

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE SANTA CATARINA – CÂMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO
MECÂNICA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DA PEÇA SOBRE O ACABAMENTO
SUPERFICIAL NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

WAGNER CABRAL MEHL

Jaraguá do Sul
Fevereiro de 2017

WAGNER CABRAL MEHL

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DA PEÇA SOBRE O ACABAMENTO
SUPERFICIAL NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de
Fabricação Mecânica do Câmpus
Jaraguá do Sul – Rau, do Instituto
Federal de Santa Catarina, para
obtenção do diploma de Tecnólogo
em Fabricação Mecânica.

Orientador: Gabriel Costa Sousa

Coorientador: Giovani Conrado Carlini

Jaraguá do Sul
Fevereiro de 2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Mehl, Wagner Cabral

Análise da influência da velocidade da peça sobre o acabamento superficial no processo de retificação / Wagner Cabral Mehl ; orientação de Gabriel Costa Sousa; coorientação de Giovani Conrado Carlini. - Jaraguá do Sul, SC, 2017.

68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -

Rau. Fabricação Mecânica. .

Inclui Referências.

1. Rugosidade. 2. Retificação. 3. Carboneto de Silício.
4. Óxido de alumínio. I. Sousa, Gabriel Costa.
- II. Carlini, Giovani Conrado. III. Instituto Federal de Santa Catarina. . IV. Título.

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DA PEÇA SOBRE O ACABAMENTO
SUPERFICIAL NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

WAGNER CABRAL MEHL

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Tecnólogo em
Fabricação Mecânica e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora
abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 23 de fevereiro de 2017.



Gabriel Costa Sousa
Mestre em Engenharia Mecânica

Stelio Jacomo Storti
Coordenador Acadêmico da Área de
Fabricação Mecânica
Câmpus JS - Geraldo Werninghaus - IFSC
Portaria Nº n.1745 de 24/09/2013



Giovani Conrado Carlini
Graduação em Fabricação Mecânica



Tiago Silva
Mestre em Engenharia Mecânica



Vanderlei Junkes
Mestre em Engenharia Mecânica

RESUMO

Entre os processos de usinagem abrasiva o mais importante deles é o processo de retificação. A retificação geralmente é o último processo realizado em uma produção, buscando alcançar tolerâncias apertadas e precisão geométricas. Peças mais bem acabadas suportam maiores capacidades de carga e possuem uma maior resistência a fadiga. A retificação é um dos processos mais complexos existentes devido à grande quantidade de variáveis existentes e conhecer estas variáveis ajuda a minimizar os riscos inerentes a esta operação e a controlar melhor os resultados desejados. Com o objetivo de estudar o grau de influência da velocidade da peça sobre o comportamento da rugosidade durante o processo de retificação, foram utilizados dois rebolos convencionais, o Óxido de Alumínio branco e o Carboneto de Silício verde. Foram utilizadas as velocidades da peça de 12m/min e 24m/min, monitoradas em tempo real com a utilização de sensores confeccionados para este fim, e com a ajuda de plataforma de prototipagem eletrônica Arduíno. O estudo obteve dados de produtividade dos rebolos, determinando o maior volume de material possível de ser removido entre dressamentos. O material ensaiado foi o aço ABNT D6 temperado de alta dureza, com teor de carbono de 2,1%. As recomendações dos fabricantes de rebolos apontam para o uso do óxido de alumínio e se contradizem em relação ao uso do carboneto de silício, desaconselhando sua utilização devido a sua afinidade química com o ferro presente nos aços, porém recomendando em materiais de alta dureza. Com os ensaios realizados foi possível chegar a uma igualdade volumétrica de remoção de material entre os dois rebolos, com uma melhor produtividade para o carboneto de silício devido a maior velocidade da peça aplicada. O carboneto de silício apresentou melhores resultados de retificação, com uma rugosidade mais constante durante todo o processo de usinagem do aço ABNT D6 temperado.

Palavras chave: Retificação. Rugosidade. Aço ABNT D6. Carboneto de Silício. Óxido de Alumínio.

ABSTRACT

Among the processes of abrasive machining the most important of them is the process of rectification. Grinding is usually the last process performed in a production, seeking to achieve tight tolerances and geometric precision. Better finished parts support higher load capacities and have a higher resistance to fatigue. Rectification is one of the most complex processes due to the large number of variables and knowing these variables helps minimize the risks inherent in this operation and better control the desired results. In order to study the degree of influence of the workpiece speed on the roughness behavior during the grinding process, two conventional grinding wheels, White Aluminum Oxide and Green Silicon Carbide, were used. It was used the velocities of the piece of 12m / min and 24m / min, monitored in real time with the use of sensors made for this purpose, and with the help of Arduino electronic prototyping platform. The study obtained data on the productivity of the grinding wheels, determining the largest volume of material possible to be removed between dressings. The tested material was tempered ABNT D6 high hardness steel with a carbon content of 2.1%. The recommendations of the wheel manufacturers point to the use of aluminum oxide and contradict the use of silicon carbide, discouraging its use due to its chemical affinity with the iron present in steels, but recommending in materials of high hardness. With the tests carried out it was possible to reach a volumetric equality of material removal between the two grinding wheels, with a better productivity for the silicon carbide due to the higher speed of the applied part. The silicon carbide showed better grinding results, with a more consistent roughness throughout the machining process of tempered ABNT D6 steel.

Key words: Rectification. Roughness. Steel ABNT D6. Silicon carbide. aluminium oxide.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Perfil de rugosidade Ra..... | 22 |
| Figura 2 - Rugosidade definida perfil do parâmetro Rz | 22 |
| Figura 3 - Rugosidade R_t . Maior distância entre picos e vales..... | 23 |
| Figura 4 - Estrutura típica de um rebolo de retificação..... | 27 |
| Figura 5 - Formação do cavaco e importância dos poros no rebolo..... | 28 |
| Figura 6 - (a) Geometria da superfície de retificação com condições de corte;(b) perfil longitudinal considerado;(c) seção transversal de um cavaco individual | 29 |
| Figura 7 - Taxa de retificação e acabamento superficial em função da velocidade do rebolo | 33 |
| Figura 8 - Gráfico de análise da rugosidade superficial em relação a velocidade de avanço longitudinal..... | 35 |
| Figura 9 - Corpo de prova a ser retificado..... | 37 |
| Figura 10 - Medições do corpo de prova em projetor de perfil | 39 |
| Figura 11 - Projetor de perfil Mitutoyo PJ-R3000..... | 39 |
| Figura 12 - Realização de medição dos chanfros do corpo de prova..... | 40 |
| Figura 13 - Exemplo de sensores instalados na retificadora..... | 44 |
| Figura 14 - Diagrama esquemático do circuito do sensor | 44 |
| Figura 15 - Placa Arduino UNO..... | 45 |
| Figura 16 - Planilha de cálculo de volume usinado..... | 46 |
| Figura 17 - Tela inicial do sistema para a captura de dados de velocidade da mesa..... | 47 |
| Figura 18 - Linha de retificação e indicação das linhas de medição de rugosidades perpendiculares a retificação..... | 48 |
| Figura 19 - Posicionamentos das peças na mesa magnética para retificação | 49 |
| Figura 20 - Fragmento de um período de retificação. Onde temos momentos alternados em que o rebolo está fora da peça e em ação de retificação | 51 |
| Figura 21 - Rugosidades obtidas após retificação com rebolo SiC à uma vel. de 12m/min..... | 52 |
| Figura 22 - Rugosidades obtidas após retificação com rebolo SiC à uma vel. de 24m/min..... | 53 |
| Figura 23 - Comparação de rugosidades Ra entre velocidades de retificação | 54 |
| Figura 24 - Comparação de rugosidades Rz entre velocidades de retificação..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 25 - Rugosidades obtidas após retificação com rebolo Al ₂ O ₃ à uma vel. de 12m/min..... | 55 |
| Figura 26 - Rugosidades obtidas após retificação com rebolo Al ₂ O ₃ à uma vel. de 24m/min..... | 56 |
| Figura 27 - Comparativo de rugosidade Rz entre as velocidades de 12m/min e 24m/min..... | 57 |
| Figura 28 - Superfície com pontos de queima ocorridos após remoção de 157,48mm ³ /mm de volume específico(V'w), utilizando o rebolo de Al ₂ O ₃ à velocidade da peça de 12m/min..... | 59 |
| Figura 29 - Imagem ampliada 40x e 100x, superfície retificada com rebolo Al ₂ O ₃ à velocidade de 12m/min..... | 59 |
| Figura 30 - Imagem após a revelação através da aplicação de liquido penetrante na superfície usinada. Retificação com rebolo de Al ₂ O ₃ a velocidade da peça de 12m/min | 60 |
| Figura 31 - Imagem ampliada 40x e 100x, superfície retificada com rebolo Al ₂ O ₃ à velocidade de 24m/min..... | 61 |
| Figura 32 - Fotografia de uma peça retificada com rebolo SiC à velocidade de 12m/min..... | 62 |
| Figura 33 - Imagem ampliada 40x e 400x, superfície retificada com rebolo SiC à velocidade de 12m/min..... | 62 |
| Figura 34 - Imagem ampliada 40x e 100x, superfície retificada com rebolo SiC à velocidade de 24m/min..... | 63 |
| Figura 35 - Comparativo entre os melhores resultados obtidos entre os rebolos Al ₂ O ₃ e SiC | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Dados de entrada e saída do processo de retificação segundo Nussbaum (1988)..... | 25 |
| Tabela 2 - Abrasivos utilizados e suas durezas..... | 26 |
| Tabela 3 - Valores orientativos da velocidade da mesa de acordo com o material a retificar..... | 34 |
| Tabela 4 - Características do rebolo de Óxido de Alumínio..... | 40 |
| Tabela 5 - Características do rebolo de Carbetto de silício | 41 |
| Tabela 6 - Comparativo entre velocidades da mesa..... | 50 |
| Tabela 7 – Parâmetros de retificação entre rebolos de SiC e Al ₂ O ₃ | 64 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio

CBN – Nitreto Cúbico de Boro

CNC - Comando Numérico Computadorizado

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

ISO - International Organization for Standardization

SAE – Society of Automobile Engineers

SEPEI – Seminário de Ensino, Pesquisa, Extensão e Inovação

SiC – Carboneto de Silício

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

μm – Micrômetro

a_e – profundidade de corte

cm - Centímetros

g - Grama

h – Altura

in – Polegada

K_2 – Constante de proporcionalidade

l_c – Comprimento do cavaco

m/min – Metros por minuto

m/s – Metros por segundo

min - Minuto

mm - Milímetro

n_c – número de cavacos

p_a – Proporção de material ligante

p_c – Profundidade de corte

p_g – Proporção de grãos abrasivos no volume total do rebolo

p_p – Proporção de poros ou espaços vazios

rpm - Rotações por Minuto

v_s – velocidade de corte

v_w – Velocidade da peça

w – Avanço longitudinal

C – Número de grãos ativos do rebolo

D - Diâmetro

G – Relação G

HRC – Dureza Rockwell

R – Raio

R_a – Desvio médio aritmético da rugosidade

R_t – Rugosidade efetiva

R_z – Profundidade média da rugosidade

T_s – Temperatura superficial

V'_w – Volume usinado específico

V_{tc} – Volume de tronco de cone

V_w – Volume usinado

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| SUMÁRIO | 13 |
| 1 INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 Justificativa | 16 |
| 1.2 Definição do problema..... | 17 |
| 1.3 Objetivos | 17 |
| 1.3.1 Objetivo geral | 17 |
| 1.3.2 Objetivo específico | 18 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA | 19 |
| 2.1 O processo de retificação..... | 19 |
| 2.2 A importância da refrigeração no processo de retificação | 20 |
| 2.3 Acabamento superficial | 21 |
| 2.4 A influência da rugosidade no atrito..... | 23 |
| 2.5 Parâmetros de retificação..... | 24 |
| 2.6 Rebolos | 26 |
| 2.7 Dressagem | 30 |
| 2.8 Velocidades do rebole e sua influência no desgaste e no acabamento | 32 |
| 2.9 Velocidade da peça e sua influência no acabamento..... | 33 |
| 3 METODOLOGIA | 36 |
| 3.1 Corpo de prova..... | 36 |
| 3.2 Projetor de perfil | 38 |
| 3.3 Rebole utilizado..... | 40 |
| 3.4 Retificadora Plana Tangencial | 41 |
| 3.5 Controle de velocidade..... | 42 |
| 3.6 Fluido de corte..... | 42 |
| 3.7 Aquisição de dados | 42 |
| 3.8 Medição de rugosidade | 45 |
| 3.9 Planejamento e execução experimental..... | 45 |
| 4 ANÁLISE DE RESULTADOS | 50 |
| 4.1 Análise das velocidades de retificação | 50 |
| 4.2 Análise de retificação com rebole de SiC | 51 |
| 4.3 Análise de retificação com rebole Al ₂ O ₃ | 55 |
| 4.4 Análise superficial das amostras | 58 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 4.5 Comparação de resultados | 63 |
| 5 CONCLUSÃO | 65 |
| REFERÊNCIAS..... | 67 |

1 INTRODUÇÃO

Para se conseguir melhores acabamentos em superfícies, se faz uso de um dos processos de usinagem abrasiva, sendo o mais importante deles o processo de retificação, que consiste na remoção de material pela ação de partículas abrasivas geralmente aglomeradas em forma de rebolo combinado com altas velocidades de rotação.

O acabamento superficial está relacionado ao modo de operação de uma peça, onde superfícies melhores acabadas tendem a suportar maiores capacidades de carga. O acabamento superficial também tem uma relação a falhas por fadiga, decorrentes de micro trincas nucleadas formadas na superfície. E da mesma forma tem ligação direta ao desgaste adesivo, que pode ser descrito como fenômeno de soldagem das asperezas da superfície da peça.

De uma maneira geral, superfícies com irregularidades, quando são exigidas mecanicamente e sujeitas aos mesmos níveis de tensão a que são submetidas superfícies regulares, apresentam maior chance de ruptura.

A retificação é certamente um dos processos de usinagem convencional mais complexo que existe, devido ao grande número de variáveis que compõe sua execução.

Além dos parâmetros de entrada inerentes ao processo como variação de velocidade da peça (v_w) e profundidade de corte (a_e), velocidade de corte (v_s), existem outras variáveis que aumentam a complexidade da usinagem abrasiva. A escolha do rebolo a ser utilizado por exemplo deve ser feita de acordo com o material a ser retificado. Os abrasivos de maior importância na retificação são o Óxido de Alumínio (Al_2O_3), Carboneto de Silício (SiC), Nitreto cúbico de boro (CBN), e o Diamante. Neste estudo será analisado a influência da variação da velocidade da peça sob o parâmetro de saída rugosidade em relação a dois rebolos, Carboneto de Silício e o Óxido de Alumínio, mantendo os demais parâmetros de entrada inalterados.

Nos dias atuais, a combinação produtividade e qualidade são cada vez mais exigidos e em se tratando de retificação a utilização de rebolos CBN sofreu um aumento considerável devido as vantagens do grão CBN em relação aos grãos convencionais, como velocidades de corte na ordem de 100m/s, maior dureza dos grãos, resistência à fratura e à abrasão, o que provocou um grande número de estudos em relação a este componente.

O valor de um rebolo CBN tem um custo consideravelmente alto quando comparado aos rebolos convencionais, o que torna inviável a aquisição de rebolos com alto valor para pequenas produções ou por pequenas fábricas, assim sendo, a retificação com rebolos convencionais precisam ganhar uma maior agilidade em sua produção, o que levou a realização deste estudo para a elaboração de parâmetro de velocidade da peça no processo de retificação com os rebolos convencionais Al_2O_3 e SiC, em busca de uma otimização de produção, com boa rugosidade final.

A motivação deste estudo tem por finalidade a análise da influência da velocidade da peça com dois tipos de abrasivos específicos, o Óxido de Alumínio por ser um abrasivo mais comum indicado para retificação de aços e ligas ferrosas bem como ligas de alta resistência, e o rebolo composto de Carboneto de Silício. Particularmente sobre este abrasivo existe uma divergência entre alguns fabricantes quanto sua utilização em aços. Enquanto alguns fabricantes recomendam sua aplicação somente para materiais dúcteis como alumínio e frágeis como ferros fundidos e cerâmicas, outros recomendam o Carboneto de Silício para retificação de aços alta liga ou com durezas elevadas. A recomendação de não se utilizar este tipo de rebolo com aços é justamente pela afinidade do SiC com os átomos de ferro, o que não ocorre quando a liga possui saturação de carbono. Callister (2008, p.262, p.263) define aços com alto teor de carbono os que possuem entre 0,6 a 1,4%C, e os ferros fundidos os que possuem teor acima de 2,14% de carbono.

O material utilizado nesta pesquisa possui 2,1%C, portanto alto teor de carbono, próximo ao limite de saturação no aço, o que leva a possibilidade de baixo desgaste por difusão. Além disso, o Carboneto de Silício possui alta dureza o que proporciona uma maior manutenção da capacidade de corte, aumentando o intervalo entre dressamentos.

1.1 Justificativa

Conforme podemos perceber, o acabamento superficial tem elevada relevância no comportamento final da peça. Elementos com acabamento superior tendem a resistir mais a fadiga e ao desgaste, portanto a retificação é um dos processos mais importantes executados dentro da indústria, e certamente possui um grau de complexidade muito grande devido ao grande número de variáveis que estão envolvidas durante o processo.

Este processo, embora alvo de constantes estudos, ainda não são totalmente conhecidos.

A busca por elevada produtividade na indústria faz com que novas ferramentas e equipamentos sejam desenvolvidos. Estas ferramentas e equipamentos tem o objetivo de resultar em melhores acabamentos com maior produtividade. Novas tecnologias de produção possuem elevados valores para implantação o que impedem as pequenas indústrias de terem acesso a estas novas tecnologias, desta forma a retificação com rebolos convencionais que são utilizados em grande parte da indústria precisam ser mais produtivos com maior durabilidade entre processos.

Quando as variáveis de retificação são conhecidas os resultados podem ser mais previamente definidos e esperados com menores ocorrências de erros durante o processo, resultando em peças mais acabadas e com maior produtividade, ressaltando a importância de estudos destas variáveis.

A pesquisa que será realizada tem por objetivo estudar a influência que a velocidade da peça exerce sobre o acabamento superficial, como resultado final, o acabamento em forma de rugosidade, mas também pretende verificar a produtividade que pode ser atingida ao se utilizar os rebolos convencionais.

1.2 Definição do problema

Como a retificação não é um processo ainda totalmente conhecido contando com inúmeras variáveis, os resultados tendem a ser de certa forma imprevisíveis. Assim estaremos estudando uma variável, a velocidade da peça, e estaremos em busca de resposta a saber qual a sua influência durante o processo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Analisar a influência da velocidade da peça (v_w) sobre o acabamento superficial no processo de retificação plana com a utilização de rebolos convencionais de Óxido de Alumínio (Al_2O_3) e Carboneto de Silício (SiC).

1.3.2 Objetivo específico

Os objetivos específicos que nortearão a pesquisa, a fim de que se chegue nos resultados serão:

- Avaliar a influência da velocidade da peça (v_w) na retificação plana através de medições de rugosidade superficial no processo.
- Desenvolver planilha para cálculo do volume usinado específico;
- Determinar o intervalo entre dressamentos para cada tipo de rebolo;
- Desenvolver um sistema para monitorar a velocidade da mesa na retificação plana;
- Validar a utilização de rebolos de Carboneto de Silício verde para a retificação de aços ABNT D6.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O processo de retificação

Nussbaum (1988, p. 255), expressa sobre o processo de retificação:

A retífica foi considerada durante muito tempo como sendo uma operação “cosmética”, onde uma pequena remoção de cavaco deixa a peça mais “apresentável”. Este conceito errado contribuiu muito para criar um mito onde não existe outra coisa senão engenharia mecânica e conhecimentos de materiais.

De fato, a retificação é um dos processos de usinagem abrasiva mais importantes que confere a peça os acabamentos superficiais, além de buscar alcançar tolerâncias apertadas de usinagem e precisão geométrica. Assim sendo, esta é geralmente a última operação realizada em uma peça durante processo de fabricação, o que a torna uma operação com grandes responsabilidades pois os riscos de danificar a peça é sempre iminente. Entre os riscos, podemos citar o dano à estrutura superficial, alteração em sua microestrutura, micro trincas, tensões residuais de tração, que ocorrem em geral devido ao aquecimento sofrido durante este processo. Estes danos comprometem a qualidade da peça e podem reduzir sua resistência a fadiga.

Durante a retificação, uma grande responsabilidade do operador é exigida, já que por características de muitos equipamentos e por se tratar de um processo com poucos recursos de automação, em muitos casos necessitam de uma grande experiência. Nussbaum (1988, p. 16, p. 255), destaca que a complexidade da operação não é sempre um assunto fácil, pois a interdependência entre peça/rebolo/máquina, incluindo o refrigerante, pode transformar em um quebra-cabeças um problema de solução aparentemente simples. E ainda cita que é necessário criar a atmosfera adequada desde o início da formação, tanto do operador da máquina, como do engenheiro responsável do departamento ou da fábrica.

2.2 A importância da refrigeração no processo de retificação

Diferentemente do processo de torneamento onde o calor gerado entre a ferramenta e a peça é em maior parte dissipado junto com o cavaco gerado, o processo de retificação tem como característica a alta quantidade de calor gerado, cerca de dez vezes mais calor gerado por unidade de volume de cavaco que o torneamento segundo Diniz, Marcondes e Coppini (1999, p. 60, 237), e em números médios cerca de 85% deste calor gerado vai para a peça, o que torna o fluido de corte extremamente importante.

Nussbaum (1988, p.427) destaca que:

Um bom líquido ou um líquido inadequado pode fazer com que a operação seja um sucesso ou um fracasso. A qualidade do refrigerante influirá na qualidade da peça usinada, na rugosidade, na tolerância dimensional e no custo operacional. Por todas estas razões, a escolha de um líquido deve ser estudada com toda a atenção.

Sousa (2012), em sua dissertação de mestrado, desenvolveu um estudo sobre a análise da eficiência da tubeira tipo sapata na lubrificação em processos de retificação utilizando como meio lubrificante uma emulsão de 5% de óleo em água, a mesma concentração utilizada nesta análise. Em sua conclusão com a empregabilidade da tubeira tipo sapata, Sousa (2012, p.81) conta que “o baixo desgaste radial, associado à pequena variação da rugosidade da superfície usinada, permite longos períodos de usinagem sem interrupções para condicionamento do rebolo.” Além de uma melhora nos índices de qualidade do processo relacionado a erros dimensionais e geométricos da peça. Concluindo Sousa (2012, p.82) diz que: “a variação da vazão também exerce influência sobre o comportamento da rugosidade.” Segundo König (2002, apud Sousa), “a refrigeração mais adequada da zona de corte favorece a formação do cavaco, pela redução das deformações elasto-plásticas do material, o que resulta em aumento da rugosidade.” Desta forma o tamanho do cavaco gerado durante o processo de retificação está diretamente ligado a este acabamento superficial.

2.3 Acabamento superficial

O acabamento superficial é fundamental onde há atrito, transmissão de calor, superfícies de medição, corrosão e outros, e sua mensuração se dá através da rugosidade superficial, e pode ser definido como um conjunto de desvios micrométricos, caracterizado por pequenos picos e vales ao longo da superfície.

Para se obter valores numéricos de rugosidade, sistemas foram desenvolvidos para este objetivo. No Brasil a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas adotou o chamado sistema M, ou sistema de linha média, onde todas as grandezas de medição são definidas a partir desta linha, conforme as normas NBR ISO 4287/2002 e NBR 8404/1988.

A rugosidade R_a , sem dúvida é o parâmetro mais utilizado na indústria mundial aplicável na maioria dos processos de fabricação e se baseia nas medidas de profundidade da rugosidade. Guimarães (1999, p.80) define este parâmetro como sendo “a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação a linha média num comprimento de amostragem.” Tendo como expressão matemática:

$$R_a = \frac{1}{L_e} \int_0^L |y| dx \quad (2.3.1)$$

O parâmetro R_a pode ser calculado através da expressão:

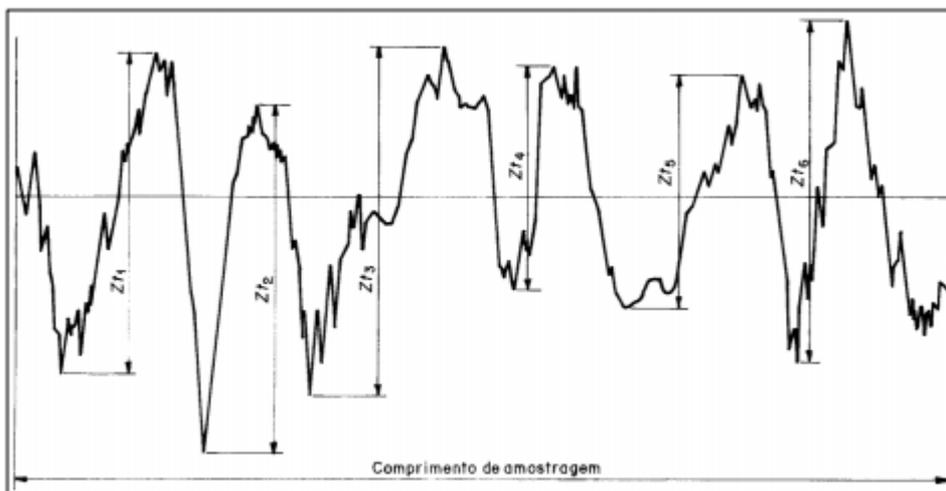
$$R_a = \frac{A}{L_e} [\mu m] \quad (2.3.2)$$

Onde:

A é a média da soma das áreas acima e abaixo da linha média.

L_e é o comprimento analisado para a obtenção de A.

Figura 1 - Perfil de rugosidade Ra

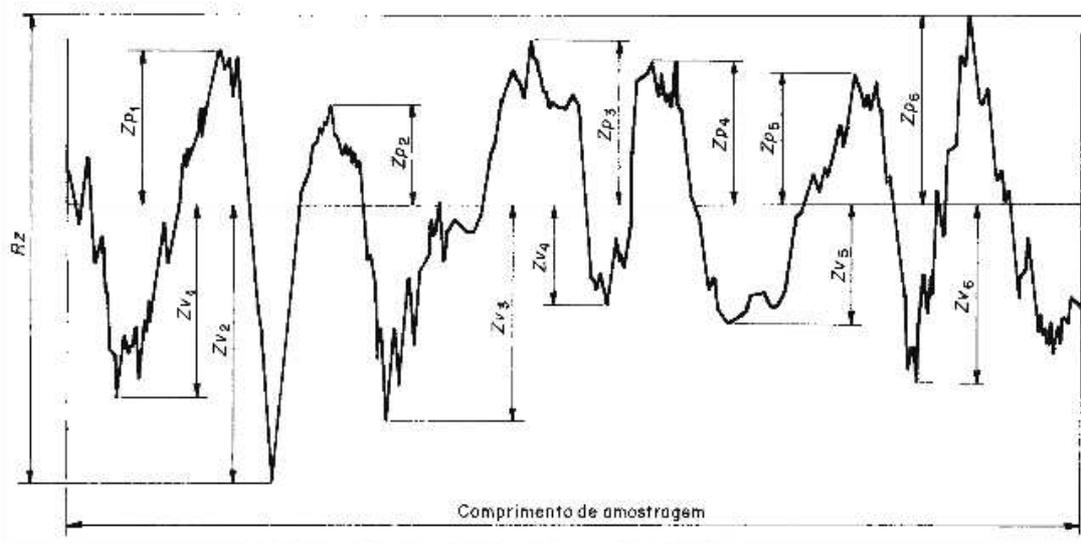


Fonte: NBR ISO 4287:2002, p 10

O parâmetro de rugosidade R_z ou rugosidade média real, é definido como a média aritmética dos cinco valores da rugosidade parcial Z_i . A rugosidade parcial Z_i é definida como a soma dos valores absolutos dos pontos mais afastados da linha média existentes no comprimento de amostragem l_e .

Definido pela expressão matemática:

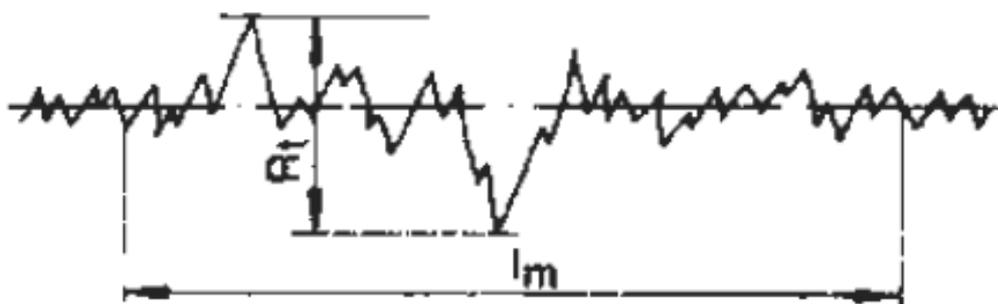
$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (2.3.3)$$

Figura 2 - Rugosidade definida perfil do parâmetro R_z 

Fonte: NBR ISO 4287:2002, p 09

O parâmetro R_t , corresponde a maior distância vertical entre o vale mais profundo e o pico mais alto em todo o comprimento de avaliação, e não somente em uma amostragem de CutOff, pode-se obter nesta medição resultados distorcidos dependendo da amplitude dos picos e vales.

Figura 3 - Rugosidade R_t . Maior distância entre picos e vales



Fonte: Norton, 2013, p.422

2.4 A influência da rugosidade no atrito

Norton (2013, p.421) sobre a superfície diz que: “a superfície terá algum grau de rugosidade que é compatível com seu processo de acabamento. Seu grau de rugosidade terá influência tanto no tipo como na intensidade de desgaste a que a peça estará sujeita. “

De fato, o acabamento superficial de uma peça influencia seu desempenho em operação, como exemplo podemos citar que superfícies melhores acabadas tendem a ser mais resistentes a fadiga e a corrosão, além de alterarem o coeficiente de atrito. Espera-se que o acabamento superficial altere consideravelmente o coeficiente de atrito entre peças.

Para rugosidades R_a da ordem de $0,25\mu\text{m}$, o coeficiente de atrito realmente aumenta até um fator próximo a dois. Segundo Norton (2013, p.425) onde trata do atrito de rolamento diz: “A rugosidade superficial tem sim, um efeito sobre o atrito de rolamento, e maior parte das peças com esse tipo de junção recebe acabamento por retificação para minimizar sua rugosidade.”

A rugosidade superficial após retificação apresenta medidas de micrometros, apesar destas medidas serem extremamente pequenas é inevitável que exista na

superfície da peça, picos e vales que fazem com que elementos montados e que possuem atritos em seu funcionamento sofram o chamado desgaste adesivo, explicado por Juvinal e Marshek (2013, p.202) como: “a pressão de contato e o calor dissipado por atrito estão concentrados nas pequenas áreas localizadas de contato”, estas áreas são exatamente as imperfeições da superfície que apesar de retificadas apresentam os picos e vales descritos anteriormente, e conclui dizendo que: “as temperaturas e as pressões locais se tornam extremamente altas, fazendo com que as condições sejam favoráveis à soldagem destes pontos”. De fato o atrito destes picos podem atingir temperaturas locais instantâneas que chegam a atingir o ponto de fusão do material, embora as superfícies muitas vezes ao serem tocadas permanecem frias devido ao alto gradiente existente.

A solda que ocorreu ou um dos dois metais nas proximidades da solda sofrerá uma falha por cisalhamento, dando continuidade dos movimentos superficiais dos elementos montados, porém com a continuidade dos movimentos novas soldas e fraturas continuarão a ocorrer resultando em um fenômeno chamado de desgaste adesivo. Partículas do metal resultantes do desgaste adesivo causam mais desgaste da superfície por causa da abrasão. A evolução deste desgaste é explicado por Juvinal e Marshek (2013, p. 202), da seguinte forma:

Se a soldagem das asperezas da superfície e o subsequente rompimento causam a transferência de um metal para a superfície do outro, o desgaste resultante ou dano superficial é chamado de riscadura. Se a soldagem localizada das asperezas se tornar tão extensiva que as superfícies não deslizam muito sobre a outra, a falha resultante é chamada de grimpamento.

Como podemos verificar, a importância do acabamento superficial para a indústria mecânica é muito grande, e constata-se o quanto ainda deve ser estudado quanto aos materiais e suas aplicações.

2.5 Parâmetros de retificação

Em operações de retificação, parâmetros de entrada combinados tal como a velocidade de rotação do rebolo, a profundidade de corte, o avanço longitudinal do

rebolo e a velocidade da peça, em conjunto com a escolha do tipo de rebolo podem determinar o comportamento final do acabamento. Nussbaum (1988, p. 255) expressa a necessidade de um conhecimento maior do processo de retificação dada a grande quantidade de variáveis existentes, assim colocada: “este desconhecimento, costumeiramente é debitado na conta do rebolo, esquecendo a participação na operação de todos os outros envolvidos, reafirmando a falta de conhecimento sobre o processo de retifica”. Imaginando que em um futuro próximo com a ajuda da automação as variáveis na usinagem por abrasão poderiam ser introduzidas num processamento de dados, Nussbaum (1988, p. 255) definia estas variáveis como os parâmetros de entrada e saída, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1- Dados de entrada e saída do processo de retificação segundo Nussbaum (1988)

| INPUT | OUTPUT |
|--|--|
| Material (Características mecânicas) | Esforços de retífica (normais e tangenciais) |
| Rebolo (características abrasivo/liga) | Ratio “G” Vol. removido/Vol. gasto peça |
| Parâmetros de dressagem | Qualidade superfície peça |
| Fluido refrigerante (características pH, concentração) | Rugosidade |
| Parâmetros da máquina (velocidade, passe...) | Micro-trincas e tensões |
| | Precisão dimensional |

Fonte: Nussbaum (1988, p.255)

Esta automação até acontece com a utilização de retíficas CNC, mas a realidade de inúmeras pequenas unidades não permitem contar com essa tecnologia devido ao alto custo do equipamento.

A profundidade de corte (a_e), em termos práticos, é o quanto a ferramenta penetra na peça em relação ao plano de trabalho, medida perpendicularmente em direção ao avanço da peça ou rebolo. Uma profundidade de corte elevada significa uma maior área de contato rebolo/peça, o que leva a crer uma maior remoção de material, contudo implica em uma aumento considerável das temperaturas podendo influenciar na integridade superficial dos componentes retificados.

2.6 Rebolos

O rebolo é constituído basicamente de partículas abrasivas que são os responsáveis por remover material da peça, aglomerantes que mantêm estas partículas no lugar e define a forma e a estrutura do rebolo e ainda o ar como terceiro elemento, indispensável para o desprendimento dos grãos e remoção do material. Esses grãos abrasivos possuem certo grau de granulometria e são responsáveis por determinar o acabamento superficial. Além disso, o rebolo deve suportar as altas rotações que lhe são conferidas, dando ainda mais importância ao material aglomerante.

Os rebolos possuem parâmetros que devem ser cuidadosamente escolhidos, embora possa parecer uma tarefa simples existem diferentes rebolos para diferentes tarefas.

O material abrasivo possui diferentes propriedades para uso em rebolos, como alta dureza, resistência ao desgaste, tenacidade e friabilidade, que é descrita por Groover (2014, p.452) como: “a capacidade do material abrasivo de fraturar quando a aresta de corte do grão se desgastar, expondo assim uma nova aresta afiada.”

Os materiais abrasivos mais utilizados são o Óxido de Alumínio (Al_2O_3), o Carboneto de Silício (SiC), o Nitreto de Boro Cúbico (CBN) e o Diamante.

A Tabela 02, traz as características de cada um deles, inclusive sua dureza relativa.

Tabela 2 - Abrasivos utilizados e suas durezas

Abrasivos de maior importância na retificação.

| Abrasivo | Descrição | Dureza Knoop |
|---------------------------------|--|--------------|
| Óxido de Alumínio (Al_2O_3) | Material abrasivo mais comum, usado para retificar aços e ligas ferrosas, ligas de alta resistência. | 2100 |
| Carboneto de Silício (SiC) | Mais duro que o Al_2O_3 , porém não tão tenaz. As aplicações incluem metais dúcteis, tais como alumínio, latão e aços inoxidáveis, assim como materiais frágeis, tais como ferros fundidos e certas cerâmicas. Efetivamente, não podem ser usados para retificação de aços devido à forte afinidade química entre o carbono no SiC e o ferro nos aços. | 2800 |
| Nitreto cúbico de Boro (cBN) | Quando usado como abrasivo, o cBN era produzido sob o nome comercial de Borazon pela General Electric Company. Os rebolos de cBN são usados para retificação de materiais endurecidos, tais como aços ferramenta endurecidos e ligas para a indústria aeroespacial. | 5000 |
| Diamante | Os abrasivos de diamante podem ser naturais ou artificiais. Os rebolos de diamante são geralmente usados para aplicações em materiais endurecidos e abrasivos, tais como cerâmicas, metais duros e vidros. | 7000 |

Fonte: Groover (2014, p.452)

Conforme exposto, a estrutura do rebolo é constituída de três elementos, o grão abrasivo o ligante e os poros ou vazios, ilustrados pela figuras 04 e 05, onde as proporções volumétricas de grãos, ligantes e poros podem ser expressas por:

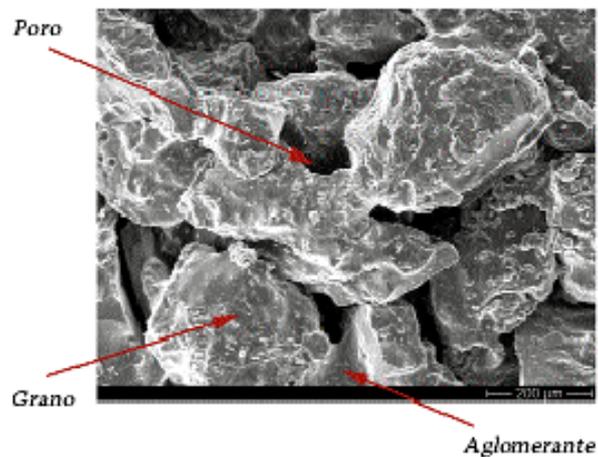
$$p_g + p_a + p_p = 1,0 \quad (2.6.1)$$

Onde, p_g = proporção de grãos abrasivos no volume total do rebolo;

p_a = proporção de material ligante;

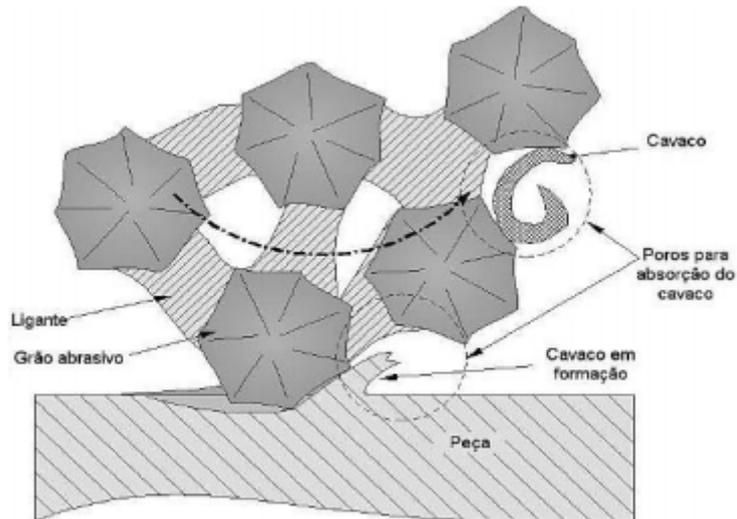
p_p = proporção de poros ou espaços vazios.

Figura 4 - Estrutura típica de um rebolo de retificação



Fonte: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/19447-Abrasivos-Navatec-S-L-una-empresa-joven-respaldada-con-56-anos-de-experiencia.html>, acessado em 18/01/2017

Figura 5 - Formação do cavaco e importância dos poros no rebolo



Fonte: <https://chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem-Aula32-p.247-256.pdf>,
acessado em 18/01/2017

Logicamente, é possível analisar que tamanhos menores de grão irão retirar cavacos menores durante o processo de retificação. É possível examinar as dimensões de um cavaco a partir da geometria do processo de retificação onde o comprimento médio de um cavaco é dado por:

$$l_c = \sqrt{D \cdot p_c} \quad (2.6.2)$$

Onde:

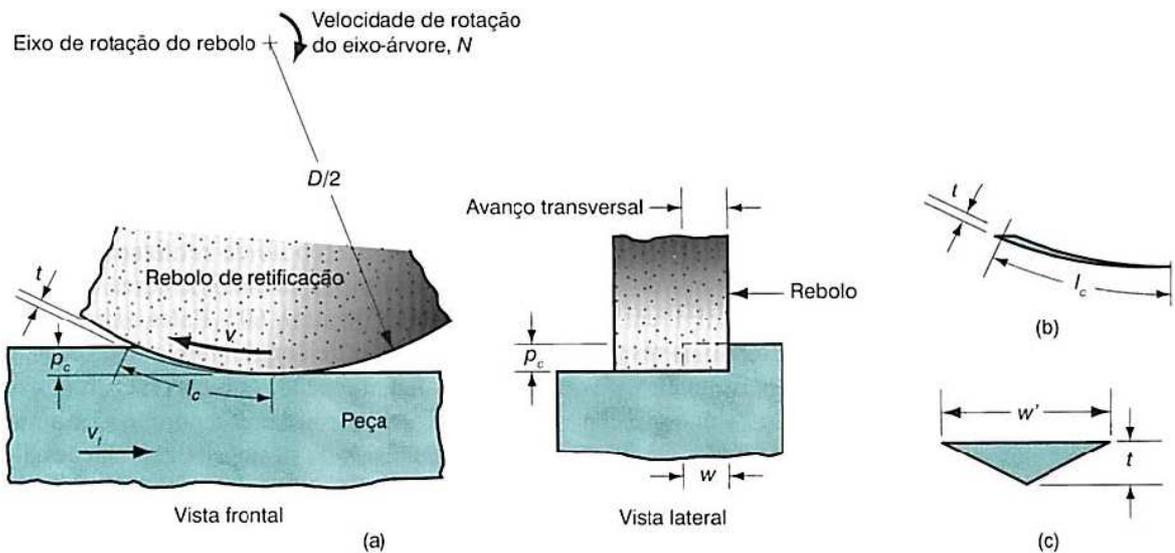
l_c = comprimento do cavaco (mm)

D = diâmetro do rebolo (mm)

p_c = profundidade de corte (mm)

Esta equação considera que o cavaco é formado por um grão que atua por toda a superfície de contato formando um arco de varredura total conforme mostrado na figura 6b.

Figura 6 - (a) Geometria da superfície de retificação com condições de corte; (b) perfil longitudinal considerado; (c) seção transversal de um cavaco individual



Fonte: Groover (2010, p. 457)

A figura 6c mostra uma seção transversal de um cavaco, com forma triangular e largura w' sendo maior que a espessura t por conta da taxa de aspecto do grão, que variam entre 10 e 20.

$$r_g = \frac{w'}{t} \quad (2.6.3)$$

Os números de grãos ativos na periferia do rebolo por polegada quadrada é indicado por C e está relacionado com a estrutura do rebolo. Assim, uma estrutura mais densa contém mais grãos por unidade de área, com base em C podemos deduzir que o número de cavacos formados por tempo é dado por:

$$n_c = v \cdot w \cdot C \quad (2.6.4)$$

Onde:

n_c = número de cavacos formados por tempo

v = velocidade do rebolo, mm/min

w = avanço longitudinal, mm

C = quantidade de grãos por área na superfície do rebolo. Grãos/mm²

A partir deste estudo, fica claro que o acabamento superficial será melhor quanto maior o número de cavacos formados por unidade de tempo para uma certa largura w . Assim, aumentando-se a velocidade ou a granulometria do rebolo, melhor será seu acabamento superficial. Porém limitações existem, e um item a que se deve ter muita atenção é em relação a velocidade máxima periférica do rebolo, já que estas dependem diretamente do tipo de ligante usado em sua construção.

O fator temperatura de retificação também pode atuar como um limitador, já que o aumento da velocidade do rebolo ou o aumento do número de grãos ativos por área do rebolo, ocasionam temperaturas consideravelmente altas tendendo a causar problemas térmicos na superfície da peça, podendo ser minimizado com uma excelente refrigeração.

A temperatura superficial está relacionada com parâmetros de retificação demonstrado por:

$$T_s = K_2 \cdot p_c^{0,75} \cdot \left(\frac{r_g C v}{v_f} \right)^{0,5} \cdot D^{0,25} \quad (2.6.5)$$

Onde:

T_s = Temperatura superficial

K_2 = constante de proporcionalidade

p_c = profundidade de corte

v = velocidade do rebolo

v_f = velocidade da peça

C = número de grãos ativos do rebolo

D = Diâmetro do rebolo

2.7 Dressagem

A operação de dressagem faz parte do processo de retífica e está diretamente ligada ao acabamento final da peça.

Segundo Nussbaum (1988, p.414) os objetivos elementares da dressagem são:

- Restaurar a capacidade de corte, permitindo que grãos novos e afiados apareçam na superfície;

- Limpar de partículas, a superfície de trabalho que o jato refrigerante não conseguiu limpar;
- Adequar as condições de corte para o acabamento desejado;
- Refazer o perfil, caso necessário, depois que este gastou-se e já não possui a forma inicial.

A medida que o rebolo trabalha, os grãos abrasivos se fraturam e novas arestas de corte surgem, até o ponto em que estas arestas cortantes se desgastam, perdendo a capacidade de remoção de material. Os poros são preenchidos pelos micro cavacos, assim o rebolo irá se empastar e cada vez menos terá capacidade de corte. Não acontecendo o corte, o aquecimento do processo aumenta, conseqüentemente a peça poderá se dilatar e aumentar a pressão entre o conjugado peça/rebolo, e em casos extremos ocorre a quebra do rebolo ou da própria peça. Desta forma, antes que se chegue a este caso extremo a operação de dressamento se faz necessária.

Existem muitas formas de dressadores, utilizamos neste estudo o dressador multigranular por oferecer um desgaste regular da parte ativa, maior rapidez na dressagem, e possuir um excelente desempenho na dressagem de granulometrias finas.

As profundidades indicadas para a operação de dressagem são 0,01mm à 0,03mm.

De acordo com a finalidade da retificação são adotadas diferentes velocidades de dressamento. Para retificação de desbaste usa-se normalmente maiores velocidades de dressagem, assim o rebolo terá uma maior agressividade e capacidade de remoção de material. Uma dressagem mais lenta favorecem acabamentos melhores de retificação.

A mesma analogia vale para os avanços do dressador. Um grande avanço determinará estrutura mais aberta e favorecerá o desbaste, já pequenos avanços favorecerá o acabamento.

Considera-se grandes avanços os realizados entre 0,03mm à 0,06mm e avanços pequenos situa-se entre 0,005mm à 0,01mm.

2.8 Velocidades do rebolo e sua influência no desgaste e no acabamento

As velocidades do rebolo e da peça combinadas, tem grande influência no acabamento superficial como resultado final da retificação, além de reduzir ou prolongar a vida do rebolo, alterando sua produtividade.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (1999, p.238), se a velocidade da peça diminui, os esforços sobre os grãos serão menores, e a vida do rebolo aumenta.

De acordo com Groover (2014, p. 456,457), para se otimizar o acabamento superficial, além da escolha de grãos menores para o rebolo e com uma estrutura mais densa, usa-se uma alta velocidade do rebolo e baixa velocidade da peça.

Estrutura densa de rebolo é aquela cuja a proporção de poros é pequena e a de grãos é grande. Esta informação é relevante pois estruturas densas proporcionam melhores acabamentos superficiais e controles dimensionais.

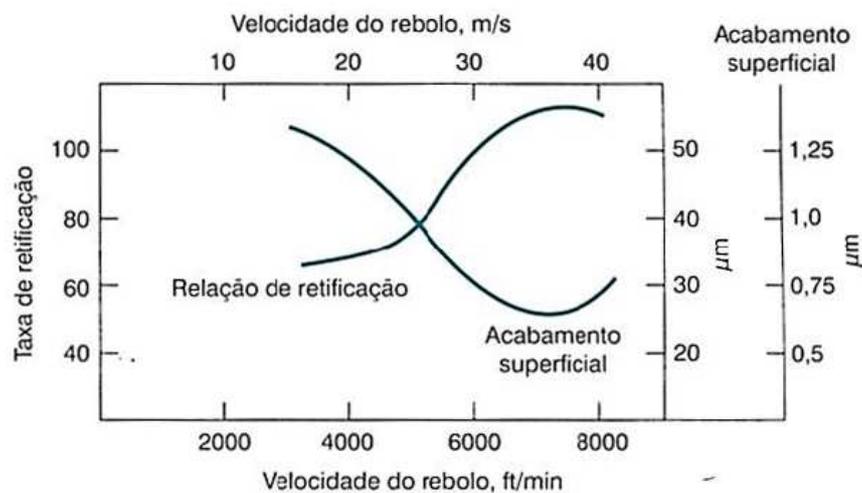
A alta velocidade do rebolo garante que o cavaco gerado tenha tamanhos menores, assim a qualidade superficial será melhorada. Porém este aumento de velocidade do rebolo é limitada, conforme Groover (2014, p.460):

Quando as velocidades de desgaste tornam-se demasiada elevadas, ocorre o aumento das temperaturas superficiais e do desgaste por abrasão. Como resultado, a taxa de retificação é reduzida, e o acabamento superficial é prejudicado.

Este efeito foi relatado por Krabacher (1959, apud Groover), e mostra que o acabamento superficial melhora com o aumento da velocidade do rebolo (figura 7). Nesta condição ocorrerá a diminuição do tamanho do cavaco, da mesma forma que a taxa de retificação poderá aumentar, se conjugada ao aumento de velocidade da peça, pois assim haverá um aumento no número de cavacos gerados por unidade de tempo, conforme equação (2.6.4).

Este efeito se dá até determinada velocidade, e a partir deste ponto o acabamento superficial é prejudicado, a taxa de retificação estabiliza e reduz, devido a perda de capacidade de remoção de cavaco sofrido pelo rebolo e pelo entupimento de seus poros, fenômeno conhecido como carregamento do rebolo.

Figura 7 - Taxa de retificação e acabamento superficial em função da velocidade do rebolo



Fonte: Groover (2014 p. 461)

2.9 Velocidade da peça e sua influência no acabamento

Muitos citam a variação da velocidade do rebolo como um parâmetro que pode definir o acabamento superficial de uma peça, de acordo como o exposto acima. Nosso foco de estudo se relaciona a analisar o acabamento superficial em relação a velocidade da mesa, visto que em muitas retificas a velocidade periférica é determinada pela rotação fixa do eixo do rebolo, e a variação de sua velocidade fica a cargo da dimensão de seu diâmetro.

A combinação da velocidade relativa do rebolo e a velocidade da peça durante o ponto de contato define a velocidade de corte, onde em um movimento discordante as velocidades do rebolo e da mesa se somam e em um movimento concordante resultará na diferença entre eles. Segundo Princípios... (2011, p.177), em seu livro sobre retificação e afiação: “como a velocidade linear da mesa, entre reversões, é normalmente de apenas 2,5% da velocidade periférica do rebolo o efeito sobre as velocidades relativas entre as duas direções é de apenas 5% e, portanto, não muito significativa.”

Há de se concordar que a velocidade do rebolo é muito superior à velocidade máxima atingida pela mesa, de qualquer forma este parâmetro requer atenção. Ainda segundo Princípios... (2011, p.177):

Uma velocidade de mesa mais baixa que a faixa entre 20 a 25 m/min teoricamente pode propiciar uma rugosidade superficial mais baixa, mas a perda de eficiência de corte e o possível surgimento de manchas de queimaduras decorrentes de sobre aquecimento na peça, anulam todas as eventuais vantagens perseguidas.

Nussbaum (1988, p.335), defende que “a velocidade longitudinal da mesa, porta peça, dependerá de vários fatores, como profundidade da passada, material a ser retificado, características do rebolo, etc.” E indica alguns valores orientativos da velocidade da mesa de acordo com o material a ser retificado, mostrado na Tabela 3.

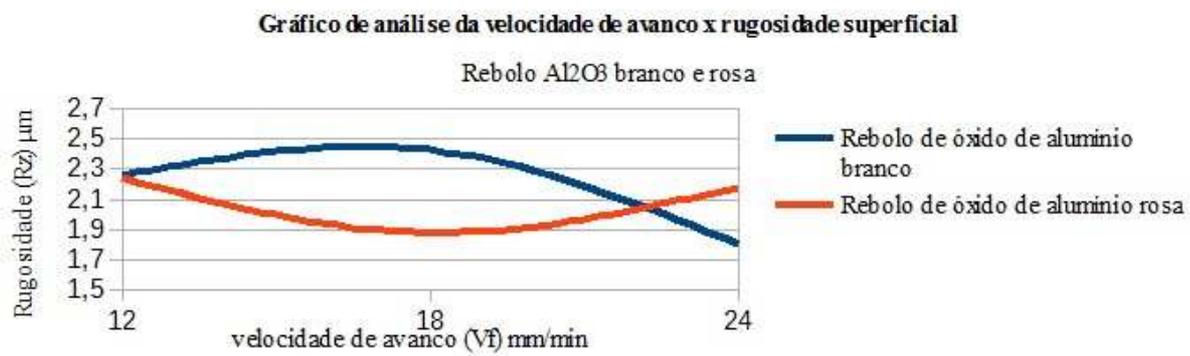
Tabela 3 - Valores orientativos da velocidade da mesa de acordo com o material a retificar

| Material a retificar | Velocidade da mesa |
|-----------------------------|---------------------------|
| Aço Comum | 6 – 15 m/min |
| Aço Liga | 5 – 12 m/min |
| FoFo | 8 – 15 m/min |
| Bronze Latão | 10 – 16 m/min |
| Carburos Metálicos | 3 – 5 m/min |

Fonte: Nussbaum (1988, p. 335)

Carlini (2015), em uma análise entre a velocidade de avanço longitudinal e a rugosidade superficial no processo de retificação, estudou os efeitos da variação da velocidade utilizando dois tipos de rebolo de Óxido de Alumínio, branco e rosa. Os resultados obtidos são demonstrados na Figura 8, onde se observa que a uma velocidade de 12 m/min, os dois rebolos se comportaram praticamente da mesma maneira, obtendo valores de rugosidade muito próximos. Com o aumento da velocidade o que se nota é um melhor acabamento com o uso do óxido de alumínio rosa, e uma inversão de resultados com o aumento da velocidade da mesa para 24 m/min, comprovando a ideia mostrada por Nussbaum sobre a complexidade do processo de retífica.

Figura 8 - Gráfico de análise da rugosidade superficial em relação a velocidade de avanço longitudinal



Fonte: Carlini (2015, p.3)

3 METODOLOGIA

Para analisar a influência da velocidade da mesa sobre a rugosidade superficial, foram realizados quatro ensaios utilizando-se 16 amostras. Foram realizadas retificações entre dois tipos de rebolo, um composto de Óxido de Alumínio (AA 80 J6 V387), e outro composto de Carboneto de Silício (GC 80 K6 V), variando o deslocamento da peça utilizando para isso as velocidades da mesa de 12m/min e 24m/min, mantendo todos os demais parâmetros inalterados.

O processo de retificação apesar de parecer simples requer muitos estudos e cuidados, dependendo em grande parte da experiência do operador, seja na escolha do rebolo ou na própria operação em si.

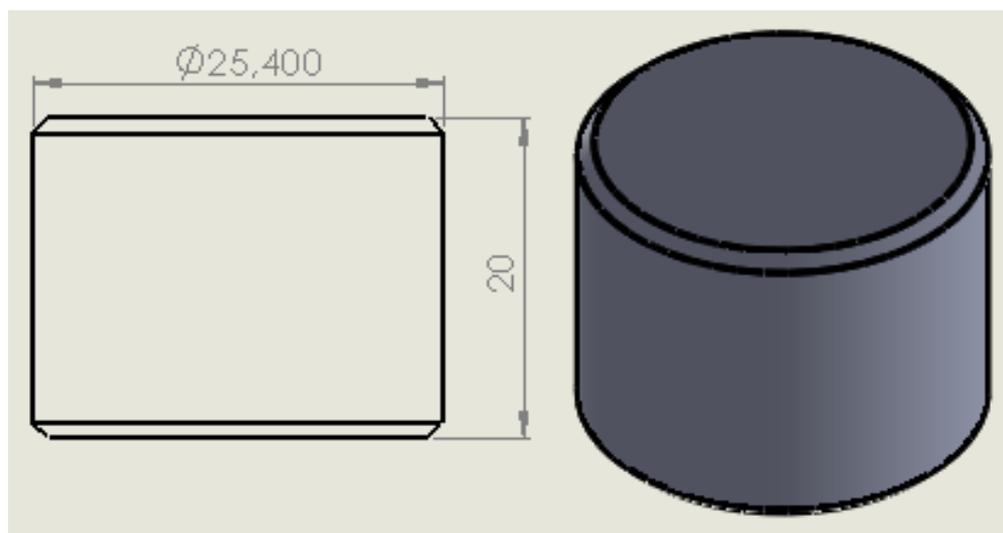
Este estudo não tem a pretensão de tabelar definitivamente os parâmetros de entrada e prever os resultados de saída como vislumbrava Nussbaum (1988), porém conforme novos estudos são realizados, novas dificuldades e respostas podem ser obtidas, seja positiva ou negativamente.

Nos próximos tópicos trataremos dos materiais, equipamentos e métodos utilizados para este estudo.

3.1 Corpo de prova

Para a realização dos ensaios foram utilizados dezesseis corpos de prova, figura 09, confeccionado em aço ferramenta SAE ABNT D6 (Villares VC131) , que possui em sua composição 2,1%C, 11,5%Cr, 0,7%W e 0,15%V, temperado atingindo dureza aproximada de 60HRC. A escolha se justifica por este aço possuir uma boa temperabilidade e tenacidade, além de uma elevada resistência mecânica, alta estabilidade dimensional e excelente resistência ao desgaste, sendo amplamente utilizado na fabricação de ferramentas de corte e estampos, facas e tesouras de alto rendimento.

Figura 9 - Corpo de prova a ser retificado



Fonte: O autor (2016)

Além disso, o material foi selecionado de modo a possibilitar a continuidade de trabalhos já desenvolvidos no IFSC – Rau, onde já foram realizadas pesquisas de análise da rugosidade em função da velocidade longitudinal de retificação com a utilização de rebolos de óxido de alumínio branco e rosa.

A preparação do corpo de prova está descrita em trabalho acadêmico apresentado no SEPEI 2015, descrito por Carlini (2015, p.2), em sua íntegra:

[...]os mesmos foram usinadas um lado, em um torno convencional marca NARDINI MS 205, logo passando pelo processo de usinagem em um torno CNC ROMI GL 240 no outro lado, para obter igualdade quanto ao seu comprimento de espessura de 20 mm. Obtendo-se então, um pré acabamento na retificação em ambas as faces, e encaminhadas para tempera, aumentando assim sua dureza para 58 à 60 Hockwell (HRC), determinada para realização dos testes. Quanto a retificação de pré acabamento citada anteriormente, não foi definido velocidade de avanço ou parâmetros de rugosidade, pois a mesma serviu apenas para corrigir irregularidades inerentes ao processo de torneamento.

3.2 Projetor de perfil

O corpo de prova a ser utilizado possui em suas extremidades um chanfro de dimensões desconhecidas. Como foram realizadas medições de rugosidade em intervalos de volumes pré definidos, o conhecimento deste volume existente em cada fração do corpo de prova se faz necessário.

Para conhecer o volume fracionado, foi necessário primeiramente saber a altura do chanfro existente em cada corpo de prova. Esta medição embora simples se torna complexa pelas características do corpo de prova, uma vez que estamos trabalhando com corpos cilíndricos e alturas de chanfro na casa de milímetros e ângulos.

Para a realização da medição da altura do chanfro, conferência do seu ângulo e diâmetros do corpo de prova, foi utilizado o projetor de perfil da marca Mitutoyo, modelo PJ-R3000, que possui área útil de 266mm x 170mm, resolução de 0,0001mm, sendo utilizado com a lente 10x para ampliação e projeção da peça, veja as Figuras 10 a 12. Um projetor de perfil possui a característica de realizar verificações em peças pequenas e com perfis complexos.

Os resultados das medições serão utilizadas na equação (3.2.1), definida como cálculo do volume do tronco de cone.

$$V_{tc} = \frac{\pi \times h(R^2 + Rr + r^2)}{3} \quad (3.2.1)$$

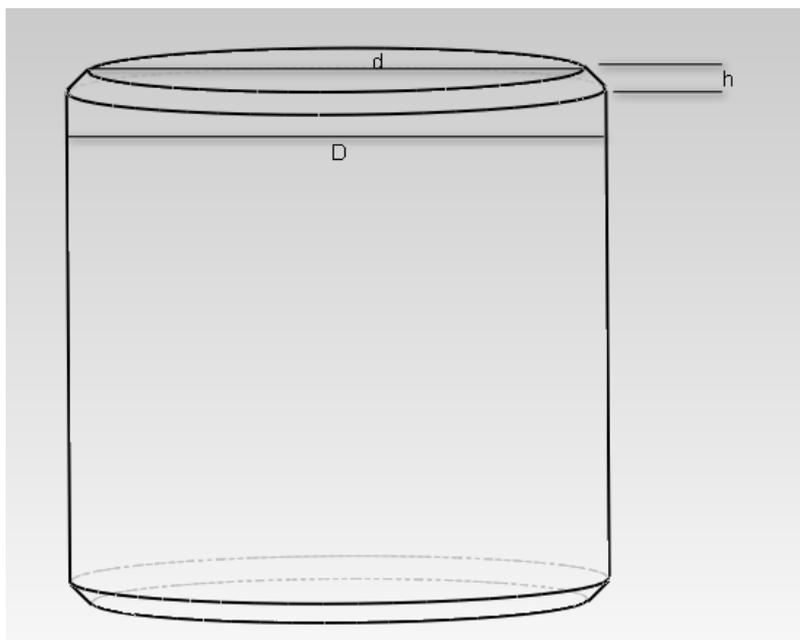
Onde:

h = altura do chanfro

R = Maior raio do cilindro.

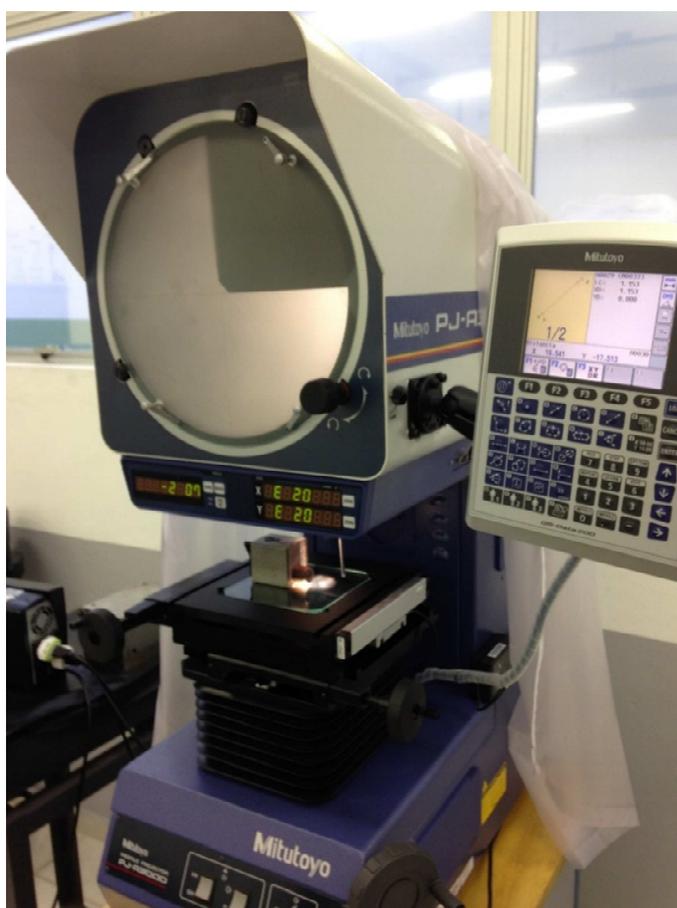
r = Menor raio do cilindro.

Figura 10 - Medições do corpo de prova em projetor de perfil



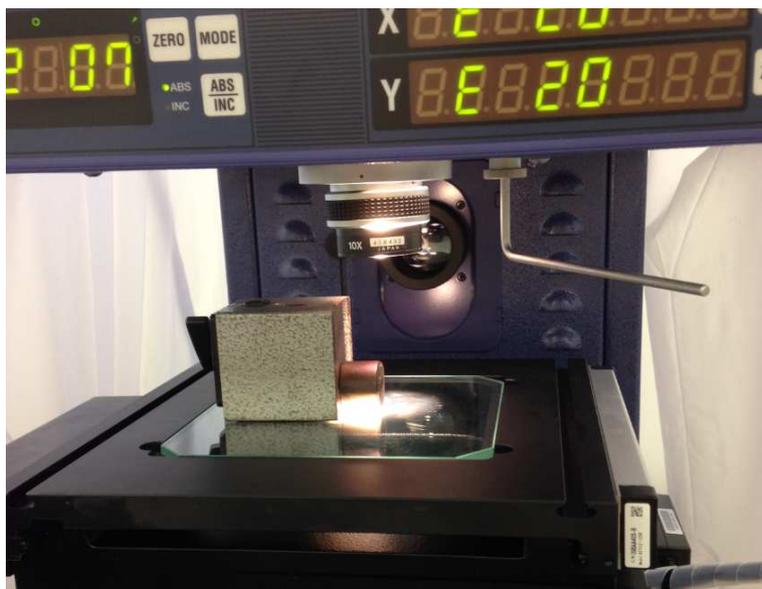
Fonte: O autor (2016)

Figura 11 - Projetor de perfil Mitutoyo PJ-R3000



Fonte: O autor (2016)

Figura 12 - Realização de medição dos chanfros do corpo de prova



Fonte: O autor (2016)

3.3 Rebolo utilizado

Para este estudo, foi feita a comparação entre um rebolo de Óxido de Alumínio (Al_2O_3), branco e outro em Carboneto de Silício (SiC), verde. As características dos rebolos foram retiradas de catálogos dos respectivos fabricantes e são descritas nas Tabelas 04 e 05.

Tabela 4 - Características do rebolo de Óxido de Alumínio.

Característica do Rebolo de Óxido de Alumínio Al_2O_3

| Especificação completa do rebolo AA 80 J6 V387 | |
|--|-------------------------------------|
| Perfil do rebolo | Reto |
| Tipo de grão | Óxido de Alumínio com 99% de Pureza |
| Granulometria (tamanho de grão) | 80 |
| Grau do rebolo | Macio |
| Estrutura do rebolo | Média |
| Tipo de Ligante | Vitrificado |
| Rotação máxima | 2480 rpm |
| Diâmetro (mm) | 254 mm |
| Espessura (mm) | 25,4 mm |
| Diâmetro furo de fixação (mm) | 76,2 mm |
| Fabricante | Indabratec |

Tabela 5 - Características do rebolo de Carbetto de silício

| Característica do Rebolo de Carbetto de Silício SiC | |
|--|---------------------|
| Especificação completa do rebolo GC 80 K6 V | |
| Perfil do rebolo | Reto |
| Tipo de grão | Carbetto de Silício |
| Granulometria (tamanho de grão) | 80 |
| Grau do rebolo | Macio |
| Estrutura do rebolo | Média |
| Tipo de Ligante | Vitrificado |
| Rotação máxima | 2765 rpm |
| Diâmetro (mm) | 250 mm |
| Espessura (mm) | 25,4 mm |
| Diâmetro furo de fixação (mm) | 76,2 mm |
| Fabricante | Stilex |

Fonte: O autor (2016)

Rebolos de Óxido de Alumínio são indicados para trabalhos em aços temperados ou não, ligas ferrosas, bronzes e alumínios de alta dureza e os ferros fundidos mais duros. Já o rebolo em Carboneto de Silício tem sua indicação para a retificação de ferro fundido, aço inoxidável, bronzes macios, alumínio puro e latão, não devendo ser utilizado em retificação de aços devido à forte afinidade química entre o carbono presente no rebolo de SiC e o ferro nos aços.

Apesar desta recomendação, foi utilizado o rebolo de SiC para a retificação em nosso estudo a fim de analisar o comportamento deste rebolo.

3.4 Retificadora Plana Tangencial

Será utilizada a retificadora plana tangencial modelo P25 AUTOMÁTICA, fabricada pela MELLO. Esta retificadora possui uma rotação de 2400 RPM no eixo horizontal do rebolo e um ajuste da profundidade de corte em incrementos de 0,005mm de precisão, parâmetro necessário para a realização do projeto. A retificadora P25 possui um curso no eixo longitudinal de 580 mm capaz de retificar um comprimento máximo de 570 mm, curso transversal de 300 mm capaz de retificar até 320 mm sem saída do rebolo, até 310 mm com saída de $\frac{1}{4}$ da espessura do rebolo e

capacidade de retificação de 280 mm com a saída completa do rebolo. A placa eletromagnética possui 550 mm X 250 mm, sua altura máxima de retificação é de 340 mm com rebolo máximo instalado com placa eletromagnética e de 460 mm de altura máxima de retificação sem placa eletromagnética e com rebolo mínimo instalado, o tamanho máximo do rebolo permitido é de 254 mm X 20 mm X 76 mm, possui um motor de 3cv.

3.5 Controle de velocidade

A velocidade máxima nominal da mesa da retificadora P25 é de 24 m/min, com reversões dos movimentos longitudinais e transversais automáticas comandadas por sensores de proximidade. Possui sistema elétrico automático para movimento transversal e sistema hidráulico para movimento longitudinal composto por bomba de palhetas de vazão variável, eletroválvulas e válvulas manuais.

Como as movimentações longitudinais são realizadas por um sistema óleo hidráulico com controle de velocidade atuado através de válvula manual, o ajuste da velocidade da mesa se torna impreciso, característica dada pela válvula ou por uma alteração de viscosidade do óleo hidráulico que pode sofrer influência de temperatura externa ou interna de trabalho.

3.6 Fluido de corte

O fluido de corte utilizado no projeto é da marca LubMaster LEB ASI L52. Trata-se de um fluido de corte semi sintético solúvel desenvolvido para metais ferrosos e não ferrosos, com a capacidade de preservar a lubrificação e o equipamento, atendendo a norma ISO VG 7.

O fluido de corte será preparado com uma diluição em água, à concentração de 5% do volume total.

3.7 Aquisição de dados

Este projeto visa analisar o acabamento superficial obtido através da variação de velocidade da peça no processo de retificação plana, mantendo-se os demais parâmetros de retificação sem alteração. Para que a análise seja efetivamente

confiável, é necessário o monitoramento contínuo da velocidade durante o processo de retificação. Para a aquisição de dados foi necessário construir um equipamento para esta finalidade.

O equipamento construído é constituído de duas placas de circuito eletrônico com sensor infravermelho (veja o diagrama esquemático na Figura 14). Para o tratamento dos dados, será adotada uma placa de prototipagem eletrônica Arduino UNO, Figura 15. Esta placa é amplamente utilizada em desenvolvimentos de projetos interativos e em tecnologias embarcadas, admitindo entradas de uma série de sensores sendo tratadas com programação em linguagem C++. Esta placa programada executará o tratamento dos dados coletados de contagem de tempo e executará o cálculo da velocidade instantaneamente.

Estes sensores foram dispostos em dois pontos ao longo da mesa da retificadora a uma distância conhecida, (Figura 13), assim a cada movimento da mesa de retificação um sensor será acionado e a velocidade será calculada e registrada com base no tempo percorrido pela mesa, iniciando um novo movimento da mesa onde uma nova contagem será iniciada, calculada e registrada, assim sucessivamente. Deste modo, obtivemos tempos e velocidades parciais para cada etapa de curso da retificação.

Para que as velocidades de retificação sejam conhecidas e ajustadas, elas precisam ser visualizadas em tempo real. Para essa visualização, optou-se pelo software de plataforma gratuita que acompanha a placa eletrônica Arduino, assim as velocidades estarão disponíveis a todo momento em real time e poderão ser acompanhadas pelo monitor e ajustadas se necessário.

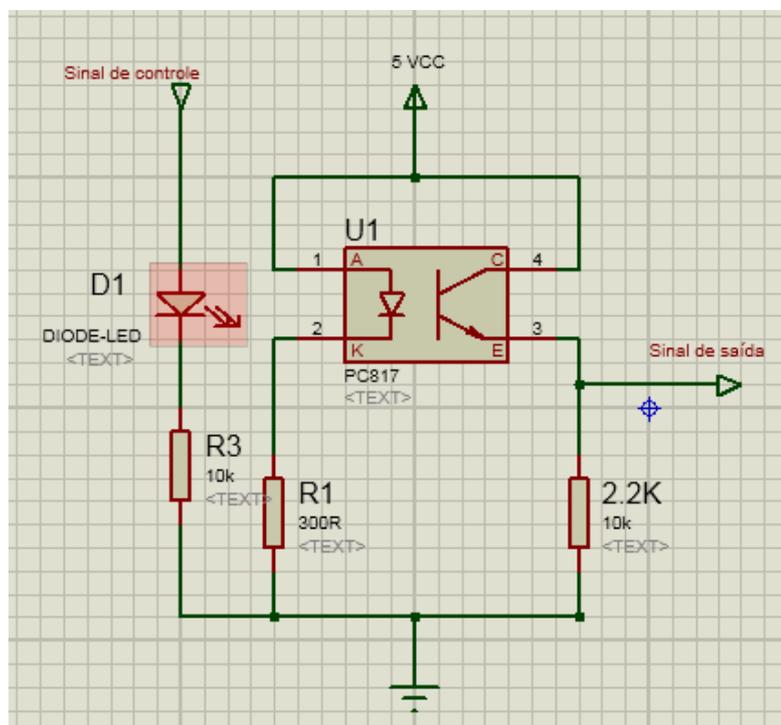
Além dos dois sensores de velocidade, um terceiro sensor foi construído e instalado na retificadora. Este terceiro sensor tem a função de monitorar o deslocamento transversal da mesa de retificação. Assim como ocorre com o ajuste de velocidade, o deslocamento transversal poderá ser ajustado previamente conforme necessidade e de acordo com as medições realizadas por este sensor, assim será possível estabelecer de modo mais assertivo o incremento lateral da mesa de retificação.

Figura 13 - Exemplo de sensores instalados na retificadora



Fonte: O autor (2017)

Figura 14 - Diagrama esquemático do circuito do sensor



Fonte: O autor (2016)

Figura 15 - Placa Arduino UNO



Fonte: O autor (2016)

3.8 Medição de rugosidade

Para a análise de rugosidade após as retificações, foi utilizado o rugosímetro da marca Tesa, modelo RUGOSURF 20. Esse rugosímetro possui escala de medição no eixo z de 400 μ m e possui 15 parâmetros de rugosidade que podem ser ativados individualmente ou não, e sua resolução de medição é de 0,001 μ m.

As medições coletadas foram as rugosidades R_a , R_t e R_z , com valor de amostragem, CutOff de 0,8 mm x 3.

Foram efetuadas três medições perpendiculares ao sentido de usinagem em cada amostra, o que nos resultará em doze medições por cada volume usinado.

3.9 Planejamento e execução experimental

Como esta análise de certa forma é uma continuidade de estudos já iniciados no IFSC, os corpos de prova utilizados nesta análise já se encontravam confeccionados e temperados com dureza entre 58 e 60 HRC, conforme descrição do corpo de prova.

O corpo de prova apresentava em suas extremidades chanfros com dimensões não conhecidas, assim um conhecimento prévio deste chanfro se fazia necessário para conhecimento do volume de material a ser retificado durante a análise.

Foi utilizado o projetor de perfil para esta medição, onde as alturas e os ângulos formados pelo chanfro do corpo de prova foram medidos e lançados em planilha eletrônica preparada para a realização dos cálculos de volume. Nesta etapa foram realizadas três medições consecutivas para a obtenção de resultados mais precisos.

A planilha preparada para auxiliar nos trabalhos realizou os cálculos de volume a serem retificados de forma automática. Após a seleção das superfícies dos corpos de prova que serão utilizados o volume específico total é calculado de acordo com o ajuste da profundidade de corte desejada. Com isto determinamos o mapa de retificação com intervalos de aproximadamente 15,75mm³/mm. Inicialmente nosso limite de retificação foi definido em 94,49mm³/mm de volume específico total retificado, pois se acreditava que com este volume usinado teríamos material suficiente para análise e a peça iria apresentar danos superficiais ou teríamos um desgaste prematuro do rebolo.

A figura 16 mostra a planilha utilizada com a seleção da superfície a ser retificada, os incrementos da profundidade de corte e o volume a ser usinado. Podemos visualizar que ao se utilizar a superfície A das amostras 9,12 e 15 e a superfície B da amostra 16, ao atingir a profundidade de corte de 1,007mm teremos um volume removido de 70,92 mm³/mm. Esta planilha nos auxiliou e agilizou o processo de definição das etapas, sendo possível resolver qualquer modificação no planejamento rapidamente.

Figura 16 - Planilha de cálculo de volume usinado

| SELEÇÃO DE CP A RETIFICAR E CÁLCULO DE VOLUME USINADO - SOMENTE CHANFRO | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|---|--------------------------------|------------------------|----------------|------------------------|----------------|-----------------------------|-------|----|
| SUPERFÍCIE | | Cálculos de volume do cone e tronco de cone | | | | | | Altura Total tronco de cone | | |
| A | B | CP | Área do círculo(plano do cone) | Vol Tronco de cone (A) | Vol Retificado | Vol Tronco de cone (B) | Vol Retificado | Sup A | Sup B | CP |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 1 | 502,29 | 491,75 | 462,744 | 552,69 | 453,27 | 1,065 | 1,208 | 1 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 2 | 502,49 | 496,97 | 462,482 | 530,91 | 454,47 | 1,076 | 1,161 | 2 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 3 | 504,36 | 492,31 | 464,191 | 504,57 | 459,021 | 1,063 | 1,098 | 3 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 4 | 502,37 | 578,16 | 447,748 | 491,11 | 462,598 | 1,272 | 1,064 | 4 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 5 | 502,80 | 535,38 | 454,476 | 499,51 | 462,510 | 1,17 | 1,081 | 5 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 6 | 502,53 | 486,31 | 461,781 | 486,16 | 462,626 | 1,056 | 1,054 | 6 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 7 | 502,57 | 506,56 | 457,215 | 469,72 | 464,698 | 1,106 | 1,017 | 7 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 8 | 503,44 | 439,04 | 468,893 | 566,48 | 447,985 | 0,948 | 1,247 | 8 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 9 | 503,44 | 579,64 | 445,230 | 498,37 | 462,825 | 1,28 | 1,078 | 9 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 10 | 502,84 | 461,41 | 465,436 | 608,08 | 440,303 | 0,999 | 1,350 | 10 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 11 | 503,60 | 494,61 | 464,535 | 526,10 | 455,896 | 1,067 | 1,148 | 11 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 12 | 503,00 | 521,82 | 452,729 | 491,15 | 463,602 | 1,146 | 1,062 | 12 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 13 | 502,73 | 584,80 | 444,756 | 504,18 | 463,212 | 1,292 | 1,089 | 13 |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 14 | 502,33 | 462,91 | 467,435 | 501,44 | 460,514 | 0,998 | 1,089 | 14 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | 15 | 504,32 | 586,36 | 444,508 | 509,78 | 462,718 | 1,295 | 1,101 | 15 |
| <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | 16 | 503,60 | 504,65 | 460,647 | 510,90 | 458,968 | 1,095 | 1,111 | 16 |

| | | |
|----------------------------|--------------------------|---------------------|
| Altura total | 1,007 | mm |
| Precisão | 1000 | |
| Incremento de profundidade | 0,2 0,8 0 0,007 | mm |
| Espessura do Rebolo | 1 | '' |
| Volume específico | 70,92 | mm ³ /mm |

| | | | | | | |
|-----------------------|-------------------------|-------------|-----------------|----------------|----------|-----------------|
| Seleção de superfície | VOLUME RETIFICADO SUP A | 1342,468255 | mm ³ | VOLUME USINADO | 1801,436 | mm ³ |
| | VOLUME RETIFICADO SUP B | 458,9676262 | mm ³ | | | |

Fonte: O autor (2016)

Os dezesseis corpos de prova foram identificados e divididos em quatro grupos com quatro peças cada. Para cada grupo selecionado foi feita uma retificação prévia nas superfícies opostas a serem utilizadas no ensaio para que os comprimentos dos corpos de prova sejam todos exatamente os mesmos, e assim não haja uma diferença de comprimento e conseqüentemente uma alteração nos volumes individuais a serem usinados em cada corpo de prova.

Após a instalação dos sensores de velocidade na mesa da retificadora a uma distância conhecida o programa para a captura das velocidades foi inicializado, neste momento é necessário informar o número de sensores instalados e a distância existente entre eles, assim o setup do programa estará pronto e aguardando o início dos movimentos da mesa para a captura de dados. A figura 17, exemplifica a tela inicial com dados inseridos.

Figura 17 - Tela inicial do sistema para a captura de dados de velocidade da mesa

```

**Cronometro Aplicado a Retificacao Plana**
Versao: 3,1,2 Correção 2 sensores

Conexao nos pinos do Arduino:
Sensor 1: A0
Sensor 2: A3
Sensor 3: 5
Sensor 3: 6 (utilizado como VCC)
Sensor 3: 7 (utilizado como GND)
Led 1: A1
Led 2: A4

Entre com o numero de sensores:
Numero de sensores: 2

Entre com o valor da distancia (mm):
Distancia escolhida: 0,10 m

Iniciado sistema de Captura!

Ciclos Tempo_s velocidade1_m/s velocidade_m/min Deslocamento_Lateral_mm

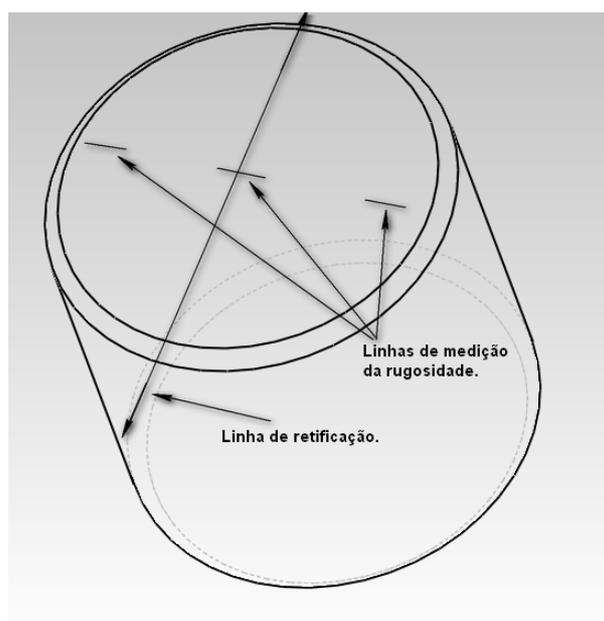
```

Fonte: O autor (2016)

O primeiro rebolo utilizado foi o de Carboneto de Silício retificando a uma velocidade da mesa ajustada de 12m/min. Conforme o mapa de retificação, ao atingir o volume específico de 15,75mm³/mm de material usinado, as peças foram retiradas da retífica para a realização das medições de rugosidade Ra, Rt e Rz. Foram efetuadas três medições de rugosidade em cada amostra, feitas perpendicularmente ao sentido de retificação, totalizando doze medições no intervalo de volume usinado,

figura 18. Em seguida as amostras foram recolocadas na mesa magnética da retificadora na mesma ordem e posição iniciais, e se seguiu a remoção de material e medições de rugosidade a cada $15,75\text{mm}^3/\text{mm}$ de material removido até o limite de $94,49\text{mm}^3/\text{mm}$ de volume específico total, conforme previamente planejado. A figura 19 exemplifica o posicionamento adotado para a realização de todas as etapas. A profundidade de corte adotada para todas as análises foi de $0,03\text{mm}$ por passada, com incremento transversal de $2,5\text{mm}$.

Figura 18 - Linha de retificação e indicação das linhas de medição de rugosidades perpendiculares a retificação



Fonte: O autor (2016)

Figura 19 - Posicionamentos das peças na mesa magnética para retificação



Fonte: O autor (2016)

Antes das etapas de usinagem foi realizado o dressamento do rebolo com um dressador multigranular de modo a remodelar sua forma, renovar os grãos e realizar sua afiação. Nesta operação de dressagem foram quatro passagens do dressador com remoção de material a profundidade de 0,03mm em cada passagem, com velocidade constante para a garantia desta renovação completa dos grãos.

Ao que se seguiu a retificação utilizando o rebolo de Carboneto de Silício com a velocidade da mesa agora ajustada em 24m/min. Também de forma sequencial executou-se as medições de rugosidade a cada 15,75mm³/mm de volume específico removido.

Ao fim da etapa planejada com remoção de 94,49mm³/mm de volume específico retificado, a superfície das peças não apresentavam sinais de queima e a aparência do rebolo estava satisfatória. Tomou-se então a decisão de prolongar as etapas de retificação adotando o novo limite de 157,48mm³/mm de volume específico usinado. Rapidamente os novos ciclos foram acertados na planilha e o mapa de retificação refeito agora com o aumento do volume específico a ser retificado de 157,48mm³/mm para as demais etapas de usinagem.

Durante todas as etapas de retificação, a velocidade da mesa foi monitorada e caso apresentasse alguma variação poderia ser imediatamente corrigida manualmente na válvula de ajuste manual da velocidade da mesa. Esta variação

poderia acontecer devido ao aquecimento, por uso contínuo, do óleo hidráulico que realiza a movimentação longitudinal da mesa ou até mesmo uma variação inesperada causada pela limitação do sistema de regulação da velocidade que, como característica da máquina, conta apenas com uma válvula de ajuste imprecisa. Foi necessária a intervenção do ajuste de velocidade em apenas um momento, após um pequeno aumento da velocidade da mesa, rapidamente corrigido.

Após as etapas concluídas com o rebolo de Carboneto de Silício foi a vez da instalação e dressagem do rebolo de Óxido de Alumínio, e novamente todas as etapas de retificação e medição seguiram os parâmetros da etapa anterior conforme realizado com o rebolo de Carboneto de Silício. Todas as retificações foram igualmente monitoradas em relação a velocidade da mesa, desta vez sem contratempos, e foi mantido o novo mapa de retificação com o limite de 157,48mm³/mm de volume específico retificado.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Análise das velocidades de retificação

As velocidades coletadas durante o processo de retificação foram compiladas e de acordo com a Tabela 6, o valor médio da velocidade da mesa se situou próximo ao valor desejado previamente para os ensaios. Nota-se uma variação média próxima de 4m/min entre a maior velocidade e a menor velocidade coletada.

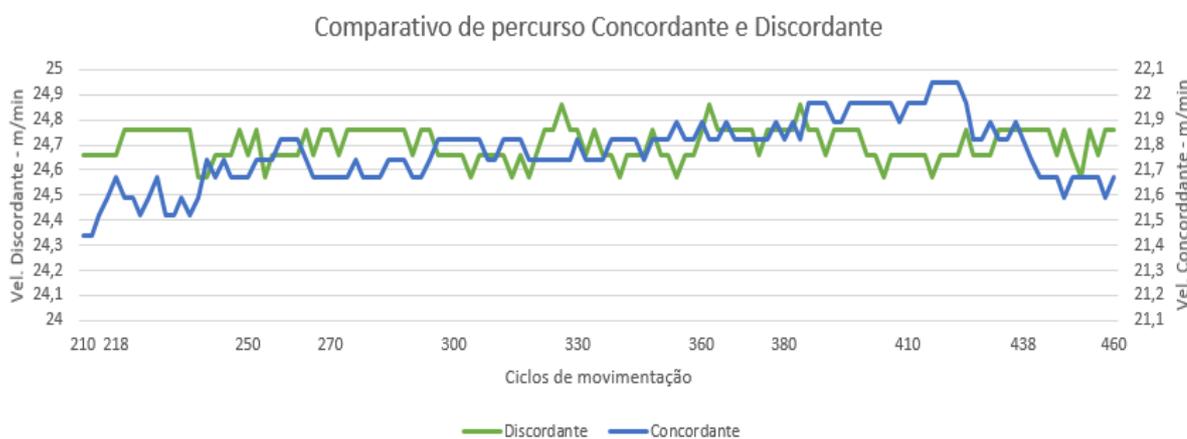
Tabela 6 - Comparativo entre velocidades da mesa

| Dados de velocidade da mesa (m/min) | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Velocidades da peça | Al2O3 | | SiC | |
| | 12m/min | 24m/min | 12m/min | 24m/min |
| MÉDIA CONCORDANTE | 12,22 | 21,85 | 13,35 | 22,63 |
| MÉDIA DISCORDANTE | 13,47 | 24,61 | 13,62 | 23,93 |
| Velocidade MÉDIA | 12,81 | 23,23 | 13,48 | 23,28 |
| Maior velocidade | 14,79 | 25,06 | 15,37 | 24,96 |
| Menor velocidade | 11,01 | 21,08 | 11,12 | 21,37 |

Fonte: O autor (2017)

Houve uma pequena variação entre as velocidades médias concordantes e discordantes da mesa, o que não significa que esta variação tenha sido provocada em função do contato entre o rebolo e a peça e sim por uma limitação construtiva do equipamento. A Figura 20 é um fragmento do processo de retificação onde em períodos alternados o rebolo está fora e sobre a peça. Neste fragmento nota-se uma maior inconstância durante a retificação no sentido concordante, e apesar de variável, o sentido discordante apresentou uma menor inconstância na variação de sua velocidade.

Figura 20 - Fragmento de um período de retificação. Onde temos momentos alternados em que o rebolo está fora da peça e em ação de retificação

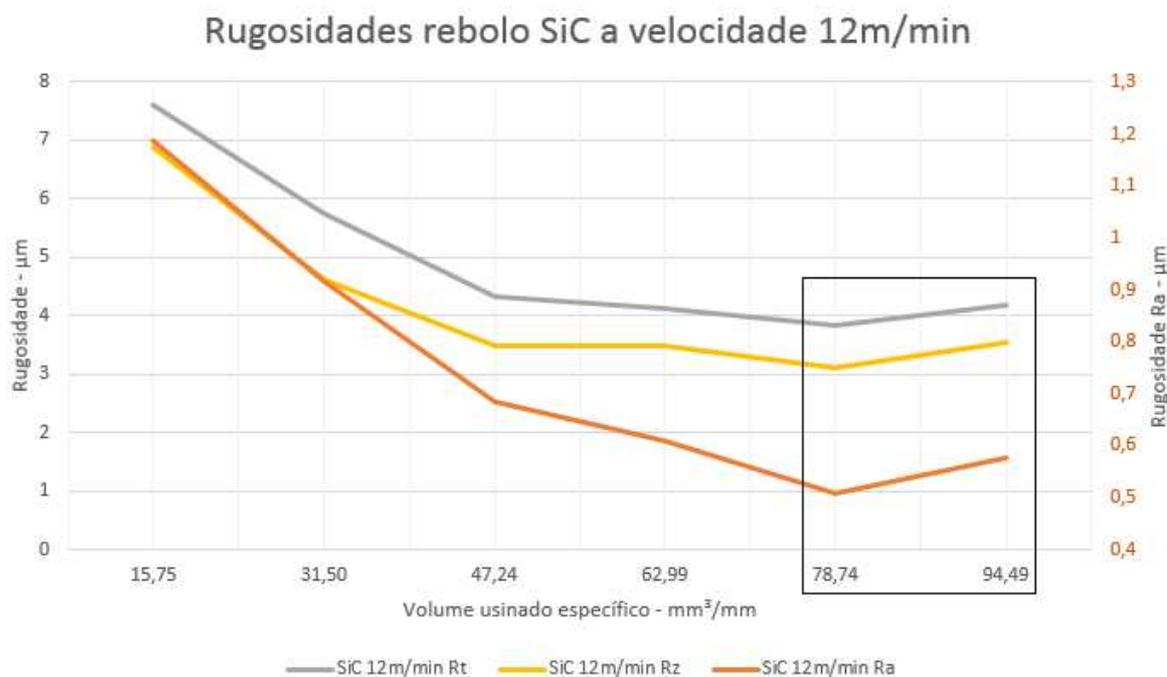


Apesar da instabilidade da velocidade da mesa, ao se comparar com a velocidade periférica do rebolo teremos uma variação de 0,2% na velocidade de corte, o que nos permite afirmar que esta variação não resultará em danos ou alterações nas medições de rugosidade ou causará algum dano superficial na peça.

4.2 Análise de retificação com rebolo de SiC

Conforme relatado no desenvolvimento, a retificação com rebolo de Carboneto de Silício com velocidade de 12m/min limitou-se a usinar um volume específico de 94,49mm³/mm, e os resultados das medições da retificação são demonstrados a seguir na Figura 21. Ao fim da retificação as peças apresentavam alguns pequenos pontos de queima próximo a suas extremidades.

Figura 21 - Rugosidades obtidas após retificação com rebolo SiC à uma vel.de 12m/min

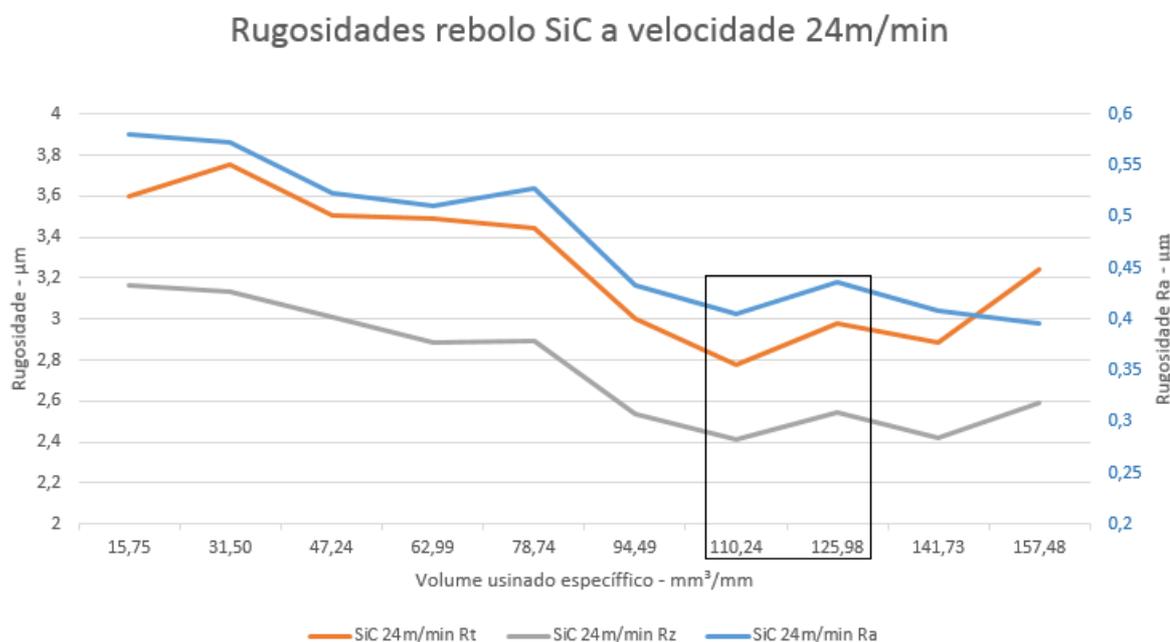


Fonte: O autor (2016)

A retificação realizada com a velocidade de 24m/min foi realizada até o limite planejado de 157,48mm³/mm de volume específico retificado. As rugosidades medidas não obedeceram uma curva regular descendente como visto na retificação à velocidade de 12m/min. O gráfico sugere uma instabilidade de medições até o volume específico usinado de 78,74mm³/mm, apresentando melhoras ínfimas de rugosidade. A partir deste volume há uma regularidade nos dois ciclos seguintes, desta vez com melhoras mais significativas na rugosidade, retornando a irregularidade após o volume específico de 110,24mm³/mm.

Marcas de queima superficial somente foram notadas ao atingir um volume específico retificado de 125,98mm³/mm, sugerindo o aparecimento de queima após a retificação de 110,24mm³/mm sem precisar exatamente o momento desta ocorrência. Juntamente com as marcas de queima houve um aumento da rugosidade, retornando próximo aos mesmos números obtidos com a retificação de volume específico de 94,49mm³/mm.

Figura 22 - Rugosidades obtidas após retificação com rebolo SiC à uma vel.de 24m/min



Fonte: O autor (2016)

Ao se analisar comparativamente as rugosidades R_a e R_z entre as velocidades de 12m/min e 24m/min, percebe-se que houve uma clara vantagem obtida ao longo de todas as medições R_z quando retificado com a velocidade de 24m/min. A mesma análise pode ser feita com as medições de rugosidade R_a , com exceção as medições realizadas ao se atingir a retificação de 78,74mm³/mm de volume específico removido, onde houve uma pequena vantagem para a velocidade de 12m/min.

Sobre o ponto de vista da produtividade, a vantagem do rebolo de Carboneto de Silício retificando com a velocidade da mesa a 24m/min, pode ser vista e entendida através do gráfico levando-se em conta a maior estabilidade na medição de rugosidade R_a , que se manteve entre os níveis de 0,6µm e 0,4µm durante todas as etapas de retificação.

Figura 23 - Comparação de rugosidades Ra entre velocidades de retificação

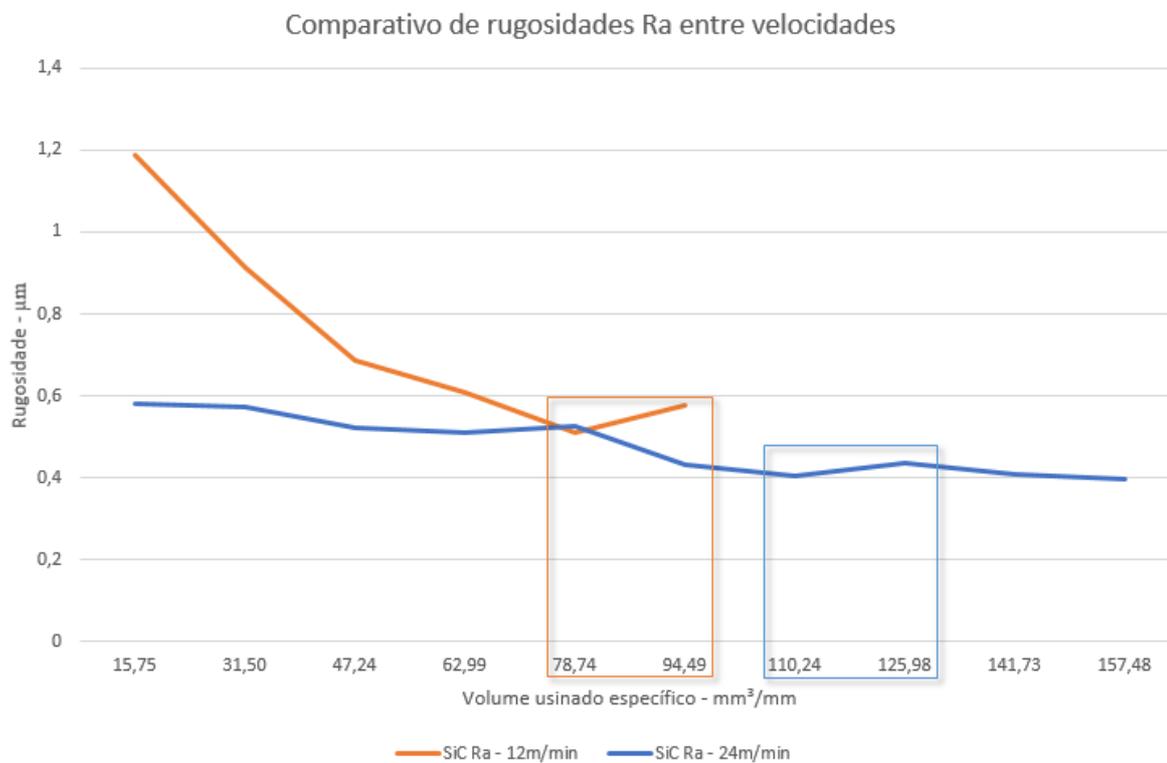
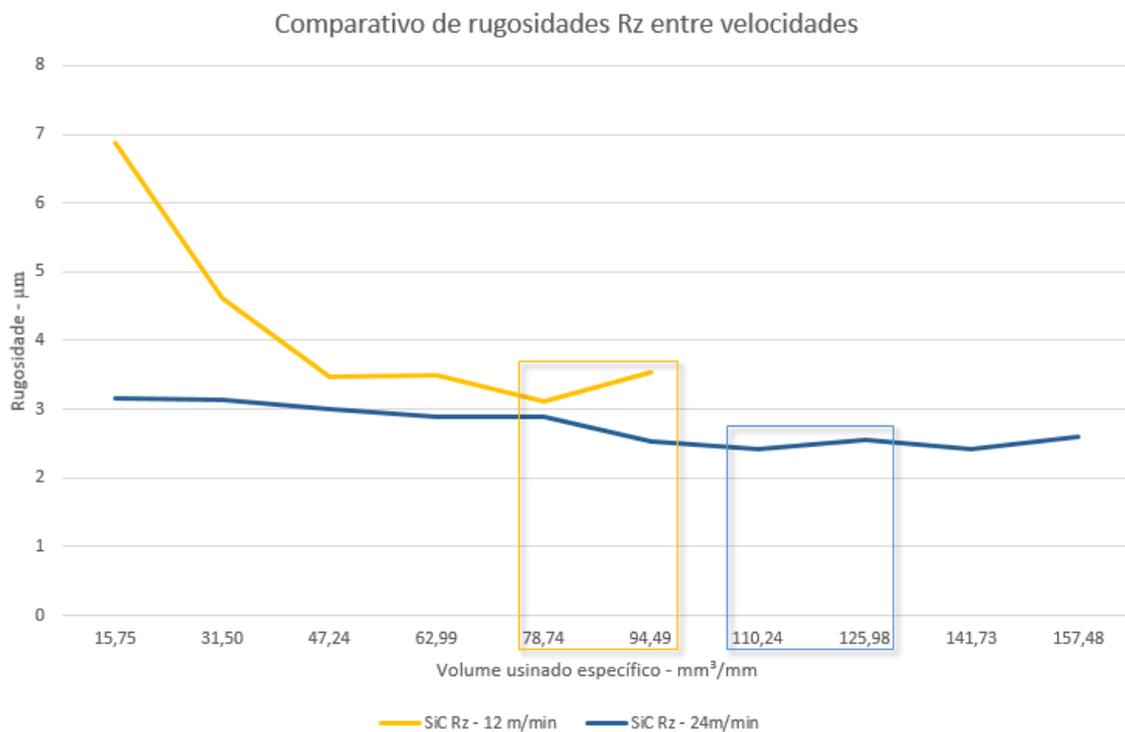


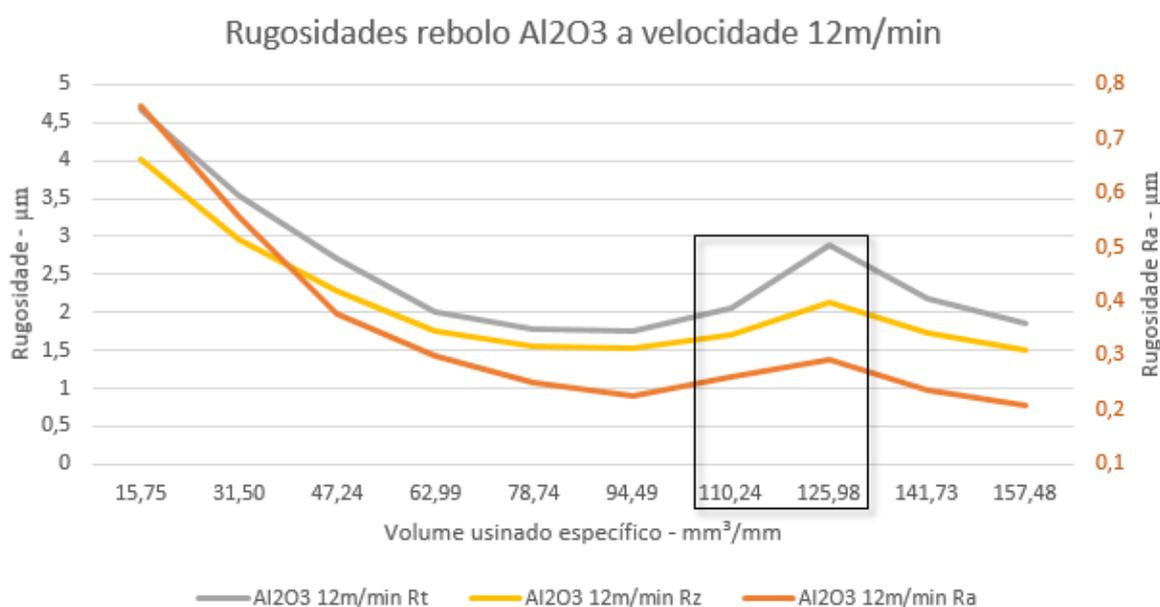
Figura 24 - Comparação de rugosidades Rz entre velocidades de retificação



4.3 Análise de retificação com rebolo Al_2O_3

A seguir teremos a divulgação dos dados obtidos com a utilização do rebolo de Óxido de Alumínio (Al_2O_3), com a retificação nas velocidades da mesa de 12m/min e 24m/min respectivamente.

Figura 25 - Rugosidades obtidas após retificação com rebolo Al_2O_3 à uma vel.de 12m/min



Fonte: O autor (2016)

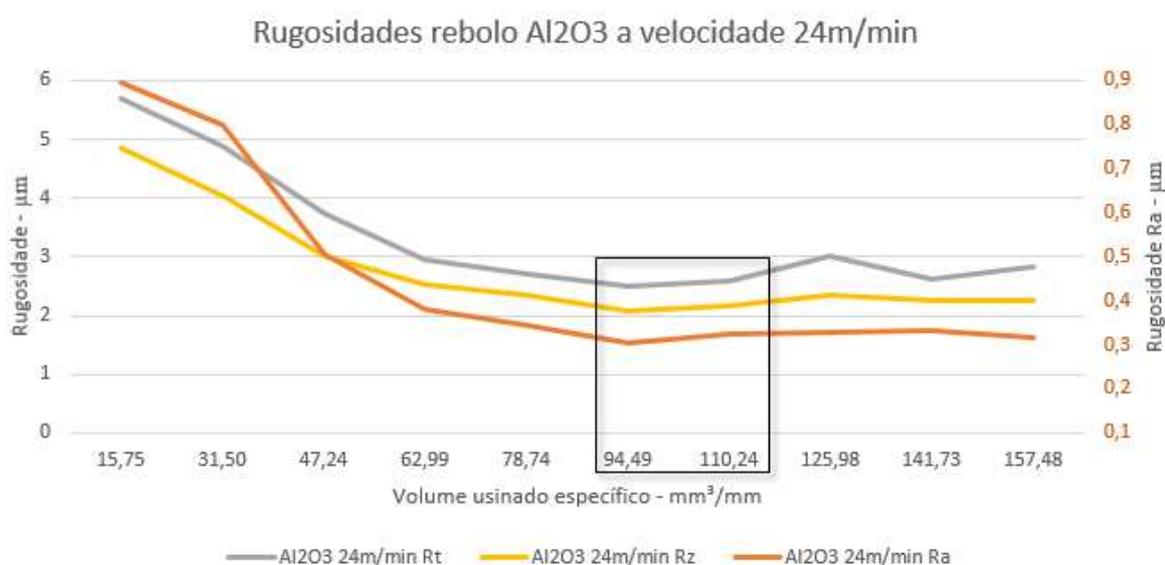
Com a utilização do rebolo de Al_2O_3 , as curvas dos gráficos de rugosidade se comportaram de forma semelhante nas duas situações, com curvas descendentes. As médias das rugosidades foram melhores para a retificação realizada com a velocidade de 12 m/min como visto nos gráficos.

Na retificação com velocidade de 12m/min foi observado o aparecimento de pontos de queima na peça ao se completar o ciclo de 125,98 mm^3/mm de volume específico usinado. A área destacada no gráfico indica que este início da queima ocorreu entre os ciclos de 110,24 mm^3/mm e 125,98 mm^3/mm de volume específico usinado.

Na retificação com velocidade de 24m/min, semelhante ao ocorrido com a velocidade de 12m/min, observou-se o aparecimento de pequenos pontos de queima na peça após o término do ciclo de 110,24 mm^3/mm de volume específico usinado. A

área destacada no gráfico informa a região onde houve o aparecimento dos pontos de queima, entre os ciclos de 94,49mm³/mm e 110,24mm³/mm de volume específico usinado.

Figura 26 - Rugosidades obtidas após retificação com rebolo Al₂O₃ à uma vel.de 24m/min



Fonte: O autor (2016)

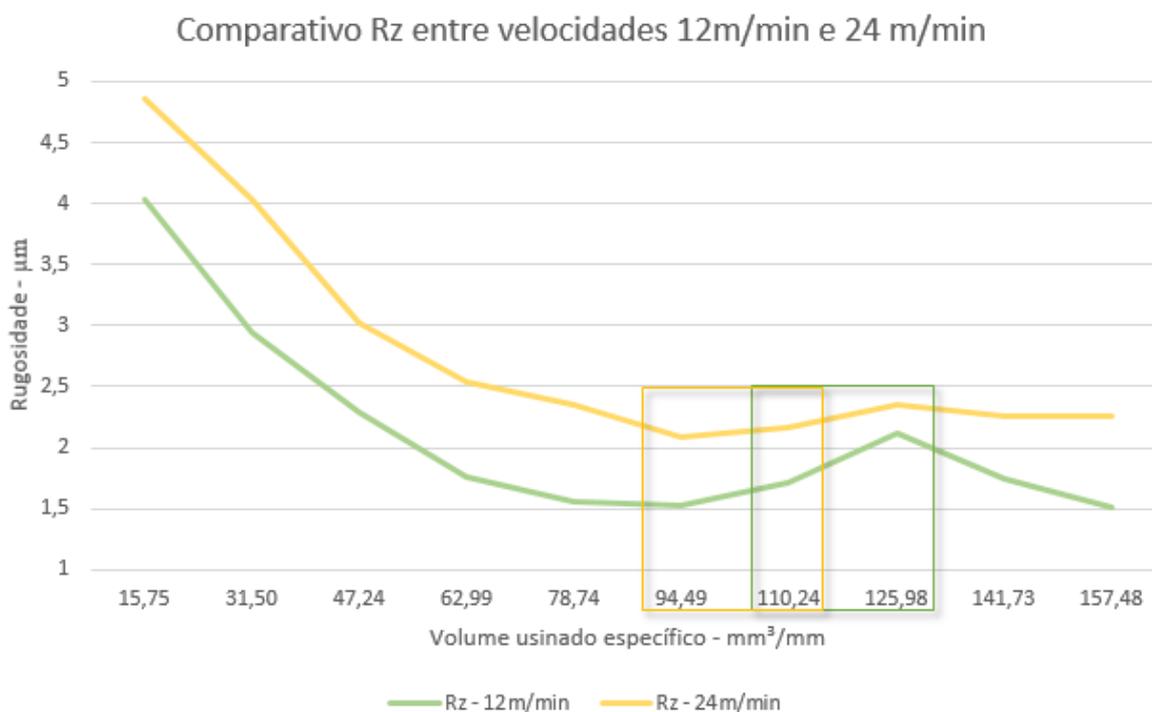
Comparativamente podemos visualizar na Figura 27, os resultados das rugosidades R_z nas duas condições de velocidade, onde temos curvas com formatos semelhantes e o comportamento da rugosidade seguiu um padrão de queda até a área onde houve a percepção do aparecimento de queima na superfície. Nesta área houve um leve crescimento do valor da rugosidade. As medições registradas após esta área mostraram uma razoável redução de rugosidade apesar de serem visíveis os pontos de queima.

No aspecto volume usinado, os dados coletados indicam que uma maior produtividade de retificação pode ser conseguida ao se utilizar a velocidade da mesa de 12m/min. Com esta velocidade a capacidade de remoção de cavaco do rebolo permanece até os 110,24mm³/mm de volume específico usinado sem que ocorra queima superficial e haja a necessidade de dressagem do rebolo. Esta diferença de volume usinado representa cerca de 14,28% a mais de volume removido de cavaco na velocidade de 12m/min, contudo esta vantagem aparente de produtividade pode desaparecer ao se analisar o tempo gasto de retificação. Neste ponto, teremos cerca de 55% a mais de tempo de retificação ao se retificar em uma velocidade de 12m/min,

o que pode não justificar o ganho em volume usinado. Já sobre o ponto de vista acabamento superficial, ao se comparar os resultados obtidos nos dois ensaios, a retificação executada em velocidade da mesa de 12m/min se portou com um desempenho pouco melhor entre 78,74mm³/mm e 94,49mm³/mm de volume específico retificado, lembrando que nos testes efetuados o limite de retificação a 12m/min sem que haja marcas de queima na peça ficaram em 110,24mm³/mm o que nos daria uma peça livre de danos superficiais e com uma rugosidade R_a de 0,22μm.

Os dados coletados ao realizar o experimento com o rebolo de Óxido de Alumínio indica que se a velocidade da peça é menor, os esforços sobre os grãos serão menores, e a vida do rebolo aumenta, conforme Diniz, Marcondes e Coppini (1999, p.238), e para um melhor acabamento superficial, usa-se uma alta velocidade do rebolo e baixa velocidade da peça, segundo Groover (2014).

Figura 27 - Comparativo de rugosidade Rz entre as velocidades de 12m/min e 24m/min



Fonte: O autor (2016)

Um dado comum a se observar em todos os resultados obtidos é a recorrência do aumento da rugosidade em conjunto ao aparecimento de queima da peça e posterior melhora das medições de rugosidade. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (1999, p.240), o rebolo pode sofrer desgaste sem perder a afiação e vice-versa.

Durante o processo de retificação o grão sofre atrito e pode se fraturar e depois se desprender do rebolo causando desgaste, ou ter suas arestas arredondadas com conseqüente perda de afiação. Se entendermos os resultados como uma perda de afiação do rebolo, o que vemos é um aumento dos esforços de corte sem a renovação dos grãos desgastados, conseqüentemente a queima da peça é inevitável.

A melhora das medições de rugosidade na verdade não estaria associada a renovação dos grãos abrasivos. Com a incapacidade de remover material, estaria havendo um esmagamento de material resultando em baixa rugosidade, porém com sucessivas queimas superficiais, este fenômeno foi encontrado também em estudo realizado por Carlini (2015).

4.4 Análise superficial das amostras

Comparativamente a outros processos de usinagem que utilizam ferramentas com geometria definida, o calor gerado por estes processos em sua maioria é dissipado com o cavaco. Em um processo de retificação o calor permanece na peça usinada resultando em temperaturas elevadas em sua superfície, e podem acarretar efeitos nocivos como queimas superficiais e trincas.

A queima superficial da peça influencia na alteração da microestrutura do material podendo resultar em casos mais extremos no aparecimento de micro trincas superficiais, além disso com o aparecimento dos primeiros sinais de queima superficial é bem provável que surjam pontos de adesão de partículas metálicas nos grãos abrasivos do rebolo conseqüentemente aumentará as forças de retificação e haverá uma deterioração da qualidade superficial da peça.

Ao se analisar os gráficos com os resultados obtidos nos ensaios, o que vemos são regiões onde a rugosidade tem um leve aumento, que coincidem com a região de aparecimento das queimas superficiais. Em uma produção, o limite volumétrico de remoção de material estaria um pouco abaixo deste ponto a partir da qual deveria ocorrer o dressamento antes de prosseguir com os trabalhos. Mas em nossos ensaios os limites se estenderam além desta região, e o que se notou foi um aumento considerável dos pontos de queima do material superficial.

As figuras a seguir nos mostram os danos ocorridos na superfície do material após a retificação de 157,48mm³/mm de volume específico removido.

A figura 28, mostra claramente os pontos de queima superficial em superfície

usinada com rebolo de Óxido de Alumínio a uma velocidade da peça de 12m/min.

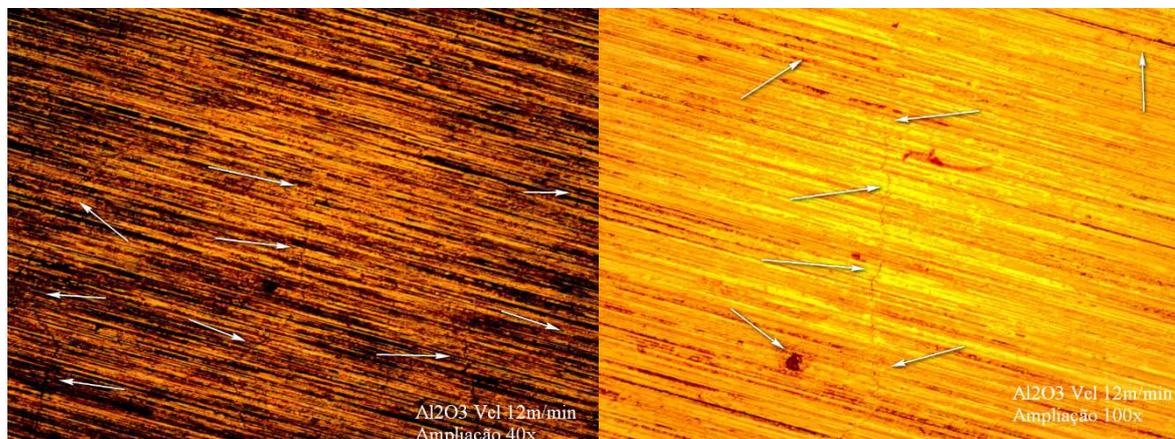
Figura 28 - Superfície com pontos de queima ocorridos após a remoção de 157,48mm³/mm de volume específico(V'w), utilizando o rebolo de Al₂O₃ à velocidade da peça de 12m/min



Fonte: O autor (2016)

A mesma superfície quando ampliada em microscópio podemos detectar facilmente micro trincas superficiais ocorridas durante o processo de retificação. Nota-se que a propagação das micro trincas ocorre no sentido perpendicular a retificação.

Figura 29 - Imagem ampliada 40x e 100x, superfície retificada com rebolo Al₂O₃ à velocidade de 12m/min



Fonte: O autor (2016)

A superfície da mesma peça foi atacada com líquido penetrante e após a sua revelação a imagem nos mostra a gravidade do dano ocorrido devido ao aquecimento sofrido. O que vemos é uma superfície tomada de micro trincas, conforme a figura 30.

Figura 30 - Imagem após a revelação através da aplicação de líquido penetrante na superfície usinada. Retificação com rebolo de Al_2O_3 à velocidade da peça de 12m/min



Fonte: O autor (2016)

Da mesma forma a Figura 31, mostra a superfície com marcas de micro trincas quando uma peça foi retificada com o rebolo de Óxido de Alumínio a velocidade de 24m/min. Nesta velocidade observa-se na imagem ampliada 100x, trincas mais definidas e com ramificações mais visíveis quando comparadas a imagem ampliada 100 x da retificação realizada com velocidade de 12m/min. Constatando que com o aumento da velocidade de avanço há o aumento das forças de corte e elevação da temperatura de retificação, resultando em maiores danos superficiais.

Figura 31 - Imagem ampliada 40x e 100x, superfície retificada com rebolo Al₂O₃ à velocidade de 24m/min



Fonte: O autor (2016)

A Figura 32 mostra a superfície da peça retificada com rebolo de Carboneto de Silício a uma velocidade da peça de 12m/min após retificação de volume específico usinado de 94,49mm³/mm. Nota-se uma leve oxidação em alguns pontos na borda da superfície indicando que houve um início de queima superficial. Embora haja pequenos e isolados pontos de queima, ao se ampliar a imagem podemos detectar o aparecimento de pequenos pontos de danos superficiais. A figura 33, é a visão ampliada 40x e 400x em microscópio indicando um início do aparecimento de trincas. Diferentemente dos danos superficiais encontrados nas superfícies onde o volume específico removido chegou a 157,48mm³/mm, as micro trincas nesta peça possuem tamanhos muito inferiores aos das demais, não possuindo continuidade pela superfície, sendo possível deduzir que as micro trincas tem seu início de formação juntamente com o aparecimento dos primeiros sinais de queima superficial, e com o agravamento das queimas superficiais haverá um prolongamento e expansão das trincas por toda a superfície. Nota-se que foi necessária a ampliação da imagem em 400x para que as micro trincas fossem notadas, ao contrário das demais imagens.

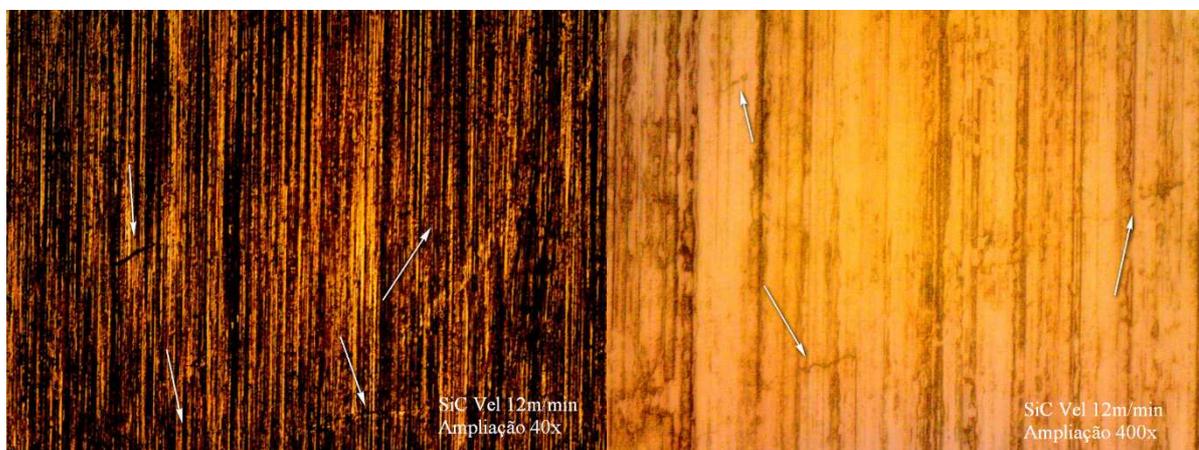
A figura 34, são ampliações de amostras que foram retificadas com velocidade de 24m/min, até o volume específico de 157,48mm³/mm de material removido, onde a superfície sofreu queima por retificação. Notamos na imagem ampliada além de micro trincas superficiais, a presença de poros ao longo da superfície.

Figura 32 - Fotografia de uma peça retificada com rebolo SiC à velocidade de 12m/min



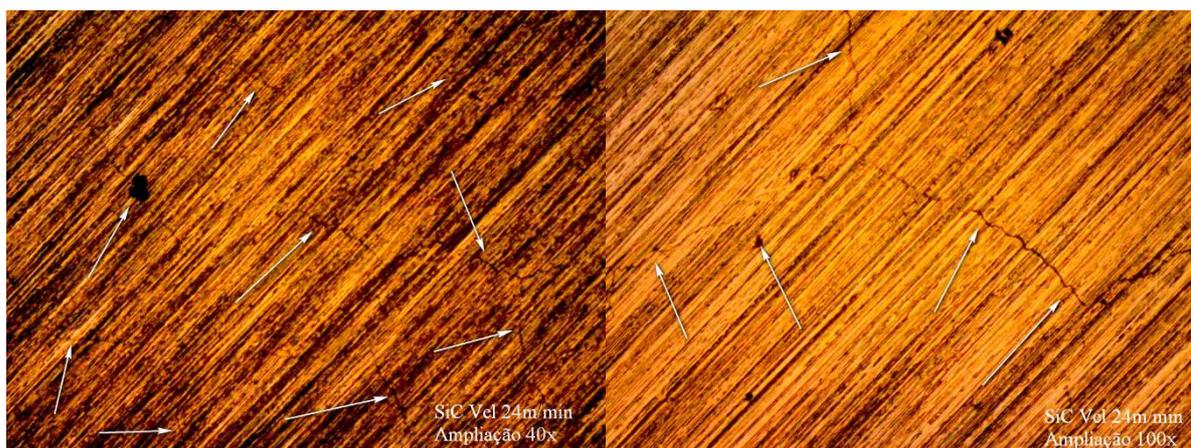
Fonte: O autor (2016)

Figura 33 - Imagem ampliada 40x e 400x, superfície retificada com rebolo SiC à velocidade de 12m/min



Fonte: O autor (2016)

Figura 34 - Imagem ampliada 40x e 100x, superfície retificada com rebolo SiC à velocidade de 24m/min

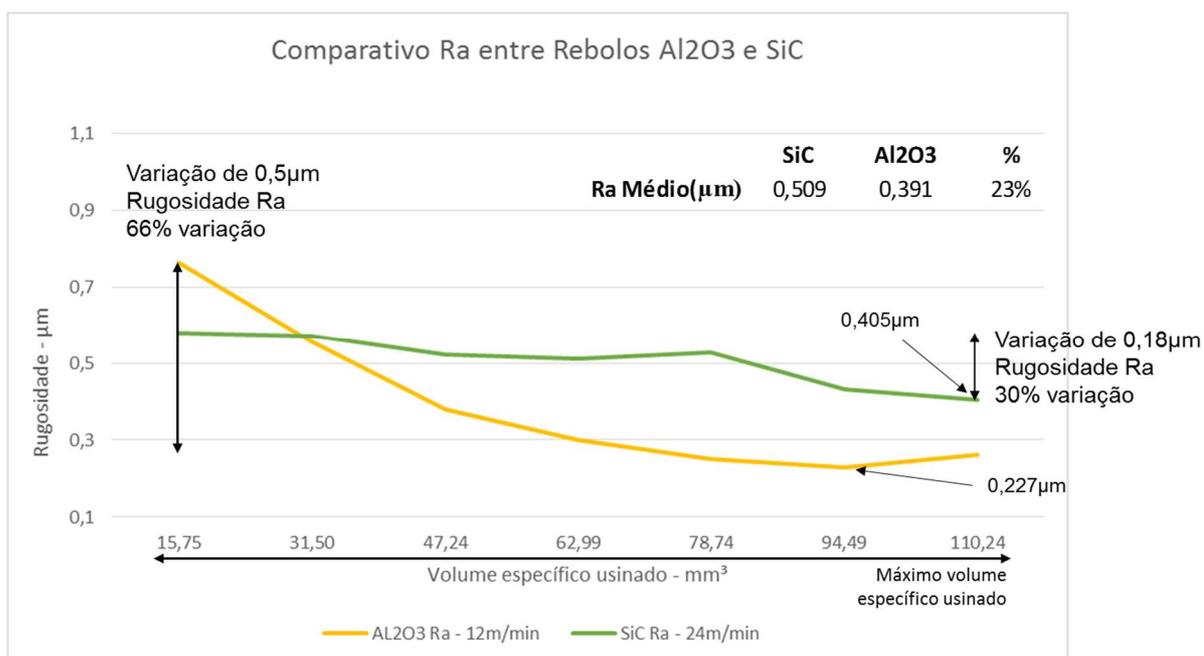


Fonte: O autor (2016)

4.5 Comparação de resultados

A Figura 35 mostra uma comparação entre os resultados de rugosidade R_a , produtividade e variação das medições obtidas com os rebolos de Óxido de Alumínio e Carboneto de Silício, retificando com velocidades da peça de 12m/min e 24m/min respectivamente.

Figura 35 - Comparativo entre os melhores resultados obtidos entre os rebolos Al_2O_3 e SiC



Fonte: O autor (2017)

Analisando os melhores resultados entre os dois rebolos no intervalo considerado produtivo, podemos verificar que a capacidade de remoção de material entre dressamentos foi o mesmo para os dois rebolos, $110,24\text{mm}^3/\text{mm}$ de volume específico. Após este volume poderá ocorrer o aparecimento de queimas superficiais.

Comparando-se as rugosidades obtidas, podemos verificar que a retificação efetuada com o rebolo de Carboneto de Silício na velocidade da peça de $24\text{m}/\text{min}$, se comportou mais estavelmente em suas medições de rugosidade. Enquanto a variação da rugosidade em números absolutos, com a utilização do rebolo de Carboneto de Silício foi de $0,18\ \mu\text{m}$, variando de $0,58\ \mu\text{m}$ a $0,40\ \mu\text{m}$, o que representa em 30% de variação.

A variação da rugosidade com a utilização do rebolo de Óxido de Alumínio na velocidade da peça de $12\text{m}/\text{min}$ foi de $0,76\ \mu\text{m}$ a $0,26\ \mu\text{m}$, resultando em uma variação total de $0,5\ \mu\text{m}$ ao longo do intervalo produtivo do rebolo, o que representa 66% de variação total.

Ao analisar as rugosidades R_a ao longo das medições, verificamos que a média alcançada pelo rebolo de Óxido de Alumínio ficou cerca de 23% menor que as rugosidades média do Carboneto de Silício ao longo das medições, confirmando que ao se utilizar menores velocidades da peça se obtém melhores acabamentos superficiais.

Como determinação das variáveis para o processo de retificação com os rebolos de Óxido de Alumínio branco e Carboneto de Silício verde, os resultados sugerem os seguintes parâmetros a serem utilizados conforme ilustrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de retificação entre rebolos de SiC e Al_2O_3

| $a_p = 0,03\text{mm}$ | Rebolo Al_2O_3 | | Rebolo SiC | |
|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| | <i>12m/min</i> | <i>24m/min</i> | <i>12m/min</i> | <i>24m/min</i> |
| Vel. Peça v_f | <i>12m/min</i> | <i>24m/min</i> | <i>12m/min</i> | <i>24m/min</i> |
| Volume máximo V_w | 2800mm^3 | 2400mm^3 | 2000mm^3 | 2800mm^3 |
| Volume específico máximo V'_w | $110,23\text{mm}^3/\text{mm}$ | $94,48\text{mm}^3/\text{mm}$ | $78,74\text{mm}^3/\text{mm}$ | $110,23\text{mm}^3/\text{mm}$ |
| Varição de Rugosidade R_a | $0,76 - 0,263\ \mu\text{m}$ | $0,89 - 0,30\ \mu\text{m}$ | $1,18 - 0,527\ \mu\text{m}$ | $0,58 - 0,405\ \mu\text{m}$ |

Fonte: O autor (2016)

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo do comportamento da retificação realizada com dois rebolos convencionais compostos de Óxido de Alumínio e Carboneto de Silício, em processo de usinagem em amostra de aço ABNT D6 temperado.

Em todos os ensaios foi constatada a ocorrência de queimas superficiais decorrentes do aquecimento da peça. O conhecimento do momento em que isto ocorre permite calcular o máximo volume usinado para os parâmetros de entrada selecionados sem que haja danos superficiais decorrentes do aquecimento.

O volume máximo permitido para estas condições leva em consideração a etapa anterior a detecção de ocorrência da queima, em termos volumétricos houve uma igualdade de volumes removidos entre os rebolos de Óxido de Alumínio a 12m/min e o Carboneto de Silício a 24m/min, 110,23mm³/mm.

Ao se analisar os resultados de rugosidade com a profundidade de corte de 0,03mm, verifica-se uma vantagem alcançada com o rebole de Óxido de Alumínio, quando comparados os resultados individuais entre os dois rebolos a cada intervalo de volume usinado.

Sobre esta análise, a rugosidade média alcançada pelo rebole de Óxido de Alumínio ficou cerca de 23% menor que a rugosidade média do Carboneto de Silício, confirmando que ao se utilizar menores velocidades da peça se obtém melhores acabamentos superficiais.

Sobre a análise da consistência de acabamento, o rebole de Carboneto de Silício obteve maiores durabilidade do corte com regularidade nas medições de rugosidade durante todo o ensaio, até o limite máximo definido pela queima da superfície, variando em 30% os valores medidos de rugosidade, enquanto o rebole de Óxido de Alumínio obteve uma variação de 66% em sua rugosidade.

A baixa variação dos valores de rugosidade é vantajosa na retificação de superfícies com maiores áreas, pois a rugosidade resultante apresentará baixa dispersão em pontos distintos da superfície. Isto corresponde a retificar uma superfície de 305,00mm x 305,00mm (93025,00 mm²) a uma profundidade de corte de 0,03mm.

O rebole de Carboneto de Silício Verde se portou mais estável em todas as medições realizadas. O rebole de Óxido de Alumínio branco obteve uma melhor rugosidade média durante as medições.

Assim, caso a finalidade seja uma maior estabilidade de acabamento com maior produtividade o rebolo de Carboneto de Silício seria o mais indicado, caso o objetivo fosse obter um melhor acabamento, o rebolo de Óxido de Alumínio será mais adequado.

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros:

- Retificar uma área superficial mais ampla com rebolo de Carboneto de Silício a profundidade de corte de 0,03mm com velocidade da peça a 24m/min de modo a verificar a estabilidade de rugosidade obtida neste trabalho.
- Estudar outros sistemas de aplicação de fluido de corte, a fim de aumentar o Intervalo entre dressamentos.
- Realizar novos estudos empregando os equipamentos desenvolvidos, alterando os valores da profundidade de corte.

REFERÊNCIAS

BERTALAN, Cláudio. **Retificação com Rebolos de Nitreto de Boro Cúbico em Máquinas-Ferramenta Convencionais**. 1997. 238 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/77209>>. Acesso em: 12 maio 2016.

CALLISTER JUNIOR, William D; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia dos Materiais uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Gen | Ltc, 2008. 705 p. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares.

DAMASCENO, Ricardo Fernando. **Análise da Influência da Profundidade de Corte e de Diferentes Métodos de Lubri-refrigeração na Retificação Plana de Aço ABNT 4340**. 2010. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Bauru, 2010. Disponível em: <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bba/33004056080P8/2010/damasceno_rf_me_bauru.pdf>. Acesso em: 12 maio 2016.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Mm Editora, 1999. 242 p.

GROOVER, Mikell P.. **Introdução aos Processos de Fabricação**. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Ltda, 2014. 737 p. Tradução Anna Carla Araújo.

GUIMARÃES, Vagner Alves. **Controle Dimensional e Geométrico: Uma Introdução à Metrologia Industrial**. Passo Fundo: Edupf, 1999. 161 p.

<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/19447-Abrasivos-Navatec-S-L-una-empresa-joven-respaldada-con-56-anos-de-experiencia.html>

<http://www.mellfaber.com.br/uploads/Catalogos/635036079413169150.pdf>
acesso 15/01/2017

<https://chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem-Aula32-p.247-256.pdf>, acessado em 18/01/2017

JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kurt M.. **Fundamentos do projeto de Componentes de Máquina**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 503 p. Tradução de: Fernando Ribeiro da Silva, D.Sc..

KHENAIRES, Maurício. **Investigação de Novas Ferramentas estatísticas e Utilização de Microcontrolador no Monitoramento da queima na Retificação Plana Tangencial**. 2006. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Bauru, 2006. Disponível em: <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bba/33004056080P8/2006/khenaif_es_m_me_bauru.pdf>. Acesso em: 20 maio 2016.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria não definida**. Florianópolis: Weingaertner, 2002.

KOPROWSKI, Stefan. **Estudo da Cinemática da Retificação Auxiliada por Oscilação**. 2013. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: <<http://tede.ufsc.br/teses/PEMC1434-D.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2016.

KRABACHER, E.J. **Factors Influencing the Performance of Grinding Whells**. Transactions ASME, Series B, Vol 81, Nº 3, 1959

NUSSBAUM, Guillaume Ch.. **Rebolos e Abrasivos**. São Paulo: Ícone Editora Ltda, 1988. 503 p. 3 v.

PRINCÍPIOS de Retificação e Afiação na Indústria metal-mecânica. São Paulo: Mello, 2011. 323 p.

SOUSA, Gabriel Costa. **Desgaste Radial de Rebolos de CBN com Aplicação de Lubrificante por Tubeira Tipo Sapata**. 2012. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

TABORGA, Alex Roberto Morales. **Análise e Monitoramento da Retificação do Ferro Fundido Nodular com Rebolos Convencionais**. 2002. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.