

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

FABIO BONGOSKI

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA QUALIDADE DE USINAGEM PARA VALIDAR A
AUTOMAÇÃO DO EIXO TRANSVERSAL DE UMA RETÍFICA PLANA MECÂNICA**

CAXIAS DO SUL

2021

FABIO BONGOSKI

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA QUALIDADE DE USINAGEM PARA VALIDAR A
AUTOMAÇÃO DO EIXO TRANSVERSAL DE UMA RETÍFICA PLANA MECÂNICA**

Trabalho de conclusão de curso,
apresentado à Universidade de Caxias do
Sul como requisito para a obtenção do
grau de Engenharia Mecânica.

Orientador Prof.: Me. Vagner Grison.

CAXIAS DO SUL

2021

FABIO BONGOSKI

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA QUALIDADE DE USINAGEM PARA VALIDAR A AUTOMAÇÃO DO EIXO TRANSVERSAL DE UMA RETÍFICA PLANA MECÂNICA

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito para a obtenção do grau de Engenharia Mecânica.

Orientador Prof.: Me. Vagner Grison

Aprovado (a) em ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof. Me. Vagner Grison
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. Rafael Dallegrave Conrado
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Me. Elton Fabro
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

A usinagem por retificação é implantada dentro do quesito industrial quando se busca alcançar pequenas tolerâncias, precisão geométrica e qualidade superficial. Por ser um processo com diversas variáveis envolvidas, conhecê-las é imprescindível para atingir os resultados desejados. Quando a máquina apresenta condições de acionamento dos eixos manuais, as variáveis ficam acondicionadas ao operador, dificultando o controle do processo. Dessa forma, a automação reduz os riscos de danos causados a peça, durante o processo, devido a retirada de parâmetros do escopo do operador. Com o objetivo de avaliar se a automação do eixo transversal de uma retífica plana é válida, foi avaliada a velocidade imposta por quatro operadores diferentes, de forma manual e posteriormente a automação. Foram feitas análises da velocidade V_w , das características de rugosidade, e da queima por retificação, antes e depois da automação. A usinagem foi realizada em onze corpos de prova com duas faces cada, confeccionados em aço forjado à quente, tratados termicamente para alcançar uma dureza superficial mínima de 60 HRC. Doze faces foram usinadas antes da automação para obter os dados das condições iniciais, em que as velocidades de avanço são impostas por quatro operadores diferentes. Outras nove faces, foram divididas em três usinagens posteriores a automação, porém, com as velocidades de avanço mais próximas possível da nominal de 12 m/min. Após o término da comparação entre as velocidades, foi demonstrado como a automação lineariza o parâmetro da velocidade V_w , e assim, foi realizada a coleta dos dados de rugosidade R_a , R_z e R_t e a avaliação da camada superficial em busca de queima e trincas decorrentes do processo de retificação. Realizou-se mais um experimento para observar como os fatores de acabamento superficial foram afetados com a usinagem de 2700 mm³, e 5400 mm³ antes de dresser o rebolo. Assim, o trabalho demonstra que o controle da velocidade V_w através da automação melhora os requisitos avaliados e apresenta o volume máximo de material usinado antes de dresser o rebolo para que a rugosidade R_a apresente a tendência em ficar abaixo do valor estipulado em projeto. Durante a usinagem, os demais parâmetros de máquina permaneceram constantes, sendo: o rebolo utilizado Al₂O₃, a velocidade do rebolo 20 m/s, penetração de trabalho 15 µm, e por fim, o fluido de corte Ultracut 360 em concentração de 1,5%.

Palavras Chave: Retífica. Usinagem. Avanço. Rugosidade.

ABSTRACT

Grinding Machining is implemented in the industrial field when looking for reaching small tolerances, geometric precision, and superficial quality. Since this is a process with many variables involved, knowing them is essential to achieve the aimed result. When the machine has operating conditions for the manual axes, the variables are conditioned to the operator, making it more difficult to control the process. This way, automation reduces damage risks caused to the piece during the process due to the parameter removal from the operator's scope. To evaluate whether the automation of the cross shaft of a flat grinder is valid, the speed imposed by four different operators was evaluated, manually and later through automation. Analyses of V_w , speed, roughness characteristics, and grinding burn were performed before and after automation. The machining was performed on eleven test pieces with two faces each, made of hot forged steel, heat-treated to achieve a minimum surface hardness of 60 HR_c. Twelve faces were machined before automation to obtain data from the initial conditions, where feed rates are imposed by four different operators. Another nine faces were divided into three machining operations after automation, but with feed rates as close as possible to the nominal 12 m/min. After the end of the comparison between the speeds, it was demonstrated how the automation linearizes the speed parameter V_w , and so, the roughness data R_a , R_z , and R_t were collected and the surface layer was evaluated for burning and cracks resulting from the grinding process. A further experiment was performed to observe how the surface finish factors were affected with machining 2700 mm³, and 5400 mm³ before dressing the wheel. Thus, the work demonstrates that the control the speed parameter V_w through automation improves the evaluated requirements by presenting the maximum volume of machined material before dressing the grinding wheel so that the roughness R_a tends to be below the value stipulated in the Project. During machining the other machine parameters remained constant, being: the grinding wheel used Al₂O₃, the grinding wheel speed 20 m/s, working penetration 15 μm, and finally, the cutting fluid Ultracut 360 at a concentration of 1.5%.

Keywords: Grinding. Machining. Feed. Roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Contato entre o rebolo e a peça.....	13
Figura 2 – Parâmetro de média da amplitude, desvio da média aritmética Ra.	15
Figura 3 - Parâmetros de amplitude, altura máxima Rz.	15
Figura 4 - Parâmetros de amplitude, altura total Rt.....	16
Figura 5 - Rugosidade superficial em relação à velocidade de avanço.....	18
Figura 6 - Comparação das rugosidades com rebolo SiC e avanço 12 m/min.....	19
Figura 7 - Comparação das rugosidades com rebolo SiC e avanço 24 m/min.....	19
Figura 8 - Comparação das rugosidades com rebolo Al ₂ O ₃ e avanço 12 m/min.....	20
Figura 9 - Comparação das rugosidades com rebolo Al ₂ O ₃ e avanço 24 m/min.....	20
Figura 10 - Comparativo de rugosidade Ra em ferros fundidos.....	21
Figura 11 - Gráficos da T °C em relação a v_w . <i>ap</i> , com fluido lubri-refrigerante.....	23
Figura 12 - Usinagem com avanço de 12 m/mim e ampliações de 40x 100x.	24
Figura 13 - Superfície, avanço de 24 m/mim e ampliações de 40x 100x.	25
Figura 14 - Usinada com avanço de 12 m/mim e ampliações de 40x 400x.	25
Figura 15 - Superfície, avanço de 24 m/mim e ampliações de 40x 400x.	26
Figura 16 - Temperatura de retificação em relação ao t e x na usinagem.	26
Figura 17 - Cilindro bruto e corpos de prova finalizados.	30
Figura 18 - Fluxograma das etapas.....	30
Figura 19 - Representação das camadas usinadas pelos diferentes Grupos.	31
Figura 20 - Sentido da usinagem e posicionamento dos corpos de prova.	32
Figura 21 - Alinhamento e posicionamento da câmera durante a análise.....	33
Figura 22 - Posição do rugosímetro durante a análise de rugosidade.	34
Figura 23 - Tamanho útil da mesa porta peças.	35
Figura 24 - Posição dos corpos de prova.....	36
Figura 25 - Etapas do teste de líquido penetrante.....	36
Figura 26 - Gráfico das velocidades V_w concordante durante as usinagens.....	39
Figura 27 - Gráfico das velocidades V_w discordante durante as usinagens.....	39
Figura 28 - Valores de rugosidade Ra.....	40
Figura 29 - Valores de rugosidade Rz.	41
Figura 30 - Valores de rugosidade Rt.....	42
Figura 31 - Perfil da rugosidade no processo manual.	43
Figura 32 - Perfil da rugosidade no processo automático.	43
Figura 33 - Perfil da rugosidade do Operador 01.	44
Figura 34 - Faces do corpo de prova (ampliação 180x).	44
Figura 35 - Rugosidades Ra, Rz, e Rt, em três volumes usinados.	45
Figura 36 - Valor usinado estipulado para rugosidade Ra de 0,8 µm.	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados do processo de retificação.	11
Quadro 2 - Valores orientativos da velocidade da mesa para diferentes materiais...17	17
Quadro 3 - Especificações da máquina de acordo com o fabricante.	29
Quadro 4 - Grupos dos experimentos e seus parâmetros.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo das velocidades de corte.	18
Tabela 2 - Parâmetros de retificação sugeridos.	21
Tabela 3 - Valores de rugosidade para diferentes tipos de fluidos de corte.	22
Tabela 4 - Valores de temperatura máxima e mínima encontrada.	24
Tabela 5 - Dados da velocidade da mesa Vw.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a_e	Penetração de Trabalho
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
D70	Fluído Revelado
FFC	Ferro Fundido Cinzento
FFN	Ferro Fundido Nodular
FFV	Ferro Fundido Vermicular
HR _c	Dureza Rockwell
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
lc	Comprimento de Contato Entre o Rebolo e a Peça
lub.	Lubrificação
m	Metro
mm	Milímetro
mm ³	Milímetros Cúbicos
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificação
MQL+G	Mínima Quantidade de Lubrificação + Grafeno
m/min	Metro por Minuto
m/s	Metro por Segundo
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
R _a	Desvio Médio Aritmético da Rugosidade
RPM	Rotações por Minuto
R _t	Rugosidade Efetiva
R _z	Profundidade Média da Rugosidade
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SiC	Silicato de Silício
T	Temperatura
Vol.	Volume
VP30	Líquido Penetrante
V _s	Velocidade do Rebolo
V _w	Velocidade da Peça
μm	Micro Metro
°C	Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	TEMA	11
1.2	JUSTIFICATIVA	11
1.3	OBJETIVO GERAL	12
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	13
2.2	RUGOSIDADE E ATRITO.....	14
2.2.1	Velocidade de avanço e sua influência na rugosidade.....	17
2.3	SUPERAQUECIMENTO NA RETIFICAÇÃO	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	RETÍFICA PLANA MECÂNICA	28
3.2	CORPO DE PROVA.....	29
3.3	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	30
3.3.1	Aquisição de dados processo atual	32
3.3.2	Aquisição de dados após a automação	34
3.4	ANÁLISE DO ACABAMENTO SUPERFICIAL QUEIMA	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	ANÁLISE DAS VELOCIDADES DA MESA	38
4.2	ANÁLISE DAS VELOCIDADES DURANTE AS USINAGENS	38
4.3	ANÁLISE DAS RUGOSIDADES	40
4.4	ANÁLISE DA QUEIMA POR RETIFICAÇÃO	44

5	CONCLUSÃO	47
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
	APÊNDICE A – Gráfico de velocidades no software TRAKER.....	51
	ANEXO A – Recorte do certificado de tratamento térmico	52
	ANEXO B – Instruções para o teste de líquido penetrante.	53

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial desde o seu início, até os dias atuais, evolui constantemente. Este, vem sofrendo várias modificações inerentes à chegada cada vez mais rápida da tecnologia, a qual agrega valor e competitividade nos setores da produção mundial.

Atualmente, os processos de automação são mais importantes do que jamais foram. No passado, a manufatura representava os métodos artesanais com simplicidade, quando comparada aos meios modernos. À medida que a força dos trabalhadores foi sendo empregada em um mesmo espaço, essas técnicas deram espaço às máquinas; e com isso, os processos se tornaram complexos, dando ênfase também à especialização dos trabalhadores em determinada tarefa. Percebe-se assim, a relevância dos processos industriais de automação, imprescindíveis na atualidade (GROOVER, 2011).

A empresa na qual este trabalho foi desempenhado, atua no segmento metalmeccânico, utilizando para confecção de seus produtos, os processos de transformação de metais e ligas metálicas, os quais ocorrem através da utilização de conjuntos mecânicos. São eles: os processos de usinagem, fresamento, retífica, entre outros. Assim sendo, manter esses conjuntos atualizados, torna capaz de garantir a produtividade e a qualidade dos seus produtos.

Durante a produção, têm-se a necessidade de facear as bielas pelo processo de retífica. O equipamento utilizado é um gargalo produtivo devido a sua característica mecânica manual, onde o operador se responsabiliza pelo acionamento de todos os eixos enquanto o processo de retirada de material acontece. Isso resulta no acabamento superficial, condicionado a influência do operador, através da velocidade do avanço imposta. Assim, a empresa optou por realizar a automação pneumática do eixo transversal da máquina, para obter um avanço da mesa porta peças constante.

Uma das maneiras de agregar qualidade às peças produzidas, é a utilização da engenharia juntamente com a automação. Para isso, realiza-se o estudo sobre as características da máquina, visando validar a automação do eixo transversal do equipamento. Considerando o avanço e sua influência na rugosidade e na queima decorrente da retificação.

De acordo com Nussbaum (1988) há a necessidade de conhecer integralmente o processo de retificação para obtenção de resultados adequados, devido a quantidade de variáveis existentes. Com o auxílio da automação, as variáveis impostas pelo processo de usinagem por abrasão, podem ser aplicadas em um controle de dados com parâmetros de entrada e saída. Conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Dados do processo de retificação.

Entrada	Saída
Material (características mecânicas)	Esforços de retífica (normais e tangenciais)
Rebolo (características abrasivo/liga)	Vol. removido / Vol. gasto peça
Parâmetros de dressagem	Qualidade superficial da peça
Fluído refrigerante (características pH, concentração)	Micro trincas e tensões
Parâmetros da máquina (velocidade, passe...)	Rugosidade e precisão dimensional

Fonte: Nussbaum (1988).

Com a validação da automatização aplicada no eixo transversal da retificadora, espera-se avaliar a qualidade da usinagem e a constante de velocidade da mesa porta peça. Com isso, alcançar requisitos de rugosidade mais baixos na superfície usinada, indicando assim, uma melhora do acabamento superficial das peças.

1.1 TEMA

O trabalho desenvolvido aborda temas relacionados à engenharia mecânica, envolvendo a validação da automação pneumática do eixo transversal de uma retífica plana mecânica. Aborda também temas relacionados à processos de usinagem, a fim de avaliar o acabamento superficial das peças retificadas.

1.2 JUSTIFICATIVA

A justificativa do presente trabalho, decorre da necessidade de melhorar a qualidade de peças produzidas em uma retífica plana mecânica. O processo em questão, é utilizado para facear as bielas fabricadas em uma empresa do setor metal mecânico. A finalidade é validar a automação do eixo transversal verificando se a

rugosidade R_a , R_z , R_t e os requisitos de queima por retificação, melhoraram após a automação e se a rugosidade R_a estipulada em projeto com classe N6 são atendidos. Visa-se também, com esse trabalho, observar se a redução da interferência do operador nos parâmetros de usinagem por retificação melhora as características de qualidade, como: menores rugosidades, e eliminação de manchas e trincas superficiais, decorrentes do superaquecimento da peça.

O propósito é empregar tecnologias já concretizadas no âmbito da engenharia, para avaliar de forma adequada a implementação da automação pneumática. Assim como, comparar a qualidade da usinagem antes e depois da implementação da automação pneumática, definindo os parâmetros de usinagem para o processo de retificação.

1.3 OBJETIVO GERAL

Validar a automação pneumática do eixo transversal em uma retífica plana mecânica comparando a qualidade de usinagem.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

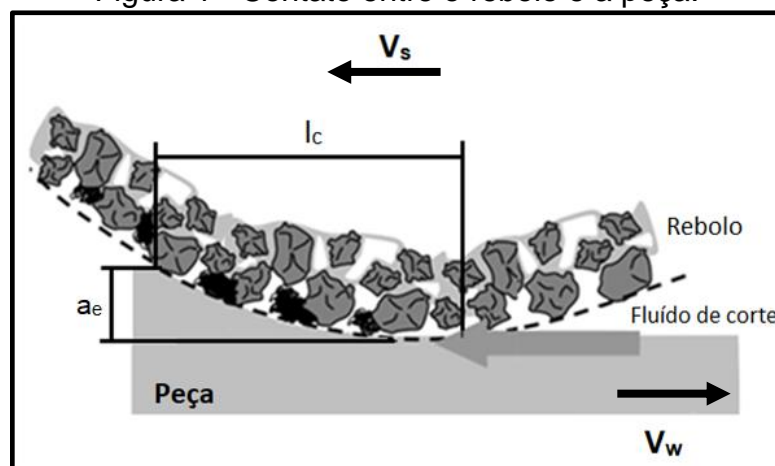
- a) Caracterizar os sistemas que compõem a retífica plana mecânica.
- b) Determinar requisitos operacionais relativos ao avanço no processo de retificação.
- c) Avaliar comparativamente os resultados baseados na rugosidade.
- d) Avaliar comparativamente os resultados baseados na queima por retificação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

A retificação ganhou força na indústria a partir do ano de 1860, com a utilização de máquinas retificadoras. Esse processo, recebe destaque dentro dos recursos de usinagem por abrasão, pois apresenta grande importância na área metalmeccânica, sendo capaz de alcançar tolerâncias dimensionais e geométricas superiores quando comparados às operações que utilizam ferramentas de corte com geometria definida. Isso ocorre, devido à ferramenta denominada rebolo conter grãos abrasivos aglomerados, formados de partículas não metálicas com dureza elevada. Essa característica, cria várias arestas cortantes na superfície de contato com a peça. Assim, o processo é capaz de retirar pequenas quantidades de material a uma velocidade elevada, promovendo a remoção do cavaco (MACHADO et al., 2009). O contato dos grãos do rebolo com a peça pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Contato entre o rebolo e a peça.



Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

As grandezas físicas associadas ao processo de retificação, são conhecidas e nomeadas (MACHADO et al., 2009):

- V_s Velocidade tangencial do rebolo [m/s].
- V_w Velocidade periférica da peça [mm/s ou m/min].
- a_e Penetração de trabalho [μm].
- l_c Comprimento de contato entre rebolo e peça [mm].

Devido à dificuldade de usinar materiais frágeis, a retífica necessita de parâmetros rigorosos dos elementos apresentados na Figura 1. Durante o início da usinagem, o conjunto: máquina, peça e ferramenta, sofre deformação elástica. Com isso, durante o primeiro desbaste, a penetração de trabalho estabelecida não é atingida, demandando novos passes da peça pelo rebolo sem aumentar a profundidade de usinagem. A cada ciclo, o rebolo recebe um alívio das tensões contraídas inicialmente, e assim, a retirada de material estabelecida acontece gradualmente através da penetração de usinagem (MALKING, 2008).

Alguns problemas na usinagem por retificação, são citados no trabalho desenvolvido por Malkin e Guo (2008):

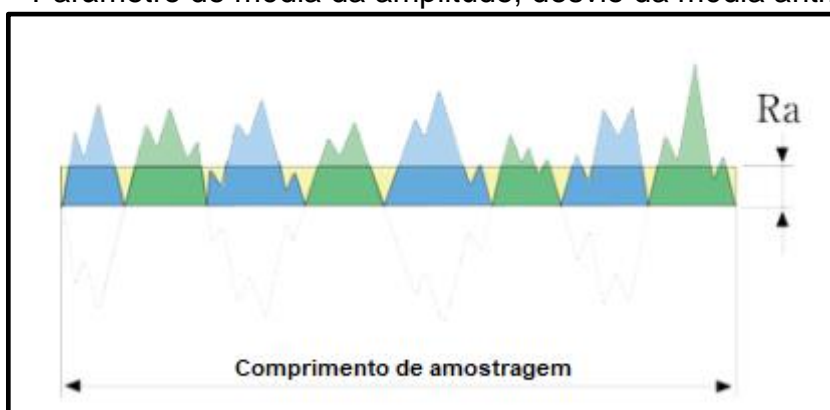
- a) Quando os parâmetros de corte envolvidos na retificação não são devidamente ajustados, as peças ficam suscetíveis a danos de origem térmica, causando a queima por retificação.
- b) Sendo o último processo desenvolvido em uma peça, erros ocasionados durante a usinagem, comprometem todo o trabalho desenvolvido anteriormente.
- c) Pelas características envolvidas, é geralmente o processo de maior custo em relação as usinagens com ferramentas de geometria definida, pois, a retirada de material é consideravelmente menor, prolongando assim, o tempo da operação.

2.2 RUGOSIDADE E ATRITO

O acabamento superficial é essencial onde encontra peças em contato, a sua mensuração se dá através das grandezas de rugosidade superficial, que pode ser definida como um conjunto de desvios micrométricos, gerados pela presença de picos e vales ao longo da superfície usinada. Para expressar os valores numéricos de rugosidade, utiliza-se as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a qual adota o sistema M ou sistema de linha média, em que todas as grandezas de medição são definidas a partir dessa linha, conforme as Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR), *International Organization for Standardization* (ISO) 4287/2002 e NBR, ISO 8404/1988.

Um parâmetro amplamente utilizado nos processos de fabricação industrial é denominado R_a e se baseia nas medidas de profundidade da rugosidade. A definição desse parâmetro, é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil analisado, em relação à linha média, considerando um determinado comprimento de amostragem como apresentado na Figura 2. Esse requisito de rugosidade fornece resultados estáveis, pois não é amplamente afetado por arranhões ou imperfeições (GUIMARÃES, 1999).

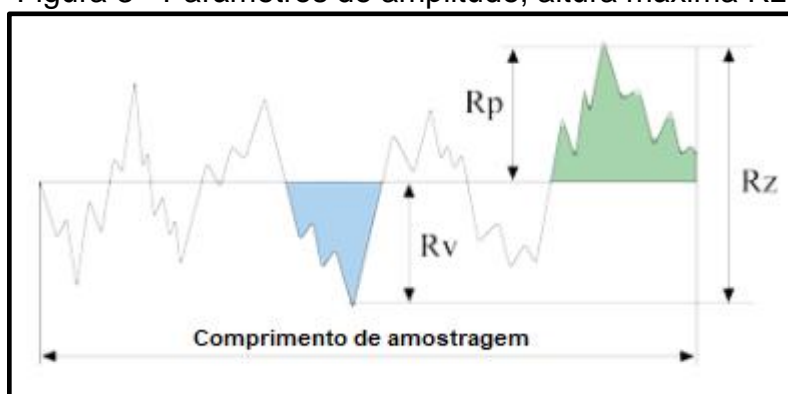
Figura 2 – Parâmetro de média da amplitude, desvio da média aritmética R_a .



Fonte: Adaptado de Olympus Corporation (2017).

O parâmetro de rugosidade R_z corresponde à média aritmética de cinco valores parciais que constituem os pontos de maior afastamento acima e abaixo da linha média, englobados no comprimento de amostragem (*cut off*), conforme a Figura 3. Esse parâmetro é frequentemente utilizado, mas devido a sua dependência por valores de pico é significativamente influenciado pela presença de imperfeições (GUIMARÃES, 1999).

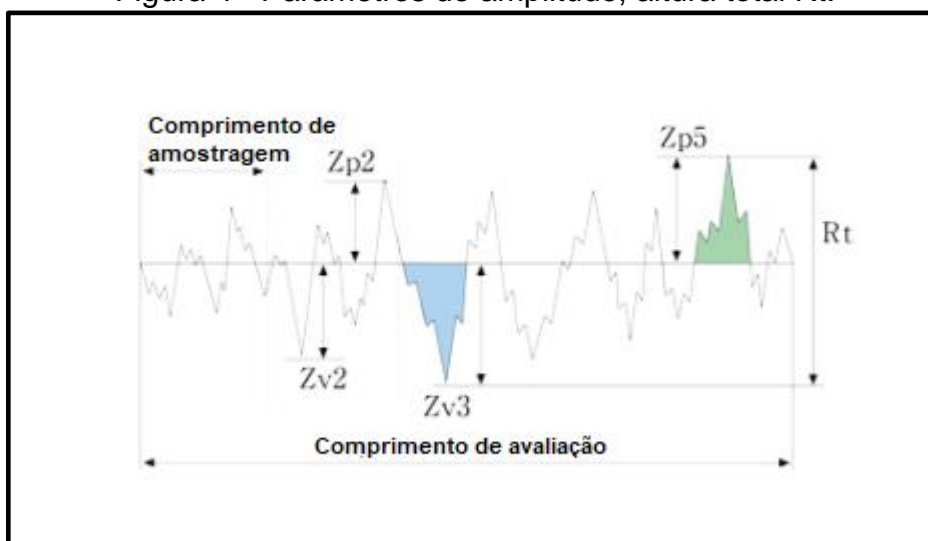
Figura 3 - Parâmetros de amplitude, altura máxima R_z .



Fonte: Adaptado de Olympus Corporation (2017).

A rugosidade total ou R_t é descrita pela distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo, em todo comprimento avaliado independente dos valores de rugosidade parciais, demonstrado na Figura 4. Esse parâmetro é mais rigoroso em comparação com as rugosidades R_a e R_z , é necessário considerar que a sua mensuração é muito influenciada pela presença de imperfeições, devido a sua utilização total dos valores de pico (GUIMARÃES, 1999).

Figura 4 - Parâmetros de amplitude, altura total R_t .



Fonte: Adaptado de Olympus Corporation (2017).

Quando uma peça é usinada, ocorre a modificação da sua superfície e com isso, as características de rugosidade passam a ser compatíveis com seu grau de acabamento. Isso reflete diretamente na influência do desgaste em que a peça estará submetida. Com a observação de que o acabamento imposto à uma peça reflete em seu desempenho, superfícies melhores acabadas tendem a ser mais resistentes a fadiga e a corrosão; sendo um dos motivos relacionados a esses ganhos, a alteração do coeficiente de atrito entre as peças (NORTON, 2013).

Conforme apresentado por Norton (2013) a rugosidade superficial, tem efeito sobre o atrito entre as peças com característica de interligação, as quais comumente recebem acabamento por retificação para minimizar a rugosidade. Após o processo de usinagem realizado, os valores de rugosidade apresentam medidas na casa de micrômetros, mas mesmo assim, observa-se atrito entre os elementos montados durante o seu funcionamento, e dessa maneira pelo contato entre as partes se caracteriza-se o efeito de desgaste.

2.2.1 Velocidade de avanço e sua influência na rugosidade

A faixa de velocidade imposta no rebolo produzido com características abrasivas convencionais, variam entre 10 m/s e 45 m/s, já os valores aplicados para velocidade da peça durante a usinagem utilizam grandezas menores, atuando entre 10 m/min até 25 m/min. Um ponto importante na definição do processo, é a relação da camada de material a ser retirada da peça, ou seja, a penetração de trabalho. Esta, por sua vez, depende do processo imposto e pode variar de centésimo de milímetro a décimo de milímetro, sendo esses valores de penetração conservadores que contribuem para alcançar as apertadas tolerâncias dentro do processo (MACHADO et al., 2009).

Visto que a velocidade do rebolo permanece constante durante o processo de retificação, o avanço é determinante para definir a velocidade de corte. Definir a velocidade de avanço, depende de fatores como o material a ser retificado, penetração de trabalho, características do rebolo, entre outros. Observa-se assim, que a velocidade de avanço mais baixa pode resultar em uma rugosidade superficial menor, mas com isso perde-se a eficiência de corte, corroborando com o aquecimento da peça e seus efeitos negativos (NUSSBAUM, 1998). Alguns valores orientativos da velocidade de avanço da peça, de acordo com o material a ser retificado, estão detalhados na Quadro 2.

Quadro 2 - Valores orientativos da velocidade da mesa para diferentes materiais.

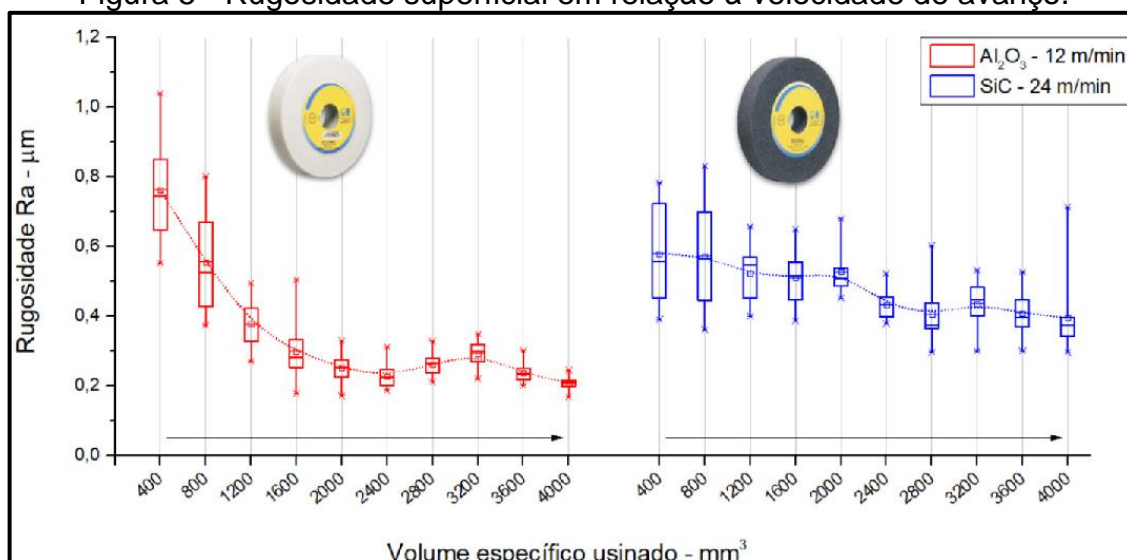
Material a retificar	Velocidade da mesa
Aço comum	6 – 15 m/min
Aço Liga	5 – 12 m/min
Ferro Fundido	8 – 15 m/min
Bronze Latão	10 – 16 m/min
Carburos metálicos	3 – 5 m/min

Fonte: Nussbaum (1988).

Conforme o estudo desenvolvido e apresentado por Ulbricht *et al.* (2020) em sua análise de comparação da rugosidade em relação à velocidade de avanço, há a

utilização de dois tipos de rebolos abrasivos, sendo eles Al_2O_3 e SiC, os quais apresentam características de desgaste diferentes. Os autores observaram os efeitos da rugosidade R_a , com a variação da velocidade de avanço de 12 m/min e 24 m/min. O resultado da rugosidade encontrado no experimento, é mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Rugosidade superficial em relação à velocidade de avanço.



Fonte: Ulbricht *et al.* (2020).

O estudo de Mehl (2017), avalia a característica do processo de retificação em que o rebole passa um período em contato e outro período sem contato com a peça, resultando em uma inconsistência na velocidade de avanço do eixo. Segundo o autor, a ocorrência é maior durante a usinagem concordante, apresentando uma variação na velocidade de corte. O autor aponta que durante seu experimento e conforme discriminado no estudo, essa variação não resultou em danos superficiais ou alterações da rugosidade. Os valores de velocidade de avanço se encontram na Tabela 1.

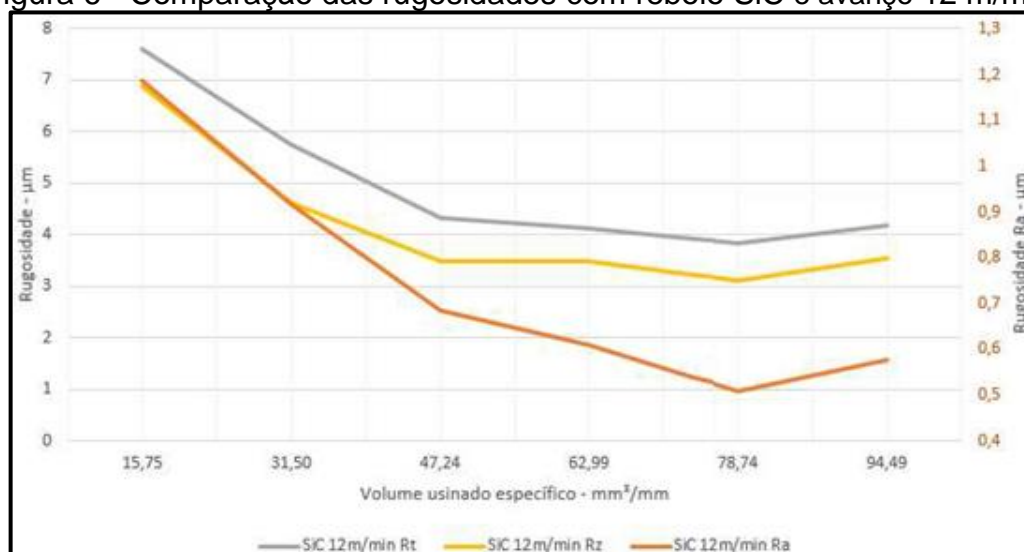
Tabela 1 - Comparativo das velocidades de corte.

Dados de velocidade da mesa (m/min)				
	Al_2O_3		SiC	
Velocidade da Peça	12 m/min	24 m/min	12 m/min	24 m/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: Mehl (2017).

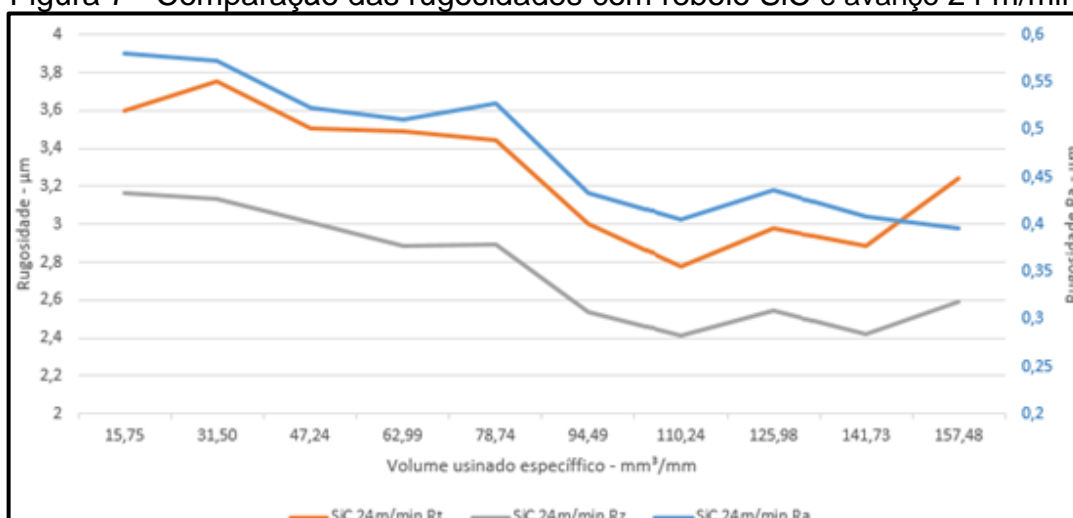
O experimento conduzido por Mehl (2017) analisou valores de rugosidade R_a , R_z e R_t em relação às velocidades de avanço 12 m/min e 24 m/min, impostas durante a usinagem por retificação plana do aço ferramenta, *Society of Automotive Engineers* (SAE) ABNT D6 temperado com dureza entre 58 e 60 HR_c. O experimento foi conduzido analisando o volume específico de material usinado com limite de 157,48 mm³/mm, e a ferramenta utilizada foi um rebolo de Carboneto de Silício. Os valores de rugosidade obtidos estão expostos nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 - Comparação das rugosidades com rebolo SiC e avanço 12 m/min.



Fonte: Mehl (2017).

Figura 7 - Comparação das rugosidades com rebolo SiC e avanço 24 m/min.

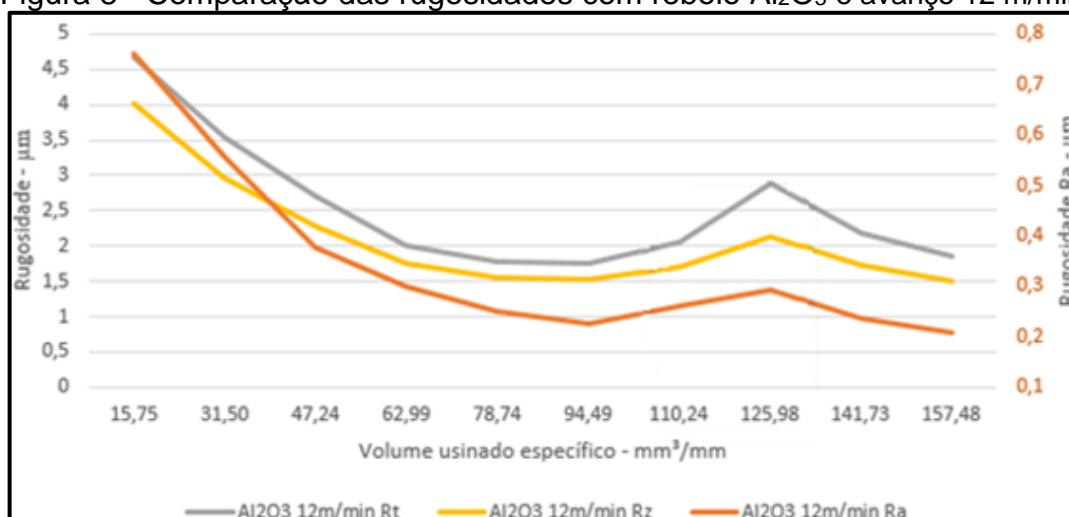


Fonte: Mehl (2017).

Apresenta ainda Mehl (2017) a comparação dos valores de rugosidade R_a , R_z e R_t em relação as mesmas velocidades de avanço, 12 m/min e 24 m/min com a

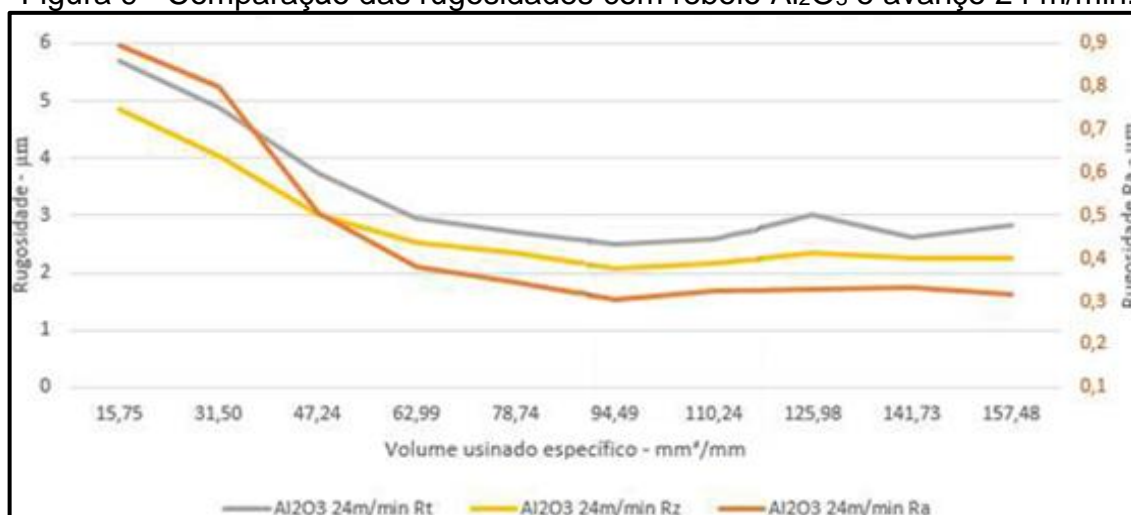
utilização do rebolo de Óxido de Alumínio, abordando o mesmo volume máximo usinado: 157,48 mm³/mm e utilizando o mesmo material com dureza entre 58 e 60 HR_c. Os valores obtidos com o rebolo de Óxido de Alumínio, encontram-se nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 - Comparação das rugosidades com rebolo Al₂O₃ e avanço 12 m/min.



Fonte: Adaptado de Mehl (2017).

Figura 9 - Comparação das rugosidades com rebolo Al₂O₃ e avanço 24 m/min.



Fonte: Adaptado de Mehl (2017).

A análise de Mehl (2017) comparando os melhores resultados encontrados entre os rebolos, demonstra que a capacidade de remoção de material para as duas ferramentas foi o mesmo, 110,24 mm³/mm de volume específico. Após esse limite é necessário dresser o rebolo para não ocorrer queimas superficiais na peça. Com a análise dos resultados, verifica-se que a média de rugosidade Ra obtida pelo rebolo

de Óxido de Alumínio com avanço de 12 m/min, ficou menor que o valor encontrado para o rebolo de Carboneto de Silício, e a rugosidade R_a obtida com o rebolo de Carbeto de Silício e avanço de 24 m/min, ficou menor que o valor encontrado para o rebolo de Óxido de Alumínio. A Tabela 2, apresenta os parâmetros de usinagem sugeridos para cada rebolo e as médias de rugosidade R_a encontradas.

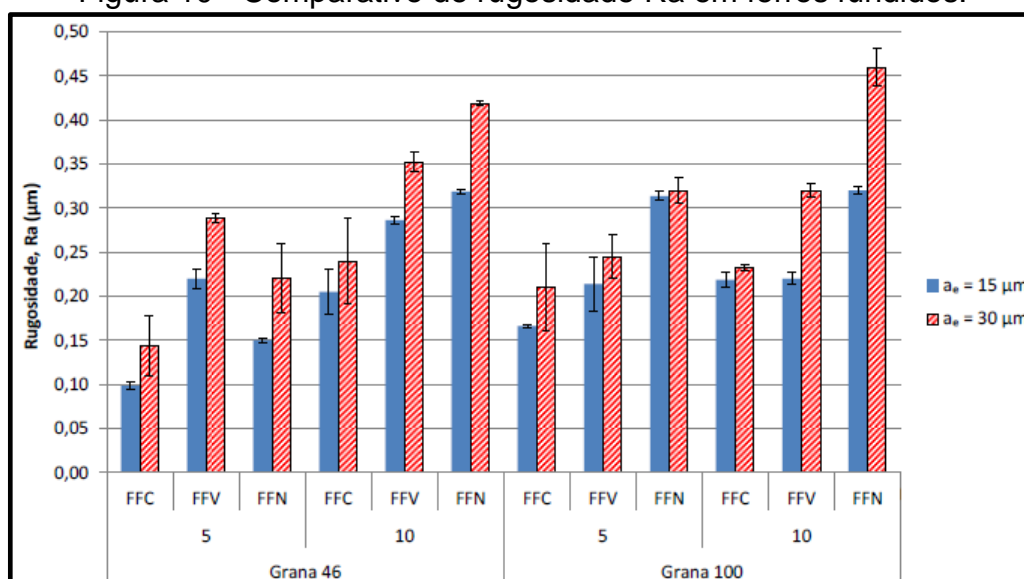
Tabela 2 - Parâmetros de retificação sugeridos.

$a_p = 0,03 \text{ mm}$	Rebolo Al_2O_3		Rebolo SiC	
Vel. Peça [m/min]	12	24	12	24
Vol. Específico [mm^3/mm]	110,23	94,48	78,74	110,23
Rugosidade R_a [μm]	0,76 – 0,263	0,89 – 0,30	1,18 – 0,527	0,58 – 0,405

Fonte: Adaptado de Mehl (2017).

Ao que se refere ao estudo realizado pela autora Lima (2016), esta realizou a retificação plana de corpos de prova em três diferentes classes de ferros fundidos, sendo eles: ferro fundido cinzento (FFC), ferro fundido nodular (FFN) e ferro fundido vermicular (FFV), utilizando as seguintes condições de usinagem: velocidade de corte 32 m/s, velocidade da peça 5 e 10 m/min, penetração de usinagem 15 e 30 μm , volume de material removido 55,9 mm^3 , dois rebolos de SiC (carboneto de silício) com granulometria mesh 46 e 100 e fluido de corte convencional. Os resultados encontrados estão na Figura 10.

Figura 10 - Comparativo de rugosidade R_a em ferros fundidos.



Fonte: Adaptado de Lima (2016).

O experimento de Melo (2015), avaliou a retificação plana de 12 corpos de prova confeccionados em liga de Titânio Ti-6Al-4V, utilizando as seguintes condições de usinagem: velocidade de corte 32 m/s, velocidade da peça 6,8 m/min, penetração de usinagem entre 10 e 20 μm , rebolos de SiC (carboneto de silício) com granulometria *mesh* 46 e três tipos de fluido de corte (Jorro, MQL e MQL+G). Valores de rugosidade Ra e Rz encontrados, se apresentam no Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de rugosidade para diferentes tipos de fluidos de corte.

Técnica de aplicação de fluido de corte:				Jorro		MQL		MQL+G		
a_e (μm)	Núm. de passes	Passe	parâmetro	Média (μm)	D.p. (μm)	Média (μm)	D.p. (μm)	Média (μm)	D.p. (μm)	
10	2	1ª	Ra	0,83	0,13	0,73	0,09	0,52	0,05	
			Rz	4,74	0,41	4,39	0,38	3,67	0,13	
		2ª	Ra	0,82	0,10	0,60	0,05	0,40	0,04	
			Rz	4,92	0,41	3,97	0,36	2,83	0,22	
		3	1ª	Ra	0,81	0,13	0,66	0,09	0,61	0,03
				Rz	5,32	0,84	4,02	0,29	4,33	0,13
	2ª		Ra	0,87	0,16	0,53	0,09	0,52	0,03	
			Rz	5,00	0,84	3,47	0,47	3,43	0,11	
	3ª		Ra	0,84	0,19	0,53	0,06	0,55	0,03	
			Rz	5,00	0,89	3,53	0,27	3,51	0,06	
	20	2	1ª	Ra	0,78	0,15	0,88	0,05	0,88	0,02
				Rz	4,98	0,56	5,68	0,53	5,44	0,10
2ª			Ra	0,71	0,12	0,80	0,18	0,60	0,09	
			Rz	4,23	0,69	5,05	0,60	4,06	0,45	
3			1ª	Ra	0,75	0,11	0,88	0,06	0,87	0,08
				Rz	4,70	0,42	5,34	0,32	5,35	0,32
		2ª	Ra	0,67	0,16	0,82	0,10	0,69	0,08	
			Rz	4,22	0,68	5,02	0,52	4,40	0,44	
		3ª	Ra	0,59	0,10	0,85	0,05	0,74	0,08	
			Rz	3,79	0,74	5,21	0,14	4,46	0,14	

Fonte: Melo (2015).

2.3 SUPERAQUECIMENTO NA RETIFICAÇÃO

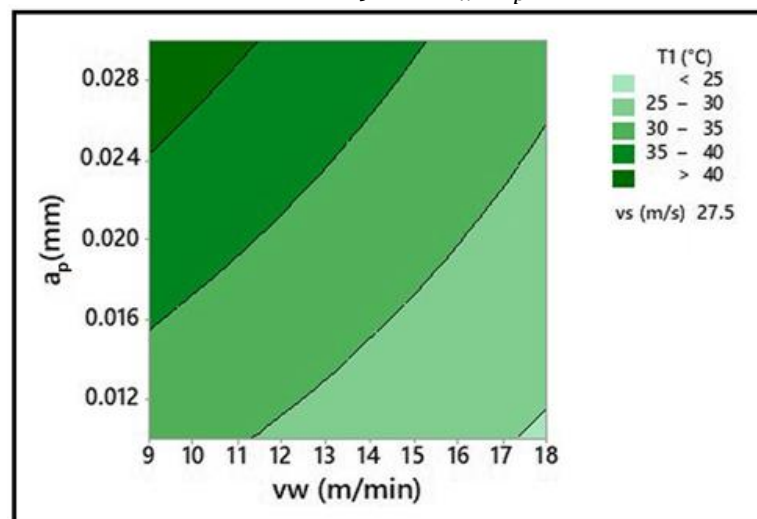
Peças que recebem usinagem por abrasão, mais precisamente retificação, estão suscetíveis a danos térmicos. Esses danos, são causados devido às altas solicitações que envolvem o processo, refletindo no aumento da temperatura sobre a peça usinada. As mudanças do gradiente de temperatura são responsáveis pela modificação da superfície e da camada abaixo da superfície retificada, que refletem diretamente em tensões residuais, trincas, alteração da dureza do material e redução da resistência a fadiga (MALKIN; GUO, 2008).

Os danos causados durante o processo de retificação devido ao aumento da temperatura são:

- a) Queima: pelo aumento demasiado da temperatura, ocorre um processo de oxidação na superfície da peça, caracterizado pelo aparecimento de manchas com tom azulado (MARINESCU et al., 2004).
- b) Têmpera superficial: ocorre geralmente durante a retificação de aços, devido ao aumento da temperatura acima da de revenimento e o resfriamento rápido pelo contato direto com fluido de corte, favorecendo a formação de estruturas martensíticas não revenidas (MALKIN; GUO, 2008).
- c) Trincas: podem ser denominadas como superficiais ou internas, desenvolvem-se quando a superfície da peça é submetida a altas tensões residuais de tração (MALKIN; GUO, 2008).

Durante o experimento realizado por Re, Dix e Tagliaferri (2018) utilizando trinta amostras produzidas com aço DIN 100Cr6 usinadas por retificação plana, alterando as variáveis; velocidade do rebolo, velocidade de avanço, profundidade de usinagem e condições de resfriamento aplicados durante a usinagem; os valores de temperaturas são coletados através de sensores termopares posicionados nas amostras. Os dados coletados encontram-se nos gráficos de contorno da Figura 11.

Figura 11 - Gráficos da T °C em relação a $v_w \cdot a_p$, com fluido lubri-refrigerante.



Fonte: Adaptado de Re, Dix e Tagliaferri (2018).

Conforme Re, Dix e Tagliaferri (2018) os valores de temperatura variam consideravelmente quando alteradas as condições de corte. Observaram que maiores profundidades de usinagem e menores velocidades de avanço resultam em um maior

contato entre a ferramenta e a amostra, promovendo assim, o aquecimento na camada superficial, e, por consequência, o aumento da temperatura gradual em pontos logo abaixo da camada superficial da amostra. Essa condição é prejudicial, pois favorece a queima por oxidação, tempera superficial, o aparecimento de trincas e o aumento das tensões residuais. A Tabela 4, mostra valores de temperatura máximos e mínimos encontrados juntamente com as condições de usinagem iniciais.

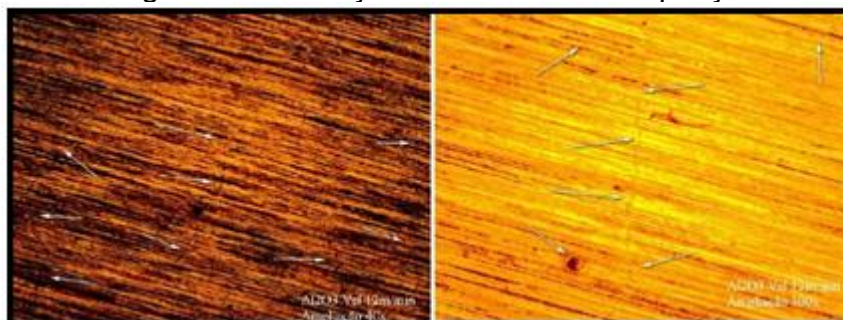
Tabela 4 - Valores de temperatura máxima e mínima encontrada.

Variável	Amostras	Valores	Condições Iniciais
<i>T</i>	a (máx.)	42,55 °C	$V_s= 35$ m/s, $V_w= 9$ m/min, $a_p= 0,03$ mm, lub= s.
	b (mín.)	20,71 °C	$V_s= 20$ m/s, $V_w= 18$ m/min, $a_p= 0,01$ mm, lub= s.

Fonte: Adaptado de Re, Dix e Tagliaferri (2018).

As constatações de Mehl (2017) durante a retificação plana de corpos de prova confeccionado em aço ferramenta SAE ABNT D6 temperado com dureza entre 58 e 60 HR_c analisou o acabamento superficial após a usinagem com velocidade de avanço de 12 m/min, utilizando um rebolo de Al₂O₃. O experimento foi conduzido analisando o volume específico de material usinado com limite de 157,48 mm³/mm. A superfície apresentou pontos de queima refletindo em micro trincas. A Figura 12, apresenta as imagens da camada superficial analisada.

Figura 12 - Usinagem com avanço de 12 m/mim e ampliações de 40x 100x.



Fonte: Mehl (2017).

Na continuação do estudo de Mehl (2017) durante a retificação plana de corpos de prova utilizando o mesmo um material, o autor analisou o acabamento superficial após a usinagem com velocidade de avanço de 24 m/min, utilizando o mesmo rebolo de Al₂O₃. O experimento foi conduzido analisando o volume específico idêntico. A

constatação do autor foi que as micro trincas superficiais apresentam-se mais definidas, em comparação à usinagem com velocidade de avanço 12 m/min. As imagens obtidas estão apresentadas na Figura 13.

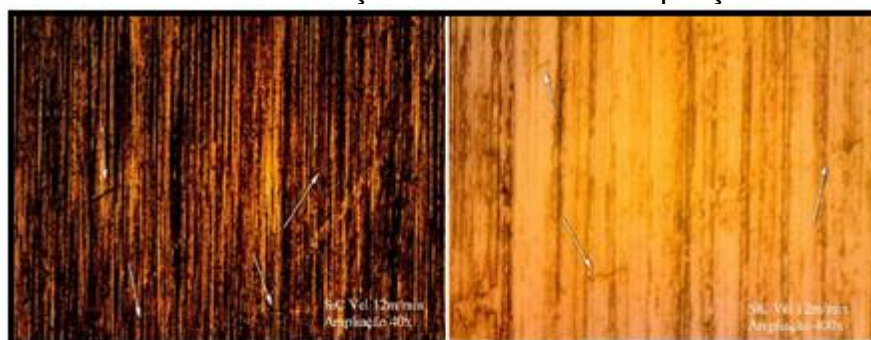
Figura 13 - Superfície, avanço de 24 m/mim e ampliações de 40x 100x.



Fonte: Mehl (2017).

Posteriormente observou Mehl (2017) que após a retificação plana dos corpos de prova produzidos com o mesmo material, usinados com velocidade de avanço de 12 m/min, utilizando o rebolo de SiC (Carboneto de Silício), e avaliando o mesmo volume de material usinado. O autor demonstrou que a camada superficial apresentou pontos de queima nas laterais. Constatou também, o início do aparecimento de micro trincas superficiais, conforme apresentado na Figura 14.

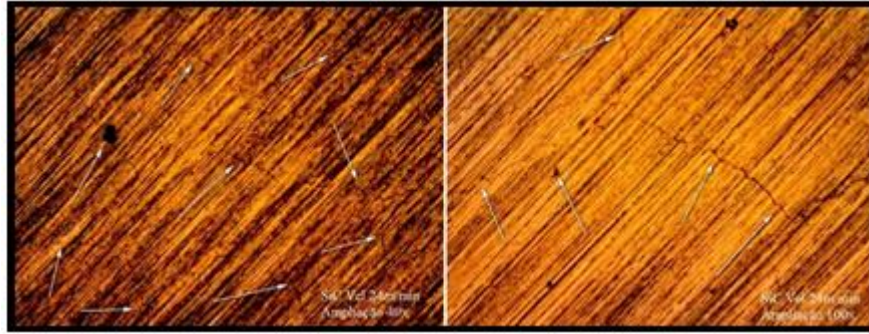
Figura 14 - Usinada com avanço de 12 m/mim e ampliações de 40x 400x.



Fonte: Mehl (2017).

Continuando, Mehl (2017) após a usinagem com velocidade de avanço de 24 m/min, utilizando as mesmas características do estudo anterior, constatou que a superfície apresentou queima e micro trincas superficiais mais definidas quando comparadas com as imagens da usinagem com velocidade de avanço 12 m/min. As imagens utilizadas para comparação, estão apresentadas na Figura 15.

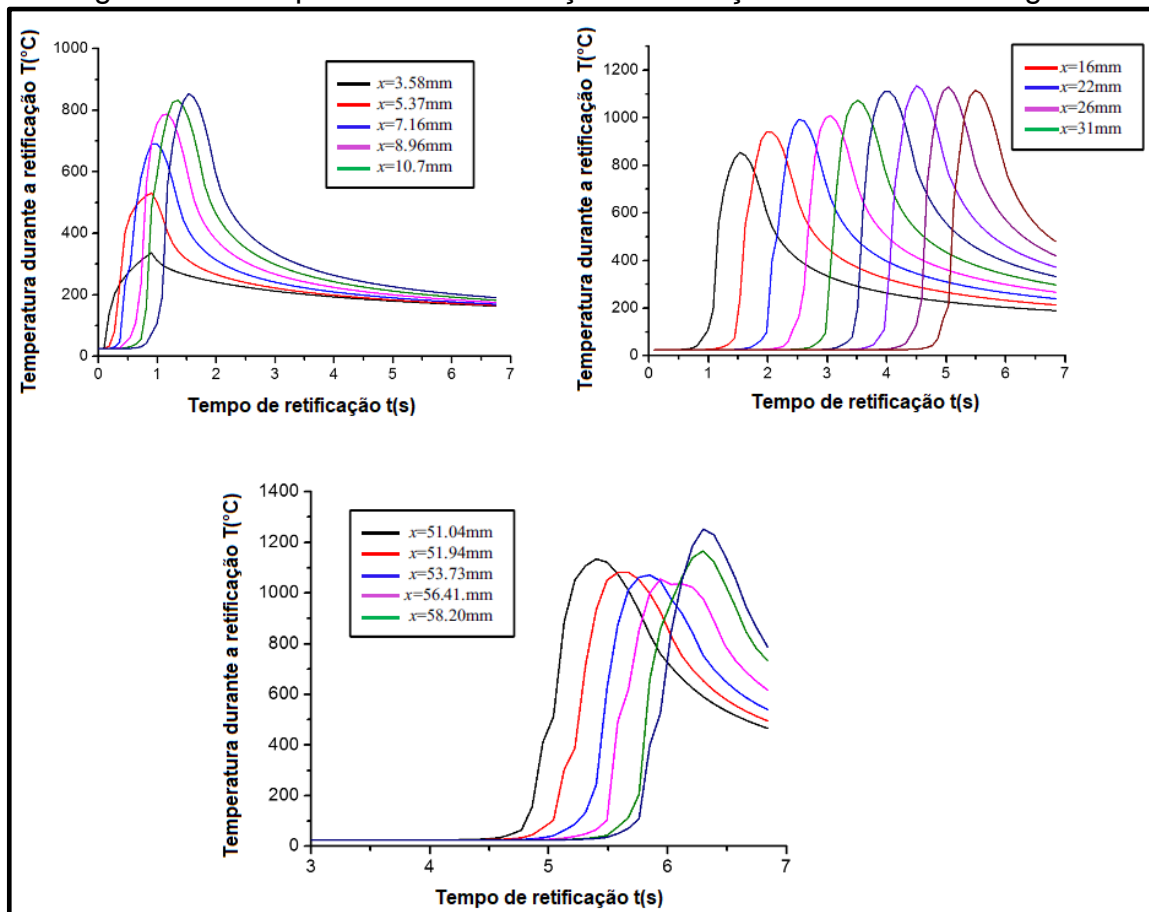
Figura 15 - Superfície, avanço de 24 m/mim e ampliações de 40x 400x.



Fonte: Mehl (2017).

No estudo apresentado por Huang *et al.* (2019) a variação da temperatura durante a usinagem com uma retífica plana com parâmetros de retificação a seco; rebolo CBN, diâmetro do rebolo 400 mm, velocidade de avanço da peça 0,6 m/min, profundidade de corte 200 μm , e velocidade do rebolo 50 m/s; a variação da distância usinada foi entre zero e 60 mm, em um tempo de sete segundos. Os dados coletados pelos autores estão apresentados na Figura 16.

Figura 16 - Temperatura de retificação em relação ao t e x na usinagem.



Fonte: Adaptado de Huang *et al.* (2019).

Como apresentado por He et al. (2018) existem grandes dificuldades em mensurar os valores de temperatura superficiais durante o processo de retificação. Com isso, características como o aparecimento de trincas, aumento da dureza na superfície, assim como a queima superficial, são critérios de análise posteriores a usinagem mais fáceis de observar, possibilitando os ajustes adequados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido para validar a implementação da automação pneumática do eixo transversal de uma retífica plana mecânica e para comparar a influência da velocidade de avanço sobre a rugosidade e requisitos de acabamento superficial, como o aparecimento de manchas e trincas decorrente da queima por retificação. Foram confeccionados 11 corpos de provas. O rebolo utilizado na usinagem foi o de Óxido de Alumínio (AA 80 J6 V387). Para analisar a velocidade de avanço da mesa porta peças, utilizou-se uma câmera Full HD e o *software* TRAKER *Video Analysis and Modeling Tool*. Na avaliação da rugosidade, utilizou-se um rugosímetro Mitutoyo, modelo SJ-301; e as condições da camada superficial, foram analisadas através de um microscópio óptico da marca Optiv Lite, modelo OLM 3020.

O processo de retificação requer estudo prévio, dependendo em grande parte da experiência e preparo técnico do operador. Este estudo não tem a pretensão de tabelar definitivamente os parâmetros de entrada e prever os resultados de saída, mas sim pretende demonstrar como a variação de velocidade imposta por operadores diferentes interferem no acabamento das peças produzidas, e como a automação regulariza esse problema. Com isso, durante a discussão dos próximos tópicos, serão abordados os materiais, equipamentos e métodos utilizados para este estudo.

3.1 RETÍFICA PLANA MECÂNICA

A máquina utilizada é uma retificadora plana com característica de acionamento mecânico em todos os eixos de comando, fabricada pela TIMEMASTER, modelo SG-2150M. O equipamento em questão, é utilizado para facear as bielas produzidas pela empresa onde o estudo foi desenvolvido. Esse processo ocorre após as peças receberem tratamento térmico, tendo em vista que esse produto é confeccionado em aço forjado, o qual apresenta nessa etapa, alta dureza. O processo de retificação, é necessário para atingir uma rugosidade R_a de $0,8 \mu\text{m}$ exigida em projeto com classe N6, de acordo com a norma NBR 8404/84, e garantir o paralelismo durante o próximo processo de usinagem; visto que o componente sofre empenamento pelo tratamento térmico.

As especificações da máquina listadas no Quadro 3, estão dispostas no manual de operação disponibilizado pelo fabricante. Essas informações são pertinentes, visto

que as dimensões, cursos de deslocamento e características do rebolo são essenciais para o estudo da operação.

Quadro 3 - Especificações da máquina de acordo com o fabricante.

Item	Unidades	Quantidade
Tamanho útil da mesa	mm	400 x 200
Deslocamento transversal	mm	520
Deslocamento longitudinal	mm	250
Dimensões do rebolo	mm	200 x 20
Velocidade máxima do rebolo	RPM	3450
Motor	kW	1,5

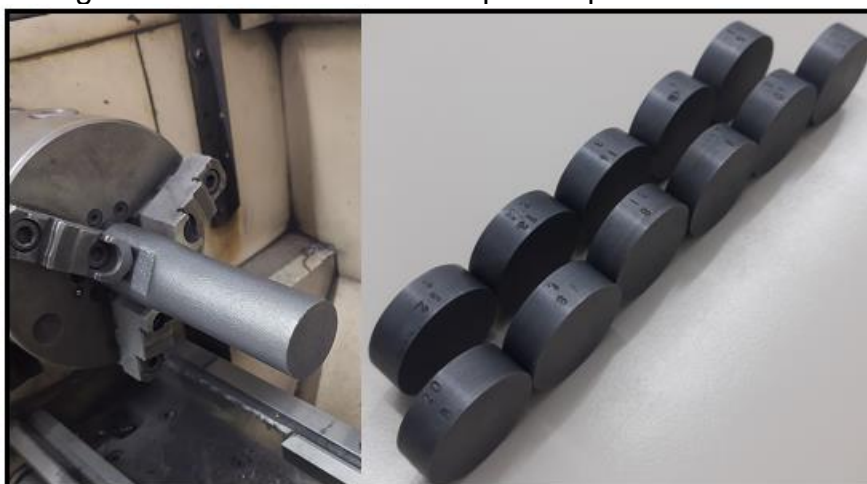
Fonte: Manual do fabricante (TIMEMASTER).

Como a máquina é totalmente controlada de forma manual, existem variáveis que fogem do controle de operação dependendo da experiência do operador. Essa falta de controle quando observada nas diferentes velocidades da mesa, resultam em peças com características de acabamento superficial diferentes que podem ser prejudiciais ao produto. Com isso a automação pneumática do avanço da mesa, visa reduzir a interferência do operador nos parâmetros de usinagem por retificação.

3.2 CORPO DE PROVA

Devido a política da empresa, as características do material e do tratamento térmico utilizado para fabricar os corpos de prova seguem sob sigilo industrial. Para confeccionar os corpos de prova, utilizou-se um cilindro de aço laminado forjado a quente, com dimensões de 30 mm de diâmetro e 132 mm de comprimento. Esse material foi usinado em um torno mecânico para ficar com dimensões de 28 mm de diâmetro e 129 mm de comprimento. Após a usinagem, o cilindro foi cortado através de um disco de corte de 3 mm, em 11 corpos de prova, totalizando 22 faces. Cada face recebeu uma numeração e foi retificada para garantir seu paralelismo. Os corpos de prova confeccionados, retificados e numerados foram encaminhados para tratamento térmico, processos necessários para a superfície alcançar uma dureza mínima de 60 HR_c a uma profundidade máxima de 0,6 mm, conforme descrito no Anexo – A. A imagem dos corpos de prova está apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Cilindro bruto e corpos de prova finalizados.

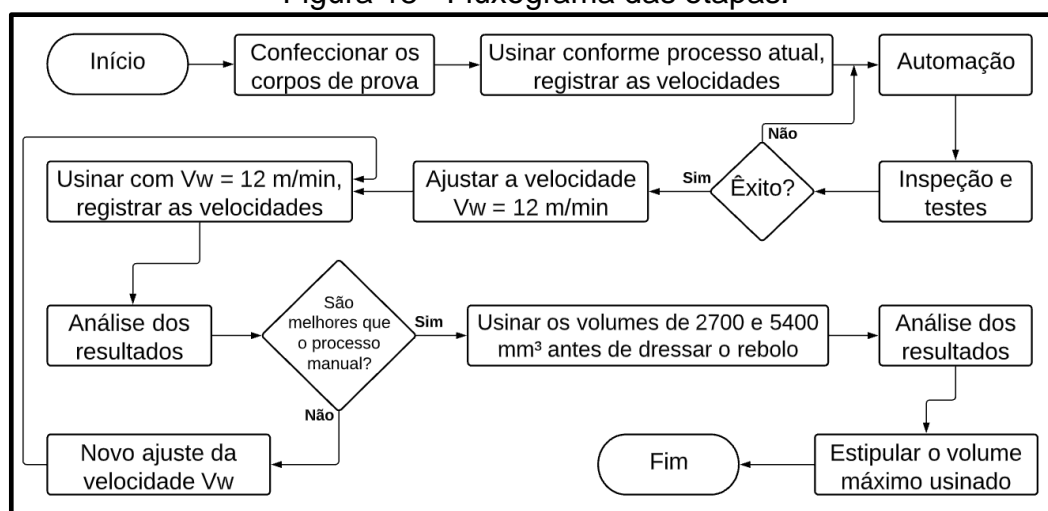


Fonte: O autor (2021).

3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados, visou validar a automação comparando a velocidade da mesa, a rugosidade R_a , R_z , e R_t , e as condições do acabamento superficial após o processo de retificação plana. Para verificar o impacto da automação, as análises compararam os parâmetros através do acionamento manual do eixo transversal; e posteriormente a automação. A Figura 18, apresenta um fluxograma das atividades desenvolvidas.

Figura 18 - Fluxograma das etapas.



Fonte: O autor (2021).

A fim de compreensão, o processo foi dividido em três grupos. O grupo 01, do experimento, contempla doze faces que foram usinadas para caracterizar o processo

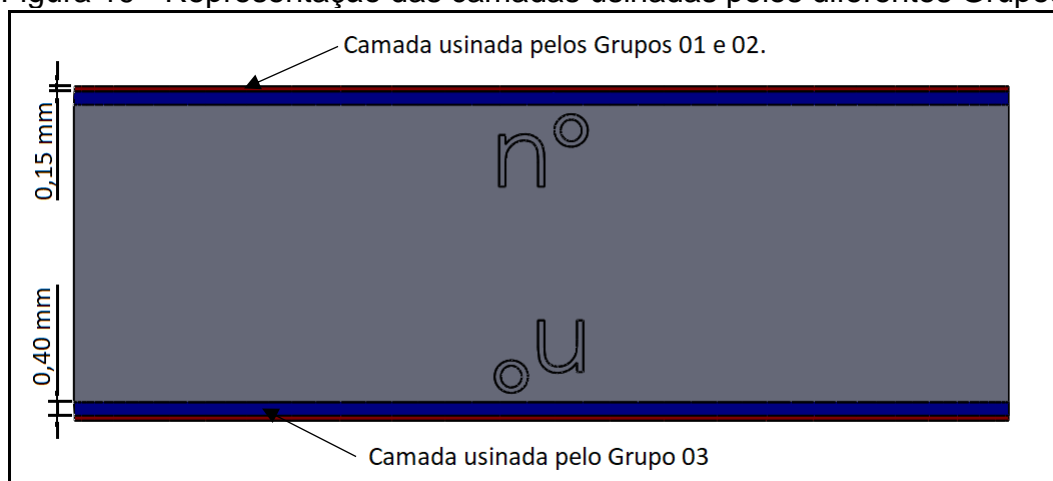
manual, da seguinte maneira: a usinagem de três faces com o avanço da mesa porta peças imposto por quatro operadores diferentes. No Grupo 02, nove faces foram divididas em três usinagens, destinadas a validar a automação com avanço de 12 m/min. Após as análises de rugosidade e acabamento superficial da usinagem dos Grupos 01 e 02, os corpos de prova passaram por nova usinagem caracterizando o Grupo 03 do experimento, que teve como objetivo observar a superfície com a usinagem das 22 faces para avaliar dois volumes usinados, em busca de queimas e trincas superficiais antes de dressar o rebolo. O Quadro 4, apresenta os grupos do experimento e seus respectivos parâmetros. A Figura 19, apresenta as camadas usinadas.

Quadro 4 - Grupos dos experimentos e seus parâmetros.

	Faces	Experimento	V_w [m/min]	VOLUME/Dressagem [mm ³]	a_e [μ m]	V_s [m/s]	liq. Ultracut 360 a 1,5%
Grupo 01	3	Operador 01	Manual	277	0,15	20	Sim
	3	Operador 02	Manual				
	3	Operador 03	Manual				
	3	Operador 04	Manual				
Grupo 02	3	Automático 01	12	2700	0,15	20	Sim
	3	Automático 02	12				
	3	Automático 03	12				
Grupo 03	11	Acabamento	12	2700	0,15	20	Sim
	11	Acabamento	12	5400			

Fonte: O autor (2021).

Figura 19 - Representação das camadas usinadas pelos diferentes Grupos.



Fonte: O autor (2021).

3.3.1 Aquisição de dados processo atual

Antes de cada operador iniciar a usinagem, realizou-se o dressamento do rebolo. O avanço para a retirada de material durante o processo ocorreu de forma manual devido as características da máquina. A velocidade do rebolo utilizada foi igual a 20 m/s, e a profundidade de dressagem ocorreu com oito passes de 50 μm , totalizando 0,4 mm, utilizando um dressador de ponta única.

Depois de dressar o rebolo, a mesa porta peças foi limpa e os corpos de prova foram posicionados com os números de identificação voltados para a frente do operador. A posição escolhida visa forçar o operador a utilizar todo o comprimento da mesa, definindo o sentido de usinagem e perpendicularmente o sentido de medição da rugosidade. A Figura 20, demonstra o posicionamento dos corpos de prova e o sentido da usinagem.

Figura 20 - Sentido da usinagem e posicionamento dos corpos de prova.



Fonte: O autor (2021).

Para determinar a velocidade imposta por cada operador, realizou-se a filmagem. A câmera foi posicionada na mesma altura e horizontalmente à mesa porta peças, a qual recebeu um círculo pintado na cor preta com diâmetro de 20 mm. O círculo é necessário para que o *software* responsável por registrar a velocidade consiga identificar um ponto de massa.

A filmagem foi realizada durante toda a usinagem que contou com um total de 60 passes concordantes e 60 discordantes. A velocidade do processo foi calculada com a média dos passes, 3, 4 e 5 (início do processo); 29, 30 e 31 (intermediário); 56, 57 e 58 (final do processo). A Figura 21, apresenta uma imagem do *software* durante a análise.

Figura 21 - Alinhamento e posicionamento da câmera durante a análise.



Fonte: O autor (2021).

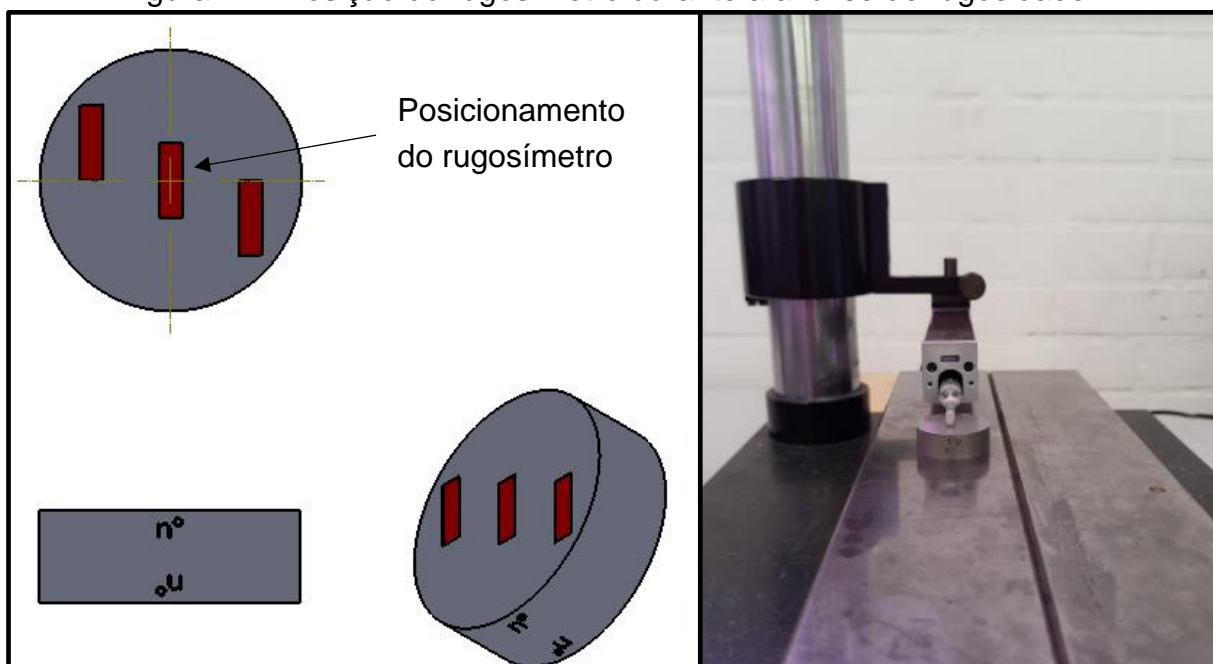
Com os parâmetros de dressagem, posicionamento dos corpos de prova e posicionamento da câmera para filmagem concluídos, iniciou-se a usinagem. Cada operador determinou o ponto zero da máquina no eixo Z necessário, para que o primeiro toque do rebolo aconteça retirando o mínimo de material possível. Após essa etapa, o eixo Z foi zerado novamente, e iniciou-se a retificação dos corpos de prova e a filmagem.

Os passes do rebolo ocorreram da seguinte maneira: o operador acrescenta uma penetração de trabalho igual a $15 \mu\text{m}$, e realiza o passe uma vez no sentido concordante; após esse passe, retorna usinando no sentido discordante sem movimentar o eixo longitudinal. Como o rebolo possui uma espessura de 20 mm, e os corpos de prova possuem um diâmetro de 28 mm, cada corpo de prova recebeu dois passes concordantes, e dois passes discordantes em cada profundidade de corte, até alcançar a retirada de material igual a 0,15 mm.

Após a retificação dos corpos de prova, realizou-se a análise da rugosidade. O processo ocorreu efetuando três medições em cada amostra no sentido perpendicular a usinagem. A avaliação dos parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_t foram definidas utilizando o rugosímetro que possui uma escala de medição no eixo Z igual a $350 \mu\text{m}$ e com resolução de medição igual a $0,01 \mu\text{m}$ para valores de rugosidade encontrados em uma faixa inferior a $10 \mu\text{m}$.

Como os valores de rugosidade encontrados foram inferiores a $2 \mu\text{m}$, utilizou-se um comprimento de *CutOff* igual a 0,8 mm. A leitura é repetida por 5 vezes em cada amostragem, porém para o resultado, são desconsiderados os valores da primeira e o última leitura. Por causa disso, foi somado um comprimento total necessário de 4 mm, para realizar cada medição, conforme as normas ABNT NBR ISO 4288 de 2008 e ABNT NBR ISO 4287 de 2002. A Figura 22, mostra o procedimento para aquisição de dados de rugosidade.

Figura 22 - Posição do rugosímetro durante a análise de rugosidade.



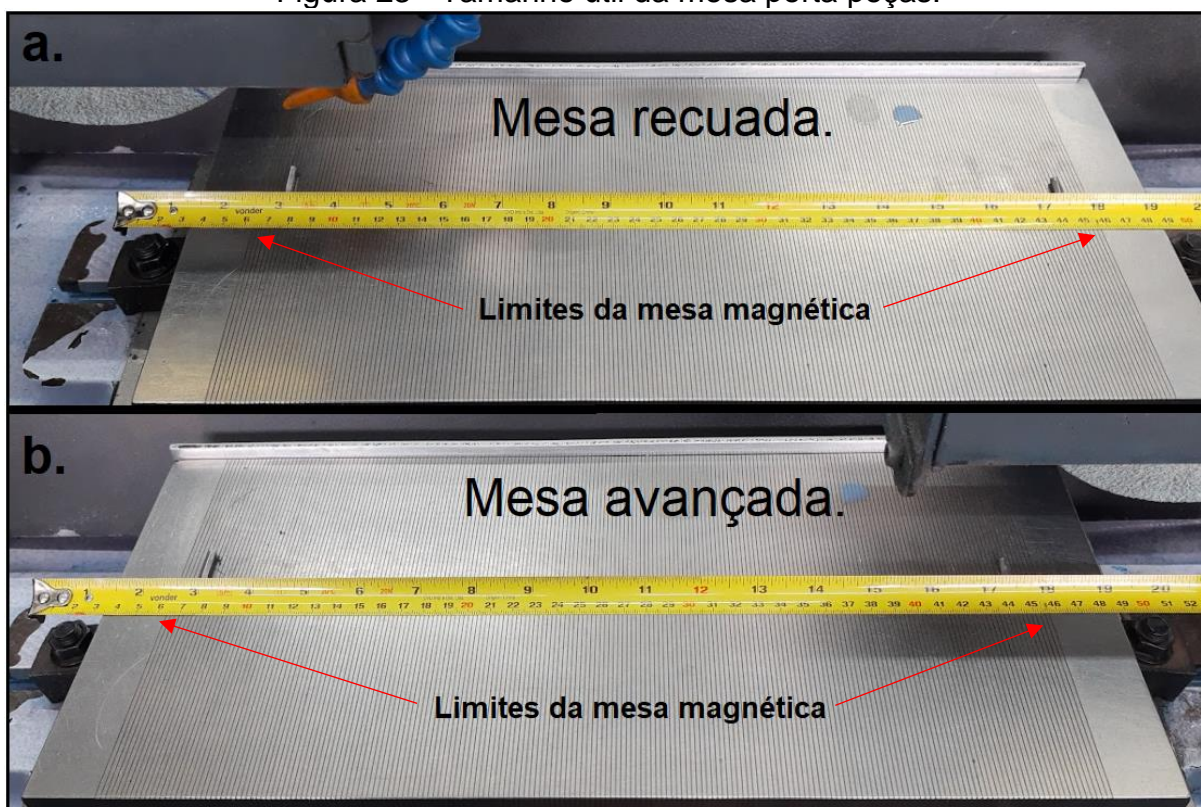
Fonte: O autor (2021).

3.3.2 Aquisição de dados após a automação

A automação pneumática do eixo transversal foi instalada, mas antes de iniciar a usinagem, a velocidade foi definida em 12 m/min. Para alcançar a velocidade almejada dentro do comprimento útil da mesa de 400 mm, restringiu-se a vazão de ar comprimido que entra nos compartimentos do cilindro.

Com a verificação da velocidade, a parte do experimento que visa a aquisição de dados após a realização da automação, foi desenvolvida. Como o estudo visa validar a influência da velocidade do avanço na rugosidade e no acabamento superficial, os parâmetros de dressamento do rebolo, a posição dos corpos de prova, e as características de avaliação da rugosidade, permaneceram iguais ao experimento 3.3.1. A mudança nesta etapa é a velocidade que agora deve ser o mais constante que o sistema pode oferecer durante as três usinagens. Considerando que o deslocamento máximo da mesa é igual a 520 mm, e o comprimento útil da mesa é igual a 400 mm, a análise foi desenvolvida dentro da faixa em que o rebolo se encontra na parte útil para usinagem, entre 60 e 460 mm. A Figura 23, apresenta nas imagens: (a) a mesa magnética na posição recuada; (b) a mesa magnética na posição avançada. As duas imagens apresentam o limite tamanho útil da mesa magnética.

Figura 23 - Tamanho útil da mesa porta peças.



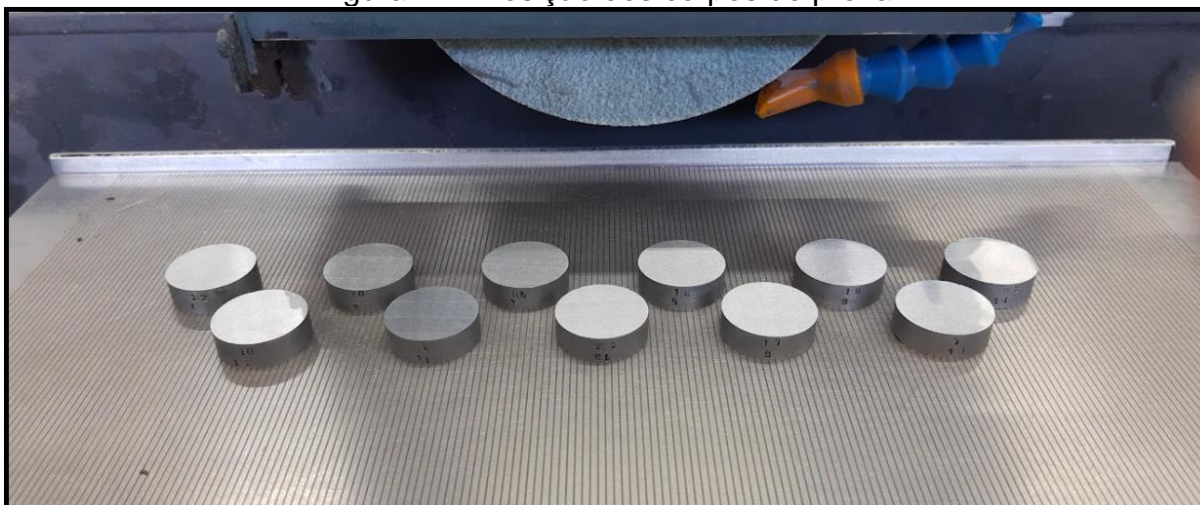
Fonte: O autor (2021).

3.4 ANÁLISE DO ACABAMENTO SUPERFICIAL QUEIMA

Após a usinagem de todos os corpos de prova não foram identificadas marcas de queima pelo processo, e a análise através do microscópio óptico não apresentou sinais de trincas na superfície. Com isso, iniciou-se mais uma fase do experimento, que pretende observar a qualidade superficial, usinando o máximo da camada endurecida restante antes de dresser o rebolo. Sendo que, os 11 corpos de prova apresentam 22 faces disponíveis e alcançam um volume de 2700 mm³, utilizando 0,4 mm do primeiro lado das faces e um total de 5400 mm³ de camada endurecida com 0,4 mm do segundo lado.

Antes de iniciar a análise, as mesmas condições de preparo para usinagem do item 3.3.1 foram aplicadas, assim como os parâmetros de usinagem do item 3.3 para a mesa automatizada. Assim, foi retificado 0,4 mm no primeiro lado dos corpos de prova, e posteriormente, virou-se e usinou-se as outras faces, mais 0,4 mm. A posição escolhida de forma intercalada é para caracterizar uma usinagem com característica de corte interrompido. A Figura 24, demonstra o posicionamento dos corpos de prova.

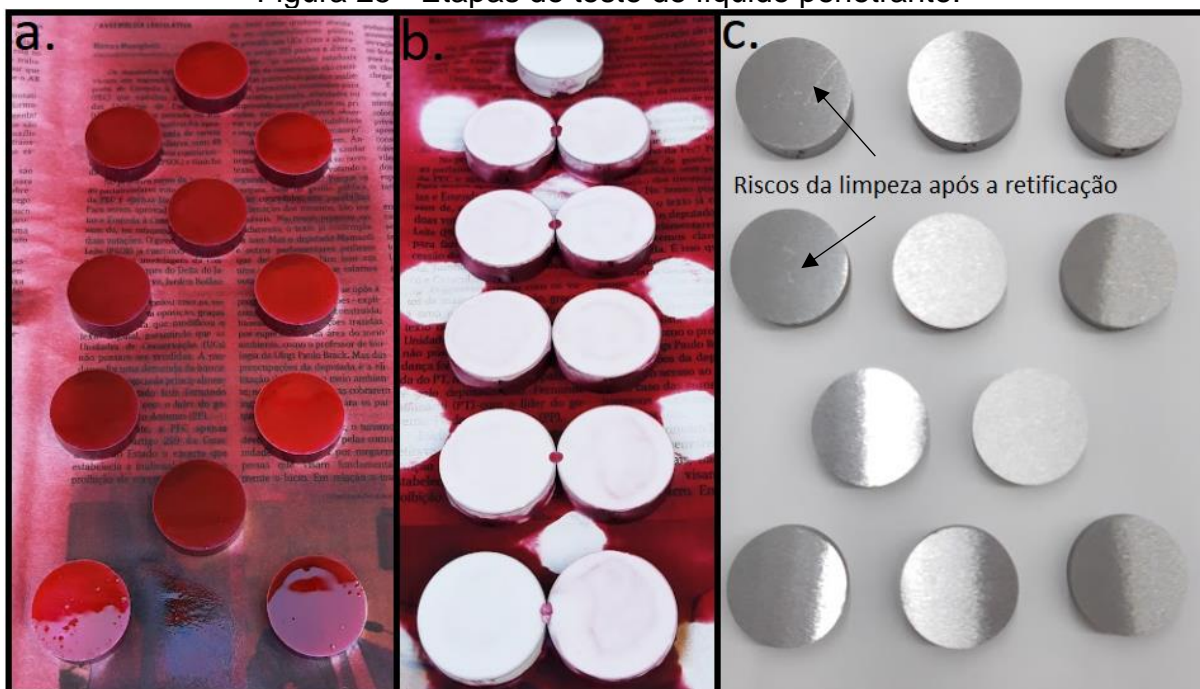
Figura 24 - Posição dos corpos de prova.



Fonte: O autor (2021).

Após a retificação dos corpos de prova, percebe-se que estes não apresentaram marcas de queima. Dessa forma, realizou-se um ensaio de líquido penetrante, da marca Metal Chek. Para realizar esse ensaio, foram seguidos os métodos descritos pelo fornecedor conforme apresentado no Anexo – B. A Figura 25, apresenta as imagens da sequência do ensaio: (a) mostra a aplicação do VP30; (b) mostra a aplicação do D70; (c) mostra os corpos de prova após o ensaio.

Figura 25 - Etapas do teste de líquido penetrante.



Fonte: O autor (2021).

A partir desse ponto, três corpos de prova foram analisados, sendo eles os que estavam nas posições: avançada, mediana e recuada da usinagem. A análise se deu com o microscópio óptico (ampliação 180x), avaliando toda superfície dos corpos de prova a procura de trincas. Essa análise, ocorreu no primeiro lado onde o volume usinado foi de 2700mm³, e no segundo lado, onde o volume usinado pelo rebolo foi de 5400 mm³. Posteriormente, os mesmos corpos de prova passaram por um teste de rugosidade, conforme o item 3.3.1, para verificar como a usinagem afetou os parâmetros R_a , R_z e R_t em 2700 e 5400 mm³, de material usinado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DAS VELOCIDADES DA MESA

Com a automação, surgiu a necessidade de normalizar a velocidade V_w . Para isso, foram ajustadas as válvulas reguladoras de vazão, a fim da velocidade automática se aproximar ao máximo da nominal de 12 m/min. Realizou-se assim, o mesmo estudo da velocidade citado no item 3.3.1 realizando três filmagens, contendo três velocidades concordantes e três discordantes. Conforme demonstrado no Apêndice – A, a análise realizada gerou os valores de velocidades concordantes e discordantes apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados da velocidade da mesa V_w .

	Concordante [m/min]	Discordante [m/min]
Nominal	12	
Média	11,56	12,04
Desvio Padrão	0,7	0,72

Fonte: O autor (2021).

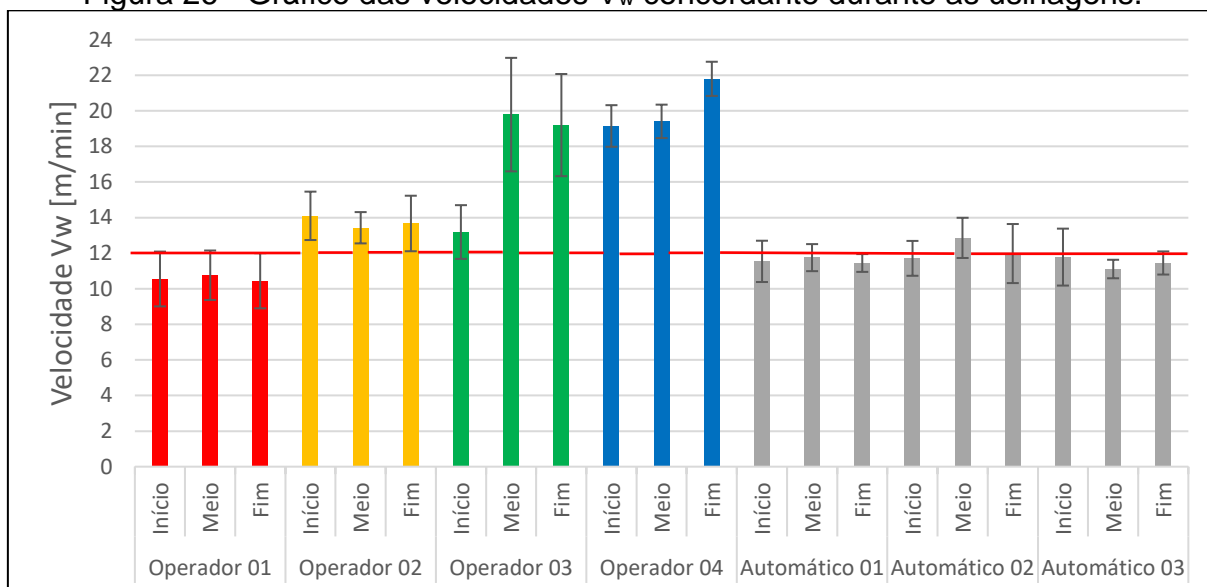
Pode-se perceber uma diferença entre a média da velocidade concordante e discordante. Essa característica é proposital, devido a usinagem concordante tracionar o rebole contra a peça, causando um aumento da velocidade da mesa durante o processo. A diferença de velocidade foi determinada por avaliação prévia a usinagem dos corpos de prova, para que a velocidade concordante durante a usinagem dos corpos de prova, fique o mais próximo possível da nominal de 12 m/min.

4.2 ANÁLISE DAS VELOCIDADES DURANTE AS USINAGENS

Conforme descrito no desenvolvimento do trabalho, a retificação com os diferentes operadores serve para avaliar a velocidade V_w , imposta antes da automação. Essa comparação foi utilizada para avaliar qual o nível de discrepância da velocidade entre os operadores durante a usinagem, e como essa questão é normalizada com a implementação da automação. Os quatro operadores realizaram a retificação que foram filmadas e posteriormente avaliadas para determinar as velocidades. Depois da automação implementada, foram realizadas mais três retificações para avaliar a velocidade do processo automatizado. As Figuras 26 e 27,

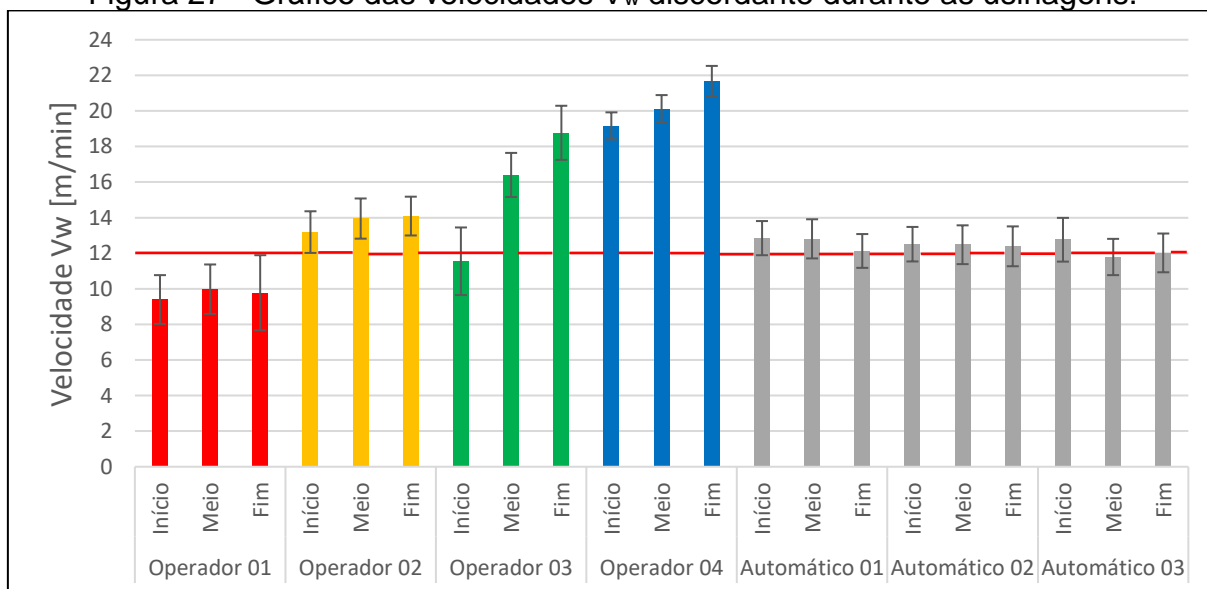
apresentam os gráficos das médias das velocidades concordantes e discordantes no início, meio e fim de cada usinagem.

Figura 26 - Gráfico das velocidades V_w concordante durante as usinagens.



Fonte: O autor (2021).

Figura 27 - Gráfico das velocidades V_w discordante durante as usinagens.



Fonte: O autor (2021).

Os dados coletados durante o processo manual, apresentam uma variação considerável da velocidade V_w imposta pelos diferentes operadores. Demonstra também, que a automação é capaz de normalizar os valores deixando mais próximo possível da nominal de 12 m/min. Pode-se observar que o valor do desvio padrão

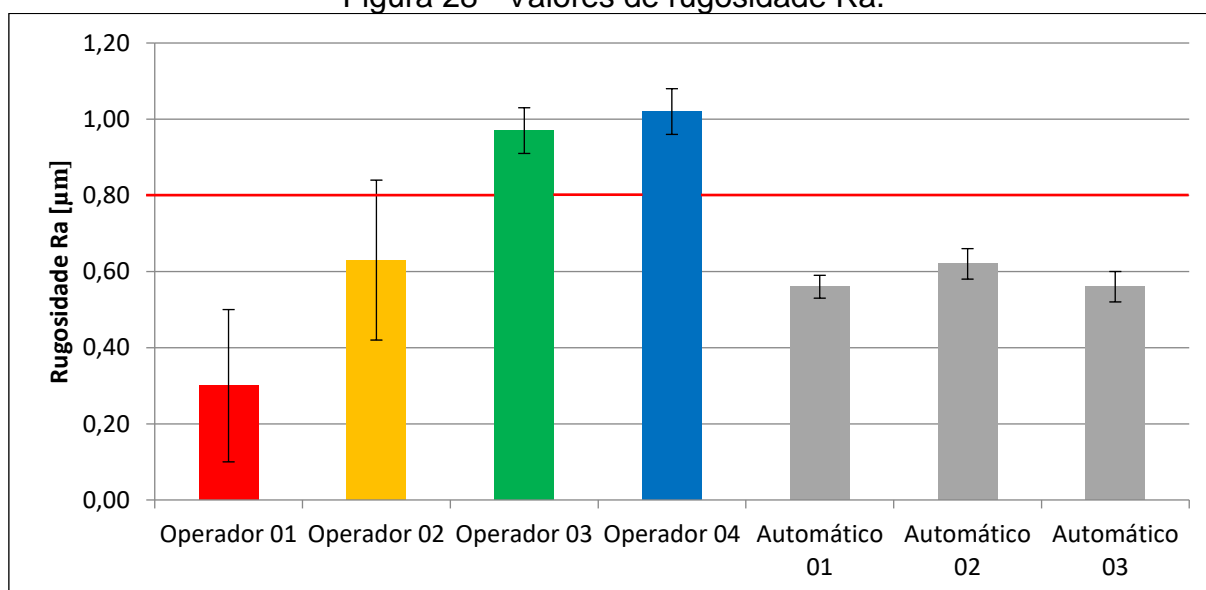
durante a usinagem de cada operador, se apresenta maior em comparação ao processo automatizado.

O valor de variação máxima de velocidade no automático é 4,5%, durante a operação concordante, e 6,75%, na discordante em comparação com a nominal. A variação dos valores no processo manual é maior chegando a 61,75%, durante a usinagem concordante e 67,67%, na discordante. A variação da média dos valores do desvio padrão encontrados no processo automático, em comparação com o processo manual, observados durante a usinagem concordante, refere a maior variação de 237,65%, e no discordante 39,45%. O único processo manual que ficou com a variação do desvio padrão menor em relação ao automático, foi o discordante do Operador 04, que apresentou uma variação 29,36%, menor durante a usinagem. Todavia, as velocidades V_w , concordantes e discordantes impostas, ficaram respectivamente em 61,75%, e 67,67%, maiores que a nominal.

4.3 ANÁLISE DAS RUGOSIDADES

Depois da usinagem realizada, iniciou-se a experimentação que pretende determinar como as velocidades discutidas no item 4.2, afetam os valores de rugosidade nos corpos de prova. Para isso, foram comparados os valores de rugosidade R_a , R_t , e R_z , entre os operadores no processo manual, e no processo automático. Os dados de rugosidade R_a estão apresentados na Figura 28.

Figura 28 - Valores de rugosidade R_a .



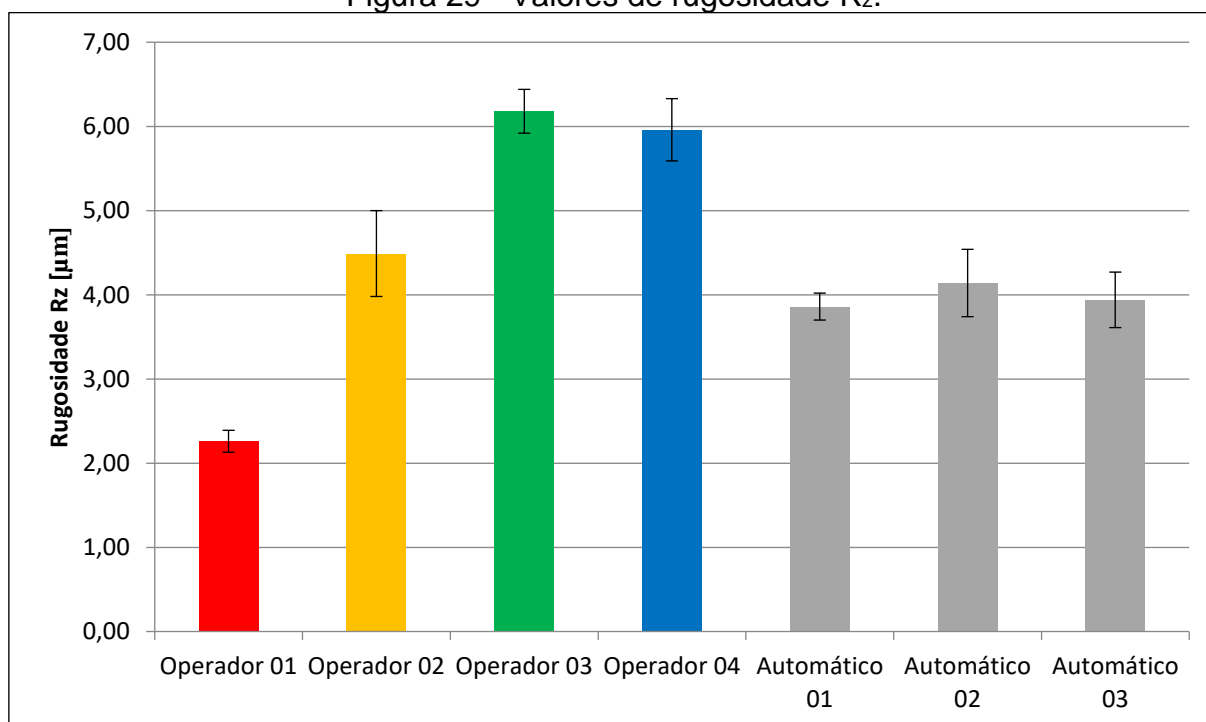
Fonte: O autor (2021).

Pode-se perceber uma variação dos valores de rugosidade R_a , entre os operadores. A automação é capaz de normalizar os valores e deixá-los mais próximos do especificado em projeto, abaixo de $0,8 \mu\text{m}$ de acordo com a classe N6 da norma NBR 8404/84. Observa-se que o valor do desvio padrão da rugosidade R_a , de cada operador, apresenta-se maior em comparação ao processo automatizado.

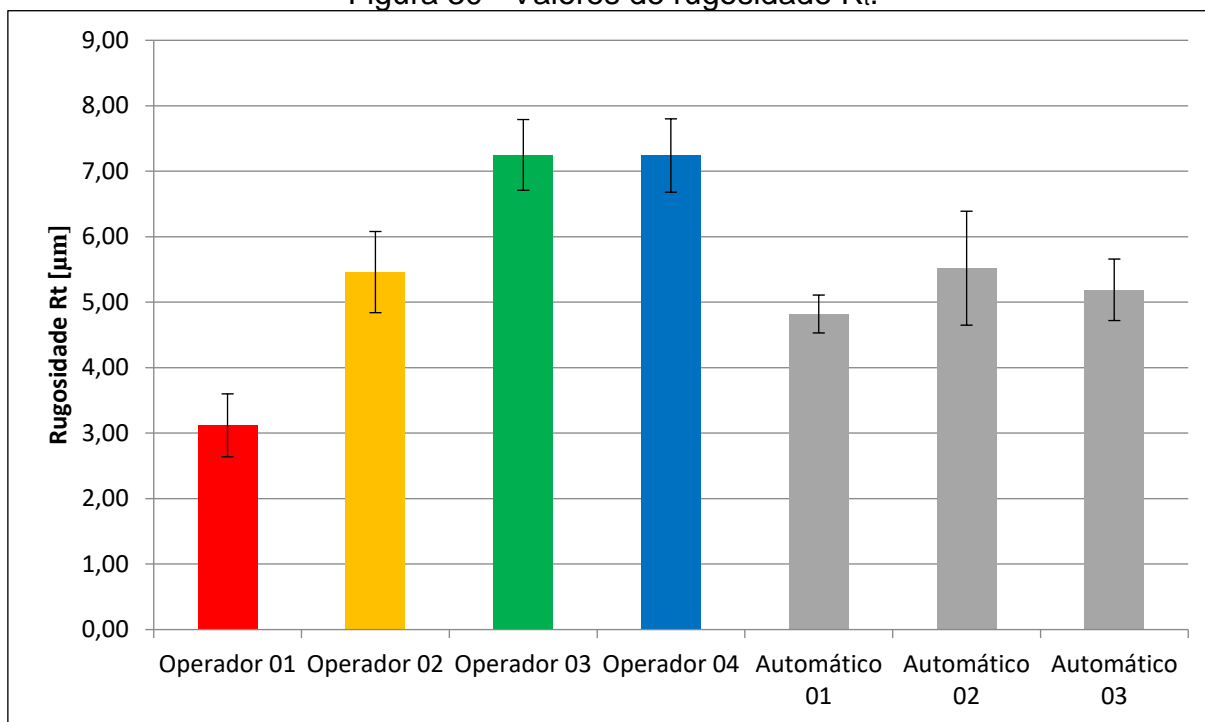
Os dados do processo manual, demonstram que os valores de rugosidade R_a , tendem a aumentar com o aumento da velocidade V_w . Comparando a variação da média dos valores do desvio padrão encontrado no processo automático com o processo manual, verifica-se que o processo automático apresentou valores baixos comparados com o processo manual. Apesar do valor médio das rugosidades R_a , dos operadores 1 e 2, ficarem abaixo do estipulado em projeto, a média do desvio padrão apresentado é maior, ficando entre 400%, e 425%, acima da média do valor automático.

Outros dois parâmetros foram analisados, a rugosidade R_z , e R_t . Esses parâmetros demonstram um panorama mais detalhado do padrão de rugosidade nos corpos de prova, os quais pretende-se determinar como as velocidades discutidas no item 4.2 os afetam. As Figuras 29 e 30, apresentam os dados da rugosidade R_z , e R_t , encontrados durante a análise dos corpos de prova.

Figura 29 - Valores de rugosidade R_z .



Fonte: O autor (2021).

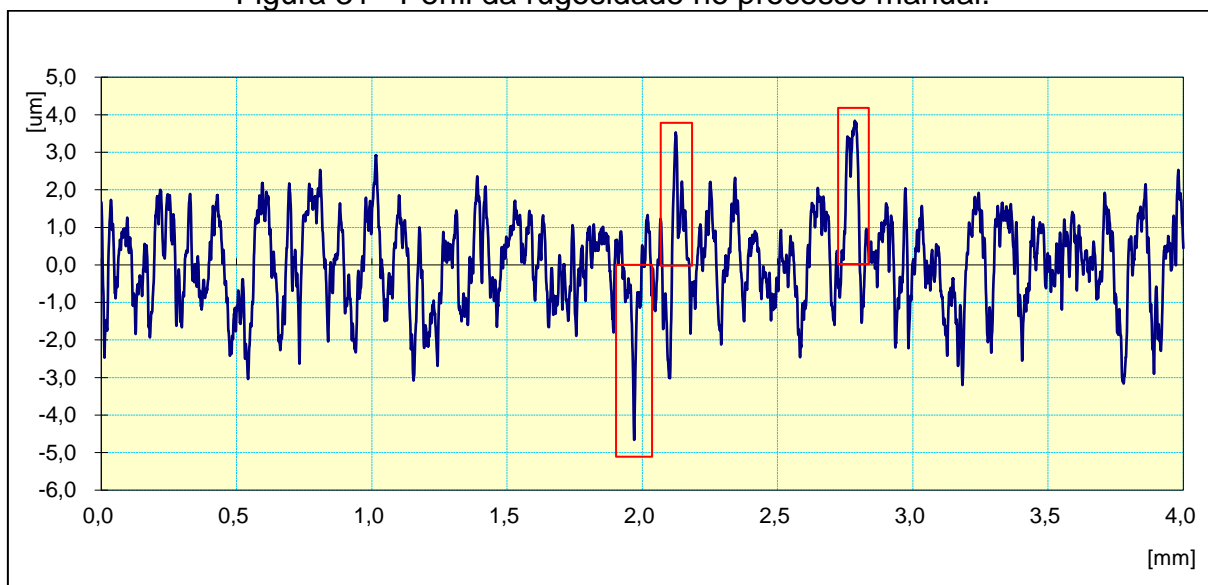
Figura 30 - Valores de rugosidade R_t .

Fonte: O autor (2021).

Inferese que os valores de rugosidade R_z e R_t , também apresentam uma tendência de aumentar com o aumento da velocidade V_w , imposta pelos diferentes operadores no processo de usinagem manual. Em contrapartida com os valores encontrados durante a análise da rugosidade R_a , identifica-se que os valores tem menor variação quando se compara o processo automático com o manual. Isso se dá devido a característica da avaliação da rugosidade R_z e R_t que apresenta dependência por valores de pico para sua mensuração, diferentemente da rugosidade R_a que utiliza a média de todos os valores no comprimento avaliado.

Sendo assim, percebe-se que principalmente a rugosidade R_t é significativamente influenciada pelos valores de pico gerados durante a usinagem, conforme demonstrado pela análise dos perfis de rugosidade apresentados nas Figuras 31 e 32. Esses fatores estão presentes tanto no processo manual quanto no automático, refletindo em valores de rugosidade R_z e R_t próximos em ambas as avaliações, (manual e automático). A automação do eixo transversal não promoveu uma melhoria substancial da qualidade de usinagem das faces retificadas neste estudo, mas provou ser capaz de uniformizar os resultados de rugosidade medidos em comparação com o processo acionado manualmente, os quais foram expressos graficamente.

Figura 31 - Perfil da rugosidade no processo manual.



Fonte: O autor (2021).

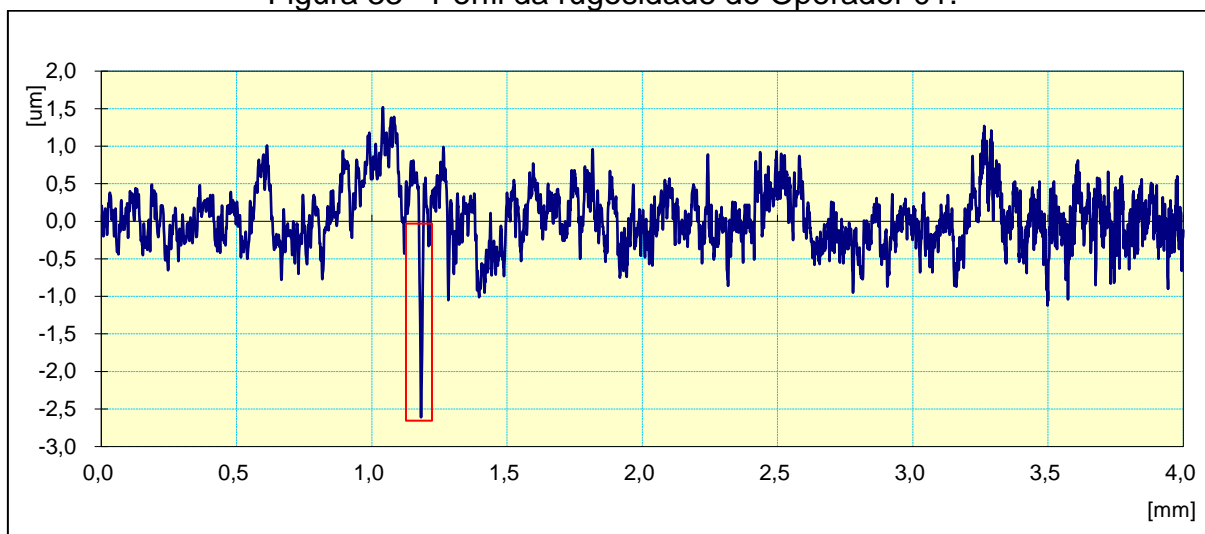
Figura 32 - Perfil da rugosidade no processo automático.



Fonte: O autor (2021).

Durante a análise das rugosidades R_a , R_z e R_t é possível perceber que o Operador 01 apresenta valores menores em comparação com os encontrados pelos Operadores 2, 3, 4 e o processo automático. Isso acontece devido a usinagem com velocidades de avanço transversais mais baixas. Assim, o rebolo permanece por mais tempo em contato com a peça, favorecendo a retirada de material durante a usinagem. Mesmo assim, é possível identificar a presença de valores de picos no perfil de rugosidade como demonstrado pelas Figuras 31 e 32.

Figura 33 - Perfil da rugosidade do Operador 01.



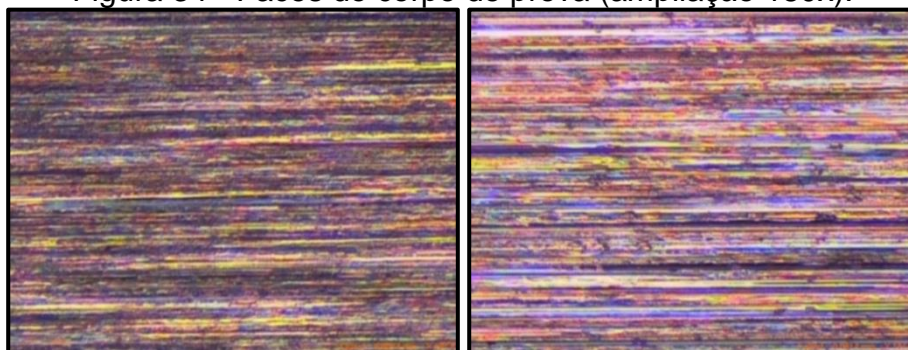
Fonte: O autor (2021).

4.4 ANÁLISE DA QUEIMA POR RETIFICAÇÃO

Além da avaliação da rugosidade, os corpos de prova foram submetidos a uma avaliação da camada superficial, em busca de queimas e trincas oriundas do processo de retificação. Ao analisar todas as faces que tiveram 0,15 mm, de material removido, observou-se através do microscópio óptico (ampliação 180x), que não houve marcas de queima e nem trincas superficiais, tanto no processo manual quanto no automático. Dessa forma, continuou-se a usinagem utilizando a camada de 0,4 mm, restantes de material endurecido em cada face.

O primeiro lado dos 11 corpos de prova gerou um volume usinado de 2700 mm³. Continuando a usinagem no segundo lado, totalizou o volume de 5400 mm³, de material usinado antes de dresser o rebolo. A Figura 34, apresenta à esquerda a face obtida pela usinagem de 2700 mm³, e à direita, a usinagem de 5400 mm³.

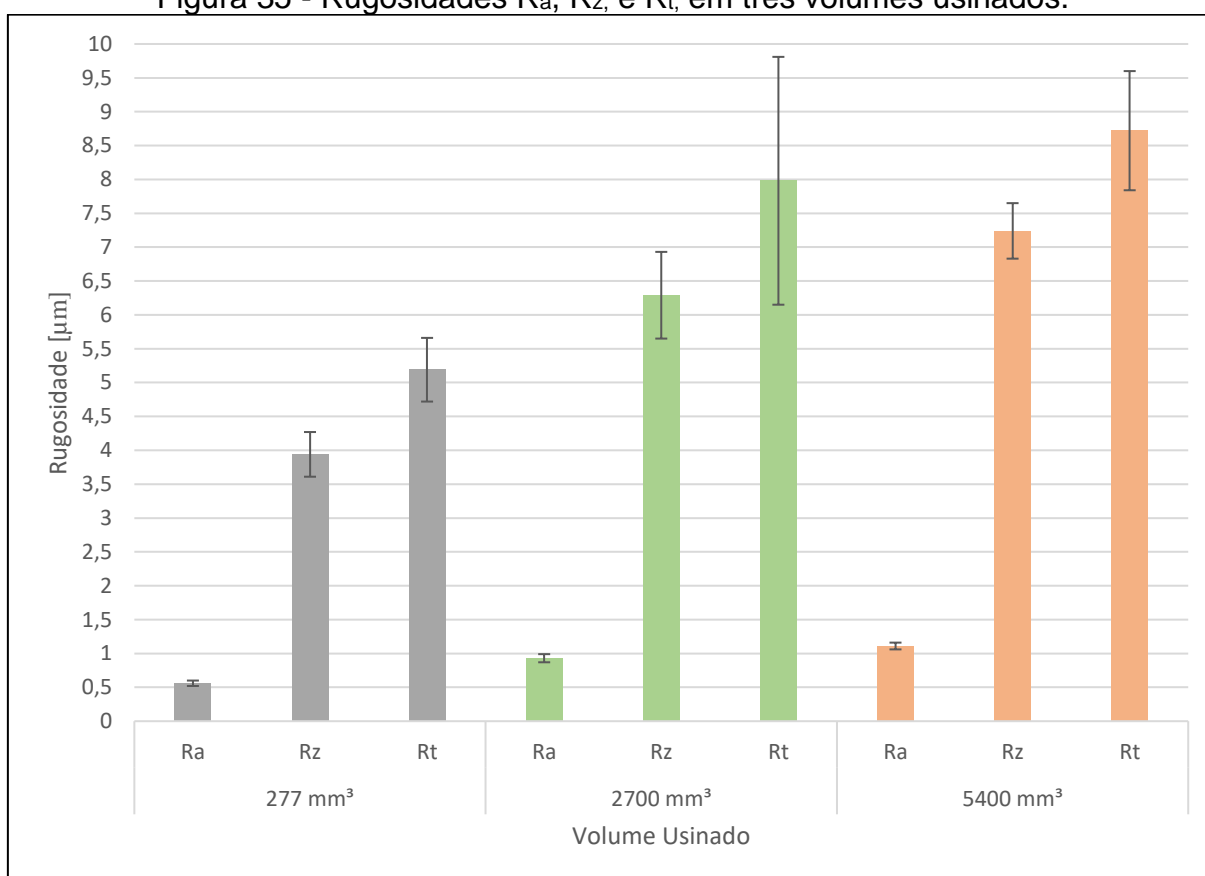
Figura 34 - Faces do corpo de prova (ampliação 180x).



Fonte: O autor (2021).

Novamente, os corpos de prova tanto na usinagem com 2700 mm³, quanto na de 5400 mm³, não apresentaram marcas de queima ou trincas por retificação, porém, observou-se que as condições da camada usinada piorou com a usinagem prolongada devido da perda na eficiência de corte do rebolo pela quebra das arestas cortantes produzidas durante o dressamento. Com isso, realizou-se um novo teste de rugosidade, para avaliar os valores R_a , R_z , e R_t , nas superfícies com os dois volumes de material usinado. A Figura 35, apresenta o gráfico das rugosidades R_a , R_t , e R_z , das usinagens com os volumes de 277 mm³, 2700 mm³, e 5400 mm³.

Figura 35 - Rugosidades R_a , R_z , e R_t , em três volumes usinados.

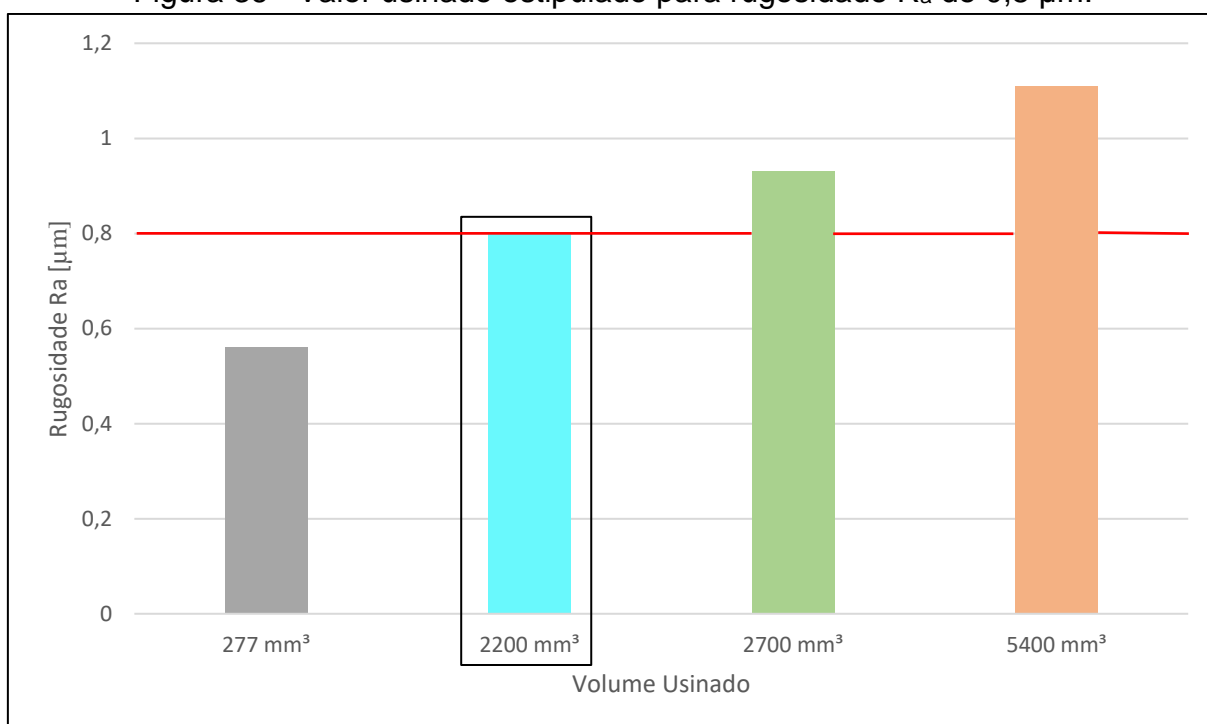


Fonte: O autor (2021).

Os valores de rugosidade encontrados pela usinagem dos dois volumes avaliados foram superiores, em comparação com a primeira parte do estudo. Essa característica é devido ao rebolo perder a capacidade de corte. A referida propriedade gera uma maior área de contato durante o corte do material retificado, refletindo assim, em parâmetros de rugosidade maiores.

Com os resultados encontrados para os valores de rugosidade R_a , nos volumes usinados de 277 mm^3 , 2700 mm^3 e 5400 mm^3 , infere-se que esta apresenta a tendência de aumentar. Dessa maneira, foi possível, determinar através de uma interpolação linear, o volume aproximado de 2200 mm^3 de material usinado antes de dresser o rebolo, para obter a rugosidade estipulada mais próxima do valor de projeto $0,8 \mu\text{m}$. A Figura 36, apresenta os valores de rugosidade pelo volume usinado, e destaca o valor de volume determinado para rugosidade R_a , de $0,8 \mu\text{m}$.

Figura 36 - Valor usinado estipulado para rugosidade R_a de $0,8 \mu\text{m}$.



Fonte: O autor (2021).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo que demonstra a validação da implementação de um sistema de automação pneumática para o eixo transversal de uma retífica plana manual. A avaliação foi realizada comparando as velocidades impostas por quatro operadores diferentes que utilizam a máquina, conferindo com as velocidades encontradas depois da automação. A validação ocorreu através do estudo dos valores de rugosidade R_a , R_z , e R_t , e quesitos de acabamento superficial, como queimas e trincas, decorrentes do processo de retificação.

Durante a avaliação dos resultados, identificou-se uma grande variação entre as velocidades impostas pelos quatro operadores. Assim como, foi observado que a automação regularizou esse parâmetro. Com a apresentação dos dados da velocidade V_w , e verificando os desvios padrões encontrados, é visível que o processo se apresenta bem controlado.

Sobre os valores de rugosidade, foi verificado que os três parâmetros analisados tendem a aumentar juntamente com o aumento da velocidade V_w , observando que a variação máxima deste parâmetro entre os operadores chegou a 48,6%, e depois da automação, houve uma redução para 2,52%. Com isso, foi possível identificar que os valores de rugosidade R_a tendem a ficar abaixo do especificado em projeto, ou seja, $0,8 \mu\text{m}$, com a velocidade automática mais próxima dos 12 m/min. A utilização de velocidades abaixo desse valor, tendem a apresentar rugosidades mais baixas, mas não são interessantes do ponto de vista da produtividade.

Ao que concerne à queima superficial, analisou-se que durante a primeira e segunda parte do experimento, com o volume usinado de 277 mm^3 , antes de dresser o rebolo, a qual foi considerada a usinagem realizada pelos quatro operadores e a usinagem após a automação, não foi possível determinar através de microscopia óptica, sinais de queima ou trincas superficiais.

Os corpos de prova foram novamente usinados, contemplando desta vez, os volumes de 2700 mm^3 e 5400 mm^3 antes de dresser o rebolo. Os resultados obtidos através do teste de líquido penetrante e microscopia óptica, também não apresentaram sinais de queima ou trincas superficiais, mas durante a avaliação da superfície no microscópio (ampliação 180x), observou-se uma piora do acabamento

superficial pela perda da capacidade de corte do rebolo, ocorrida com a usinagem prolongada.

Uma nova análise dos parâmetros de rugosidade R_a , R_z , e R_t , foram realizadas, e como o esperado, devido a perda da eficiência de corte do rebolo, os valores encontrados foram maiores, e já com o volume de 2700 mm³ de material usinado antes de dresser o rebolo, esses ultrapassam o requisito de projeto. Com isso, foi realizado uma interpolação linear utilizando os valores de rugosidade R_a encontrados nos três grupos do experimento para determinar o volume usinado máximo estipulado antes de dresser o rebolo de 2200 mm³, para que a rugosidade R_a represente a tendência de permanecer abaixo de 0,8 μm .

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a importância de realizar estudos com rebolo de SiC, a fim de verificar se é possível utilizar velocidades V_w maiores, e continuar atendendo os requisitos de rugosidade R_a estipulados em projeto.

Em relação à automação do movimento longitudinal da mesa, é relevante a avaliação da qualidade superficial das peças produzidas em função do movimento longitudinal automático.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GROOVER, Mikell. **Automação industrial e sistemas de manufatura**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

GUIMARÃES, Vagner Alves. **Controle dimensional e geométrico: Uma introdução a metrologia industrial**. Passo Fundo: EDIUPF, 1999.

HE, Baofeng *et al.* A survey of methods for detecting metallic grinding burn. **Measurement**. Pequim, 30 out. 2018. p. 4-6.

HUANG, Xiangming *et al.* Research on grind-hardening layer and residual stresses based on variable grinding forces. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 103, n. 1-4, p. 1045-1055, 29 mar. 2019. Springer Science and Business Media LLC.

KANNAN, Kalpana; ARUNACHALAM, N. Grinding wheel redress life estimation using force and surface texture analysis. **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 72, p. 1439-1444, 2018. Elsevier BV.

KLOCKE, Fritz. **Manufacturing process 2: grinding, honing, lapping**. Germany: Springer, 2009.

LIMA, Mariana Landim Silveira. **Retificação plana tangencial dos ferros fundidos nodular, vermicular e cinzento em várias condições de corte**. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B.; COELHO, R. T. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining With Abrasives**. 2. ed. New York: Industrial Press, 2008.

MARINESCU, I. D.; ROWE, W. B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. **Tribology of abrasive machining processes**. Norwich: William Andrew Inc, 2004.

MEHL, Wagner Cabral. **Análise da influência da velocidade da peça sobre o acabamento superficial no processo de retificação**. 2017. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Fabricação Mecânica, Educação, Ciência e Tecnologia, Instituto Federal de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, 2017.

MELO, Antonio Vitor de. **Retificação da liga de Ti-6Al-4V, com fluido de corte contendo partículas de grafeno**. 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

NORTON, Robert. L. **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. 4. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NUSSBAUM, Guillaume. **Rebolos e Abrasivos**. São Paulo: Ícone, 1988.

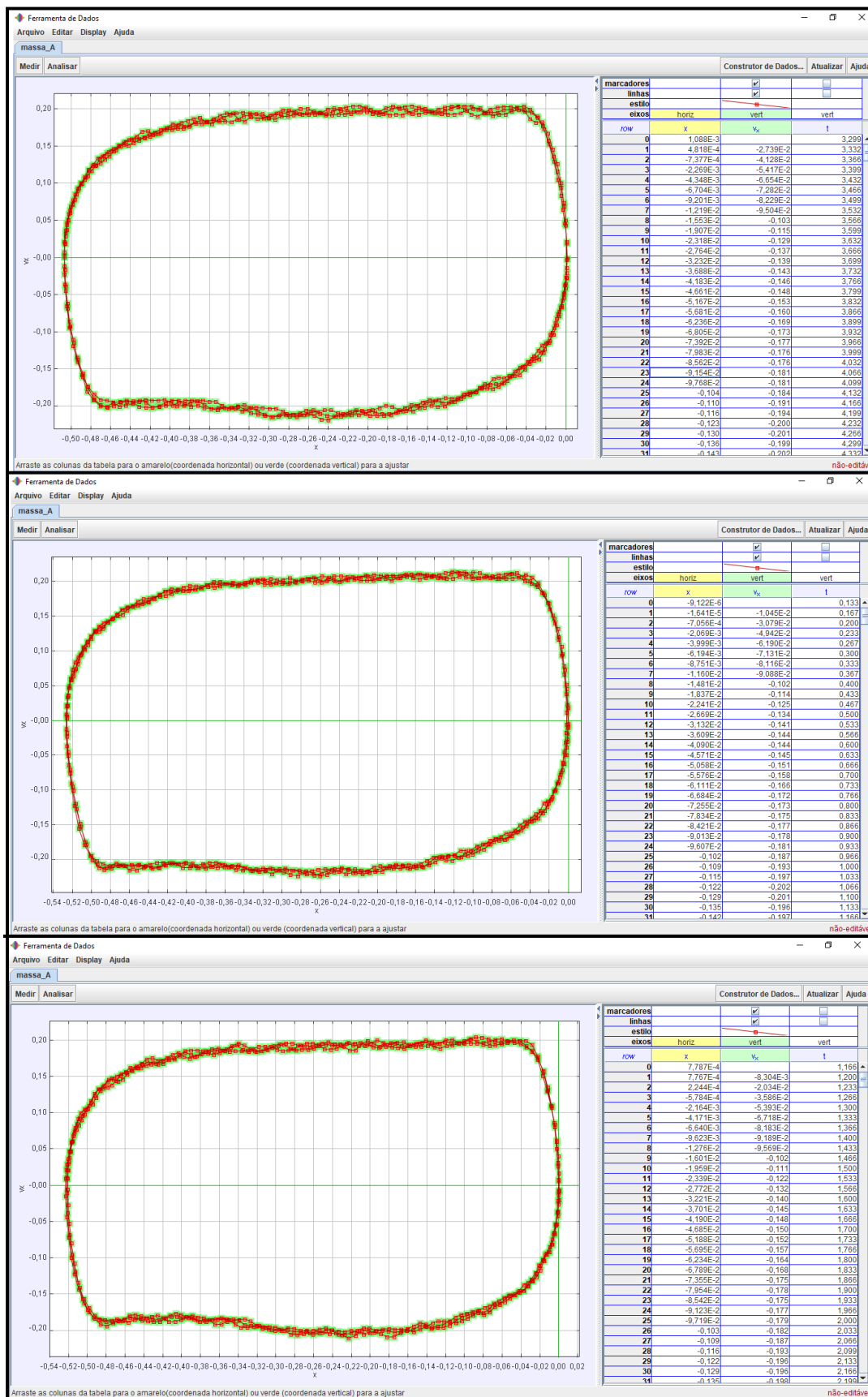
OLYMPUS CORPORATION (Japão). **Soluções em microscopia**: medição da rugosidade de superfícies. Medição da rugosidade de superfícies — Parâmetros. 2017. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>. Acesso em: 04 dez. 2021.

RE, F. del; DIX, M.; TAGLIAFERRI, F. Grinding burn on hardened steel: characterization of onset mechanisms by design of experiments. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 101, n. 9-12, p. 2889-2905, 12 dez. 2018. Springer Science and Business Media LLC.

ROSSINI, N. S.; DASSISTI, M.; BENYOUNIS, K. Y.; OLABI, A. G. **Methous of measuring residual stress in componentes**. *Materials and Desing*. v. 35, 2012, p. 588.

ULBRICHT, Gerson *et al.* **Análise da influência da velocidade da peça sobre a rugosidade no processo de retificação plana tangencial**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 10., 2020, Ponta Grossa: Aprepro, 2020. p. 1-9. Disponível em: <https://aprepro.org.br/conbrepro/2020/>. Acesso em: 22 abr. 2021.

APÊNDICE A – Gráfico de velocidades no software TRAKER.



Fonte: O autor (2021).

ANEXO A – Recorte do certificado de tratamento térmico

Dureza de corpos de prova, conforme peças de produção

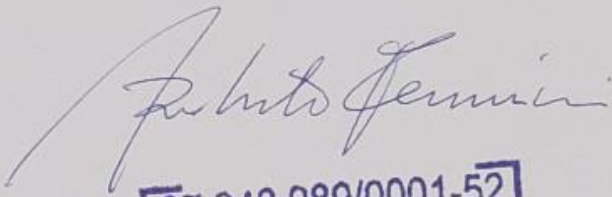
(Recorte de certificado de Tratamento Térmico):


ENSAIO DE DUREZA
Especificado
Dureza Superficial.....: Min: 61,00 Max: 65,00 Unid: HRC
Verificado
Min: 61,00 Max: 63,00 Unid: HRC

Dureza Efetiva a 0,60mm = 60HRC
Encontrado:60 HRC

ENSAIO DE CAMADA
Especificado
EHT Min: 1,200 Max: 1,400 mm
Verificado
Min: 1,200 mm

Dureza mínima a 1,20mm = 525HV1 (51HRC).
Encontrado:1,20mm





Fonte: Ferzza Equipamentos para Motocicletas.

ANEXO B – Instruções para o teste de líquido penetrante.



metalchek.com.br/loja/vp-30/

Pesquisa Pesquisar

- Liquido Penetrante ▾
- Particula Magnética ▾
- Deteção de Vazamentos ▾
- Luminárias Spectroline ▾
- Acessórios para Ensaio ▾



Líquido Penetrante Visível Metal-Chek VP-30

Tipo : II
Método: A

Preços e condições especiais, consulte agora:  

Com Metal-Chek Líquido Penetrante visível VP-30 lavável   água,   possível detectar descontinuidades superficiais, como trincas, dobras, etc., em materiais sólidos e não porosos. E também é indicado para testes de estanqueidade.

Após limpeza prévia com o Metal-Chek removedor E-59, o Metal-Chek Líquido Penetrante visível VP-30 pode ser aplicado com pincel, pistola, aerossol ou por imersão, e tem poder de penetração em áreas extremamente pequenas.

Após sua remoção, deve-se utilizar o revelador D-70 Metal-Chek, que irá mostrar os locais exatos para deteção de trincas superficiais e descontinuidades.

Documentos Relacionados

- FISPQ
- Descrição Técnica
- Ficha de Emergência

Penetrante VP-30	Tempo de penetração com temperatura de 10 C a 50 C: 10 a 60 min	Isotermia com aquecimento de 100 C a 200 C: 40 por min.	Isotermia de 5 min temperatura máxima da peça	Revela�o • D-70 • D-70 NF	Tempo: 10 a 60 min	Inspeção
------------------	---	---	---	---------------------------------	--------------------	----------

Fonte: <https://metalchek.com.br/loja/vp-30/>.