



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

DÁVILA MOREIRA LOPES SILVA

**PROCESSO DE BRUNIMENTO EM CAMISAS DE CILINDRO DE MOTORES DE
COMBUSTÃO INTERNA: UMA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE
AVANÇO NO ACABAMENTO SUPERFICIAL**

FORTALEZA

2017

DÁVILA MOREIRA LOPES SILVA

PROCESSO DE BRUNIMENTO EM CAMISAS DE CILINDRO DE MOTORES DE
COMBUSTÃO INTERNA: UMA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE
AVANÇO NO ACABAMENTO SUPERFICIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheiro
Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S579p Silva, Dávila Moreira Lopes.

Processo de brunimento em camisas de cilindro de motores de combustão interna: uma análise da influência da velocidade de avanço no acabamento superficial / Dávila Moreira Lopes Silva. – 2017. 82 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2017.

Orientação: Profa. Dra. Francisco Elicivaldo Lima.

1. Retífica de motor. 2. Brunimento. 3. Rugosidade superficial. 4. Ângulo de cruzamento. I. Título.
CDD 620.1

DÁVILA MOREIRA LOPES SILVA

PROCESSO DE BRUNIMENTO EM CAMISAS DE CILINDRO DE MOTORES DE
COMBUSTÃO INTERNA: UMA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE
AVANÇO NO ACABAMENTO SUPERFICIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheiro
Mecânico.

Aprovada em: ___ / ___ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luiz Soares Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto da contribuição direta e indireta de diversas pessoas que serviram de suporte para minha construção pessoal e profissional ao longo deste curso de graduação. A todos envolvidos neste processo, meu agradecimento será apresentado.

Aos meus pais, Carmen Isaías e Valdir Lopes, por sempre me incentivarem, com valentia e amor, ao longo de minha vida. Meu profundo agradecimento por acreditarem em meus sonhos e por sempre me ajudarem, com caráter e verdade, a superar os obstáculos ao longo deste caminho.

Aos meus irmãos, Levi Lopes e Davi Lopes, por serem inspirações e por servirem de alicerce em minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Francisco Lima, por ser um profissional excelente, dedicado e inspirador, que não mediu esforços para que este trabalho acontecesse da melhor maneira possível.

Ao meu namorado, Higor Ximenes, por sempre me apoiar e por me incentivar.

Aos meus amigos e amigas, principalmente Thaís Lopes, Rafael Vasconcelos, Felipe Martins e Hiago Maciel, por tornarem a graduação um ambiente de muita cumplicidade e diversão.

Aos colegas do Programa de Aprendizagem Cooperativa, representado pelo querido Hermany Viana, por terem me proporcionado experiências de grande crescimento pessoal.

Ao empresário, Marco Paulo, por disponibilizar insumos e as dependências da Retifica Central para que o estudo acontecesse.

Ao professor Luiz Soares Júnior, por disponibilizar o LAMETRO para que procedimentos importantes deste estudo pudessem ser realizados.

Ao colega, Crisanto Augusto, por ter me ajudado a realizar medições importantes.

“Cada pessoa deve trabalhar para o seu
aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo,
participar da responsabilidade coletiva por
toda humanidade”
(Marie Curie)

RESUMO

Um segmento importante da cadeia automotiva é o da remanufatura de motores, que, normalmente, é realizada por empresas prestadoras de serviços, popularmente nomeadas como “retíficas de motores”. Nestas empresas, os diferentes componentes do motor passam por procedimentos para recondicionar as suas características de funcionamento. As camisas dos cilindros são componentes importantes nos motores de combustão interna, uma vez que, junto aos pistões, delimitam a câmara de combustão. O reparo destas camisas acontece por meio de um processo de usinagem denominado brunimento. Procedimento capaz de promover boa exatidão dimensional, boa qualidade superficial e boa exatidão geométrica. Características determinantes, já que o bom acabamento superficial das camisas contribui para a redução do consumo de combustível, por meio, principalmente, da diminuição das perdas por atrito. Logo, destaca-se a importância de se prover uma pesquisa neste âmbito cujo o objetivo principal seja fazer uma investigação do acabamento superficial gerado pelo processo de brunimento realizado por uma empresa que atua na prestação de serviços de recondicionamento de motores localizada na cidade de Fortaleza, por meio da avaliação da rugosidade superficial e dos ângulos de cruzamento resultantes do processo de brunimento nas quatro camisas de um bloco de motor de combustão interna. Neste estudo, cada uma das camisas foi brunida com diferentes velocidades de avanço. Os valores dos parâmetros de rugosidade e dos ângulos de cruzamento encontrados para as diferentes velocidades de avanço estudadas foram comparados a valores disponibilizados em estudos similares. Os resultados de rugosidade obtidos possuíam valores dentro do intervalo aconselhado apenas para as duas menores velocidades de estudo, já para os cilindros usinados nas duas maiores velocidades de estudo, os valores de rugosidade superaram o intervalo. Enquanto os ângulos de cruzamentos estiveram todos abaixo do intervalo aconselhado para todas as velocidades avaliadas, sugerindo que as velocidades de avanço estavam baixas para o processo. Concluindo-se que o brunimento estudado possui não conformidades, notando-se, portanto, a necessidade de se realizar alterações em determinadas grandezas de processo para que o procedimento atinja melhores resultados. Sugerindo que estas alterações possam ser menos dispendiosas, como a mudança apenas do abrasivo, ou mais dispendiosas, como a mudança para uma máquina de brunir de rotação variável que permita melhorar ainda mais o processo, tornando-o mais flexível.

Palavras-chave: Retífica de motor. Brunimento. Rugosidade superficial. Ângulo de cruzamento.

ABSTRACT

An important part of the automotive productive chain is the engine's remanufacturing, which is usually carried by service companies, more commonly known as the "engine rebuilding". In these companies, the different engine components undergo procedures to recondition their operating characteristics. The cylinder liners are important components in internal combustion engines, once they delimit the combustion chamber along the pistons. The repair of these cylinder liners happens through a machining process called honing. A procedure capable of promoting good dimensional and geometric accuracy, as well as good surface quality. Determinant characteristics, since the good superficial finish of the cylinder liners contributes to the fuel consumption reduction, mainly by the reduction of the losses by friction. Therefore, it is of importance to provide a research in this field whose main goal is to make an investigation of the superficial finish generated by the honing process carried out by a company that provides services of engine's rebuilt located in the city of Fortaleza, through superficial roughness evaluation and crossing angles formed by the honing process on the four cylinder liners of an internal combustion engine. In this study, each one of the cylinder liners was burnished with different feed rates. The crossing angles and roughness parameters values found for the different feed rates studied were compared to standardized values of automakers. The roughness results have values within the recommended range only for the two lower studied speeds, whereas for the cylinder liners machined at the two top studied speeds, the roughness rates exceed the range. While the crossing angles were all below the recommended range for the evaluated speeds, suggesting that the feed rates were low for the process. It is concluded that the studied honing process has no conformities and therefore is necessary to make changes in some process qualities so the procedure reach better results. Suggesting that these changes can be less costly, such as the change of only the abrasive, or more costly, such as the change to a variable rotation honing machine to make the process even better and more flexible.

Keywords: Engine rebuilding. Honing process. Superficial roughness. Crossing angle.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Disposição das válvulas de admissão e escape no cabeçote	19
Figura 2	– Eixo Comando de Válvulas	19
Figura 3	– Pistão, biela e anéis de seguimento e castilho	21
Figura 4	– Virabrequim com localização de moentes e de munhões	21
Figura 5	– Localização do volante no virabrequim	22
Figura 6	– Mancais	22
Figura 7	– Bloco do motor	23
Figura 8	– Cabeçote de um motor de 4 cilindros	23
Figura 9	– Cárter de um motor Chevrolet Chevette	24
Figura 10	– Tipos de camisas resfriadas a água	25
Figura 11	– Camisa aletada	26
Figura 12	– Caracterização do brunimento	29
Figura 13	– Desvios corrigidos pelo brunimento	29
Figura 14	– Remoção de material no brunimento	30
Figura 15	– Perfis de penetração do grão abrasivo	30
Figura 16	– Formas de cavaco	31
Figura 17	– Grandezas do processo de brunimento	33
Figura 18	– Brunidora horizontal	34
Figura 19	– Brunidora vertical	34
Figura 20	– Ferramenta de pedra de brunimento única	36
Figura 21	– Ferramenta pedra única e barras de guia	36
Figura 22	– Ferramenta de múltiplas pedras de brunimento	37
Figura 23	– Tipos de buchas em ferramentas de casca	37
Figura 24	– Ferramenta maciça	38
Figura 25	– Ferramenta "precidor" e suas principais porções	39
Figura 26	– Expansão por acionamento mecânico	39
Figura 27	– Expansão por acionamento hidráulico	40
Figura 28	– Quadro de classificação de granulometria	41
Figura 29	– Velocidades no brunimento	42
Figura 30	– Componentes de força no processo de brunimento	45
Figura 31	– Perfil primário com distinção de ondulação e rugosidade	47

Figura 32 – Características de transmissão dos perfis de rugosidade e de ondulação...	47
Figura 33 – Representação da área e da linha média	48
Figura 34 – Conceitos de percursos durante o processo de medição de rugosidade ...	49
Figura 35 – Rugosidade média	50
Figura 36 – Desvio médio quadrático	51
Figura 37 – Altura máxima do perfil	51
Figura 38 – Tabela de comprimento de amostragem limite (<i>cut-off</i>) para o filtro λ_c ...	52
Figura 39 – Motor estudado após o processo de brunimento	53
Figura 40 – Brunidora vertical Chinelatto BH – 200	54
Figura 41 – Ferramenta de brunimento de múltiplas pedras	55
Figura 42 – Modelo de pedra abrasiva utilizada	56
Figura 43 – Operador manipulando a mangueira do fluido de brunimento	56
Figura 44 – Brunimento em cada cilindro numerado	57
Figura 45 – Rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201	58
Figura 46 – Ilustração da camisa do cilindro mostrando os planos de medição	59
Figura 47 – Ilustração dos pontos de medição em um plano de medição	60
Figura 48 – Posicionamento inicial do bloco	60
Figura 49 – Medição do ângulo de cruzamento para 17,6 cursos por minuto.....	61
Figura 50 – Superfície gerada com velocidade de avanço de 11 cursos por minuto ...	66
Figura 51 – Superfície gerada com velocidade de avanço de 13,2 cursos por minuto..	67
Figura 52 – Superfície gerada com velocidade de avanço de 15,4 cursos por minuto..	68
Figura 53 – Superfície gerada com velocidade de avanço de 17,6 cursos por minuto..	69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – R_a (μm) em diferentes velocidades de avanços (curso por minuto)	63
Gráfico 2 – R_z (μm) em diferentes velocidades de avanços (curso por minuto)	64
Gráfico 3 – R_q (μm) em diferentes velocidades de avanços (curso por minuto)	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Propriedades técnicas da brunidora BH-200	54
Tabela 2	– Relação entre as escalas de velocidades utilizadas em cada cilindro	57
Tabela 3	– Rugosidade para velocidade de avanço de 11 cursos por minuto	62
Tabela 4	– Rugosidade para velocidade de avanço de 13,2 cursos por minuto	62
Tabela 5	– Rugosidade para velocidade de avanço de 15,4 cursos por minuto	62
Tabela 6	– Rugosidade para velocidade de avanço de 17,6 cursos por minuto	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
CBN	Nitrato Cúbico de Boro
CONAREM	Conselho Nacional de Retificas de Motores
DIN	Instituto Alemão para Normatização
ISO	Organização Internacional para Padronização
LAMETRO	Laboratório de Metrologia Mecânica
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
SiC	Carbeto de Silício
SLD	Superfícies de Deslizamento Lubrificadas
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

V_c	Velocidade de corte
V_u	Velocidade tangencial
V_a	Velocidade de avanço
α	Ângulo de cruzamento
d_c	Diâmetro interno do cilindro
n	Rotação
f	Avanço
F	Força resultante
F_{ca}	Força componente axial
F_{ct}	Força componente tangencial
F_{cn}	Força componente normal
F_c	Força de corte
R_a	Rugosidade média ou desvio médio do perfil axial
R_z	Altura máxima do perfil
R_q	Desvio médio quadrático
λ_s	Filtro de perfil entre rugosidade e ondas menores
λ_c	Filtro de perfil entre rugosidade e ondulações
λ_f	Filtro de perfil entre ondulações e ondas maiores
A	Área total
A_1	Primeira área acima da linha média
A_2	Segunda área acima da linha média
A_3	Área abaixo da linha média
L	Comprimento de referência
L_v	Percurso inicial
L_m	Percurso de medição
L_n	Percurso final
L_t	Percurso do apalpamento
L_e	Comprimento de amostragem
Z_p	Altura máxima dos picos
Z_v	Profundidade maior dos vales

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	17
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Motores de combustão interna	18
2.2	Componentes dos motores	18
<i>2.2.1</i>	<i>Componentes móveis</i>	18
<i>2.2.1.1</i>	<i>Válvulas</i>	18
<i>2.2.1.2</i>	<i>Eixo do comando de válvulas</i>	19
<i>2.2.1.3</i>	<i>Pistão</i>	20
<i>2.2.1.4</i>	<i>Anéis de segmento</i>	20
<i>2.2.1.5</i>	<i>Bielas</i>	20
<i>2.2.1.6</i>	<i>Brozinas ou castilhos</i>	20
<i>2.2.1.7</i>	<i>Virabrequim</i>	21
<i>2.2.1.8</i>	<i>Volante</i>	22
<i>2.2.1.9</i>	<i>Mancais</i>	22
<i>2.2.2</i>	<i>Componentes fixos</i>	23
<i>2.2.2.1</i>	<i>Bloco do motor</i>	23
<i>2.2.2.2</i>	<i>Cabeçote</i>	23
<i>2.2.2.3</i>	<i>Cárter</i>	24
2.3	Camisas de cilindro	24
<i>2.3.1</i>	<i>Camisas resfriadas a água</i>	25
<i>2.3.1.1</i>	<i>Camisas integradas</i>	25
<i>2.3.1.2</i>	<i>Camisas secas</i>	25
<i>2.3.1.3</i>	<i>Camisas úmidas</i>	26
<i>2.3.2</i>	<i>Camisas resfriadas a ar</i>	26
<i>2.3.3</i>	<i>Problemas em camisas de cilindro</i>	27
2.4	Brunimento	27
<i>2.4.1</i>	<i>Apanhado histórico</i>	27
<i>2.4.2</i>	<i>Características do brunimento</i>	28

2.4.3	Usinagem com ferramentas de geometria não-definida	30
2.4.4	Principais tipos de brunimento	31
2.4.4.1	<i>Brunimento de curso longo</i>	31
2.4.4.2	<i>Brunimento de curso curto</i>	32
2.4.5	Grandezas de entrada	32
2.4.5.1	<i>Configurações das máquinas de brunimento</i>	33
2.4.5.2	<i>Geometria da peça</i>	35
2.4.5.3	<i>Ferramentas de brunimento</i>	35
2.4.5.3.1	Ferramentas de pedra de brunimento única.....	35
2.4.5.3.2	Ferramentas de múltiplas pedras de brunimento	36
2.4.5.3.3	Ferramentas de casca	37
2.4.5.3.4	Ferramentas maciças	37
2.4.5.3.5	Ferramenta “ <i>Precidor</i> ”	38
2.4.5.3.6	Expansão da ferramenta	39
2.4.5.4	<i>Abrasivos</i>	40
2.4.5.5	<i>Fluidos de corte do brunimento</i>	41
2.4.5.6	<i>Cinemática do processo de brunimento</i>	42
2.4.5.7	<i>Ângulo de cruzamento</i>	44
2.4.5.8	<i>Força e pressão de contato do brunimento</i>	44
2.4.6	Superfícies geradas pelo brunimento	45
2.4.6.1	<i>Superfícies de deslizamento</i>	45
2.4.6.2	<i>Análise de uma superfície usinada</i>	46
2.5	Rugosidade superficial	46
2.5.1	Medição de rugosidade superficial pelo método da linha média	48
2.5.2	Percursos no processo de medição da rugosidade	48
2.5.3	Parâmetro de avaliação de rugosidade	50
2.5.3.1	<i>Rugosidade Média ou desvio médio do perfil avaliado (R_a)</i>	50
2.5.3.2	<i>Desvio médio quadrático (R_q)</i>	50
2.5.3.3	<i>Altura máxima do perfil (R_z)</i>	51
2.5.3.4	<i>Seleção de cut-off</i>	51
3	MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1	Motor de combustão interna	53
3.2	Camisas dos cilindros	53

3.3	Máquina brunidora	53
3.4	Ferramenta de brunimento.....	55
3.5	Abrasivo	55
3.6	Fluido de brunimento	56
3.7	Procedimento de brunimento	57
3.8	Análise de rugosidade	58
3.8.1	<i>Rugosímetro</i>	58
3.8.2	<i>Escolha do cut-off</i>	58
3.8.3	<i>Procedimentos para obtenção da rugosidade</i>	59
3.8.4	<i>Procedimentos para obtenção do ângulo de cruzamento</i>	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1	Rugosidade nos planos de estudo	62
4.2	Rugosidades e as velocidades de avanço	63
4.3	Ângulos de cruzamento e as velocidades de avanço	65
4.4	Análise das não conformidades e alternativas de melhoria	70
5	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	ANEXO 1	78
	ANEXO 2	79
	ANEXO 3	80
	ANEXO 4	81

1 INTRODUÇÃO

A remanufatura de motores é um procedimento automotivo, normalmente, realizado por empresas prestadoras de serviço, popularmente, chamadas de “retíficas de motores”. O objetivo deste segmento de remanufatura é o de possibilitar a reutilização de peças e componentes, diminuindo a quantidade de recursos utilizados e diminuindo o resíduo industrial gerado (SHERWOOD; SHU, 2000). Logo, a presença de empresas desse setor contribui para a melhoria do meio ambiente, questão essa que atualmente possui considerável destaque no cenário de pesquisas mundial.

No Brasil, estima-se que existam mais de 2000 empresas prestadoras de serviços de remanufatura de motores (ANDRETTA, 2001). Onde os princípios gerais para realização de uma retífica completa em motores de combustão interna são padronizados pela ABNT NBR 13032:2009, em que todos os processos, que cada componente deve passar, são descritos. Porém, é importante destacar que uma parcela majoritária dessas empresas não segue de maneira adequada o proposto pela norma apresentada, muitas vezes, sem saber a influência, que esses procedimentos não regulamentados, pode gerar na qualidade dos serviços prestados.

Um dos principais conjuntos tribológicos nos motores de combustão interna, que precisam ser regularmente inspecionados, é o formado pelo pistão e camisa do cilindro. Este conjunto tem considerável importância devido ser ele responsável por 45% das perdas por atrito do motor em carros comuns de passeio (HOLMBERG, 2011). As camisas dos cilindros sofrem desgaste no decorrer do funcionamento do motor e necessitam, por conseguinte, ser regularmente inspecionadas. O processo normalmente adotado para o recondicionamento é a usinagem por brunimento. Pesquisas científicas acerca do processo de brunimento têm crescido nos últimos dezesseis anos. Devido, principalmente, a considerável influência que o acabamento superficial da camisa do cilindro exerce na redução do consumo de combustível, mantendo as emissões de gases baixas.

Desta maneira, considerando que a remanufatura de motores tem significativa importância ambiental, que a qualidade da maioria dos serviços nas “retíficas de motores” não é controlada e que o acabamento do processo de brunimento tem uma relevante influência no consumo de combustíveis pelos automóveis, destaca-se a importância de se prover uma pesquisa neste âmbito cujo o objetivo principal seja fazer uma investigação na superfície gerada pelo processo de brunimento. Este estudo foi realizado por uma retífica afiliada ao CONAREM (Conselho Nacional de Retíficas de Motores), chamada Retífica Central, localizada na cidade

de Fortaleza, estado do Ceará. Por meio, principalmente, da análise da rugosidade superficial e do ângulo de cruzamento das camisas.

O presente trabalho foi organizado em cinco partes textuais, em que a primeira parte denominada Introdução, contextualiza e problematiza o tema abordado, justifica a importância da pesquisa bem como os seus objetivos. A segunda parte, denominada Revisão Bibliográfica, apresenta a fundamentação teórica em que o artigo vai se orientar, tais com os principais conceitos acerca dos motores de combustão interna, do brunimento e da rugosidade superficial. Mostrando como estes conceitos interagem, corroborando, assim, para o melhor embasamento da pesquisa. Na terceira parte, denominada Materiais e Métodos, são apresentados os procedimentos utilizados na pesquisa, assim como os materiais utilizados. Já na penúltima parte, denominada Resultados e Discussão, são expostos e analisados os resultados obtidos, além de se discutir possíveis melhorias para o processo analisado. Já na última parte, chamada de Conclusão, a pesquisa foi concluída.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Averiguar a influência da velocidade de avanço na qualidade superficial de camisas de cilindro usinadas pelo processo de brunimento.

1.1.2 Objetivos específicos

Os principais objetivos específicos são:

- a) avaliar a rugosidade das camisas de cilindro do motor de combustão interna em diferentes planos de estudo;
- b) averiguar a influência das diferentes velocidades de avanço na rugosidade das camisas dos cilindros;
- c) analisar a influência das diferentes velocidades de avanço no ângulo de cruzamento das ranhuras nas camisas dos cilindros;
- d) comparar as grandezas do processo com valores disponíveis em estudos similares.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna são máquinas térmicas capazes de transformar energia proveniente de uma reação química em energia mecânica (HAICAL, 2009). Nesses motores, o combustível e o ar necessário a combustão, misturam-se, efetuando a queima no interior do próprio motor. Após a queima, a liberação de energia calorífica eleva a temperatura da mistura, fazendo com que os gases se expandam, assim, realizem trabalho. Estes motores possuem inúmeras utilizações, das quais uma das mais importante é ser fonte de potência para locomoção de veículos.

2.2 Componentes dos motores

São denominados componentes as partes auxiliares que trabalham em conjunto para o funcionamento do motor. Os principais componentes ou partes fundamentais são responsáveis pelo fornecimento das condições favoráveis para que o processo de transformação da energia química dos combustíveis nos motores se realize de forma eficiente e contínua (MAHLE, 2007). Os principais componentes de um motor de combustão interna se dividem em dois grupos, os componentes móveis: válvulas, eixo do comando de válvulas, pistão, anéis de segmento, biela, virabrequim, bronzinas, volante e mancais; e os componentes fixos compostos pelos seguintes elementos: bloco do motor, cabeçote, cárter e as camisas dos cilindros. Os fixos são os que não se movimentam quando o motor se encontra em funcionamento, enquanto que os móveis são aqueles que se movimentam nessa mesma situação.

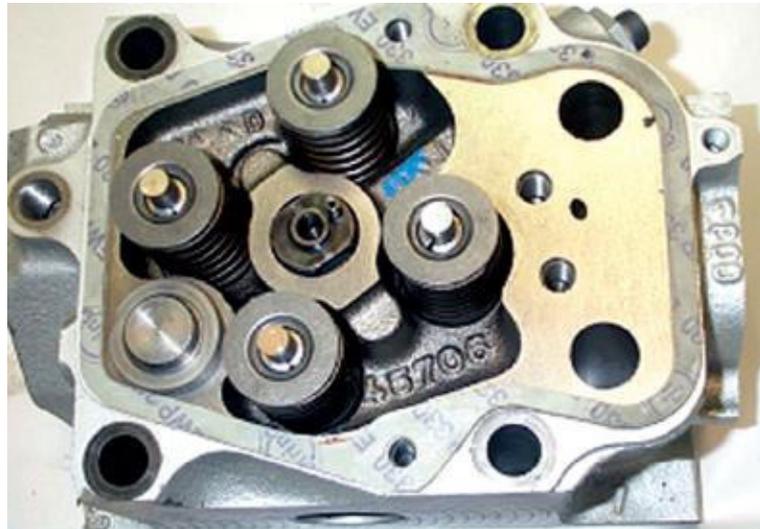
2.2.1 Componentes móveis

2.2.1.1 Válvulas

Válvulas são dispositivos mecânicos desenvolvidos para direcionar, ativar, parar, misturar ou regular o escoamento, pressão ou temperatura de um determinado fluido. (PINHO, 2009). Nos motores de combustão interna, as válvulas principais são as válvulas de admissão e as válvulas de escape. A primeira abre-se para permitir a entrada da mistura combustível/ar (ou

ar puro, conforme o caso) no interior dos cilindros. A outra, de escape, abre-se para dar saída aos gases queimados na combustão.

Figura 1 – Disposição das válvulas de admissão e escape no cabeçote



Fonte: Mercedes Benz do Brasil (2006)

2.2.1.2 Eixo do comando de válvulas

A função desse eixo é abrir corretamente as válvulas de admissão e escape por meio do seu acionamento realizado pelo eixo de manivelas através de engrenagens, de corrente ou de correia dentada.

Figura 2 – Eixo Comando de Válvulas



Fonte: Volkswagen (2007).

2.2.1.3 Pistão

É o componente responsável por transmitir e ampliar a energia resultante da expansão dos gases após a combustão, transmitindo-a a biela, por intermédio de um pino de aço (pino do pistão). O pistão é feito, normalmente, de ligas de alumínio e tem um formato aproximadamente cilíndrico. É no pistão que se encontram dois tipos de anéis: anéis de vedação e anéis de lubrificação.

2.2.1.4 Anéis de segmento

Os anéis de segmento são componentes montados nos pistões que trabalham em contato com as camisas. Possuem duas divisões básicas de acordo com sua função, tais como: anéis de vedação, que estão mais próximos da parte superior do pistão, e anéis de lubrificação que estão localizados na parte inferior do pistão e têm a finalidade de lubrificar as paredes do cilindro.

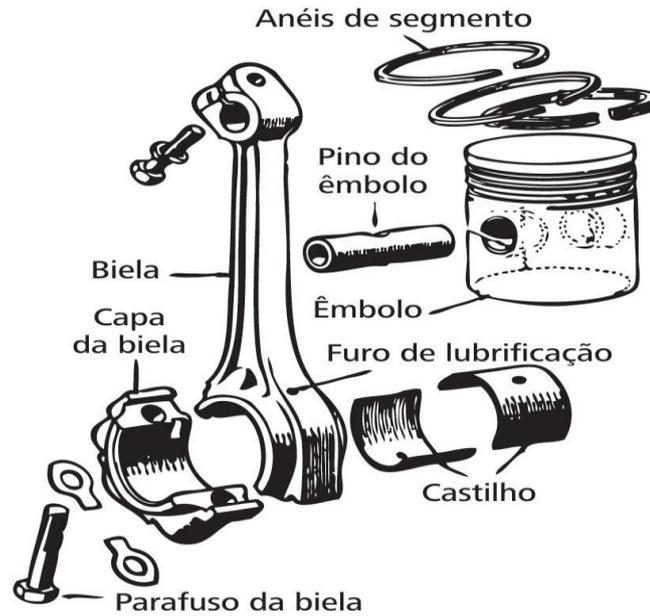
2.2.1.5 Bielas

Segundo MAHEL (2007), as bielas são como braço de ligação entre o pistão e o virabrequim. É importante salientar que este conjunto transforma o movimento retilíneo alternado do pistão em movimento rotativo do virabrequim.

2.2.1.6 Bonzinas ou castilhos

São buchas bipartidas, geralmente trimetálicas de aço-cobre-estanho, que diminuem o atrito entre o eixo e seu apoio, suportando cargas elevadas. Os castilhos ou bonzinas possuem ressalto para assegurar um posicionamento correto na montagem e impedir seu deslocamento lateral, bem como orifícios que permitem facilitar a lubrificação.

Figura 3 – Pistão, biela, anéis de seguimento e castilho



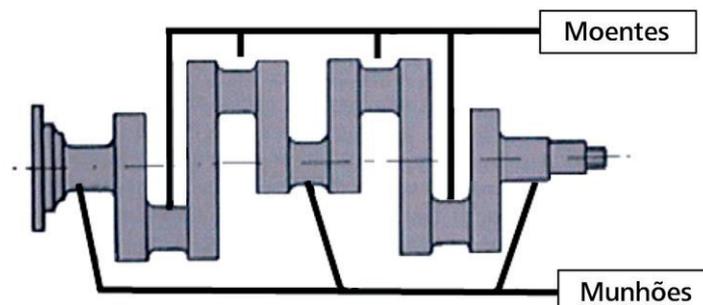
Fonte: Mahle (2007).

2.2.1.7 Virabrequim

Trata-se de um eixo motor que, na maioria das vezes, é instalado na parte inferior do bloco, recebendo ainda as bielas que lhe imprimem movimento. Somente em motores de grande porte o virabrequim é instalado no cárter.

A linha de eixo é o conjunto de munhões, pontos fixos de assentamento dos mancais de fixação no bloco. Já os moentes são as partes do virabrequim onde se apoiam as bielas, como mostrado na figura.

Figura 4 – Virabrequim com localização de moentes e de munhões.

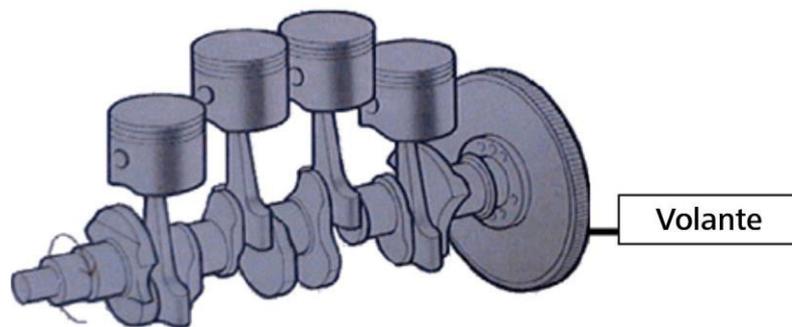


Fonte: Mercedes Benz do Brasil (2006).

2.2.1.8 Volante

O volante destina-se a regularizar e equilibrar a rotação do virabrequim. No momento da explosão, o volante absorve energia desenvolvida e a restitui nos tempos não motores.

Figura 5 – Localização do volante no virabrequim



Fonte: Mercedes Benz do Brasil (2006).

2.2.1.9 Mancais

Os mancais são utilizados para reduzir o atrito e servir de apoio às partes móveis giratórias do motor, aos moentes e aos munhões. Dividem-se em dois tipos principais: os fixos, alojados nos munhões e no bloco do motor; e os móveis, montados nos moentes e bielas.

Figura 6 – Mancais



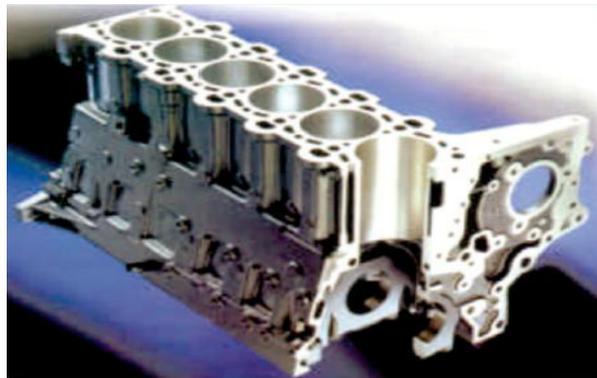
Fonte: Loja dos Rolamentos (2017).

2.2.2 Componentes fixos

2.2.2.1 Bloco do Motor

O bloco é considerado a estrutura central, pois nele, direta ou indiretamente, são acoplados os componentes que compõem o motor. Esses, dependendo dos requisitos tecnológicos considerados, passam por diferentes processos de fabricação.

Figura 7 – Bloco do motor



Fonte: Daimler Chrysler (2008).

2.2.2.2 Cabeçote

Acoplado na parte superior do bloco do motor, o cabeçote tem a função de juntos dos cilindros e dos pistões formar a câmara de combustão. Geralmente, possui orifícios com roscas onde são fixadas as velas de ignição, alojadas as válvulas de admissão e de escape.

Figura 8 – Cabeçote de um motor de 4 cilindros



Fonte: Daimler Chrysler (2008).

2.2.2.3 Cárter

Localizado na parte inferior do bloco, o cárter cobre os componentes inferiores do motor e serve de depósito para o óleo lubrificante. É no cárter, normalmente, em que se situa a bomba de óleo, componente importante do sistema de lubrificação, nos motores de combustão interna.

Figura 9 – Cárter de um motor Chevrolet Chevette



Fonte: F1 Visão Técnica (2011).

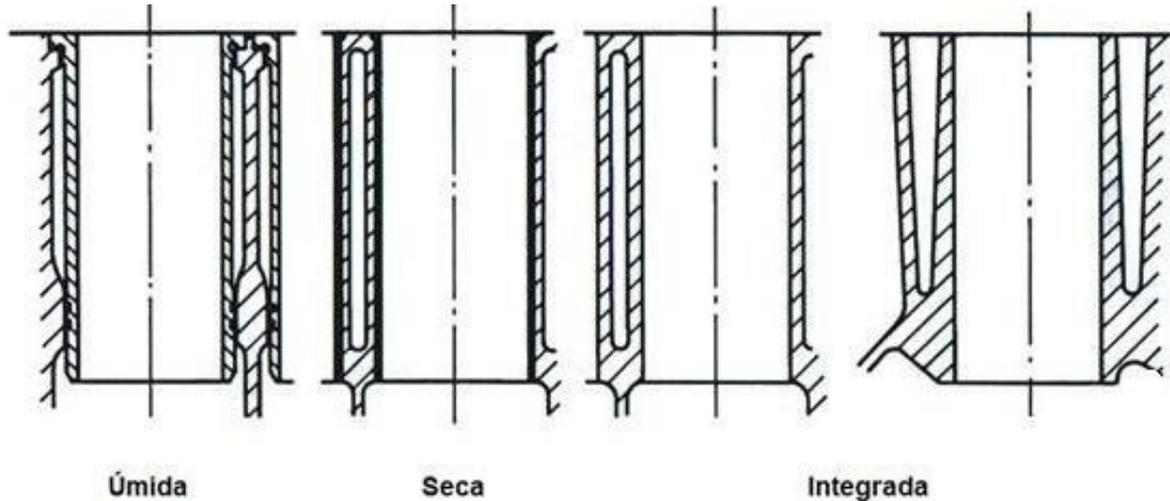
2.3 Camisas de cilindro

As camisas de cilindro são componentes fixos que podem ser removíveis ou não. Desta maneira, quando não removíveis, são normalmente chamadas apenas de cilindros. Uma das funções destes componentes é delimitar o ambiente em que se realiza a combustão, devendo ser projetadas com a capacidade de suportar altas temperaturas decorrentes do aquecimento provocado pela reação química do combustível e altas tensões. A fim de se aumentar a vida útil destas camisas, deve-se prever um sistema de arrefecimento para cada motor. Os fluidos refrigerantes mais utilizados são a água e o ar. A seguir serão apresentados os tipos de camisas normalmente encontrados na literatura.

2.3.1 Camisas resfriadas a água

As camisas de cilindro que são resfriadas a água (geralmente tratada e aditivada) podem ser de três tipos: integradas, secas e úmidas. Para a escolha do tipo, devem ser considerados aspectos como a necessidade de reparo e as solicitações térmicas e mecânicas.

Figura 10 – Tipos de camisas resfriadas a água



Fonte: Ferreira; Magalhães (2009).

2.3.1.1 Camisas integradas

No caso de camisas integradas, bloco e camisas constituem uma única peça, ou seja, não há possibilidade de remoção das camisas. Esse tipo de execução encontra aplicação, principalmente em motores que funcionam segundo o ciclo Otto (motor a gasolina) e em pequenos motores Diesel pouco solicitados

A questão do reparo é de grande importância, pois um cilindro removível, além de poder ser fabricado com um material diferente do que constitui o bloco, pode ser facilmente substituído ou reparado em caso de avaria. A utilização de camisas integradas, dificulta em algumas situações o reparo desta.

2.3.1.2 Camisas secas

Camisas secas são tubos projetados normalmente com paredes finas que são prensados para dentro dos furos cilíndricos do bloco. Elas recebem esse nome porque não estão

diretamente em contato com o líquido de arrefecimento, excluindo-se, dessa forma, problemas de corrosão externa e vedação. Esse tipo de execução é encontrado em motores de baixa e média cilindrada de veículos automotivos, e apresenta desvantagens referentes aos altos custos de fabricação e à baixa eficiência de transferência de calor.

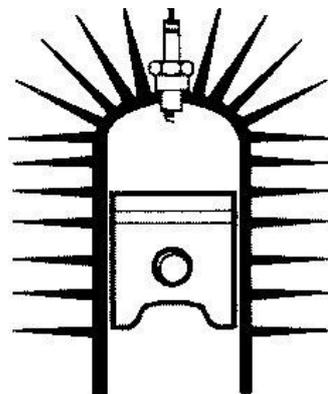
2.3.1.3 Camisas úmidas

Contrariamente às camisas secas, uma parte da superfície externa das ditas camisas úmidas está diretamente em contato com o líquido de arrefecimento, o que favorece um melhor resfriamento. As camisas úmidas têm grande emprego em motores Diesel de diversas cilindradas. Esse tipo de execução permite uma remoção relativamente fácil das camisas para fora do motor. Qualquer camisa pode então ser recondicionada ou substituída.

2.3.2 Camisas resfriadas a ar

A capacidade de transferência de calor no caso de camisas resfriadas a ar é aproximadamente 1/30 da atingida quando camisas resfriadas a água são utilizadas (MARTINS, 2006). Para aumentar a difícil transferência de calor por este fluido, a área externa de transferência de calor é ampliada por meio de aletamento. São utilizadas, normalmente em motores menores, como os de motocicletas.

Figura 11 – Camisa aletada.



Fonte: Martins (2006).

2.3.3 Problemas em camisas de cilindro

Durante o funcionamento do motor as camisas são submetidas a diversas forças provenientes da combustão do gás, da inércia dos componentes e da montagem. Além de estarem expostas a temperaturas de combustão que se elevam a aproximadamente 2000°C, a líquidos de arrefecimento e a ação destes. Sendo assim, ao longo da vida útil destes componentes, sua qualidade e seu funcionamento adulteram-se, sofrendo, principalmente, com os problemas de deterioração, de desgaste da superfície de correr e de deformação.

A combinação desses fenômenos juntos de uma lubrificação deficiente, efeitos da umidade do ar e contaminação do ar e do óleo, pode levar a camisa a apresentar problemas, como um formato ovalizado e/ou cônico, marcas de arranhão, possíveis trincas, corrosão e/ou superfície espelhada (rugosidade muito baixa). Logo, torna-se necessário a realização do condicionamento das camisas dos cilindros, sendo o brunimento o processo adequado para este reparo.

2.4 Brunimento

2.4.1 Apanhado histórico

Segundo PERES (1994), foi em meados da primeira década do século XX, na Alemanha, onde se registrou uma das primeiras notícias do uso do brunimento. Em que a ferramenta de brunir era constituída de cilindros de madeira bipartidos nos quais as pedras abrasivas se encontravam. Neste processo, tanto o avanço quanto a rotação do sistema, eram manuais. Pouco mais tarde, foi empregado um pistão de alumínio adaptado a uma furadeira de coluna, que conduzia tal ferramenta.

Após a Primeira Guerra Mundial, especialistas norte-americanos adotaram este novo processo, readaptando-o para a fabricação em série. No ano de 1921, uma fábrica em Detroit registrou a primeira patente do processo de brunimento. Cinco anos mais tarde, este processo de fabricação havia sido introduzido em várias indústrias automobilísticas, especialmente na usinagem dos cilindros de blocos de motores.

Quando em 1935, a Chrysler, uma fabricante americana de automóveis que atuou de forma independente entre 1925 e 1998, detectou falhas em seus mancais, causadas por impacto e vibrações resultantes do acabamento insuficiente nas pistas de rolamentos, um novo

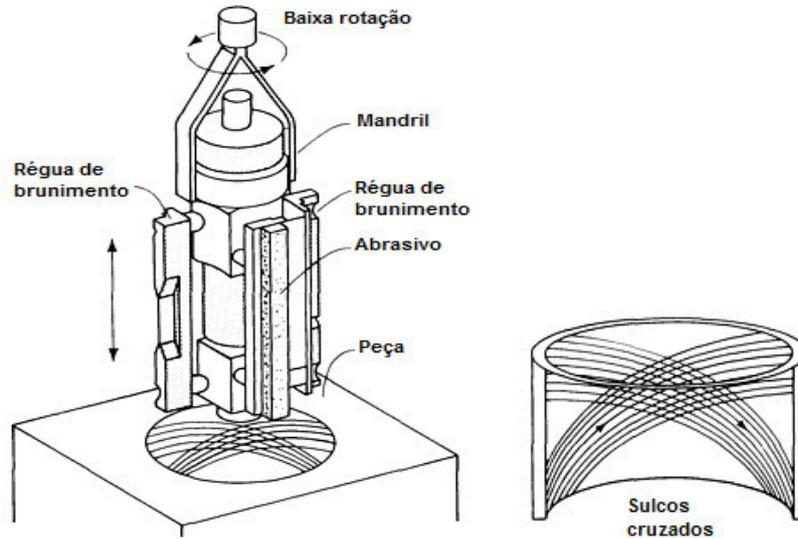
modelo de brunimento foi desenvolvido, em que estas falhas foram eliminadas pela melhora da qualidade superficial fornecida por um novo processo criado na própria empresa, o "*superfinishing*". Neste período, iniciou-se também o uso do brunimento em duas etapas: desbaste e acabamento (HAASIS ,1975).

Com novas tecnologias no campo dos abrasivos e na concepção das ferramentas pode-se observar um crescente desenvolvimento na área (YOKOYAMA, 1987). Um maior domínio na produção de abrasivos, principalmente diamante e nitrato cúbico de boro (CBN), tem propiciado o controle dimensional e geométrico dos grãos. Atualmente, as novas características construtivas das ferramentas têm permitido a obtenção de peças com alta precisão, o que reflete sensivelmente na produção. Logo, a automatização das máquinas de brunir tem elevado eficiência destes sistemas produtivos, possibilitando a correção de erros de forma, redução de custos, alta eficiência, mas principalmente maior flexibilidade de produção.

2.4.2 Características do brunimento

O brunimento é um processo de usinagem em que o movimento de avanço é executado simultaneamente ao movimento de corte, produzindo na peça, uma superfície cruzada, como é ilustrado na Figura 12. Logo, nesse processo, a remoção do material ocorre por meio de grãos abrasivos que se encontram em contato praticamente constante com a superfície usinada, determinando uma grande área de contato entre o abrasivo e a peça, desta maneira, produzindo baixas pressões e velocidades de corte (BYRNES, 1992). Estas baixas pressões e velocidades de corte, quando comparadas com outros processos de usinagem como o mandrilamento, possibilitam ao brunimento ser menos agressivo a superfície da peça após a usinagem e permitem a obtenção de boa exatidão dimensional, boa qualidade superficial e boa exatidão geométrica.

Figura 12 – Caracterização do brunimento



Fonte: Aaron (1995).

O processo também envolve a correção de erros comuns encontrados em peças cilíndricas, tais como ovalização, estrangulamento, ondulação, abaulamento, conicidade, marcas de ferramenta, desalinhamento e erros de vibração (vibrado), mostrados na Figura 13. Todas essas imperfeições podem ser corrigidas por meio de brunimento, sem que haja necessidade de retirada de muito material.

Além disso, o brunimento, assim como a lapidação, a retificação e o polimento, pertencem ao grupo de processos de usinagem com ferramenta de corte de geometria não-definida, pois não possuem uma aresta de corte com geometria definida. Desta maneira, para se compreender melhor o processo, é preciso que se entenda mais sobre esse tipo de usinagem.

Figura 13 – Desvios corrigidos pelo brunimento

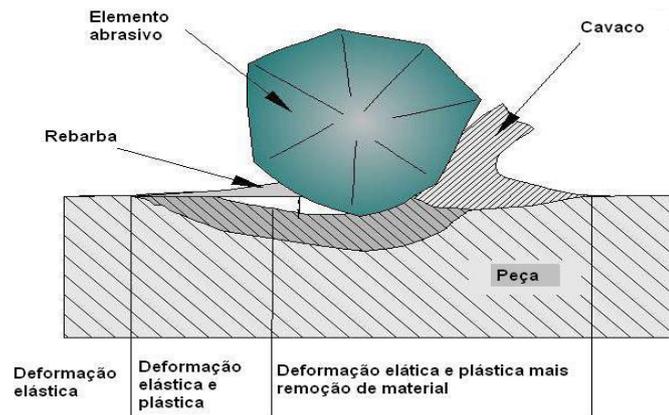


Fonte: Andretta (2001).

2.4.3 Usinagem com ferramentas de geometria não-definida

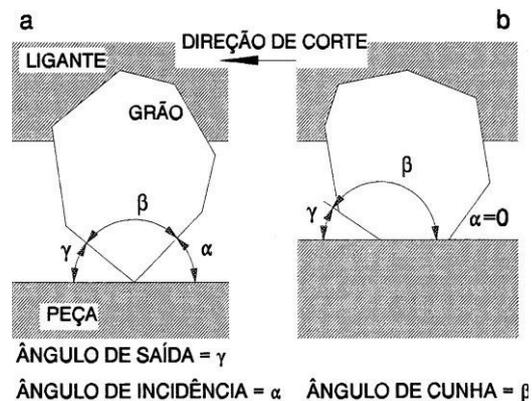
Nos processos de usinagem com geometria não-definida, as ferramentas são formadas por grãos que, em contato com a peça a ser usinada, são responsáveis pela remoção de material, como mostra a Figura 14. É interessante salientar que durante a usinagem existem dois perfis de penetração do grão abrasivo na superfície, ilustrados na Figura 15. Sendo o primeiro (a) o ideal, porém menos comum; enquanto o segundo (b) é bem mais comum, porém provoca maiores perdas por atrito, maior desgaste do gume e cavacos menos contínuos. Em ambos, a princípio, apenas uma parcela do grão abrasivo penetra no material, denominado gume de corte. O material escoou na região inferior e ao redor do grão dando origem às rebarbas. A penetração persiste até provocar o cisalhamento do material e a formação de cavaco.

Figura 14 – Remoção de material no brunimento



Fonte: Stoeterau (2006).

Figura 15 – Perfis de penetração do grão abrasivo.



Fonte: Peres (1994).

No brunimento, os cavacos produzidos pelo grão abrasivo são muito pequenos, apresentando formas geométricas variadas dado a irregularidade dos gumes dos abrasivos e sua distribuição descontínua no meio ligante. A direção tomada pelos cavacos é função da cinemática do processo, enquanto que o sentido de saída destes resquícios de material é inverso ao movimento de avanço da ferramenta.

Observando os cavacos resultante deste processo, pode-se ver que têm grande similaridade com as partículas de material removidas no processo de torneamento, fresamento ou plainamento. Isso demonstra que o corte com os grãos abrasivos é sujeito às mesmas leis que regem as ferramentas de geometria definida. De acordo com as condições impostas pelo processo, como velocidade, pressão de trabalho, lubrificação e a própria abrasividade da ferramenta, podem ocorrer cavacos irregulares, em vírgula e espiral, Figura 16.

Figura 16 – Formas de cavaco.



Fonte: Peres (1994).

2.4.4 Principais tipos de brunimento

O processo de brunimento pode ser dividido em dois grupos que se diferenciam pelo curso percorrido pela ferramenta, sendo ele o de curso longo e o de curso curto.

2.4.4.1 Brunimento de curso longo

O brunimento de curso longo é empregado normalmente em ferramentas cilíndricas em diâmetros internos. Processo este mais apropriado para usinagem de furos interrompidos, passantes e curtos em ferro fundido. Capaz de conferir considerável precisão a forma, além de gerar uma topografia na superfície que permite para uma maior retenção de lubrificante. Sendo este processo amplamente aplicado em furos de bielas, camisas de cilindros e tambores de freios, por exemplo. Como as principais vantagens deste processo pode se destacar: curto tempo

de fabricação, alta taxa de remoção e correção de erros de forma. E como principais desvantagens tem-se que possui uma aplicação restrita e não corrige erros de posição. (PERES, 1994).

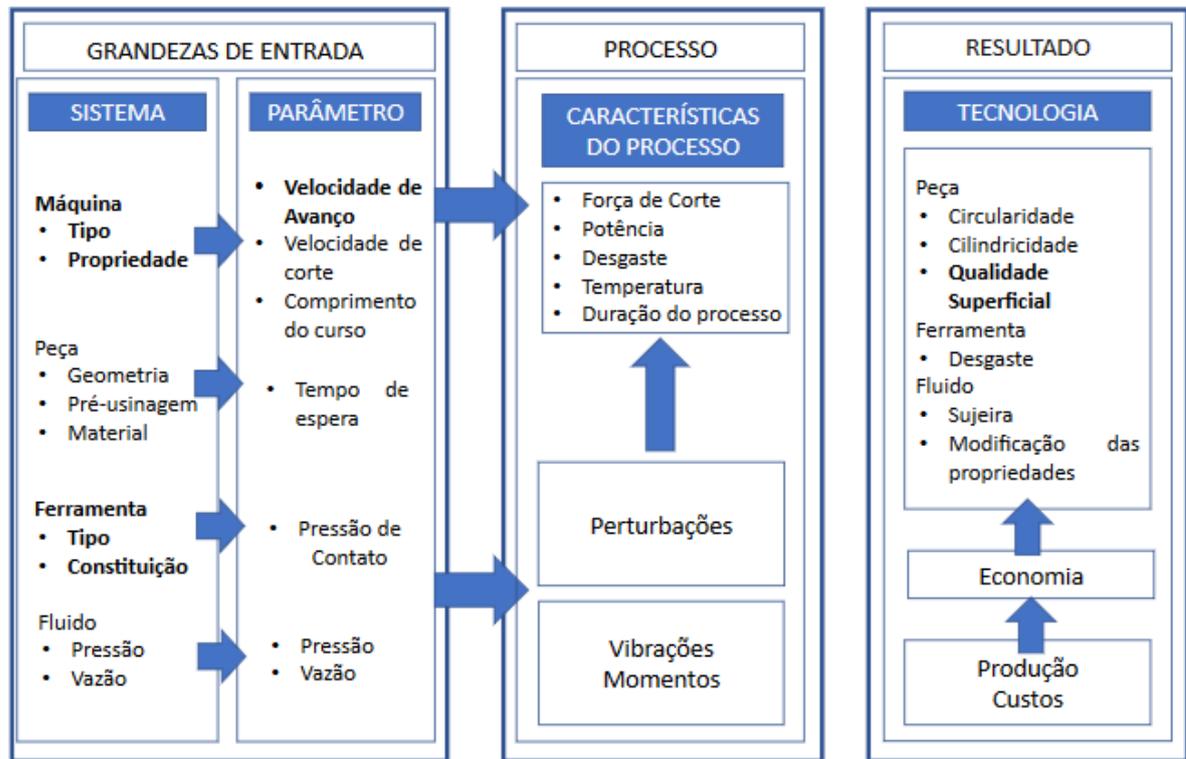
2.4.4.2 *Brunimento de curso curto*

O brunimento de curso curto objetiva restaurar a integridade superficial, garantindo precisão geométrica e dimensional às peças usinadas. Com este processo é possível a obtenção de superfícies opticamente lisas, livres de qualquer metal fragmentado e sujeiras das operações anteriores. O processo utiliza pedras abrasivas ligadas, para a usinagem de peças cilíndricas ou ferramentas em forma de copo e abrasivos em disco para a usinagem de peças esféricas e planas. Existem denominações não normalizadas como: brunimento fino, "*superfinishing*" e retificação vibratória.

2.4.5 *Grandezas de entrada*

Segundo KÖNIG (1989), as grandezas de brunimento são divididas em dois grupos um de grandezas fixas e outro de grandezas variáveis. O primeiro compreende o sistema formado, principalmente, pela máquina, pela ferramenta, pela peça e pelo fluido de corte. Enquanto o segundo, compreende os parâmetros de usinagem responsáveis pela cinemática do processo, como os movimentos, o curso e o tempo de espera. Inclui-se, também, como parâmetro de usinagem: a pressão de contato do abrasivo na superfície da peça, a pressão e a vazão do fluido de corte. Foi desenvolvido um esquema por König que expressa melhor a interação desses grupos de grandezas deste processo. O esquema original foi modificado a fim de melhor atingir os objetivos desta pesquisa. Destacou-se, então, as grandezas que serão melhores apresentadas neste trabalho (Figura 17).

Figura 17 – Grandezas do processo de brunimento



Fonte: Adaptada de König (1989).

2.4.5.1 Configurações das máquinas de brunimento

O brunimento é uma operação de usinagem que pode ser executado manualmente ou automaticamente. Quando se fala em brunimento manual, refere-se à operação de translação que é, necessariamente, feita de forma manual. A peça pode ser fixada em uma bancada, já o cabeçote brunidor é montado em furadeiras ou prensas que se movimentam por estímulo de um operador. Obviamente, para produção em massa, o brunimento manual não é interessante, pois consome tempo e é muito limitado no que concerne à capacidade de brunimento.

As máquinas de brunimento podem ser classificadas, simplificadaamente, em máquinas de brunimento horizontal e máquinas de brunimento vertical. Ambas são bastante utilizadas e, de acordo com a aplicação, uma pode ser mais adequada para uma operação requerida do que a outra. As máquinas horizontais são utilizadas normalmente para brunimento de peças com longos comprimentos, já que seria inviável uma brunidora vertical realizar o processo em uma peça de três metros de comprimento, por exemplo. Visto que, para se brunir uma peça com essa dimensão, seria necessária uma brunidora de aproximadamente oito metros de altura, o que seria algo bem improvável de acontecer devido sua dificuldade de instalação.

Segundo BYNERS (1992), brunidoras horizontais, mostrada na Figura 18, tem capacidade de brunir peças com comprimentos de até vinte e cinco metros. Brunidoras verticais, por outro lado, são opções mais interessantes para peças mais robustas, como em cilindros de blocos de motores, como é possível notar na Figura 19, em que um bloco está posicionado sobre uma brunidora vertical, para que as camisas dos cilindros sejam usinadas. Esta é o tipo de máquina mais adequado para a realização desta usinagem. Porém, é importante destacar, que não é apenas pelo tamanho e pela forma das peças, mas também da quantidade superficial e dos requisitos de tolerância.

Figura 18 – Brunidora horizontal



Fonte: Sunnen (2017).

Figura 19 – Brunidora vertical



Fonte: Chinelatto (2017).

2.4.5.2 Geometria da peça

A característica geométrica principal da peça durante o processo de brunimento é a espessura de parede do cilindro (MOCELLIN, 2007). Tanto de uma camisa de cilindro brunida isoladamente quanto um cilindro de um bloco de motor, visto que a espessura da parede sofre com a influência da pressão de contato dos seguimentos abrasivos na superfície e da maneira com que ocorre a distribuição de temperatura durante este processo. Já que em paredes finas a distorção sofrida pela pressão durante o processo e pela distribuição irregular da temperatura são bem maiores.

Outra característica importante quanto a geometria da peça consiste no espaço para a saída da ferramenta. O desejável é que seja de aproximadamente um terço do comprimento do segmento abrasivo de brunimento, frequentemente implicando a necessidade de emprego de estratégias como o retardo do curso no ponto morto inferior, uso de curso com menor comprimento, alteração geométrica dos segmentos abrasivos de brunimento ou ainda do próprio conceito da ferramenta. Ressalta-se, ainda, a influência da geometria da peça em seus modos de vibração e frequências naturais, o que pode influenciar significativamente no resultado do brunimento, em termos de geração de erros de circularidade devido a ondulações ou marcas de vibração na superfície do cilindro brunido.

2.4.5.3 Ferramenta de brunimento

Uma grande variedade de ferramentas tem sido desenvolvida para o processo de brunimento. Para isto, dependendo das características da função e das exigências de qualidade, são utilizadas ferramentas classificadas principalmente nos grupos de pedra única, de múltiplas pedras, de casca e maciças.

2.4.5.3.1 Ferramentas de pedra de brunimento única

Ferramentas de pedra de brunimento única são preferencialmente empregadas na usinagem de furos passantes e furos cegos, possui uma forma construtiva compacta (Figura 20) característica esta que permite exigir implementações mecânicas menos dispendiosas. Muitas

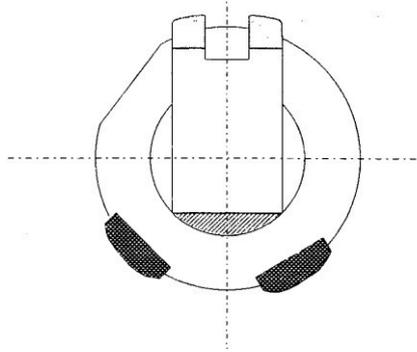
destes tipos de ferramentas possuem duas barras de guia posicionadas na parte posterior da ferramenta, visando o melhoramento da concentricidade, como mostra a Figura 21.

Figura 20 – Ferramenta de pedra de brunimento única



Fonte: Byrnes (1980).

Figura 21 – Ferramenta pedra de brunimento única e barras de guia



Fonte: Peres (1994).

2.4.5.3.2 Ferramentas de múltiplas pedras de brunimento

Atualmente existem à disposição ferramentas de brunir de várias réguas abrasivas, para os mais diversificados campos de aplicação, de tal maneira que, para cada caso, tenha-se a condição ótima de formação de cavaco. As ferramentas são especificadas segundo o comprimento e o diâmetro e estão associadas a uma série padrão, podendo ser equipadas com pedras comuns como também com pedras diamantadas. Tais ferramentas múltiplas com pedras de diamante têm um grande campo de aplicação. Com pedras curtas são usinados os chamados diâmetros "sobre quadrado", por exemplo, bielas e engrenagens. Ferramentas com pedras compridas são empregadas em serviço de brunimento de curso longo, como tubos de aços. Para furos cegos estas ferramentas são usadas sem o cone de entrada.

Figura 22 – Ferramenta de múltiplas pedras de brunimento

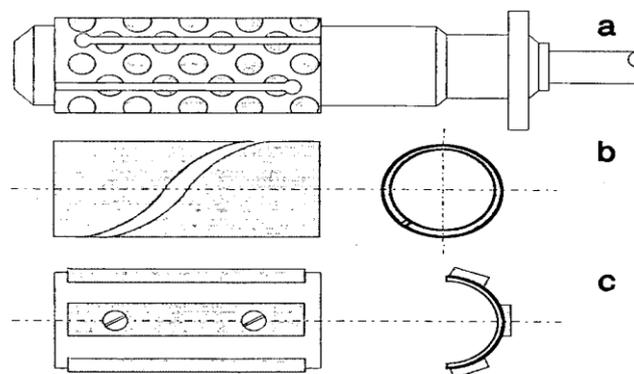


Fonte: Byrnes (1980).

2.4.5.3.3 Ferramentas de casca

Estas ferramentas consistem basicamente de uma haste cônica e de uma bucha, onde são aplicados os abrasivos. As buchas são geralmente diamantadas ou revestidas com grãos de CBN, proporcionando um grau de acabamento superior e rápida remoção. A granulometria do abrasivo empregado normalmente está relacionada com a remoção e o acabamento desejado. O campo de aplicação destas ferramentas é determinado pelo material a usinar, dependendo do tipo e tamanho dos cavacos produzidos. Materiais que produzem cavacos longos, como os aços moles, não são usinados economicamente por este processo, isto porque os cavacos longos não podem ser acolhidos na ranhura da bucha (YOKOAMA, 1987).

Figura 23 – Tipos de buchas em ferramentas de casca



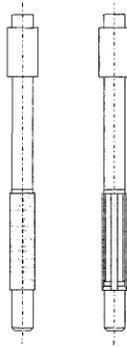
Fonte: Peres (1994).

2.4.5.3.4 Ferramentas maciças

Nos últimos anos, foram desenvolvidas diversas pequenas ferramentas tornando possível o brunimento de furos com diâmetros a partir de 0,6mm. As ferramentas maciças servem principalmente para rebarbar e alisar estes pequenos furos. Nesta série se integram as

hastes de diamante que se adaptam para trabalhos de desbaste difíceis, principalmente para a usinagem de aços, metal duro, fundidos, vidros e metais leves. Tais revestimentos podem ser selecionados com diferentes granulações, de acordo com a qualidade superficial desejada.

Figura 24 – Ferramenta maciça.



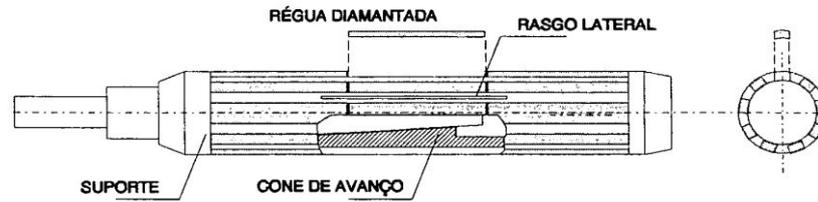
Fonte: Peres (1994).

2.4.5.3.5 Ferramenta “*Precidor*”

Esta ferramenta apresenta três porções distintas. O primeiro terço é formado por uma região de guia, o segundo por uma região cônica de corte e o último por uma região cilíndrica de calibração. A leve conicidade apresentada na região central se justifica pelo desgaste proveniente do trabalho forçado, resultante da movimentação com avanço único. A expansão do diâmetro é mecânica e se dá pelo deslocamento de um elemento cônico na região de corte.

Este processo, consideravelmente simples, tem melhorado e muito os resultados obtidos na usinagem, principalmente no que se refere aos materiais mais leves. Além disto, praticamente qualquer tipo de furo pode ser brunido com o uso desta técnica, inclusive furos cegos com ou sem interrupções. Atualmente o processo é bastante empregado na usinagem de furos de válvulas hidráulicas, mancais de blocos cilíndricos e bielas de grande e pequeno porte, ou seja, elementos onde se deseja uma constância de qualidade.

Figura 25 – Ferramenta "Precidor" e suas principais porções



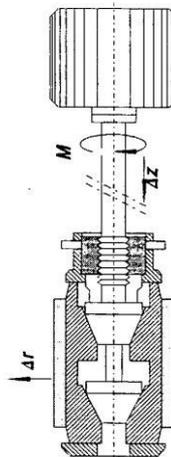
Fonte: Peres (1994).

2.4.5.3.6 Expansão da ferramenta

O mecanismo de expansão da ferramenta pode ser controlado de duas maneiras: por meio de controle da posição de expansão dos seguimentos abrasivos, feito por motor de passo, em sua maioria; ou controle de pressão de expansão, feito normalmente por um sistema hidráulico. Sendo assim, resumidamente, pode-se classificar a expansão de duas maneiras: expansão por acionamento mecânico e expansão por acionamento hidráulico.

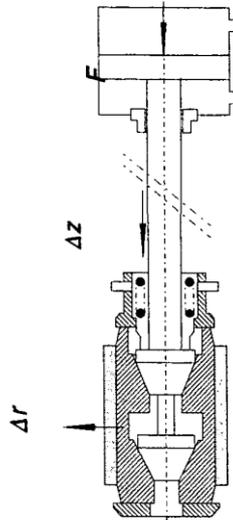
É interessante destacar que os sistemas de expansão do diâmetro por acionamento hidráulico vêm sendo utilizados não somente para a compensação do desgaste sofrido pela pedra de brunir durante o processo de corte. São empregados, também, para a obtenção de uma determinada remoção de material, através da ação progressiva da ferramenta, que tem seu diâmetro aumentando gradualmente durante a usinagem. A expansão se deve, normalmente, a uma força que atua sobre o êmbolo conectado à haste cônica. A medida que a força aumenta, o êmbolo movimenta-se e a expansão é transmitida às pedras de brunir.

Figura 26 – Expansão por acionamento mecânico



Fonte: Peres (1994).

Figura 27 – Expansão por acionamento hidráulico



Fonte: Peres (1994).

2.4.5.4 Abrasivos

Os materiais abrasivos normalmente empregados em processos de brunimento podem ser classificados em dois grupos: os denominados abrasivos convencionais, tais como óxido de alumínio (Al_2O_3) e carbetto de silício (SiC), ou os chamados superabrasivos, como o diamante e o nitreto de boro cubico (CBN).

Os abrasivos convencionais, possuem menor custo, entretanto, desgastam-se bem mais rapidamente quando comparados ao superabrasivos. Sendo o Al_2O_3 usado comumente em operação de rebarba de aço, devido a sua menor dureza. Enquanto o SiC é bastante utilizado no brunimento de peças que tem baixa resistência ao cisalhamento, como o ferro fundido. Tem-se que os abrasivos de SiC são bastante utilizados em retificas de motores, mesmo tendo o seu rápido desgaste como ponto negativo.

Os superabrasivos, desgastam muito menos e exibem uma taxa de remoção mais elevada quando comparados aos convencionais. Estes vêm sendo aplicados atualmente em algumas brunidoras mais modernas. Sendo o diamante empregado principalmente em aços de baixo carbono, ferros fundidos e aços nitretados, enquanto o CBN tem sua principal utilização em aços endurecidos (FLORES, 1998).

É interessante ressaltar que os abrasivos também podem se classificar referente a outros diversos parâmetros, tais como granulometria, dureza, tipo de agente aglutinante. A

tabela abaixo mostra como se dá a classificação dos abrasivos referentes a sua granulometria, característica mais usual na identificação de réguas abrasivas para brunimento.

Figura 28 – Quadro de classificação de granulometria

Grão	Características
#24,36	Muito grosso
#40,50	Grosso
#60,80	Intermediário
#100,150	Fino
#180,220	Muito fino
#220	Extremamente fino

#24 ao #50	Indicados para lixar materiais macios e não causam empastamento. Ideais para operações que requerem alta remoção.
#60 ao #220	Indicados para lixar materiais fortes. Aplicados em operações que requerem acabamento e limpeza de superfícies.
Acima de #220	Indicado para fino acabamento e limpeza de superfícies que requerem baixa remoção de material

Fonte: Rei Abrasivo (2017).

Um comparativo entre os abrasivos de SiC e de Diamante foi realizado por um site americano, chamado *Automotive repair & diagnosis help*, em que o passo de um jogo de SiC pode brunir três blocos V8, um jogo de diamante é capaz de brunir 300 blocos antes de necessitarem substituição. Ou seja, o uso de abrasivos de diamante pode ser uma alternativa mais econômica no caso de brunimento de produção, pois embora o custo inicial de um jogo do abrasivo seja maior, a durabilidade do mesmo compensa esse fato. Por este motivo, muitas brunidoras para produção estão sendo vendidas com pedras de diamante. No entanto, outros fabricantes ainda hesitam, pois alegam que o diamante não produz resultados satisfatórios em algumas aplicações.

2.4.5.5 Fluidos de corte do brunimento

Os fluidos de corte são elementos fundamentais nos processos de usinagem, devido as suas características físicas e químicas. Eles são, normalmente, empregados com funções principais de lubrificação, de refrigeração e de remoção do cavaco. De acordo com o tipo de usinagem, nestes fluidos podem existir a presença de aditivos para potencializar sua eficiência.

No processo de brunimento, os fluidos de corte são classificados em dois grupos os miscíveis e os imiscíveis em água. Dentre eles os mais usuais são os que não possuem miscibilidade em água, adicionados de ligantes orgânicos (ácidos graxos) e ligantes de cloro, fósforo ou enxofre. Esses fluidos são responsáveis pela formação de uma interface entre ferramenta e a peça que promovem uma redução da pressão de corte e possibilitam uma melhor integridade da superfície brunida.

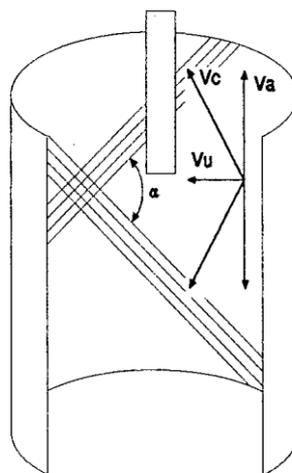
Para especificar um fluido de corte deve-se levar em consideração que materiais que geram cavacos curtos e duros (aços temperados, nitretados e cromados) são brunidos com óleos de baixa viscosidade, ao passo que para materiais que geram cavacos longos e tenazes empregam-se óleos de alta viscosidade. Assim, quão mais difícil é usinar o material, menos viscoso deve ser o óleo utilizado.

2.4.5.6 Cinemática do processo de brunimento

Será abordada a cinemática no processo de brunimento de curso longo, já que é este o utilizado no brunimento em camisas de cilindro que é de maior interesse neste estudo. Neste tipo de usinagem dois movimentos fundamentais são responsáveis pela cinemática, sendo eles o movimento de avanço e o de rotação, ambo executados pela ferramenta. Por conseguinte, a velocidade de corte (V_c) é, na verdade, uma resultante entre uma componente tangencial (V_u) proveniente do movimento de rotação e uma de avanço (V_a) proveniente do movimento de avanço, também chamado de movimento de translação, que é praticamente constante ao longo do curso de brunimento.

A combinação desses movimentos possibilita a formação de uma superfície cruzada característica do processo de brunimento, formada por finos traços que possuem entre si um ângulo α , chamado ângulo de cruzamento.

Figura 29 – Velocidades no brunimento.



Fonte: König, 1989.

Como resultante vetorial, a velocidade de corte V_c pode ser calculada por meio da equação a seguir:

$$V_c = \sqrt{V_u^2 + V_a^2} \quad (1)$$

Conforme sabe-se da Dinâmica, a velocidade tangencial de corpo rígido pode ser expressa segundo a equação abaixo:

$$V_u = \frac{\pi d_c n}{1000} \quad (2)$$

Onde:

V_u : velocidade tangencial (m/min)

d_c : diâmetro interno do cilindro (mm)

n : rotação (rpm).

Enquanto a velocidade de avanço (V_a), segundo DINIZ (2013), pode ser expressa como:

$$V_a = \frac{nf}{1000} \quad (3)$$

Onde:

V_a : velocidade de avanço (m/min)

f : avanço (mm)

n : rotação (rpm).

Segundo AARON (1995), a velocidade de rotação do cabeçote brunidor depende principalmente do diâmetro do furo que se deseja brunir. Via de regra, para diâmetros grandes utilizam-se rotações mais baixas e vice-versa. Enquanto a velocidade de avanço (V_a) depende dos comprimentos da pedra, da peça e da capacidade do mecanismo utilizado para acionar o cabeçote. É mais frequentemente expressa em cursos por minuto, embora a unidade padrão seja m/min (FERREIRA, 2009).

2.4.5.7 Ângulo de cruzamento

Conforme exposto anteriormente, o ângulo de cruzamento ou de brunimento é obtido de acordo com a manipulação da rotação e do avanço do cabeçote brunidor. Quando as velocidades de avanço e rotação são iguais, o ângulo de brunimento é 90° . Nos casos em que a rotação excede a velocidade de translação, o ângulo é menor que 90° . Como é possível de se analisar por meio de um estudo trigonométrico simples do movimento, o ângulo de cruzamento, simbolizado como α na Figura 29 pode ser encontrado em graus pela relação mostrada na equação abaixo (FERREIRA, 2009).

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \frac{Va}{Vu} \quad (4)$$

Substituindo Va e Vu pelas equações 3 e 2, respectivamente, encontra-se que o ângulo de cruzamento também pode ser escrito como:

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \frac{f}{\pi d_c} \quad (5)$$

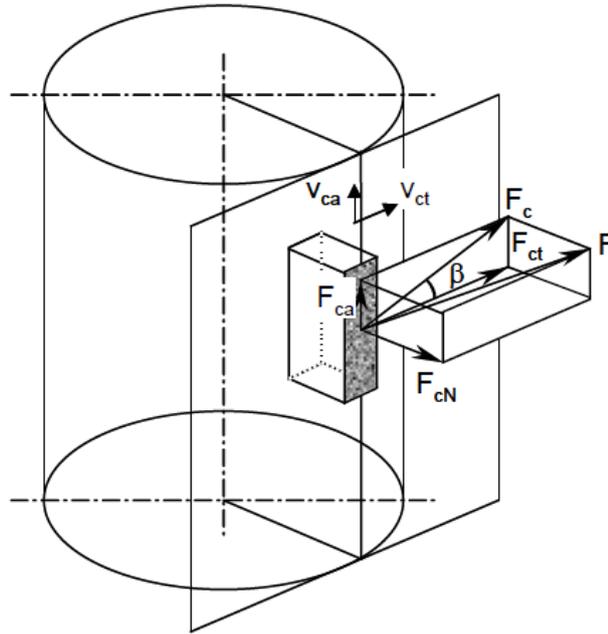
O ângulo de cruzamento é de extrema importância no caso de camisas de cilindro de motores, pois afeta diretamente o desempenho dos mesmos. Este possibilita a retenção de óleo na parede do cilindro, logo é especificado a fim de garantir a correta lubrificação do sistema pistão-anéis-cilindro.

2.4.5.8 Força e Pressão de contato no brunimento

A força e a pressão são grandezas diretamente relacionadas, e no brunimento não é diferente. O movimento relativo entre a ferramenta de brunir e a peça, associado a pressão de contato dos segmentos abrasivos de brunimento, geram uma força resultante (F). Que pode ser dividida em três componentes: axial (F_{ca}), tangencial (F_{ct}), normal (F_{cn}), em que a força de corte (F_c) é a resultante de F_{ca} e F_{ct} no mesmo plano das velocidades de corte, como é possível de perceber pela figura abaixo.

É interessante ressaltar que pressão de contato tem influência considerável na rugosidade da superfície brunida, já que em virtude de pressões de contato mais elevadas, o estilhaçamento e arrancamento dos grãos levam a um processo de auto afiação da ferramenta. Em decorrência, é gerada uma maior agressividade dos grãos abrasivos contra a peça usinada, o que modifica sensivelmente as características superficiais da peça.

Figura 30 – Componentes de força no processo de brunimento



Fonte: Pauchsch (1996).

2.4.6 Superfícies geradas pelo brunimento

2.4.6.1 Superfícies de deslizamento

As características das superfícies geradas posteriores a processos de fabricação são normalmente diferentes das do restante da peça. É preciso compreender qual é a situação da superfície para que se possa, se necessário, realizar outros procedimentos para que esta tenha uma vida útil considerável desempenhando sua função de maneira competente. Desta forma, divide-se as superfícies técnicas em três grupos relacionados ao principal tipo de solicitação em que a peça é exposta com frequência. No primeiro, têm-se as superfícies não solicitadas mecanicamente, as quais não exigem uma contra-superfície. No segundo, as superfícies solicitadas por tensões que estão paradas em relação à contra-superfície. O terceiro corresponde às solicitadas por atrito, que apresentam movimento relativo entre a superfície principal e o contra-corpo.

As superfícies resultantes do processo de brunimento interagem em condições de atrito, sendo caracterizadas como superfícies de deslizamento lubrificadas (SLD). Quando classificada com SLD, a superfície deve possuir características como precisão de forma, resistência ao desgaste, amortecimento ao desgaste inicial, além de, obviamente, a capacidade de deslizar, suportar carga e reter lubrificante (PERES, 1994)

2.4.6.2 Análise de uma superfície usinada

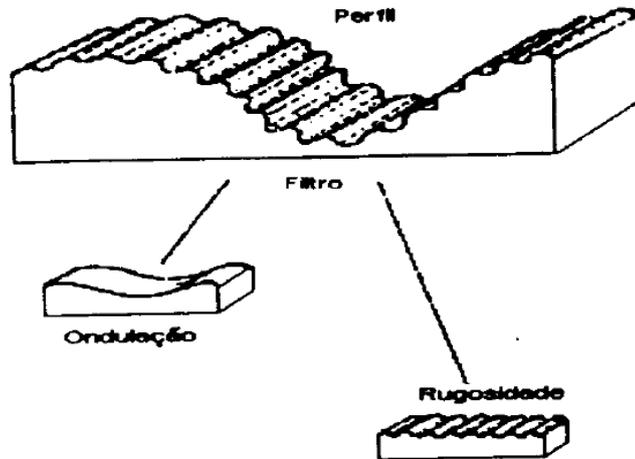
O estudo superficial pode abranger, principalmente, duas vertentes uma relacionada as condições de superfície (textura de superfície) outra relacionada com as camadas da superfície (integridade superficial), este último se relaciona com aspectos como microestrutura e tensões residuais, por exemplo. Sendo o brunimento um processo mais diretamente relacionado com textura superficial, este será o principal enfoque desta pesquisa, especificamente relacionando-se ao parâmetro vertical de caracterização de superfície relativo às amplitudes dos desvios geométricos (R_a , R_z , R_q) que serão definidos nos próximos tópicos.

2.5 Rugosidade Superficial

A rugosidade superficial é definida como o conjunto de desvios microgeométricos, caracterizados pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície (FILHO, 2011). No Brasil, termos e parâmetros de rugosidade superficial são definidos pela norma ABNT NBR ISO 4287: 2002.

A rugosidade superficial é função do tipo de acabamento, da máquina-ferramenta ou do processo de fabricação utilizado. Quando se mede o perfil de rugosidade, o instrumento lerá a peça composta por rugosidades e ondulações como visto na Figura 31. As ondulações ou texturas secundárias são o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento bem maior que sua amplitude. A frequência destas ondas é pequena. Já a rugosidade superficial ou textura primária é o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento semelhantes à sua amplitude. A frequência destas ondas é bastante elevada. Logo se vê a necessidade da aplicação de um filtro que deixe ser analisadas somente as frequências maiores do que um valor pré-determinado.

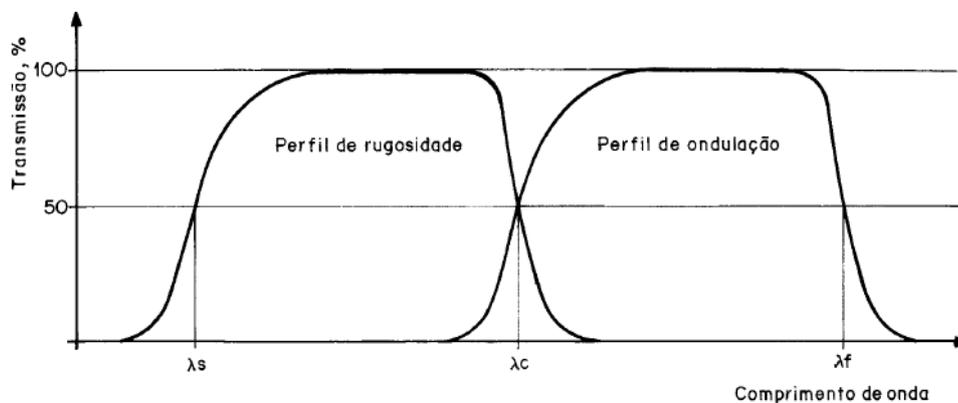
Figura 31 – Perfil primário com distinção de ondulação e rugosidade



Fonte: Filho (2011).

É importante destacar que são utilizados três filtros nos instrumentos para medição de rugosidade, ondulação e perfis primários. Eles têm as mesmas características de transmissão, porém com comprimentos de onda limite diferentes (*cut-off*).

Figura 32 – Características de transmissão dos perfis de rugosidade e de ondulação



Fonte: NBR ISO 4287 (2002).

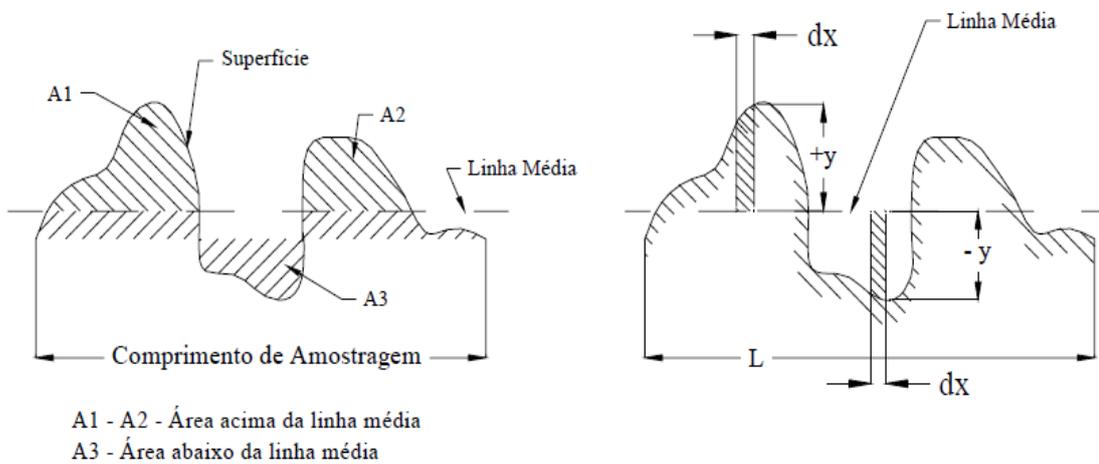
Os três filtros, mostrados na Figura 32 são definidos da seguinte maneira:

- o filtro λ_s que define a separação entre os componentes da rugosidade e os componentes de onda mais curtos presentes na superfície;
- o filtro λ_c que define a separação entre os componentes da rugosidade e da ondulação;
- o filtro λ_f que define a separação entre os componentes da ondulação e os componentes das ondas mais longas presentes na superfície.

2.5.1 Medição de rugosidade superficial pelo método da linha média

No sistema da linha média, ou sistema M, todas as grandezas são definidas a partir de uma linha de referência que caracterizada como uma linha disposta paralelamente à direção geral do perfil, dentro do percurso de medição, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendida entre ela e o perfil efetivo seja igual à soma das áreas inferiores. Conforme mostra a figura, em que $A_1 + A_2 = A_3$.

Figura 33 – Representação da área e da linha média



Fonte: Filho (2011).

Observando-se a figura b e transformando o conceito de linha média em uma expressão matemática, obtém-se a expressão seguinte:

$$\int_0^L y dx = 0 \quad (6)$$

Como $y dx$ é a área de uma faixa elemental, a área total (A) dos picos e vales dentro do comprimento de referência (L) pode ser escrita por meio da seguinte expressão:

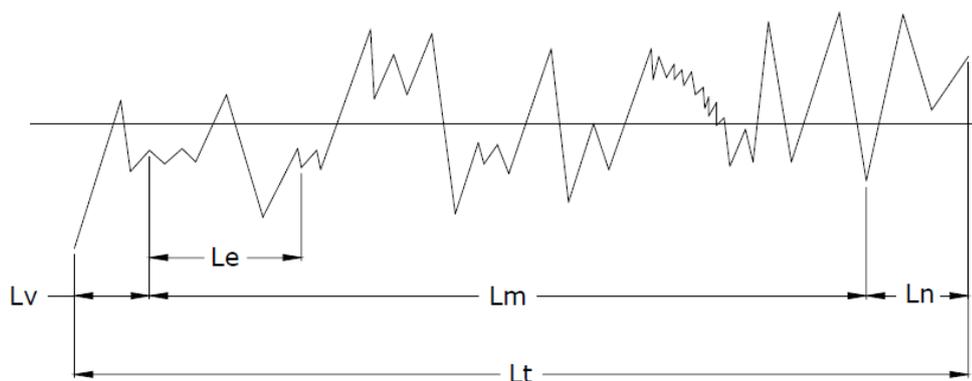
$$A = \int_0^L |y| dx \quad (7)$$

2.5.2 Percursos no processo de medição de rugosidade

Durante o processo de medição da rugosidade, o rugosímetro apalpa a superfície a ser medida. Pode-se definir vários percursos e/ou comprimentos neste processo de medição:

- a) percurso inicial (L_v) sendo a extensão da primeira parte do primeiro trecho, projetado sobre a linha média. Ele não é utilizado na avaliação da rugosidade. Este trecho inicial tem a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas iniciais do sistema de medição e a centragem do perfil de rugosidade;
- b) percurso de medição (L_m) sendo a extensão do trecho útil do perfil de rugosidade usado diretamente na avaliação, projetado sobre a linha média;
- c) percurso final (L_n) sendo a extensão da última parte do trecho apalpado, projetado sobre a linha média e não utilizado na avaliação. O trecho final tem a finalidade de permitir o amortecimento das oscilações mecânicas e elétricas finais dos sistemas de medição;
- d) percurso de apalpamento (L_t) sendo o percurso total apalpado pelo sistema de medição, ou seja, é a soma dos percursos inicial, de medição e final. $\Rightarrow L_t = L_v + L_m + L_n$;
- e) comprimento de amostragem (L_e) sendo igual a um quinto do percurso de medição, ou seja, $L_e = L_m/5$. O comprimento de amostragem deve ser o suficiente para avaliar a rugosidade, isto é, deve conter todos os elementos representativos de rugosidade.

Figura 34 – Percursos durante o processo de medição de rugosidade



Fonte: Filho (2011).

2.5.3 Parâmetros de avaliação de rugosidade

Os parâmetros apresentados por este trabalho se classificam como parâmetros relacionados a amplitude, além destes outros, de espaçamento e híbridos, são apresentados na NBR ISO 4287:2002, porém não terão destaque nesse trabalho.

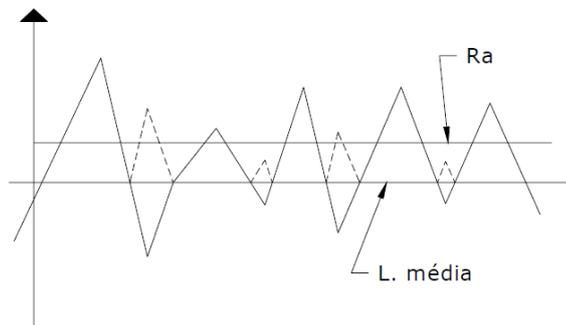
2.5.3.1 Rugosidade Média ou desvio médio do perfil avaliado (R_a)

É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição L_m .

R_a pode ser calculada pela Equação:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx = \frac{A}{L} \quad (8)$$

Figura 35 – Rugosidade média



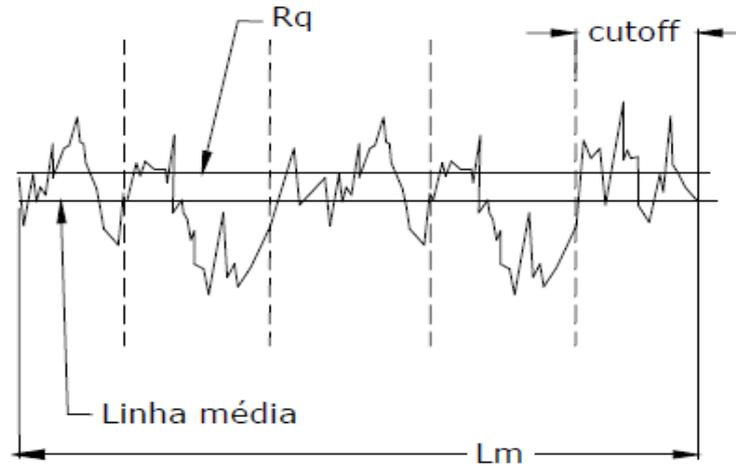
Fonte: Filho (2011).

2.5.3.2 Desvio médio quadrático (R_q)

Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas, ou seja, trata-se de um parâmetro correspondente ao R_a , seu desvio médio quadrático. Sabe-se que este parâmetro é de 10% a 25% maior que R_a . R_q pode ser definido pela equação:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx} \quad (9)$$

Figura 36 – Desvio médio quadrático

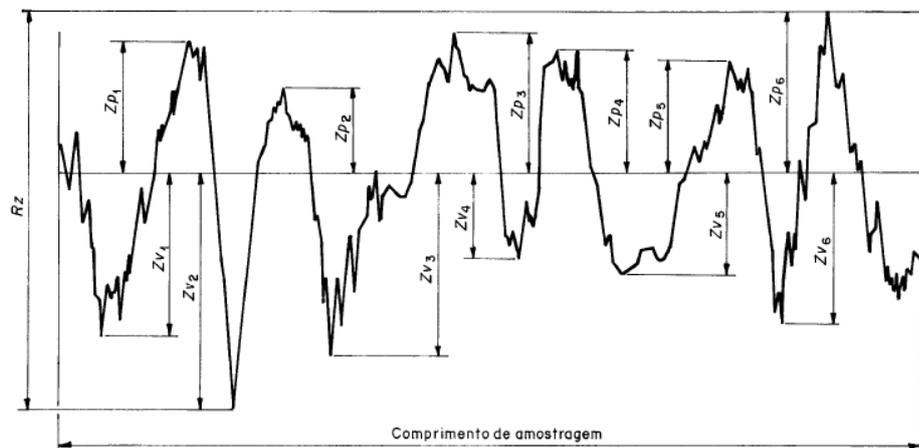


Fonte: Filho (2011).

2.5.3.3 Altura máxima do perfil (R_z)

Soma da altura máxima dos picos do perfil (Z_p) e a maior das profundidades dos vales do perfil (Z_v), no comprimento de amostragem L_e .

Figura 37 – Altura máxima do perfil



Fonte: ABNT NBR ISO 4287 (2002).

2.5.3.4 Seleção de cut-off

Para a seleção do comprimento de amostragem deve ser levado em consideração o tipo de perfil e um parâmetro de rugosidade. A norma ISO 4288 (1996 apud MACHADO, 2009) apresenta um procedimento para medição de rugosidade, no qual deve-se inicialmente avaliar

se a superfície é periódica ou aperiódica. O perfil periódico é caracterizado pela uniformidade do perfil e o perfil aperiódico pela disformidade. A estimativa adequada do valor do comprimento de amostragem é realizada comparando os valores obtidos na medição de rugosidade preliminar com as faixas de valores especificadas na Figura 38.

Figura 38 – Tabela de comprimento de amostragem limite (cut-off) para o filtro λ_c

Perfis Periódicos	Perfis Aperiódicos		Comprimento de amostragem	Comprimento de Medição Unitário / total
Distância entre picos- S_m (mm)	R_z (μm)	R_a (μm)	λ_c (mm)	l_e/l_m (mm)
> 0,01 até 0,04	Até 0,01	Até 0,02	0,08	0,08/0,4
> 0,04 até 0,13	> 0,1 até 0,5	> 0,02 até 0,1	0,25	0,25/1,25
> 0,13 até 0,4	> 0,5 até 10	> 0,1 até 2	0,8	0,8/4
> 0,4 até 1,3	> 10 até 50	> 2 até 10	2,5	2,5/12,5
> 1,3 até 4	> 50	> 10	8	8/40

Fonte: ISO 4288 (1996 apud Machado, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Motor de combustão interna

O motor de combustão interna utilizado foi fabricado pela a empresa sul coreana KIA MOTORS. Este é composto por quatro cilindros em linha com bloco em ferro fundido, cabeçote de alumínio e comando de válvulas no cabeçote. Este possui 1600 cm³ de cilindradas e seu combustível é a gasolina.

3.2 Camisas dos cilindros

As camisas deste motor possuem diâmetro interno de 78 mm e altura de 132,6 mm. Trata-se de camisas integradas refrigeradas a água.

Figura 39 – Motor estudado após o processo de brunimento



Fonte: Elaborada pela autora.

3.3 Máquina brunidora

A máquina brunidora utilizada neste processo de brunimento, é caracterizada como sendo uma máquina hidráulica vertical da marca CHINELATTO e modelo BH-200 empregada para brunimento de cilindros de motores.

A capacidade de brunir desta máquina-ferramenta envolve cilindros de diâmetros entre 41 mm e 195 mm. Possuidora de rotação do cabeçote brunidor constante e velocidades de avanço variáveis

Figura 40 – Brunidora vertical Chinelatto BH-200



Fonte: Elaborada pela autora.

Algumas das suas principais características técnicas foram tabeladas, como se pode ver abaixo:

Tabela 1 – Propriedades técnicas da brunidora BH-200

Propriedades técnicas	Valores
Curso máximo do eixo porta-brunidor	300 mm
Distância mesa-mandrill do brunidor	1030 mm
Distancia coluna mandrill do brunidor	310 mm
Motor giro eixo porta-brunidor	1 cv
Motor unidade hidráulica	3 cv
Motor refrigeração	0,12 cv
Comprimento x Largura x Altura	2,52 m x 1,44 m x 2,71 m

Tabela 1 – Propriedades técnicas da brunidora BH-200 (continua)

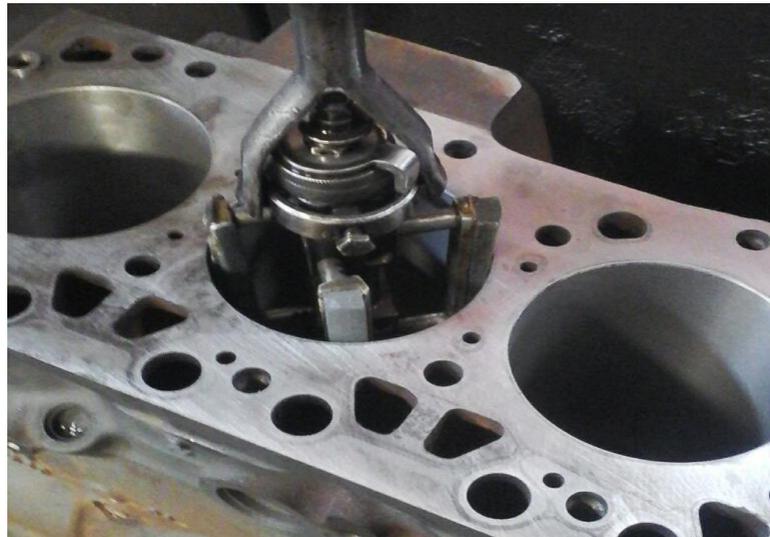
Propriedades técnicas	Valores
Peso bruto	1300 kg
Velocidade de avanço variáveis	0 a 44 cursos por minuto
Velocidade de movimento do mandril	17 m/min
Rotação constante do eixo brunidor	95 rpm

Fonte: Adaptada do catálogo da brunidora do modelo BH-200 (2017).

3.4 Ferramenta de brunimento

A ferramenta utilizada no procedimento pode ser classificada como uma ferramenta de múltiplas pedras de brunimento modelo STAND, em que a expansão acontece por meio de acionamento hidráulico.

Figura 41 – Ferramenta de brunimento de múltiplas pedras de brunimento



Fonte: Elaborada pela autora.

3.5 Abrasivo

O abrasivo utilizado neste processo é constituído de grãos de SiC com granulometria 150 (fina), da marca FERSAN. Classifica-se no grupo de abrasivos convencionais. As dimensões do abrasivo eram em polegadas dadas por 4 in de comprimento, $\frac{1}{2}$ in de largura e $\frac{1}{2}$ in de espessura, ou respectivamente em milímetros, dado por 101,6 mm, 12,7 mm e 12,7 mm. A nomenclatura do abrasivo não é disponibilizada pelo fornecedor.

Figura 42 – Modelo de pedra abrasiva utilizada

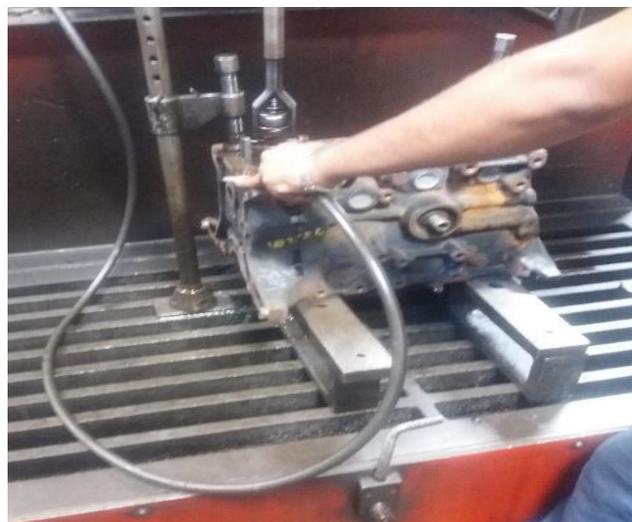


Fonte: Fersan Abrasivos (2017).

3.6 Fluido de brunimento

O fluido utilizado neste processo de brunimento foi óleo diesel, comumente empregado neste tipo de usinagem (AARON, 1995). Porém, atualmente, muitas são as ressalvas acerca do seu uso exclusivo. Parâmetros como pressão e vazão deste fluido não são controlados no processo realizado pela retífica em estudo. Este fluido é manipulado pelo operador em todo o processo e se acumula em um reservatório para que seja filtrado, posteriormente, bombeado e reutilizado.

Figura 43 – Operador manipulando a mangueira do fluido de brunimento.



Fonte: Elaborada pela autora.

3.7 Procedimento de brunimento

O primeiro passo para realização deste experimento foi a doação e disponibilização de um bloco de motor de propriedade da Retífica Central, tendo sido escolhido um bloco de motor KIA MOTORS, devido este tipo de modelo possuir um menor valor de mercado, logo sua disponibilização para a pesquisa aconteceria de maneira não prejudicial a empresa, mesmo este sendo um motor que possui características comuns a diversos outros blocos presentes em diferentes modelos de carros de passeio.

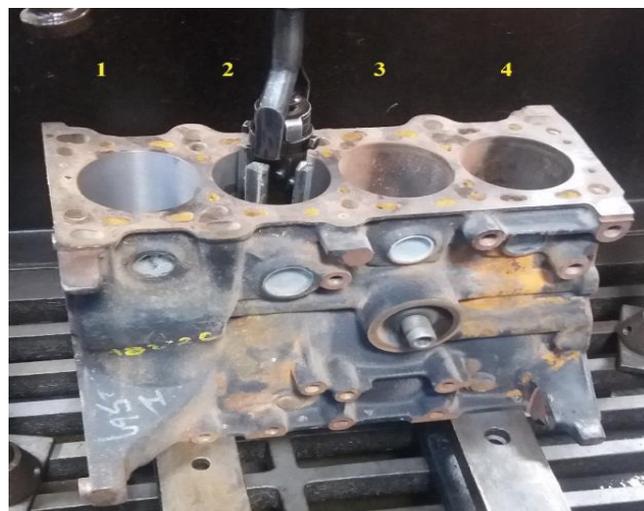
Inicialmente todos os cilindros do bloco foram broqueados pela BCF-200 da marca FAMOP, afim de se realizar uma limpeza superficial inicial, para que posteriormente os cilindros fossem brunidos pela brunidora BH-200. Os cilindros abaixo foram brunidos em diferentes velocidades de avanço para uma mesma velocidade de rotação do eixo brunidor, sendo esta 95rpm, conforme indicado na Tabela 2. A numeração dos cilindros aparece na Figura 44.

Tabela 2 – Relação entres as escalas de velocidades da utilizadas em cada cilindro

Número do cilindro	Escala da máquina	Velocidade de avanço
1	3	13,2 cursos por minuto
2	3,5	15,4 cursos por minuto
3	2,5	11 cursos por minuto
4	4	17,6 cursos por minuto

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 44 – Brunimento em cada cilindro numerado



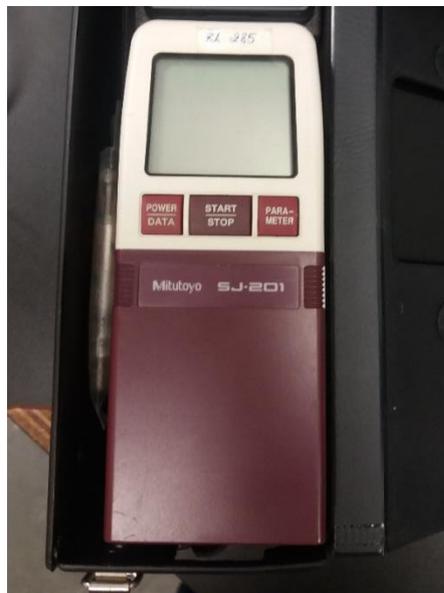
Fonte: Elaborada pela autora.

3.8 Análise de rugosidade

3.8.1 Rugosímetro

O rugosímetro utilizado foi cedido pelo Laboratório de Metrologia Mecânica (LAMETRO) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Trata-se de um equipamento portátil do modelo SJ-201 e da marca Mitutoyo, mostrado na Figura 45.

Figura 45 – Rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201



Fonte: Elaborada pela autora.

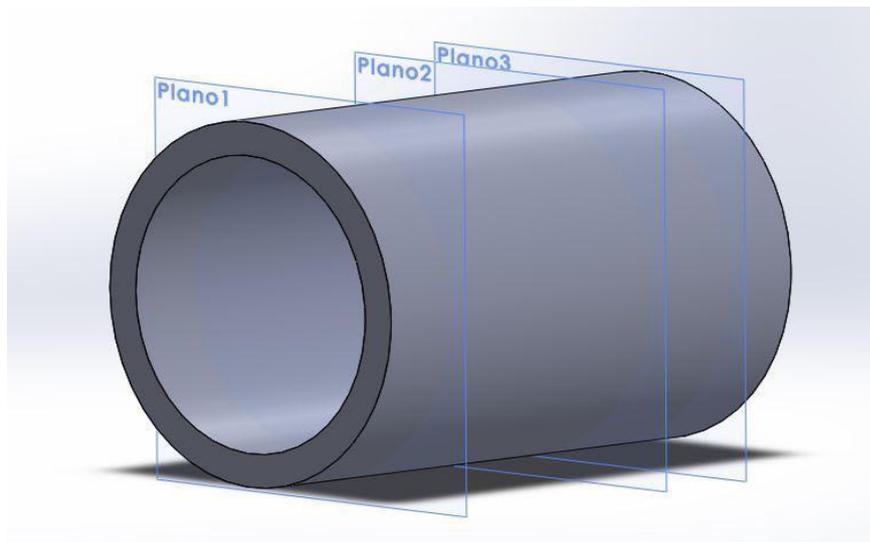
3.8.2 Escolha do *cut-off*

Para seleção do *cut-off*, tentou-se tomar, inicialmente, como referência o procedimento estabelecido pela norma ISO 4288:1996, em que é necessário se fazer uma medição preliminar com valor de *cut-off* sugerido de 0,8 mm com o objetivo de se determinar se o perfil de rugosidade da superfície é periódico ou aperiódico por meio de uma análise gráfica da presença de disformidades ou não. Entretanto, tendo em vista o rugosímetro utilizado, não foi possível realizar esse processo de análise gráfica do perfil. Com a finalidade de contornar esta dificuldade, embasando-se pelos valores mais baixos de rugosidade que o brunimento promove, segundo a norma DIN 4766 (1981 apud FACCIO, 2002) (Anexo 1), e adotando este processo como aperiódico segundo perfis de superfícies encontrados na maioria das pesquisas conduzidas nesse âmbito, escolheu-se o *cut-off* de 0,25 mm, consultando-se da Figura 38.

3.8.3 Procedimentos para obtenção da rugosidade

Feita a seleção do *cut-off*, definiu-se como as medições ocorreriam ao longo da camisa dos cilindros. Três planos de medição foram determinados, sendo eles o inicial (plano 1), o médio (plano 2) e o final (plano 3), ilustrados na imagem abaixo. É importante ressaltar que o plano inicial se encontrava a 20 mm da extremidade superior do cilindro, o plano médio se encontrava exatamente no médio do cilindro, enquanto, o plano final se encontrava a 20 mm da extremidade inferior. As distâncias das bordas foram arbitradas pelo conhecimento de outros processos de usinagem em que existe um período de acomodação da ferramenta a ser considerado.

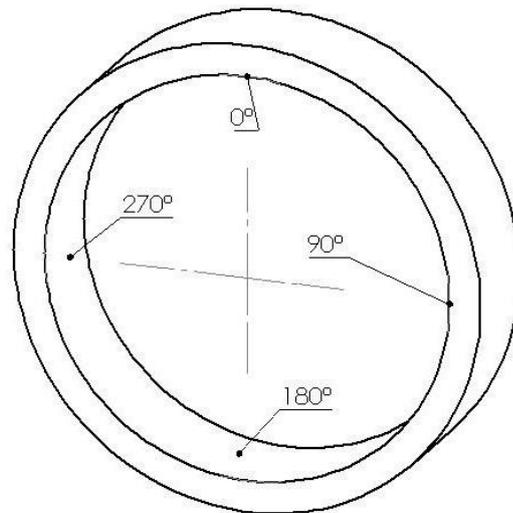
Figura 46 – Ilustração da camisa do cilindro mostrando os planos de medição



Fonte: Elaborada pela autora.

Em cada plano definido foram feitas quatro marcações que representavam os pontos 0° , 90° , 180° e 270° , ilustrado na Figura 47, e com o bloco posicionado inicialmente como na Figura 48. E em cada ponto desses, três medições foram feitas, totalizando 12 medições por plano, 36 por cilindro e 144 no total.

Figura 47 – Ilustração dos pontos de medição em um plano de medição



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 48 – Posicionamento inicial do bloco



Fonte: Elaborada pela autora.

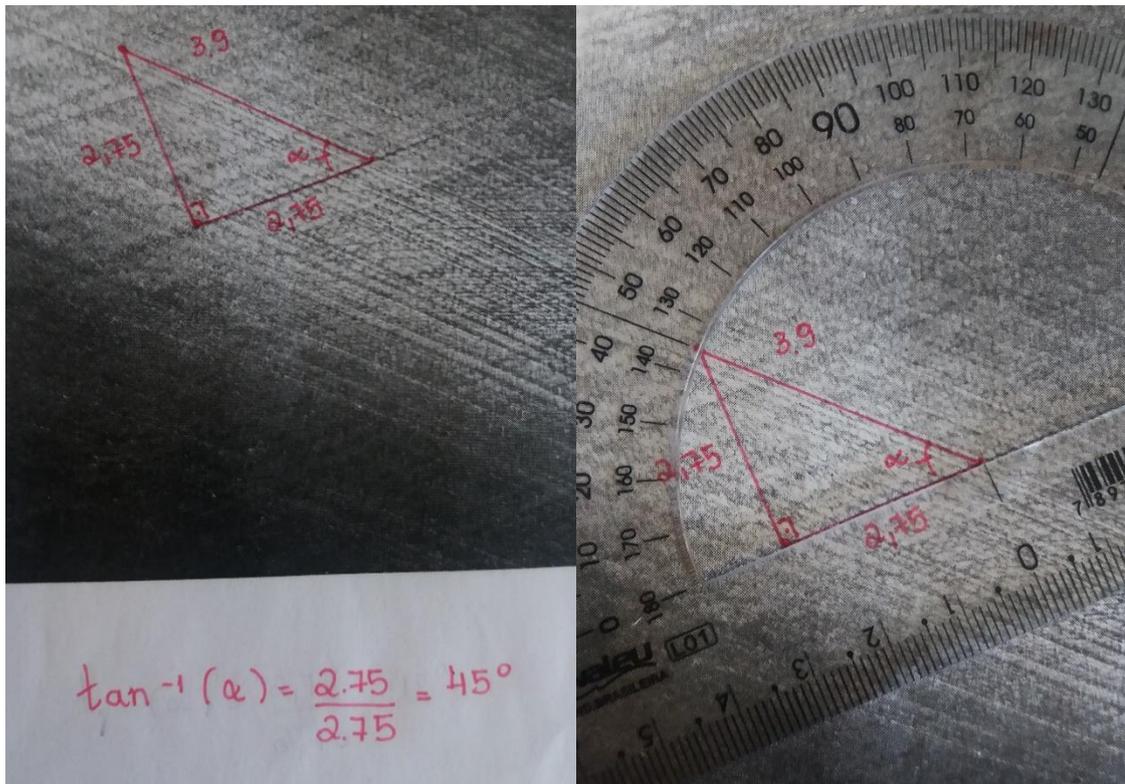
Os parâmetros de rugosidade, (R_a , R_z e R_q), eram todos disponibilizados pelo equipamento utilizado, ou seja, em cada uma das medições poder-se-ia fazer as leituras de todos estes parâmetros. O parâmetro R_a é um dos mais antigos e mais empregados no estudo em superfícies (FACCIO, 2012), tendo percebido que maioria das empresas apresentam os valores de rugosidades das suas camisas de cilindro dispostas relacionando principalmente esse

parâmetro escolheu-se, então, avaliá-lo. Outro parâmetro amplamente utilizado na indústria, principalmente na análise de superfícies de deslizamento como a camisa de cilindros é o R_z . Sendo assim, estes foram os principais parâmetros estudados. O parâmetro R_q não é muito utilizado pelas montadoras mas tem efeito de dar peso extra, já que é a média quadrática de R_a , foi então medido.

3.8.4 Procedimentos para obtenção do ângulo de cruzamento

A medição do ângulo de cruzamento foi realizada por meio de uma análise de imagens das superfícies brunidas. Posicionou-se uma câmera perpendicular ao Plano Médio, em todas as camisas. Onde capturou-se, então, a imagem das ranhuras em que, por meio de uma análise trigonométrica simples e, posteriormente, utilizando de um transferidor, o ângulo para cada velocidade de avanço foi medido.

Figura 49: Medição do ângulo de cruzamento para 17.6 cursos por minuto



Fonte: Elaborada pela autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Rugosidade nos planos de estudo

As médias aritméticas das medições que foram feitas em cada plano estão apresentadas nas tabelas abaixo. É importante salientar que em cada medição fez-se a leituras de três parâmetros (R_a , R_z e R_q).

Tabela 3 – Rugosidade para velocidade de avanço de 11 cursos por minuto

Planos estudados	R_a (μm)	R_z (μm)	R_q (μm)
Plano inicial	1,29	7,74	1,63
Plano médio	1,28	7,32	1,60
Plano final	1,31	7,53	1,65

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 4 – Rugosidade para velocidade de avanço de 13,2 cursos por minuto

Planos estudados	R_a (μm)	R_z (μm)	R_q (μm)
Plano inicial	1,19	8,13	1,57
Plano médio	0,89	5,69	1,68
Plano final	1,84	9,72	1,25

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 5 – Rugosidade para velocidade de avanço de 15,4 cursos por minuto

Planos estudados	R_a (μm)	R_z (μm)	R_q (μm)
Plano inicial	1,32	8,02	1,70
Plano médio	1,18	7,29	1,50
Plano final	2,49	12,85	3,10

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 6 – Rugosidade para velocidade de avanço de 17,6 cursos por minuto

Planos estudados	R_a (μm)	R_z (μm)	R_q (μm)
Plano inicial	1,94	10,61	1,98
Plano médio	1,53	9,04	1,96

Tabela 6 – Rugosidade para velocidade de avanço de 17,6 cursos por minuto (continua)

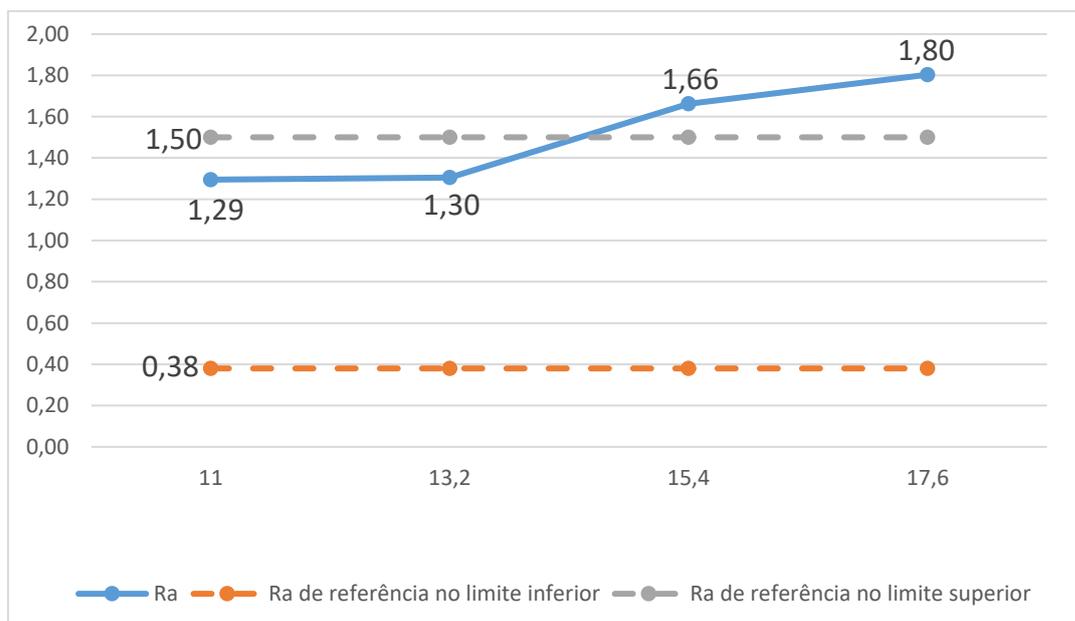
Planos estudados	R_a (μm)	R_z (μm)	R_q (μm)
Plano final	1,94	9,94	2,63

Fonte: Elaborada pela autora.

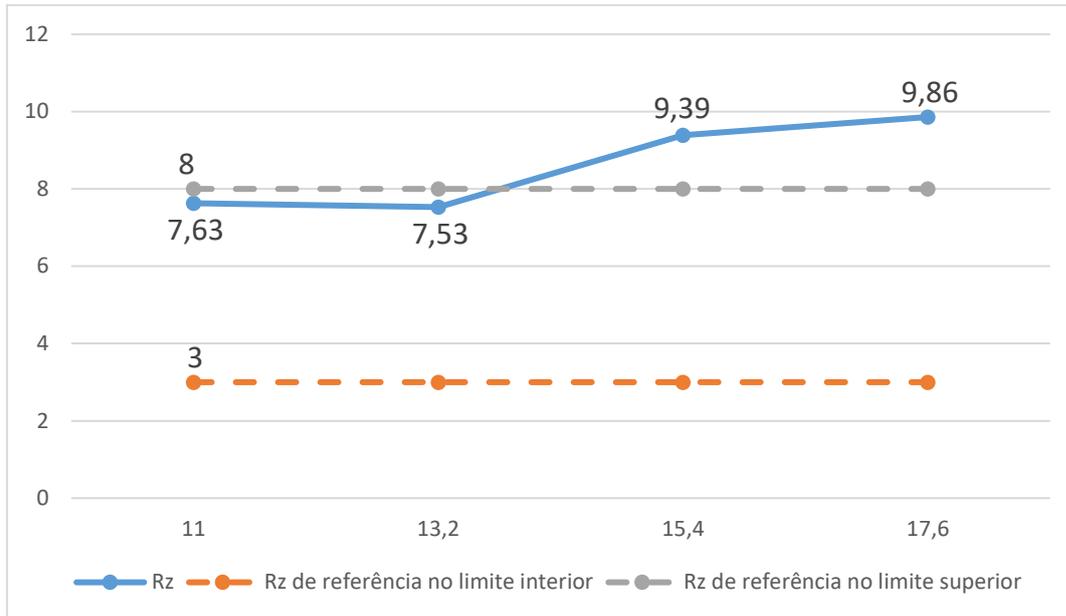
É interessante perceber que a média de todos os parâmetros de rugosidade (R_a , R_z e R_q) é menor no plano médio e maior nos planos próximos as extremidades. Este padrão foi notado em todas as camisas brunidas. Desta maneira, pode-se atribuir que uma possível razão para esta característica do processo de brunimento estudado, está relacionada a vibrações que a pedra de brunir está sujeita nas extremidades. Nessas regiões, nem todo o comprimento do abrasivo está em contato com a superfície brunida, promovendo maior instabilidade ao processo nestes pontos.

4.2 Rugosidades e as velocidades de avanço

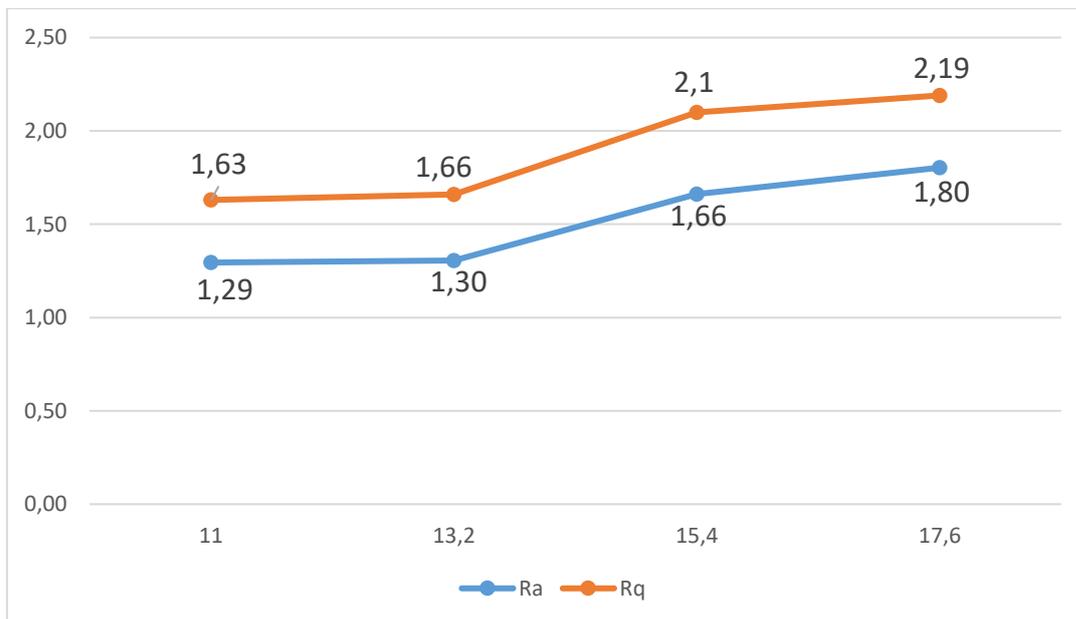
Nesta etapa do trabalho, fez-se uma média geral dos parâmetros de rugosidade do plano inicial, plano médio e plano final para cada camisa de cilindro. Ou seja, realizou-se uma média aritmética dos valores de rugosidade para as diferentes velocidades de avanço, mostradas nos gráficos abaixo. Em que no eixo das abscissas estão as velocidades de avanço e no eixo das ordenadas estão os parâmetros de rugosidade.

Gráfico 1 – R_a (μm) em diferentes velocidades de avanços (cursos por minuto)

Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 2 - R_z (μm) em diferentes velocidades de avanços (cursos por minuto)

Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 3 - R_q (μm) em diferentes velocidades de avanços (cursos por minuto)

Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando estes gráficos percebe-se que todos os parâmetros de rugosidade avaliados aumentaram à medida que a velocidade de avanço foi aumentada, corroborando com o que a literatura expõe. É interessante notar que as maiores disparidades aconteceram quando se mudava de 13,2 para 15,4 cursos por minuto, pontos estes que podem ser considerados de transição, segundo comparações com o Anexo 2 deste trabalho. Este anexo apresenta tabelado

os valores de rugosidade das camisas de cilindro das principais montadoras em determinados modelos de veículos, é importante ressaltar que estudos com modelos da KIA MOTORS não foram encontrados e não estão nesta tabela.

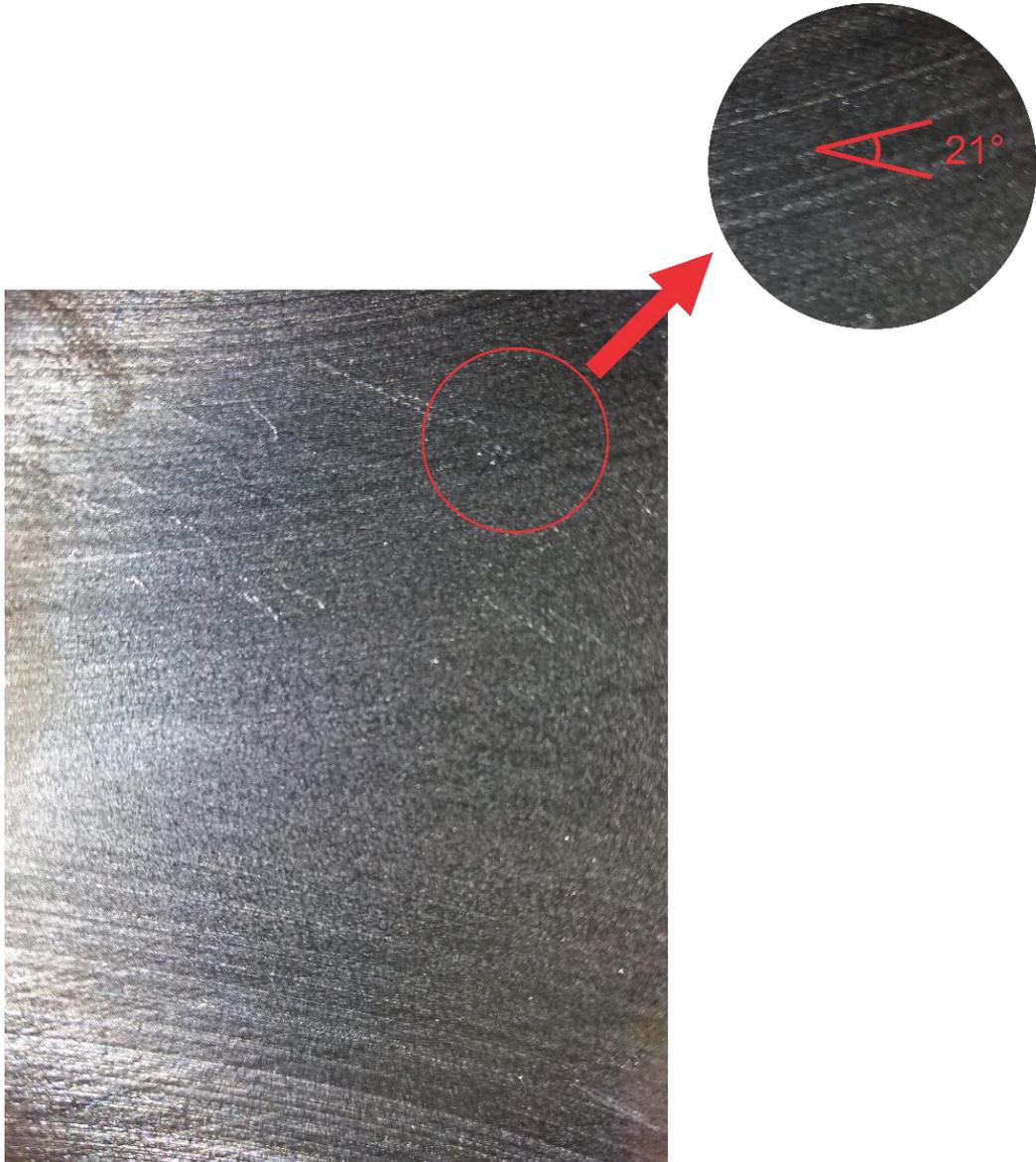
Os valores de rugosidade mostrados nos gráficos foram comparados com os expressos no Anexo 2 de maneira genérica, para diferentes variáveis do processo de brunimento como a granulometria do abrasivo, o tipo de motor e o ângulo de cruzamento. Assim, para brunimento em camisas de cilindro, segundo o expresso nesse anexo, o parâmetro de rugosidade R_a varia entre $0,38 \mu\text{m}$ e $1,5 \mu\text{m}$ e R_z varia entre $3 \mu\text{m}$ e $8 \mu\text{m}$. Observando, então, os gráficos, pode-se dizer que os valores de rugosidade medidos neste estudo se encontram dentro do intervalo apresentado apenas nas medições com velocidade de 11 e 13,2 cursos por minuto, de maneira que quando a velocidade de avanço chega a 15,4 e a 17,6 cursos por minuto, os parâmetros de rugosidade extrapolam o intervalo anteriormente indicado.

É interessante ressaltar que R_q não possuem valores de referência no Anexo 2 e funcionaria apenas como um parâmetro amplificador de erros para uma mesma medida. Sendo ele neste estudo em média 25% maior que R_a .

4.3 Ângulos de cruzamento e as velocidades de avanço

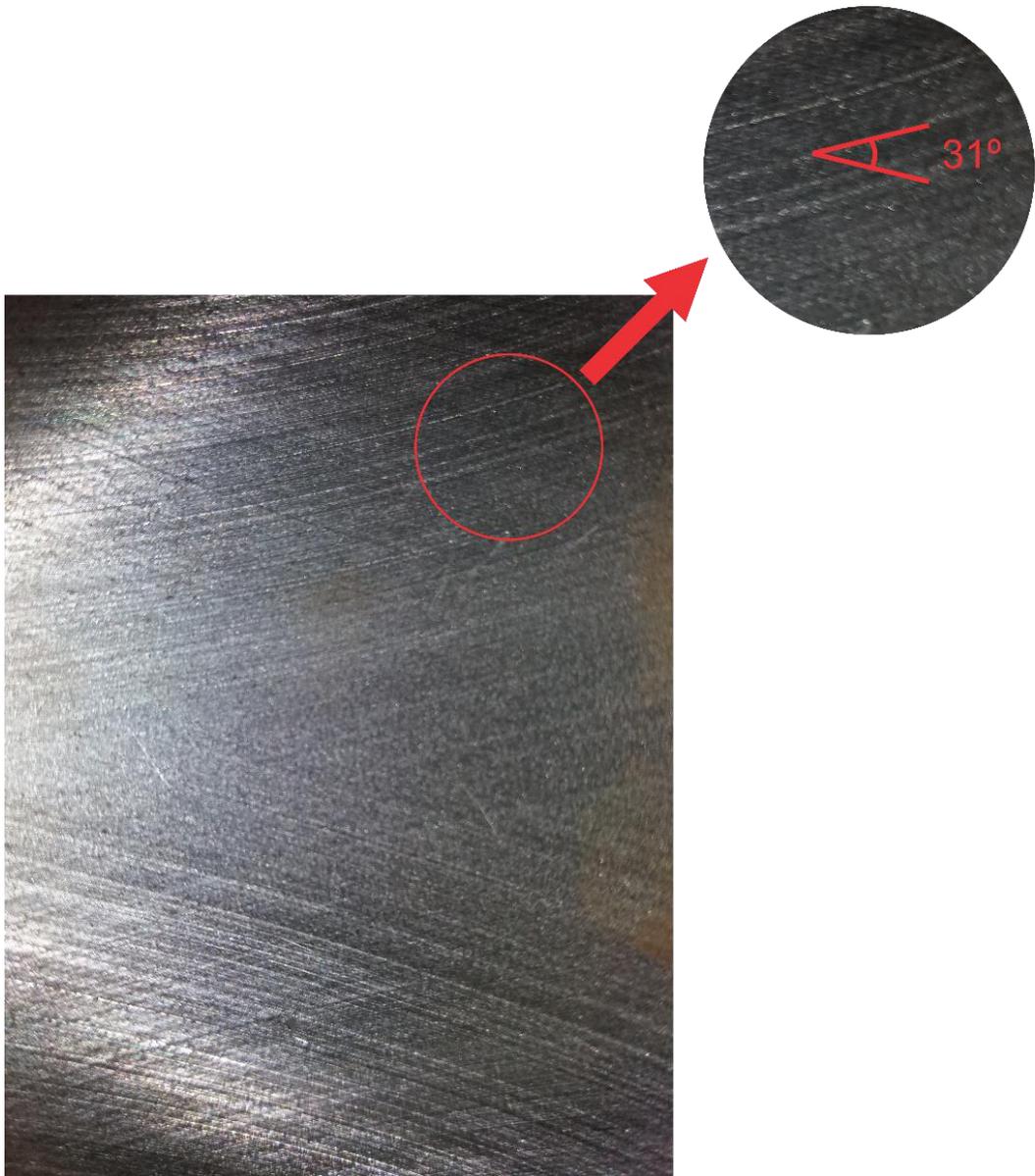
Por meio das imagens das superfícies geradas após o processo de brunimento, fez-se o estudo dos ângulos de cruzamento, o resultado é mostrado nas figuras seguintes.

Figura 50 – Superfície gerada com velocidade de avanço de 11 cursos por minuto



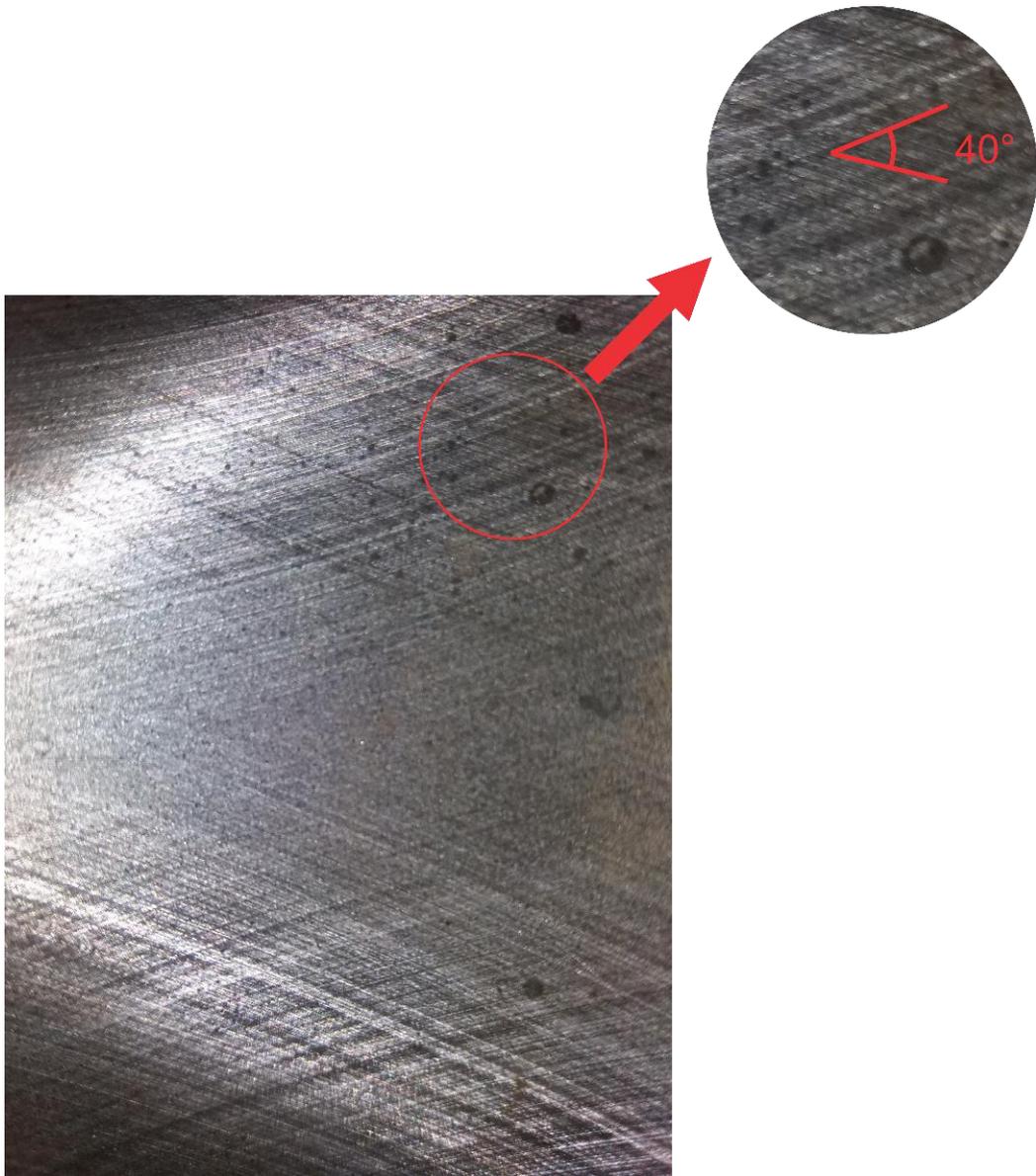
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 51 – Superfície gerada com velocidade de avanço de 13,2 cursos por minuto



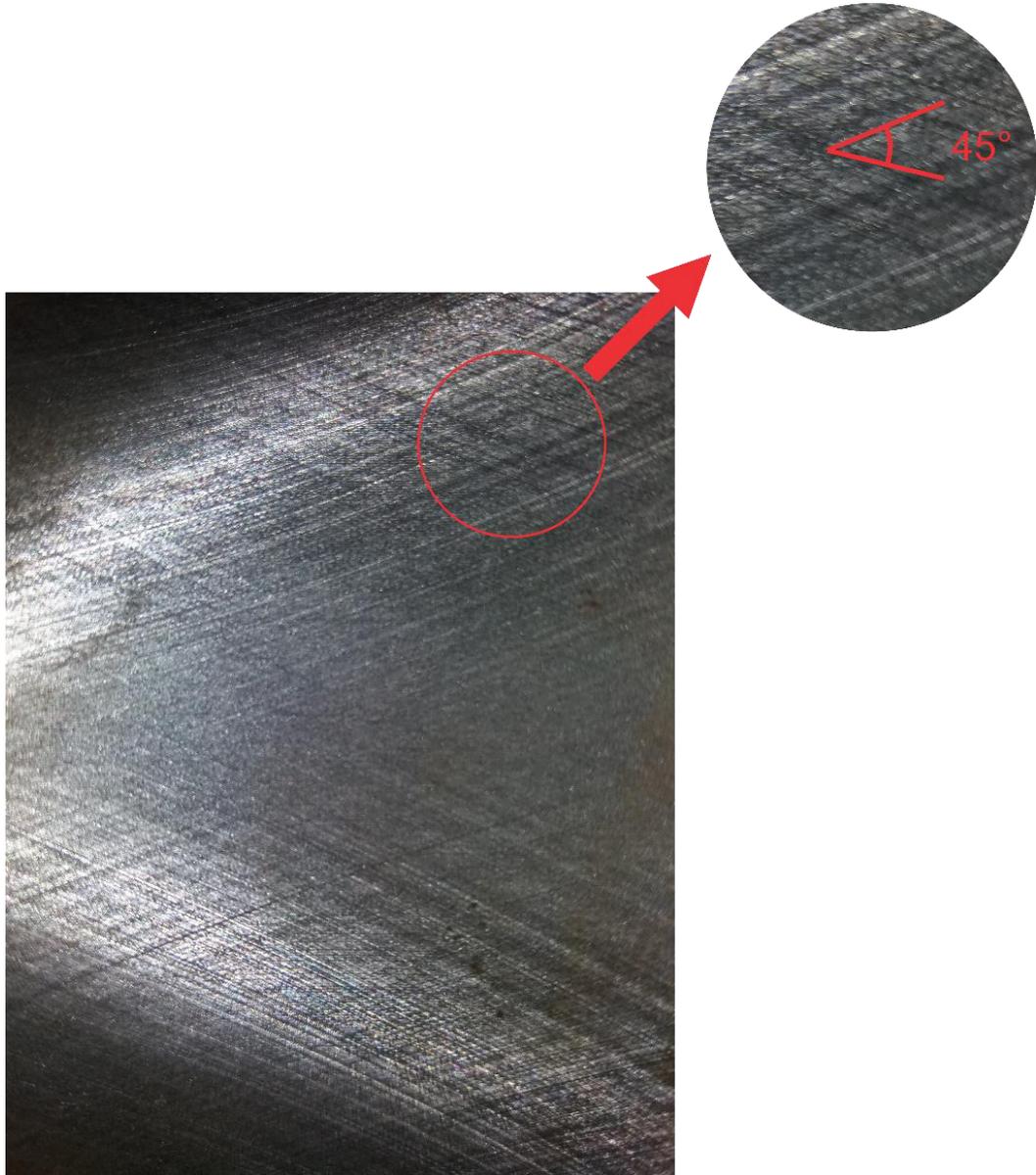
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 52 – Superfície gerada com velocidade de avanço de 15,4 cursos por minuto



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 53 – Superfície gerada com velocidade de avanço de 17,6 cursos por minuto



Fonte: Elaborada pela autora.

Tendo feito o estudo das superfícies foi possível perceber que a medida que se aumenta a velocidade de avanço, o ângulo de cruzamento também fica maior. Isso pode ser explicado entendendo-se a cinemática do processo como a composição de dois movimentos um de rotação e outro de avanço, realizados pela ferramenta em um percurso de subida e descida, como já exposto neste trabalho. Neste experimento, em que a rotação da ferramenta é constante, à medida que se aumenta as velocidades de avanço (V_a) mais se distancia a componente resultante (V_c) da direção horizontal, em que se encontra a componente de rotação, sendo assim mais o ângulo sofre abertura. Matematicamente, isso é facilmente percebido quando se observa

a equação 4 em que se percebe que o ângulo de cruzamento α é diretamente proporcional ao arco tangente do quociente entre V_a e V_u , em que a medida que se aumente V_a aumenta-se α .

É importante perceber que os valores encontrados para α (21° , 31° , 40° e 45°), nas diferentes velocidades de avanço estudadas, não se enquadram no intervalo de ângulo de cruzamento proveniente do Anexo 2 no brunimento de camisas de cilindro, que variam entre valores de 52° e 75° . Logo, analisando a relação da equação 5, nota-se que uma possível causa para não conformidade deste processo de brunimento esteja relacionada aos pequenos avanços proveniente de baixas velocidades de avanço que foram utilizadas nessa usinagem.

4.4 Análise das não conformidades e alternativas de melhorias

Quando comparado os valores encontrados nesta pesquisa com os intervalos provenientes do Anexo 2, ficam evidentes duas principais não-conformidades: uma sendo os altos valores de rugosidade em velocidade superiores a 13,2 cursos por minuto e a outra sendo os baixos valores de ângulo de cruzamento para todas as quatro velocidades de avanço estudadas. Sabe-se que a rugosidade pode ser influenciada por diversas grandezas do processo de brunimento, enquanto o ângulo de cruzamento, definido pela equação 5, para um tamanho fixo de diâmetro interno, sofre variação de apenas um parâmetro, o avanço, que é diretamente relacionado a velocidade de avanço. Portanto, para se aumentar os ângulos de cruzamento seria necessário, para esse motor, se aumentar a velocidade de avanço do processo. Porém, isso acarretaria um aumento ainda maior de rugosidade. Uma alternativa possível e pouco dispendiosa para melhoria deste processo seria a troca do abrasivo para um de maior granulometria, permitindo então que se trabalhe em velocidades mais elevadas obtendo valores aceitáveis de rugosidade, já que é conhecido da literatura que numerações altas de granulometria implicam em menores rugosidades. (Anexo 3).

Uma maneira mais dispendiosa de se melhorar o processo de maneira geral, não apenas para este tipo de motor, seria a aquisição de uma Brunidora com rotação variável do eixo brunidor. Sendo assim, seria possível a melhor escolha da rotação para o determinado diâmetro interno da camisa a ser brunida, permitindo o uso de rotações menores que 95 rpm, já que esta é uma velocidade considerada alta para o brunimento em camisas de cilindro, influenciado também em menores velocidades de corte e, possivelmente, menores rugosidades. Ou seja, a possibilidade de se variar rotação iria permitir uma maior flexibilidade do processo, adequando-se melhor os valores da velocidade de avanço. É importante ressaltar que a diminuição dos valores de rugosidade deve acontecer de maneira que as rugosidades dos planos

externos possam ficar dentro do intervalo indicado pelo Anexo 2, independente da alternativa de melhoria escolhida.

5 CONCLUSÃO

Por meio da análise dos resultados obtidos nos planos para todas as camisas dos cilindros, pode-se perceber que naqueles das extremidades todos os parâmetros de rugosidade aumentavam.

Observou-se também que a medida que se aumenta a velocidade de avanço, os parâmetros de rugosidade, objetos de estudo, também sofreram aumentos. Assim, ao compará-los com aqueles apresentados por importantes montadoras de automóveis, constatou-se que os parâmetros de rugosidade obtidos estão dentro do intervalo apenas quando se usina com as duas velocidades de avanço menores (11 e 13,2 cursos por minuto). Com base no exposto, concluiu-se que o processo não possui parâmetros de brunimento flexíveis para todas velocidades estudadas.

Além disso, pode-se perceber, por meio da análise dos ângulos de cruzamento das superfícies brunidas, que as velocidades de avanço usadas pela empresa estudada são velocidades baixas. Logo, concluiu-se que o processo realizado pela retífica acontecia em baixas velocidades.

Tendo em vista todos os resultados obtidos, pode-se concluir que o processo de brunimento realizado pela empresa em estudo, possui algumas não similitudes com os valores apresentados por montadoras consolidadas. Percebeu-se, então, a necessidade de se realizar alterações em determinadas grandezas para que o processo se adequasse melhor àquele comparado, concluindo que estas alterações podem ser menos dispendiosas, como a mudança da pedra de brunir, ou mais dispendiosa, como a mudança para uma máquina de brunir de rotação variável que permita melhorar ainda mais o processo, tornando-o mais flexível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARON, T. *et al.* Grinding, Honing and Lapping. ASM Handbook - Machining. **ASM International**, 1995.

ANDRETTA, C., **Brunimento para Recuperação das Camisas de Pistão dos Motores de Combustão Interna**. 2001. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000226585>>. Acesso em: 20 jan. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método de perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**, NBR ISO 4287. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **Execução de retífica de motores**, NBR 13032. 2009.

Automotive Repair & Diagnostic Help. **Reparo e diagnóstico automotivo**. Home Page. Disponível em: <<http://www.aalcar.com/library/honing98.htm>>. Acesso em: 02 abr. 2017.

BYRNES, J.; FISCHER, H., Honing with superabrasives. **Society of Manufacturing Engineers**. Dearborn, p. 1 – 6. 1992.

CABANETTES, F.; DIMKOVSKI, Z.; ROSÉN, B. Roughness variations in cylinder liners induced by honing tool's wear. **Elsevier**, 29 jan. 2015. Precision Engineering. p. 40 – 46. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/precision.com>>. Acesso em: 20 jan. 2017.

DAIMLER CHYSLER DO BRASIL Ltda. **Global training**. Home Page. Disponível em: <<http://www.daimlerchrysler.com.br/>>. Acesso em: 08 mar. 2017.

DINIZ, A.; MARCONDES, F.; COPPINI, L., **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8.ed. São Paulo, SP: Artliber Editora, 2013. 270 p.

F1 VISÃO TÉCNICA. **Lubrificação de motor**. Home Page. Disponível em: <<https://f1visaotecnica.wordpress.com/2011/03/27/como-funciona-a-lubrificacao-de-um-motor/>>. Acesso em: 08 mar. 2017.

FACCIO, I., **Investigação sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte**. 2002. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FAMOP. **Indústria de máquina para retifica de motores**. Home Page. Disponível em: <<http://www.famop.com.br/port/html/equipamentos/BCF200.html>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

FERREIRA C.; MAGALHÃES L., **Projeto Mecânico de Equipamento para Brunimento de Camisas de Cilindro**. 2009. 123 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2009.

FERSAN ABRASIVOS. **Distribuidora de produtor para retífica de motores**. Home Page. Disponível em: <http://loja.fersan.com.br/>. Acesso em 15 abr. 2017.

FILHO, P. A., **Rugosidade Superficial, 3º Seminário de Metrologia da Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2011. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAD9UAA/metrologia-rugosidade>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

FLORES, G., Diamond and CBN honing technology. **Society of Manufacturing Engineers**. Dearborn p. 1 – 9. 1998.

HAASIS, G., New honing potentialities with diamond tools. **Proceedings of industrial diamond conference**. London: Industrial Diamond Information Bureau. p. 37-50. 1975.

HAICAL, R., **Desenvolvimento de um sistema de controle de dinamômetro para testes de motores de combustão interna**. 2009. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2009.

INDÚSTRIA DE MÁQUINAS CHINELATTO. **Brunidora hidráulica de cilindros**. Home Page. Disponível em: <http://www.chinelatto.com.br/catalogos/BH-200_Brunidora_Pulidora_de_Cilindros__Cylinder_Honing_Machines.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2017.

KIA MOTORS. **Montadora Sul Coreana**. Home Page. Disponível em: <<https://www.kia.com.br/Veiculos/>>. Acesso em: 11 abr. 2017.

KÖNIG, W., **Tecnologia da fabricação II: Retificação, brunimento e lapidação**. Tradutor Walter Lindolfo Weingaertner. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1992, 381p.

LOJAS DE ROLAMENTO. **Loja virtual revendedora de rolamento**. Home Page. Disponível em: <http://www.lojarolamento.com.br/?page_id=296>. Acesso em: 08 mar. 2017.

MACHADO, A., **Avaliação da rugosidade em superfícies complexas**. 2009. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto Superior Tupy, Joinville, 2009.

MAHLE. Driven by performance. **Apostila de Treinamento**. 2007. 221 p. Disponível em: <http://www.maxxitraining.com.br/Documentos/livraria_do_conhecimento/MAHLE%20M anual-Tecnico-Curso-de-Motores-Miolo-846B-2.pdf> Acesso em: 06 mar. 2017.

MAHLE. Driven by performance. **Informações Técnicas**. 2016. 210 p. Disponível em: <

center/technical-materials/2016-04-08-mahle-catalogo-informacoes-tecnicas-2016.pdf>.
Acesso em: 10 abr. 2017.

MATINS J., **Motores de Combustão Interna**. 2.ed. Porto: Polindústria, 2006. 437 p.

MERCEDES BENZ DO BRASIL. **Apostila de treinamento técnico: matemática e metrologia**. 2006. 38 p.

MITUTOYO. **Manual técnico rugosímetro modelo SJ-210**. Disponível em:
<<http://www.mitutoyo.com.ar/nueva/lancamentos/pdf/MANUAL-SJ-210.pdf>>. Acesso em:
16 abr. 2017.

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

PAUCKSCH, E., **Honen**. Vieweg: Braunschweig e Wiesbaden. 11. ed., 1996. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/299770199_Honen >. Acesso: 05 abr. 2017.

PERES, R., **Caracterização do processo e verificação das grandezas de entrada no brunimento de curso longo do tipo “precidor”**. 1994. 157 p, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1994.

PINHO, J., **Estudo e determinação experimental dos parâmetros de funcionamento de uma válvula de controle**. 2009. 66 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto, 2009. Disponível em: <<http://www.repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59715/1/000134707.pdf>>. Acesso em: 08 mar. 2017.

REI ABRASIVO. **Empresa fabricante de abrasivos do grupo Weiler Corporation**. Home Page. Disponível em: < <http://www.reiabrasivos.com.br/informacoes-ao-usuario.htm>>. Acesso em: 18 mar. 2017.

SHERWOOD, M., SHU, L. M., Supporting Design for Remanufacture through Waste-Stream Analysis of Automotive Remanufacturers, **Annals of Cirp**, v. 49, p. 87 - 90, Jan. 2000.

STOETERAU, R., **Laboratório de Mecânica de Precisão**. Disponível em: <http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-23-U-2006-1brunim_lapid_jateam_lixam.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2017

SUNNEN PRODUCTS COMPANY. **Fabricante e distribuidora de equipamentos de acabamento e dimensionamento de furos**. Home Page. Disponível em: <<http://www.sunnen.com.br/details.aspx?NavID=789>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

VERSON, I., **Processos de corte em madeira, Universidade Federal do Paraná**. Home Page. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasivan/processoscorte_arquivos/Abrasivos.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2017.

VOLKSWAGEN DO BRASIL. **Pecas originais**. Home Page. Disponível em: <<http://www.vw.com.br/pt/servicos/pecas-originais.html>>. Acesso em: 08 mar. 2017.

VOSVIEWER. **Software livre para construir e visualizar redes bibliométricas**. Home Page. Disponível em: <<http://www.vosviewer.com>>. Acesso em: 20 de ago. 2016

YOKOHAMA, K. *et al.* Analyses of thermal deformation of workpieces in honing process: Dynamic expansion pressure of honing stone during honing. Bull. **Japan Society of Precision Engineering**. v. 21, n. 2, p. 119-124, 1987

ANEXO 1 – VALORES DE R_a ATINGÍVEIS PARA DIFERENTES PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Grupo Principal	Método de Manufatura Designação do Método	Valores atingíveis médios de R_a , em μm													
		0,006	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
Fundição	Fundição em molde de areia														
	Fundição em molde de casca														
	Fundição em coquilha														
	Fundição sob pressão														
	Fundição por cera perdida														
Conformação	Forjamento em matriz fechada														
	Laminação plana														
	Estampagem profunda de chapas														
	Extrusão														
	Estampagem														
	Laminação de perfis														
	Corte por serra														
Separação	Torneamento longitudinal														
	Faceamento														
	Abertura de ranhuras														
	Aplainamento														
	Contorno com plaina limadora														
	Alisamento														
	Furação														
	Mandrilhamento														
	Escareamento														
	Alargamento														
	Fresamento tangencial														
	Fresamento de topo														
	Brochamento														
	Limagem														
	Retificação circular longitudinal														
	Retificação circular de superfícies														
	Retificação circular de mergulho														
	Retificação superficial tangencial														
	Retificação superficial de topo														
	Retificação-polimento														
	Brunimento														
	Acabamento finíssimo														
	Polimento circular com disco														
	Polimento de superfícies com disco														
	Usinagem por ultra-som														
	Polimento														
	Jateamento de abrasivo														
Tamboreamento, rebarbação															
Corte por chama															

Legenda

Valores comuns
 Valores possíveis

Fonte: DIN 4766 (1981 apud FACCIO, 2002).

ANEXO 2 – ESPECIFICAÇÕES DE BRUNIMENTO

TABELA DE ESPECIFICAÇÕES DE BRUNIMENTO							
Aplicação	Número de Cilindros	Diâmetro [mm]	Curso [mm]	Ângulo de Cruzamento 2β [°]	Especificação da Rugosidade		Grão da pedra Aconselhada [mesh]
					Parâmetro	Valores [µm]	
FIAT DIESEL							
80	4	115	130	110 ~ 140	R_a	0.8 ~ 1.2	100 ~ 120
140	6	115	130	110 ~ 140	R_a	0.8 ~ 1.2	100 ~ 120
70	4	110	130	110 ~ 140	R_a	0.8 ~ 1.2	100 ~ 120
120	6	110	130	110 ~ 140	R_a	0.8 ~ 1.2	100 ~ 120
D11000, 180, 190R, 210 Mille	6	125	150	105 ~ 135	R_a	0.8 ~ 1.3	100 ~ 120
FIAT ALCOOL E GASOLINA							
Motor 1050	4	76	57.8	120	R_a	0.4 ~ 1.0	150 ~ 180
Motor 1300	4	76	71.5	120	R_a	0.4 ~ 1.0	150 ~ 180
Motor 1500	4	86.4	63.9	120	R_a	0.4 ~ 1.0	150 ~ 180
Alfa Romeo, 2300 B, T14	4	88	95	120	R_a	0.5 ~ 1.0	120 ~ 150
FORD DIESEL							
4600	3	111.76	111.76	135	R_a	0.38 ~ 0.96	180 ~ 220
6600	4	111.76	106.68	135	R_a	0.38 ~ 0.96	180 ~ 220
Cargo	6	111.80	111.80	135	R_a	0.38 ~ 0.96	180 ~ 220
FORD ALCOOL E GASOLINA							
Corcel 1300	4	73	77	110 ~ 140	R_a	0.5 ~ 1.0	120 ~ 150
Corcel I.4, Corcel II, Del Rey	4	75.3	77	110 ~ 140	R_a	0.6 ~ 1.0	120 ~ 150
Belina II 1.6, Escort, Del Rey	4	77	83.5	110 ~ 140	R_a	0.6 ~ 1.0	120 ~ 150
Ford 1.6 Cht	4	77	83.5	110 ~ 140	R_a	0.6 ~ 1.0	120 ~ 150
GENERAL MOTORS ALCOOL E GASOLINA							
Chevette 1.4	4	82	66.7	120 +/- 10	R_a	0.5 ~ 0.75	180
Chevette 1.6 e 1.6 S	4	82	75.7	120 +/- 10	R_a	0.5 ~ 0.75	180
Monza 1.6	4	79.98	79.5	120 +/- 10	R_a	0.5 ~ 1.5	180
Monza 1.8	4	84.78	79.5	120 +/- 10	R_a	0.5 ~ 1.5	180
Monza 2.0	4	86	86	120 +/- 10	R_a	0.5 ~ 1.5	180
Opala 2500	4	101.6	76.2	120	R_r	3.5 ~ 6.0	150
Opala 4100	6	98.42	89.7	120	R_r	3.5 ~ 6.0	150
MERCEDES BENZ							
OM-314	4	97	128	120	R_{3z}	3.0 ~ 5.0	150
OM-352	6	97	128	120	R_{3z}	3.0 ~ 5.0	150
OM-352-A	6	97	128	120	R_{3z}	3.0 ~ 5.0	150
OM-355/5	5	128	150	120	R_{3z}	3.0 ~ 5.0	120
OM-355/6	6	128	150	120	R_{3z}	3.0 ~ 5.0	120
OM-355/6-A	6	128	150	120	R_{3z}	3.0 ~ 5.0	150
OM-364	4	97.5	133	120	R_{3z}	3.0 ~ 5.0	150
OM-364/A	4	97.5	133	120	R_{3z}	3.0 ~ 5.0	150
OM-366	6	97.5	133	120	R_{3z}	3.0 ~ 5.0	150
OM-366-A	6	97.5	133	120	R_{3z}	3.0 ~ 5.0	150
OM-366-LA	6	97.5	133	120	R_{3z}	3.0 ~ 5.0	150
PERKINS							
3152	3	91.49	127	120 ~ 150	R_a	0.8 ~ 1.2	100 ~ 120
4203, D4203	4	91.49	127	120 ~ 150	R_a	0.8 ~ 1.2	100 ~ 120
4248	4	101.7	127	120 ~ 150	R_a	0.8 ~ 1.2	100 ~ 120
6358	6	104.15	114.3	120 ~ 150	R_a	0.8 ~ 1.2	100 ~ 120
6357	6	104.15	114.3	120 ~ 150	R_a	0.8 ~ 1.2	100 ~ 120
6357.2	6	104.15	114.3	120 ~ 150	R_a	0.8 ~ 1.2	100 ~ 120
VOLKSWAGEM							
1200-AR	4	77	64	100 ~ 140	R_z	3.0 ~ 8.0	120 ~ 150
1300-AR	4	77	69	100 ~ 140	R_z	3.0 ~ 8.0	120 ~ 150
1500-AR	4	83	69	100 ~ 140	R_z	3.0 ~ 8.0	120 ~ 150
1600-AR	4	85.5	69	100 ~ 140	R_z	3.0 ~ 8.0	120 ~ 150
1.6 AGUA	4	85.5	69	100 ~ 140	R_z	3.0 ~ 8.0	120 ~ 150
MD270	4	79.5	80	120 +/- 10	R_r	2.0 ~ 5.0	180
AP600 1.6	4	81	77.4	120 +/- 10	R_r	2.0 ~ 5.0	180
AO800 1.8	4	81	86.4	120 +/- 10	R_r	2.0 ~ 5.0	180
VW AP2000	4	82.5	92.8	120 +/- 10	R_r	2.0 ~ 5.0	180
MWM							
D226	4	105	120	115 ~ 135	R_a	0.8 ~ 1.2	120

Fonte: N.N. Albarus (sem data apud ANDRETTA, 2001).

ANEXO 3 – PARÂMETROS OPERACIONAIS PARA BRUNIMENTO DE METAIS E LIGAS

Hardness, HB	Honing stone material		Grit size, for surface roughness (R_a), μm ($\mu\text{in.}$)					Spindle motion				Working pressure		Cutting fluid ^(c)
	Type ^(b)	Grade ^(b) ANSI and ISO	0.025- 0.125 (1-5)	0.15- 0.25 (6- 10)	0.30- 0.50 (11- 20)	0.53- 0.75 (21- 30)	>0.75 (>30)	Rotation speed		Reciprocation speed		kPa	psi	
								m/min	sfn	m/min	sfn			
Carbon and alloy steels, wrought or cast														
100-300	A or B	Q	600	500	320	220	180	30-91	100- 300	5.5-33	18- 110	276	40	A
300-400	A or B	Q	500	500	320	220	180	27-84	90- 275	4.9-30	16- 100	276	40	A
45-52 HRC	A or B	N	500	400	280	220	120	24-76	80- 250	4.3-27	14- 90	414	60	A
52-58 HRC	A or B	K	500	320	280	120	120	23-69	75- 225	3.9-25	13- 82	517	75	A
58-60 HRC	B or A	I	400	280	220	120	120	20-69	65- 205	3.4-23	11- 75	517	75	A
>60 HRC	B or A	I	320	220	120	120	120	18-56	60- 185	3.0-21	10- 68	690	100	A
Tool steels, wrought														
150-300	A or B	Q	600	500	320	220	180	23-64	75- 210	4.0-23	13- 75	345	50	A
300-400	A or B	N	500	500	320	220	180	21-61	70- 200	3.7-22	12- 73	345	50	A
45-52 HRC	A or B	N	400	320	220	150	120	20-55	65- 180	3.4-20	11- 65	517	75	A
52-58 HRC	A or B	K	400	280	220	150	120	15-46	50- 150	2.7- 16.5	9-55	690	100	A
>60 HRC	B or A	I	320	220	180	120	120	15-46	50- 150	2.7- 16.5	9-55	830	120	A
Stainless steels, wrought and cast														
135-315	A or B	O	600	500	320	280	180	30-76	100- 250	5.5-27	18- 90	276	40	A
315-420	A or B	N	500	500	320	220	150	26-72	85- 235	4.6-26	15- 85	276	40	A
45-52 HRC	A or B	N	500	400	280	220	150	21-67	70- 220	3.7-24	12- 80	414	60	A
52-58 HRC	A or B	I	500	320	220	150	120	15-61	50- 200	2.7-23	9-75	517	75	A
Gray, ductile, and malleable cast iron														
110-315	C or D	Q	500	500	320	220	180	36.5- 100	120- 330	6.4- 36.5	21- 120	276	40	B
315-420	C or D	Q	500	500	320	220	180	26-91	85- 300	4.6- 33.5	15- 110	276	40	B
45-52 HRC	C or D	N	500	400	320	220	120	20-67	65- 220	3.4-25	11- 82	414	60	B
Austenitic (Ni-Resist), gray, and malleable cast irons														
100-270	C or D	J to S	500	400	280	220	120	38- 68.5	125- 225	12.2-24	40- 80	345	50	A
Aluminum alloys, wrought and cast														

Fonte: Aaron (1995).

ANEXO 4 – MEDIÇÕES DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

11 cursos por min 0° Início			11 cursos por min 90° Início			11 cursos por min 180° Início			11 cursos por min 270° Início		
Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg
1,30	8,19	1,75	1,43	8,88	1,85	1,16	7,18	1,48	1,33	6,81	1,48
1,23	7,68	1,59	1,45	9,08	1,87	1,19	7,37	1,51	1,36	7,29	1,65
1,12	7,03	1,45	1,41	8,85	1,84	1,17	7,17	1,48	1,36	7,29	1,65
Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1		
1,22	7,63	1,60	1,43	8,94	1,85	1,17	7,24	1,49	1,35	7,13	1,59
11 cursos por min 0° Meio			11 cursos por min 90° Meio			11 cursos por min 180° Meio			11 cursos por min 270° Meio		
Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg
1,62	8,42	1,98	0,96	5,63	1,19	1,24	6,81	1,48	1,59	9,63	2,06
1,40	7,65	1,72	0,85	4,89	1,06	1,24	6,94	1,49	1,57	8,99	2,01
1,22	7,90	1,58	0,86	5,17	1,07	1,24	6,96	1,49	1,60	8,80	2,04
Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1		
1,41	7,99	1,76	0,89	5,23	1,11	1,24	6,90	1,49	1,59	9,14	2,04
11 cursos por min 0° Final			11 cursos por min 90° Final			11 cursos por min 180° Final			11 cursos por min 270° Final		
Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg
1,58	8,89	2,00	1,20	6,78	1,47	1,43	7,77	1,74	1,03	6,72	1,39
1,57	8,26	1,97	1,17	6,75	1,46	1,42	7,65	1,74	1,07	6,96	1,39
1,59	8,80	2,02	1,14	6,67	1,42	1,44	8,07	1,79	1,07	6,98	1,40
Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1		
1,58	8,65	2,00	1,17	6,73	1,45	1,43	7,83	1,76	1,06	6,89	1,39

Fonte: Elaborada pela própria autora

13,2 cursos por min 0° Início			13,2 cursos por min 90° Início			13,2 cursos por min 180° Início			13,2 cursos por min 270° Início		
Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg
1,08	7,59	1,48	1,21	7,95	1,58	0,95	6,55	1,26	1,59	10,93	2,03
1,04	6,46	1,35	1,11	7,32	1,50	0,98	6,23	1,28	1,62	10,70	2,08
0,98	9,25	1,40	1,17	7,64	1,57	0,95	6,20	1,24	1,62	10,70	2,09
Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1		
1,03	7,77	1,41	1,16	7,64	1,55	0,96	6,33	1,26	1,61	10,78	2,07
13,2 cursos por min 0° Meio			13,2 cursos por min 90° Meio			13,2 cursos por min 180° Meio			13,2 cursos por min 270° Meio		
Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg
0,94	5,69	1,17	0,90	6,24	1,24	0,74	5,13	0,98	0,95	5,93	1,25
0,86	5,16	1,07	0,88	6,23	1,23	0,78	4,94	1,03	0,98	6,10	1,31
0,92	5,44	1,14	0,89	6,31	1,24	0,80	4,81	1,04	1,00	6,34	1,32
Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1		
0,91	5,43	1,13	0,89	6,26	1,24	0,77	4,96	1,02	0,98	6,12	1,29
13,2 cursos por min 0° Final			13,2 cursos por min 90° Final			13,2 cursos por min 180° Final			13,2 cursos por min 270° Final		
Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg
1,07	8,55	1,50	1,05	7,01	1,39	1,88	8,47	2,04	3,39	14,62	4,02
1,10	9,48	1,57	1,05	6,91	1,40	1,81	8,18	2,11	3,44	14,95	4,08
1,09	8,74	1,52	1,04	6,89	1,39	1,73	7,97	2,02	3,38	14,88	4,01
Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1		
1,09	8,92	1,53	1,05	6,94	1,39	1,81	8,21	2,06	3,40	14,82	4,04

Fonte: Elaborada pela própria autora

ANEXO 4 – MEDIÇÕES DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

15,4 cursos por min 0° Início			15,4 cursos por min 90° Início			15,4 cursos por min 180° Início			15,4 cursos por min 270° Início		
Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg
1,49	8,93	1,85	1,13	7,86	1,55	1,14	7,46	1,53	1,53	7,95	1,88
1,52	9,33	1,92	1,14	7,86	1,55	1,17	7,46	1,56	1,51	8,06	1,86
1,38	9,05	1,87	1,14	7,77	1,57	1,12	6,40	1,35	1,52	8,13	1,89
Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1		
1,46	9,10	1,88	1,14	7,83	1,56	1,14	7,11	1,48	1,52	8,05	1,88
15,4 cursos por min 0° Meio			15,4 cursos por min 90° Meio			15,4 cursos por min 180° Meio			15,4 cursos por min 270° Meio		
Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg
1,11	6,40	1,36	1,56	10,15	2,06	0,89	5,22	1,11	1,10	7,12	1,40
0,96	6,37	1,26	1,57	10,10	2,05	0,91	5,24	1,13	1,13	6,90	1,42
1,21	6,77	1,50	1,58	10,21	2,08	0,92	5,46	1,15	1,17	7,51	1,49
Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1		
1,09	6,51	1,37	1,57	10,15	2,06	0,91	5,31	1,13	1,13	7,18	1,44
15,4 cursos por min 0° Final			15,4 cursos por min 90° Final			15,4 cursos por min 180° Final			15,4 cursos por min 270° Final		
Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg
2,73	15,04	3,45	2,04	11,56	2,67	2,76	12,88	3,30	2,30	12,04	2,94
2,72	15,16	3,45	2,12	11,55	2,72	2,79	12,96	3,32	2,36	12,14	2,95
2,82	14,07	3,40	2,12	11,60	2,72	2,81	13,13	3,34	2,35	12,10	2,98
Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1		
2,76	14,76	3,43	2,09	11,57	2,70	2,79	12,99	3,32	2,34	12,09	2,96

Fonte: Elaborada pela própria autora

17,6 cursos por min 0° Início			17,6 cursos por min 90° Início			17,6 cursos por min 180° Início			17,6 cursos por min 270° Início		
Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg
1,47	8,47	1,84	1,70	11,61	2,35	2,71	12,93	1,53	1,85	9,52	2,20
1,46	8,03	1,83	1,73	11,63	2,39	2,69	13,07	1,56	1,87	9,23	2,22
1,45	9,02	1,88	1,75	11,49	2,41	2,71	13,08	1,35	1,88	9,27	2,23
Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1		
1,46	8,51	1,85	1,73	11,58	2,38	2,70	13,03	1,48	1,87	9,34	2,22
17,6 cursos por min 0° Meio			17,6 cursos por min 90° Meio			17,6 cursos por min 180° Meio			17,6 cursos por min 270° Meio		
Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg
1,55	8,81	1,92	1,36	9,12	1,78	1,74	10,33	2,28	1,46	8,16	1,83
1,46	8,49	1,88	1,37	8,86	1,77	1,75	10,12	2,30	1,42	7,68	1,70
1,73	10,41	2,28	1,38	8,95	1,79	1,73	9,99	2,26	1,41	7,51	1,68
Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1		
1,58	9,24	2,03	1,37	8,98	1,78	1,74	10,15	2,28	1,43	7,78	1,74
17,6 cursos por min 0° Final			17,6 cursos por min 90° Final			17,6 cursos por min 180° Final			17,6 cursos por min 270° Final		
Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg	Ra	Rz	Rg
1,54	8,01	1,92	1,96	10,41	2,38	2,58	11,45	3,01	1,43	8,44	2,94
1,85	9,94	2,28	2,00	11,01	2,44	2,59	11,55	3,02	1,46	7,64	2,95
1,72	10,46	2,18	2,04	10,91	2,47	2,59	11,52	3,01	1,52	7,92	2,98
Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1			Médias Parcial 1		
1,70	9,47	2,13	2,00	10,78	2,43	2,59	11,51	3,01	1,47	8,00	2,96

Fonte: Elaborada pela própria autora