

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

BRUNO HENRIQUE ANDREATTA

**ANÁLISE DE UM PRÉ-TRATAMENTO DE DADOS BASEADO EM
VALORES LIMIARES DE AMPLITUDE NA TEXTURA DE
SUPERFÍCIES BRUNIDAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Tcc2 - Nº 40 – Bruno Henrique Andreatta)

CURITIBA

2017

BRUNO HENRIQUE ANDREATTA

**ANÁLISE DE UM PRÉ-TRATAMENTO DE DADOS BASEADO EM
VALORES LIMIARES DE AMPLITUDE NA TEXTURA DE
SUPERFÍCIES BRUNIDAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde.

CURITIBA

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa " Análise de um pré-tratamento de dados baseado em valores limiares de amplitude na textura de superfícies brunidas ", realizado pelo aluno Bruno Henrique Andreatta, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde
Departamento Acadêmico de Mecânica, DAMEC
Orientador

Prof. Dr. Tiago Cousseau
Departamento Acadêmico de Mecânica, DAMEC
Avaliador

Prof. Dr. Walter Luís Mikos
Departamento Acadêmico de Mecânica, DAMEC
Avaliador

Curitiba, 03 de julho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui meus mais sinceros agradecimentos às pessoas que contribuíram notoriamente para o desenvolvimento desse trabalho:

Primeiramente, ao meu orientador Prof. Giuseppe Pintaúde, pela orientação e confiança depositada, onde em todas as fases de execução do trabalho se fez disponível e contribuiu em grande escala para que esse trabalho realmente saísse do campo das ideias e se tornasse algo palpável. Ao amigo, e colega de trabalho, William Fernandes pela apresentação da proposta de tema de trabalho e pela participação, inicial, em conjunto com seu programa de mestrado.

Ao aluno de iniciação científica Guilherme Fernandes Ventura pelo esforço, e dedicação, nas caracterizações de interferometria de luz branca e preparações de amostras. Ao Prof. Walter Mikos por toda a colaboração quanto a indicação de normas e referências para embasar tecnicamente o trabalho, bem como na análise crítica do escopo de estudo. Ao Prof. Tiago Cousseau pelas dicas e recomendações dadas quanto ao escopo do trabalho, pelas propostas de análises alternativas e pelo auxílio quanto as amostras fornecidas junto a Mahle Jundiaí®.

Ao Prof. Euclides Bernadelli, como professor responsável pelo trabalho de conclusão de curso 2, por todos os esclarecimentos e auxílios prestados durante o primeiro semestre de 2017. Aos amigos Felipe Tosin, Rafael Klüppel e Guilherme Balvedi pela ajuda quanto ao entendimento de trechos de programação no software MATLAB®.

Aos amigos Eliseu Ramos, Felipe Possoli e Guilherme Sanches por todo o apoio e companheirismo prestado durante essa jornada de execução desse trabalho. E por fim, presto especial agradecimento à minha namorada, Diane Ribeiro, por todo apoio, ajuda e compreensão tanto nos bons momentos como nas fases difíceis dessa jornada.

RESUMO

Andreatta, Bruno Henrique. Análise de um pré-tratamento de dados baseado em valores limiares de amplitude na textura de superfícies brunidas. 2017. 71 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

O conjunto pistão, anéis e camisa de cilindro pode ser considerado como um dos grupos de função mais importante para os motores a combustão interna, devido ao fato de estar totalmente atrelado a potência produzida a partir do processo de combustão proveniente de um ciclo térmico de operação e, ao mesmo tempo, também sendo relacionado as perdas de energia, principalmente por atrito, que são originadas pelo contato dos anéis dos pistões com o cilindro e/ou camisa de cilindro. Uma das principais demandas da indústria automobilística, e de geradores industriais, é a redução dessas perdas por atrito, afim de se melhorar a eficiência de funcionamento, bem como a reduzir o consumo de combustível e atender os níveis de emissões de poluentes que são exigidos pelos órgãos reguladores/regulamentadores. Deste modo, o estudo do contato mecânico desse conjunto mecânico se mostra de relevância científica, onde os atuais modelos de contato mecânico (Greenwood e Williamson, por exemplo) trazem como premissa inicial superfícies que possuam distribuição de alturas de asperezas com comportamento gaussiano. Deste modo, o objetivo deste trabalho é voltado a análise de um pré-tratamento baseado em valores limiares, para picos, quando aplicados na topografia de superfície brunidas e seu efeito na distribuição de alturas e simetria estatística das mesmas e, também o comparativo entre o emprego de filtros gaussianos em superfícies com e sem os recortes limiares de amplitudes de asperezas.

Palavras-chave: Brunimento, Pré-Tratamento, Recortes Limiares, Asperezas.

ABSTRACT

Andreatta, Bruno Henrique. Analysis of a data pretreatment based on amplitude thresholds in the texture of honed surfaces. 2017. 71 p. Monograph (Bachelor of Mechanical Engineering) – Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2017.

The piston, piston-ring and cylinder liner assembly can be considered as one of the most important function groups for internal combustion engines, due to the fact that is totally related to the power produced from the combustion process from a thermal operating cycle and at the same time the energy losses, especially by friction, which are caused by the contact of the piston-rings with the cylinder and / or cylinder liner. One of the main demands of the automobilist industry and of industrial generators is the reduction of these losses by friction, in order to improve the efficiency of operation, as well as to reduce fuel consumption and to meet the emission levels of pollutants that are required by the Regulatory agencies. In this way, the mechanical contact of this mechanical unit is shown to be of scientific relevance, where the current mechanical contact models (Greenwood and Williamson, for example) bring as premise surfaces that have a distribution of Gaussian behavioral heights. Thus, the objective of this work is to analyze a pretreatment based on threshold values, for peaks, when applied to surface topography and its effect on the distribution of heights and statistical symmetry of the same, and also the comparison between the use of Gaussian filters on surfaces with and without the threshold cut-offs of roughness amplitudes.

Keywords: Honing, Pretreatment, Tresholds, Roughness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Textura típica de uma superfície brunida de uma camisa de cilindro.....	12
Figura 1.2 - Curva de Abbott-Firestone.....	13
Figura 2.1 - Exemplo de cilindros, à esquerda, e camisas de cilindros, à direita, de MCI.....	18
Figura 2.2 - (a) Representação esquemática do brunimento de cilindros/camisas de cilindros; (b) Superfície brunida de uma camisa de cilindro.....	20
Figura 2.3 - Componentes da velocidade de corte no brunimento de curso longo....	21
Figura 2.4 - Perfil superficial genérico resultante do brunimento de desbaste (a) e do brunimento de platô (b).....	22
Figura 2.5 - Brunimento de platô: Associação das regiões às características superficiais.....	22
Figura 2.6 - Elementos que compõem uma superfície real.....	24
Figura 2.7 - Método de medição de rugosidade sem contato.....	26
Figura 2.8 - Representação do valor de Sa no perfil de rugosidade.....	27
Figura 2.9 - Representação da rugosidade máxima Sz	28
Figura 2.10 - Inclinação da curva de distribuição de amplitude.....	29
Figura 2.11 - Representação da assimetria da curva de distribuição de amplitude.....	30
Figura 2.12 - Método para cálculo de Smr	30
Figura 2.13 - Curva de Abbott-Firestone.....	31
Figura 2.14 - Interpretação da curva de Abbott-Firestone com inclinação suave (a) e acentuada (b).....	32
Figura 2.15 - Representação gráfica de Sk	33
Figura 2.16 - Representação gráfica dos parâmetros obtidos a partir da curva Abbott-Firestone.....	34
Figura 2.17 - Contato com atrito: (a) tipo stick; (b) tipo slip.....	36
Figura 3.1 - Interferômetro CCI HM.....	40

Figura 3.2 – Procedimento experimental.....	41
Figura 3.3 – Croqui do corpo de prova da camisa de cilindro após operação de corte	41
Figura 3.4 – Procedimento para Tratamento de dados.	44
Figura 3.5 - Métodos comparativos aplicados	45
Figura 4.1 – Textura característica de superfície brunida.	47
Figura 4.2 – Vista superior característica de superfície brunida.....	48
Figura 4.3 - Curva Abbott-Firestone (i) Região 3 da amostra A; (ii) Região 9 da amostra B.....	50
Figura 4.4 – Parâmetro S_{sk} versus Percentual de Recorte.....	51
Figura 4.5 - Parâmetro S_{ku} versus Percentual de Recorte	52
Figura 4.6 - Curva Distribuição Acumulada pós recorte para (i) região 3 da amostra A e (ii) região 9 da amostra B.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Recomendações de cut-off e espaçamentos máximos	39
Tabela 3.1 - Composição química do ferro fundido cinzento (% em massa)	39
Tabela 4.1 - Parâmetros de rugosidade das amostras analisadas.....	49
Tabela 4.2 - Resultados do método de recorte para as medições A3 e B9	50
Tabela 4.3 - Melhores recortes obtidos para cada região analisada	53
Tabela 4.4 - Teste de hipóteses para recorte limiar dos picos	54
Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros Skewness e Kurtosis após aplicação dos filtros gaussianos propostos no Comparativo 1	55
Tabela 4.6 – Teste de Hipóteses para Comparativo 1	55
Tabela 4.7 - Valores dos parâmetros Skewness e Kurtosis após aplicação dos filtros gaussianos propostos no Comparativo 2	56
Tabela 4.8 - Teste de Hipóteses para Comparativo 2	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contexto do Tema	14
1.2	Caracterização do Problema	14
1.3	Objetivos	15
1.4	Justificativa	16
1.5	Conteúdo ou Etapas do Trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Cilindros de motores a combustão interna	17
2.1.1	Materiais comumente utilizados	18
2.1.2	Processo de fabricação	19
2.2	Brunimento	19
2.2.1	Brunimento de Curso Longo	20
2.2.2	Funcionalidade das superfícies brunidas	23
2.3	Textura da superfície	24
2.4	Rugosidade	25
2.4.1	Medição da rugosidade	26
2.4.2	Parâmetros de rugosidade	27
2.5	Contato mecânico	35
2.5.1	Classificação do contato	35
2.5.2	Contato entre superfícies	36
2.5.3	Modelo de Greenwood e Williamson	37
2.6	Filtro gaussiano	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Materiais	39
3.2	Equipamentos	40
3.2.1	Interferômetro	40
3.3	Procedimento experimental	40
3.4	Análise de dados	43
3.5	Comparativos	45
3.5.1	Teste de Hipóteses	45
4	RESULTADOS	47
4.1	Textura das superfícies brunidas	47
4.2	Dados referência sem pré-tratamento	48
4.3	Dados referência com pré-tratamento	50
4.3.1	Teste de hipótese para o pré-tratamento	53
4.4	Filtro gaussiano ISO 16610-21 vs Duplo filtro gaussiano – Comparativo 1	54
4.4.1	Teste de hipóteses – Comparativo 1	55
4.5	Filtro gaussiano ISO 16610-21 vs Duplo filtro gaussiano – Comparativo 2	56
4.5.1	Teste de hipóteses – Comparativo 2	57
5	CONCLUSÕES	58

REFERÊNCIAS	60
APÊNDICE A – CÓDIGO MATLAB	65
APÊNDICE B – Tabela 4.1 completa	70

1 INTRODUÇÃO

Um dos processos de usinagem mais utilizados para proporcionar elevados níveis de acabamento superficial em furos, e/ou elementos tubulares, bem como correções de geometria, é o brunimento (KÖNIG, 1989). Esse método consiste na usinagem abrasiva e possui aplicabilidade tanto em componentes de aço e ferro fundido, quanto em metais não ferrosos.

Quando analisado o contexto industrial da utilização desse método de usinagem, observa-se que o brunimento traz um impacto crucial nas características tribológicas, das superfícies internas dos cilindros (Figura 1.1) de motores a combustão interna (ASM, 1989). A avaliação de atrito, desgaste e lubrificação para esse componente é diretamente relacionada às características do motor, tais quais: durabilidade dos componentes síncronos aos cilindros, nível de emissão de poluentes, capacidade de entrega de potência, níveis de ruídos quando em operação, entre outros (PAWLUS, 1997).

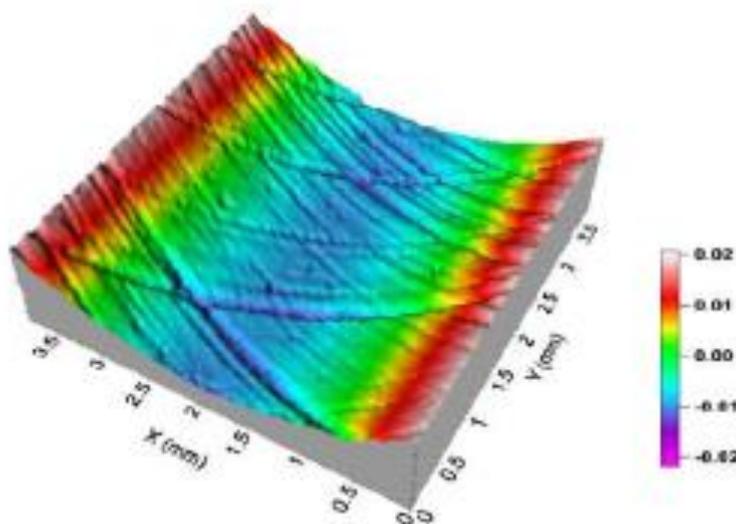


Figura 1.1 - Textura típica de uma superfície brunida de uma camisa de cilindro.

Fonte: Adaptado de Sabeur *et al.* (2013).

Com a crescente demanda sobre o controle do nível de emissão de poluentes, tanto em veículos de passeio quanto em caminhões e veículos de construção, se faz necessário cada vez mais aprofundar os estudos em relação às características

topográficas que uma superfície brunida deve apresentar a fim de atender as legislações vigentes.

Para a análise e caracterização das superfícies brunidas, se faz necessário o entendimento e aplicação de conceitos relacionados a rugosidade superficial, parâmetros de avaliação e curvas normalizadas atreladas aos mesmos. Quanto aos parâmetros comumente abordados quando na análise de superfícies brunidas, especialmente para camisas de cilindros, destacam-se os seguintes: Parâmetro da curva de razão de material associada à altura central (S_k), altura de pico reduzida (S_{pk}) e a altura de vale reduzida (S_{vk}).

Os parâmetros anteriormente citados são obtidos através da construção da curva de Abbott-Firestone (Figura 1.2), que possui a capacidade de descrever propriedades referentes a distribuição das amplitudes presentes em uma superfície, sendo uma representação da variação do parâmetro razão material do perfil em função de diferentes níveis de corte do comprimento avaliado (FERREIRA e MAGALHÃES, 2009).

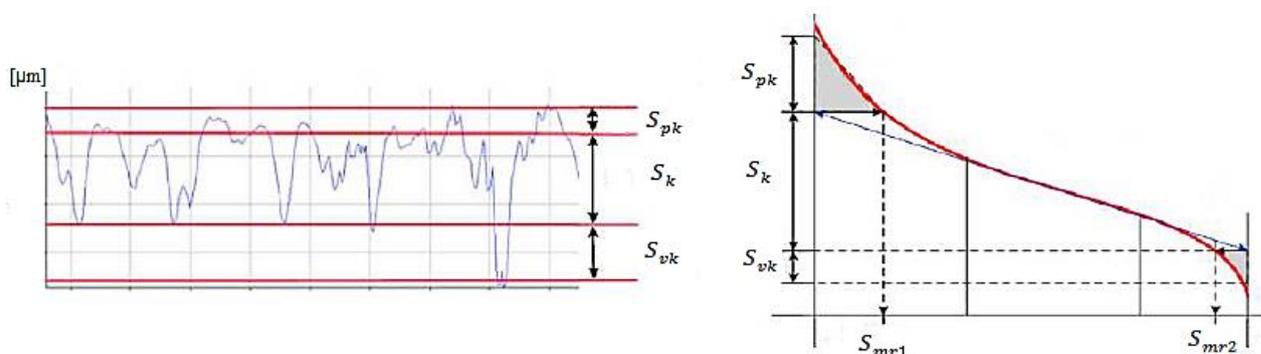


Figura 1.2 - Curva de Abbott-Firestone.

Fonte: Adaptada de ISO 13565-2.

Quanto a características funcionais, pode-se dizer que se a curva apresentar pequena inclinação, têm-se uma superfície com baixa quantidade de picos, ou seja, terá boa resistência ao desgaste e, na situação contrária, quando da curva com inclinação acentuada, sugere-se uma superfície com baixa resistência ao desgaste (FREITAS, 2006).

Esse estudo tem como pauta realizar a análise de um pré tratamento das medições de rugosidade, obtidas em um interferômetro, baseado na utilização de valores limiares (do termo em inglês, *threshold*), para picos, na textura da superfície de uma camisa de cilindro de motor a combustão interna. Posteriormente a isso, avaliar parâmetros normatizados relacionados a rugosidade superficial e então verificar a possibilidade de determinar regiões de recorte no perfil de rugosidades nos quais seja possível utilizar modelos Gaussianos de contato mecânico.

1.1 Contexto do Tema

Um dos primeiros fatores que fomenta o estudo da caracterização topográfica de superfícies brunidas é a ampla aplicação do processo de brunimento no setor industrial para fins automotivos. É de conhecimento geral que os órgãos reguladores/regulamentadores têm cada vez mais aumentado e restringido o controle sobre os níveis de emissões, com perspectiva de aplicação, no Brasil, de uma versão adaptada da atual legislação europeia “Euro VI” nos próximos dez anos. Logo, desenvolver e fabricar componentes que sejam capazes de atender tal demanda é uma necessidade do setor industrial. Com as crescentes parcerias entre as indústrias automobilísticas, de manufatura, e Universidades, têm-se um cenário interessante para o estudo dos aspectos relativos a textura das superfícies brunidas e seus parâmetros relacionados.

Em um segundo contexto, focando na produção científica presente neste dado momento, é interessante destrinchar os conceitos referentes aos parâmetros de rugosidade aplicados aos cilindros dos motores a combustão interna e sua correlação com os modelos teóricos de contato entre superfícies.

1.2 Caracterização do Problema

Alguns dos modelos de contato mecânico mais utilizados em trabalhos acadêmicos de referência na área de tribologia, como o de Greenwood e Williamson, tem como premissa o fato de que as superfícies em questão possuem suas alturas de asperezas distribuídas de forma Gaussiana. Por outro lado, sabe-se que as

superfícies submetidas ao processo de brunimento não são perfeitamente caracterizadas como gaussianas quando avaliada toda a amplitude de aspereza da superfície. Sendo assim, quando na avaliação do contato mecânico entre uma camisa de cilindro de motor de combustão interna, brunida, e os anéis do pistão encontra-se certa limitação na aplicação de modelos como o citado acima.

A adoção de tais modelos é dada como uma hipótese para estudo e não representa, a priori, uma correlação real entre a premissa básica do modelo de contato mecânico e o comportamento das superfícies brunidas. Porém, se avaliados os *summits* (porções dos picos com distribuição gaussiana), uma superfície brunida possui distribuição gaussiana. Na tentativa de suavizar as amplitudes de toda a textura da superfície, utiliza-se os filtros gaussianos, sejam eles simples, duplos ou robustos, nos dados obtidos na medição de rugosidade. Sendo assim, uma alternativa a aplicação direta de tais métodos de filtragem, é a análise de recortes a partir de valores limiares, “Tresholds”, de amplitude que resultem em uma distribuição de alturas de asperezas com maior tendência gaussiana.

1.3 Objetivos

O objetivo desse trabalho de conclusão de curso é a análise do pré tratamento de amplitudes, ou alturas de asperezas, quando aplicado na textura de superfícies brunidas. Esse pré tratamento dá-se através da utilização de recortes na curva Abbott-Firestone original (sem tratamento), com valores limiares para picos. Deste modo, objetiva-se avaliar se o pré-tratamento promove ganho quanto a identificação de regiões de recorte com comportamento gaussiano de distribuição de amplitudes de asperezas.

Como consequência, os objetivos secundários desse projeto de pesquisa são:

- Caracterização topográfica 3D das superfícies brunidas de camisas de cilindros de motores a combustão interna;
- Construção da curva de distribuição acumulada para representação das amostras em estudo pré-tratadas;
- Determinar ponto de recorte da curva Abbott-Firestone que possibilite a aplicação de modelos gaussianos de contato mecânico;

1.4 Justificativa

Esse projeto de pesquisa agrupa conceitos dos seguintes campos de conhecimento da engenharia mecânica: processos de fabricação e metrologia.

Em se tratando de processos de fabricação, têm-se a exposição do principal processo de usinagem empregado para a obtenção de superfícies de retenção de lubrificantes, o brunimento. Quanto ao campo da metrologia, salienta-se a mensuração da rugosidade superficial dos componentes mecânicos, traduzindo-se em técnicas, equipamentos e parâmetros obtidos.

Observa-se que a otimização da textura da superfície dos cilindros traz várias demandas, sejam elas por questões produtivas, relacionadas a eficiência, consumo e também quanto aos aspectos ambientais (DIMKOVSKI et al., 2011). Outro ponto que justifica essa PP, como ponto de motivação, é relacionado ao fato do tema de pesquisa ser totalmente atrelado com a área de atuação, engenharia *Powertrain*, do executante desse trabalho.

1.5 Conteúdo ou Etapas do Trabalho

O capítulo 1 aborda a Introdução ao tema de pesquisa desse trabalho de conclusão de curso, passando pelo contexto do assunto, caracterização do problema, justificativa do trabalho e objetivos a serem atingidos.

O capítulo 2 se inicia tratando dos cilindros de motores a combustão interna. Dado o panorama geral dá-se a apresentação do processo de brunimento e suas especificidades. Caminhando no contexto do estado da arte, aborda-se questões relacionadas a textura de superfícies, conceitos de rugosidade e seus parâmetros, bem como noções sobre contato mecânico e filtro gaussiano.

No capítulo 3 esquematiza-se a estratégia de trabalho para o presente estudo, desde materiais, equipamentos, metodologia experimental aplicada e forma comparativas para análise dos resultados. Posteriormente, apresenta-se os resultados no capítulo 4 com o propósito de fomentar as conclusões tomadas no capítulo 5.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção tem por objetivo apresentar os conceitos básicos relacionados ao projeto de pesquisa. Inicialmente serão abordados os tipos cilindros de motores a combustão interna, bem como seus processos de fabricação e materiais utilizados. Aprofundando no conceito de manufatura, aborda-se a usinagem de acabamento por brunimento, suas variantes e a funcionalidade das superfícies brunidas. Convergindo a um ponto de estudo, salienta-se o embasamento referente a textura de superfície e o problema do contato mecânico. Findando o referencial bibliográfico, apresenta-se os conceitos de rugosidade, métodos de medição e os parâmetros comumente aplicados tanto no âmbito industrial quanto no foco de pesquisa e investigação, com foco especial para parâmetros oriundos da curva Abbott-Firestone e os relacionados a distribuição de alturas de asperezas. O último ponto levantado nesse referenciamento bibliográfico faz citação a respeito do contato entre superfícies e o modelo de Greenwood e Williamson, bem como as normas que definem o filtro gaussiano e, num apanhado geral, a relação de todos os conceitos anteriormente citados com a distribuição probabilística de alturas de asperezas.

2.1 Cilindros de motores a combustão interna

O cilindro é um componente do motor de combustão interna (MCI), com denominação relacionada a sua forma, que desempenha a função de alojamento do pistão ao longo do curso deste. De modo simplista, o sistema cilindro-pistão-biela-virabrequim é o responsável pela conversão do movimento linear, oriundo da combustão, em movimento rotativo.

Os cilindros podem ser parte constituinte do bloco do motor, sendo usinados diretamente no mesmo, seja ele de ferro fundido ou alumínio, ou como peças que são montadas no bloco do motor (Figura 2.1). Nessa segunda opção de aplicação, tais itens são comumente denominados como “camisas de cilindro” e, as motivações principais para seu uso são baseadas na praticidade de substituição e reposição.

O trabalho conferido pelo cilindro de um motor a combustão interna se relaciona basicamente com a quantidade de mistura presente na câmara de combustão, de

forma que se estabelece uma relação de proporcionalidade direta entre o volume dos cilindros e a potência entregue. De modo geral, pode-se dizer que a potência final que o motor apresentará tem relação com: o trabalho realizado em cada cilindro, a eficiência da reação de combustão, a quantidade de cilindros em atuação e a rotação em que o sistema está atuando.



**Figura 2.1 - Exemplo de cilindros, à esquerda, e camisas de cilindros, à direita, de MCI.
Fonte: Adaptado de Ford Racing Parts¹ e L.A Sleeves²**

2.1.1 Materiais comumente utilizados

Independentemente do tipo de cilindro, seja ele usinado no bloco ou camisa de cilindro, existem dois materiais comumente adotados, sendo o ferro fundido cinzento (FFC) o mais empregado e o vermicular (FFV) figurando-se em uma segunda posição quanto à sua utilização (GUESSER, 2009). Existe ainda a aplicação do alumínio no caso de cilindros usinados no bloco, porém, limita-se apenas a motores que operam em baixas pressões de combustão, sendo preferencialmente utilizados em motores a gasolina. Para todos os demais casos, onde as pressões de operação sejam elevadas ou no uso de camisas de cilindros, a utilização de FFC ou FFV se torna tecnicamente necessária, principalmente em MCI para veículos pesados, tais como caminhões.

¹ Disponível em: < <https://performanceparts.ford.com/images/part/full/newboss.jpg>>, acesso em: 04/10/2016

² Disponível em: < https://www.lasleeve.com/images/news_images/lasleeve-performance-opendeck-sleeves-inline-4.jpg>, acesso em 04/10/2016

2.1.2 Processo de fabricação

A fabricação desses componentes, que são produtos oriundos da fundição, é caracterizada pelo emprego de vários processos usinagem, tais como: fresamento, alargamento, mandrilhamento e brunimento.

Os processos anteriormente descritos possuem importância na concepção de um cilindro de motor a combustão interna, porém, o brunimento é o processo chave para que seja possível atingir um nível de acabamento superficial condizente com a aplicação em motores a combustão interna, facilitando a retenção de óleo lubrificante no movimento do pistão, reduzindo atrito e evidenciando uma lubrificação aprimorada na região da superfície de contato entre anel e cilindro/camisa de cilindro (TOMANIK, 1992). O brunimento será abordado detalhadamente na sequência deste levantamento do estado da arte.

2.2 Brunimento

O processo de brunimento é considerado como um processo de usinagem com ferramentas GND, ou seja, de geometria não-definida. Dentre os vários outros processos elencados nesse mesmo grupo de usinagem, que se utilizam de elementos abrasivos como ferramenta de corte, pode-se dizer que suas características principais são conferir à superfície brunida qualidade superficial elevada, precisão dimensional e, ao mesmo tempo, baixos erros de forma (KÖNIG, 1989).

O conceito de funcionamento da operação de brunimento é baseado na superposição de dois movimentos: movimento axial e movimento de rotação. Basicamente, existem três variações do processo, sendo elas: brunimento de curso curto, brunimento de curso longo e o de engrenagens (KLOCKE, 2009). No referencial bibliográfico desse trabalho não serão abordados brunimento de curso curto e o de engrenagens.

2.2.1 Brunimento de Curso Longo

O processo de curso longo é caracterizado pela rapidez e precisão, utilizado principalmente na usinagem de acabamento de furações, a partir do emprego de ferramentas de geometria cilíndrica. Como sendo uma variante do brunimento, o método do curso longo têm por base a conferência de precisão dimensional e ajuste fino quanto à forma da superfície usinada, além de conferir atributos específicos quanto a textura e nível de deformação superficial (GUO *et al.*, 2011b). Segundo (PERES, 1994), algumas das principais áreas em que se aplica essa derivação do brunimento são: camisas de cilindro, cilindros de freio, cilindros hidráulicos, tambores de freio e válvulas hidráulicas.

Avaliando vantagens e desvantagens desse processo, nota-se que seus principais pontos fortes são: reduzido tempo de fabricação, taxas de remoção elevadas, correção dimensionais e de forma (KLOCKE, 2009).

Nesse método de usinagem para acabamento superficial refinado, a ferramenta de brunir realiza deslocamento axial, empregando movimentos alternados, e rotacionando em torno do seu próprio eixo (Figura 2.2). Deste modo, com a combinação desses movimentos cinemáticos, ocorre a descrição de uma trajetória helicoidal, que é responsável por gerar os sulcos característicos presentes na superfície dos cilindros/camisas de cilindros processados por essa técnica.



Figura 2.2 - (a) Representação esquemática do brunimento de cilindros/camisas de cilindros; (b) Superfície brunida de uma camisa de cilindro.

Fonte: Wang, 2013; Adaptado de Rejowski, 2012.

Adicionalmente, existe ainda a possibilidade da ferramenta de brunir deslocar suas pedras, de forma controlada, radialmente, permitindo assim que as mesmas sejam pressionadas contra a parede a ser usinada (Figura 2.3).

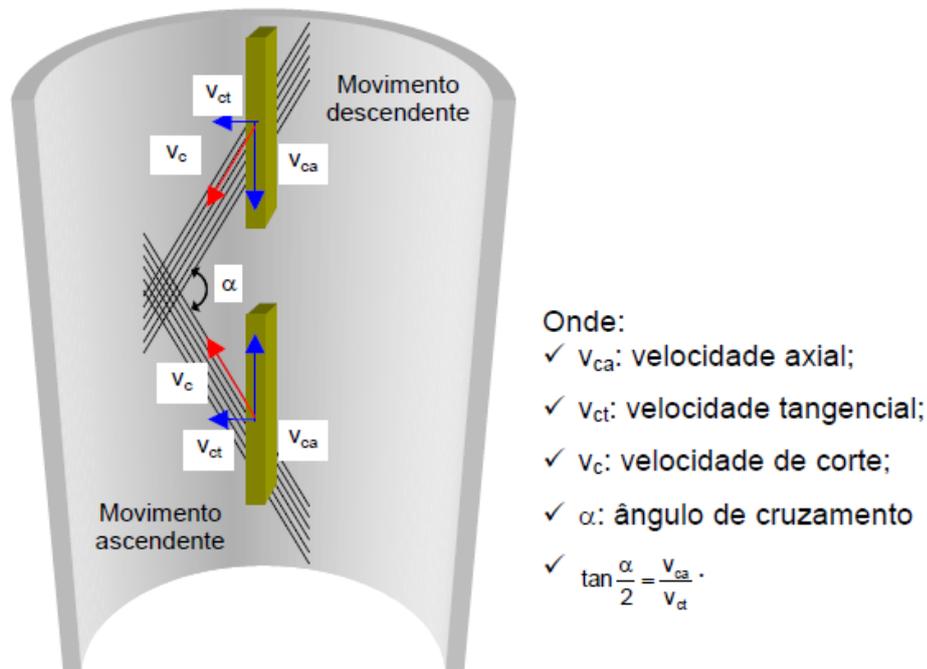


Figura 2.3 - Componentes da velocidade de corte no brunimento de curso longo.

Fonte: Adaptado de König, 1989.

Onde a velocidade de corte (V_c) é dada pela somatória vetorial das velocidades tangenciais e axiais. A combinação da movimentação, da ferramenta de brunir, anteriormente descrita acaba por promover sulcos alinhados, tendo sua representação de cruzamento dada pelo ângulo de cruzamento (α).

Os valores das tolerâncias dimensionais, bem como as designações de rugosidade estipuladas nos desenhos de fabricação são comumente obtidos por um processamento composto de três etapas de desenvolvimento, sendo elas: desbaste, semi-acabamento e acabamento (MOCELLIN, 2007). Quanto a fase de acabamento do brunimento de curso longo, existem também três tipos de variantes, tais como o brunimento fino, o brunimento em deslizamento helicoidal e o brunimento de platô (mais empregado) (MOCELLIN, 2007).

O brunimento de platô tem como princípio básico a remoção de picos residuais de etapas anteriores (Figura 2.4), mantendo os vales intacto devido ao fato dos mesmos operarem como bolsões de óleo para lubrificação do contato. Deste modo, a remoção desses picos causa um aumento na área de contato, elástico, lubrificado, propiciando melhor resistência ao desgaste entre anéis e paredes dos cilindros/camisas de cilindros.

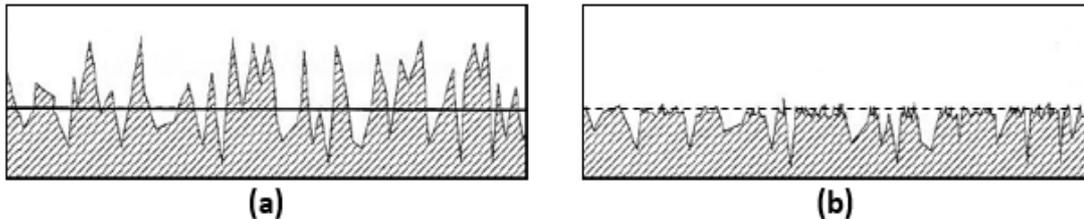


Figura 2.4 - Perfil superficial genérico resultante do brunimento de desbaste (a) e do brunimento de platô (b).

Fonte: Adaptado de Schmidt, 1999.

Outro ponto de extrema importância associado ao brunimento de platô é configurado a partir da sua relação direta com a obtenção de características tribológicas interessantes para a aplicação de cilindros/camisas de cilindros de motores a combustão interna (Figura 2.5).

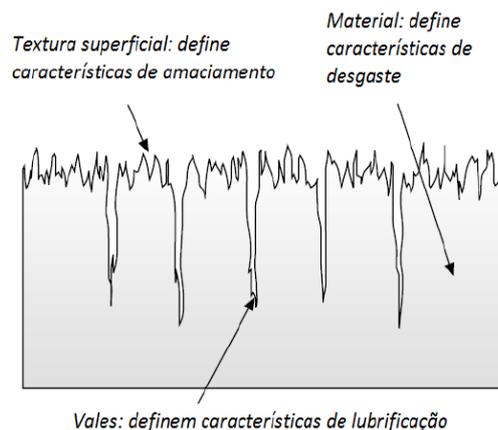


Figura 2.5 - Brunimento de platô: Associação das regiões às características superficiais.

Fonte: Whitehouse, 1994.

Após o processamento por brunimento de platô verificam-se, na peça processada, três regiões denominadas como platô, corpo (ou material) e vale, que

possuem associação direta com as características de amaciamento, desgaste e lubrificação. Quando da aplicação do brunimento de platô, verifica-se as seguintes vantagens (de maneira genérica e não aprofundada): melhoria no assentamento do anel do pistão, redução do desgaste, melhor selamento e redução de contaminação do óleo com partículas desgastadas (WOS e WMICHALSKI, 2011).

Em adição a tais pontos positivos, essa variante do brunimento promove o alcance de características com efeito direto ao usuário ou a órgãos reguladores, tais quais: consumo de óleo e combustível, além da manutenção dos níveis de emissão de poluentes dos motores a combustão interna, respectivamente (DROSSEL *et al.*, 2013).

2.2.2 Funcionalidade das superfícies brunidas

O processo de brunimento tem como objetivo principal a obtenção de superfície com rugosidade extremamente controlada, provendo pequenos picos e regiões com microsulcos, que servirão como porção de armazenamento para lubrificantes. Focando na aplicação do par de contato camisa de cilindro e anéis do pistão, observa-se que as camisas de cilindro com superfície brunidas irão proporcionar um desgaste menor dos anéis, principalmente no período de amaciamento dos motores, o que aumenta a vida útil de ambos os componentes (GARCIA, 2003).

Superfícies de camisas de cilindro brunidas trazem vantagens como: facilidade do assentamento dos anéis de pistão, redução da condição de desgaste dos anéis, condições de melhor selamento e também a redução de contaminação do óleo com partículas de desgaste (WOS e MICHALSKI, 2011; TUNG e EMLEY, 2002). Somado a todos os fatores anteriores, sabe-se que a superfície brunida é crucial para a determinação dos níveis de consumo de óleo e combustível, bem como para os níveis de emissão de poluentes (DROSSEL *et al.*, 2013).

Os sulcos gerados pelo brunimento, basicamente comandam os aspectos referentes a lubrificação, onde os mesmos acabam por criar um sistema de vias comunicantes de lubrificação (VALE, 2016).

Ângulos de brunimento inferiores a 30° proporcionam menor distribuição de óleo na direção axial, logo, os anéis do pistão tenderiam a encontrar um maior nível de dificuldade para realizar a movimentação característica sobre a superfície da camisa de cilindro. Basicamente, a faixa de ângulos de brunimento que compreende a melhor relação entre “custos e benefícios” fica alocada entre os intervalos de ótimos de 30° a 50° ou de 120° a 130° (WANG, 2013).

2.3 Textura da superfície

A textura de uma superfície brunida de um cilindro/camisa de cilindro de motor a combustão interna traz influência no comportamento do contato entre pistão-anel-cilindro. Deste modo, salienta-se a importância da caracterização superficial, principalmente quanto a rugosidade, devido ao fato da mesma ter atuação preponderante no período de amaciamento do MCI. (PAWLUS, 1994; TAYLOR, 1998). Para tal estudo, necessita-se do entendimento de alguns conceitos básicos referentes aos elementos que compõem uma superfície real (Figura 2.6).

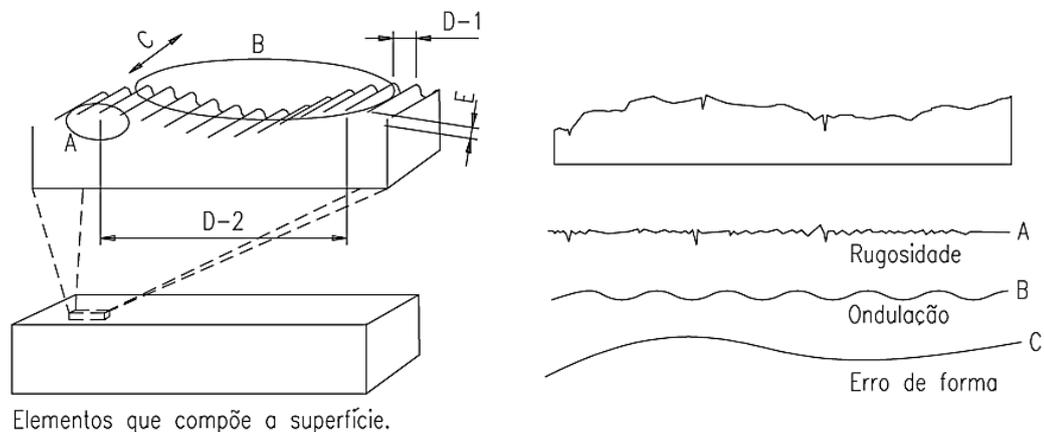


Figura 2.6 - Elementos que compõem uma superfície real.

Fonte: Adaptado de ASM, 1994.

Onde os elementos representados por (A), (B), (C), (D-1), (D-2) e (E) são:

- (A) – rugosidade, ou textura primária;
- (B) – ondulação, ou textura secundária;
- (C) – erro de forma;

- (D-1) – passo das irregularidades da textura primária;
- (D-2) – passo das irregularidades da textura secundária;
- (E) – Altura, ou amplitude, das irregularidades da textura primária;

Onde o termo textura faz menção aos picos e vales, oriundos de um processo de fabricação, presentes na superfície. Por definição, compreende-se que a textura superficial é dada por duas componentes anteriormente citadas, rugosidade e ondulação (ASM, 1994). Explanando de maneira detalhada, têm-se que a ondulação, ou textura secundária, é o conjunto de irregularidades superficiais repetidas em ondas de comprimento majoritariamente maior quando comparado à sua amplitude. O conceito de rugosidade e todos os itens relacionados serão abordados no tópico seguinte.

2.4 Rugosidade

Rugosidade, ou textura primária, é o conjunto de irregularidades superficiais repetidas em ondas de comprimento semelhante à sua amplitude, ou seja, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície (MATOS, 2009). Para motores a combustão interna, atentando-se a cilindros/camisas de cilindro, têm-se uma situação limítrofe a ser observada, onde deseja-se ao mesmo tempo superfícies rugosas o suficiente para que ocorra a retenção de óleo lubrificante e superfícies lisas a ponto de se reduzir o desgaste adesivo (PAWLUS, 1994). De modo generalista, pode-se salientar as seguintes influências da rugosidade no comportamento dos componentes mecânicos:

- Qualidade de deslizamento;
- Resistência ao desgaste;
- Possibilidade de acoplamento forçado;
- Resistência ao escoamento de fluidos;
- Resistência à corrosão;
- Vedação;
- Aparência.

Quando da ocorrência da fabricação fora de especificação quanto aos parâmetros de rugosidade, poderão ocorrer: imperfeições nos mecanismos; perda de funcionalidade; vibrações não dimensionadas no projeto; desgaste prematuro dos componentes, entre outros.

2.4.1 Medição da rugosidade

A fim de analisar a qualidade superficial tanto imediatamente após o processamento da mesma quanto durante o seu ciclo de desgaste convencional, pode-se considerar, além do método visual, três métodos básicos de medição de rugosidade: método da placa de comparação, medição por contato e, por fim, medições sem contato.

A medição sem contato, que geralmente é utilizado na medição de superfícies macias, extremamente precisas, e que não podem ser danificadas por qualquer efeito do apalpador (Figura 2.7). Quando comparado ao método com contato, apresenta um raio de medição, ou de ponta, na casa do micrômetro (HOBSON, 2002).

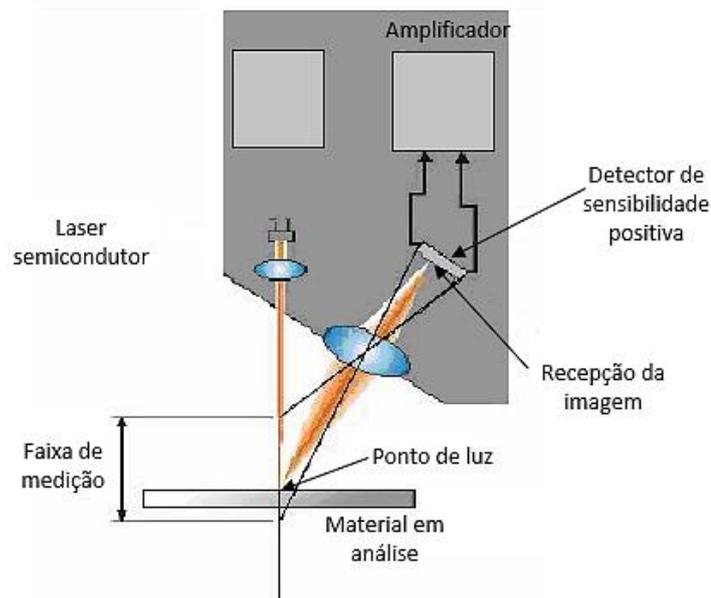


Figura 2.7 - Método de medição de rugosidade sem contato.
Fonte: Adaptado de Taylor Hobson, 2000.

Em que o método descrito acima se utiliza dos princípios físicos de reflexão. Basicamente, o feixe de luz é aplicado na superfície de estudo é refletida e direcionada a um detector e divisores de feixes (THURN e BRODMAN, 1986). Posteriormente, o sinal dos detectores é digitalizado e processado em softwares específicos para a conversão dessas leituras em parâmetros de interesse para o estudo da rugosidade da superfície.

2.4.2 Parâmetros de rugosidade

A avaliação da rugosidade de uma superfície pode ser realizada por meio de inúmeros parâmetros. Tais itens possuem caráter diferenciado quanto a sua concepção e possibilitam uma análise completa acerca das características da superfície de estudo.

2.4.2.1 Rugosidade Média

Rugosidade média (R_a), 2D, tem como definição a média aritmética dos valores absolutos dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade em relação a linha média, dentro do percurso de medição (l_m), podendo ser calculada pela equação (1):

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y \quad (1)$$

Em que, numa perspectiva tridimensional, o parâmetro (S_a), é dado pela equação (2):

$$S_a = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Z(y, x) \quad (2)$$

Onde sua representação no perfil de rugosidade é evidenciada (Figura 2.8):

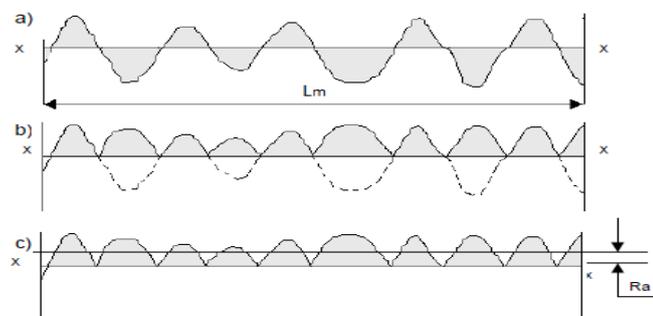


Figura 2.8 - Representação do valor de S_a no perfil de rugosidade.

Fonte: Adaptado de Mummery, 1992.

Onde primeiramente se define uma linha média, em seguida os vales são representados acima da linha média e, por fim, o parâmetro R_a é então definido como a altura média do perfil acima da linha média original.

Por ser um valor médio, esse parâmetro pode não fornecer uma indicação direta do estado da superfície, ou seja, em determinadas aplicações se faz necessário o uso de outros parâmetros. Seu principal uso é utilizado no controle contínuo, em linhas de produção, da rugosidade de superfícies com sulcos bem orientados como no fresamento ou torneamento (PIRATELLI FILHO, 2011).

2.4.2.2 Rugosidade média quadrática

Este é um parâmetro (R_q), 2D, correspondente ao desvio médio quadrático das medições de rugosidade, onde a operação de elevação quadrática aumenta o efeito das irregularidades, podendo ser formulado pela equação (3):

$$R_q^2 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n y^2 \quad (3)$$

Em que, numa perspectiva tridimensional, o parâmetro (S_q), é dado pela equação (4):

$$S_q = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Z(y, x))^2} \quad (4)$$

2.4.2.3 Rugosidade máxima

O conceito de rugosidade máxima (S_z) é dado pelo maior valor das rugosidades parciais que se apresentam ao longo do percurso de medição, caracterizado pela máxima distância pico-vale obtida (Figura 2.9):

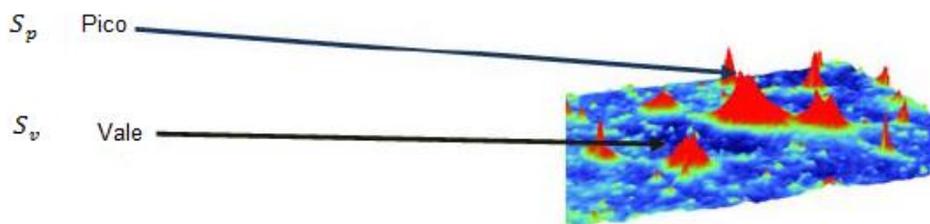


Figura 2.9 - Representação da rugosidade máxima S_z .

Fonte: Adaptado de Michigan Metrology Surface Texture Parameters Glossary, 2014.

Onde S_p e S_v são, respectivamente, as alturas máximas de pico e de vale mais acentuadas da porção de superfície avaliada, resultando na equação (5):

$$S_z = S_p - S_v \quad (5)$$

2.4.2.4 Parâmetro Skewness

Esse parâmetro (S_{sk}) aponta a simetria da distribuição de amplitude sobre a linha média do perfil. Para valores negativos, a interpretação é de que a superfície possui grande vales, como uma superfície brunida, por exemplo. Para o perfil Gaussiano, o Skewness tende a assumir valores nulos (Figura 2.10):

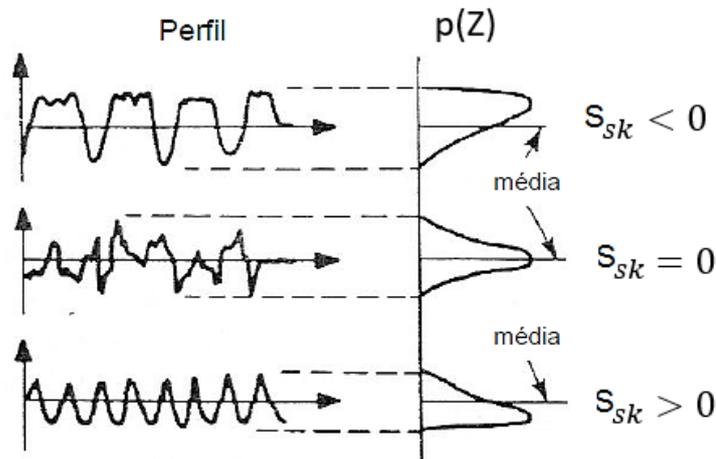


Figura 2.10 - Inclinação da curva de distribuição de amplitude.

Fonte: ASME, 1995.

Sendo determinado pela equação (6):

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Z(y, x))^3 \quad (6)$$

2.4.2.5 Parâmetro Kurtosis

O parâmetro Kurtosis S_{ku} está diretamente relacionado com a distribuição da superfície. Se a distribuição de amplitude tem uma forma equilibrada, o valor desse parâmetro fica aproximadamente igual a três. Já superfícies irregulares e pontiaguda geram valores, respectivamente, inferiores e superiores a três (Figura 2.11):

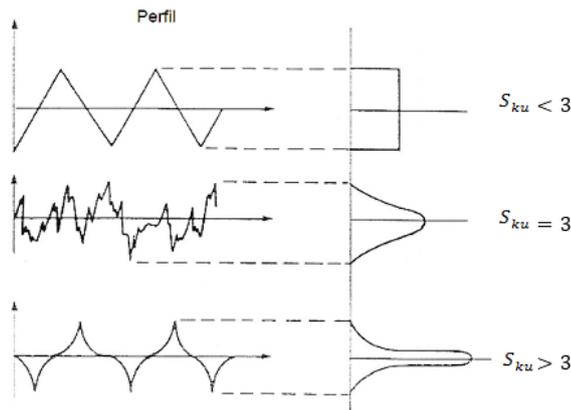


Figura 2.11 - Representação da assimetria da curva de distribuição de amplitude.
Fonte: ASME, 1995.

Sendo determinado pela equação (7):

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Z(y, x))^4 \quad (7)$$

2.4.2.6 Razão material do perfil

O parâmetro razão material do perfil ou fração de contato (M_r) é definido como sendo a relação percentual entre o comprimento de contato (de L_1 até L_5) e o comprimento de medição (l_m) dentro do nível de corte “C” (Figura 2.12).

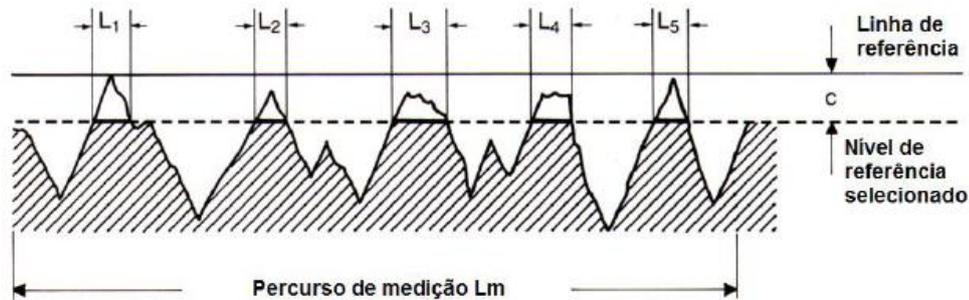


Figura 2.12 - Método para cálculo de S_{mr} .
Fonte: ISO 4287, 2002.

Onde o nível de corte “C” é dado como a distância entre uma linha de corte avaliada e uma linha de referência selecionada e, para avaliações do parâmetro razão material do perfil, é necessário a determinação de uma linha de referência (FERREIRA e MAGALHÃES, 2009).

O cálculo de M_r pode ser feito utilizando a Equação (8):

$$M_r = \frac{L1+L2+L3+L4+L5}{l_m} \times 100 (\%) \quad (8)$$

A norma ISO 4287 (2002), aponta que esse parâmetro serve na avaliação da forma do perfil e, conseqüentemente, sobre o provável comportamento de amaciamento e resistência ao desgaste, como por exemplo, as superfícies de correr de camisas de cilindro (FERREIRA e MAGALHÃES, 2009).

2.4.2.7 Curva Abbott-Firestone

Abbott e Firestone, em 1933, desenvolveram uma maneira de descrever várias propriedades de amplitude de uma superfície a partir da curva razão de apoio, que atualmente é denominada como curva Abbott-Firestone (FREITAS, 2006).

Basicamente, pode-se dizer que esta curva é a representação gráfica da variação do parâmetro razão material do perfil em função de diferentes níveis de corte do comprimento avaliado (Figura 2.13) (FERREIRA e MAGALHÃES, 2009).

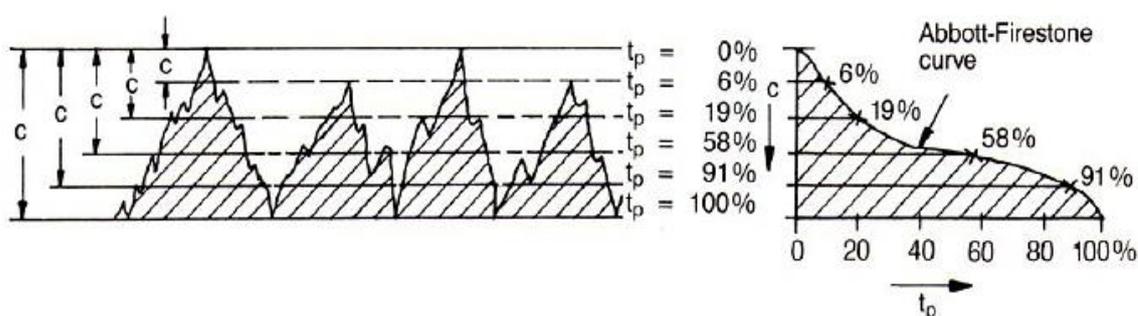


Figura 2.13 - Curva de Abbott-Firestone.

Fonte: Ferreira e Magalhães, 2009.

Quanto a características funcionais, pode-se dizer que se a curva estiver pouco inclinada, têm-se uma superfície com baixa quantidade de picos, ou seja, a superfície apresentará boa resistência ao desgaste e, a situação contrária, quando da curva com inclinação acentuada, sugere uma superfície com baixa resistência ao desgaste (Figura 2.14) (FREITAS, 2006).

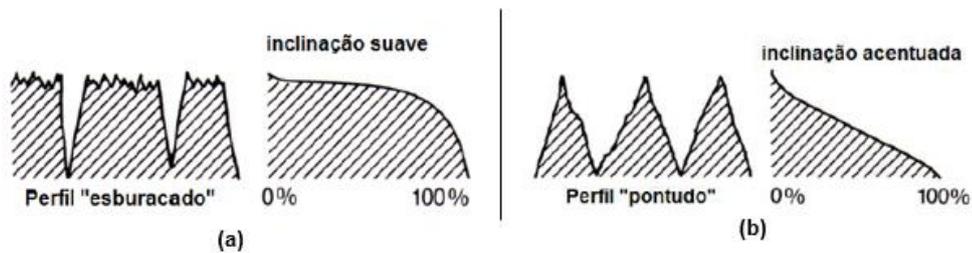


Figura 2.14 - Interpretação da curva de Abbott-Firestone com inclinação suave (a) e acentuada (b).

Fonte: Freitas, 2006.

Bohm (1992) elencou três regiões do perfil de rugosidade de acordo com a seguinte descrição:

- Região de amaciamento: profundidade entre 1% e 45% do comprimento de apoio;
- Região de operação: profundidade entre 15% e 75% do comprimento de apoio;
- Zona de lubrificação: profundidade entre 45% e 99% do comprimento de apoio.

Segundo Andretta (2001), um dos métodos mais aceitos para caracterizar a superfície produzida por brunimento é o proposto pela norma DIN EN ISO 13565-2, onde esse método consiste na aproximação da curva Abbott-Firestone por três retas e, assim, dividir a textura da superfície em três regiões; picos superiores, núcleo do perfil e vales inferiores, fazendo analogia a divisão proposta por Bohm (1992).

A implementação desse modelo tem como base uma curva secante com a menor inclinação possível, obtida para um intervalo de fração de contato igual a 40%. Elencando, os parâmetros passíveis de obtenção por meio da curva Abbott-Firestone são: parâmetro profundidade da rugosidade central, parâmetro profundidade reduzida dos vales e parâmetro altura reduzida dos picos.

2.4.2.8 Parâmetro profundidade da rugosidade central

O parâmetro S_k é definido como sendo a rugosidade de apoio, ou central, que suportará a maior solicitação, de operação, após o amaciamento. Para determinação deste parâmetro traça-se uma curva secante com a menor inclinação possível sobre a curva de Abbott-Firestone, onde a componente horizontal atinge o valor de 40% (Figura 2.15) (ISO 13565-2,1998). Para pequenos valores desse parâmetro têm-se elevada resistência mecânica e alta capacidade de suportar cargas em operações de contato, devido ao fato da superfície ter mais regiões suportando os carregamentos de trabalho (STOUT, 2000).

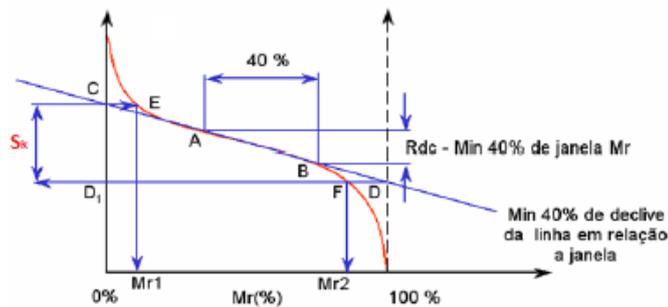


Figura 2.15 - Representação gráfica de S_k .

Fonte: ISO 16556-2, 1988.

2.4.2.9 Parâmetro profundidade reduzida dos vales

Por outro lado, o S_{vk} é a profundidade reduzida dos vales que se encontram abaixo da porção central (Figura 2.16), com base a 100% a M_{r2} , onde esse parâmetro é um dos grandes responsáveis pelas informações referentes a manutenibilidade do lubrificante na parede do cilindro (DONG *et al.*, 1994).

A1 Área dos picos superiores em contato com uma superfície lisa
 A2 Área dos vales em contato com uma superfície lisa
 Rk rugosidade do núcleo do perfil
 Rpk altura do pico reduzida
 Rvk profundidade reduzida dos vales
 Mr1 fração de contato relativa aos picos
 Mr2 fração de contato relativa aos vales

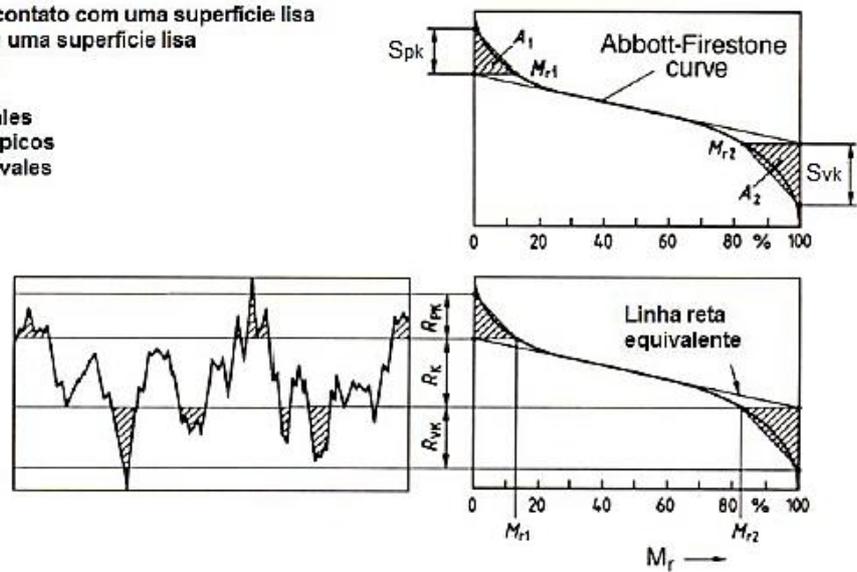


Figura 2.16 - Representação gráfica dos parâmetros obtidos a partir da curva Abbott-Firestone.
 Fonte: ISO 13565-2, 1998.

Onde o S_{vk} pode ser calculado a partir do conhecimento da área A2 e fração de contato relativa aos vales, pela equação (9):

$$S_{vk} = \frac{2 A_2}{(100 - M_{r2})} \quad (9)$$

2.4.2.10 Parâmetro altura reduzida dos picos

O S_{pk} , é uma estimativa em relação à altura reduzida dos picos acima da porção central (Figura 2.19), com base a 0% a M_{r1} . Para cilindros/camisas de cilindros, é interessante que tal parâmetro apresente valores reduzidos devido ao fato dos picos serão desgastados ou removidos durante a fase de amaciamento (BOHM, 1992).

Onde o S_{vk} pode ser calculado a partir do conhecimento da área A1 e fração de contato relativa aos vales, pela equação (10):

$$S_{pk} = \frac{2 A_1}{M_{r1}} \quad (10)$$

2.5 Contato mecânico

A problemática do contato mecânico envolve inúmeros fatores que influenciam no desempenho de superfícies em contato, seja quanto ao aspecto de performance quanto nas características de vida útil de componentes de um sistema mecânico qualquer. Fatores como rugosidade, variação de condições ambientes as quais o sistema em contato está exposto, entre outros, acabam por trazer diversos efeitos diretos no comportamento de corpos em contato (SAMPAIO, 2009).

Segundo Kikuchi e Oden (1988), os problemas de atrito tiveram seus estudos iniciados séculos antes das investigações sobre o contato mecânico, lideradas por Leonardo da Vinci no século XV, onde os sólidos eram invariavelmente considerados como indeformáveis. Questões referentes a contato na mecânica dos sólidos deformáveis surgiram na literatura apenas posteriormente a investigação mais detalhada e estabelecida de conceitos da mecânica do contínuo. Um dos primeiros trabalhos que conseguiu descrever os fenômenos da mecânica do contato é de autoria de Heinrich Hertz, que em 1882 apresentou o '*On the Contact of Elastic Solids*', artigo considerado como sendo o ponto de partida da Mecânica do Contato (YAMAOKA, 2014).

A Mecânica do Contato tem como objetivo principal estudar as situações nas quais dois corpos ocupam o mesmo local no espaço durante um mesmo intervalo de tempo, de modo alternado quanto as condições de contorno e também gerando solicitações de ação e reação que atuarão na superfície dos corpos. Em um primeiro momento, quando ocorre a compressão entre os corpos, as superfícies respondem de maneira elástica e, caso o carregamento seja retirado, ocorre o retorno mecânico total para a configuração inicial. Já numa segunda tratativa, com a imposição de um acréscimo da força de compressão, as tensões acabam por ultrapassar o limite de escoamento do material e o corpo assume um estado de deformação irreversível.

2.5.1 Classificação do contato

O contato mecânico pode ser classificado, em uma perspectiva simplista e num primeiro momento, quanto a porção de região de contato, isto é, como sendo conforme ou não conforme. Um contato conforme é dito aquele onde a superfície de contato

entre os dois corpos sólidos está ajustada perfeitamente entre os mesmos, sem carregamento. Já o contato não conforme é dado nos casos em que o contato ocorre em um ponto ou ao longo de uma linha (contato entre duas esferas ou entre cilindro e superfície plana), onde a área de contato será alterada quando na presença de um carregamento (SAMPAIO, 2009).

Outra maneira de classificar o contato é quanto a presença, ou não, de atrito. No caso do contato “sem atrito”, considera-se que os sólidos podem deslizar uns sobre os outros sem resistência efetiva na direção do movimento, onde essa consideração mostra-se muito restrita a superfícies extremamente lisas e com boa lubrificação (MAN, 1994).

Já no caso do contato com atrito têm-se duas situações passíveis de ocorrência: contato sem e com deslizamento tangencial, *stick* e *slip* (Figura 2.17), respectivamente. Para a primeira designação têm-se que a componente tangencial será menor que o limite de atrito e, na segunda perspectiva de análise, *slip*, a componente tangencial será igual ao limite de atrito (SAMPAIO, 2009).

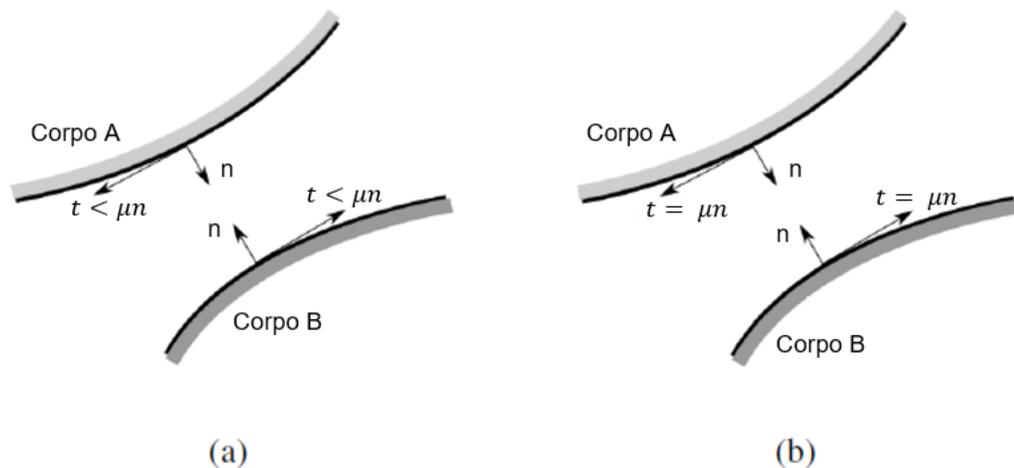


Figura 2.17 - Contato com atrito: (a) tipo stick; (b) tipo slip.
Fonte: Adaptado de Sampaio, 2009.

2.5.2 Contato entre superfícies

Num ponto de vista microscópico nota-se que as superfícies são extremamente rugosas. A partir do momento da ocorrência de contato, os picos que se tocam acabam por determinar a área real de contato, que pode ser aumentada quando no

incremento de pressão, uma vez que os picos se deformam (LUDEMA, 1996). As irregularidades presentes em uma superfície possuem uma altura de vários milhares de diâmetros atômicos, sendo que os picos são comumente denominados como “asperezas” (HUTCHINGS, 1992).

Em termos de área de contato, seu valor real terá representatividade como função da carga, rugosidade superficial e das propriedades mecânicas dos materiais que constituem os corpos, podendo inclusive variar com o tempo, em caso de contato estático. Já nos casos de carregamentos mais elevados as forças refletirão as propriedades mecânicas das asperezas, com a possibilidade de deformação plásticas, ranhuras e formações de de debris (partículas) de desgaste (GLAESER, 1993).

2.5.3 Modelo de Greenwood e Williamson

O princípio do modelo matemático de Greenwood e Williamson para a deformação das asperezas a partir da rugosidade dos perfis de contato é baseado e aplicado para o caso de superfície rugosa com uma lisa, porém, pode ser adaptado para o caso real de duas superfícies rugosas a partir da utilização de algumas simplificações (GREENWOOD e WILLIAMSON, 1966):

- Asperezas e forma esféricas na região do pico, com raio constante independentemente de sua altura;
- As asperezas mecanicamente independentes, suportando carregamentos proporcionais à sua altura e sem relação à vizinhança;
- Asperezas sofrem deformação elástica, entre deflexão, carga e área de contato;
- Altura dos picos é dada pelo desvio do plano médio dos picos e é tratada como uma variável aleatória que segue distribuição gaussiana de probabilidade. Esta consideração se baseia no fato de que os summits, região dos picos de uma superfície brunida, possuem distribuição gaussiana.

2.6 Filtro gaussiano

O filtro gaussiano se comporta como função matemática aplicada aos dados do perfil, sendo uma média ponderada do perfil e onde os valores mensurados se distribuem de forma gaussiana (distribuição normal). Outra característica do filtro gaussiano é que o mesmo conta com o suporte de uma função interpoladora que tem por objetivo a amenização da amplitude dos sinais, de modo a promover uma maior suavidade aos contornos superficiais do espécime em análise (WHITEHOUSE, 1994).

O filtro Gaussiano, dentro da série para especificações geométricas do produto, é definido pela norma internacional ISO 16610-21, servindo como base fundamental para a indústria e aplicações metrológicas. A base do filtro de perfil linear é a integral de convolução. Esse procedimento pode ser visto como a determinação de uma média móvel em movimento com uma função de ponderação, de acordo com a equação (11):

$$w(x) = \int_0^L z(x - \xi)s(\xi)d\xi \quad (11)$$

Em que $w(x)$ é a linha de filtro, $z(x)$ é o perfil não filtrado, ξ é a variação da linha média e $s(x)$ é a função de ponderação do filtro. Um requisito importante para definir a função de ponderação é que a área sob a função deve ter valor igual a um. Para o filtro gaussiano, a função de ponderação é dada pela equação (12):

$$s(x) = \frac{1}{\alpha\lambda_c} \cdot e^{-\pi(x/(\alpha-\lambda_c))^2} \quad (12)$$

Onde λ_c é o “cut-off”, e α , constante que acaba por determinar que 50% da amplitude é transmitida pelo filtro de perfil (ISO 16610-21, 2011), é representado pela equação (13):

$$\alpha = \sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi}} \quad (13)$$

Em relação a frequência do “cut-off”, têm a equação (14):

$$f_c = \frac{L}{\lambda_c} \quad (14)$$

Por fim, a norma recomenda alguns valores padrão para “cut-off”, a fim de delimitar variações quanto a esse parâmetro e possibilitar comparações de resultados. Os valores recomendados são apresentados na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Recomendações de cut-off e espaçamentos máximos

Cut-off (mm)	Espaçamentos (mm)
0,08	0,5
0,25	0,5
0,8	0,5
2,5	1,5
8,00	5,00

Fonte: ISO 16610-21, 2011.

Ressalta-se que a escolha do cut-off adequado para a superfície brunida não se baseia apenas no espaçamento, tendo em vista que é necessário considerar a rugosidade e isotropia da superfície para então selecionar o cut-off mais adequado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será descrita a metodologia para caracterização topográfica das superfícies brunidas de camisas de cilindros de motores a combustão interna, bem como os meios utilizados para o emprego do pré-tratamento baseado na aplicação de valores limiares de amplitudes de asperezas e os métodos comparativos realizados.

3.1 Materiais

Para a realização desse projeto de pesquisa serão utilizadas 2 amostras de camisas de cilindros novas do fabricante Mahle®. Essas camisas são constituídas de ferro fundido cinzento, composição média dada na Tabela 3.1, com dureza entre 240 e 300HB (Brinell).

Tabela 3.1 - Composição química do ferro fundido cinzento (% em massa)

	C	Si	Mn	S	P	Cr	Sn	Cu	Ni	Mo
%mín	2,7,	1,5	0,4	-	-	0,18	-	-	-	-
%máx	3,5	2,4	0,9	0,15	0,2	0,30	0,15	0,6	0,2	0,1

Fonte: Mahle®, 2014.

3.2 Equipamentos

Executou-se esse projeto de pesquisa com um equipamento: o interferômetro. Essa opção de escolha foi justificada pela metodologia de trabalho, que teve seu detalhamento descrito mais à frente nessa seção.

3.2.1 Interferômetro

O interferômetro de luz branca que foi utilizado para avaliação das superfícies de estudo, pelo método sem contato 3D, é o CCI HM da Taylor Hobson® (Figura 3.1) e que está disponível na UTFPR, atualmente no laboratório de metrologia.



Figura 3.1 - Interferômetro CCI HM.
Fonte: TAYLOR HOBSON, 2016.

Modelo que possui resolução vertical de 0,01 nm e lateral de 0,816 μm , varrendo-se uma área de 1024x1024 pontos mensuráveis (TAYLOR HOBSON, 2016).

3.3 Procedimento experimental

O procedimento experimental deu-se seguindo o fluxo do diagrama de blocos apresentado a seguir (Figura 3.2):

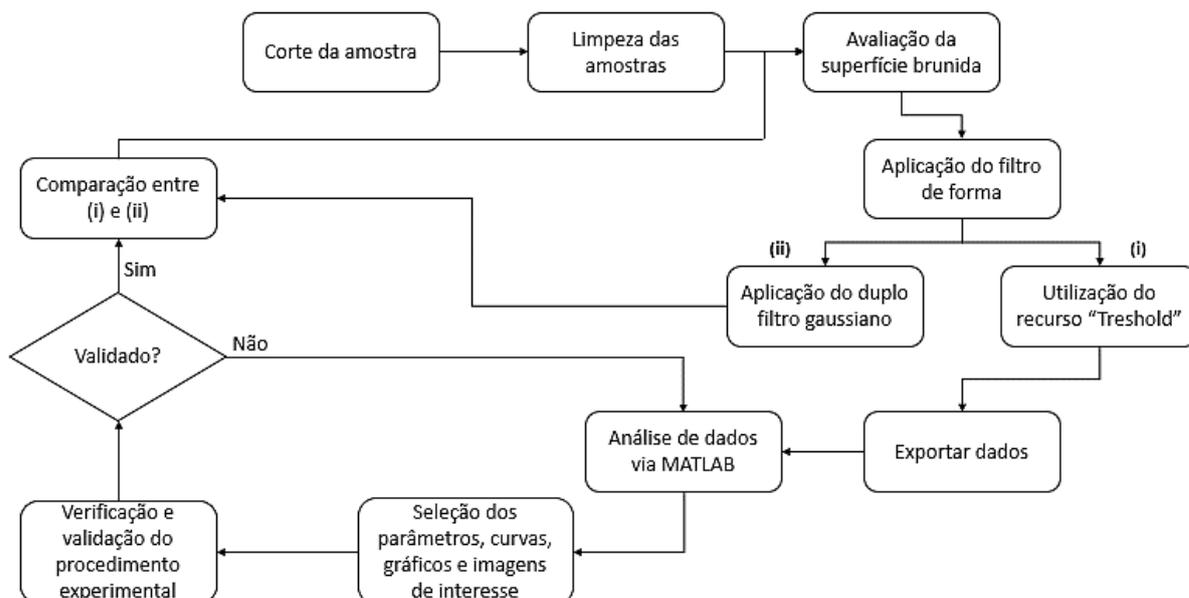


Figura 3.2 – Procedimento experimental

A primeira etapa do procedimento experimental é a realização do corte da amostra piloto, que será utilizada para a verificação e validação do mesmo. Basicamente, as duas amostras analisadas foram cortadas em tiras quadradas, de cota lateral de 25,4mm (Figura 3.3):

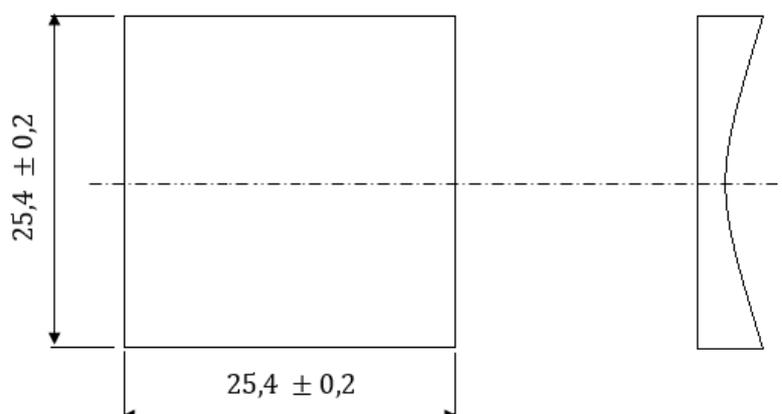


Figura 3.3 – Croqui do corpo de prova da camisa de cilindro após operação de corte

Logo após cortadas, submeteu-se as amostras à limpeza com detergente neutro, comercialmente comum, e então levadas a um banho no ultrassom (10 minutos). Posteriormente, iniciou-se a avaliação das superfícies brunidas no interferômetro, onde se necessita definir um número mínimo de medições, bem como a área de

varredura. Para esse procedimento experimental definiu-se que cada uma das amostras seria avaliada em cinco regiões diferentes, com três medições para cada região, totalizando ao todo quinze avaliações por amostra. Sabe-se que o número de medições adequado deveria ser maior do que o realizado, mas a título de agilidade no procedimento procedeu-se com o número de medições citado anteriormente. Concluída a avaliação da superfície das amostras, com lente objetiva que proporcionou aumento de vinte vezes, necessitou-se da aplicação do filtro de forma cilíndrico (para corrigir o perfil curvado da amostra), do nivelamento da superfície (para atingir coerência quanto ao plano dos pontos medidos) e do preenchimento dos pontos não medidos (por variados motivos e erros/limitações de medições).

Dada a realização das etapas descritas anteriormente, abriram-se duas ramificações do procedimento, ambas sujeitas à exportação dos dados obtidos, que vem atrelada a um Treshold padrão com 0,2% para picos e 99,8% para vales, basicamente para remover ruídos de medição. A primeira técnica, representada por **(i)**, é a em que se utilizou o recurso Treshold (valores limiares para picos), já a segunda, representada por **(ii)**, é dada pela aplicação direta do duplo filtro gaussiano na amostra pós filtro de forma. Findada a execução dessas duas vertentes de análise, obteve-se uma matriz contendo as alturas de asperezas avaliadas.

Para a aplicação dos recortes propostos em **(i)**, Tresholds na curva Abbott-Firestone, os valores de razão de material para picos, S_{r1} , foram utilizados como limites de referência a fim de não se adentrar na porção de núcleo dos platôs brunidos. Realizou-se o corte para os picos de maneira incremental, a fim de que se obtivesse ao limiar dos limites de referência os máximos valores de corte aplicados na porção de picos da curva Abbott-Firestone. O incremento para o recorte dos picos foi fixado em 0,5%.

Já a segunda vertente de análise **(ii)**, baseou-se na aplicação direta do duplo filtro gaussiano na amostra logo após as correções iniciais padrão do procedimento de análise descrito anteriormente. Essa segunda via de análise é tida como fator de comparação futura dos resultados recortados em relação aos recortados a partir da amostragem “pura”.

No MATLAB® executou-se a análise dos dados obtidos nos passos anteriores de (i), a fim de se determinar os parâmetros Kurtosis e Skewness, bem como as novas curvas de distribuição acumulada e razões de material para picos, em cada recorte aplicado. Concluídas as etapas apresentadas anteriormente, necessitou-se do estabelecimento e definição dos parâmetros, curvas, gráficos e imagens de interesse, onde os itens selecionados são apresentados no capítulo de resultados do presente trabalho.

Com todo o procedimento estabelecido, são verificados os níveis de correlação entre a distribuição de alturas das asperezas das amostras e as de uma distribuição gaussiana característica. Para tal, os parâmetros S_{ku} e S_{sk} , quando na distribuição gaussiana, assumem como valores característicos 3 e 0 (Bharat, 2000), respectivamente. Sabe-se também que estes parâmetros possuem valores característicos para o caso de superfícies brunidas, segundo Yu et al. (2004) tipicamente não gaussianas, sendo balizados por $S_{ku} > 4,0$ e $S_{sk} < -1,0$.

3.4 Análise de dados

O tratamento de dados a partir da utilização do software MATLAB® se justifica pela necessidade de manipulação dos dados, pós recortes utilizando o *TalyMap Platinum*, a fim de se obter um recorte na curva Abbott-Firestone que traga uma tendência de comportamento gaussiano para a distribuição de alturas das asperezas das superfícies avaliadas. Para tal, o fluxo em diagrama de blocos (Figura 3.4) apresentados resume essa etapa do desenvolvimento do trabalho:

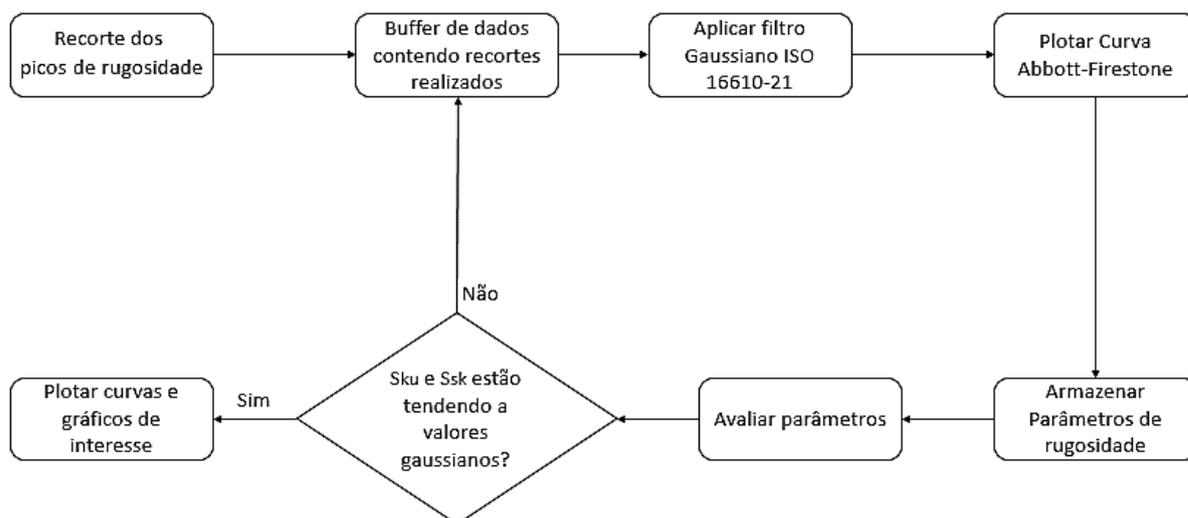


Figura 3.4 – Procedimento para Tratamento de dados.

Com todos os recortes realizados no software *TalyMap Platinum*, criou-se um buffer, estoque, de dados contendo os recortes realizados. Tal buffer apresenta, para cada recorte, por uma matriz com 1024 linhas e 1024 colunas contendo o valor da altura de aspereza ponto a ponto, das cinco regiões avaliadas para cada uma das duas amostras. Posteriormente a leitura do arquivo que contém a matriz, dá-se o arredondamento do valor mensurado da altura da aspereza na casa centesimal do micrômetro, pela razão de que os processos de usinagem dificilmente fabricam peças com acabamento superficiais superiores aos escolhidos no presente trabalho. Aplica-se então o filtro gaussiano simples, de acordo com a norma ISO 16610-21, com o objetivo de comparativo com o duplo filtro gaussiano utilizado no software do interferômetro.

Conta-se então a frequência de aparição dos valores de alturas de asperezas únicos e então armazena-se os mesmos em uma nova matriz, que apresenta em sua primeira coluna valores sem repetição e, na outra, a somatório referente a cada valor singular. Tais dados são utilizados para a construção da curva Abbott-Firestone (o código de programação desenvolvido no software MATLAB® pode ser encontrado no apêndice A).

3.5 Comparativos

Este subcapítulo tem como objetivo apresentar o comparativo que se realizou no presente trabalho, entre amostras com e sem recortes e, entre filtros gaussianos simples e duplos, que pode ser analisado de maneira visual abaixo (Figura 3.5):

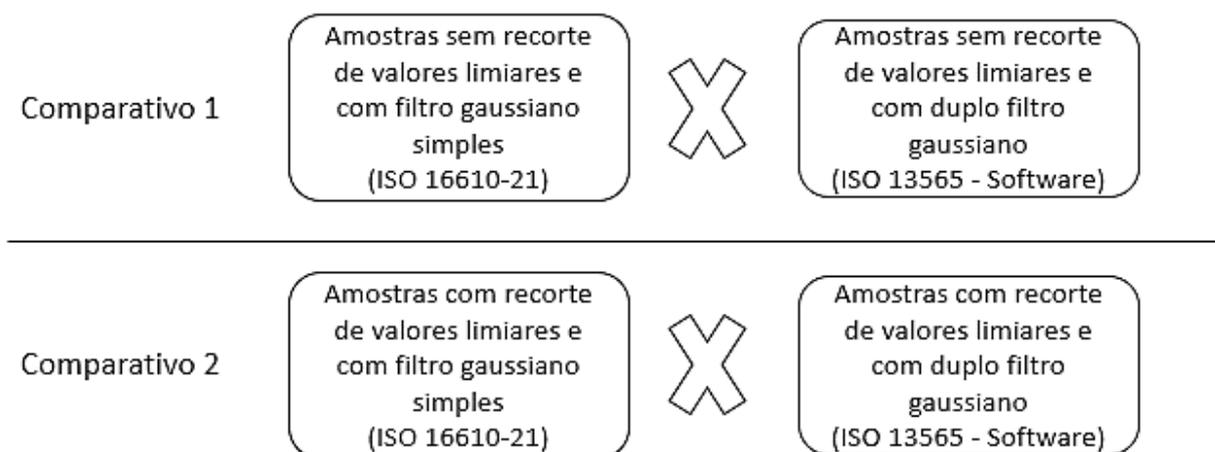


Figura 3.5 - Métodos comparativos aplicados

Onde no comparativo 1 se confronta propriamente os métodos de filtragem, simples e duplo, e, no comparativo 2 se confronta a influência dos recortes de valores limiares somados a aplicação dos filtros gaussianos, simples ou duplo, na distribuição de alturas de asperezas da superfície brunida analisada.

3.5.1 Teste de Hipóteses

A fim de se verificar a inferência de algumas hipóteses tomadas após a análise dos resultados preliminares do presente trabalho aplicou-se a ferramenta estatística chamada teste de hipóteses. Esse procedimento conduz a uma decisão, baseada nas hipóteses, acerca dos parâmetros da amostra de medições realizadas, onde adotou-se 5% de nível de significância. Tal formulação é demonstrada na equação (15):

$$Z_{calc} = \frac{X - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \quad (15)$$

Onde Z_{calc} é o valor a ser comparado com o tabelado para 5% de significância ($Z_{tab} = 1,96$), de forma bilateral, X é o valor da hipótese nula a ser testada, μ é a média

da amostra, σ é o desvio padrão da amostra e n é o número de amostras. A consideração inicial é de que as distribuições que receberam o teste de hipótese se comportam com distribuição normal.

4 RESULTADOS

O escopo desse capítulo é voltado a apresentação dos resultados do presente trabalho. Inicialmente é exposto o resultado obtido em relação a caracterização da textura da superfície brunida. Posteriormente, apresenta-se duas bases referenciais para o presente trabalho, sendo a primeira relacionada a superfície analisada sem qualquer alteração, seja ela de recorte ou filtragem, e a segunda relacionada a aplicação dos recortes a partir dos valores limiares para picos.

Em seguida, expõe-se os resultados para o caso do comparativo 1, onde aplica-se o filtro gaussiano simples e duplo (ISO 16610-21 e ISO 13565-Software TalyMap Platinum, respectivamente) nas superfícies analisadas sem quaisquer alterações. Posteriormente, apresenta-se os resultados para o caso do comparativo 2, onde aplica-se o filtro gaussiano simples e duplo (ISO 16610-21 e ISO 13565-Software TalyMap Platinum, respectivamente) nas superfícies que foram recortadas, Treshold, por meio do método de valores limiares para picos.

4.1 Textura das superfícies brunidas

Superfícies brunidas de camisas de cilindro tem como característica principal a presença de sulcos para retenção de óleo lubrificante, a fim de promover maior lubrificação entre os componentes em contato mecânico, sendo possível observar tal comportamento na representação tridimensional abaixo (Figura 4.1):

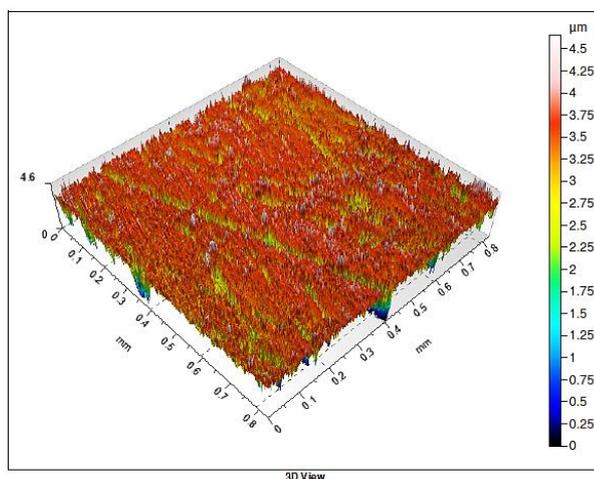


Figura 4.1 – Textura característica de superfície brunida.

Já o padrão de sulcos cruzados e platôs pode ser visualizado na vista superior da superfície, apresentada abaixo (Figura 4.2):

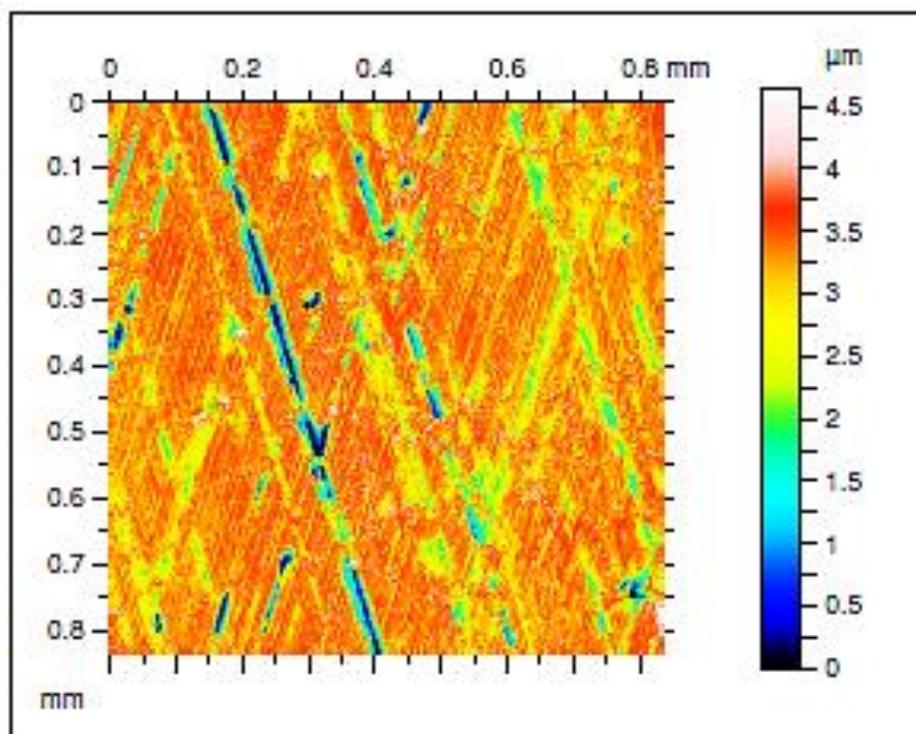


Figura 4.2 – Vista superior característica de superfície brunida.

4.2 Dados referência sem pré-tratamento

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores dos parâmetros de rugosidade das duas amostras analisadas, em cinco regiões diferentes (novamente salienta-se que seriam necessárias mais medições por amostra, mas por questões de disponibilidade realizou-se apenas as quantidades mencionadas na metodologia - tabela completa com valores de incertezas de medição associadas no Apêndice B):

Tabela 4.1 - Parâmetros de rugosidade das amostras analisadas

Amostra	Região	S _{sk}	S _{ku}	S _{pk} (μm)	S _k (μm)	S _{vk} (μm)	Sr1	Sr2
A	1	-1,688	6,897	0,453	0,972	1,238	8,97%	85,60%
	2	-1,211	6,187	0,438	0,960	1,168	9,12%	81,27%
	3	-1,049	4,940	0,399	0,923	0,951	8,85%	83,30%
	4	-1,162	5,879	0,426	0,946	0,968	9,18%	82,27%
	5	-1,059	5,468	0,421	0,939	0,961	8,99%	84,31%
B	6	-1,744	6,941	0,459	0,974	1,224	9,14%	82,29%
	7	-1,256	6,328	0,448	0,964	1,216	9,01%	84,64%
	8	-1,346	6,121	0,432	0,953	1,312	9,20%	85,15%
	9	-1,520	7,119	0,466	0,981	1,248	9,36%	82,61%
	10	-1,289	6,024	0,431	0,951	1,246	9,09%	82,33%

A partir da análise da tabela acima é possível concluir que ocorre variação entre as regiões avaliadas, porém dentro do esperado para superfícies brunidas. Em vermelho estão destacadas as medições que possuem comportamento mais próximo e mais distante, numa abordagem prática de engenharia e não estatística, A3 e B9 respectivamente, da distribuição gaussiana. Tais medições destacadas serão utilizadas na sequência de demonstração de resultados do presente trabalho pois salientam o melhor e pior caso, sem qualquer intervenção, quanto a tendência de distribuição gaussiana. Entretanto, num apanhado geral, observa-se que os valores encontrados para Kurtoses e Skewness, S_{ku} e S_{sk} respectivamente, refletem o comportamento característico de uma superfície brunida, segundo Yu et al. (2004), com valores balizados por $S_{ku} > 4,0$ e $S_{sk} < -1,0$.

Por meio da curva Abbott-Firestone (Figura 4.3) foi possível verificar, em termos de razão de material, que apesar da diferença encontrada entre a região 3 da amostra A e a região 9 da amostra B os parâmetros da série k estão dentro da faixa indicada pela literatura de referência, reforçando a validade das medições das amostras.

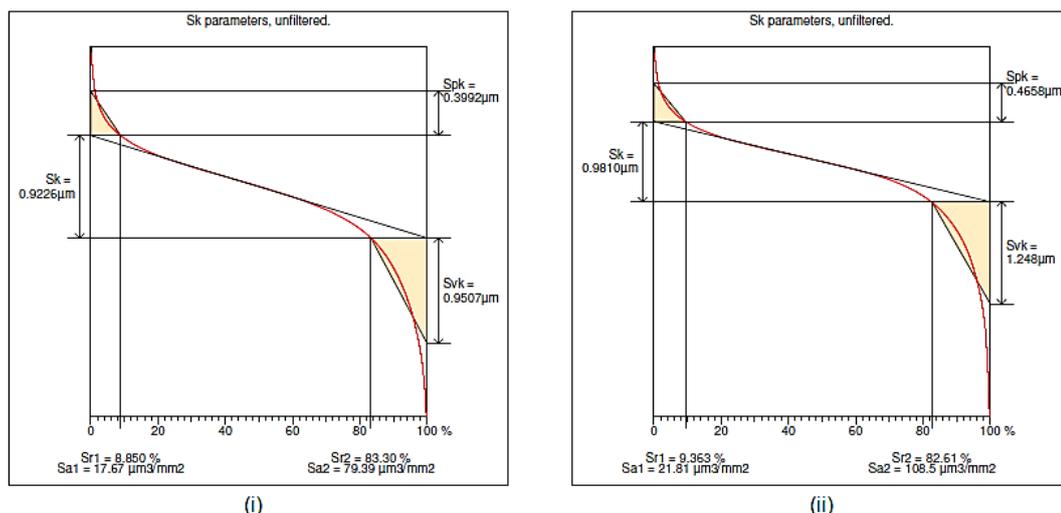


Figura 4.3 - Curva Abbott-Firestone (i) Região 3 da amostra A; (ii) Região 9 da amostra B.

4.3 Dados referência com pré-tratamento

Aplicando o método de recorte descrito na metodologia apenas para o caso do recorte baseado em valores limiares para picos, obteve-se uma região de recorte que ainda não se comporta com distribuição gaussiana, mas que apresenta evolução em tal tendência. Na Tabela 4.2 é possível conferir os resultados do método:

Tabela 4.2 - Resultados do método de recorte para as medições A3 e B9

	A3		B9		
Recorte Pico	Ssk A3	Sku A3	Recorte Pico	Ssk B9	Sku B9
0,20%	-1,049	4,940	0,20%	-1,520	7,119
0,50%	-1,036	4,916	0,50%	-1,511	7,009
1,00%	-1,029	4,874	1,00%	-1,508	6,987
1,50%	-1,034	4,652	1,50%	-1,482	6,721
2,00%	-1,012	4,521	2,00%	-1,462	6,499
2,50%	-1,004	4,311	2,50%	-1,450	6,388
3,00%	-1,001	4,169	3,00%	-1,441	6,201
3,50%	-0,993	3,975	3,50%	-1,434	6,024
4,00%	-0,974	3,812	4,00%	-1,431	5,897
4,50%	-0,961	3,778	4,50%	-1,426	5,644
5,00%	-0,940	3,754	5,00%	-1,422	5,423
5,50%	-0,929	3,725	5,50%	-1,418	5,149
6,00%	-0,939	3,726	6,00%	-1,415	5,094
6,50%	-0,930	3,775	6,50%	-1,438	5,112
7,00%	-0,949	3,821	7,00%	-1,521	5,483
7,50%	-0,958	3,962	7,50%	-1,597	5,821
8,00%	-0,998	4,287	8,00%	-1,618	6,117
8,50%	-1,184	4,449	8,50%	-1,711	6,324
9,00%	-1,229	4,558	9,00%	-1,768	6,574

As linhas em destaque representam a melhor combinação entre os parâmetros Skewness e Kurtosis em função do recorte aplicado. De forma visual (Figuras 4.4 e 4.5) é possível verificar que tal comportamento se dá próximo a região de platô da superfície:

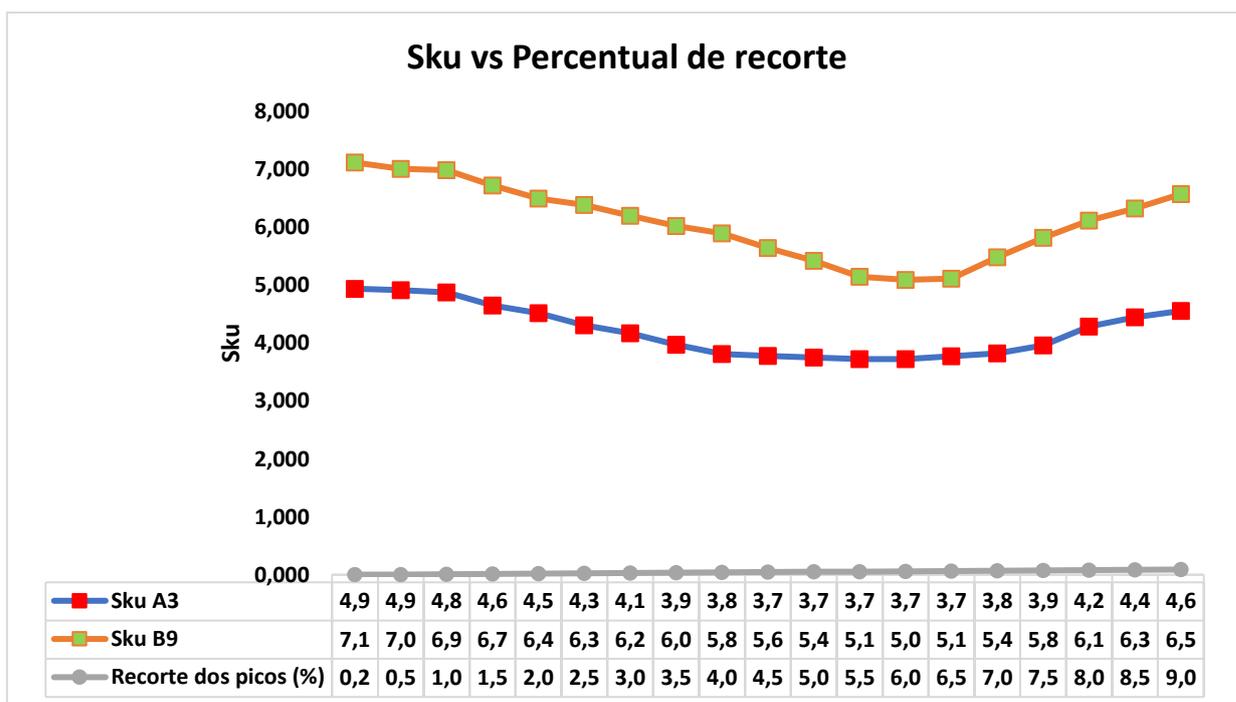


Figura 4.4 – Parâmetro S_{sk} versus Percentual de Recorte

Deste modo, sem uma análise estatística mais detalhada, a região de recorte que demonstrou maior tendência de comportamento gaussiano para o comparativo entre as medições A3 e B9 ficou compreendida entre 5,5 a 6% de material da região dos picos.

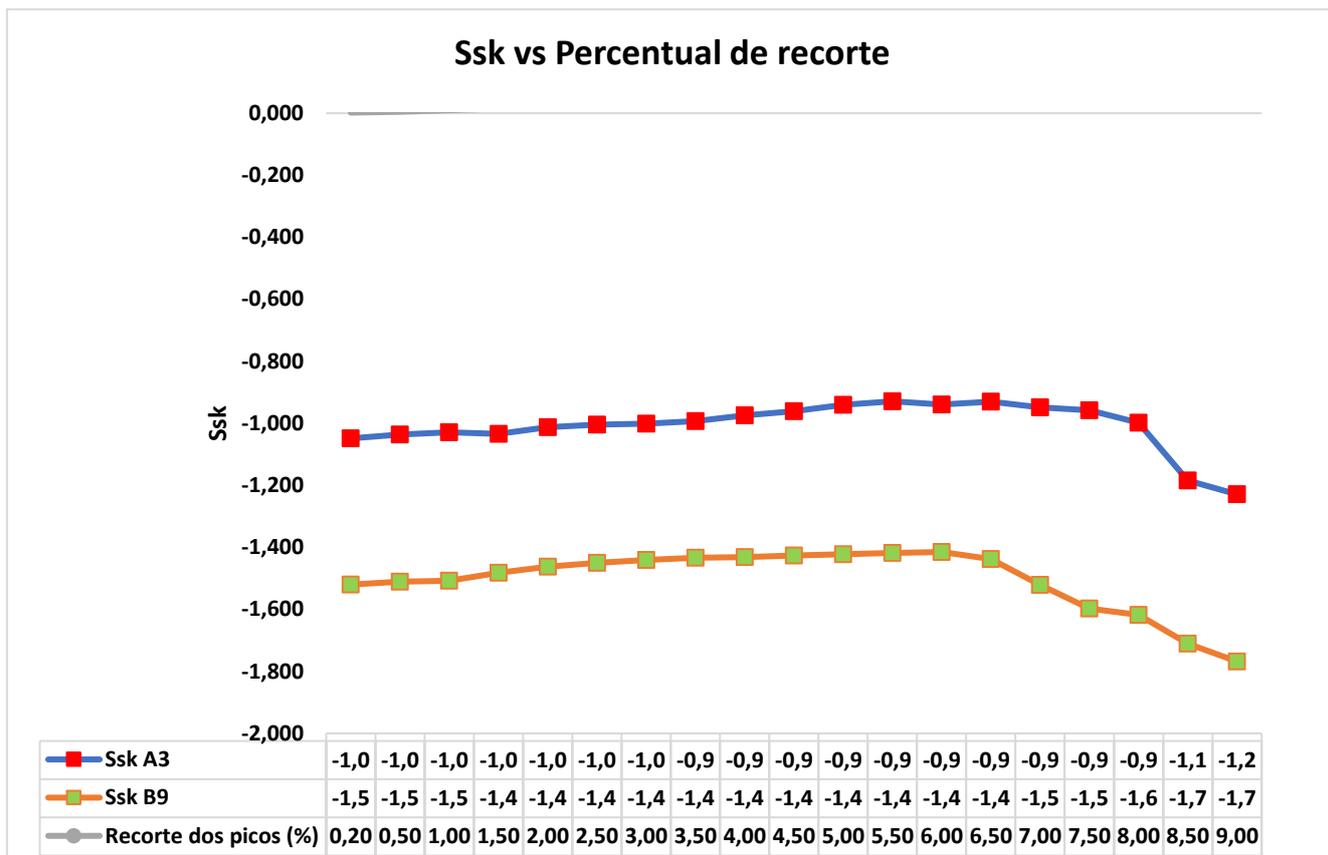


Figura 4.5 - Parâmetro S_{sk} versus Percentual de Recorte

Deste modo, as curvas de distribuição acumulada que representam os recortes encontrados são representadas a seguir (Figura 4.6):

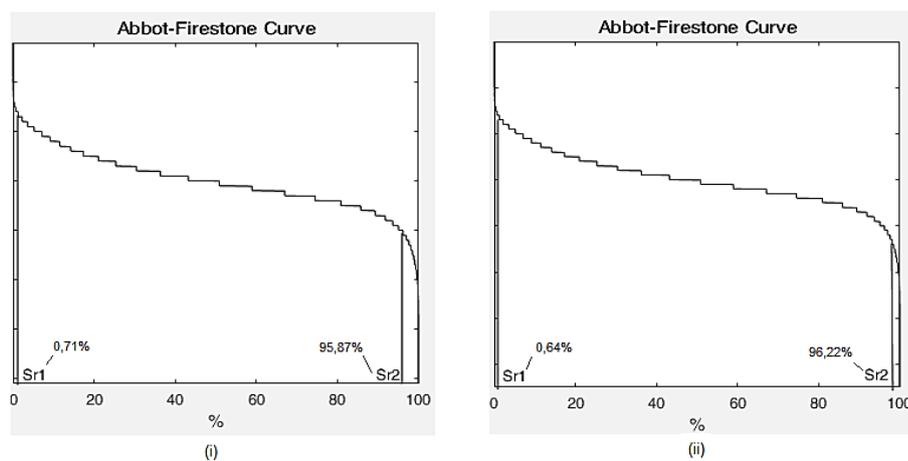


Figura 4.6 - Curva Distribuição Acumulada pós recorte para (i) região 3 da amostra A e (ii) região 9 da amostra B.

A figura acima reforça a ideia de que no limiar da região de platô da superfície obtém-se os melhores valores dos parâmetros Skewness e Kurtosis para caracterizar uma tendência de comportamento de gaussiano para a distribuição de altura de asperezas. Deste modo, essa região poderia ser utilizada para a aplicação dos conhecidos filtros gaussianos, sejam eles simples ou duplos, a fim de verificar o possível benefício, ou não, da aplicação dos mesmos após a realização dos recortes baseados em valores limiares para picos.

4.3.1 Teste de hipótese para o pré-tratamento

Na Tabela 4.3, abaixo, apresentam-se os melhores recortes obtidos, seguindo a mesma metodologia que originou a Tabela 4.2, para cada uma das 10 regiões avaliadas:

Tabela 4.3 - Melhores recortes obtidos para cada região analisada

Região	Recorte Pico
A1	4,50%
A2	6,00%
A3	5,50%
A4	6,50%
A5	5,50%
B6	7,00%
B7	6,00%
B8	5,50%
B9	6,00%
B10	5,00%
Média	5,75%
Moda	6,00%
Desvio Padrão	0,0072

Realizou-se um teste de hipótese, com significância de 5%, para verificar a hipótese de que valores próximos ao da moda dos recortes aplicados sejam representativos para a tendência de distribuição gaussiana das alturas de asperezas. Com isso avaliou-se, como hipótese nula, o intervalo de 5,5% a 6,5% de recortes para picos, com incrementos de décimo percentual, onde os resultados de tal avaliação encontram-se na Tabela 4.4:

Tabela 4.4 - Teste de hipóteses para recorte limiar dos picos

Recorte	Z _{calc}	Z _{tab}	Decisão
5,50%	2,751	1,96	Rejeitar Hipótese Nula
5,60%	2,328	1,96	Rejeitar Hipótese Nula
5,70%	1,904	1,96	Aceitar Hipótese Nula
5,80%	1,481	1,96	Aceitar Hipótese Nula
5,90%	1,058	1,96	Aceitar Hipótese Nula
6,00%	0,635	1,96	Aceitar Hipótese Nula
6,10%	0,212	1,96	Aceitar Hipótese Nula
6,20%	0,212	1,96	Aceitar Hipótese Nula
6,30%	0,635	1,96	Aceitar Hipótese Nula
6,40%	1,058	1,96	Aceitar Hipótese Nula
6,50%	1,481	1,96	Aceitar Hipótese Nula

Observa-se que a faixa de recortes limiares para picos entre 5,8% a 6,5% (excluiu-se 5,7% devido à proximidade do valor tabelado) possui representatividade dentro do nível de significância adotado para tal abordagem.

4.4 Filtro gaussiano ISO 16610-21 vs Duplo filtro gaussiano – Comparativo 1

De acordo com a metodologia proposta, um dos itens a serem realizados era voltado a aplicação do filtro gaussiano ISO 16610-21, via MATLAB® (código disponível no apêndice A), e o duplo filtro gaussiano, via software TalyMap Platinum, para as amostras SEM aplicação do recorte, Treshold, baseado em valores limiares para picos. A seguir, na Tabela 4.5, é possível verificar o efeito da aplicação dos mencionados filtros gaussianos nos parâmetros Skewness e Kurtosis:

Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros Skewness e Kurtosis após aplicação dos filtros gaussianos propostos no Comparativo 1

Região	ISO 16610-21		ISO 13565-1	
	S _{sk}	S _{ku}	S _{sk}	S _{ku}
A1	-0,4312	3,711	-0,4293	3,651
A2	-0,3239	3,459	-0,3219	3,432
A3	-0,2921	3,372	-0,2898	3,329
A4	-0,3102	3,424	-0,3034	3,387
A5	-0,3052	3,431	-0,2995	3,411
B6	-0,3797	3,551	-0,3718	3,536
B7	-0,3186	3,447	-0,3128	3,418
B8	-0,3499	3,534	-0,3455	3,501
B9	-0,4522	3,763	-0,4492	3,734
B10	-0,3428	3,443	-0,3398	3,429
Média	-0,3506	3,5135	-0,3463	3,4828
Mediana	-0,3428	3,4590	-0,3398	3,4320
Desvio Padrão	0,0543	0,1292	0,0549	0,1257

Percebe-se que a superfície brunida sem a aplicação da metodologia dos recortes baseados em valores limiares para picos ainda possui certa divergência em relação ao modelo de distribuição gaussiana, mas com tendência notória de aproximação a distribuição mencionada. Nota-se também que o duplo filtro gaussiano consegue promover um ajuste um pouco mais sensível, porém com pequena diferença, à distribuição gaussiana quando comparado ao filtro gaussiano da ISO 16610-21 na relação estabelecida pelo comparativo 1.

4.4.1 Teste de hipóteses – Comparativo 1

Como teste de hipótese para o comparativo 1, utilizou-se como hipótese nula a média e mediana dos valores encontrados pela ISO 16610-21 na distribuição dada pela aplicação do duplo filtro gaussiano. A metodologia aplicada foi a mesma dos testes de hipóteses anteriores, e seu resultado pode ser visualizado na Tabela 4.6:

Tabela 4.6 – Teste de Hipóteses para Comparativo 1

Hipótese		Z _{calc}	Z _{tab}	Decisão
Média S _{sk} ISO 16610-21	-0,3506	0,248	1,96	Aceitar Hipótese Nula
Média S _{ku} ISO 16610-21	3,5135	0,772	1,96	Aceitar Hipótese Nula

Nota-se que os valores de média dos parâmetros, sem recorte, Kurtosis e Skewness, oriundos da aplicação da ISO 16610-21, são contemplados dentro da distribuição de parâmetros obtidos via duplo filtro gaussiano.

4.5 Filtro gaussiano ISO 16610-21 vs Duplo filtro gaussiano – Comparativo 2

De acordo com a metodologia proposta, um dos itens a serem realizados era voltado a aplicação do filtro gaussiano ISO 16610-21, via MATLAB® (código disponível no apêndice A), e o duplo filtro gaussiano, via software TalyMap Platinum, para as amostras COM aplicação do recorte, Treshold, baseado em valores limiares para picos. A seguir, na Tabela 4.7, é possível verificar o efeito da aplicação dos mencionados filtros gaussianos nos parâmetros Skewness e Kurtosis:

Tabela 4.7 - Valores dos parâmetros Skewness e Kurtosis após aplicação dos filtros gaussianos propostos no Comparativo 2

Região	ISO 16610-21		ISO 13565-1	
	S _{sk}	S _{ku}	S _{sk}	S _{ku}
A1	-0,2224	3,241	-0,2191	3,231
A2	-0,1743	3,223	-0,1706	3,208
A3	-0,1397	3,152	-0,1380	3,124
A4	-0,1609	3,203	-0,1582	3,192
A5	-0,1503	3,209	-0,1488	3,194
B6	-0,2131	3,287	-0,2099	3,266
B7	-0,1630	3,199	-0,1601	3,185
B8	-0,1796	3,234	-0,1772	3,204
B9	-0,2271	3,276	-0,2240	3,248
B10	-0,1561	3,279	-0,1523	3,251
Média	-0,1787	3,230	-0,1758	3,210
Mediana	-0,1687	3,229	-0,1654	3,206
Desvio Padrão	0,0314	0,042	0,0310	0,041

Percebe-se que a superfície brunida com a aplicação da metodologia dos recortes baseados em valores limiares para picos fica com comportamento da distribuição de alturas de asperezas muito próximo ao de uma distribuição gaussiana. Nota-se também que a aplicação dos filtros gaussianos após a aplicação dos recortes,

Treshholds, nos limiares da região dos platôs passa a trazer pouca diferença entre os modelos simples e duplo de filtragem.

4.5.1 Teste de hipóteses – Comparativo 2

Como teste de hipótese para o comparativo 2, utilizou-se como hipótese nula a média e mediana dos valores, previamente recortados, encontrados pela ISO 16610-21 na distribuição dada pela aplicação do duplo filtro gaussiano. A metodologia aplicada foi a mesma dos testes de hipóteses anteriores, e seu resultado pode ser visualizado na Tabela 4.8:

Tabela 4.8 - Teste de Hipóteses para Comparativo 2

Hipótese		 Z_{calc} 	 Z_{tab} 	Decisão
Média S _{sk} ISO 16610-21	-0,1787	0,289	1,96	Aceitar Hipótese Nula
Média S _{ku} ISO 16610-21	3,2303	1,532	1,96	Aceitar Hipótese Nula

Nota-se que os valores de média dos parâmetros Kurtosis e Skewness, oriundos da aplicação da ISO 16610-21 são contemplados dentro da distribuição de parâmetros obtidos via duplo filtro gaussiano.

5 CONCLUSÕES

O escopo de análise do presente trabalho baseou-se na análise do pré-tratamento por meio de recortes limiares, de picos, das amplitudes de asperezas na textura de superfícies brunidas. Tal preocupação teve origem no fato de que o objeto de estudo do trabalho, camisas de cilindro de motor a combustão interna, recebem acabamento superficial pelo processo de brunimento, tipicamente conhecido pelo seu comportamento não gaussiano quanto a distribuição de alturas de asperezas quando analisada toda a porção de material e não apenas os picos, ou os conhecidos *summits*.

Sabe-se que o conjunto camisa de cilindro e anel de pistão trabalha em contato mecânico durante o ciclo de um motor de combustão interna, onde alguns dos modelos matemáticos, tais como o de Greenwood e Williamson por exemplo, descrevem esse contato mecânico com premissa no fato de que as superfícies em atrito devem possuir distribuição gaussiana de alturas de asperezas. Esse fato é verdade para a região dos picos, porém não para toda a distribuição da superfície.

Com o desenvolvimento do pré-tratamento baseado no recorte de valores limiares para picos concluiu-se que existe uma região de maior tendência ao comportamento da distribuição gaussiana. O recorte que propicia tal situação é dado na região limiar dos platôs das superfícies brunidas, entre 5,8% a 6,5% de razão de material para os picos. Ou seja, utilizando da curva Abbott-Firestone para representação da região, para uma superfície brunida a região que possuirá comportamento tendendo a distribuição gaussiana é a porção localizada entre os parâmetros S_{r1} e S_{r2} . Basicamente, isso se explica pelo fato de que a execução dos contínuos recortes até esse determinado ponto acaba por eliminar regiões que geram discordância e assimetria nos parâmetros Skewness e Kurtosis.

Realizando um comparativo entre os valores obtidos para os parâmetros citados acima, tanto para o caso da aplicação dos filtros gaussianos, simples ou duplo, combinados, ou não, com a aplicação do recorte baseado em valores limiares de picos, percebe-se que a metodologia de filtragem suaviza a amplitude das alturas das asperezas de modo que as torna com distribuição muito mais característica a uma gaussiana quando confrontada a técnica do recorte de picos.

Outra conclusão tomada a partir da análise dos resultados do presente trabalho é de que os valores dos parâmetros, sem recortes limiares para picos, Kurtosis e Skewness obtidos com a aplicação do filtro gaussiano simples, ISO 16610-21, podem ser utilizados como alternativos à aplicação do duplo filtro gaussiano. Além disso, quando se realiza o recorte limiar para picos e posteriormente aplica-se os dois tipos de filtros nota-se que ambos possuem intercambialidade, fazendo com que o filtro gaussiano simples, ISO 16610-21, possa ser utilizado como alternativa ao duplo filtro gaussiano.

Durante o avançar do presente trabalho foi possível ainda realizar a construção da curva Abbott-Firestone e de distribuição acumulada das amplitudes de asperezas pré-tratadas bem como a caracterização topográfica da superfície brunida de uma camisa de cilindro de motor a combustão interna.

REFERÊNCIAS

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos**. NBR 8404. Rio de Janeiro, 1984.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Surface engineering**. In: Metals Handbook, vol. 5, p 2535. 1994.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B46.1-1995 **Surface texture (Surface roughness, waves and lay)**. ASME, New York, NY. p. 111. 1995.

ANDRETTA, C. **Brunimento para Recuperação das Camisas de Pistão dos Motores de Combustão Interna**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas: São Paulo, 2001.

AUSCHNER, W.; O'HEARN, J. **Stone super finishing of hard turned surfaces**. Machining Technologic Association SME, v. 8, n. 3, p. 1-05, 1997.

BHARAT, B. Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques. **Modern Tribology Handbook, Two Volume Set**, 2000.

BRODMANN, R.; THURN, G. **Roughness measurement of ground, turned and shot-peened surfaces by the light scattering method**. Wear, v. 109, n. 1-4, p. 1-13, 1986.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 8. ed. New York :John Wiley & Sons, 2007.

CARVALHO, M. V. **Análise do brunimento de cilindro de blocos de motores em ferro fundido de grafita compacta (CGI)**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP, p. 152. 2007.

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

DIN 4760, **“Gestaltabweichungen technischer Oberflächen”**. 1982.

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

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 characterizing three-dimensional surface topography: III - Parameters for characterizing amplitude and some functional properties**. Wear, v.178, p. 29-43, 1994.

DROSSEL, W. G.; HOCHMUTH, C.; SCHNEIDER, R. **An adaptronic system to control shape and surface of liner bores during the honing process**. CIRP Annals - Manufacturing Technology. v. 62, p. 331–334, 2013.

FERREIRA, C. B. E. M.; MAGALHÃES, L. L. **Projeto mecânico de equipamento para brunimento de camisas de cilindro**, Centro Federal de Educação Tecnológica, Rio de Janeiro. 2009.

Freitas, E. D. S. R. **Parâmetros topográficos para avaliação, caracterização e controle tribológicos de superfícies de engenharia** (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). 2006.

GARCIA, M. B. **Características do desgaste de anéis de pistão com diferentes tecnologias de tratamentos superficiais**. Dissertação de M.Sc., Instituto de Pesquisa Energética e Nucleares, São Paulo, SP, Brasil, 2003.

GLAESER, W.A.; **Characterization of Tribological Materials**. Reed. Publishing Inc, USA, p.273, 1993.

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.

GREENWOOD, J. A.; WILLIAMSON, J. B. P. **Contact of nominally flat surfaces**. Proc. Royal Soc. London Ser. A, v.295, 1966.

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.

GUO, Y.; SAOUBI, R. M.; CHANDRASEKAR, S. **Control of deformation levels on machined surfaces**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 60, p. 137-140, 2011a.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**, Ed. Butterworth - Heinemann. Oxford, p. 273. 1992.

ISO, NBR. 4287, 2002. **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade**, 2002.

ISO 16610-21. **Geometrical Product Specifications (GPS)—Filtration—Part 21:Linear profile filters: Gaussian filters**; 2011.

ISO 16610-31. **Geometrical Product Specifications (GPS)—Filtration—Part 31: Robust profile filters: Gaussian regression filters**, 2011.

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.

JUCHEM, H. O., **Honing with diamond and CBN abrasives.** In: DE BEERS. *Ultrahard Materials in Industry – Honing.* Ascot, Bekshire: De Beers Industrial Diamond Division, 1986.

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

KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren – band 4: Schleifen, Honen und Läppen.** 4. Auflage. VDI – Verlag, Düsseldorf, 1989.

LUDEMA, Kenneth C. **Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology.** CRC press, 1996.

MAN, K.W., **Contact mechanics using boundary elements,** Computational Mechanics Publications, 1994.

MATOS JR, R. F. **Análise Topográfica da Superfície de Cilindros de Motores a Combustão Interna.** Dissertação de M.Sc., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2009.

McCOOL, J. I. **Comparison of models for the contact of rough surfaces.** *Wear*, v.107 , 1986.

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.

LLC, **Michigan Metrology Surface Texture Parameters Glossary,** 2014.

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.

MONTANEZ-CALAU L., **Coeficiente de Atrito Estático do Par Aço AISI H13 Temperado e Revenido e Recobrimento de Cromo Duro: Ensaios em Plano Inclinado,** Dissertação, UTFPR, 2011.

MUMMERY, L. **Surface Texture Analysis.** The Handbook. Ed. Hommelwerke GMBH. West Germany, p105. 1992.

OLIVEIRA, Claudinei José. **Avaliação da Influência de Sistemas de Filtragem Aplicados a Topografia de Superfície em Usinagens**. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. 2004.

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.

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.

PERES, R. M. **Caracterização do processo e verificação das grandezas de entrada no brunimento de curso longo do tipo “precidor”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.

PIRATELLI FILHO, Antonio; MECÂNICA, Departamento de Engenharia. **Rugosidade superficial. 3º Seminário de metrologia**, p. 1-41, 2011.

REJOWSKI, Edney Deschauer. **Caracterização e desempenho de um filme de carbono amorfo hidrogenado tipo diamante (a-C: H) dopado com silício, aplicado em camisa de cilindro de motor à combustão interna**. 2012. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

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

SAMPAIO, M. A. B., **Mecânica do contato com o método dos elementos de contorno para modelagem de máquinas tuneladoras**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2009.

SCHIMIDT, M. A., **Brunimento em ferro fundido cinzento utilizando ferramenta tipo bucha com grãos de diamante** Dissertação de mestrado. Florianópolis: UFSC, p. 240. 1999.

STOUT, Ken J. **Development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions**. 2000.

TAYLOR HOBSON BRASIL. **Produtos**. Disponível em: < http://www.taylorhobson.com.br/index.php/c_home/produtos/1/5/147>. Acesso em: 2 nov. 2016.

TAYLOR HOBSON, **The Parameter Tree of Roughness Surface**, apresentação dos parâmetros fornecidos pelo fabricante do equipamento, 2000.

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

TOMANIK, E. E. – **Brunimento de Cilindros – Principais características**. SAE Technical Paper Series. Publicação 921453, São Paulo, 1992.

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

VALE, J. L. **Influência da microestrutura de ferros fundidos na ocorrência de metal dobrado e no comportamento tribológico de superfícies brunidas, 2016**. Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. (No Prelo)

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

WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of Surface and Nanometrology**. London: Institute of Physics Publishing, 1994.

WOS, P.; MICHALSKI, J. **Effect of initial cylinder liner honing surface roughness on aircraft piston engine performances**. *Tribology Letters*. v. 41, p. 555–67, 2011.

YAMAOKA, R. H. F. **Análise das condições de contato entre fios de cabos condutores de energia**. 2014.

YU, N.; POLYCARPOU, A. A. **Extracting Summit Roughness Parameters From Random Gaussian Surfaces Accounting for Asymmetry of the Summit Heights**. *Journal of Tribology*. v. 126 (4), p. 761-766, 2004.

APÊNDICE A – CÓDIGO MATLAB

```

%Treshold e Abbott-Firestone

%Carrega os dados do software
A = importdata('A_(3).txt', '\t');

%Devolve o tamanho da matriz
sz_A = size(A);
linha_A = sz_A(1,1); %número de linhas da matriz A
coluna_A = sz_A(1,2); %número de colunas da matriz A

%Devolve os valores máximos e mínimos de cada coluna da matriz
maximos = max(A);
minimos = min(A);

aux = zeros([linha_A coluna_A]);

for i = 1:1:linha_A;
    for j = 1:1:coluna_A;
        aux(i,j) = roundn(A(i,j),-2);
    end
end

a = unique(aux);
out = [a,histc(aux(:),a)];
C = max(out);
maxx = C(1,1);
maxy = C(1,2);

D = min(out);
minx = D(1,1);
miny = 0;

%Valores máximos e mínimos de interesse
maximo_interesse = max(aux);
minimo_interesse = min(aux)

%Aplicando corte de um por cento do valor máximo de rugosidade
auxCUT = zeros([linha_A 1]);
cut = maximo_interesse*1;
for i = 1:linha_A;
    auxCUT(i,1) = roundn(A(i,3),-1);
    if auxCUT(i,1) > cut
        auxCUT(i,1) = cut;
    end
    i = i + 1;
end
end

```

```

b = unique(auxCUT);
outCUT = [b,histc(auxCUT(:),b)];
Ssk = skewness(auxCUT);
Sku = kurtosis(auxCUT);

%Range dos valores de rugosidade e o intervalo
soma = maximo_interesse - minimo_interesse;
intervalo = 0.1;
n = soma/intervalo;

[outX outY] = size(out)
for countX = 1:1:outX;
    plotX(countX,1) = out(countX,1)
    plotY(countX,1) = out(countX,2)
end

function w = iso16610_21_closed(z, dx, lc)
%Filtro gaussiano ISO 16610-21
%z → profile values [z] = um
%dx → sampling distance in [dx] = mm
% lc → cutoff wavelength in [lc] = mm
% w → filter mean line in [w] = um
alpha = sqrt(log(2)/pi); % filter constant
c = dx/lc/alpha; % constant used to calculate the weights
N = length(z);
Nlc = ceil(lc/dx);
w = zeros(N, 1);
for n = -Nlc:Nlc % periodic weighting function
    index = mod(n, N);
    w(index + 1) = w(index + 1) + c * exp(-pi * (c * n)^2);
end
for n = [-Nlc Nlc] % trapezoidal rule
    index = mod(n, N);
    w(index + 1) = w(index + 1) - c * exp(-pi * (c * n)^2)/2;
end
end
w = real(ifft(fft(z) .* fft(w))); % convolution
Return

%Curva Abbott-Firestone
%function [abbot,adf]=abbot(data_x,data_z);
%x=data_x;
rug=auxCUT;
resolution=1000;

%===Abbott-Firestone===
maxr=max(rug);
minr=min(rug);
dis=length(rug);

```

```

increment=(maxr-minr)/resolution;
abbot=zeros(resolution+1,1);
temp=maxr;
j=1;
while temp>minr
    abbot_y(j)=temp;
    for i=1:dis
        if rug(i)>temp
            abbot(j)=abbot(j)+1;
        end
    end
    j=j+1;
    temp=temp-increment;
end

%Normalizando o vetor Abbott:
for i=1:resolution+1
    abbot(i)=(abbot(i)*100)/max(abbot);
end
subplot(1,2,1)
area(abbot,abbot_y,minr) %plot area
axis([0 100 minr maxr])
xlabel('%')
ylabel('micron m')
title('Abbot-Firestone Curve');

%===Função Probabilidade de Distribuição ===
temp=maxr;
adf=zeros(resolution+1,1);
j=1;
while temp>0
    for i=1:dis
        if rug(i)>temp
            adf(j)=adf(j)+1;
        end
    end
    j=j+1;
    temp=temp-increment;
end;
while temp>minr
    for i=1:dis
        if rug(i)<temp
            adf(j)=adf(j)+1;
        end
    end
    j=j+1;
    temp=temp-increment;
end;
A=sum(adf)*increment; %Area de adf

```

```

%Normalizatio adf
for i=1:resolution+1
    adf_n(i)=adf(i)/A;
end
subplot(1,2,2)
area(adf_n,abbot_y);
axis([0 max(adf_n)+0.1 minr maxr])
ylabel('micron m')
title('Amplitude Distribution Function (ADF)');

%====Algorithm for calculation of Sk parameters
inte=fix((resolution+1)*0.4);
for i=1:fix((resolution+1)*0.6)
    m(i)=(abbot_y(i)-abbot_y(i+inte))/(abbot(i)-
abbot(i+inte));
end
a=find(m==max(m));
c=abbot_y(a(1))-abbot(a(1))*m(a(1)); %y=mx+c
j=1;
for i=1:(resolution+1)
    line(i)=m(a(1))*abbot(i)+c;
end
for i=1:(resolution)
    if or(or(line(i)>abbot_y(i) &
line(i+1)<abbot_y(i+1),line(i)<abbot_y(i) &
line(i+1)>abbot_y(i+1)),line(i)==abbot_y(i))
        mr(j)=abbot(i); rk(j)=abbot_y(j);
        j=j+1;
    end
end
Mr1=min(mr)
Mr2=max(mr)
Rk=max(rk)-abs(min(rk))
clear m;
m=find(abbot==Mr1);
A1=0;
for i=1:m(1)
    A1=A1+(abbot(i+1)-abbot(i))*(abbot_y(i)-abbot_y(m(1)));
end
clear m;
m=find(abbot==Mr2);
A2=0;
for i=m(1):resolution
    A2=A2+(abbot(i+1)-abbot(i))*(abs(abbot_y(i))-
abs(abbot_y(m(1))));
end
Rpk=2*A1/Mr1
Rvk=2*A2/(100-Mr2)

[outCUTX outCUTY] = size(outCUT)

```

```
for countX = 1:1:outCUTX;  
    plotCUTX(countX,1) = outCUT(countX,1)  
    plotCUTY(countX,1) = outCUT(countX,2)  
end
```

```
cftool(plotCUTX,plotCUTY);
```

APÊNDICE B – TABELA 4.1 COMPLETA

Amostra	Região	S _{sk}	S _{ku}	S _{pk}	S _k	S _{vk}	Sr1	Sr2
A	1	-1,688 (±0,284)	6,897 (±2,377)	0,453 (±0,028)	0,972 (±0,019)	1,238 (±0,221)	8,97% (±0,29)	85,60% (±1,34)
	2	-1,211 (±0,182)	6,187 (±2,104)	0,438 (±0,021)	0,960 (±0,015)	1,168 (±0,189)	9,12% (±0,24)	81,27% (±1,49)
	3	-1,049 (±0,127)	4,940 (±1,237)	0,399 (±0,014)	0,923 (±0,011)	0,951 (±0,042)	8,85% (±0,19)	83,30% (±0,82)
	4	-1,162 (±0,149)	5,879 (±1,682)	0,426 (±0,019)	0,946 (±0,014)	0,968 (±0,174)	9,18% (±0,21)	82,27% (±1,11)
	5	-1,059 (±0,163)	5,468 (±1,336)	0,421 (±0,017)	0,939 (±0,012)	0,961 (±0,089)	8,99% (±0,23)	84,31% (±0,81)
B	6	-1,744 (±0,251)	6,941 (±2,291)	0,459 (±0,023)	0,974 (±0,018)	1,224 (±0,097)	9,14% (±0,31)	82,29% (±1,06)
	7	-1,256 (±0,189)	6,328 (±1,897)	0,448 (±0,022)	0,964 (±0,014)	1,216 (±0,125)	9,01% (±0,34)	84,64% (±1,26)
	8	-1,346 (±0,197)	6,121 (±1,994)	0,432 (±0,025)	0,953 (±0,015)	1,312 (±0,146)	9,20% (±0,30)	85,15% (±1,87)
	9	-1,520 (±0,258)	7,119 (±2,434)	0,466 (±0,027)	0,981 (±0,021)	1,248 (±0,261)	9,36% (±0,45)	82,61% (±2,11)
	10	-1,289 (±0,203)	6,024 (±1,451)	0,431 (±0,021)	0,951 (±0,014)	1,246 (±0,161)	9,09% (±0,28)	82,33% (±1,18)

