GN são praticamente idênticos.

A AMG da amostra delgada é 12% menor em relação a amostra FFV 7.8, sendo que as principais diferenças na distribuição e forma da grafita entre as amostras de FFV são perceptíveis nos parâmetros QG, QGN e FGN. No caso em questão, tem-

se que a amostra de menor espessura apresenta maior quantidade de grafita por milímetro quadrado, tanto nodular quanto no geral de modo a manter o mesmo GN, e maior fração da área total das grafitas pertencente a grafita nodular.

As micrografias das amostra de FFV 7.8 e FFV 3.8 são mostradas na Figura 4.13.

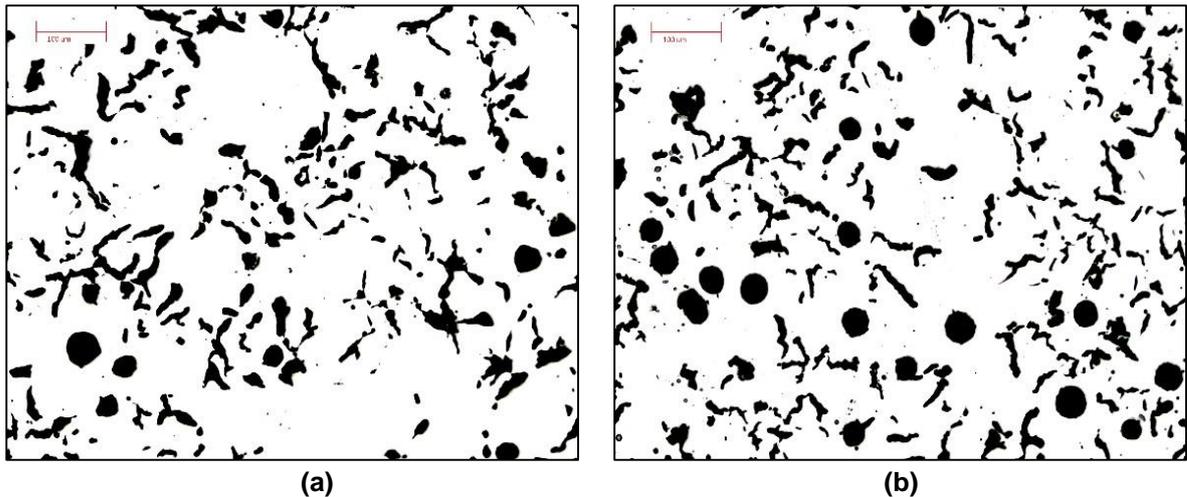


Figura 4.13: Micrografias das amostras: (a) FFV 7.8 e (b) FFV 3.8.

Visualmente, a micrografia da amostra FFV 3.8 apresenta maior quantidade de nódulos, e como o GN é o mesmo em ambas, conseqüentemente maior número de grafitas vermiculares.

4.4.2 Distribuição e morfologia da grafita no cilindro de FFC

Os parâmetros das amostras de FFC são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Parâmetros de distribuição da grafita no cilindro de FFC

Parâmetro	FFC 7.8	FFC 3.8
AMG (μm^2) (Área média da grafita)	206 \pm 19	221 \pm 51
RA (Razão de aspecto)	4,0 \pm 0,4	3,9 \pm 0,2
QG ($1/\text{mm}^2$) (Quantidade de grafitas)	673 \pm 17	768 \pm 21
FG (%) (Fração de grafita)	14 \pm 1	17 \pm 1

Dado que os FFCs não apresentam características de nodularização de suas grafitas, os parâmetros relacionados a esta particularidade não foram analisados para estas amostras.

Tanto a AMG quanto a RA, seja devido a proximidade entre os valores médios ou em função da dispersão ou baseado na ANOVA, são semelhantes entre as diferentes espessuras

Há uma indicação em que a amostra delgada apresenta-se com um maior percentual de FG (3% a mais), assim como uma quantidade de grafitas superior ($\approx 10\%$) em relação a amostra FFC 7.8

Na Figura 4.14 são mostradas as micrografias de ambas as amostras de FFC. Foi possível observar a aparição de três formas de grafita, em referência a norma ISO 945-1: em tipo A, B e C. Para a amostra FFC 7.8 tem-se a predominância de A e B, conforme ilustra a Figura 4.14(a), e na amostra de menor espessura observou-se a predominância de B e C.

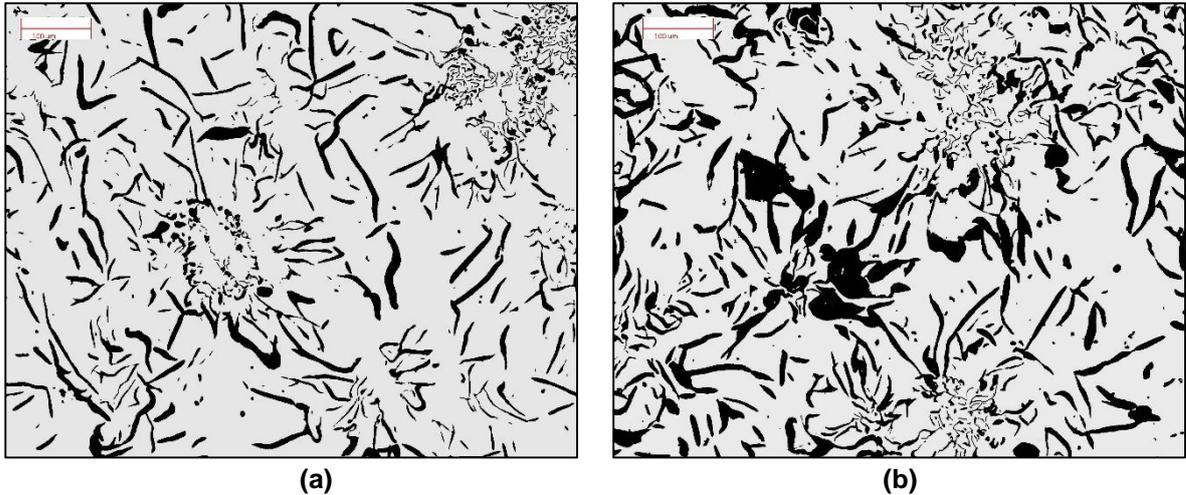


Figura 4.14: Micrografias das amostras: (a) FFC 7.8 e (b) FFC 3.8.

4.4.3 Comparativo entre as distribuições de grafita dos cilindros de FFV e FFC

A RA para as amostras de FFV, por terem nódulos de grafita, tenderá a apresentar valores significativamente menores, como ilustra Gráfico 4.6.

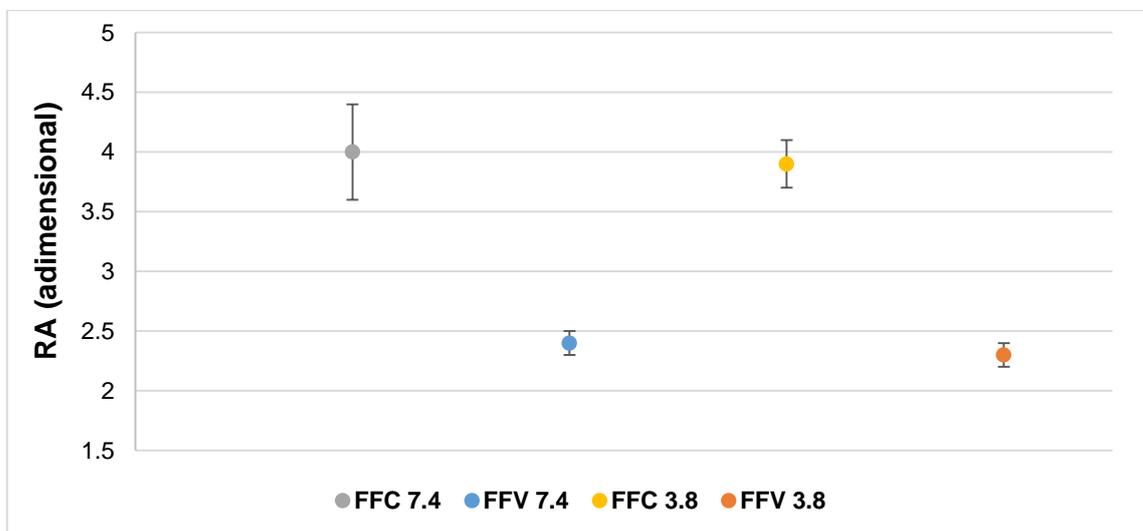


Gráfico 4.6: RA das amostras em FFC e FFV

Em relação a AMG, as grafitas presentes nas amostras FFV apresentam maiores áreas, com destaque para as grafitas da amostra FFV 7.8 que é 50% maior em relação a do FFC de mesma espessura. Comportamento semelhante é observado para as amostra de menor espessura, mas em menores proporções.

O Gráfico 4.7 apresenta a comparação da AMG para as quatro amostras.

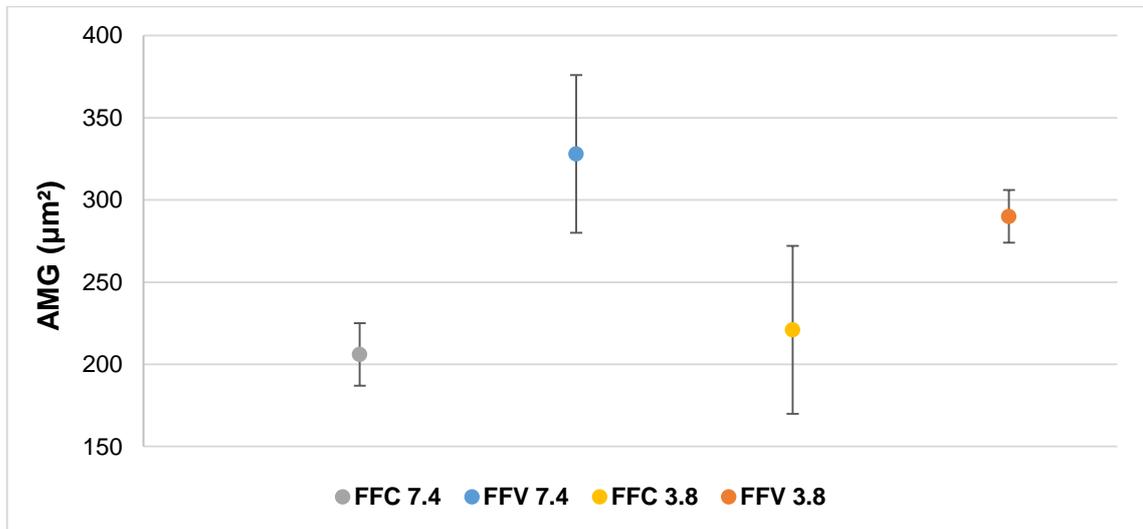


Gráfico 4.7: AMG das amostras em FFC e FFV

Observa-se que a redução da espessura tem maior efeito nas amostras de FFV.

Já para a QG, ambos os materiais sofrem alterações ao se variar a espessura. O Gráfico 4.8 apresenta os valores da QG.

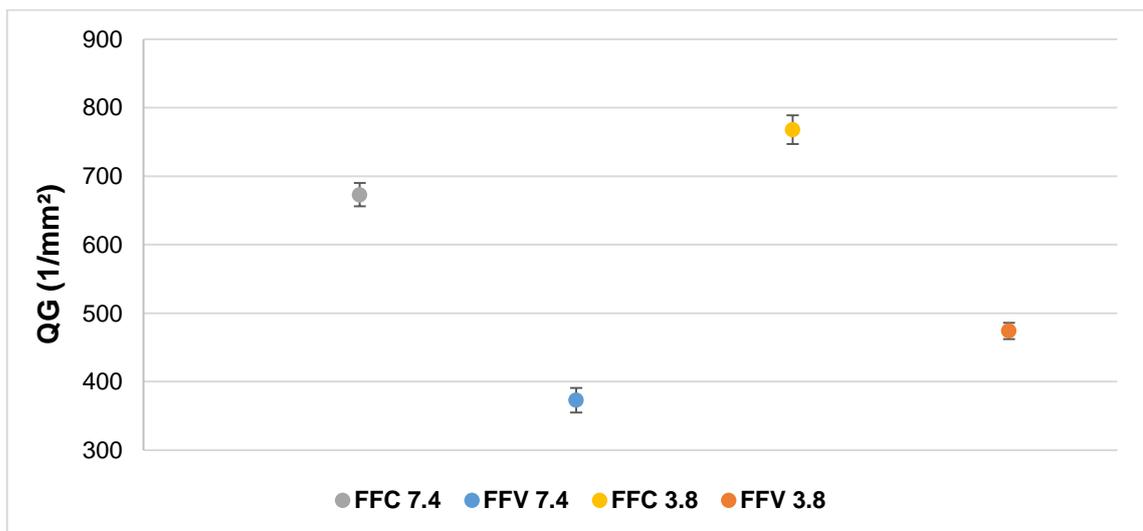


Gráfico 4.8: QG das amostras em FFC e FFV

As amostras de FFC apresentam em média 50% mais grafitas do que as de FFV em ambas as espessuras.

Para a FG, apesar dos valores médios serem semelhantes visualmente, estes são estatisticamente diferentes, salvo a exceção da amostra em FFV como já mencionado anteriormente. No Gráfico 4.9 são plotados os valores da FG.

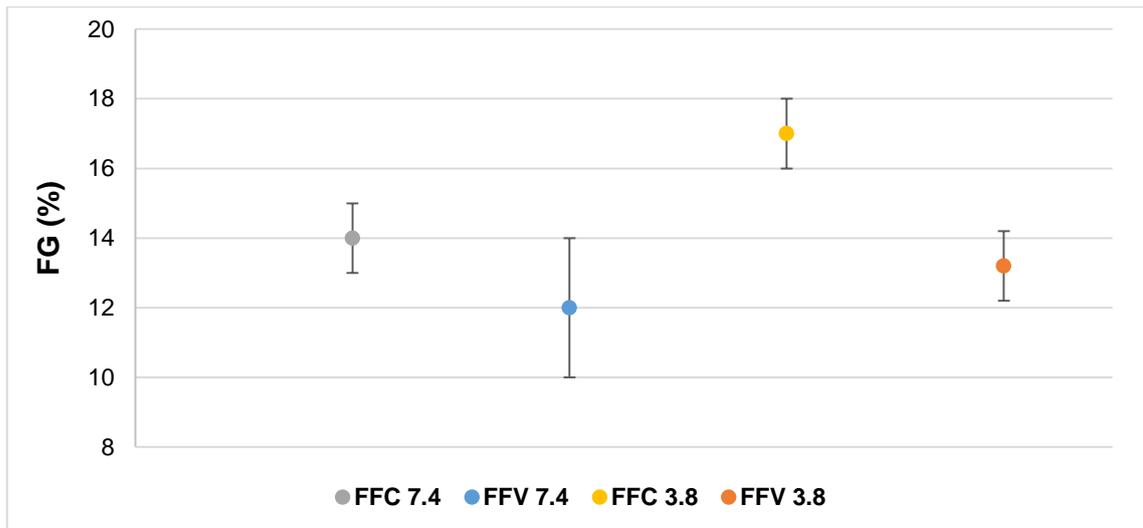


Gráfico 4.9: FG das amostras em FFC e FFV

O efeito da variação de espessura é mais pronunciada nas amostras de FFC.

Em resumo, as amostras em FFV apresentam maior AMG, com menor QG, resultando em uma FG ligeiramente inferior ao do FFC, acompanhada de menor valor de RA, devido especialmente ao nódulos presentes na mesma.

Em nenhuma das situações elencadas anteriormente há semelhanças estatísticas entre os dois materiais abordados. Em alguns casos, têm-se no máximo valores médios semelhantes. Logo, as grafitas diferem tanto em espessura quanto em material.

4.5 Análise da relação entre FM e grafita

Todas as abordagens anteriores em relação ao FM e a grafita foram analisadas em regiões aleatórias ao longo da superfície brunida dos cilindros de FFC

e FFV. Neste capítulo são apresentadas análises de quantificação de FM e de grafita correspondentes a mesma localização.

Na Figura 4.15 são mostradas a identificação de FM nos sulcos, a micrografia e a sobreposição da micrografia com o FM para a amostra FFC 7.8.

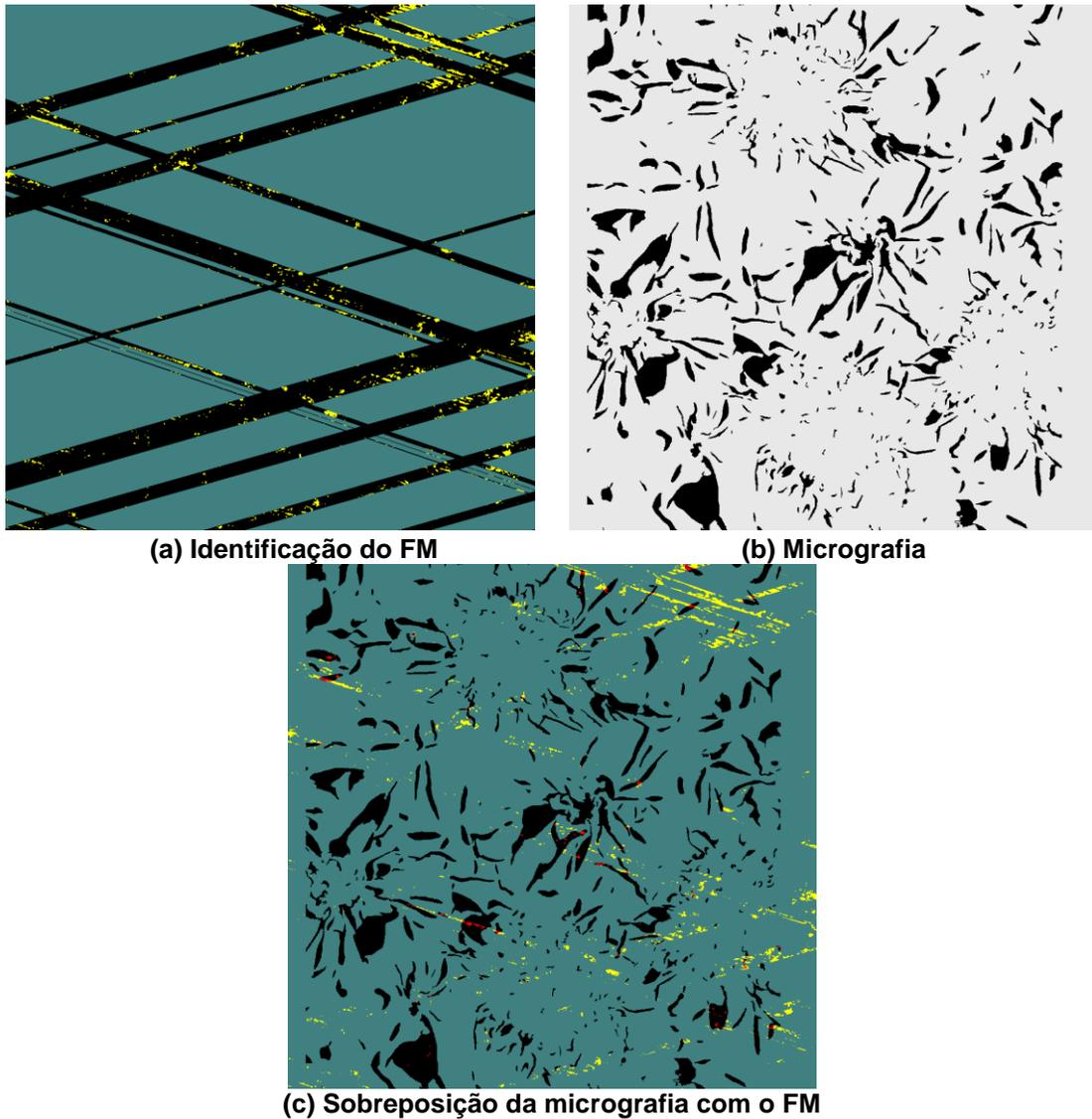


Figura 4.15: Composição das imagens para sobreposição do FM e grafita para amostra FFC 7.8. Área = 0,835x0.835 mm

Os pixels em amarelo representam o FM, enquanto que os pixels em vermelho indicam os pontos coincidentes de FM e grafita.

Na Figura 4.16 tem-se a mesma disposição de imagens da Figura 4.15, mas para a amostra de menor espessura.

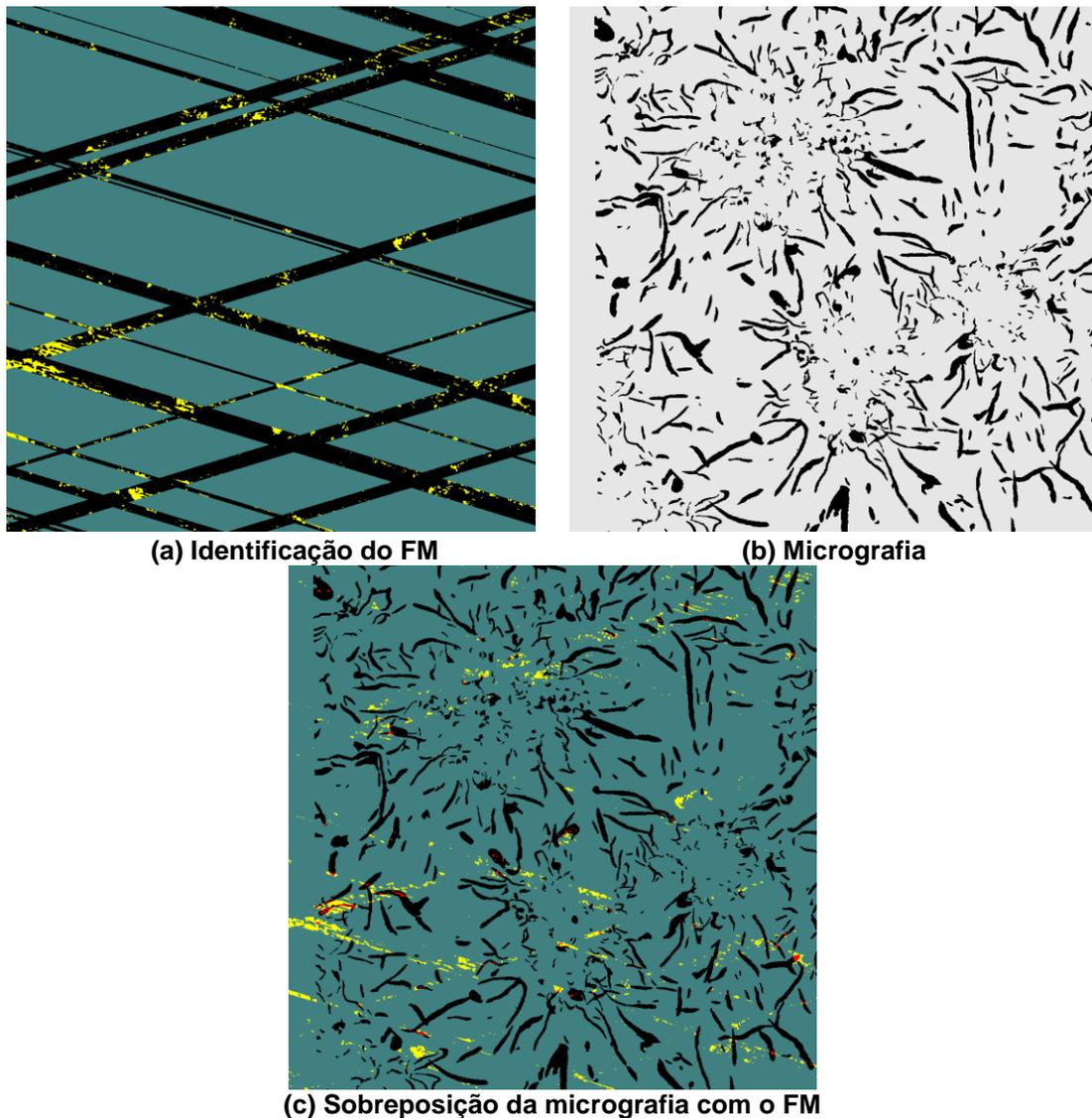


Figura 4.16: Composição das imagens para sobreposição do FM e grafita para amostra FFC 3.8. Área = 0,835x0.835 mm

Diversas tentativas de correlacionar a distribuição e forma da grafita nos FFCs em função do percentual de FM, tanto em relação a área de amostragem quanto em relação aos sulcos, foram realizadas. Entretanto, os resultados obtidos demonstram que não uma correlação direta entre os parâmetros de distribuição e forma da grafita dos FFCs e o FM, ao menos no que diz respeito aos parâmetros utilizados neste trabalho.

No Gráfico 4.10 é mostrado o melhor resultado para a correlação entre o FM e a grafita na amostra FFC 7.8. Observa-se que o coeficiente de determinação (R^2) indica que a QG e o percentual de FM em relação a área de dos sulcos ideais estão

fracamente correlacionados. O R^2 correspondente a amostra FFC 3.8, para os mesmos parâmetros, é de apenas 0,005.

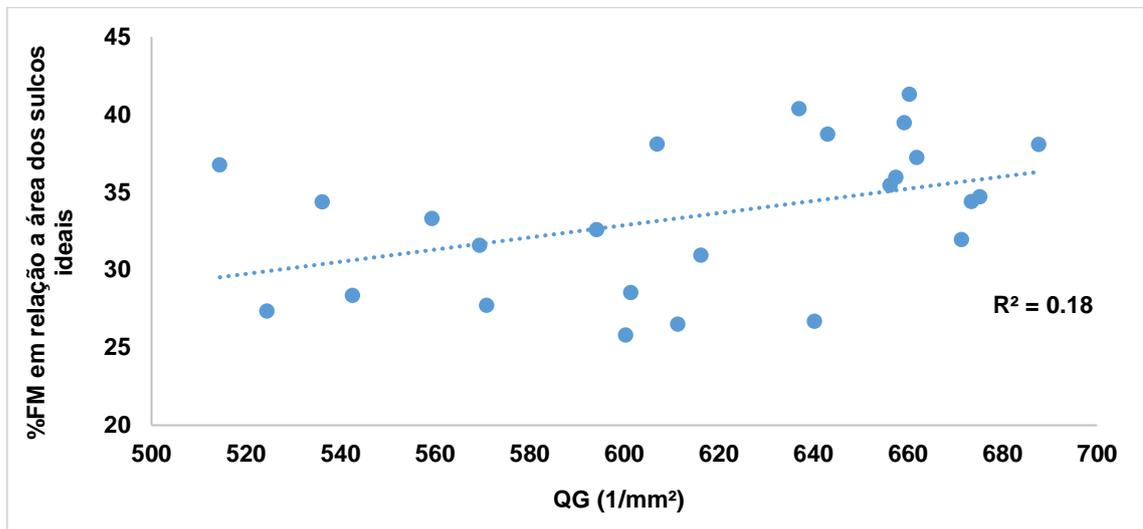


Gráfico 4.10: Correlação entre o %FM em relação a área dos sulcos ideais e a QG para a amostra FFC 7.8

No Gráfico 4.11 é mostrado o melhor resultado para a correlação entre o FM e a grafita na amostra FFC 3.8. Neste caso, é avaliado a FG em função do percentual de FM em relação a área de amostragem. Novamente, assim como na amostra FFC 7.8, a correlação é baixa, sendo que para a amostra FFC 7.8 tem-se o R^2 de 0,01.

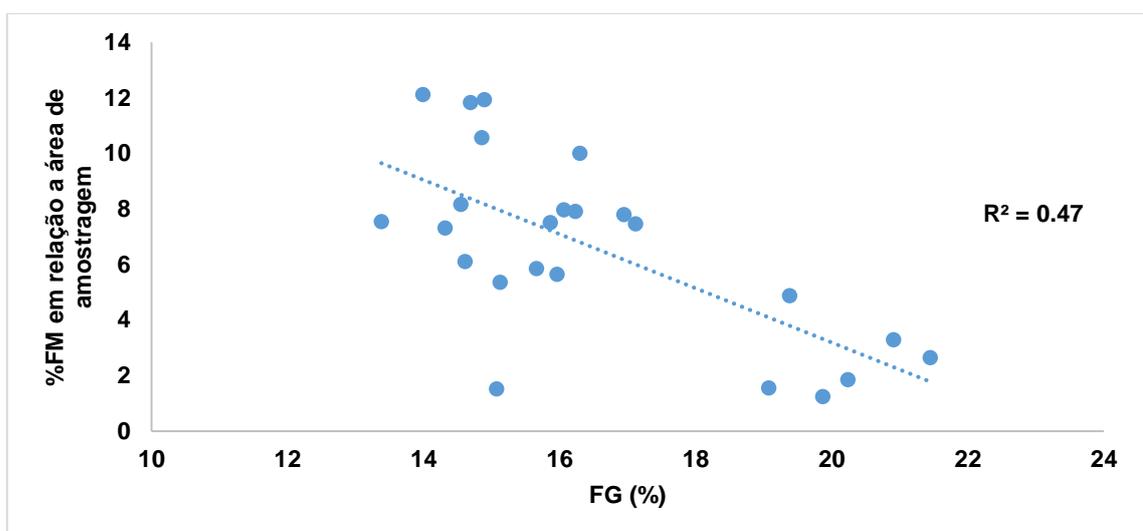


Gráfico 4.11: Correlação entre o %FM em relação a área de amostragem e a FG para a amostra FFC 3.8

Para as amostras de FFV, comportamento semelhante é observado na correlação entre o FM e a grafita. A única ressalva neste caso, é que os melhores resultados, apesarem de serem fracamente correlacionadas, estão em função das características nodulares das grafitas, e os parâmetros comuns ao FFC (FG, RA, AMG e QG) apresentam R^2 inferior a 0,25 em todas as situações.

Na Figura 4.17 são mostradas uma das imagens de FM, das grafitas e a sobreposição das mesmas para a amostra FFV 7.8.

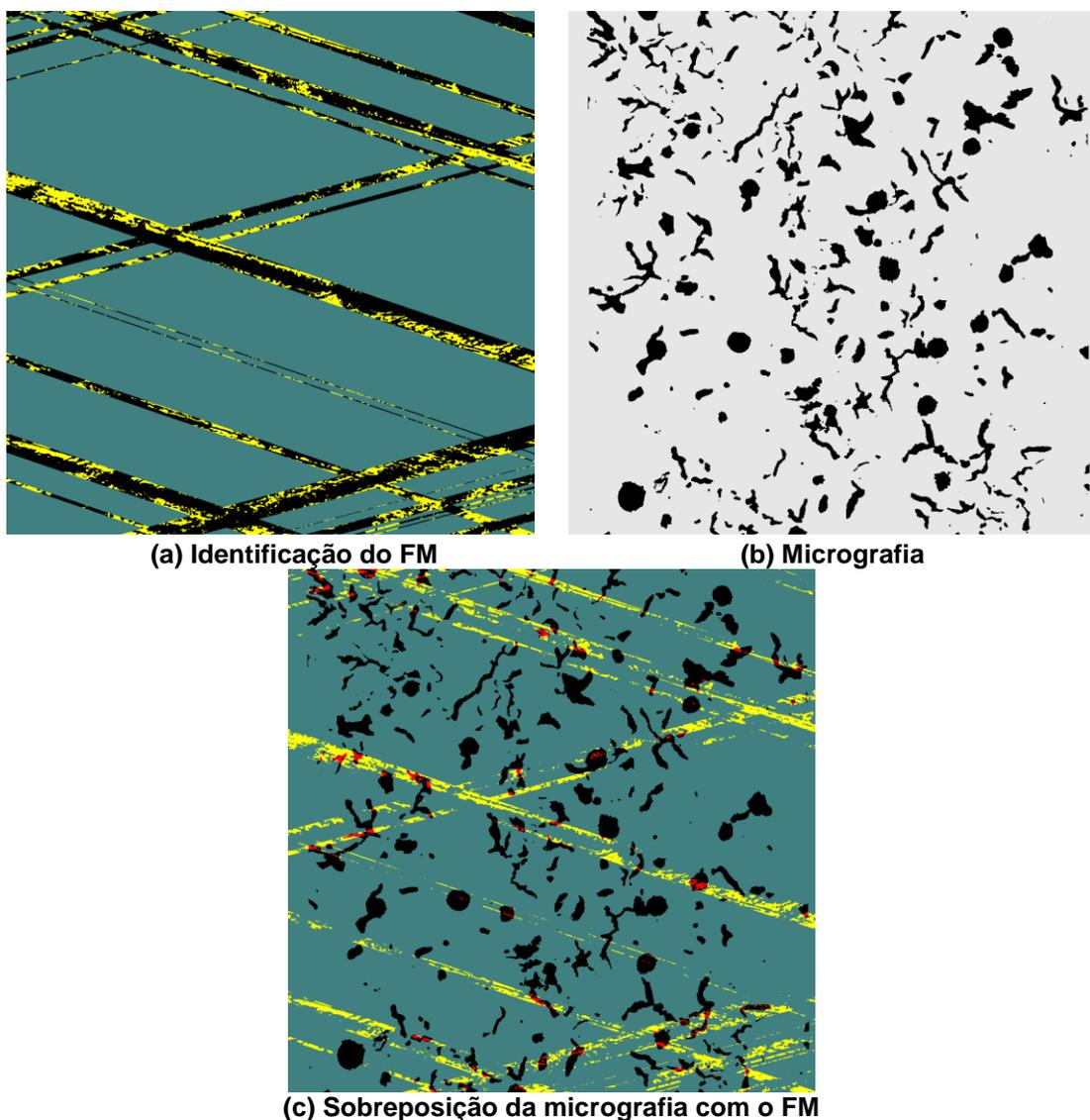


Figura 4.17: Composição das imagens para sobreposição do FM e grafita para amostra FFV 7.8.
Área = 0,835x0,835 mm

Assim como nas amostras de FFC, o maior R^2 em uma determinada espessura não apresenta nenhuma semelhança com o R^2 a outra amostra. No Gráfico

4.12 é apresentado a relação entre a AMGN e o percentual de FM em relação área de amostragem, que apresenta baixa correlação, e o correspondente R^2 para a amostra delgada é de 0,002.

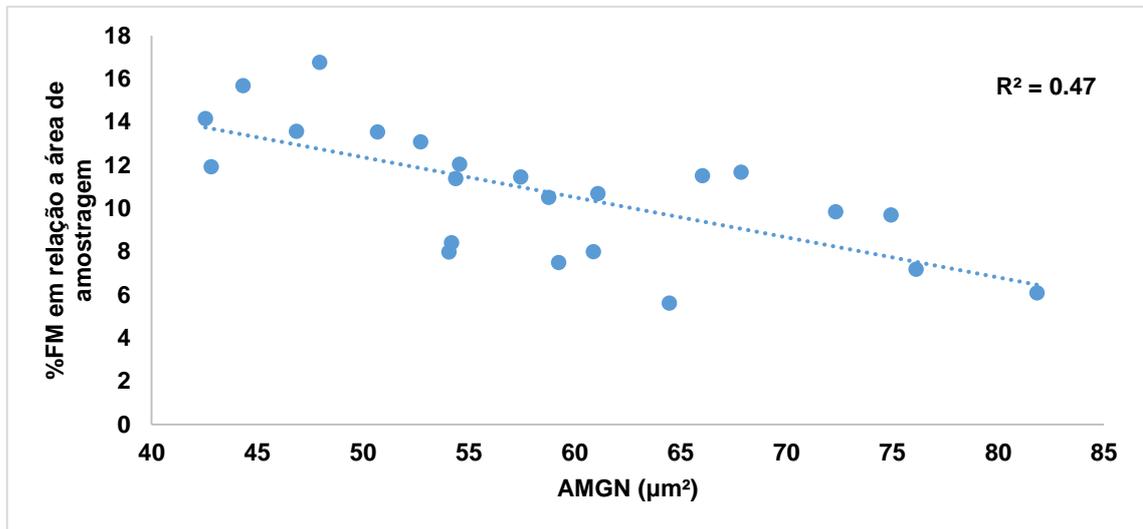


Gráfico 4.12: Correlação entre o %FM em relação a área de amostragem e a AMGN para a amostra FFV 7.8

Para avaliar a incidência entre os pixels de FM e sua relação com os pixels pertencem tanto a grafita quanto ao FM, no Gráfico 4.13, Gráfico 4.14, Gráfico 4.15 e Gráfico 4.16 são apresentados as relações existentes entre o percentual de FM em relação a área de amostragem e a razão entre a quantidade de pixels coincidentes (pixels vermelhos) pela quantidade de pixels de FM para as amostras FFC 7.8, FFC 3.8, FFV 7.8 e FFV 3.8, respectivamente.

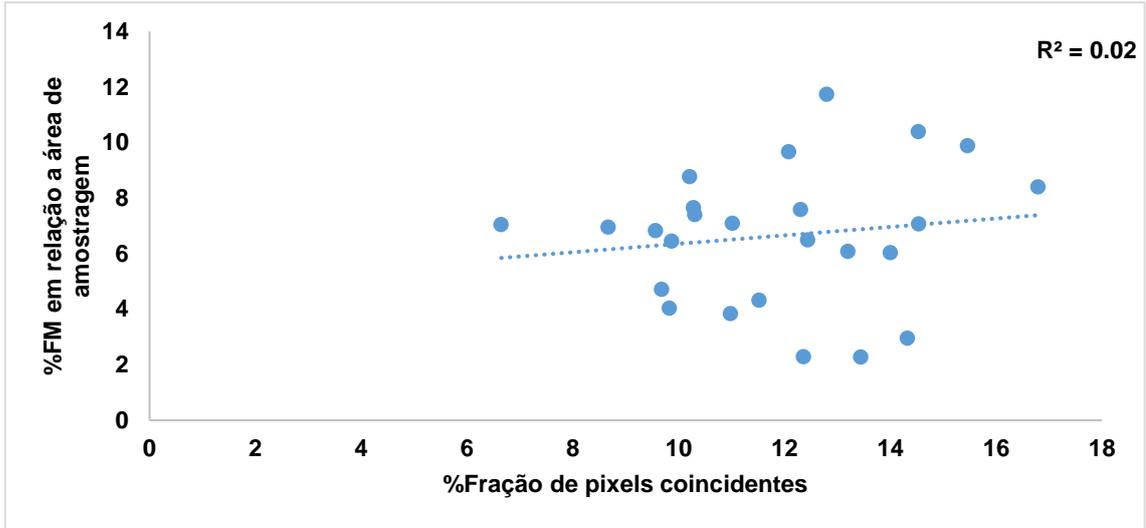


Gráfico 4.13: Relação entre o percentual de FM em relação a área de amostragem e a fração de pixels coincidentes para a amostra FFC 7.8

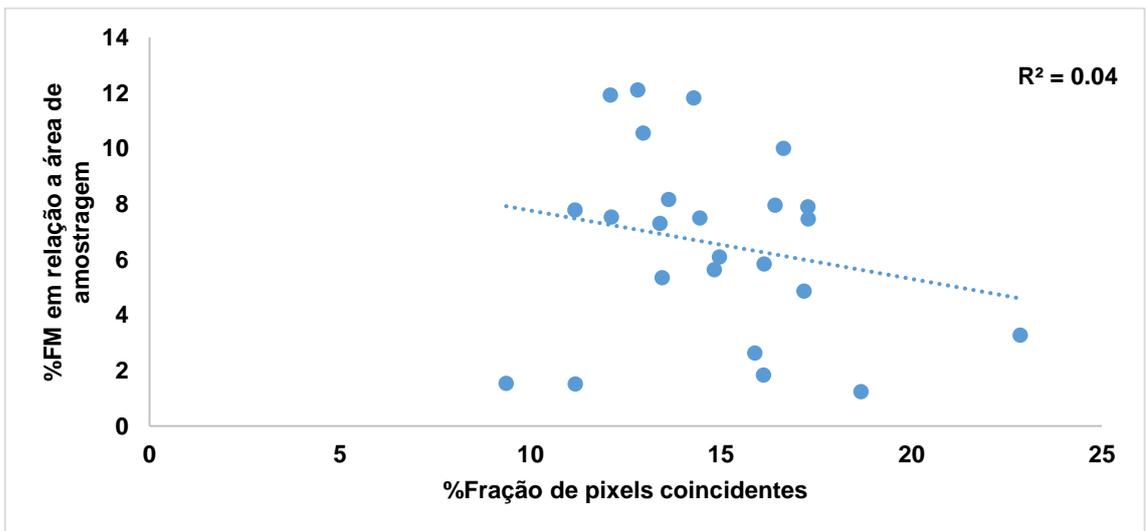


Gráfico 4.14: Relação entre o percentual de FM em relação a área de amostragem e a fração de pixels coincidentes para a amostra FFC 3.8

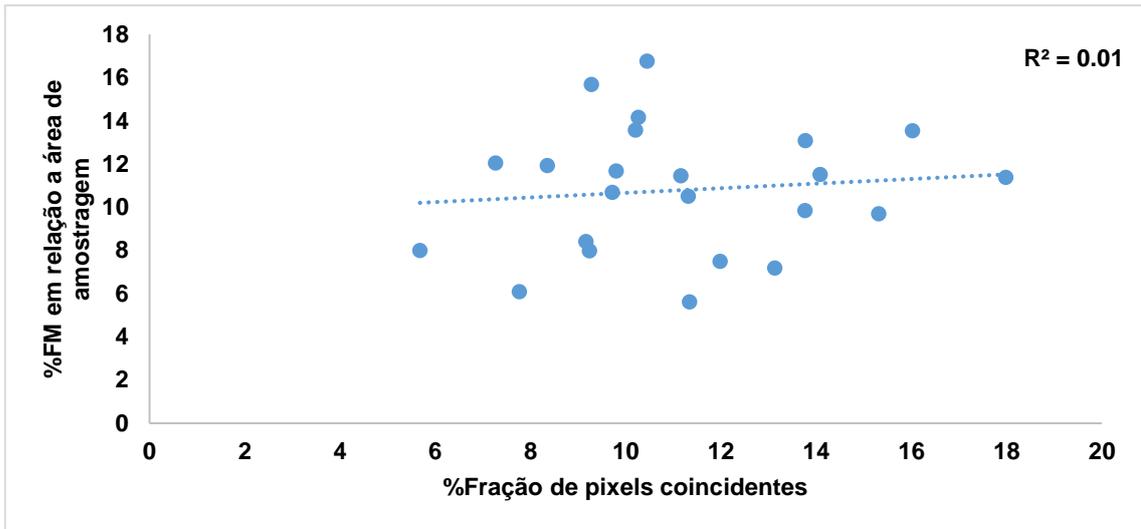


Gráfico 4.15: Relação entre o percentual de FM em relação a área de amostragem e a fração de pixels coincidentes para a amostra FFV 7.8

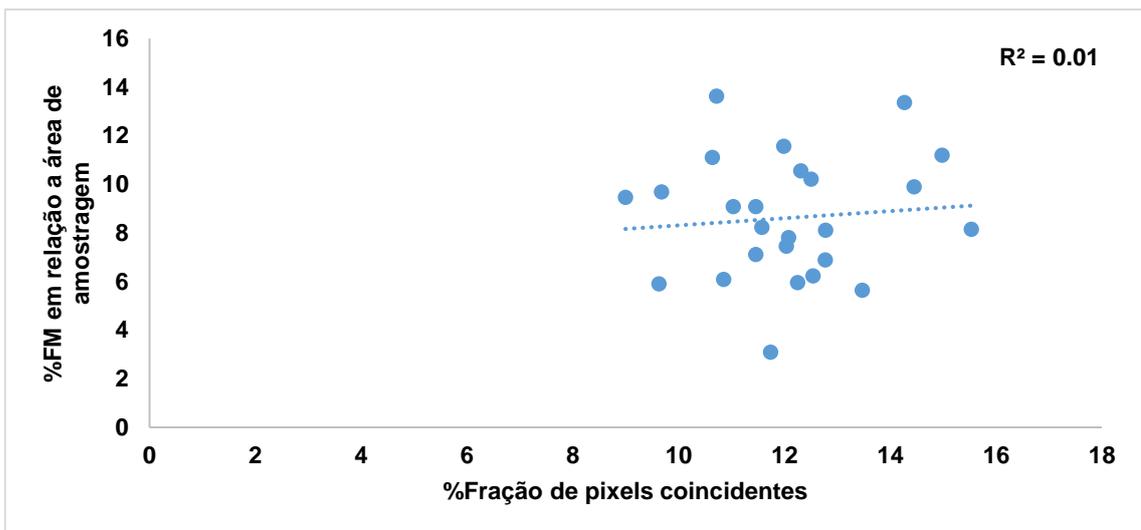


Gráfico 4.16: Relação entre o percentual de FM em relação a área de amostragem e a fração de pixels coincidentes para a amostra FFV 3.8

Apesar de estarem omitidos, os gráficos relativos ao percentual de FM em relação a área dos sulcos ideias em função da fração dos pixels coincidentes se apresentaram de modo semelhante ao Gráfico 4.13, Gráfico 4.14, Gráfico 4.15 e Gráfico 4.16.

Logo, o que se observa é que a variação do percentual de FM não está relacionado com a variação da fração de pixels coincidentes. Ou seja, a incidência entre os pixels de FM e da grafita tem caráter aleatório, logo a formação do FM não depende, ou depende muito pouco, da presença da grafita, de sua distribuição e

forma, tanto nos cilindros de FFC quanto no de FFV, estando conseqüentemente relacionada a outras variáveis não abordadas nesta pesquisa.

5 CONCLUSÕES

Na avaliação dos parâmetros de rugosidade investigados, com relação as amostras retiradas do cilindro de FFC, não se observaram diferenças significativas entre as diferentes espessuras. Já nas amostras do cilindro em FFV, os parâmetros Spk e Sdq apresentam valores médios distintos, baseados na ANOVA com 95% de significância. Entretanto, dado que as médias apresentam valores médios semelhantes, com diferença inferior a 6%, associada ao baixo coeficiente de variação, é viável assumir que ambas as amostras são equivalentes em termos de aplicação. Mostrou-se ainda que os parâmetros de rugosidade também são equivalentes entre os dois materiais dos cilindros. Logo, tem-se que:

- Não há diferenças significativas entre as espessuras ou entre materiais dos cilindros em termos dos parâmetros de rugosidade 3D avaliados.

Para a quantificação de FM, o código desenvolvido apresentou resultados melhores em comparação a rotina de Obara (2013), tanto em termos de identificação dos sulcos ao se utilizar a o plano referente a altura de início do Sr₂, quanto para a identificação do FM no interior dos sulcos na altura do plano Sk_{/2}, além da quantificação de parâmetros de interesse tais como o percentual de FM em relação aos sulcos ideais e a fração de sulcos ideais.

Na quantificação em si, tendo como referência o plano Sk_{/2} visto que este apresenta resultados melhores como já mencionado, quando realizada em relação a área de amostragem tem-se que não há diferenças significativas (ANOVA para 95% de significância) entre as diferentes espessuras de um mesmo material, mas que há quando comparado materiais distintos.

Já na quantificação realizada em relação a área dos sulcos, observou-se que ocorre diferenciação em relação a variação de espessura, e que as amostras delgadas de materiais diferentes são semelhantes entre si. Portanto, a depender do critério para quantificação pode ocorrer diferenças na quantidade de FM ao se variar o quadrante de avaliação do cilindro. Em resumo:

- Para a quantificação em relação a área de amostragem tem-se duas populações: Uma que abrange ambas a amostras de FFC e outra com as amostras de FFV;

- Para a quantificação em relação aos sulcos ideais observa-se três populações distintas: Uma referente ao FFC 7.8, outra para o FFV 7.8 e por último, uma população constituída pelas amostras delgadas.

A variação de espessura dos cilindros, e conseqüente variação na taxa de resfriamento, provocou alterações nas características da grafita. Para o cilindro de FFC, as alterações foram na fração e quantidade de grafita, e no cilindro de FFV as modificações ocorreram com maior intensidade nos parâmetros relacionados a nodularidade: fração, quantidade e área média da grafita nodular, além da quantidade total de grafita.

Os resultados obtidos através da sobreposição de imagens de FM e grafita indicam que a ocorrência do FM está fracamente correlacionada com a presença da grafita, mesmo existindo diferenças significativas no percentual de FM e na distribuição e morfologia da grafita em relação a variação de espessura, ou mesmo em relação ao tipo de material dos cilindros.

Logo, se a grafita que é o principal microconstituente dos FFs apresenta baixa correlação com a formação do FM, e os parâmetros de rugosidade são os mesmos em ambos os cilindros, há duas possibilidades a serem exploradas em trabalhos futuros visando a compreensão da formação de FM:

- Em se tratando da quantificação de FM em relação a área de amostragem, onde não variação de FM em função da espessura, mas sim em função do material, é plausível assumir neste caso que a formação do FM está mais intimamente relacionada as variáveis do processo de brunimento, assim como a interação entre a pedra de brunimento e a superfície do cilindro, e/ou presença de outros microconstituintes.
- Já em se tratando da quantificação em relação a área dos sulcos, onde ocorre a variação do percentual de FM em função da espessura, as variáveis de brunimento são as mesmas para toda superfície sujeita a usinagem, supõem-se que há outros constituintes na microestrutura que apresentem maior influência na formação do FM do que a grafita.

REFERÊNCIAS

ANDERBERG, C. *et al.* Cylinder Liners and Consequences of Improved Honing. In: Nordic Symposium in Tribology, 12th, 2006, Helsingør, Denmark. **Proceedings...** Denmark: Nordtrib, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6589**: Peças em ferro fundido cinzento classificadas conforme a resistência à tração. Rio de Janeiro, 1986.

ASM. **American Society for Metals - Metals Handbook vol. 16 - Machining**. USA, p.472 - 492, 1989.

BEYERER, J.; KRAHE, D.; LEON, F. P. Characterization of cylinder bores. In: **Metrology and Properties of Engineering Surfaces**. Springer US, 2001. p. 243-281.

BLAU, P. J. Glossary of terms. In: ASM Metals Handbook, vol. 18. **Friction, Lubrication and Wear Technology**. ASM International, 1992, p. 1849-1930.

BLUNT, L; JIANG, X. **Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards" surfstand"**.Oxford: Elsevier, 2003.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 8. 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.

CRAIG, D. B.; HORNUNG, M. J.; McCluhan, T. K. Gray Iron. In: ASM Metals Handbook, vol. 15. **Casting**. ASM International, 1992, p. 1355-1394.

ÇAVDAR, B.; LUDEMA, K. C. Dynamics of dual film formation in boundary lubrication of steels - Part I - Functional nature and mechanical properties. **Wear**, v.148, p. 305-327, 1991.

DAWSON, S.; INDRA, F. Compacted Graphite Iron – A New Material for Highly Stressed Cylinder Blocks and Cylinder Heads. In. International Vienna Motor

Symposium, 28th, 2007, Vienna, Austria. **Proceeding...** Vienna: VDI Fortschritt – Berichte 12, 2007.

DIMKOVSKI, Z. **Surfaces of honed cylinder liners**. 2011. 75 f. Thesis (Ph. D.) - Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2011.

DIMKOVSKI, Z. *et al.* 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.

DIMKOVSKI, Z. *et al.* Optimization of cylinder liner surface finish by slide honing. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 226, p. 575-584, 2012.

DONG, W. P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography: III - Parameters for characterizing amplitude and some functional properties. **Wear**, v.178, p. 29-43, 1994.

EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION. **The aluminium automotive manual**. Disponível em: < <http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2011/11/AAM-Applications-Power-train-2-Engine-blocks.pdf> >. Acesso em: 11 jan. 2014.

FENG, C. X.; WANG, X.; YU, Z. Neural networks modeling of honing surface roughness parameters defined by ISO 13565. **Journal of manufacturing systems**, vol. 21, n. 5, p. 395-408, 2003.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo: Blucher, 2009.

GUESSER, W. L.; SCHROEDER, T.; DAWSON, S. Production experience with compacted graphite iron automotive components. **AFS Transactions**, v. 109, p. 1061-1071, 2001.

GÓRNY, M.; KAWALEC, M. Effects of titanium addition on microstructure and mechanical properties of thin-walled compacted graphite iron casting. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 22, p. 1519-1524, 2012.

HECK M. *et al.* Analytical investigations concerning the wear behavior of cutting tools used for the machining of compacted graphite iron and grey cast iron. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 26, p.197-206, 2008.

IMASOGIE, B. I.; WENDT, U. Characterization of graphite particle shape in spheroidal graphite iron using a computer-based image analyzer. **Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1-12, 2004.

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16112**: Compacted (vermicular) graphite cast irons – Classification. 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13565-2**: Geometrical Product Specifications - Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties - Part 2: Height characterization using the linear material ratio. 1996.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 2**: Grinding, honing, lapping. Berlin: Springer, 2009.

LEÓN, F. P. Evaluation of honed cylinder bores. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 51, n. 1, p. 503-506, 2002.

MALBURG, M. C.; JAY, R.; WHITEHOUSE, D. J. Characterization of surface texture generated by plateau honing process. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 42, n.1, p. 637-639, 1993.

MEZGHANI, S. *et al.* The effect of groove texture patterns on piston-ring pack friction. **Precision Engineering**, v. 36, p. 210-217, 2012.

MICHALSKI, J.; PAWLUS, P. Description of honed cylinders surface topography. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 34, n. 2, p. 199-210, 1994a.

MICHALSKI, J.; PAWLUS, P. Effects of metallurgical structure and cylinder surface topography on the wear of piston ring-cylinder assembly under artificially increased dustiness condition. **Wear**, v. 179, p. 109-115, 1994b.

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.

MOCELLIN, F. *et al.* Study of the Machinability of Compacted Graphite Iron for Drilling Process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v.26, n.1, p.22-27, 2004.

OBARA, R. **Uso das transformadas de Fourier e Radon na quantificação de folded metal no interior de sulcos de brunimento**. 2013. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

OBARA, R.; TOMANIK, E.; SOUZA, R. M. Folded metal and others surface parameters on combustion engine cylinders. **SAE Technical Paper 2014-36-0323**, 2014.

PAPADOPOULOS, P.; PRIEST, M.; RAINFORTH, W. M. Investigation of fundamental wear mechanisms at the piston ring and cylinder wall interface in internal combustion engines. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 221, p. 333-343, 2007.

PAWLUS, P. A study on the functional properties of honed cylinders surface during running-in. **Wear**, v. 176, p. 247-254, 1994.

PAWLUS, P. Change of cylinder surface topography in initial stage of engine life. **Wear**, v. 209, p. 69-83, 1997.

PRIEST, M.; TAYLOR, C. M. Automobile engine tribology – approaching the surface. **Wear**, v. 241, p.193-203, 2000.

PEREIRA, A. A.; **Análise do desgaste da ferramenta a base de β -Si₃N₄ na usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 utilizando técnicas avançadas e de alta resolução**. 2010. 228 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

ROSA, S. N. *et al.* Analysis of tool wear, surface roughness and cutting power in the turning process of compact graphite irons with different titanium content. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 32, n. 3, p. 234-240, 2010.

STOUT, K.J. *et al.* The development of methods for the characterization of roughness on three dimensions. **EUR 15178 EN of the Commission of the European Communities**, 1994.

SABRI, L.; MEZGHANI, S.; MANSORI, M. A study on the influence of bond material on honing engine cylinder bores with coated diamond stones. **Surface & Coatings Technology**, v. 205, p. 1515-1519, 2010.

STEFANESCU, D. M. Classification of ferrous casing alloys. In: ASM Metals Handbook, vol. 15. **Casting**. ASM International, 1992, p. 1352-1355

STEFANESCU, D. M., HUMMER, R.; NECHTELBERGER, E. Compacted graphite iron. In: ASM Metals Handbook, vol. 15. **Casting**. ASM International, 1992, p. 1456-1459.

SUDARSHAN, T. S.; BHADURI, S. B. Wear in cylinder liners. **Wear**, v.91, p.269-279, 1983.

TALYMAP 3D. **Guide – Segmentation**.

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

TUNG, S. C.; MCMILLAN, M. L. Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future. **Tribology International**, v.37, p. 517-536, 2004.

TUPY S.A. **Blocos em CGI, fabricados e pré-usinados pela Tupy, equipam novos motores diesel da Ford**. Disponível em: <http://www.tupy.com.br/portugues/imprensa/noticias.php?id_idioma=3&ntc_id=553>. Acesso em: 22 nov. 2014.

VELICHKO, A. **Quantitative 3D characterization of graphite morphologies in cast iron using FIB microstructure tomography**. 2008. 166 f. Thesis (Ph.D) - Universität des Saarlandes, Saarlandes, Germany, 2008.

WOJNAR, L. **Image Analysis: Applications in Materials Engineering**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.

APÊNDICE A – ROTINA PARA QUANTIFICAÇÃO DE METAL DOBRADO

Acesso restrito. Para mais informações entrar em contato com autor:

gustavo_takehara@hotmail.com

pintaude@utfpr.edu.br

joaovale@utfpr.edu.br

ANEXO A – ROTINA PARA SOBREPOSIÇÃO DE IMAGENS

Acesso restrito. Para mais informações entrar em contato com autor:

joaovale@utfpr.edu.br