

NICOLAS SANTANA CAMARGO

**Análise de custo e rugosidade em processo de retificação cilíndrica externa de mergulho
de aço ABNT 8620 para diferentes tipos de rebolos**

Guaratinguetá - SP

2017

Nicolas Santana Camargo

**Análise de custo e rugosidade em processo de retificação cilíndrica externa de mergulho
de aço ABNT 8620 para diferentes tipos de rebolos**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

Guaratinguetá - SP

2017

C172a Camargo, Nicolas Santana
Análise de custo e rugosidade em processo de retificação cilíndrica externa de mergulho de aço ABNT 8620 para diferentes tipos de rebolos / Nicolas Santana Camargo – Guaratinguetá, 2017.
78 f : il.
Bibliografia: f. 76-78

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

1. Usinagem. 2. Rebolos. 3. Óxido de alumínio. I. Título

CDU 621.9


Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

NICOLAS SANTANA CAMARGO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

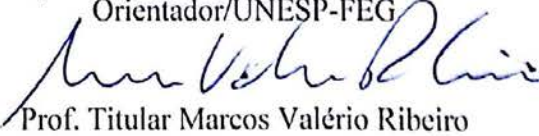
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS

Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Titular Marcos Valério Ribeiro
UNESP-FEG


Prof. Msc. Taise Azevedo de Souza
UNESP-FEG

Dezembro 2017

dedico este trabalho
de modo especial, à minha esposa, família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

aos meus pais *Janui Camargo e Ana Lúcia de Jesus Santana*, e ao meu irmão *Janui Raony Camargo*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos,

à minha amada esposa *Débora Maria Leticia Fonseca Camargo*, pela paciência e apoio incondicional neste desafio,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá pela dedicação e presteza no atendimento,

aos companheiros de trabalho *Júlio César Cursino, Marcos Antonio Miranda, Olten de Assis, Pâmela Gabriela Corrêa e Silva, Carlos Duarte, Peterson Migotto e Rodrigo Silva* pela colaboração e auxílio na obtenção dos resultados.

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo.”

Winston Churchill

RESUMO

A retificação é o processo de acabamento muito utilizado na indústria atual devido à sua alta produtividade em grandes lotes de peças que necessitam ter baixa rugosidade e tolerância dimensional e geométrica apertadas. Entretanto, é necessário que este processo seja capaz de atender as especificações do produto de forma a eliminar perdas e reduzir custos no processo. Para tanto, neste trabalho foram analisados dois rebolos convencionais com diferentes composições e materiais de grão abrasivo, o primeiro composto por óxido de alumínio cerâmico (Cubitron®) e óxido de alumínio branco e o segundo de óxido de alumínio cerâmico (SG). Utilizando as mesmas condições de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 8620 em processo real utilizado na indústria, o objetivo do trabalho foi tornar o processo capaz de atender à rugosidade especificada no produto ($0,5 \mu\text{m Ra}$) com menor custo de fabricação. Desta forma, foi possível perceber que apesar do rebolo de óxido de alumínio cerâmico (Cubitron®) ter apresentado melhor acabamento superficial, a relação custo benefício foi melhor no rebolo de óxido de alumínio cerâmico (SG). Os dois rebolos testados apresentaram melhores resultados de acabamento superficial em relação ao rebolo utilizado no processo atual (óxido de alumínio monocristalino).

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem por abrasão. Rebolos convencionais. Óxido de alumínio cerâmico. Capabilidade.

ABSTRACT

Grinding is the most commonly used finishing process in current industry due to its high productivity in large batches of parts that need to have low roughness and tight dimensional and geometrical tolerance. However, this process needs to be able to meet product specifications in order to eliminate losses and reduce process costs. Therefore, two conventional grinding wheels with different abrasive grains materials and compositions were analyzed, the first one was composed of ceramic aluminum oxide (Cubitron®) and white aluminum oxide and the second one was composed of ceramic aluminum oxide (SG). Using the same conditions of external cylindrical plunge grinding of ABNT 8620 steel in real process used in industry, the work objective was to make the process capable of meeting the product specified roughness ($0.5 \mu\text{m Ra}$) with lower manufacturing costs. Thus, it was possible to notice although the ceramic aluminum oxide (Cubitron®) grinding wheel got a better surface finish, the cost benefit ratio was better in the ceramic aluminum oxide (SG) grinding wheel. The two tested grinding wheels got better surface finish results compared to the grinding wheel used in the present process (monocrystalline aluminum oxide).

KEYWORDS: Abrasive machining. Conventional wheels. Ceramic aluminum oxide. Capability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Os seis elementos envolvidos no processo de retificação	17
Figura 2 – Exemplos das quatro formas básicas de retificação.....	19
Figura 3 – Classificação do processo de retificação segundo a superfície a ser usinada.....	19
Figura 4 – Representação da retificação cilíndrica externa de mergulho entre pontas.....	20
Figura 5 – Representação da profundidade de corte (<i>a</i>) e comprimento de contato (<i>lc</i>)	23
Figura 6 – Representação: espessura de cavaco não deformado e espessura equivalente.....	26
Figura 7 – Óxido de alumínio branco	29
Figura 8 – Exemplificação da classificação de grãos por peneiras	31
Figura 9 – Parâmetros de dressagem	34
Figura 10 – Representação da operação com dressador rotativo	37
Figura 11 – Relação acabamento rel. e força normal relativa x <i>Crush ratio</i>	38
Figura 12 – Perfis de rugosidade e ondulação de uma superfície	42
Figura 13 – Características de transmissão dos perfis de rugosidade e ondulação	43
Figura 14 – Posicionamento da linha média	43
Figura 15 – Comprimentos de análise utilizados para determinação da rugosidade.....	44
Figura 16 – Rugosidade média aritmética (<i>Ra</i>)	45
Figura 17 – Representação de processo com e sem causas especiais atuantes	47
Figura 18 – Representação do diagrama causa efeito.....	49
Figura 19 – Fluxograma do processo de fabricação do corpo de prova	51
Figura 20 – Representação do tratamento térmico de cementação.....	51
Figura 21 – Corpo de prova do experimento, eixo bruto	52
Figura 22 – Imagem ilustrativa da máquina retificadora Schaudt GmbH	53
Figura 23 – Detalhes do processo de retificação	54
Figura 24 – Rolo dressador Stroh utilizado na máquina.....	56
Figura 25 – Diagrama de causa e efeito (Ishikawa)	57
Figura 26 – Aparato para medição da rugosidade	61
Figura 27 – Pontos de medição da rugosidade	62
Figura 28 – Carta de controle para Rugosidade (<i>Ra</i>) do rebolo ALCAR 2A 80.2 L5V1.....	63
Figura 29 – Gráfico de probabilidade normal rebolo ALCAR 2A 80.2 L5V1	64
Figura 30 – Estudo de capacidade do rebolo ALCAR 2A 80.2 L5V1	64
Figura 31 – Carta de controle para Rugosidade (<i>Ra</i>) do rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V165	
Figura 32 – Gráfico de probabilidade normal rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1	66

Figura 33 – Gráfico de controle para as amostras do rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1....	66
Figura 34 – Estudo de capacidade do rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1	67
Figura 35 – Carta de controle para Rugosidade (Ra) do rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N .	67
Figura 36 – Gráfico de probabilidade normal rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N.....	68
Figura 37 – Gráfico de controle para as amostras do rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N	68
Figura 38 – Estudo de capacidade do rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N.....	69

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Dureza e Índice de Friabilidade dos abrasivos de óxido de alumínio	28
Quadro 2 – Escala granulométrica.....	31
Quadro 3 – Classificação do grau de dureza dos rebolos	32
Quadro 4 – Classificação dos rebolos de acordo com a estrutura	32
Quadro 5 – Fluidos de corte utilizados na indústria e comparação de suas características	39
Quadro 6 – Composição química do aço ABNT 8620	41
Quadro 7 – Valor de <i>cut-off</i> para perfis aperiódicos.....	45
Quadro 8 – Composição química do aço ABNT 8620, utilizado nos experimentos.....	50
Tabela 1 – Ferramentas de corte utilizadas no experimento	55
Tabela 2 – Parâmetros de corte para o estudo de capacidade do rebolo	57
Tabela 3 – Parâmetros de corte para teste do rebolo grão cerâmico (Cubitron® e SG).....	59
Tabela 4 – Cálculo do custo por unidade rebolo ALCAR 2A 80.2 L5V1	71
Tabela 5 – Cálculo do custo por unidade rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1	71
Tabela 6 – Cálculo do custo por unidade rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	RETIFICAÇÃO	16
3.1.1	A base do processo de retificação.....	17
3.1.2	Tipos de retificação.....	18
3.1.2.1	Retificação cilíndrica externa de mergulho	20
3.1.2.2	Parâmetros do processo de retificação cilíndrica	20
3.1.2.2.1	<i>Velocidade de corte ou velocidade tangencial do rebolo (V_s)</i>	<i>21</i>
3.1.2.2.2	<i>Velocidade tangencial da peça (V_w)</i>	<i>21</i>
3.1.2.2.3	<i>Velocidade de mergulho ou velocidade de avanço do rebolo (V_f)</i>	<i>22</i>
3.1.2.2.4	<i>Profundidade de corte real (a_e)</i>	<i>22</i>
3.1.2.2.5	<i>Comprimento do arco de contato (l_g).....</i>	<i>23</i>
3.1.2.2.6	<i>Taxa de remoção de material (Q) e taxa de remoção de material específica (Q') ...</i>	<i>24</i>
3.1.2.2.7	<i>Espessura equivalente de corte (h_{eq})</i>	<i>25</i>
3.1.3	Rebolos.....	26
3.1.3.1	Codificação de rebolos	27
3.1.3.2	Tipos e combinações dos grãos abrasivos	27
3.1.3.3	Granulometria e combinações dos abrasivos.....	30
3.1.3.4	Graus de dureza.....	31
3.1.3.5	Estrutura ou porosidade	32
3.1.3.6	Tipos de liga.....	33
3.1.4	Dressagem de rebolos convencionais	33
3.1.4.1	Dressadores rotativos.....	36
3.1.5	Lubrificação e refrigeração em retificação.....	38
3.1.5.1	Óleos Minerais	39
3.1.5.2	Óleos Emulsionáveis	40
3.1.5.3	Fluidos Semi-sintéticos.....	40
3.1.5.4	Fluidos Sintéticos	40
3.2	AÇO ABNT 8620.....	41
3.3	QUALIDADE SUPERFICIAL	41
3.3.1	Medição da rugosidade.....	42

3.3.1.1	Medição da rugosidade por contato.....	43
3.3.1.1.1	<i>Linha média</i>	43
3.3.1.1.2	<i>Comprimentos ou percursos de medição</i>	44
3.3.1.1.3	<i>Comprimentos de amostragem (Cut-off)</i>	44
3.3.1.1.4	<i>Rugosidade Média (Ra)</i>	45
3.3.2	Rugosidade e retificação	46
3.4	CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO	46
3.4.1	Índice de capacidade de processo	48
3.4.2	Diagrama de causa e efeito	49
4	MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1	MATERIAIS	50
4.1.1	Corpo de prova	50
4.1.2	Máquina retificadora	52
4.1.2.1	O processo de retificação empregado	53
4.1.3	Ferramentas de corte	54
4.1.4	Dressagem	55
4.1.5	Lubrificação e refrigeração da peça	56
4.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	56
4.2.1	Delimitação das variáveis de impacto	56
4.2.2	Análise e ajustes do processo	57
4.2.3	Estudo de capacidade do processo atual para rugosidade (Ra)	57
4.2.4	Experimentos com as ferramentas de corte	58
4.2.4.1	Rebolosde grão cerâmico (Cubitron® e SG)	59
4.2.5	Medição da rugosidade (Ra)	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1	CAPABILIDADE DO PROCESSO ATUAL PARA RUGOSIDADE	63
5.2	RESULTADOS DOS TESTES DE CAPABILIDADE	65
5.2.1	Rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1	65
5.2.2	Rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N	67
6	CONCLUSÕES	74
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem de aços ainda são predominantes na indústria. A retificação é um processo de fabricação muito importante, quase tudo que é fabricado já foi processado por máquinas que devem sua precisão às operações abrasivas, e a retificação é o processo de usinagem com geometria não definida que mais se utiliza na indústria.

De todos os processos de usinagem de uso comum a retificação é, sem dúvida, o menos compreendido e mais negligenciado na prática. Esta situação parece ter sua origem na crença equivocada de que o processo é muito complicado de se compreender. Devido à multiplicidade de pontos de corte e sua geometria irregular, as altas velocidades de corte e as pequenas profundidades de corte que variam de grão a grão, qualquer tentativa de análise dos mecanismos de retificação pode parecer uma tarefa improvável.

O processo de retificação tem sido objeto de extensa pesquisa, especialmente durante os últimos 50 anos. Por causa do grande número de grãos abrasivos envolvidos, verificou-se que o processo pode ser caracterizado pela ação de corte de um grão "médio", o que torna mais fácil a análise e interpretação dos dados experimentais. Juntamente com outros processos de usinagem, a retificação foi transformada de uma "arte prática" para uma "ciência aplicada".

Na indústria atual, reduzir os custos de produção é fundamental para tornar o produto competitivo. Para o processo de retificação, descartar uma peça por não conformidade a qualquer característica especificada, significa desperdiçar todos os processos anteriores agregados ao produto, como torneamento, fresamento, furação, tratamento térmico, entre outros.

Este trabalho foi motivado por um problema real de impossibilidade da ferramenta de corte atual (rebolo óxido de alumínio monocristalino) atender às especificações no que diz respeito à rugosidade da peça, eixo secundário da transmissão automotiva fabricado de aço ABNT 8620. A rugosidade (Ra) especificada para o produto é de 0,50 μm , o rebolo convencional de óxido de alumínio monocristalino é capaz de produzir peças com rugosidade (Ra) média de 0,53 μm neste processo.

O presente trabalho é uma aplicação prática de experimentos, análise e tomada de decisão envolvendo processo de fabricação por retificação em um aço muito usado na indústria metal mecânica. Foram testados dois rebolos de diferentes fabricantes, um composto por óxido de alumínio cerâmico (Cubitron®) e óxido de alumínio branco e o outro por óxido de alumínio cerâmico (SG), com o objetivo de atender às especificações de rugosidade.

Em seguida, foi analisada a relação custo benefício de cada um dos rebolos testados levando em consideração a rugosidade (Ra) obtida e o custo de cada rebole por unidade de peça produzida.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como principal objetivo analisar a rugosidade para diferentes rebolos no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço ABNT 8620, e verificar a relação custo benefício entre a rugosidade obtida e o custo de cada rebolo por unidade de peça produzida. E por fim, de acordo com os resultados obtidos especificar um novo rebolo para o processo estudado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica que segue aborda os principais temas estudados neste trabalho: processo de retificação e variáveis envolvidas, tipos de rebolos e dressadores assim como suas especificações, utilização do fluido de corte, material da peça utilizada, qualidade superficial e análise estatística do processo.

3.1 RETIFICAÇÃO

A retificação é um processo de usinagem pelo qual se remove material estabelecendo-se contato entre a peça e uma ferramenta abrasiva girando em alta velocidade. Nesse processo a ferramenta, denominada reboło, retira minúsculos cavacos do material sob usinagem (FREIRE, 1978).

Conforme dito por Marinescu et al. (2016), a retificação é o processo de usinagem que emprega uma ferramenta em formato de roda abrasiva (reboło) girando a alta velocidade para remover cavaco de um material com menor dureza.

As principais características desse processo são a obtenção de tolerâncias dimensionais apertadas, ótimo acabamento superficial e baixa capacidade de remoção de cavaco, o que o caracteriza, comumente, como um processo de acabamento (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Vieira Júnior et al. (1999) citam que a retificação é tida como um dos mais importantes processos de fabricação, tendo como objetivo melhorar o acabamento superficial e garantir a integridade das peças acabadas. A retificação é um processo de alta precisão e importância, uma vez que é inaceitável perder uma peça nesta etapa, pois o valor agregado ao material nesta fase é elevado devido aos vários processos que antecederam a retificação (SOARES; OLIVEIRA, 2002).

A retificação é um dos processos de acabamento mais utilizados na fabricação de peças que necessitam de elevada qualidade superficial, dimensional ou geométrica. Ocorre através de interações entre os grãos abrasivos de uma ferramenta e a peça a ser retificada. É o processo que visa solucionar os problemas de qualidade e tempo de toda a seqüência de fabricação, embora seja um dos processos que apresentam menor domínio tecnológico (OLIVEIRA, 1998).

Malkin e Guo (2008) citam que o processo de retificação é complexo, uma vez que este apresenta muitas variáveis, e estas são muito sensíveis a pequenas alterações. Tönshof, Friemuth e Becker (2002) dizem ser necessário analisar o maior número de variáveis

possíveis para se monitorar melhor a retificação evitando assim perdas de peças durante o processo.

A retificação de materiais provavelmente é um dos processos de usinagem de materiais mais antigos, datando de períodos pré-históricos, época em que o homem utilizava os grãos de pedras para afiar suas ferramentas através do atrito (MALKIN; GUO, 2008).

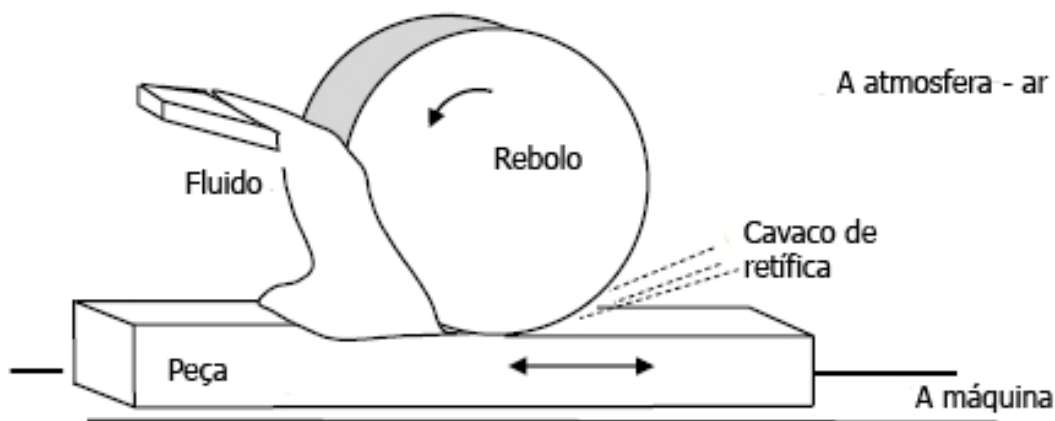
Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), o processo de retificação era, até pouco tempo atrás, um dos únicos utilizados em peças que já haviam sido endurecidas por tratamento térmico. Atualmente, com o surgimento de materiais de ferramentas como nitreto cúbico de boro e materiais cerâmicos, houve esforços para substituição do processo de retificação, principalmente em superfícies de revolução, por processos de torneamento. Ainda assim, de acordo com Rowe (2014), o processo de retificação é o menos custoso e capaz de atingir a qualidade e velocidade necessária na produção.

Por outro lado, nos últimos 20 anos ocorreram muitas pesquisas e novos desenvolvimentos no que diz respeito ao processo de usinagem por retificação conforme citado por Nguyen e Butler (2005). Dentre os principais avanços obtidos foi a inclusão de dois novos tipos de abrasivos utilizados na formulação dos rebolos, nitreto cúbico de boro (CBN) e abrasivos baseados em diamantes naturais e sintéticos (MARINESCU et al., 2016).

3.1.1 A base do processo de retificação

Para Marinescu et al. (2016), o processo de retificação pode ser analisado tomando como base seis elementos, conforme indicado no processo de retificação plana da Figura 1.

Figura 1 – Os seis elementos envolvidos no processo de retificação



Fonte: adaptado de Marinescu, et al. (2016)

1 – **Peça** e suas propriedades: material, forma, velocidade, rigidez e propriedades químicas e térmicas;

2 – **Ferramenta** abrasiva: estrutura, dureza, velocidade, rigidez, propriedades termoquímicas, tamanho de grão e ligantes;

3 – **Geometria** e movimentos que regem a interação entre ferramenta e peça (cinemática) e geram o cavaco no processo de retificação;

4 – **Fluido**: fluxo, pressão e propriedades físicas e termoquímicas;

5 – **Atmosfera**: ou ambiente envolvido;

6 – **A Máquina**: precisão, estabilidade de temperatura, vibração.

Outro importante fator que influencia o processo são as condições de dressagem do rebolo, que são afetadas pelo tipo de ferramenta, velocidades e avanços, refrigeração, lubrificação e manutenção (ROWE, 2014).

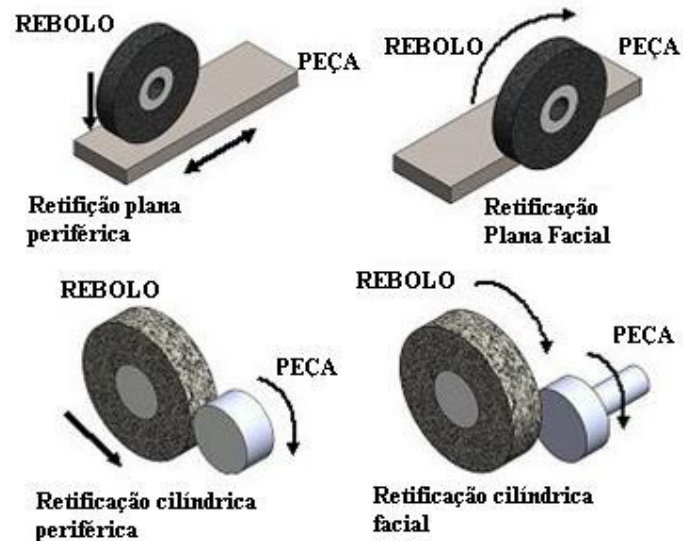
3.1.2 Tipos de retificação

Os processos de retificação podem ser classificados:

- Segundo a dureza da peça usinada:
 - i. *Retificação mole ou verde*: quando o processo é realizado para garantir superfícies precisas para serem utilizadas como referência a outras operações de usinagem. Esta operação ocorre antes do tratamento térmico;
 - ii. *Retificação dura*: quando o processo é realizado para conferir dimensões e acabamento finais à peça. Processo realizado após tratamento térmico, com a peça endurecida (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

- Segundo o tipo de operação: Conforme representado na Figura 2.

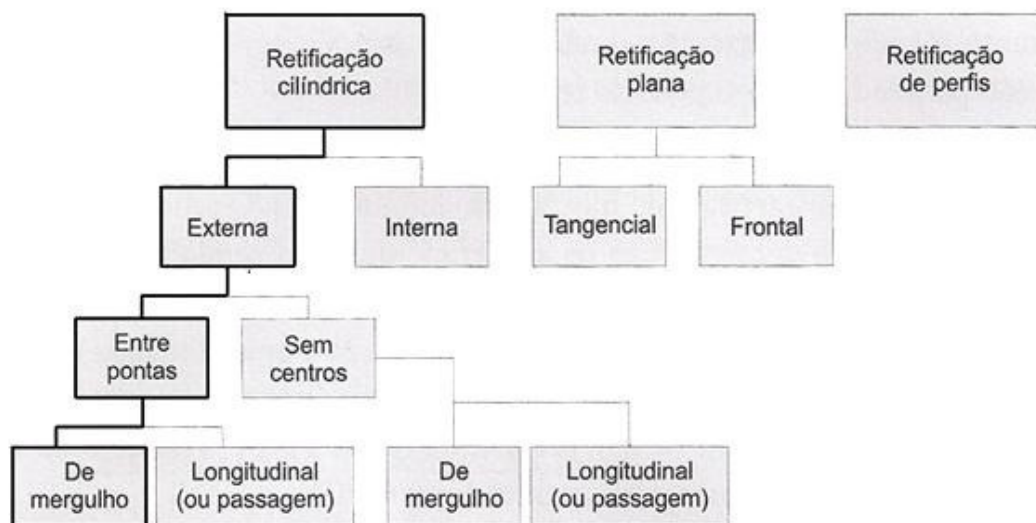
Figura 2 – Exemplos das quatro formas básicas de retificação



Fonte: Marinescu, et al. (2007) apud Anjos (2015)

- Segundo o tipo de superfície a ser usinada (Figura 3):

Figura 3 – Classificação do processo de retificação segundo a superfície a ser usinada



Fonte: adaptado de Diniz; Marcondes e Coppini (2013)

No presente trabalho, o objeto de estudo será o processo de **retificação cilíndrica externa entre pontas de mergulho**, que será abordado com maior detalhe a seguir.

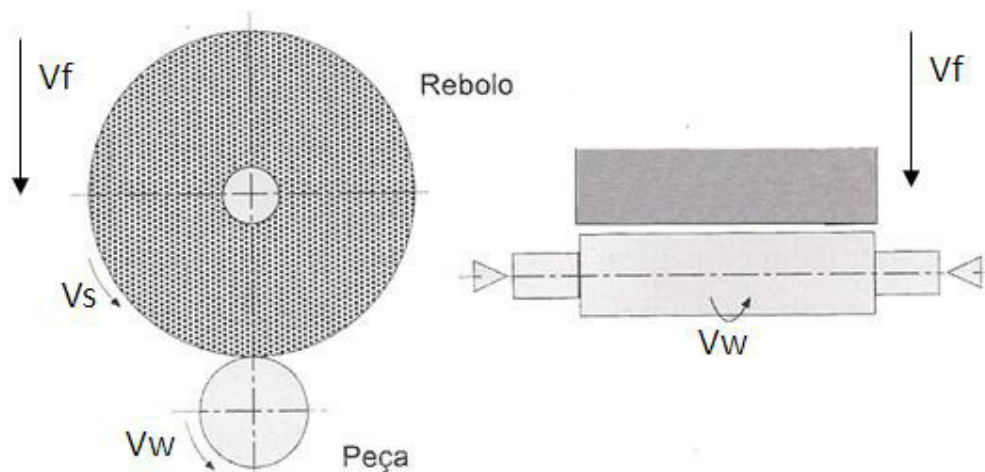
3.1.2.1 Retificação cilíndrica externa de mergulho

Neste processo (representado na Figura 4), ocorre o movimento rotacional tanto da ferramenta (rebolo) quanto da peça. A peça é fixada pelos seus dois extremos, normalmente, utilizam-se contrapontos. Geralmente, a peça possui somente movimento de rotação, porém, dependendo da necessidade do processo, podem ocorrer pequenos movimentos longitudinais (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A retificação cilíndrica externa refere-se à usinagem de uma superfície externa de uma peça em torno de um eixo de rotação com a peça mantida entre os centros. A superfície pode ser um simples diâmetro reto, cônico, roscado ou perfilado (Marinescu et al., 2004).

Além disso, conforme ressaltado por Diniz, Marcondes e Coppini (2013), o processo de retificação externa de mergulho tem, geralmente, um rebolo de largura maior do que a peça a ser usinada. Outra característica do processo, é que o mesmo pode ser utilizado para perfis de diversos formatos, bastando dar forma desejada ao rebolo.

Figura 4 – Representação da retificação cilíndrica externa de mergulho entre pontas



Fonte: adaptado de Diniz; Marcondes e Coppini (2013)

3.1.2.2 Parâmetros do processo de retificação cilíndrica

A seguir, serão destacados os principais parâmetros envolvidos no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho. Para Marinescu et al. (2016) o objetivo de definir esses parâmetros está em relacioná-los diretamente com a vida do rebolo, tempo de ciclo e qualidade do produto, além de entender e desenvolver o processo de usinagem.

3.1.2.2.1 Velocidade de corte ou velocidade tangencial do rebolo (V_s)

Esta velocidade é definida de acordo Graf (2004) apud Anjos (2015) a partir da Equação (1):

$$V_s = \frac{\pi \times d_s \times n_s}{60 \times 1000} \quad (1)$$

Onde:

V_s = Velocidade de Corte ou velocidade tangencial do rebolo [m/s.];

d_s = diâmetro do rebolo [mm];

n_s = rotação do rebolo [rpm].

Conforme citado por Diniz, Marcondes e Coppini (2013) o aumento na velocidade de corte V_s proporciona a redução do esforço de corte, aumento na vida do rebolo e acabamento superficial de melhor qualidade, assim como um comportamento mais duro do rebolo. Portanto, buscam-se velocidades elevadas do rebolo, que é limitada pela resistência da liga aglomerante, como será visto a seguir.

3.1.2.2.2 Velocidade tangencial da peça (V_w)

Graf (2004) apud Anjos (2015) define que a velocidade tangencial da peça ou simplesmente velocidade da peça é dada em função do diâmetro e rotação da mesma (Equação 2).

$$V_w = \frac{\pi \times d_w \times n_w}{60 \times 1000} \quad (2)$$

Onde:

V_w = Velocidade tangencial da peça [m/s.];

d_w = diâmetro da peça [mm];

n_w = rotação da peça [rpm].

Geralmente nos processos de retificação, as velocidades de corte e tangencial da peça são definidas e em seguida calcula-se a rotação correspondente do eixo do rebolo ou da peça em função do diâmetro dos mesmos.

3.1.2.2.3 Velocidade de mergulho ou velocidade de avanço do rebolo (V_f)

A velocidade de mergulho V_f é definida como a velocidade de avanço do rebolo. Esta afeta o acabamento pretendido e também a força tangencial de corte, que se eleva com o aumento da mesma (Alves, 2005).

Conforme estudado na pesquisa de Alves (2005) fica evidente que quanto maior a velocidade de mergulho maior a solitação da ferramenta abrasiva e conseqüente maior força tangencial de corte. Além disso, no mesmo trabalho, observa-se um comportamento característico da rugosidade em função da velocidade de mergulho: para maiores velocidade de mergulho observam-se maiores rugosidades (Ra).

3.1.2.2.4 Profundidade de corte real (a_e)

De acordo com Rowe (2014), a profundidade de corte programada no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho entre centros, é definida pela profundidade que o rebolo avança sobre a peça em uma revolução completa da mesma, como visto na Figura 5, e calculada pela Equação 3.

$$a_e = \frac{\pi \times d_w \times V_f}{V_w} \quad (3)$$

Onde:

a_e = profundidade de corte [mm];

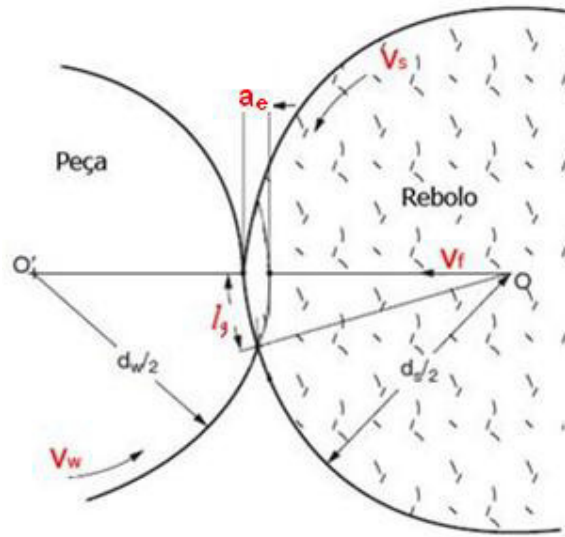
d_w = diâmetro da peça [mm];

V_w = Velocidade tangencial da peça [m/s];

V_f = Velocidade de mergulho [m/s];

Porém, a profundidade de corte real, a_e , inicialmente é menor do que a programada devido às deflexões da máquina, rebolo e peça, além do desgaste do rebolo no processo de corte. Após certo tempo de avanço as deflexões se tornam estáveis e constantes, e os valores da profundidade real se aproximam da profundidade programada (MARINESCO et al., 2004).

Figura 5 – Representação da profundidade de corte (a) e comprimento de contato (l_c)



Fonte: adaptado de Malkin e Gui (2008)

3.1.2.2.5 Comprimento do arco de contato (l_g)

Marinescu et al. (2016) descrevem que o comprimento do arco de contato (l_g) é definido pelo comprimento de contato geométrico de acordo com a Equação 4, representado na Figura 5, desconsiderando as deformações elásticas do processo.

$$l_g = \sqrt{a_e \times d_{eq}} \quad (4)$$

Onde:

l_g = Comprimento do arco de contato [mm];

a_e = profundidade de corte [mm];

d_{eq} = diâmetro equivalente [mm].

O diâmetro equivalente é o método de cálculo responsável por representar o comprimento do arco de contato (l_g) independentemente do processo de retificação (plana ou cilíndrica). Esse diâmetro é dado pelas Equações 5.1 e 5.2, para os processos de retificação externa e interna, respectivamente (MARINESCU et al., 2016).

$$d_{eq} = \frac{d_s}{(d_s/d_w) + 1} \quad (5.1)$$

$$d_{eq} = \frac{d_s}{(d_s/d_w) - 1} \quad (5.2)$$

Onde:

d_{eq} = diâmetro equivalente [mm];

d_s = diâmetro do rebolo [mm].

d_w = diâmetro da peça [mm].

Observa-se que para a operação de retificação plana o diâmetro da peça (d_w) tem valor infinito, portanto o diâmetro equivalente (d_{eq}) é o próprio diâmetro do rebolo (d_s).

3.1.2.2.6 Taxa de remoção de material (Q) e taxa de remoção de material específica (Q')

Para Rowe (2014) a taxa de remoção de material (Q) é produto da profundidade de corte (a_e) pela velocidade de peça de trabalho (V_w) pela largura de contato entre peça rebolo (b). Utilizando a Equação 3 para representar a profundidade de corte (a_e) a taxa de remoção de material para a retificação cilíndrica pode ser representada conforme a Equação 6.

$$Q = a_e \times V_w \times b = \pi \times d_w \times V_f \times b \quad (6)$$

Onde:

Q = Taxa de remoção de material [mm^3/s];

a_e = profundidade de corte [mm];

V_w = velocidade da peça [mm/s];

d_s = diâmetro do rebolo [mm].

Podemos definir a taxa de remoção de material específica (Q') como a taxa de remoção de material (Q) por unidade de largura de contato (b), representada na Equação 7. De acordo com Rowe (2014) esta é uma forma comum de se representar a taxa de remoção de material, pois energia por volume de cavaco removido, forças e potência de corte, são diretamente proporcionais à largura de contato.

$$Q' = a_e \times V_w = \pi \times d_w \times V_f \quad (7)$$

Q' = Taxa de remoção de material específica [mm^2/s];

a_e = profundidade de corte [mm];

V_w = velocidade da peça [mm/s];

d_w = diâmetro da peça [mm];

V_f = velocidade de mergulho [mm/s];

3.1.2.2.7 Espessura equivalente de corte (h_{eq})

Kassen (1969) apud Marinescu et al. (2016) relaciona a espessura de cavaco não deformado (h_{cu}), que pode ser visualizado na Figura 6a), com a topografia do rebolo, os parâmetros de corte (V_s , V_w , a_e) e os parâmetros geométricos. Porém, devido à dificuldade de se determinar as características topográficas do rebolo, Peters et al. (1974) apud Taborga, A., Taborga, J. e Weingaertner (2003) desenvolveram uma grandeza mais fácil de se calcular, determinada espessura equivalente de corte (h_{eq} , demonstrada na Figura 6b).

Para Rowe (2014) a espessura equivalente de corte (h_{eq}) é uma medida comumente utilizada da profundidade de remoção de material pelos grãos abrasivos, ela combina profundidade de corte (a_e), velocidade do rebolo (V_s) e velocidade da peça (V_w). E também pode ser relacionada com a taxa de remoção de material específica (Q') através da Equação 8.

$$h_{eq} = a_e \times \frac{V_w}{V_s} = \frac{Q'}{V_s} \quad (8)$$

h_{eq} = espessura equivalente de corte [mm];

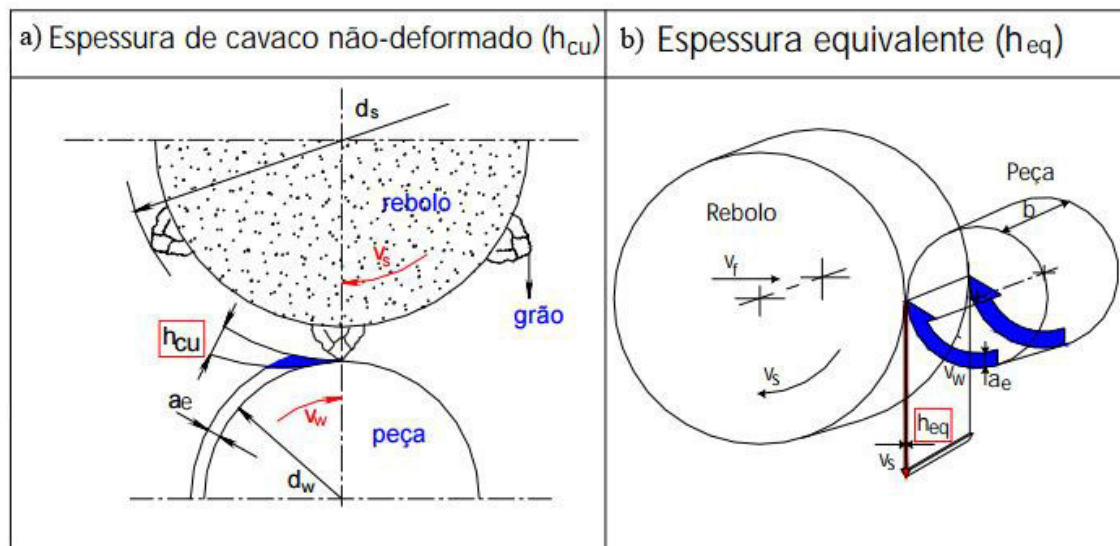
a_e = profundidade de corte [mm];

V_w = velocidade da peça [mm/s];

V_s = velocidade do rebolo [mm/s];

Q' = Taxa de remoção de material específica [mm²/s];

Figura 6 – Representação: espessura de cavaco não deformado e espessura equivalente



Fonte: Snoys e Peters (1974) apud Taborga, A., Taborga, J., Weingaertner (2003)

Ficou evidente na pesquisa de Taborga, A., Taborga, J. e Weingaertner (2003), que a rugosidade tem total relação com a espessura de cavaco não deformado (h_{cu}), e conseqüentemente, a espessura de corte equivalente (h_{eq}). Estes autores obtiveram melhores resultados para rugosidade (Ra) quando impuseram menor espessura de cavaco deformado (h_{cu}) através do aumento da velocidade de corte (V_s) e diminuição das velocidades de mergulho (V_f) e da peça (V_w).

$$\uparrow h_{eq} \rightarrow \uparrow Ra$$

De acordo com Rowe (2014) esta grandeza, h_{eq} , diz muito sobre o processo de retificação, mas não leva em conta o número de arestas em contato com o reboleto ou a conformidade de contato. Portanto, a seguir serão vistas as características do reboleto que afetam os parâmetros de saída do processo de retificação.

3.1.3 Rebolos

A ferramenta que executa a operação de retificação é denominada reboleto. O reboleto é um corpo, em geral cilíndrico, constituído por um material aglomerante, que possui a função de aglutinar os diversos grãos abrasivos, que são os responsáveis por entrar em contato com a peça e realizar o corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Malkin e Guo (2008) consideram o reboleto como um sistema trifásico, composto por grãos abrasivos, aglomerantes e poros. Portanto, o desempenho do reboleto está relacionado ao

tipo e ao tamanho do grão abrasivo, as propriedades abrasivas do material e a porosidade do conjunto. São fabricados rebolos de diversos tipos de grãos, com diferentes tamanhos e combinados com vários tipos de ligantes com composições distintas.

De acordo com Marinescu et al. (2016), os modernos tipos de abrasivos estão divididos entre dois principais grupos, que seguem: **Abrasivos convencionais** baseados em Carboneto de silício (SiC), Óxidos de Alumínio (Al_2O_3), ou Óxido de Zircônio (ZrO_2). **Super abrasivos** baseados em diamante ou CBN (Nitreto cúbico de boro).

Como o foco deste trabalho está nos rebolos com abrasivos convencionais, utilizou-se a classificação dos autores para estes tipos de rebolos.

3.1.3.1 Codificação de rebolos

Atualmente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) regulamenta o uso, manuseio, segurança, classificação e padronização das ferramentas abrasivas através da norma ABNT NBR 15230:2016. Segundo a norma o rebolo é classificado e padronizado de acordo com os seguintes itens:

- ✓ Tipos e combinações dos grãos abrasivos;
- ✓ Granulometria e combinações dos grãos;
- ✓ Graus de dureza;
- ✓ Estrutura ou porosidade;
- ✓ Tipos de liga.

3.1.3.2 Tipos e combinações dos grãos abrasivos

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013) quando falamos de materiais convencionais dos grãos abrasivos se destacam o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o carboneto de silício (SiC). Sendo que, em geral, os abrasivos de carboneto de silício (SiC) são indicados para retificação de materiais de alta dureza como ferro fundido cinzento e materiais não ferrosos (principalmente metal duro) e não metálicos. Já os abrasivos de óxido de alumínio (Al_2O_3) são indicados para retificação de materiais de alta resistência à tração tais como aço-carbono, ligas de aço, aço-rápido e ferro fundido maleável e nodular. Existem diversos tipos de abrasivos de óxido de alumínio, alguns **tipos** serão citados a seguir.

Óxido de alumínio comum (tipo A): é composto por 96 a 97% de Al_2O_3 cristalizado e de dureza de 2000 Knoop. Geralmente é utilizado em operações de desbaste e retificações cilíndricas em geral, com exceção de aços com elevada dureza e sensíveis ao calor (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Outros autores, como Marinescu et al. (2016) e Malkin e

Guo (2008), classificam este tipo de grão como *óxido de alumínio marrom*. Malkin e Guo (2008) ainda ressaltam que o óxido de alumínio marrom é produzido por fusão da bauxita calcinada (minério) com uma pequena quantidade de coque e ferro. Este material ainda possui cerca de 2,7% de óxido de titânio retido a partir da bauxita, o que faz com que o grão possua menor dureza e friabilidade se comparados com o óxido de alumínio branco e monocristalino.

Malkin e Guo (2008) definem friabilidade como o oposto a tenacidade, ou seja, se um abrasivo é mais friável (menos tenaz), ele regenera suas arestas de cortes, à medida que ocorre o atrito entre peça e rebolo, sem que seja necessário afiar (ou dresser) o rebolo. Uma maneira de quantificar a friabilidade dos grãos abrasivos consiste em submeter uma amostra grosseira de material a condições prescritas de moagem. Em seguida é definido o índice de friabilidade como a porcentagem de material moído que passa por uma peneira de maior malha. A friabilidade e a dureza Knoop de alguns tipos de grãos abrasivos estão apresentadas a seguir no Quadro 1.

Em geral, grãos são menos friáveis quando menores, já que estes são produzidos a partir dos grãos mais grossos. Grãos com maior dureza e com maior friabilidade são usados em operações onde se deseja precisão, por outro lado os maiores e mais tenazes são utilizados para cortes mais pesados (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Oxido de alumínio branco (tipo AA): É uma forma mais refinada do óxido de alumínio comum ou marrom, alcançando 99% de Al_2O_3 . Este tipo de abrasivo possui alta dureza e friabilidade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Marinescu et al. (2016) ressaltam que o óxido de alumínio branco proporciona uma ação corte frio o que o torna viável para retificação de precisão em ligas vitrificadas. Malkin e Guo (2008) descrevem que o óxido de alumínio branco é produzido pela fusão de alumina no processo Bayer pré-purificada no forno de arco elétrico Hall-Heroult. A Figura 7 mostra os grãos de óxido de alumínio branco.

Quadro 1 – Dureza e Índice de Friabilidade dos abrasivos de óxido de alumínio

Tipo de grão abrasivo (número mesh do grão #12)	Dureza Knoop (Gpa)	Índice de Friabilidade
Óxido de Alumínio		
Branco	20,8	56,6
Monocristalino	22,4	47,7
Comum ou Marrom	20,0	35,6

Fonte: adaptado de Malkin e Guo (2008)

Figura 7 – Óxido de alumínio branco



Fonte: Rowe (2014)

Óxido de alumínio monocristalino: O óxido de alumínio monocristalino pode ser produzido por um processo semelhante à fusão do óxido de alumínio marrom, mas com a adição de sulfeto de ferro e compostos alcalinos para retirar o titânio com os outros óxidos. Este material é muito mais puro do que o óxido de alumínio marrom, contendo apenas pequenas quantidades de impurezas de óxido, e tem a grande vantagem de que os grãos são produzidos por um método que não os expõe a altas forças de esmagamento antes de serem usados em um rebolo. Este material abrasivo é usado principalmente para operações de acabamento (MALKIN; GUO, 2008).

Oxido de alumínio cerâmico (SG – Seeded Gel): Este abrasivo foi desenvolvido e patenteado em 1986 pela Norton Company. Os grãos são produzidos com tamanho de cristalito de 0,2 μm (produzidos por processo de precipitação química) através dos processos de compactação e sinterização (elevação a temperaturas ligeiramente inferiores ao ponto de fusão do material). Estes abrasivos são extremamente duros e friáveis e se tornam auto-afiáveis, pois ocorrem fraturas micrométricas (microfraturas). Para regular os níveis de dureza, este abrasivo é misturado a abrasivos comuns (ROWE, 2014).

Oxido de alumínio cerâmico (Cubitron®): De acordo com Rowe (2014) e Marinescu et al. (2016) a 3M Co. introduziu este material abrasivo através do processo Sol-Gel diferente do utilizado para produzir óxido alumínio cerâmico (SG), que modifica as propriedades abrasivas com adição de magnésia e outros elementos raros.

O Cubitron® apesar de ter menor dureza (21 GPa), é mais friável do que SG (19 GPa). Porém a comparação direta do desempenho de SG e Cubitron é difícil porque o grão é apenas um componente da retificação. Evidências em campo sugerem que rebolos feitos a partir de SG têm maior vida, mas o Cubitron® tem melhor corte. (MARINESCU et al., 2016).

3.1.3.3 Granulometria e combinações dos abrasivos

De acordo com Rowe (2014) nem todos os fabricantes usam o mesmo sistema de especificação de tamanho de grão (granulometria). Existem dois padrões para tamanho de grão utilizado, *American National Standards Institution* (ANSI), comumente utilizado para especificar rebolos convencionais, e o padrão ISO (*International Organization for Standardization*) - *Federation of European Producers of Abrasives* (FEPA) utilizado para rebolos superabrasivos.

O tamanho do grão é representado por um número correspondente ao número de malhas por polegada linear de uma peneira de classificação conhecida como escala *mesh*. O Quadro 2 representa a escala granulométrica e a Figura 8 exemplifica como é feita essa classificação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O significado do tamanho de grão específico pode variar de uma especificação para outra. Isso ocorre porque é impossível especificar o tamanho do grão dentro de limites apertados e podendo ser até indesejável. Um reboło contém uma gama de tamanhos de grãos que passará através de uma peneira, mas não através da próxima mais fina. Quanto maior for o número de classificação menor será a dimensão do grão (ROWE, 2014).

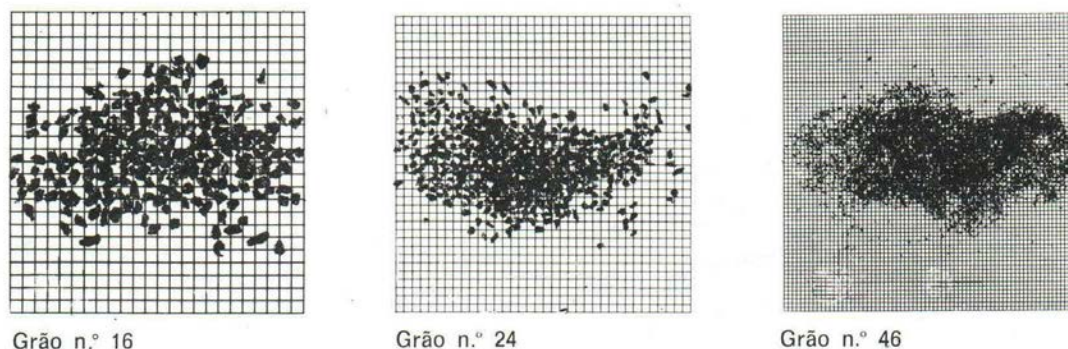
Malkin e Guo (2008) ressaltam que alguns fabricantes de reboło às vezes adicionam um único dígito após o número *mesh* para indicar se o reboło contém uma mistura de tamanhos de grão. O número 1 após o número do tamanho de grão geralmente indica que o reboło contém grãos abrasivos apenas do número de grão indicado, enquanto um número diferente designaria uma mistura particular de tamanhos de grão. O uso de uma gama mais ampla de tamanhos de grão facilita a fabricação de rebolos e é uma prática comum mesmo que não seja explicitamente indicado na especificação do reboło.

Quadro 2 – Escala granulométrica

Muito grosso	Grosso	Médio	Fino	Muito fino	Pó
6	16	36	100	280	600
8	20	46	120	320	700
10	24	54	150	400	800
12	30	60	180	500	1000
14		70	220		1200
		80	240		1600
		90			

Fonte: Diniz; Marcondes e Coppini (2013)

Figura 8 – Exemplificação da classificação de grãos por peneiras



Fonte: SIVAT Abrasivos (2017)

3.1.3.4 Graus de dureza

A dureza de uma ferramenta abrasiva é o grau de coesão entre os grãos e o aglomerante utilizado. Portanto, esse índice representa a resistência com que o grão abrasivo é retido no material aglutinante. Quando temos uma coesão grande, ou seja, os grãos são capazes de resistir aos esforços de retificação sem que sejam removidos, temos um rebolo duro. Caso contrário, o rebolo é classificado como mole (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Conforme citado por Rowe (2014), o grau de dureza é um indicativo do desgaste do rebolo. Um rebolo mole sofre desgaste rapidamente, enquanto um rebolo duro se desgasta mais lentamente. Essa dureza também é afetada pelo volume de ligante, uma maior proporção de ligante torna o rebolo mais duro. Sendo que essas características podem ser alteradas pelo processo de dressagem, a dressagem grossa tende deixar o rebolo com a estrutura mais aberta e efetivamente mais macia. O grau de dureza é indicado por letras no intervalo de A a Z na

ordem crescente do alfabeto. Portanto a letra A indica menor dureza em relação à letra Z, exemplificado no Quadro 3.

Quadro 3 – Classificação do grau de dureza dos rebolos

Extremamente macios	Muito macios	Macios	Dureza média	Duros	Muito duros	Extremamente duros
A	E	H	L	P	T	X
B	F	I	M	Q	U	Y
C	G	J	N	R	V	Z
D		K	O	S	W	

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008)

3.1.3.5 Estrutura ou porosidade

A estrutura do rebolo é representada por números inteiros que partem de 1 (estrutura aberta, grande quantidade de grãos abrasivos) e vão a números superiores a 12 (Quadro 4), onde há grande espaçamento entre os grãos, ou seja, menor quantidade de grãos. A estrutura indica a concentração volumétrica de grãos abrasivos do rebolo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Conforme descrito por Rowe (2014), rebolos com estrutura aberta permitem uma melhor remoção de cavaco e proporcionam melhor acesso do fluido refrigerante à região de contato entre o grão abrasivo e a peça. Em geral, uma estrutura de grãos abertos entrega um grão mais grosseiro que uma estrutura mais fechada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Quadro 4 – Classificação dos rebolos de acordo com a estrutura

Aglomeramento fechado	Aglomeramento médio	Aglomeramento aberto	Superporosos
1	5	8	Acima de 12
2	6	9	
3	7	10	
4		11	
		12	

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008)

3.1.3.6 Tipos de liga

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) definem que a função do elemento ligante no rebolo é manter os grãos abrasivos unidos. E os principais tipos de liga para rebolos convencionais são:

Vitrificada: Simbolizada pela letra V na identificação do rebolo é a liga mais comum na retificação de precisão. Tem boa e rigidez o que facilita a manutenção do perfil do rebolo. Apesar de não resistir a trabalho com grande impacto ou altas pressões, também não é afetada por água, óleos ou ácidos. Geralmente alcança velocidades periféricas de 33 m/s, porém, algumas ligas especiais podem chegar a velocidades de 60 m/s.

Resinóides: Simbolizada pela letra B é composta por resinas orgânicas, e tem como principais características sua alta resistência e resiliência. Alguns rebolos podem alcançar velocidade periférica de 100 m/s com estas ligas, e são utilizados para operações de desbaste pesado e corte, porém também em operações que exigem alto nível de acabamento.

3.1.4 Dressagem de rebolos convencionais

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013) dois fenômenos ocorrem com relação à vida do rebolo e sua utilização:

Desgaste do rebolo: Quantidade de rebolo consumida durante um ciclo de operação, que causa perda de volume ou diâmetro do rebolo;

Perda de afiação: esse fenômeno ocorre principalmente devido ao arredondamento das arestas cortantes e/ou entupimento dos poros do rebolo.

Quando o rebolo entra em atrito com a peça, os grãos abrasivos podem sofrer fraturas e se desprender ou sofrer arredondamento das arestas. Portanto, o rebolo pode sofrer desgaste sem perder afiação, ou vice e versa. Normalmente um dos dois fatores sempre se sobrepõe em relação ao outro, ou seja, ou o rebolo perde sua capacidade de corte, podendo causar danos a superfícies da peça, ou sofre desgastes desiguais na sua superfície, tornando-se oval e causando um consequente desvio de forma na peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

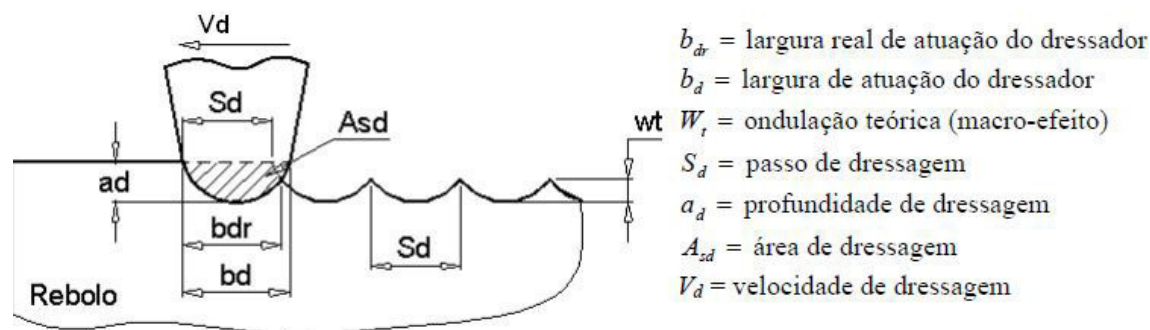
Malkin e Guo (2008) definem a dressagem como o processo de condicionamento da superfície do rebolo de modo a atingir certo comportamento de retificação. Com os rebolos abrasivos convencionais, tanto o perfilamento quanto o recondicionamento dos rebolos às condições ideais de corte são geralmente feitos pelo mesmo processo, e a combinação é comumente chamada de dressagem.

Com isso, na dressagem mecânica, ocorre o perfilamento e a dressagem propriamente dita. Segundo Marinescu *et al.* (2016), a operação de perfilamento busca atingir uma forma precisa para o rebolo, enquanto a dressagem tem como objetivo restaurar a eficiência de corte da ferramenta.

De acordo com Malkin (1989), o perfilamento é responsável pelo ajuste de forma da topografia do rebolo, por meio da remoção de material. No caso de rebolos convencionais, dispensa-se tal operação, pelo fato de que este ajuste já é atingido no momento da dressagem.

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) definem a dressagem como a reconstituição da camada exterior do rebolo, explicando que o processo ocorre como se o rebolo fosse a peça e a ponta de diamante (dressador) fosse a ferramenta de um processo de torneamento (Figura 9).

Figura 9 – Parâmetros de dressagem



Fonte: adaptado de Oliveira, et al. (1992) apud Hassui e Diniz (2003)

Marinescu *et al.* (2016) escrevem que os engenheiros de retífica empregam valores empíricos e certas diretrizes para determinar o avanço por rotação ou passo (S_d) na dressagem. De acordo com a profundidade de dressagem, a ferramenta de dressagem recebe uma largura de atuação (b_d). Em função desses valores é definido o grau de recobrimento (U_d):

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} = \frac{b_d \times n_d}{V_d} \quad (9)$$

Sendo:

U_d = Grau de recobrimento;

b_d = largura de atuação do dressador [mm];

S_d = passo de dressagem [mm/rev];

n_s = rotação do rebolo [RPM];

V_d = Velocidade de avanço axial [mm/min].

Marinescu et al. (2016) definem os seguintes valores de grau de recobrimento em função do objetivo do acabamento da operação de retificação:

Retificação áspera: $U_d = 2 - 3$;

Retificação média: $U_d = 3 - 4$;

Retificação de acabamento: $U_d = 6 - 8$.

Já Rowe (2014), descreve que o range de valores para grau de recobrimento deve estar entre 2 – 20. De acordo com o trabalho de um menor valor de U_d para um rebolo com grão pequeno tem macro efeito acentuado, ou seja, logo após a dressagem o rebolo tem menor número de arestas ativas, causando uma remoção maior de material por aresta e tendendo à elevação do valor da rugosidade. Conforme o rebolo se desgasta, o macro efeito é atenuado o número de arestas ativas aumenta e ocorre redução na rugosidade.

Ainda pelo trabalho dos mesmos autores, observa-se que quando se utiliza um U_d maior para o mesmo tamanho de grão, inicialmente a peça apresenta valores de rugosidade mais baixos devido à dressagem mais fina. Logo em seguida, há um aumento do valor na rugosidade devido ao grão apresentar desgaste, ou seja, o micro efeito (causado pela fratura dos grãos abrasivos) é atenuado, causando arredondamento do grão abrasivo.

O passo de dressagem (S_d) é limitado pela largura de atuação da ponta dressadora, se o passo ultrapassar a largura da ponta, o dressador não removerá material de toda a superfície do rebolo, gerando assim uma espécie de rosca, este limite está associado ao tamanho do grão (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

De acordo com Oliveira (1988) apud Alves (2005), variando-se as condições de dressagem, pode-se utilizar um mesmo rebolo para as operações de desbaste (alta agressividade) e de acabamento (baixa agressividade).

Quanto maior o passo (avanço por volta) e/ou profundidade de dressagem, mais agressivo se torna o rebolo, podendo aumentar a sua vida e reduzindo as forças de corte, porém também ocorre outra situação muitas vezes indesejada, um aumento na rugosidade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Em relação à penetração de dressagem (a_d) Marinescu et al. (2016) garantem que ela irá controlar a rugosidade da peça, valores mantidos abaixo 30 μm são indicados para rebolos

convencionais de alumina, porém para rebolos de grão cerâmico o valor indicado de profundidade de dressagem pode ser de 5-10 μm , visto que esses materiais se fraturam no âmbito de micron sendo possível restabelecer uma ótima condição de corte. Valores acima dos descritos acima são considerados apenas desperdícios por desgaste da ferramenta abrasiva.

Marinescu et al. (2016) evidenciam que a dressagem pode ser feita por dois tipos de ferramentas que seguem: Ferramentas diamantadas estacionárias e discos ou rolos diamantados rotativos, que oferecem uma vida de ferramenta muito mais longa. Este trabalho abordará os **dressadores rotativos**, pois este tipo de ferramenta é utilizado no processo em estudo.

3.1.4.1 Dressadores rotativos

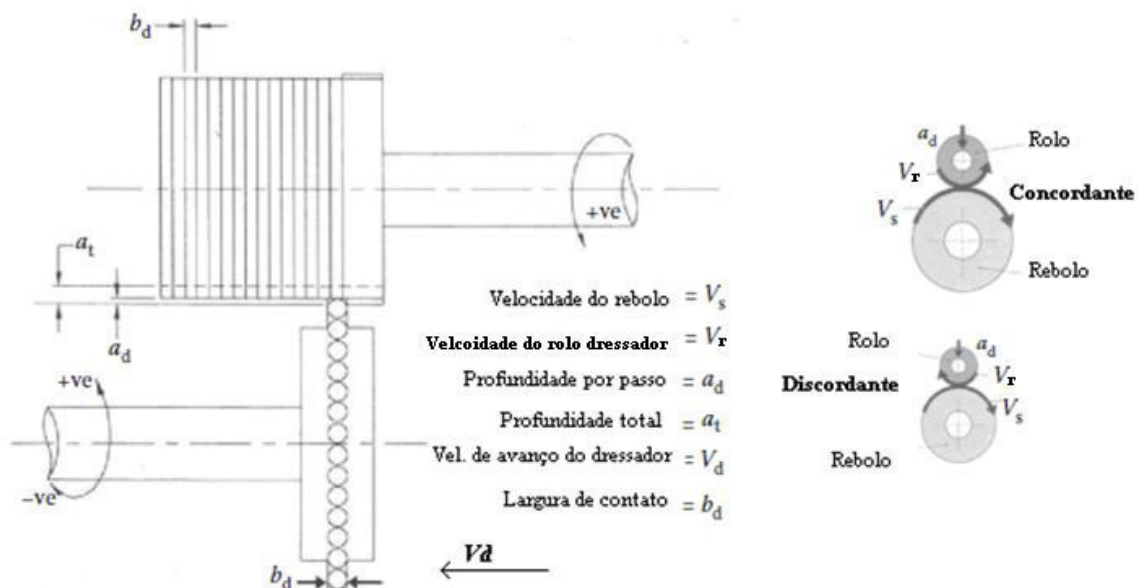
A dressagem também pode ser feita com dressadores no formato de discos ou rolos diamantados. Além disso, a dressagem muitas vezes tem a função de informar a máquina a real posição da superfície externada do rebolo, ou seja, o seu diâmetro. Já que o diâmetro ou a posição da ponta do dressador pode ser considerada constante e com valor conhecido pela máquina.

Rowe (2014) diz que uma ferramenta de dressagem rotativa pode ser percorrida através da superfície do rebolo da mesma maneira que uma ferramenta estacionária em uma velocidade de avanço (V_{fd}). A seleção da taxa de avanço de dressagem é regida pelos mesmos fatores que uma ferramenta de curativo estacionário, no entanto em vez de produzir um passo espiral, a marca aparente é determinada pelo espaçamento dos grãos de diamante na ferramenta de dressagem.

Segundo Marinescu et al. (2016), os rolos dressadores tem uma vida aumentada em cerca de 100 vezes em relação aos dressadores estacionários em função da quantidade de diamante disponíveis que são depositados em sua periferia e são movidos por um eixo motorizado.

A maneira mais comum de condicionar o rebolo é a dressagem rotativa uniaxial, onde o eixo do rebolo é paralelo ao eixo de movimentação do rolo dressador. E a relação entre a velocidade do dressador e a velocidade do rebolo é conhecida como razão de velocidade de dressagem (q_d), ou *crush ratio* (Figura 10) (MARINESCU et al., 2016).

Figura 10 – Representação da operação com dressador rotativo



Fonte: adaptado de Marinescu, et al. (2016)

A razão de velocidade de dressagem (q_d), calculada pela Equação 10, deve ser considerada um parâmetro chave na dressagem. Conforme representado na Figura 11, para uma relação de dressagem concordante (+ve), o acabamento e as forças mudam significativamente na faixa de +0,4 para +1. No entanto, as forças de dressagem também aumentam drasticamente, levando a um desgaste mais elevado do rolo, requisitos mais rígidos da máquina e motores de aparelhagem de torque mais altos. O desgaste do diamante sobe tão dramaticamente que normalmente é recomendado não exceder +0,9. Para a maioria das operações convencionais com dressagem, as características do rebolo e da máquina são tais que a maioria dos processos é executada em sentido discordante (-ve) no intervalo de -0,4 a -0,8 (MARINESCU et al., 2016).

$$q_d = \frac{V_R}{V_S} \quad (10)$$

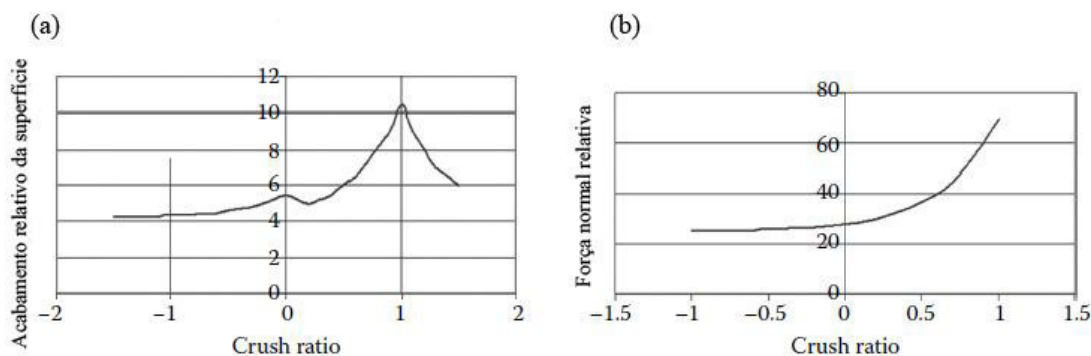
Sendo:

q_d = Razão de velocidade de dressagem;

V_R = velocidade de rotação do dressador [m/s];

V_S = Velocidade de corte ou do rebolo [m/s];

Figura 11 – Relação acabamento rel. e força normal relativa x *Crush ratio*



Fonte: adaptado de Marinescu, et al. (2016)

3.1.5 Lubrificação e refrigeração em retificação

No processo de retificação são consumidas energias que variam entre 20 e 60 J/mm³, o que significa aproximadamente 10 vezes a energia que se consome no processo de torneamento. Esta energia é transformada em calor, o que ocasiona elevadas temperaturas (WEINGAERTNER et al., 2000 apud ALVES, 2005).

O objetivo principal dos fluidos de retificação é minimizar o impacto mecânico, térmico e químico entre o material abrasivo e o material da peça durante o processo. O efeito de lubrificação de um fluido na retificação reduz o atrito entre os grãos abrasivos e ligantes com a peça de trabalho. Um segundo efeito de um fluido de retificação é o resfriamento direto da zona de contato abrasiva, onde as temperaturas são mais elevadas através da absorção e transporte do calor gerado no processo. Outros efeitos de um fluido de retificação são a expulsão do cavaco da zona de contato, resfriamento como um todo da peça de trabalho, arrefecimento da máquina retificadora e proteção contra corrosão da peça (MARINESCU et al., 2016).

Além disso, Marinescu et al. (2016) ressaltam que a seleção de um fluido de corte na retificação é de importância crucial para a obtenção de condições favoráveis de refrigeração e lubrificação. O tipo, o óleo de base, os aditivos e a concentração do fluido são importantes para a eficiência do resfriamento e lubrificação. Outros requisitos importantes para os fluidos lubri-refrigerantes são operações econômicas e eficientes, estabilidade operacional (longa vida) e proteção ambiental, ou seja, é fundamental que os fluidos utilizados sejam compatíveis com a saúde ambiental e humana (ausência de odores desagradáveis e não ser nocivos à pele), bem como sejam confiáveis em operação.

Por fim, outros requisitos também são necessários, normalmente obtidas com adição de aditivos ao fluido:

- Facilmente filtrados e reciclados;
- De fácil remoção do filme residual da peça de trabalho, rebolo e da máquina;
- Possibilidade de transporte de partículas sólidas da remoção do cavaco;
- Inibir a formação de espuma e névoa;
- Ter baixa inflamabilidade;
- Ter boa compatibilidade com os materiais do sistema de máquina-ferramenta.

Os tipos de fluidos que são mais comumente utilizados nas indústrias são comparados no Quadro 5.

Quadro 5 – Fluidos de corte utilizados na indústria e comparação de suas características

	Sintético	Semi-sintético	Óleo emulsionável	Óleo mineral
Calor removido	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Lubrificação	Ruim	Bom	Ótimo	Excelente
Manutenção	Ótimo	Bom	Ruim	Excelente
Filtrabilidade	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Danos meio ambiente	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Custo	Excelente	Ótimo	Bom	Ruim
Vida do rebolo	Ruim	Bom	Ótimo	Excelente

Fonte: Webster (1995) apud Alves (2005)

3.1.5.1 Óleos Minerais

Esse tipo de lubrificante é formado por hidrocarbonetos obtidos do refinamento do petróleo cru. Possuem preços elevados, risco de incêndio, ineficiência às altas velocidades de corte, baixo poder refrigerante, formação de fumos e podem oferecer riscos à saúde do operador. É aditivado à base de cloro e/ou enxofre, dando característica de extrema pressão ao fluido (SANTOS e SALES, 2007).

O óleo possui pior capacidade de refrigeração e é prejudicial pelo ponto de vista ambiental se comparado à água. Porém a água tem baixa viscosidade, baixa capacidade de lubrificação, de anti-corrosão, anti-ferrugem, e propriedades anti-bactericidas. Devido a essas constatações, surgiram alternativas que proporcionam aos fluidos de corte características de

ambos os componentes, óleo e água. (MARINESCU et al., 2016). Essas características são base dos óleos emulsionáveis e semi-sintéticos.

3.1.5.2 Óleos Emulsionáveis

Os fluidos emulsionáveis são óleos minerais adicionados à água, nas proporções de 1:10 a 1:100, mais emulgadores, substâncias responsáveis por garantir a miscibilidade entre água e óleo. São adicionados às emulsões aditivos anticorrosivos, como nitrito de sódio, biocidas, para inibir o crescimento de bactérias e fungos (devem ser compatíveis com a pele humana e não tóxicos), elementos EP (extrema pressão) e antidesgaste (SANTOS e SALES, 2007). Pode ser feita a adição de antiespumantes quando se utilizada sabões, acopladores e agentes umectantes como emulsificantes.

De acordo com Alves (2005), as emulsões são indicadas para operações de usinagem de alta velocidade, baixa pressão de corte e elevada geração de calor, pois possuem poder de refrigeração da água associada à capacidade anticorrosiva e lubrificante dos óleos minerais.

3.1.5.3 Fluidos Semi-sintéticos

Conforme descrito por Santos e Sales (2007), este tipo também é chamado de micro emulsões, sendo uma combinação de fluidos sintéticos com emulsões de óleo em água, e apresenta de 5 a 50% de óleo mineral no fluido concentrado, contando ainda com aditivos e compostos químicos capazes de dissolver o óleo na água formando moléculas individuais.

Neste tipo de fluido é mais fácil controlar a atividade microbacteriana, no entanto, apesar destes fluidos possuírem melhor capacidade lubrificante que os fluidos sintéticos, essa característica ainda é inferior aos óleos de corte e óleos emulsionáveis.

3.1.5.4 Fluidos Sintéticos

Este tipo de fluido não possui óleo mineral em sua composição, e são baseados em substâncias químicas solucionada com água. São adicionados sais orgânicos e inorgânicos, inibidores de corrosão, aditivos de lubricidade, biocidas, e agentes umectantes que melhoram a capacidade refrigerante. Além disso, apresentam maior vida, pois são menos atacados por bactérias, e são mais transparentes possibilitando melhor visualização do processo de corte (SANTOS E SALES, 2007).

3.2 AÇO ABNT 8620

O aço ABNT 8620 é uma liga utilizada em aplicações de cementação e carbonitreção. O níquel existente na liga melhora algumas propriedades do material como tenacidade e ductilidade, já o cromo combinado com o molibdênio auxilia na resistência ao desgaste e no aumento da camada endurecida por cementação. Esta liga sendo bem balanceada, tende a obter uma dureza elevada na camada da cementação e também uma ótima resistência ao desgaste, tendo em seu núcleo uma resistência aproximada de 860 MPa após o tratamento térmico. Esta composição tem ainda uma ótima usinabilidade (OGATA, 2003).

A liga ABNT 8620 tem diversas aplicações com elementos de máquina e peças da indústria automotiva como, por exemplo, na fabricação de engrenagens, eixos, pinos, buchas e peças onde há exigência de dureza superficial obtida pelo processo de cementação ou carbonitreção. A dureza superficial, na condição cementada e temperada, pode alcançar 62 HRc, enquanto que a dureza de núcleo varia entre 30 e 45 HRc (COSTA, 2016). A composição do aço ABNT 8620 está representada no Quadro 6.

Quadro 6 – Composição química do aço ABNT 8620

Aço ABNT 8620	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo
Composição Química	0,18	0,15	0,70	0,03	0,04	0,40	0,40	0,15
	–	–	–	máx.	máx.	–	–	–
	0,23	0,35	0,90			0,60	0,70	0,25

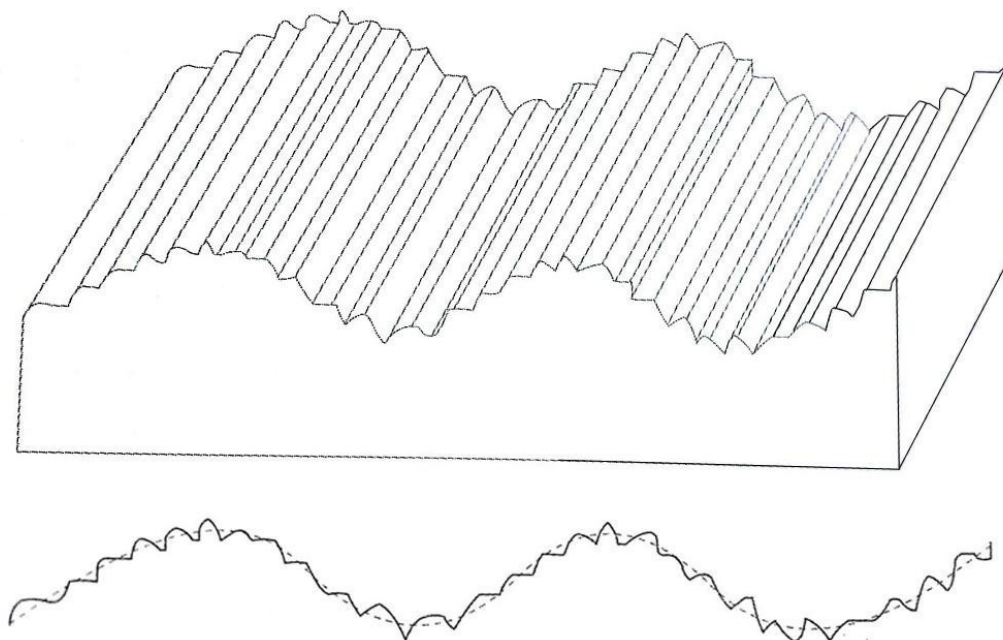
Fonte: Catálogo de Aços GERDAU (2017)

3.3 QUALIDADE SUPERFICIAL

Freire (1978) define a qualidade superficial ou acabamento superficial como a condição que uma ou mais superfícies de uma peça devem apresentar de acordo com a função e operação que a mesma deverá realizar, e conforme essa operação o projetista seleciona o grau de acabamento necessário.

A qualidade superficial ou textura superficial pode caracterizada em dois níveis de irregularidades: O perfil de rugosidade, representado pela linha cheia na Figura 12, e a ondulação, representada pela linha pontilhada na mesma figura. A rugosidade é descrita por irregularidades com menor espaçamento, enquanto que a ondulação as irregularidades mais espaçadas (SANTOS e SALES, 2007).

Figura 12 – Perfis de rugosidade e ondulação de uma superfície



Fonte: Santos e Sales (2007)

3.3.1 Medição da rugosidade

A rugosidade da superfície ganha ainda mais importância quando somente as tolerâncias dimensionais, de forma e posição não são suficientes para garantir a funcionalidade do par acoplado. A qualidade do acabamento superficial das peças fabricadas é avaliada através da medida de sua rugosidade. Para sua aferição são utilizados equipamentos de medidas específicos se os procedimentos são normalizados com valores expressos em *micrometros* (MARCO FILHO e CANABRAVA FILHO, 1996).

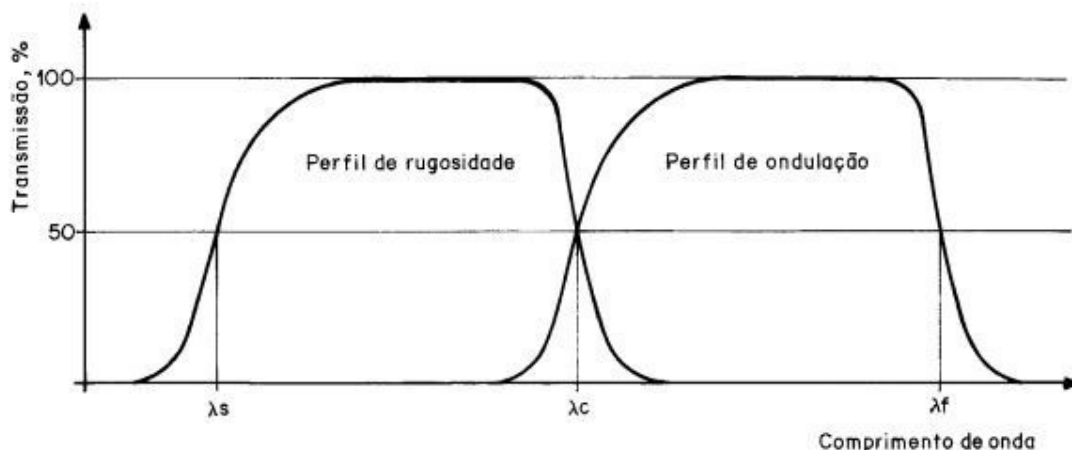
Santos e Sales (2007) enfatizam que uma série de fatores explica a medição de peças quanto à rugosidade. Portanto, a qualidade obtida está diretamente ligada ao processo de fabricação, ou seja, se houver qualquer alteração quanto a alterações na propriedade da matéria prima (dureza ou composição química), na ferramenta utilizada (desgaste ou lubrificação), em parâmetros adotados ou mesmo em instabilidades da máquina, haverá reflexos na qualidade superficial da peça. Segundo esses autores, podemos dizer que a rugosidade é impressão digital do processo de manufatura.

A rugosidade pode ser medida através de equipamentos de contato ou ópticos. A seguir serão detalhados os parâmetros utilizados na medição da rugosidade em instrumentos de contato, objeto de estudo deste trabalho.

3.3.1.1 Medição da rugosidade por contato

A norma NBR ISO 4287:2002 adota o sistema método do perfil para especificar a rugosidade das superfícies. Essa norma utiliza a terminologia de filtro de perfis para separar as componentes de ondas mais curtas, de rugosidade, de ondulação e de ondas mais longas presentes na superfície, através de comprimentos de onda (λ) conforme Figura 13.

Figura 13 – Características de transmissão dos perfis de rugosidade e ondulação



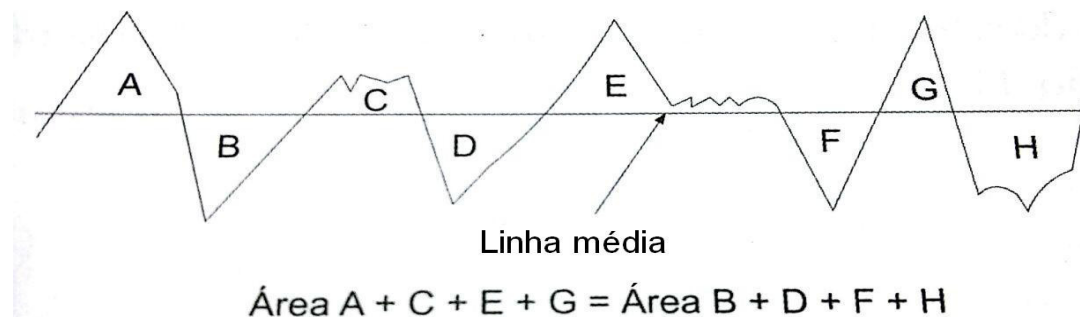
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2002)

No entanto, para entender como é medida a rugosidade, é necessário apresentar algumas definições fundamentais como linha média, comprimentos de medição e *cut-off*.

3.3.1.1.1 Linha média

A linha média é uma linha imaginária utilizada como base para os parâmetros de rugosidade. Esta linha corta a superfície na posição em que a área dos picos (acima da linha média) se equivale à área dos vales (abaixo da linha média), como representado na Figura 14.

Figura 14 – Posicionamento da linha média

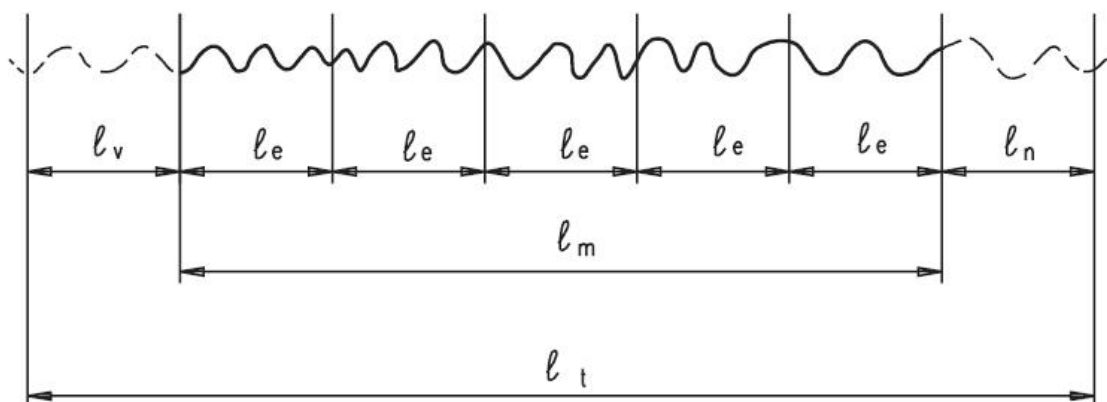


Fonte: Santos e Sales (2007)

3.3.1.1.2 Comprimentos ou percursos de medição

Conforme Marco Filho e Canabrava Filho (1997), Santos e Sales (2007) para medir a rugosidade são definidos três percursos ou comprimentos de avaliação, são eles: percurso de medição (l_m), comprimento de amostragem (l_e) e comprimento total (l_t). Existem ainda mais dois percursos, o percurso inicial (l_v) e o percurso final (l_n), que não são utilizados para medição, pois nestes trechos ocorre o amortecimento das oscilações mecânicas e elásticas iniciais do sistema e a centragem do perfil de rugosidades, além disso, nestes trechos a velocidade é variável (Figura 15).

Figura 15 – Comprimentos de análise utilizados para determinação da rugosidade



Fonte: Marinescu, et al. (2007) apud Macedo (2012)

3.3.1.1.3 Comprimentos de amostragem (Cut-off)

O comprimento de amostragem é conhecido também como *cut-off* ou comprimento de onda limite (λ_c) e tem como finalidade filtrar a ondulação. Esse comprimento é selecionado no próprio instrumento de medição e seu valor é especificado de maneira que seja no mínimo 2,5 vezes maior que a distância entre sulcos e de no máximo 8 vezes. Em processo onde o espaçamento entre os sulcos é aperiódico, como na retificação, o *cut-off* é dado de acordo com a rugosidade R_a da peça a ser medida (Quadro 7).

Quadro 7 – Valor de *cut-off* para perfis aperiódicos

Rugosidade R_a (μm)	Mínimo <i>cut-off</i> (mm)
$\leq 0,1$	0,25
maior que 0,1 até 2	0,80
maior que 2 até 10	2,50
>10	8,00

Fonte: Marco Filho e Canabrava Filho (1997)

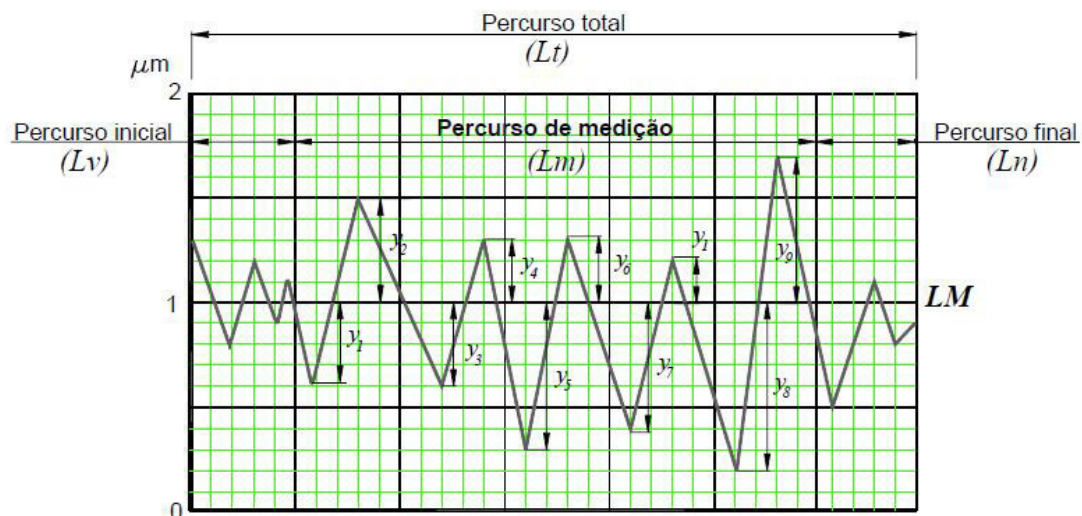
3.3.1.1.4 Rugosidade Média (R_a)

A rugosidade média de uma superfície é o parâmetro mais difundido e é calculada a partir da média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), em relação à linha média dentro do percurso de medição (Equação 10a ou 10b). Este parâmetro é muito utilizado em linhas de produção por ter grande aplicabilidade em diversos processos e é exibido na Figura 16 (MARCO FILHO e CANABRAVA FILHO, 1997).

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \quad (10a)$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_n| \quad (10b)$$

Figura 16 – Rugosidade média aritmética (R_a)



Fonte: (Marco Filho e Canabrava Filho (1997))

3.3.2 Rugosidade e retificação

No que diz respeito à retificação, a rugosidade, como foi visto anteriormente, é influenciada pelo tipo de grão do rebolo, o tamanho da malha do rebolo e o diâmetro equivalente da ferramenta, tipo de dressagem. Além disso, o acabamento superficial depende de parâmetros como dureza da peça, características estruturais e dinâmicas da máquina, profundidade de corte, velocidade do rebolo e peça e tipo de fluido (SHAJI; RADHAKRISHNAN, 2003 apud ANJOS, 2015).

Outros autores que especificam a dependência da rugosidade sobre certos fatores no processo de retificação são King e Hahn (1986) apud Alves (2005). Segundo eles, existem sete fatores:

- ✓ Força normal entre a peça e o rebolo durante as quatro ou cinco últimas revoluções antes do término do ciclo de retificação;
- ✓ Condição da superfície do rebolo (tamanho de grão, porosidade e desgaste do rebolo);
- ✓ Diâmetro equivalente do rebolo;
- ✓ Tempo de centelhamento (o rebolo é mantido na posição final especificada, sem deslocamento radial para reduzir deformações impostas no contato rebolo/peça);
- ✓ Capacidade de remoção do cavaco pelo fluido de corte e prevenção de empastamento;
- ✓ Quantidade de áreas planas nos grãos abrasivos;
- ✓ Uniformidade de durezas localizadas e a estrutura do rebolo em seu perímetro.

Outra observação pertinente, observada por Malkin (1989), é que a rugosidade na direção de corte apresenta maior ondulação, sendo ligeiramente menor do que na direção perpendicular a ela.

3.4 CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO

Para Costa, Epprecht e Carpinetti (2008) o controle permanente dos processos é condição básica para manutenção da qualidade de bens e de serviços. Qualidade do produto tem diferentes definições: adequação ao uso, atender as especificações ou grau de satisfação do consumidor. A qualidade de um produto ou serviço é estabelecida no projeto (qualidade de projeto), no entanto, nem sempre é cumprido tudo que estabelece, sendo necessário estipular a qualidade de conformação, que avalia quão bem um produto ou serviço atende as especificações de projeto.

O controle estatístico do processo (CEP) é, sem dúvida, uma das mais poderosas metodologias desenvolvidas visando auxiliar no controle eficaz da qualidade. O CEP é

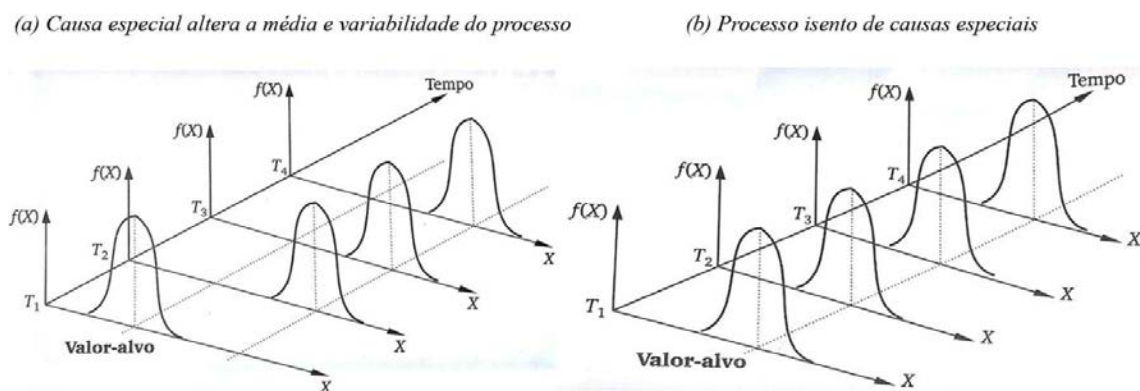
fundamentado no controle da qualidade conduzido simultaneamente com a manufatura (controle do processo), diferente de métodos como inspeção após a produção (controle do produto). É muito mais fácil e barato fazer certo da primeira vez, do que selecionar e retrabalhar produtos que não estejam conformes (CONTADOR et al., 2010).

Contador et al. (2010) definem dois motivos de variação no processo que devem ser conhecidos e controlados, variações devido a causa comum e causa especial. Uma causa comum, também chamada de causa aleatória, é a variação natural de um processo. Enquanto que as causas especiais, também conhecidas como causas esporádicas, geram variações que afetam o comportamento do processo de forma imprevisível.

Causas aleatórias, de acordo com Costa, Epprecht e Carpinetti (2008), podem ser representadas, geralmente, por uma distribuição normal ou normal aproximada de uma variável X que se mantém estável (com média e dispersão inalteradas) ao longo do tempo, ou seja, o processo se diz em controle estatístico, como representado na Figura 17 a. Já as causas especiais, as chamadas perturbações maiores, têm efeito de deslocar a distribuição da variável X (movendo a média do valor alvo), como ilustrado na Figura 17 b.

As variações devido às causas comuns estão sempre presente, e não podem ser alteradas sem mudanças na concepção do processo, assim como o deslocamento da média em relação ao valor alvo. Exemplos de causas especiais são desregulagem ocasional da máquina, lote de matéria prima com problema, quebra de ferramenta, entre outras (CONTADOR et al., 2010).

Figura 17 – Representação de processo com e sem causas especiais atuantes



Fonte: Costa, Epprecht e Carpinetti (2008)

3.4.1 Índice de capacidade de processo

Os índices de capacidade de processo (ICPs) são parâmetros adimensionais que indiretamente medem o quanto o processo consegue atender às especificações. Em geral, para grande parte dos índices, quanto maior seu valor, melhor o processo consegue atender às especificações (COSTA, EPPRECHT e CARPINETTI, 2008). Existem vários índices de capacidade, alguns índices serão descritos a seguir de acordo com Contador et al. (2010).

Índice Cp: definido como a razão entre a tolerância de engenharia e a dispersão total do processo:

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (11)$$

LSE = limite superior de especificação;

LIE = limite inferior de especificação;

σ = desvio padrão;

Índice Cpk: definido como o menor valor entre Cpi e Cps (Equação 12), ou seja, avalia a distância da média do processo aos limites de especificação, tomando aquela que é menor e, portanto, mais crítica em termos de produzir itens fora da especificação. Contador et al. (2010) considera que se $Cpk > 1$, o processo é capaz. Entretanto

$$Cpk = \text{Min} \left\{ \frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right\} \quad (12)$$

LSE = limite superior de especificação;

LIE = limite inferior de especificação;

μ = média do processo;

σ = desvio padrão.

Outro índice muito utilizado para avaliar o processo é Ppk . Este avalia a performance do processo considerando desvio padrão global, ou seja, desvio padrão de longo prazo, que é capaz de detectar variações entre as amostras. É calculado de maneira semelhante ao Cpk (Equação 13):

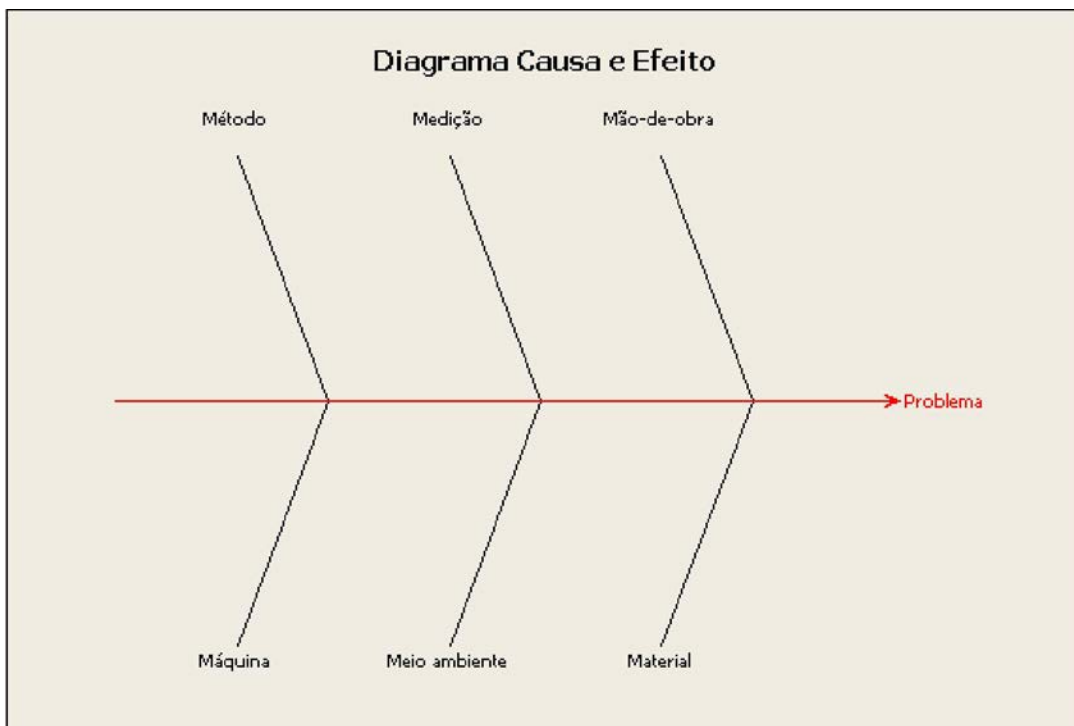
$$Ppk = \text{Min} \left\{ \frac{LSE - \mu}{3s}, \frac{\mu - LIE}{3s} \right\} \quad (13)$$

Sendo assim, pode-se concluir que o processo está consistente ao longo do tempo se o valor do Ppk está próximo ao valor da capacidade Cpk . Se esses valores divergirem, é sinal de que o processo tem sofrido variações entre as amostras.

3.4.2 Diagrama de causa e efeito

Diagrama de causa e efeito (Figura 18), também conhecido como Diagrama de Ishikawa ou espinha de peixe, devido ao seu formato, é uma representação significativa entre um efeito e suas possíveis causas. Permitindo descrever situações complexas, muito difíceis de serem descritas e interpretadas com palavras. Em geral, são empregadas as seguintes categorias: **Mão de obra, Máquinas, Métodos, Materiais, Medição e Meio Ambiente**, também conhecido como os 6 M's. Em cada linha de categoria do diagrama são adicionados possíveis causas (CONTADOR et al., 2010).

Figura 18 – Representação do diagrama causa efeito



Fonte: Produção do próprio autor

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

A seguir serão detalhados os materiais utilizados para elaboração deste estudo. Será detalhado o corpo de prova utilizado, com os respectivos processos agregados a ele, bem como a máquina retificadora e o processo de retificação utilizado, as ferramentas de corte ensaiadas, o sistema de dressagem e o método de lubrificação da peça.

4.1.1 Corpo de prova

O corpo de prova em estudo é o eixo secundário de uma transmissão automotiva, fabricado com aço ABNT 8620. O aço ABNT 8620 é amplamente utilizado na fabricação de engrenagens, pinos e peças onde há exigência de dureza superficial obtida pelo processo de cementação ou carbonitreção. A composição química aproximada do aço está descrita na Quadro 8, e a dureza do material como fornecido é de 157 HB. O diâmetro inicial da peça no ponto a ser estudada a rugosidade é de 27,2 μm , e o comprimento da peça é de 300 mm.

Quadro 8 – Composição química do aço ABNT 8620, utilizado nos experimentos

Aço ABNT 8620	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Al
Comp. Química	0,19	0,81	0,25	0,013	0,022	0,51	0,19	0,50	0,022
Aço ABNT 8620	%Cu	%Ca	%N						
Comp. Química	0,06	0,0008	0,007						

Fonte: Certificado de Qualidade do Material - GERDAU S/A (2017)

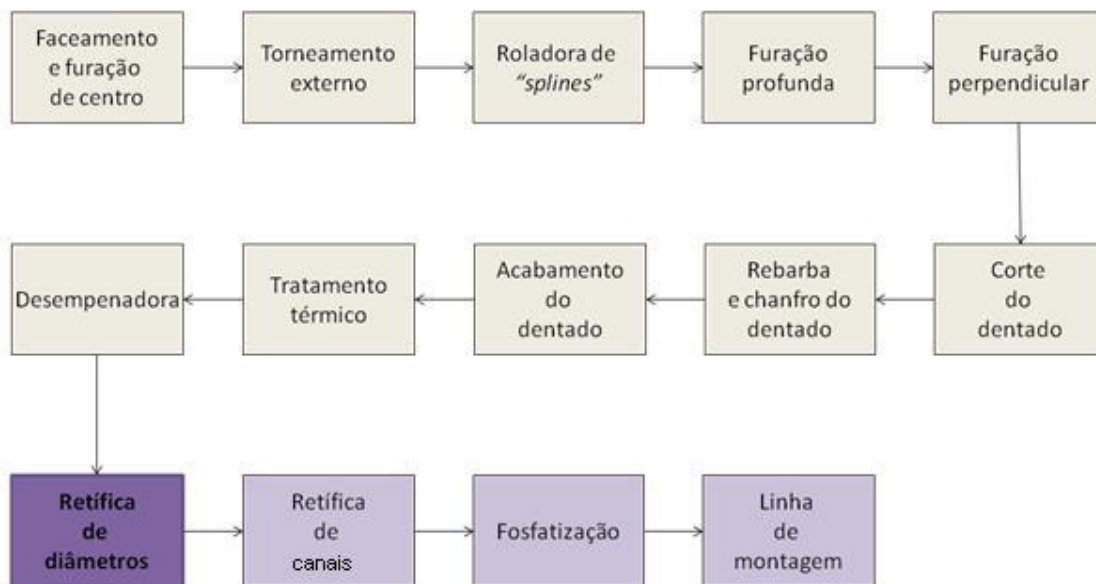
O material é recebido pelo fornecedor da matéria prima e passa pelo processo de forjamento a quente tomando a forma de material bruto e entregue à empresa para usinagem. Em seguida, são realizadas algumas operações de usinagem descritas de acordo com o fluxograma completo do processo, Figura 19, bem como a operação que será dedicada este trabalho (Retificação de diâmetros).

O tratamento térmico utilizado no corpo de prova é a cementação (Figura 20). Esse tratamento térmico promove enriquecimento com carbono da superfície de um aço de baixo carbono. O objetivo é que, após a têmpera e revenimento, esta camada apresente uma dureza mais elevada do que a do núcleo. A dureza superficial, na condição cementada e temperada,

pode alcançar 62 HRC (688 HB), enquanto que a dureza de núcleo varia entre 30 e 45 HRC (286 a 421 HB).

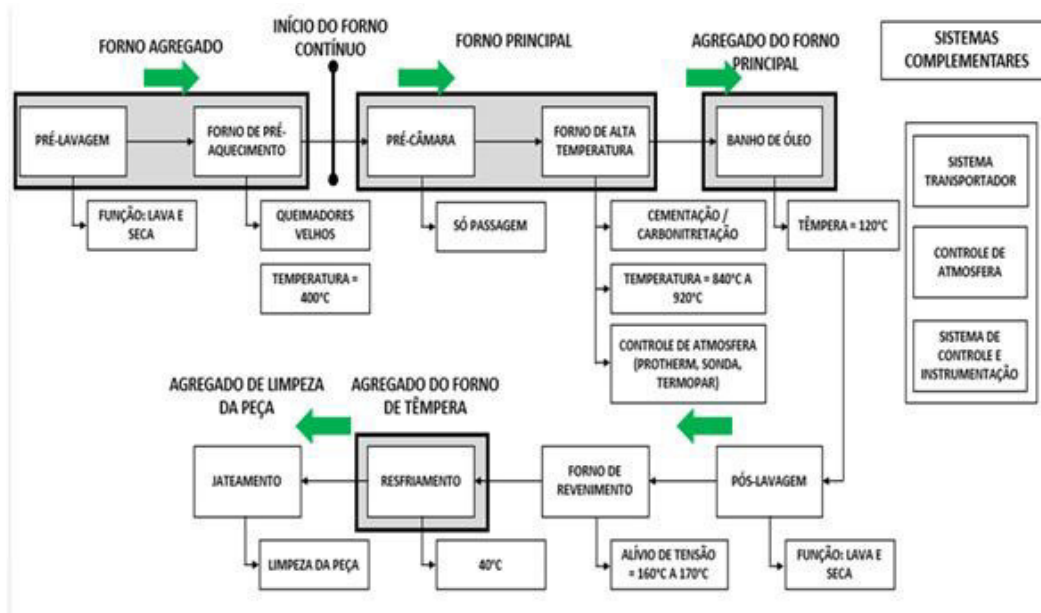
A espessura da camada cementada especificada é de 0,600 mm à 1,000 mm após o tratamento térmico, e de no mínimo 0,400 mm após a retificação. Geralmente, o sobre metal para retificação é 0,200 mm no diâmetro do eixo (Figura 21).

Figura 19 – Fluxograma do processo de fabricação do corpo de prova



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 20 – Representação do tratamento térmico de cementação



Fonte: Produção do próprio autor

O tratamento térmico de cementação pode ser feito em cementação a gás, cementação líquida e outros. No estudo abordado o carbono vem do gás e é aplicado em peças que necessitam de dureza superficial, resistência à fadiga de contato e submetidas a cargas superficiais elevadas.

O perfil da peça corresponde por diversos diâmetros retificados, que variam entre Ø24 mm no topo da peça, até Ø33 mm próximo ao pinhão. Devido aos conhecimentos prévios da operação, observou-se que não há variação na rugosidade nos diversos pontos do eixo. Sendo assim, o foco do trabalho se concentrou no diâmetro do rolamento (Ø rolamento especificado de $27 \pm 0,0075$ mm).

Figura 21 – Corpo de prova do experimento, eixo bruto



Fonte: Produção do próprio autor

4.1.2 Máquina retificadora

A máquina utilizada no presente trabalho foi a retificadora cilíndrica externa do fabricante Schaudt GmbH, modelo PS5 N750 (Figura 22). Equipada com CNC Siemens Sinumerik 840C, sistema de medição para diâmetro (*in process*) e posicionamento da peça, além de balanceamento eletrônico Marposs P7.

Figura 22 – Imagem ilustrativa da máquina retificadora Schaudt GmbH



Fonte: Bomvalor (2017)

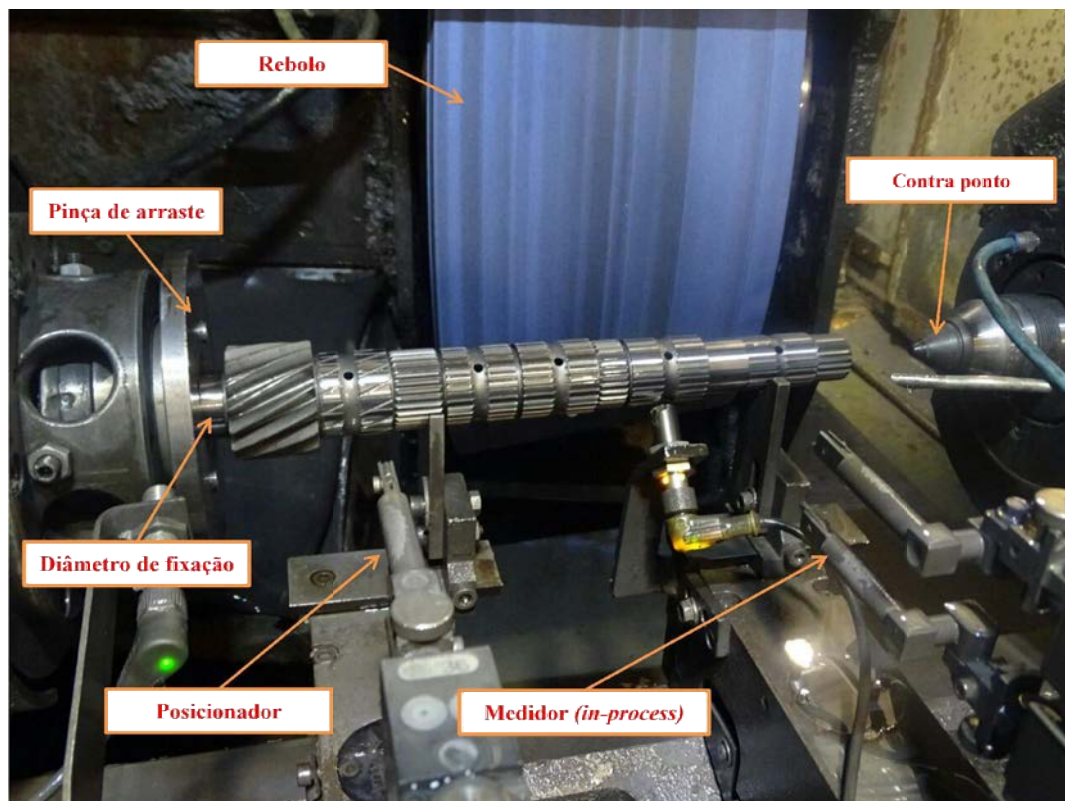
4.1.2.1 O processo de retificação empregado

Para retificar as peças a serem estudados os valores de rugosidade, foi realizado o processo como segue:

A peça é carregada através de um sistema automático de braço robotizado da empresa Felsomat e é fixada entre pontas através de um ponto fixo e um contra pronto com acionamento pneumático. O posicionador atua sobre a peça (com acionamento hidráulico), compensando a diferença no posicionamento da peça. A peça é colocada em rotação através de um sistema de pinça pneumática que é fixa à peça através do diâmetro indicado na Figura 23.

Em seguida, o rebolo inicia o ciclo de retificação, juntamente com o avanço do medidor sobre o diâmetro da peça. Ao atingir a medida desejada (\varnothing rolamento especificado = $27 \pm 0,0075$ mm), indicada pelo medidor, a máquina encerra o ciclo de retificação e retorna à sua posição inicial aguardando um próximo ciclo.

Figura 23 – Detalhes do processo de retificação



Fonte: Produção do próprio autor

4.1.3 Ferramentas de corte

Neste trabalho foram estudados três diferentes rebolos, conforme segue abaixo:

✓ Rebolo **Alcar 2A 80.2 L5V1**: Rebolo de óxido de alumínio monocristalino (2A), com tamanho de grão #80 (60% em tamanho de grão #80 e 40% em tamanho de grão #60). Com dureza média (L) e estrutura de aglomeramento médio (5). Este rebolo com ligante vitrificado (V) era o atualmente especificado.

✓ Rebolo **Alcar SA/AA100.2 L5V1**: Rebolo composto pela combinação de óxido de alumínio cerâmico (Cubitron® - SA) e óxido de alumínio branco (AA). Possui combinação granulométrica com grãos finos *mesh* #100 (80% em tamanho de grão #100 e 20% em tamanho de grão #120). Assim como o rebolo anterior, possui dureza (L) e estrutura (5) média com aglomerante vitrificado (V).

✓ Rebolo **SIVATSW 100.5 K4V08N**. Rebolo com grãos abrasivos de óxido de alumínio cerâmico (SG) com combinação granulométrica de tamanho de grão predominante igual a 100 (20% #80 + 40% #100 + 20% #120 + 20% #150). Com nível de dureza macia (K), estrutura fechada (4) e tipo de liga vitrificado (V).

Todos os rebolos (Tabela 1) possuem a mesma dimensão e mesmo formato, e são detalhados a seguir:

- ✓ Diâmetro externo (novo): 758 mm;
- ✓ Diâmetro externo (fim de vida): 560 mm;
- ✓ Diâmetro do flange: 244 mm;
- ✓ Largura do rebolo: 304 mm;
- ✓ Formato: Copo cônico.

Tabela 1 – Ferramentas de corte utilizadas no experimento

Alcar 2A 80.2 L5V1 (ATUAL)	Alcar SA/AA 100.2 L5V1	SIVAT SW 100.5 K4V08N
<ul style="list-style-type: none"> • Material do grão: Óxido de alumínio monocristalino (2A) • Tamanho de grão #80 (60% #80 + 40% #60) • Dureza média (L) • Estrutura: média (5) • Ligante: Vitrificado 	<ul style="list-style-type: none"> • Material do grão: Óxido de alumínio branco (AA) + cerâmico (Cubitron® - SA) • Tamanho de grão #100 (80% #100 + 20% #120) • Dureza média (L) • Estrutura: média (5) • Ligante: Vitrificado 	<ul style="list-style-type: none"> • Material do grão: Óxido de alumínio cerâmico (SG) • Tamanho de grão #100 (20% #80 + 40% #100 + 20% #120 + 20% #150) • Dureza macia (K) • Estrutura: fechada (4) • Ligante: Vitrificado

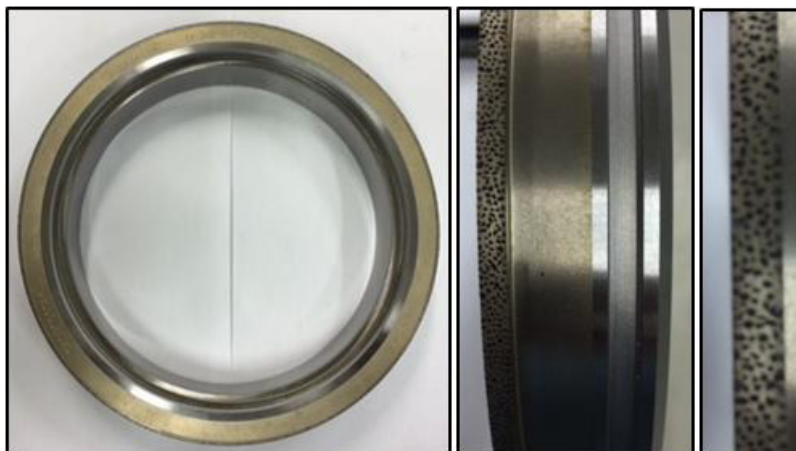
Fonte: Produção do próprio autor

4.1.4 Dressagem

O rolo dressador utilizado na máquina (Figura 24), da marca Stroh, é feito sob encomenda para a empresa. O sentido de rotação do dressador é discordante ao rebolo, ou seja, o dressador opera em sentido de rotação inverso ao rebolo. A profundidade de penetração e a quantidade de peças retificadas para nova dressagem será apresentada para cada rebolo logo adiante.

Para todos os testes realizados, a razão de velocidade de dressagem (q_d) não foi alterada, permanecendo igual a -0,8 (sendo o valor negativo representando o movimento discordante entre rebolo e rolo dressador).

Figura 24 – Rolo dressador Stroh utilizado na máquina



Fonte: Produção do própria do autor

4.1.5 Lubrificação e refrigeração da peça

A lubrificação e refrigeração da peça são realizadas através de um sistema central de lubrificação (GIPI Astrex filtro PAC 1505), onde é utilizada uma emulsão com Greencool 1006 (concentração: mínimo 6 g/L e máximo 8 g/L; pH: mínimo 8,4 e máximo 10) é controlada diariamente. O tanque de armazenagem possui capacidade de 11000 litros, e o sistema central filtra e refrigera o fluido.

A lubrificação da peça é feita de maneira convencional, ou seja, a emulsão é bombeada à pressão variando de 4 a 5 bar sobre a peça de forma abundante através de bicos direcionados na periferia do rebolo.

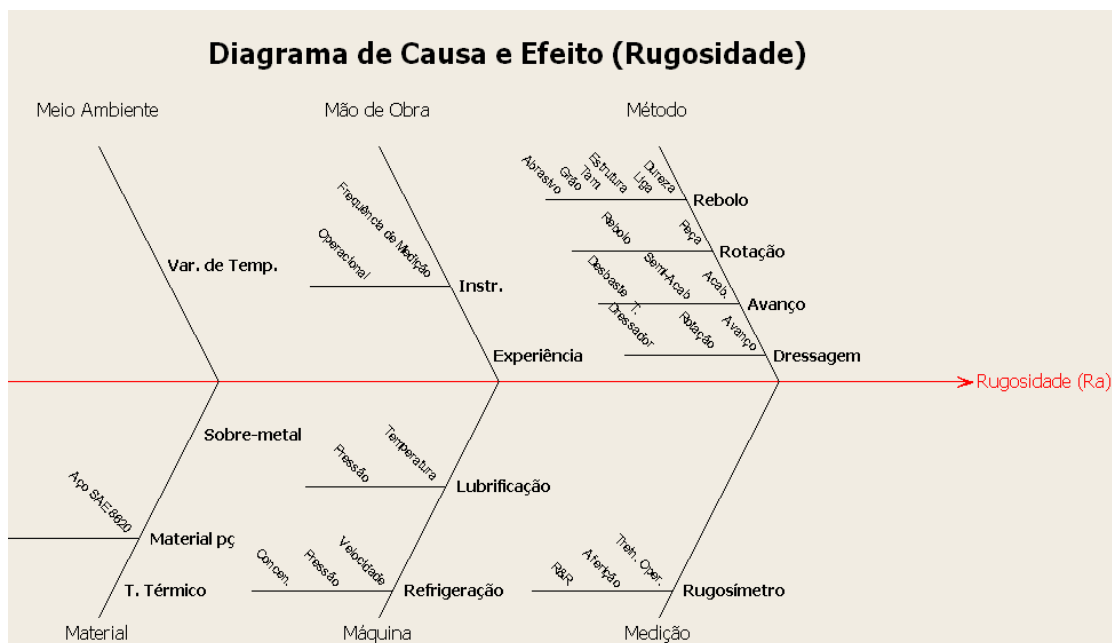
4.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Conforme dito anteriormente, o principal objetivo do trabalho era a redução de custo e melhor aderência aos parâmetros de rugosidade estipulados para a peça em estudo. Para tanto, os seguintes métodos foram seguidos.

4.2.1 Delimitação das variáveis de impacto

Com o objetivo de reduzir ao máximo todas as causas especiais atuantes no processo, foi reunida uma equipe multidisciplinar, com técnicos especialistas em ferramentas, manutenção, operadores e engenheiros. Para melhor organizar as possíveis causas e soluções para o problema de não aderência à qualidade superficial especificada, foi elaborado um diagrama de causa efeito da Figura 25.

Figura 25 – Diagrama de causa e efeito (Ishikawa)



Fonte: Produção do próprio autor

4.2.2 Análise e ajustes do processo

Algumas causas especiais atuantes no processo foram detectadas e resolvidas. Como folga no cabeçote acionador do rolo dressador; rolo dressador com desgaste excessivo (substituído); confirmação da invariabilidade características do material tratado; correção para os corretos parâmetros de corte configurados na máquina; aferição do rugosímetro utilizado e treinamento de operadores para medição da rugosidade de forma correta.

Em seguida, foi realizada uma análise de capacidade do processo atual para verificar a melhor situação conseguida com os ajustes realizados. Os resultados obtidos são apresentados na próxima seção “Resultados e Discussões”.

4.2.3 Estudo de capacidade do processo atual para rugosidade (Ra)

O estudo de capacidade do processo atual foi realizado após eliminar as causas especiais contidas no processo. O objetivo desse estudo foi verificar a melhor condição obtida no processo com a ferramenta de corte já utilizada no processo, rebolo **Alcar 2A 80.2 L5V1**. Além de avaliar o processo quanto a presença ou não de causas especiais.

Os parâmetros de corte utilizados no estudo foram ajustados conforme especificado pelos fabricantes da máquina e da ferramenta e estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de corte para o estudo de capacidade do rebolo

Parâmetro do processo	Valor utilizado
Velocidade de corte ou velocidade do rebolo	$V_s = 45 \text{ m/s}$
Diâmetro do rebolo novo	$d_s = 758 \text{ mm}$
Diâmetro do rebolo fim de vida	$d_s = 560 \text{ mm}$
Velocidade da peça	$V_w = 0,5 \text{ m/s}$
Diâmetro da peça (trecho analisado Ra)	$d_w = 27 \text{ mm}$
Velocidade de mergulho 0 – GAP (não toca a peça) 1 – Desbaste 2 – Semi-acabamento 3 – Acabamento	$V_{f-0} = 5 \text{ mm/min}$ $V_{f-1} = 1,4 \text{ mm/min}$ $V_{f-2} = 0,5 \text{ mm/min}$ $V_{f-3} = 0,09 \text{ mm/min}$
Intervalo de dressagem	8 peças
Profundidade do passo de dressagem	30 μm

Fonte: Produção do próprio autor

A velocidade do rebolo é controlada e mantida constante conforme ocorre o desgaste do rebolo pelo aumento da rotação do eixo motriz da ferramenta. Ou seja, o rebolo novo tem rotação menor se comparado com o rebolo gasto.

O processo é desenhado para que a rugosidade seja medida sempre ao início de cada turno, porém, para este estudo, foi coletada uma amostra de **60 peças** produzidas sequencialmente.

Antes de realizar a medição no rugosímetro, as peças foram lavadas e numeradas de 1 a 60 de acordo com a ordem de usinagem. As medições da rugosidade foram feitas conforme descrito na seção 4.2.5.

4.2.4 Experimentos com as ferramentas de corte

Visto que os resultados apresentados não foram satisfatórios, o time de engenheiros especialistas decidiu solicitar auxílio dos fabricantes de ferramentas abrasivas parceiros para testes com outras especificações de rebolos, de modo que o processo continuasse com a mesma capacidade produtiva, atendesse as especificações de rugosidade determinadas em projeto e, se possível, houvesse uma redução nos custos com a ferramenta de usinagem.

4.2.4.1 Rebolosde grão cerâmico (Cubitron® e SG)

O primeiro rebolo testado foi o rebolo Alcar SA/AA 100.2 L5V1 e o segundo o rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N. Os procedimentos a seguir foram realizados para os dois rebolos.

A sequência de eventos descritas a seguir é descrita para o operador em um documento que padroniza as etapas de operação em cada posto de trabalho.

Foi retirado da máquina o rebolo Alcar 2A 80.2 L5V1, e montado o rebolo de teste. Logo após, foi realizado o procedimento padronizado de *offset* do disco dressador na superfície de referência do rebolo. Em seguida, o rebolo foi dressado até obter o perfil ideal de trabalho. Posteriormente, realizou-se o procedimento de zero peça, que consiste em gravar as posições do rebolo na superfície de uma peça com medidas conhecidas e dentro do especificado no processo.

Os parâmetros de corte se mantiveram os mesmos se comparados ao estudo de capacidade do rebolo Alcar 2A 80.2 L5V1, com exceção de dois parâmetros: **o intervalo de dressagem e a profundidade do passo de dressagem**. Estes foram alterados conforme Tabela 3 de acordo com a especificação dos rebolos pelos seus respectivos fabricantes, sendo iguais para os dois rebolos de grão cerâmico.

Tabela 3 – Parâmetros de corte para teste do rebolo grão cerâmico (Cubitron® e SG)

Parâmetro do processo	Valor utilizado
Velocidade de corte ou velocidade do rebolo	$V_s = 45 \text{ m/s}$
Diâmetro do rebolo novo	$d_s = 758 \text{ mm}$
Diâmetro do rebolo fim de vida	$d_s = 560 \text{ mm}$
Velocidade da peça	$V_w = 0,5 \text{ m/s}$
Diâmetro da peça (trecho analisado Ra)	$d_w = 27 \text{ mm}$
Velocidade de mergulho 0 – GAP (não toca a peça) 1 – Desbaste 2 – Semi-acabamento 3 – Acabamento	$V_{f-0} = 5 \text{ mm/min}$ $V_{f-1} = 1,4 \text{ mm/min}$ $V_{f-2} = 0,5 \text{ mm/min}$ $V_{f-3} = 0,09 \text{ mm/min}$
Intervalo de dressagem	12 peças
Profundidade do passo de dressagem	15 μm

Fonte: Produção do próprio autor

Foram coletadas 30 peças produzidas por cada um dos rebolos para o estudo da rugosidade no processo. A primeira e a décima segunda peça de quinze ciclos de dressagem. Sendo que cada ciclo de dressagem corresponde 12 peças conforme citada na Tabela 3. Ou seja, foi retificado um total de 180 peças com cada um dos rebolos testados.

Esta metodologia foi adotada, pois desta maneira seria possível analisar o comportamento da rugosidade quando o rebolo se encontrasse mais agressivo (primeira peça após a dressagem) e quando o mesmo se encontrasse menos agressivo (última peça antes da dressagem).

As peças foram segregadas, lavadas e numeradas de 1 a 30 para cada um dos rebolos. As medições da rugosidade foram feitas conforme descrito na seção 4.2.5.

4.2.5 Medição da rugosidade (R_a)

Para medir a rugosidade foi utilizado o dispositivo ilustrado na Figura 26. A peça foi fixada à base magnética que por sua vez se encontrava apoiada no desempenho. Com o auxílio do dispositivo, o rugosímetro foi posicionado no sentido perpendicular às estrias da retificação da peça. As características do rugosímetro utilizado são descritas a seguir:

- ✓ Marca: Mahr;
- ✓ Modelo: MarSurf PS1
- ✓ Faixa de medição: 0-350 μ m;
- ✓ Resolução: 8nm - 32nm;
- ✓ *Cut-off*: 0,25mm, 0,8mm, 2,5mm;
- ✓ Comprimento total de medição: 1,75mm, 5,6mm, 17,5mm;

Figura 26 – Aparato para medição da rugosidade

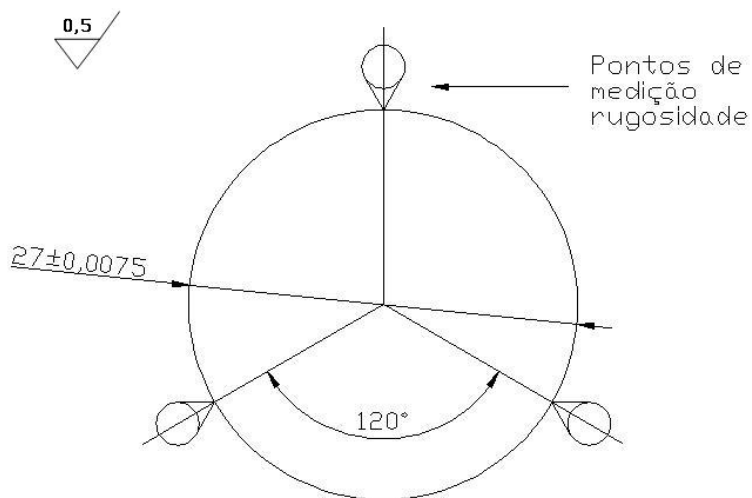


Fonte: Produção do próprio autor

Conforme representado no Quadro 7, o *cut-off* selecionado para medição foi de $l_e = 0,8\text{mm}$, o percurso total $l_t = 7 \times l_e = 5,6\text{ mm}$, e o comprimento do percurso de medição $l_m = 5 \times l_e = 4\text{ mm}$.

A medição da rugosidade foi realizada tomando três pontos aproximadamente equidistantes de 120° , e tomada a média das três medidas para estudo. A posição de medição especificada para o produto é no diâmetro do rolamento $27 \pm 0,0075\text{ mm}$ perpendicular ao sentido de usinagem e de valor máximo de $0,5\ \mu\text{m Ra}$, conforme indicado no desenho da Figura 27.

Figura 27 – Pontos de medição da rugosidade



Fonte: Produção do próprio autor

As outras características solicitadas no processo (diâmetros, circularidade, linearidade, paralelismo e batimento axial) foram medidas com maior frequência e não apresentaram alterações significativas. Por este trabalho estar direcionado à rugosidade da peça em função de cada rebolo e associado ao custo por unidade produzida, esses dados não serão detalhados.

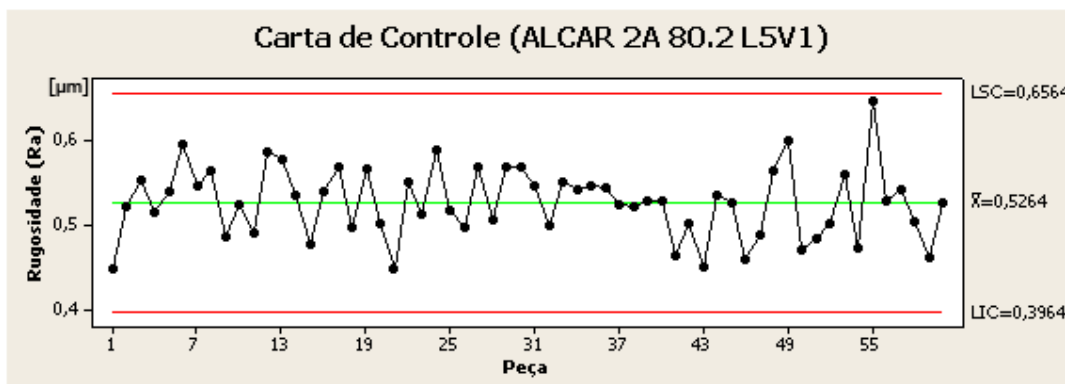
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para a análise de capacidade do rebolo utilizado na operação e para os dois rebolos testados. Além disso, são exibidas a análise de custo e benefício da utilização de cada um dos rebolos na operação estudada. Os gráficos exibidos a seguir, foram gerados através do Minitab® 16.

5.1 CAPABILIDADE DO PROCESSO ATUAL PARA RUGOSIDADE

A análise de capacidade do processo atual foi realizada da seguinte forma. Primeiramente foi plotado a carta de controle para as medições de rugosidade em função das sessenta amostras obtidas, conforme mostrado na Figura 28.

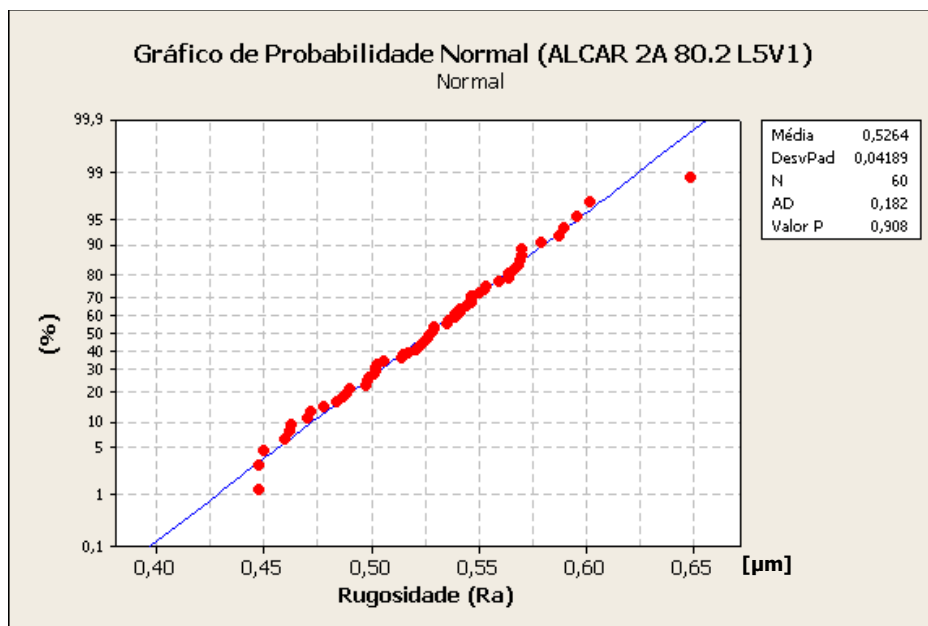
Figura 28 – Carta de controle para Rugosidade (Ra) do rebolo ALCAR 2A 80.2 L5V1



Fonte: Produção do próprio autor

Em seguida, foi plotado o gráfico de probabilidade normal dos dados obtidos da medição da rugosidade com rebolo ALCAR 2A 80.2 L5V1 (Figura 29).

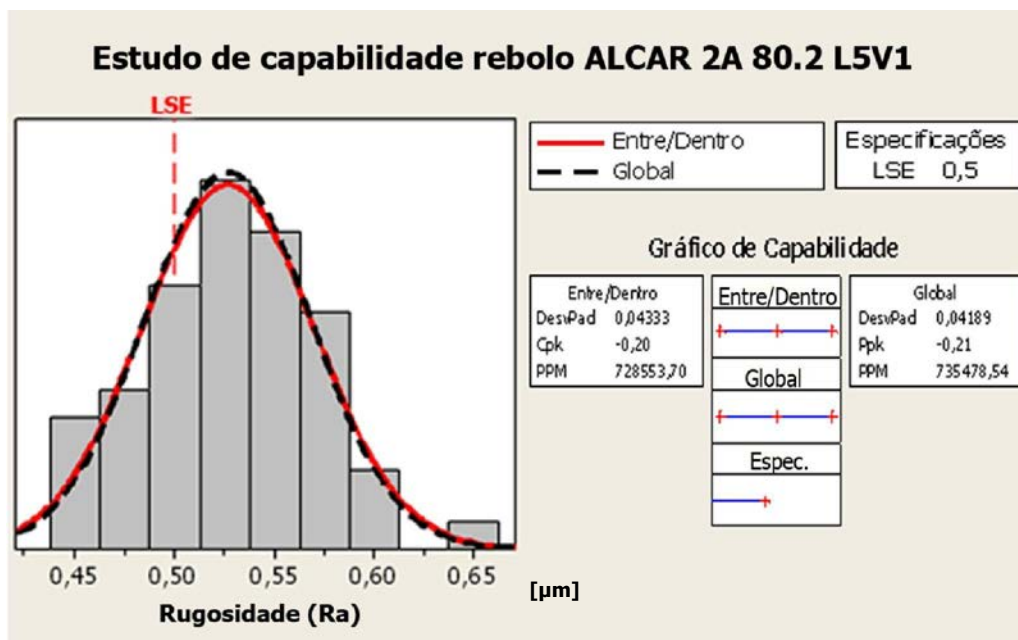
Figura 29 – Gráfico de probabilidade normal rebolo ALCAR 2A 80.2 L5V1



Fonte: Produção do próprio autor

A partir daí foi calculado a capacidade do processo, através dos índices C_{pk} e P_{pk} como mostrado na Figura 30. Foi utilizada a ferramenta “*Capability SixPack*” do Minitab® 16. Definido com limite superior de especificação 0,5 e subgrupos de tamanho 2.

Figura 30 – Estudo de capacidade do rebolo ALCAR 2A 80.2 L5V1



Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 28, a Carta de controle para o rebolo ALCAR 2A 80.2 L5V1 fica evidente que o processo atual não era capaz de atender os requisitos de especificação para a rugosidade de 0,5 μm Ra. Não só apenas alguns pontos ficaram acima do LSE (Limite Superior de Especificação), bem como a própria média da amostra (5264 μm) não é suficiente para atender o especificado.

Para se avaliar os coeficientes Cpk e Ppk é necessário que a distribuição seja normal. Na Figura 29 é representado o teste de normalidade da amostra. Este deixa claro que a distribuição da amostra é normal, também visualizada no formato de sino característico desta distribuição na Figura 30.

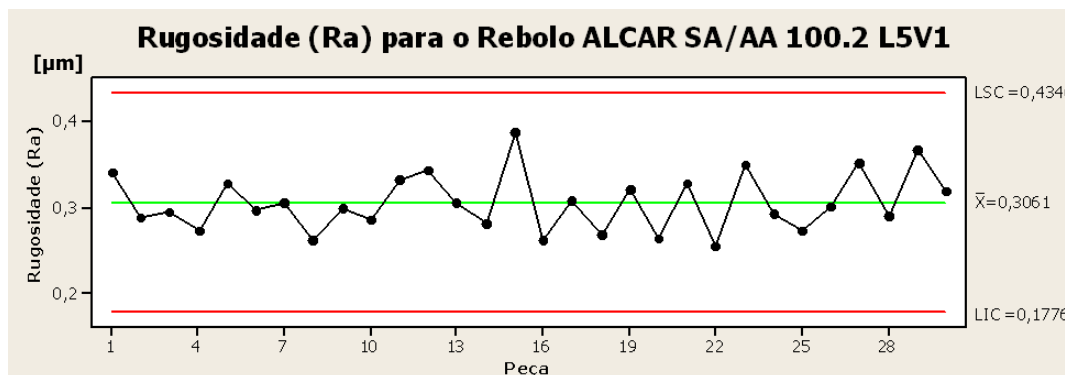
Finalmente, o índice de capacidade Cpk para o estudo realizado teve sinal negativo. O que evidenciou que a média da amostra estava fora do campo especificado para a rugosidade média (Ra).

5.2 RESULTADOS DOS TESTES DE CAPABILIDADE

5.2.1 Rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1

A análise de capacidade do para o rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1 foi realizada de forma semelhante à análise de capacidade do processo atual. Primeiramente foi plotado a carta de controle para as medições de rugosidade em função das trinta peças obtidas, conforme mostrado na Figura 31.

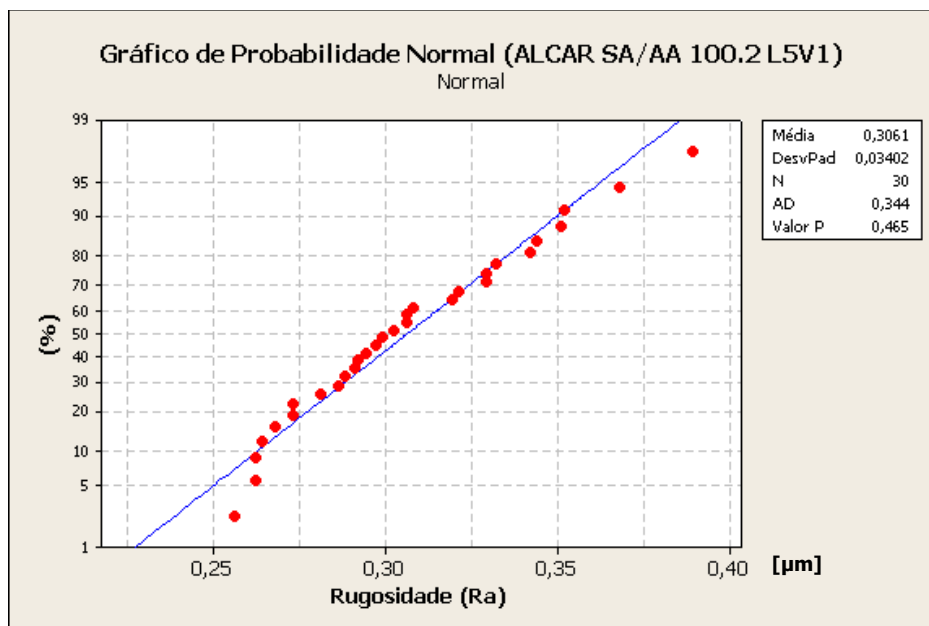
Figura 31 – Carta de controle para Rugosidade (Ra) do rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1



Fonte: Produção do próprio autor

Em seguida, foi plotado o gráfico de probabilidade normal dos dados obtidos da medição da rugosidade com rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1(Figura 32).

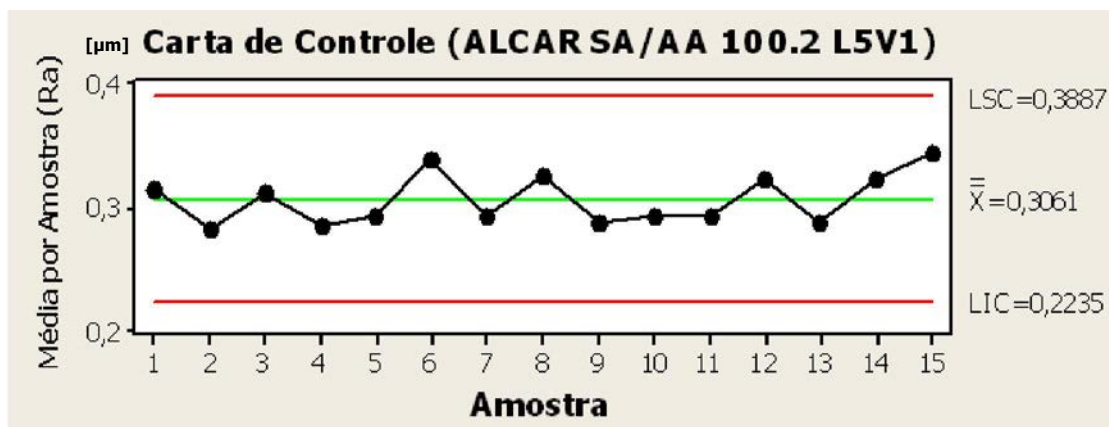
Figura 32 – Gráfico de probabilidade normal rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1



Fonte: Produção do próprio autor

Com os dados obtidos, foi possível gerar o gráfico de controle considerando cada amostra como a média das duas peças de cada ciclo de dressagem, conforme mostrado na Figura 33.

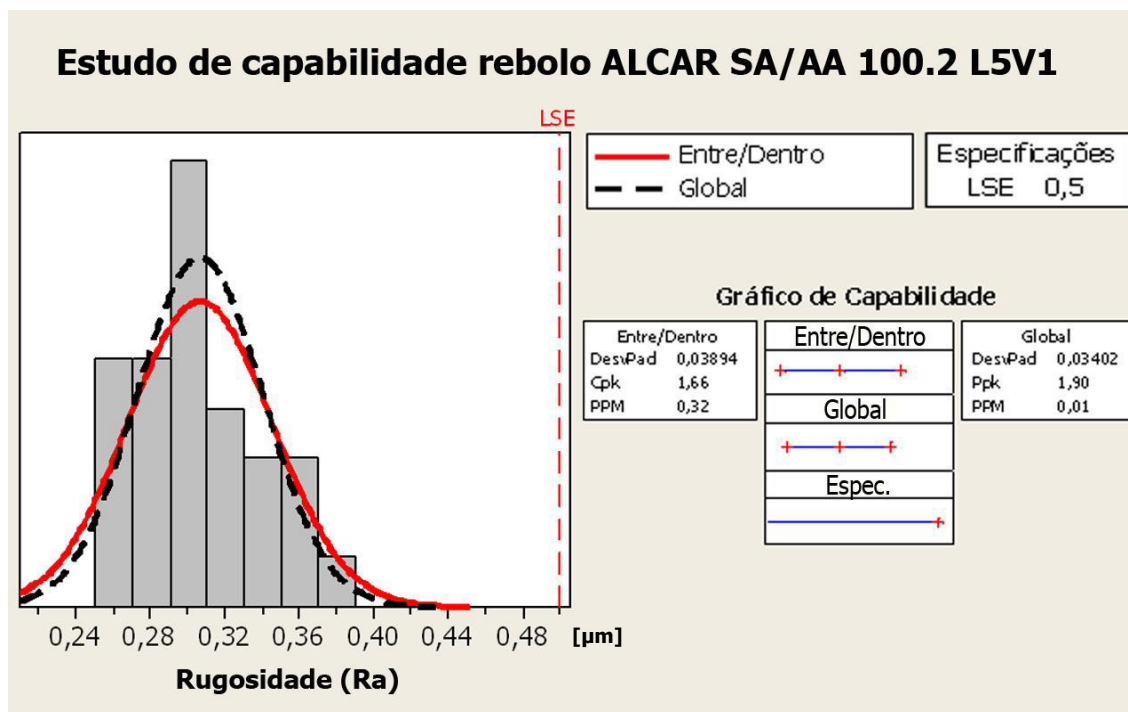
Figura 33 – Gráfico de controle para as amostras do rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1



Fonte: Produção do próprio autor

Por fim, foi calculado a capacidade do processo, através dos índices C_{pk} e P_{pk} como mostrado na Figura 34.

Figura 34 – Estudo de capacidade do rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1



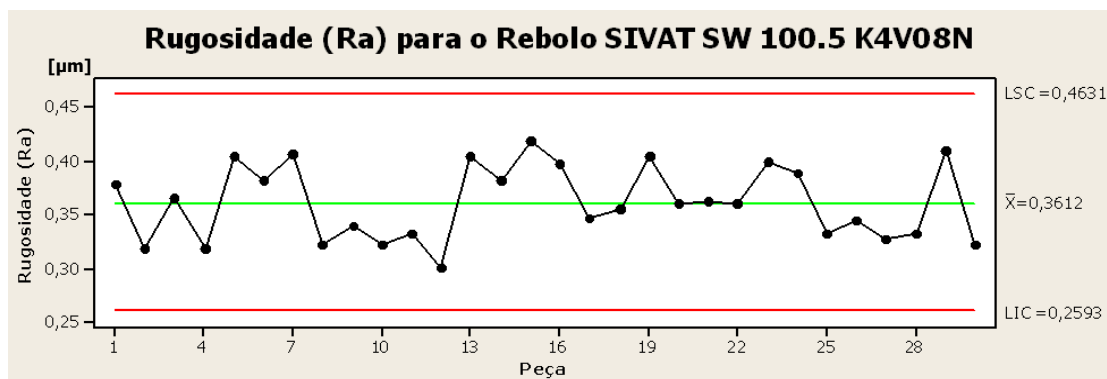
Fonte: Produção do próprio autor

5.2.2 Rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N

Os resultados obtidos para análise de capacidade do rebolo **SIVAT SW 100.5 K4V08N** respeitaram a mesma sequência que o rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1.

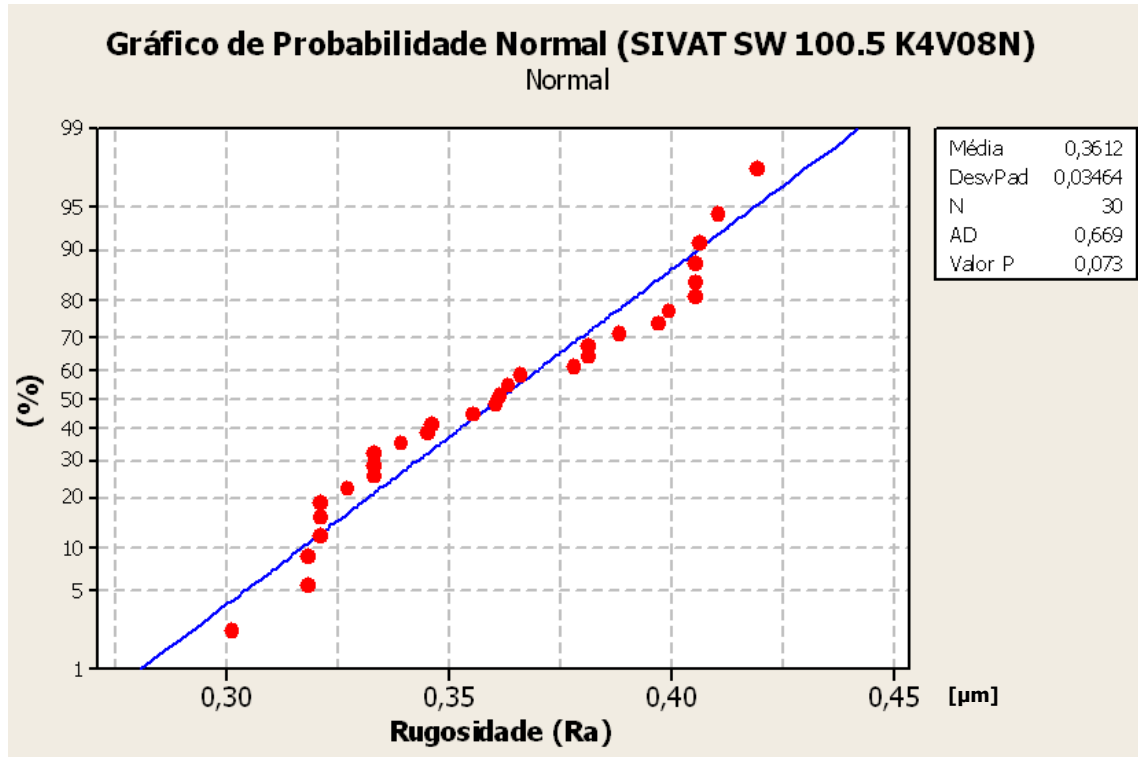
- ✓ Carta de controle para rugosidade (Figura 35);
- ✓ Gráfico de probabilidade normal (Figura 36);
- ✓ Gráfico de controle para as médias entre as peças das amostras (Figura 37);
- ✓ Estudo de capacidade (Figura 38).

Figura 35 – Carta de controle para Rugosidade (Ra) do rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N



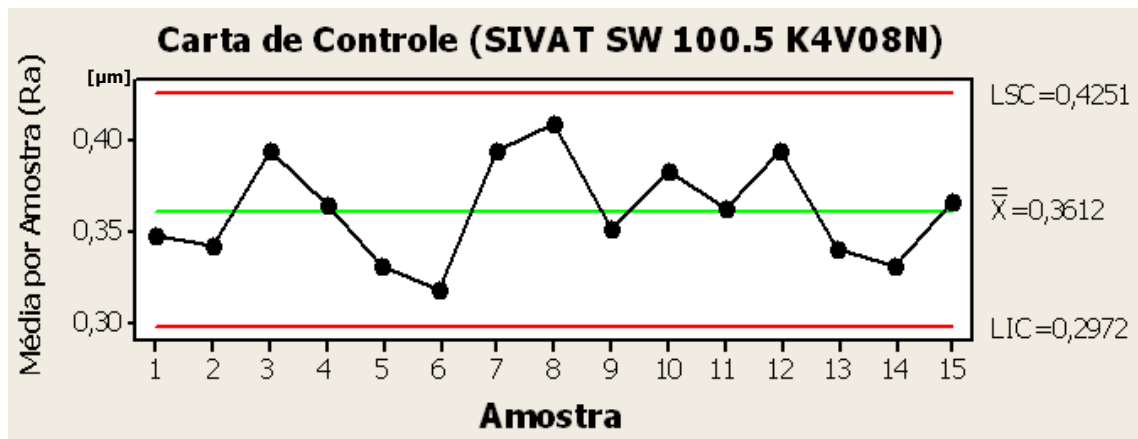
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 36 – Gráfico de probabilidade normal rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N



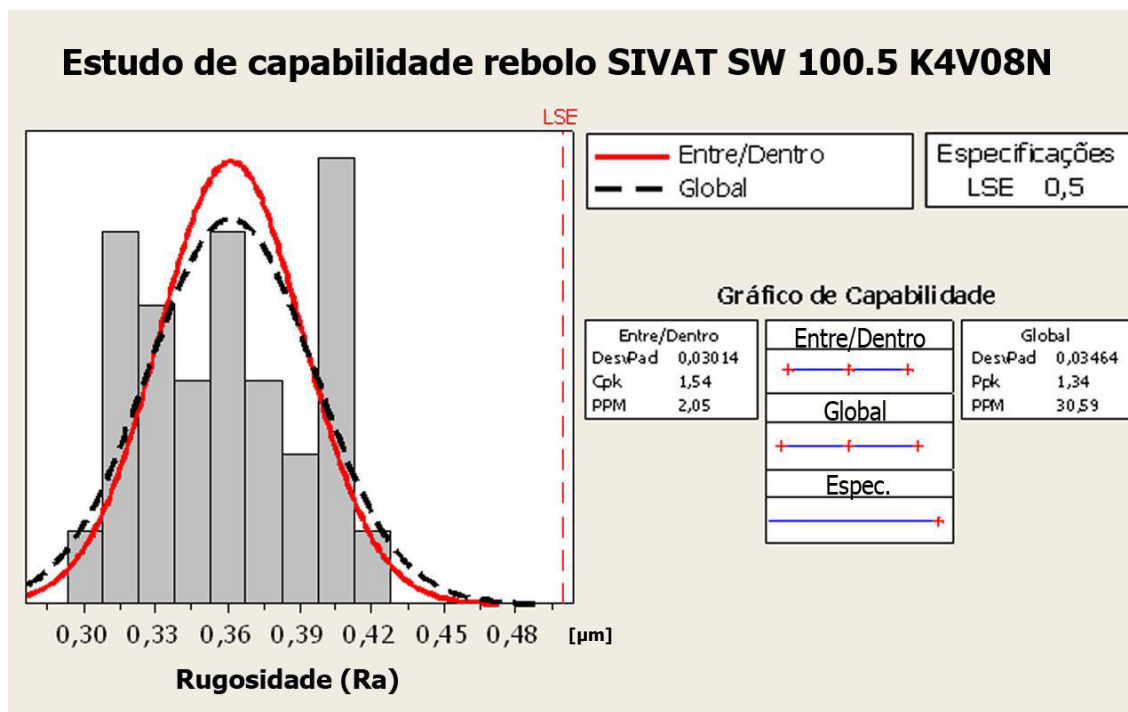
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 37 – Gráfico de controle para as amostras do rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 38 – Estudo de capacidade do rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N



Fonte: Produção do próprio autor

Ao analisar as cartas de controle com os valores da rugosidade média em função de cada peça medida, tanto para o rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1 (Figura 31), quanto para o rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N (Figura 35), foi possível observar um comportamento característico que evidencia o efeito da dressagem na rugosidade produzida pelo rebolo na peça subsequente. Na maioria dos casos, para os dois rebolos, a rugosidade média da primeira peça após a dressagem foi superior a rugosidade média da última peça antes da dressagem seguinte. Este resultados se devem a própria definição de dressagem, descrita por Diniz, Marcondes e Coppini (2013) como a reconstituição da agressividade (capacidade de corte) do rebolo.

Os gráficos de probabilidade normal (Figuras 32 e 36), usados para avaliar se a distribuição pode ser considerada normal, apresentam que as duas distribuições tendem a uma normal. Esse fato é comprovado devido a três resultados que podem ser visualizados nestas figuras. Primeiramente os pontos plotados tendem a formar uma linha reta que acompanham a linha ajustada ao centro. Os outros dois resultados são valores analíticos calculados pelo Minitab® 16, a estatística de teste de Anderson-Darling (AD) e o valor p. Estatisticamente, se o valor p é menor do que 0,05, a hipótese nula de que os dados seguem a distribuição normal deve ser rejeitada. Em ambos os testes de probabilidade normal o valor p foi superior a 0,05,

porém para os dados do rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N, o valor p foi baixo. Esse resultado também é visível no histograma da Figura 38 e pode ser explicado devido à existência de poucos dados amostrais, como foi o caso desse teste.

Finalmente, os dois rebolos testados apresentaram ótimos resultados. Tanto as peças medidas no rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N como no rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1 estão dentro do especificado para o LSE de $0,5 \mu\text{m}$ de rugosidade média (Ra). Os dois principais fatores que resultaram na diminuição da rugosidade média foram:

- ✓ O uso de granulometria mais refinada nos dois rebolos testados quando comparados ao rebolo anteriormente utilizado na máquina. Os grãos dos rebolos testados possuíam granulometria predominantemente fina (número *mesh* 100), enquanto o rebolo anterior grãos médios (número *mesh* 80);

- ✓ Outra característica dos rebolos testados de total influência na rugosidade média (Ra) foi a utilização de grãos cerâmicos na composição dos rebolos (Cubitron® e SG). O que proporcionou um melhor acabamento superficial e maior friabilidade aos rebolos, sendo possível aumentar intervalo de peças por dressagem.

O melhor desempenho observado foi do rebolo com grão cerâmico Cubitron® da ALCAR. A média entre as rugosidades foi de **$0,3061 \mu\text{m}$** e um índice de performance de **1,90** para o *Ppk*, o que provavelmente contabilizaria apenas 0,01 partes por milhão (PPM) produzidas fora do especificado (Figura 34). Já o outro rebolo testado, SIVAT com grão cerâmico SG, a rugosidade média foi de **$0,3612 \mu\text{m}$** e o índice *Ppk* de **1,34**, com um PPM de 30,59 (Figura 38).

Nas Tabelas 4, 5 e 6 foi calculado o índice que avalia a influência do custo de cada rebolo levando em conta a peça produzida, o custo por unidade (CPU). As equações e cálculos são mostrados nas tabelas e envolvem, além do custo de cada rebolo, os parâmetros de intervalo de dressagem e profundidade do passo de dressagem.

Tabela 4 – Cálculo do custo por unidade rebolo ALCAR 2A 80.2 L5V1

Rebolo ALCAR 2A 80.2 L5V1	
Custo do Rebolo (C_{rebolo})	R\$ 5208,40
Diâmetro do rebolo novo (d_{s-novo})	758 mm
Diâmetro do rebolo fim de vida ($d_{s-gasto}$)	560 mm
Vida ($V_u = \frac{d_{s-novo} - d_{s-gasto}}{2}$)	$\frac{758 - 560}{2} = 99 \text{ mm}$
Vida efetiva* ($V_{ef} = V_u(1 - 0,1)$)	$99(1 - 0,1)$ = 89,100 mm
Intervalo de dressagem (I_{dres})	8 un/dressagem
Profundidade do passo de dressagem (a_d)	0,030 mm
Quantidade de dressagem ($n_{dres} = \frac{V_{ef}}{a_d}$)	$\frac{89,100}{0,030} = 2970 \text{ dress.}$
Quantidade peças produzidas ($n_{peças} = I_{dres} \times n_{dres}$)	$8 \times 2970 = 23760 \text{ un}$
Custo por unidade ($CPU = \frac{C_{rebolo}}{n_{peças}}$)	$\frac{5208,40}{23760} = \text{R\$ } 0,219/\text{un}$

*Considerando perda de 10% de material na dressagem

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 5 – Cálculo do custo por unidade rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1

(continua)

Rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1	
Custo do Rebolo (C_{rebolo})	R\$ 15100,00
Diâmetro do rebolo novo (d_{s-novo})	758 mm
Diâmetro do rebolo fim de vida ($d_{s-gasto}$)	560 mm
Vida ($V_u = \frac{d_{s-novo} - d_{s-gasto}}{2}$)	$\frac{758 - 560}{2} = 99 \text{ mm}$
Vida efetiva* ($V_{ef} = V_u(1 - 0,1)$)	$99(1 - 0,1)$ = 89,100 mm
Intervalo de dressagem (I_{dres})	12 un/dressagem

Tabela 6 – Cálculo do custo por unidade rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1

(conclusão)

Rebolo ALCAR SA/AA 100.2 L5V1	
Profundidade do passo de dressagem (a_d)	0,015 mm
Quantidade de dressagem ($n_{dres} = \frac{V_{ef}}{a_d}$)	$\frac{89,100}{0,015} = 5940 \text{ dress.}$
Quantidade peças produzidas ($n_{peças} = I_{dres} \times n_{dres}$)	$12 \times 5940 = 71280 \text{ un}$
Custo por unidade ($CPU = \frac{C_{rebolo}}{n_{peças}}$)	$\frac{15100}{71280} = \text{R\$ } 0,211/\text{un}$

*Considerando perda de 10% de material na dressagem

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 7 – Cálculo do custo por unidade rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N

Rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N	
Custo do Rebolo (C_{rebolo})	R\$ 5233,16
Diâmetro do rebolo novo (d_{s-novo})	758 mm
Diâmetro do rebolo fim de vida ($d_{s-gasto}$)	560 mm
Vida ($V_u = \frac{d_{s-novo} - d_{s-gasto}}{2}$)	$\frac{758 - 560}{2} = 99 \text{ mm}$
Vida efetiva* ($V_{ef} = V_u(1 - 0,1)$)	$99(1 - 0,1) = 89,100 \text{ mm}$
Intervalo de dressagem (I_{dres})	12 un/dressagem
Profundidade do passo de dressagem (a_d)	0,015 mm
Quantidade de dressagem ($n_{dres} = \frac{V_{ef}}{a_d}$)	$\frac{89,100}{0,015} = 5940 \text{ dress.}$
Quantidade peças produzidas ($n_{peças} = I_{dres} \times n_{dres}$)	$12 \times 5940 = 71280 \text{ un}$
Custo por unidade ($CPU = \frac{C_{rebolo}}{n_{peças}}$)	$\frac{5233,16}{71280} = \text{R\$ } 0,073/\text{un}$

*Considerando perda de 10% de material na dressagem

Fonte: Produção do próprio autor

O reboło SIVAT SW 100.5 K4V08Nobteve um custo por unidade de R\$0,073,bem menor do que os demais rebolos calculados, seguido do reboło ALCAR SA/AA 100.2 L5V1 com um CPU de R\$0,211.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho possibilitou observar o comportamento da rugosidade média (Ra) de três diferentes rebolos convencionais na retificação externa de mergulho entre centros utilizando métodos estatísticos para avaliar o desempenho de cada um deles.

Foi possível verificar que ao dressar um rebolo o mesmo se comporta maneira mais agressiva, desempenhando uma maior capacidade de corte e conseqüentemente maiores valores de rugosidade. A rugosidade média torna-se menor conforme os grãos entram em contato com as peças subseqüentes. Além disso, rebolos com grão cerâmico são capazes de usinar peças com em maiores intervalos de dressagem sem que danifiquem visualmente a peça.

A rugosidade média (Ra) das peças usinadas pelo rebolo óxido de alumínio cerâmico Cubitron® obteve melhor resultado, mas o rebolo de óxido alumínio cerâmico SG também foi capaz de atender as especificações de projeto para rugosidade da peça. Este resultado ocorreu conforme esperado, pois os dois rebolos possuem material de óxido de alumínio cerâmico e granulometria mais fina se comparados ao rebolo de óxido de alumínio monocristalino.

O custo por unidade do rebolo grão cerâmico Cubitron® foi ligeiramente menor do que o rebolo com grão de óxido de alumínio monocristalino. Por sua vez, o rebolo grão cerâmico SG tem um custo muito baixo.

Como os dois rebolos testados atendem os requisitos de projeto para a rugosidade média (Ra) o rebolo escolhido deve ser o que proporciona menor custo à empresa. Desta maneira o rebolo SIVAT SW 100.5 K4V08N foi o mais indicado para esta operação entre os rebolos testados no que diz respeito a custo-benefício para a rugosidade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15230**: Ferramentas abrasivas - Uso, manuseio, segurança, classificação e padronização. Rio de Janeiro. 2016.

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

ALCAR ABRASIVOS. **Informações Técnicas**. Disponível em: <<http://www.alcar.com.br/blog/artigo/rebolos>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

ALVES, M. C. S. **Análise da influência da velocidade de mergulho na retificação de aços endurecidos utilizando refrigeração otimizada**. 2005. 167 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Bauru, 2005.

ANJOS, M. A. **Estudo experimental do uso de rebolos convencionais na usinagem do aço VP-50 utilizado na retificação cilíndrica, por meio de diferentes métodos de lubri-refrigeração**. 2015. 117 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Bauru, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/132523>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

BIANCHI, E. C. et al. **Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóide e vitrificado**. Cerâmica. Associação Brasileira de Cerâmica, v. 57, n. 344, p. 431-437, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/8915>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

BIANCHI, E. C. et al. **The Grinding Wheel Performance in the Transverse Cylindrical Grinding of an Eutectic Alloy**. Mat. Res., São Carlos, v. 5, n. 4, p. 433-438, Oct. 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392002000400007&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 27 Ago. 2017.

CONTADOR, J. C. (Coord.). **Gestão de Operações: A Engenharia de Produção a serviço da modernização da empresa**, 3ª ed. São Paulo: Blucher, 2010.

COSTA, A. F. **Análise Comparativa de Ferramentas Revestidas por PVD e CVD no Torneamento do Aço ABNT 8620**. 2016. 132 f. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

COSTA, A. F. B., EPPRECHT, E. K., CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**, 2ª ed. São Paulo: Atlas. 2008.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**, 8ª ed. São Paulo: Artlibler Editora, 2013.

FREIRE, J. M. **Tecnologia Mecânica: Máquina limadoras e retificadoras**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978. v.5.

GERDAU. **Catálogo** **aços**. Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf>. Acesso em: 25 set. 2017.

GUIMARÃES, V. A. **Controle dimensional e geométrico: uma introdução à metrologia industrial**. Passo Fundo: EDIUPF, 1999.

HASSUI, A., DINIZ, A. E. **Estudo da influência do tempo de centelhamento, das condições de corte e da dressagem na qualidade das peças retificadas**. In: 2º COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2003, Uberlândia. Anais Eletrônicos... Disponível em: <abcm.org.br/anais/cobef/2003/artigos/COF03_0847.pdf>

MACEDO, C. M. **Análise da influência dos parâmetros de retificação cilíndrica na rugosidade média (Ra) da luva externa para Cardan**. 2012. 48 f. Dissertação (Especialização em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MALKIN, S. **Grinding technology: theory and applications of machining abrasives**. England: Ellis Horwood Limited, 1989, 275p.

MALKIN, S., GUO, C. **Grinding Technology: Theory and applications of machining with abrasives**. 2 ed. Industrial Press, 2008.

MARCO FILHO, F., CANABRAVA FILHO, J. S. **Apostila de metrologia**. Rio de Janeiro: UFRJ, Sub-Reitoria de Ensino de Graduação e Corpo Docente/SR-1, 1996. 106 p. – (Cadernos Didáticos UFRJ; 29).

MARINESCU, I. D. et al. **Tribology of abrasive machining processes**. 1.ed. Norwich, William Andrew Inc, 2004.

MARINESCU, I. D., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W. B. & INASAKI, I. **Handbook of machining with grinding wheels**. 2a Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.

NGUYEN, T.A., BUTLER, D.L. **Simulation of precision grinding process, part 1: generation of the grinding wheel surface**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1321–1328.

OGATA, H. T. S. **Determinação Da Influência Das Tensões Residuais Nas Propriedades De Fadiga Em Aço ABNT8620 Processado Com Diferentes Profundidades De Camada De Cementação**. 2003. 129 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 2003.

OLIVEIRA, J. F. G. **Tópicos avançados sobre o processo de retificação**. Reimpressão. Universidade de São Paulo, USP, Setembro, 1998.

ROWE, W. B. **Principles of modern grinding technology**. 2nd ed. Oxford: Elsevier Inc., 2014

SIVAT ABRASIVOS. **Informações Técnicas.** Disponível em: <www.sivat.com.br/informacoes.php?menu=informacoes>. Acesso em: 15 jul. 2017.

SOARES, D. D., OLIVEIRA, J. F. G. **Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXVIII, nº 436, Maio, 2002, p. 140 - 157.

TABORGA, A. R. M., TABORGA, J. D. M., WEINGAERTNER, W. L. **Análise da rugosidade obtida na retificação de ferro fundido nodular utilizando rebolos de SiC e Al₂O₃.** In: 2º COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2003, Uberlândia. Anais Eletrônicos... Disponível em: <http://abcm.org.br/anais/cobef/2003/artigos/COF03_0848.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2017.

TÖNSHOFF, H. K., FRIEMUTH, T., BECKER, J. C. **Process monitoring in grinding.**In: Annals of the CIRP, vol. 51, nº 2, 2002, p. 551-571.

VARGAS, V. L. **Análise comparativa do desempenho entre rebolos superabrasivos e convencionais, na retificação cilíndrica externa de aços endurecidos.** 2001. 73 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista - UNESP, Bauru, 2001.

VIEIRA JÚNIOR, M., LIBARDI, R., CANCELIERI, H. A., LIMA, A. **Como o calor pode afetar a integridade superficial das peças.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXV, nº 397, Fevereiro, 1999, p. 28-36.