

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS CAPPUCIO CASTANHEIRA

EFEITO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE
FRESAMENTO SOBRE A QUALIDADE DE
SUPERFÍCIES ESPECULARES EM AÇOS
FERRAMENTA

SÃO CARLOS - SP
2023

LUCAS CAPPUCIO CASTANHEIRA

EFEITO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE FRESAMENTO SOBRE A QUALIDADE DE
SUPERFÍCIES ESPECULARES EM AÇOS FERRAMENTA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Carlos Eiji Hirata
Ventura

Coorientador: Prof. Dr. Fabio Antonio Xavier



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Lucas Cappucio Castanheira, realizada em 24/04/2023.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura (UFSCar)

Prof. Dr. Fabricio Tadeu Paziani (UFSCar)

Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro (UNESP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Anderson Collares Castanheira e Patricia Fatima Cappucio, pelo incentivo a todo momento e aos meus tios, Giovani Verdi Cappucio e Raquel Lucia Cappucio, pelo apoio necessário para execução e conclusão desse trabalho.

AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus familiares e amigos pelo incentivo constante e por toda a compreensão pelo tempo dedicado à realização desse trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr.-Ing. Carlos E. H. Ventura, pelo apoio, disponibilidade, conhecimentos passados e confiança para me motivar a realizar e desenvolver toda essa pesquisa.

Agradeço aos meus professores de pós-graduação, por todo o apoio e conhecimento disseminado.

Agradeço ao meu coorientador Prof. Dr. Fabio Antonio Xavier pelo apoio e pelas contribuições feitas.

Agradeço aos colegas Fábio Ricardo, Marcelo Kuroda, Fernando Hondei e Gediael Antunes, que me apoiaram durante a criação de todo o trabalho. Sem eles, não seria possível.

Agradeço às empresas Villares Metals, Seco Tools, Blaser e Tecno-How pelo apoio na realização dos testes e ensaios necessários para conclusão desse trabalho.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de financiamento 001) pelo apoio financeiro e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processo nº 2017/12309-7) pela disponibilização de um dos equipamentos necessários para a realização da pesquisa.

RESUMO

A importância da indústria de plásticos e a utilização deste tipo de material para os mais diversos fins levaram ao desenvolvimento de aços para manufatura de moldes de injeção. A fabricação do molde tem influência direta no prazo de entrega, nos custos e na qualidade dos produtos, sendo o fresamento um dos processos mais relevantes para sua produção. Dada a dificuldade em se usinar aços endurecidos e as geometrias comumente observadas em moldes de injeção, além da qualidade da superfície necessária para a geração de peças plásticas sem defeitos, uma estratégia adequada de fresamento deve ser escolhida, o que implica na definição não apenas dos parâmetros de corte e da ferramenta, mas também de sua trajetória. Assim, o presente trabalho tem como foco a investigação da influência de duas diferentes estratégias de corte no fresamento sobre a qualidade de superfície convexa (de curvatura constante) em dois tipos de materiais. A qualidade foi avaliada a partir dos diferentes parâmetros de rugosidade correlacionados com o brilho percebido e às características de cada material, como dureza e microestrutura. A partir dos resultados encontrados na etapa final de acabamento, foi possível constatar a influência positiva da estratégia de corte em paralelo na obtenção dos menores valores de rugosidade média S_a e máxima S_z em ambos os aços estudados, VH13IM e VTMPPlus, em comparação com a estratégia zig-zag. Esses resultados foram congruentes com as imagens geradas a partir das superfícies usinadas na etapa de acabamento. O conjunto de baixos valores de rugosidade com um perfil topográfico homogêneo da superfície levou a um maior brilho e grau de espelhamento.

Palavras-chave: Fresamento. Superfície complexa. Moldes e matrizes. Brilho. Acabamento.

ABSTRACT

The importance of the plastics industry and the use of this type of material for the most diverse purposes to the development of steel alloys for the manufacturing of injection molds. Mold manufacturing has a direct influence on product delivery time, costs, and quality, and milling is one of the most relevant processes for its production. Given the difficulty in machining hardened steels and the geometries commonly observed in injection molds, besides the necessary surface quality to generate plastic parts without defects, an adequate milling strategy must be chosen, which implies in defining not only the cutting parameters and the tool, but also its trajectory. Thus, the present work focuses on investigating the influence of two different cutting strategies in milling process on the surface quality of convex (constant curvature) surfaces on two types of material. The quality will be evaluated from the different roughness parameters correlated to the quality of the perceived gloss and will be evaluated and be correlated to the characteristics of each material, such as hardness and microstructure. After the tests, in the finishing step it was possible to verify the positive influence of the parallel strategy obtaining the lowest values of average roughness S_a and maximum S_z in both steel alloys VH13IM and VTMPPlus in comparison with the zig-zag strategy. Those results were congruent with the generated images from the machined surfaces by the finishing step. The combination of low roughness values with a homogeneous topographic profile of the surface led to a higher brightness and mirror finish.

Keywords: Milling. Free-form surface. Molds and dies. Gloss. Finishing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração do sobremetal teórico e real em superfície complexa	19
Figura 2 - Contato de uma ferramenta esférica com a peça em função do sentido de corte	20
Figura 3 - Estratégias de usinagem mais comuns: (a) espiral, (b) zig-zag, (c) contornos sucessivos	21
Figura 4 - Cisalhamento e deformação sob a aresta cortante da fresa de ponta esférica.	22
Figura 5 - Variação do contato da ferramenta ao longo do percurso de corte	23
Figura 6 - Fatores que influenciam a rugosidade de superfícies usinadas	25
Figura 7 - (a) Exemplo de bloco para confecção dos corpos de prova e (b) superfície final a ser obtida	29
Figura 8 - Micrografias sem ataque químico dos aços (a) VH13IM e (b) VTMPPlus - Aumento 100x Seção Longitudinal	31
Figura 9 - Microestrutura do aço VH13IM (a) Aumento 100x (b) Aumento 500x - Seção Longitudinal	32
Figura 10 - Microestrutura do aço VTMPPlus (a) Aumento 100x (b) Aumento 500x - Seção Longitudinal	32
Figura 11 - CENTRO CNC HERMLE C400	33
Figura 12 - Morsa KSC 125 Schunk para fixação das peças	34
Figura 13 - Fresa de topo High Feed para operação de desbaste	35
Figura 14 - Fresa toroidal para operação de pré-acabamento 1	35
Figura 15 - Fresa de ponta esférica para operação de pré-acabamento 2	36
Figura 16 - Fresa sólida de metal duro, com ponta esférica, diâmetro de 6 mm	36
Figura 17 - Mandril hidráulico para fixação da fresa utilizada no acabamento final	37
Figura 18 - Inclinação entre fresa e peça durante usinagem do Platô	37
Figura 19 - Microscópio confocal Alicona InfiniteFocus SL	38
Figura 20 - Microscópio Digital HIROX KH-1300	39
Figura 21 - Microscópio metalográfico Carl Zeiss	39
Figura 22 - Microdurômetro DURAMIN-40 AC1	40
Figura 23 - Simulação da trajetória da ferramenta com estratégia complementar profile finishing em associação às estratégias (a) Paralelo à superfície e (b) Contornos sucessivos	41
Figura 24 - Simulação da trajetória da ferramenta com estratégia complementar profile finishing com (a) alinhamento global e (b) direção de usinagem com curvas ISO	42
Figura 25 - Regiões determinadas para medição de rugosidade no corpo de prova usinado	43

Figura 26 - Definições dos parâmetros de (a) curtose e (b) assimetria em um perfil bidimensional	44
Figura 27 - Esquema de corte de amostras para análise metalográfica das subsuperfícies usinadas	45
Figura 28 - Amostras embutidas das regiões Platô e Curvilínea Superior para análises metalográficas e de microdureza	45
Figura 29 - Peças usinadas dos aços (a) VTMPPlus e (b) VH13IM	48
Figura 30 - Contato da ferramenta durante o percurso de corte nas regiões (a) inferior, (b) meio e (c) superior	49
Figura 31 - Micrografias da subsuperfície da região Platô do aço VH13IM após usinagem em (a) paralelo e em (b) zig-zag	50
Figura 32 - Micrografias da subsuperfície da região Curvilínea Superior do aço VH13IM após usinagem em (a) paralelo e em (b) zig-zag	50
Figura 33 - Micrografias da subsuperfície da região Platô do aço VTMPPlus após usinagem em (a) paralelo e em (b) zig-zag	51
Figura 34 - Micrografias da subsuperfície da região Curvilínea Superior do aço VTMPPlus após usinagem em (a) paralelo e em (b) zig-zag	51
Figura 35 - Curvas de microdureza Vickers na subsuperfície em função da profundidade a partir da superfície usinada para as regiões Platô e Curvilínea Superior do aço VH13IM fresado com estratégia de corte em paralelo	52
Figura 36 - Curvas de microdureza Vickers na subsuperfície em função da profundidade a partir da superfície usinada para as regiões Platô e Curvilínea Superior do aço VH13IM fresado com estratégia de corte em zig-zag	53
Figura 37 - Curvas de microdureza Vickers na subsuperfície em função da profundidade a partir da superfície usinada para as regiões Platô e Curvilínea Superior do aço VTMPPlus fresado com estratégia de corte em paralelo	53
Figura 38 - Curvas de microdureza Vickers na subsuperfície em função da profundidade a partir da superfície usinada para as regiões Platô e Curvilínea Superior do aço VTMPPlus fresado com estratégia de corte em zig-zag	54
Figura 39 - Rugosidade média na área Sa gerada pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões dos aços VH13IM e VTMPPlus	55
Figura 40 - Rugosidade máxima na área Sz gerada pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões dos aços VH13IM e VTMPPlus	57
Figura 41 - Valores de curtose S_{ku} gerados pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões dos aços VH13IM e VTMPPlus	58
Figura 42 - Valores de assimetria S_{sk} gerados pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões dos aços VH13IM e VTMPPlus	59
Figura 43 - Superfícies geradas pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões do aço VH13IM	60
Figura 44 - Superfícies geradas pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões do aço VTMPPlus	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das microinclusões dos aços VH13IM e VTMPPlus	31
Tabela 2 - Situações com valores de rugosidade média $S_a < 0,22 \mu\text{m}$	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição química dos aços VH13IM e VTMPPlus	30
Quadro 2 - Parâmetros de tratamento térmico para beneficiamento dos aços VH13IM e VTMPPlus	30

LISTA DE SIGLAS

AISI - *American Iron and Steel Institute*

Al - Alumínio

ASTM - *American Society of Testing Materials.*

CNC - Comando numérico computadorizado

HRc - *Hardness Rockwell C*

ISO - *International Organization for Standardization*

MQL - Mínima Quantidade de Lubrificação

N - Nitrogênio

SAE - Society of Automotive Engineers

Ti - Titânio

2D - Representação em duas dimensões

LISTA DE SÍMBOLOS

a_e – Penetração de trabalho (mm)

a_p - Profundidade de usinagem (mm)

f_z - Avanço por aresta (mm)

n - Rotação do eixo árvore (rpm)

S_a - Rugosidade média aritmética medida em uma área

S_{sk} - Grau de assimetria da distribuição das alturas de uma superfície

S_{ku} - Achatamento da distribuição das alturas de uma superfície

S_z - Rugosidade máxima, média de dez diferenças entre o pico mais alto e o vale mais profundo em uma superfície

v_c - Velocidade de corte (m/min)

v_f - Velocidade de avanço (mm/min)

λ - Comprimento de onda da luz incidente (nm)

θ - Ângulo de incidência da luz

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
3 REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1 FRESAMENTO DE MOLDES	17
3.1.1 Estratégias de Usinagem	18
3.1.2 Fresamento com Fresa de Ponta Esférica	21
3.2 SUPERFÍCIES DE PEÇAS FRESADAS	24
3.3 SUPERFÍCIES ESPECULARES: CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 CORPOS DE PROVA	29
4.2 CENTRO DE USINAGEM E FERRAMENTAS	33
4.3 EQUIPAMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE	38
4.4 EQUIPAMENTOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA SUBSUPERFÍCIE	39
4.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	40
4.5.1 Descrição das operações	46
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA SUBSUPERFÍCIE	49
5.2 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA DA SUPERFÍCIE	55
5.3 QUANTIFICAÇÃO DO BRILHO	62
6 CONCLUSÕES	65
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 30 anos, o advento do plástico como material para bens de consumo causou uma mudança significativa na indústria de manufatura. O vidro e o aço foram substituídos por plástico em muitas áreas, incluindo interiores e exteriores de automóveis, eletrônicos, utensílios domésticos, recipientes e componentes médicos. A aparência de itens de plástico corresponde a uma indicação de sua qualidade superficial e muitos setores têm buscado melhorias nesse sentido, o que tem demandado avanços na indústria de moldes.

A técnica mais comum para produção de moldes é o fresamento, processo de usinagem em que a remoção de material se realiza de modo intermitente, pela combinação de movimentos de rotação e translação da ferramenta. Tal processo pode ser aplicado na produção de superfícies planas, contornos, rasgos, cavidades, entre outras geometrias. O desafio das modernas indústrias de usinagem está focado, principalmente, em alcançar alta qualidade e taxa de produção. O processo de fresamento apresenta vantagens frente a outros métodos, pois pode ser automatizado e permite curtos tempos de processamento (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2018).

Tendo em vista as características do processo de injeção de plástico, aços endurecidos são comumente utilizados na fabricação de moldes. O fresamento direto desses materiais fornece benefícios substanciais em termos de redução do custo de fabricação e tempo de produção, quando comparado à rota convencional, que consiste na usinagem em condição recozida, tratamento térmico, eletroerosão, retificação e polimento manual. Um grande número de estudos voltados para a usinagem de aços de alta dureza pesquisa principalmente a fabricação de uma ampla gama de moldes e matrizes (FRITZ; DALCIN; DALCIN, 2017).

Neste contexto e com foco na obtenção de superfícies consideradas especulares, a escolha adequada da trajetória da ferramenta é um pré-requisito para que se alcance a qualidade requerida, relevante principalmente em aplicações automotivas e aeroespaciais. A uniformidade da superfície do molde, também chamada de espelhamento, permite que peças moldadas tenham brilho e transparência, como lentes, faróis, artefatos espelhados e molduras de faróis, ou seja, peças que necessitam de um alto grau de polimento e quase isentas de deformações na fotometria (REBEGGIANI; ROSÉN, 2013).

Assim, considerando-se as tecnologias atualmente disponíveis em termos de máquinas-ferramentas, pós-processadores e softwares de programação CNC, este trabalho tem como foco a investigação da influência das estratégias paralelo à superfície (mesma direção) e zig-zag de fresamento sobre a qualidade de superfícies consideradas especulares, o que será avaliado por meio do brilho e de diferentes parâmetros de rugosidade. Tendo em vista a importância da produtividade na cadeia de fabricação de moldes, sem comprometer a qualidade final da superfície gerada.

2 OBJETIVOS

Tem-se como objetivo principal determinar o efeito do processo de fresamento de acabamento na qualidade de superfícies especulares produzidas a partir das estratégias paralelo à superfície e zig-zag nos aços ferramenta VH13IM e VTMPPlus, utilizados na fabricação de moldes de injeção plástica. Para melhor acompanhamento da evolução do trabalho, são definidos ainda três objetivos específicos: (1) determinação da rugosidade para as diferentes estratégias e materiais; (2) análise da topografia das superfícies geradas pelas duas estratégias em ambos os aços; (3) determinação da correlação entre os parâmetros de rugosidade e brilho.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 FRESAMENTO DE MOLDES

Moldes são ferramentas essenciais para a produção em massa na indústria de manufatura atual, usados principalmente na moldagem por injeção e em processos de fundição. As técnicas atuais conseguem fabricar moldes de precisão, que contribuem para a produção em massa de produtos com o mesmo formato e qualidade em uma ampla gama de áreas (MESQUITA; MORAES, 2012; SANTOS, 2021).

A indústria de moldes tem forte influência sobre os custos, a qualidade e o prazo de entrega de um produto. Boujelbene et al. (2004) investigaram os custos dos produtos plásticos e concluíram que 30% estão relacionados à fabricação do molde, 25% ao processo de injeção, 25% ao material plástico, 10% ao projeto e simulação, 5% ao aço do molde e 5% a outros custos. Consoante aos mesmos autores, 60% do tempo de fabricação do molde podem ser atribuídos à fabricação das cavidades. Eles afirmam ainda que são diversos os inconvenientes na fase de fabricação dos moldes, desde as limitações tecnológicas dos equipamentos e máquinas até a falta de desenvolvimento do processo de fabricação. Adicionalmente, para atender à demanda do mercado, projetistas têm utilizado geometrias de forma livre no projeto do produto, o que o torna mais atraente, mas aumenta sua complexidade de fabricação.

Os materiais para moldes incluem os aços-ferramenta de elevada dureza, com alto teor de carbono e/ou cromo, fatores estes que prejudicam seu acabamento, realizado com frequência pela operação de fresamento (MESQUITA; MORAES, 2012), processo que utiliza uma ferramenta rotativa multicortante (fresa) que avança pelo material para geração de determinada superfície. A operação de fresamento é reconhecida por sua versatilidade e elevadas taxas de remoção de material (MACHADO et al., 2009), sendo amplamente utilizada no setor aeroespacial e automotivo (SONI, 2015). O fresamento pode ser concordante ou discordante: no primeiro, o sentido da passagem do dente da fresa pela peça coincide com o sentido de avanço, ocorrendo a espessura máxima de cavaco no início do corte; no segundo, o sentido do movimento dos dentes da fresa é oposto ao sentido de avanço da peça em relação à ferramenta, a espessura máxima de cavaco sendo atingida no fim do corte (SANTOS, 2021). Devido à menor deformação de material na entrada do dente, melhor qualidade de acabamento é obtida normalmente com o corte concordante, o

qual costuma ser evitado apenas na usinagem de peças com camadas endurecidas, já que prejudicam a vida da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Na manufatura de moldes e matrizes são produzidas diversas superfícies consideradas complexas (ALBANO, 2007), as quais, conforme colocado por Schützer e Helleno (2009), raramente possuem definição analítica, exigindo que sua modelagem seja feita por aproximações. Costa e Volpato (2007) afirmam que os termos “*free-form surfaces*” ou “*sculptured surfaces*” têm sido frequentemente encontrados na literatura como sinônimos de superfícies complexas.

Para a usinagem de tais superfícies, a geração da trajetória da ferramenta, principal tarefa a ser desempenhada, deve ser feita por aplicativos específicos e uma má escolha dessas estratégias envolve aumentos de tempo na usinagem e diminui a qualidade da peça (VILA et al., 2019). A preparação do processo de usinagem deve ser baseada na análise geométrica e topológica da peça, cujas informações devem ser associadas às de usinagem (PATTARO JÚNIOR, 2019). O fresamento de moldes tem sido investigado com foco na otimização dos caminhos da ferramenta e do corte e a eficiência na remoção de material, sendo a vida útil da ferramenta e a estabilidade do processo pontos de atenção (NUNES et al., 2008).

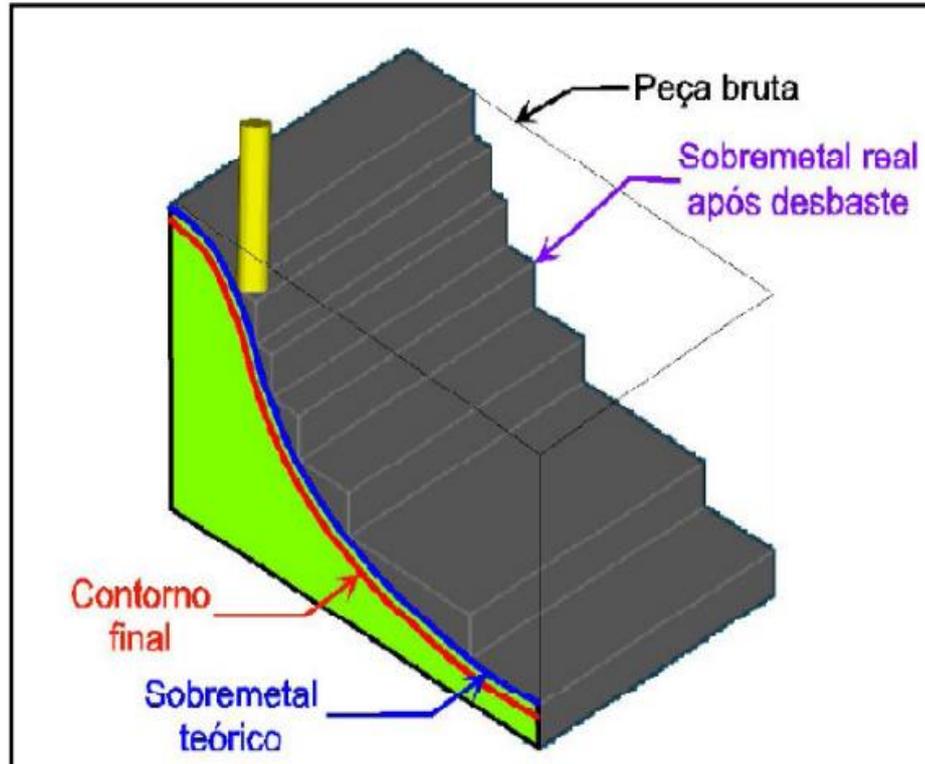
3.1.1 Estratégias de Usinagem

Três operações de fresamento comuns, sendo elas classificadas em: desbaste, pré-acabamento e acabamento, são de extrema importância na qualidade da superfície gerada em uma peça usinada. A operação de desbaste tem a função de usinar a matéria-prima até que se aproxime da geometria desejada e é responsável pela retirada da maior parte do material usinado. Após a operação de desbaste, tem-se a de pré-acabamento, responsável pela remoção dos degraus formados pela operação anterior. Esta ação é projetada para aproximar o sobremetal real do teórico (Figura 1). Por fim, a operação de acabamento possui por finalidade remover o sobremetal das operações de desbaste e pré-acabamento (DE SOUZA; ULBRICH, 2009).

Devido a esta ser a última operação realizada no processo de fresamento e de gerar de fato a superfície final da peça, a operação de acabamento possui grande variedade de possibilidades de estratégias de usinagem, possuindo grande influência sobre a qualidade, tempo e desgaste da ferramenta. Principalmente quando a

usinagem é de superfícies complexas, em que o par ferramenta/peça não é o único que influencia a qualidade do processo (WEINERT; GUNTERMANN, 2000).

Figura 1 – Ilustração do sobremetal teórico e real em superfície complexa



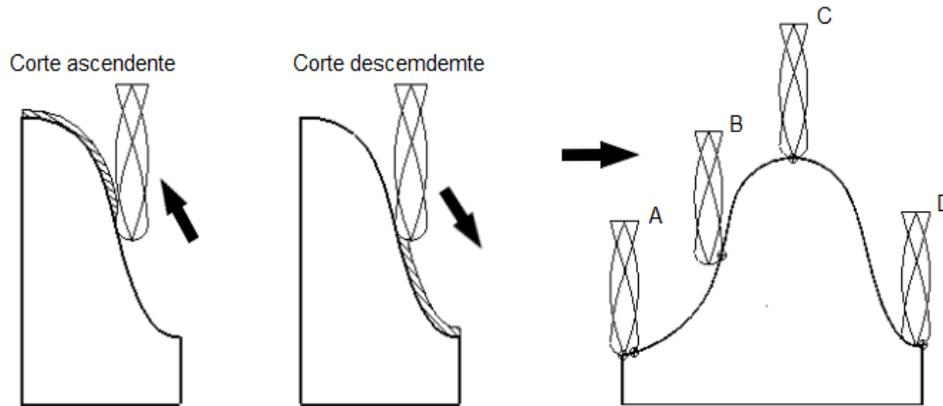
Fonte: SCHÜTZER; STANIK; DE SOUZA (2001).

No fresamento de formas livres, comumente realizado por fresas de topo esférico, o contato entre a ferramenta de corte e a superfície usinada muda constantemente, devido à trajetória da ferramenta sobre a geometria da peça (PATTARO JÚNIOR, 2019). São encontrados muitos trabalhos sobre o tema, que tratam principalmente do desgaste da ferramenta (RODRIGUES, 2009; BAGCI; YÜNCÜOĞLU, 2017; FRITZ; DALCIN; DALCIN, 2017; SCANDIFFIO; DINIZ; SOUZA, 2017, VILA et al., 2019). Ventura (2010) destaca que a trajetória da ferramenta pode influenciar o tempo real de usinagem, as acelerações e desacelerações envolvidas em alterações de direção dos movimentos na máquina.

O estudo das condições do contato ferramenta-peça e suas implicações durante o fresamento de formas livres é de grande importância para a obtenção da geometria correta. A operação de acabamento de superfícies complexas, como ocorre na fabricação de moldes e matrizes, é realizada por uma ferramenta de ponta esférica, o que causa a variação do ponto de contato e seu diâmetro efetivo de corte. São ilustradas na Figura 2 as variações de contato da ferramenta percorrendo a superfície

da peça quando o volume de remoção é uniforme. No sentido descendente (Figura 2D), utiliza-se a parte esférica ou o centro da ferramenta, que possui velocidade de corte zero, dependendo da relação entre o sobremetal e o raio da fresa. Já no sentido ascendente (Figura 2B), a ferramenta corta com o diâmetro nominal (SOUZA, 2004).

Figura 2 - Contato de uma ferramenta esférica com a peça em função do sentido de corte

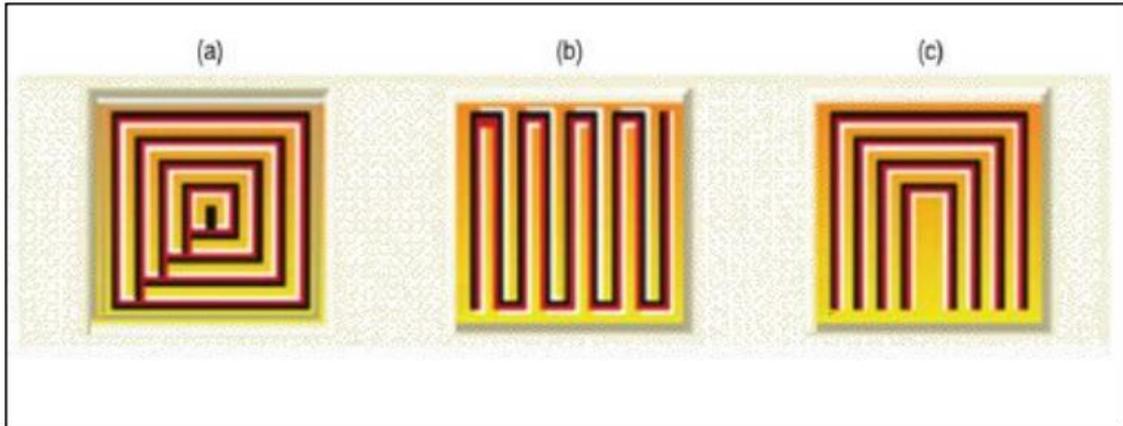


Fonte: Adaptado de SOUZA (2004).

Dentre as estratégias mais utilizadas encontram-se a espiral, a zig-zag e a de contornos sucessivos, conforme mostrado na Figura 3 e descrito por Rodrigues (2009):

- Espiral: caminho espiral feito do centro para a borda, com trajetórias uniformemente espaçadas; usado para usinagem de cavidades (Figura 3a).
- Zig-zag: utilizado em operações de desbaste, quando não há preocupação com o acabamento e precisão; descreve deslocamentos da ferramenta em trajetórias paralelas com afastamento constante (Figura 3b).
- Contornos sucessivos: movimentação semelhante à estratégia zig-zag, porém com início sempre na mesma face (Figura 3c).

Figura 3 - Estratégias de usinagem mais comuns: (a) espiral, (b) zig-zag, (c) contornos sucessivos



Fonte: RODRIGUES (2009).

Albano (2007) afirma que, como ferramentas de acabamento, são usadas comumente fresas de metal duro revestido, com ponta esférica, na faixa de 1 a 10 mm de diâmetro, estando as precisões dimensionais e de forma requeridas na faixa de 0,02 a 0,05 mm. Máquinas com comando numérico computadorizado (CNC), que permitem elevadas velocidades, geração de caminhos complexos e monitoramento do processo para controle em malha fechada são também indispensáveis (ELBESTAWI et al., 1997).

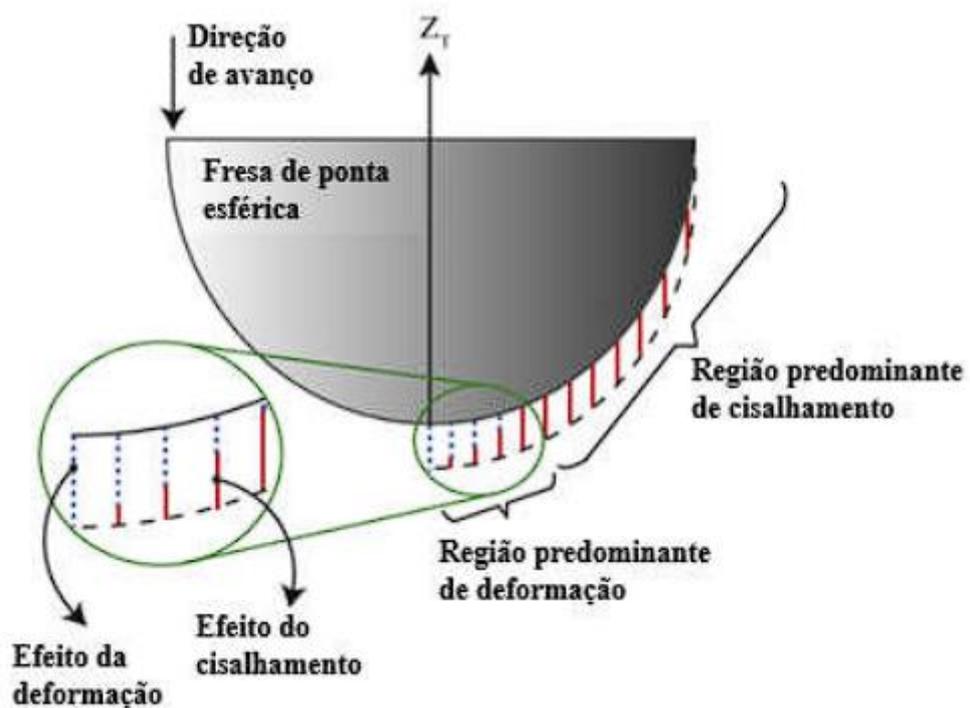
3.1.2 Fresamento com Fresa de Ponta Esférica

Fresas de ponta esférica são fundamentais para proporcionar forma e acabamento por meio de sua alta precisão e ampla gama de formatos. Além disso, elas possuem longa durabilidade e baixo custo de utilização em comparação com outros métodos de usinagem de peças, devido à sua melhor condição de contato da ferramenta de corte com a superfície usinada (CHIANG et al., 1995).

Durante o processo de usinagem, quando o centro da fresa de ponta esférica entra em contato com a superfície da peça, ocorre deformação plástica do material próximo à região do centro, devido à velocidade de corte ser nula, ocasionando o esmagamento do material ao invés de seu cisalhamento, influenciando, assim, diretamente a rugosidade, a estabilidade do processo e a tolerância dimensional (Figura 4) (TUYSUZ; ALTINTAS; FENG, 2013; DE SOUZA et al., 2014a; DE SOUZA et al., 2014b).

Tuysuz, Altintas e Feng (2013) simularam o processo de usinagem em três e cinco eixos para a liga de alumínio Al7050 utilizando uma fresa de ponta esférica e três condições diferentes, sendo elas fresamento de geometria complexa, superfície plana inclinada e fresamento em mergulho, validando os resultados a partir de um processo experimental. Os autores verificaram que o contato do centro da fresa de ponta esférica produz uma deformação superficial na peça, decorrente do escoamento plástico, gerando o esmagamento do material ao invés de cisalhá-lo.

Figura 4 - Cisalhamento e deformação sob a aresta cortante da fresa de ponta esférica.



Fonte: TUYSUZ, ALTINTAS e FENG (2013).

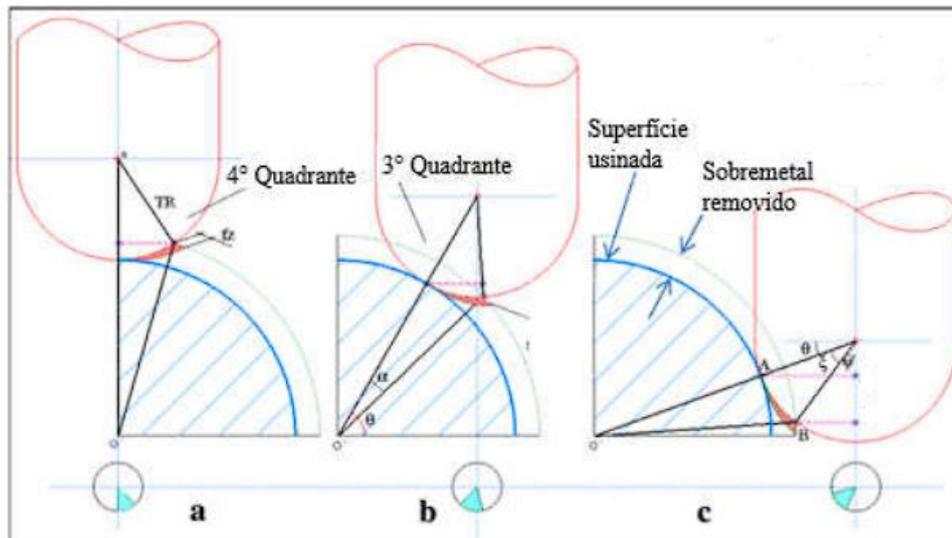
Ainda segundo os autores, o movimento de avanço no sentido descendente apresenta predominância de deformação em relação ao sentido ascendente por manter o contato constante do centro da fresa de ponta esférica com a superfície da peça usinada, ocasionando deformação plástica do material usinado nas proximidades do centro da ferramenta.

No experimento feito por Toh (2004^a), que executou a usinagem de um aço AISI H13 com dureza de 52 HRC em geometria plana com 75° de inclinação, obteve-se valores maiores de rugosidade utilizando o sentido de corte descendente devido ao fluxo lateral de cavaco gerado pelo processo. Segundo o autor, o sentido de corte

ascendente é melhor para usinar peças de geometrias complexas com fresa de ponta esférica, devido à redução do raio efetivo de corte da ferramenta ser menor do que no sentido descendente, reduzindo o contato entre o centro da ponta da fresa e a superfície usinada.

Segundo o estudo de De Souza et al. (2014b), é ilustrado na Figura 5 três tipos de posição de contato da ferramenta de ponta esférica em relação a uma superfície circular (um quarto de cilindro com 27 mm de diâmetro), com parâmetros geométricos utilizados para a determinação do raio efetivo e da velocidade de corte. Em regiões superiores, onde a ponta do centro da fresa esférica teve contato com a peça, foram obtidas as maiores rugosidades. Tanto os resultados de rugosidade quanto os de vibração decorreram da deformação elástica e plástica provenientes dessa região central da ponta da ferramenta, onde a velocidade de corte é zero, causando o esmagamento do material e não seu cisalhamento.

Figura 5 - Variação do contato da ferramenta ao longo do percurso de corte



Fonte: Adaptado de DE SOUZA et al. (2014b).

3.2 SUPERFÍCIES DE PEÇAS FRESADAS

Os efeitos mecânicos, químicos e térmicos gerados pelos processos de usinagem podem modificar a condição da superfície de um componente, levando a características diferentes daquelas encontradas em seu núcleo e afetando seu desempenho quando submetida às condições de trabalho. Além disso, a configuração dos parâmetros do processo, devido às suas influências diretas e/ou indiretas, define o acabamento superficial (KALPAKJIAN, 1995).

Integridade da superfície é a condição de uma superfície produzida por um processo qualquer avaliada pelas propriedades mecânicas, metalúrgicas, químicas, topológicas e por seu desempenho operacional, podendo ser medida pela variação da dureza, tensão residual, rugosidade, resistência à corrosão, entre outros (GRIFFITHS, 2001; STIPKOVIC, 2017).

Após o processo de usinagem, a superfície costuma apresentar diferentes camadas, de diferentes composições e comportamento mecânico, resultantes de deformação plástica e endurecimento. Superfícies de baixa qualidade decorrem de diversos defeitos provenientes do processo de fabricação, como problemas do material exemplo de inclusões não metálicas e possível falta de controle dos parâmetros de corte do processo, que podem originar altas temperaturas e elevados níveis de tensão (STIPKOVIC, 2017).

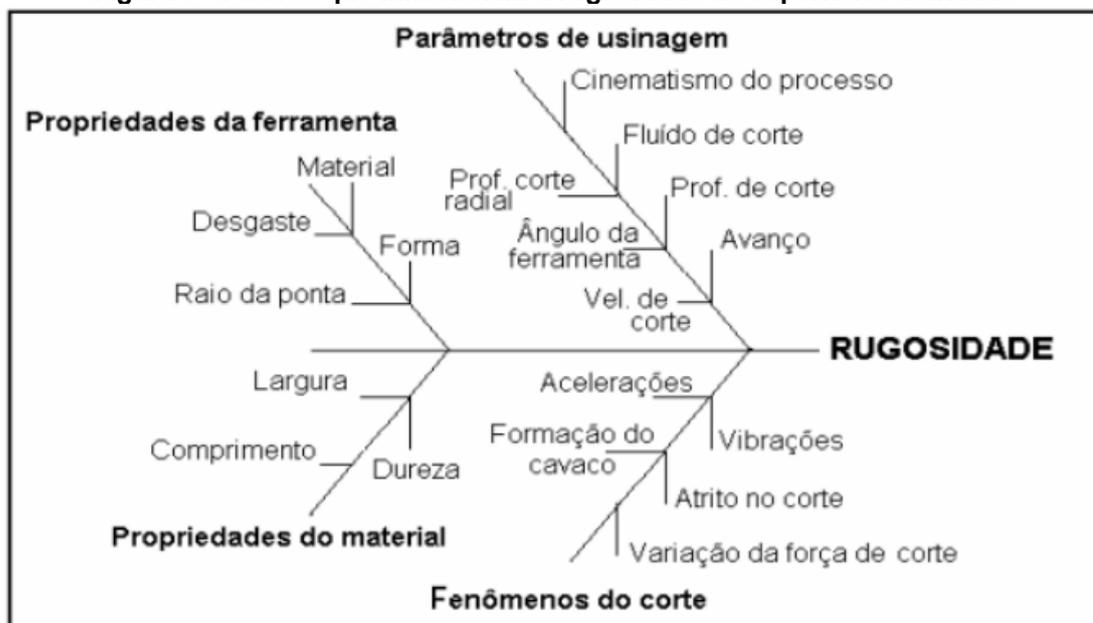
Os principais defeitos referentes à qualidade da superfície podem ser classificados como: trincas ou microfissuras; crateras, moessa, que podem ser o resultado de ataques químicos ou físicos; dobras, muitas vezes causadas pela sobreposição de material durante a usinagem; zonas afetadas termicamente, quando parte do material é submetido a ciclos térmicos sem fusão; inclusões de elementos não metálicos embutidos em peças fundidas de metal; ataque intergranular, gerando enfraquecimento da fronteira de grão por fragilização e corrosão pelo metal líquido; transformação metalúrgica, incluindo transformações de fase, ressolidificação e descarbonetação; deformação plástica causada por altas tensões de atrito, geometria e temperatura da ferramenta ou do processo; tensões residuais de compressão ou tração, geralmente causadas por deformação não uniforme ou diferentes distribuições de temperatura (RECH; HAMDI; VALETTE, 2008).

A escolha do processo de fabricação é baseada no custo, tempo e precisão. No entanto, outro critério tem se tornado cada vez mais importante: o desempenho da

superfície, principalmente ligado à fadiga, à corrosão e ao desgaste. Normalmente, o desempenho está diretamente relacionado à textura da superfície. Suas irregularidades, especialmente vales ou sulcos, induzem concentrações de tensão que possibilitam a plastificação do material e a propagação de trincas (RECH; HAMDÍ; VALETTE, 2008; CALIL, 2013).

Muitos dos testes de usinabilidade são baseados em medições de rugosidade e os materiais de difícil usinagem são aqueles que apresentam maior dificuldade para se alcançar um bom acabamento (VALIM, 2018). Tem-se que a rugosidade é uma medida da textura de uma superfície e pode ser quantificada pelos desvios verticais de uma superfície real em relação a uma possível forma ideal (SONI, 2015; YAN et al., 2009). Para Ghazali et al. (2008), a rugosidade é um parâmetro importante na determinação da qualidade de produtos obtidos por processo de usinagem. A aspereza da superfície pode ser afetada pelos parâmetros de corte, propriedades do material da peça, parâmetros da ferramenta e condições da máquina-ferramenta, como é ilustrado na Figura 6. Uma superfície com acabamento uniforme e baixa rugosidade traz benefícios em relação à resistência à fadiga e à minimização do atrito.

Figura 6 - Fatores que influenciam a rugosidade de superfícies usinadas



Fonte: Adaptado de ÇOLAC; KURBANOGLU; KAYAKAN (2007).

Oliveira; De Souza e Diniz (2018) investigaram a influência da velocidade de corte na rugosidade da superfície no fresamento de uma geometria de forma livre. Os

resultados mostraram que a rugosidade diminuiu com o aumento da velocidade de corte, de acordo com a posição da ferramenta ao longo do caminho. Os autores verificaram ainda que a inclinação do eixo da ferramenta afeta a dinâmica de fresamento e a rugosidade da superfície usinada.

Anteriormente, Scandiffio; Diniz e de Souza (2017) reforçaram que o fresamento em superfícies de forma livre difere do fresamento de superfície planas, porque o contato da ferramenta com a superfície da peça muda constantemente, causando a variação da velocidade efetiva de corte. Os resultados obtidos mostraram que diferentes trajetórias da ferramenta podem reduzir a rugosidade e que o tempo de usinagem também pode ser reduzido com aumento da velocidade de avanço para manutenção do avanço por dente em diferentes inclinações da ferramenta. Segundo os mesmos autores, a melhor estratégia para o fresamento de superfícies convexas é manter o diâmetro efetivo da ferramenta constante nas diferentes trajetórias, utilizando o corte ascendente.

Toh (2004^a) verificou na operação de acabamento por fresamento que menores penetrações de trabalho são preferíveis, de modo que baixas forças de corte possam ser mantidas e vibrações indesejadas sejam evitadas. Com isso, menores rugosidades e maior precisão podem ser obtidas. Bagci e Yüncüoğlu (2017) notaram que a variação da espessura do cavaco em diferentes estratégias corresponde a uma das principais razões para a variação das forças e, conseqüentemente, para a deflexão da ferramenta e a ocorrência de erros de forma.

3.3 SUPERFÍCIES ESPECULARES: CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES

O molde precisa ter uma superfície adequada para atendimento das demandas de desmoldagem e desgaste. Além disso, ela deve ser quase livre de defeitos, brilhante e lisa, com níveis de rugosidade na faixa de nanômetros. Destaca-se, porém, que, em relação à preparação da superfície de moldes para aplicações de alto brilho, a maioria do conhecimento ainda é acumulada por polidores individuais, com longa experiência na área (REBEGGIANI, ROSÉN, 2014).

Conforme apontam Vicente Neto e Helleno (2011), o polimento manual de uma área de 10 mm² leva cerca de 30 min para ser realizada, sendo que 12% a 15% dos custos e 30% a 50% do tempo gasto com a fabricação estão associados com esta atividade. Os autores afirmam ainda que a rugosidade nas cavidades dos moldes para injeção de termoplásticos impacta diretamente as características das peças injetadas. Moldes para injeção de plástico devem ter rugosidades médias Ra inferiores a 0,1 µm, que costumam ser alcançadas por polimento manual, já que o uso de equipamentos automáticos leva a desvios dimensionais e de forma maiores que 0,020 mm e 0,015 mm, respectivamente, valores máximos permitidos para moldes de injeção (DOMINGUES JUNIOR, 2009).

Mesquita e Moraes (2012) afirmam que a maioria das aplicações finais de peças plásticas depende das condições de sua superfície, que estão diretamente relacionadas à qualidade da superfície do molde, o qual é normalmente feito com aços especiais, devido a uma adequada combinação de propriedades como resistência à tração, dureza, condutividade térmica e custo, mas também pela possibilidade destes materiais serem processados por diferentes processos de fabricação, como usinagem, soldagem, polimento e texturização (HARADA, 2008).

O polimento fornece ao molde uma superfície reflexiva e brilhante, que facilita a extração da peça moldada, reduz o risco de rebarbas e a ocorrência de corrosão (MENGES; MICHAELI; MOHREN, 2000), e leva a um aumento considerável da resistência ao desgaste (HARADA, 2008). O brilho, conforme Souza (2007), é entendido como a capacidade de reflexão de luz incidente predominantemente em uma mesma direção, conhecida como direção especular. Esta capacidade é influenciada pela capacidade de absorção da luz e qualidade da superfície.

De acordo com Vorburger et al. (2007), desde o início da tecnologia óptica, compreende-se que as superfícies lisas são semelhantes a espelhos e que as

superfícies ásperas espalham a luz em muitas direções. Este fenômeno tem sido usado para quantificar a rugosidade da superfície, por meio do método de dispersão da luz. Quando um feixe de luz incide sobre uma superfície lisa, a maioria da luz viaja na direção especular, de maneira que o ângulo de reflexão seja igual ao ângulo de incidência. Com o aumento da rugosidade, mais luz é espalhada em diferentes direções e o feixe especular refletido perde intensidade (SOUZA, 2007). A medição do brilho, conforme a norma ISO 2813:2014, pode ser realizada por meio de equipamentos conhecidos por brilhômetros, que medem a relação entre a luz emitida do equipamento e aquela refletida pela superfície analisada.

O processo de usinagem de moldes é uma etapa exigente no que diz respeito ao tempo, ao custo e à tecnologia. Alterações no material para melhoria da usinabilidade têm sido investigadas, mas a utilização de aços de alta usinabilidade geralmente leva a uma diminuição em sua qualidade de polimento (BOUJELBENE et al., 2004; MESQUITA, 2012). A relação inversa entre usinabilidade e polibilidade ocorre essencialmente devido a inclusões não metálicas macias, que facilitam a quebra do cavaco e atuam na lubrificação da zona de contato cavaco-ferramenta, mas alteram a microestrutura do material e podem gerar defeitos superficiais (REBEGGIANI; ROSÉN, 2014).

Visando evitar ou diminuir o tempo do processo adicional de polimento e possibilitar a aplicação de aços com usinabilidade melhorada, serão investigadas neste trabalho estratégias de fresamento para a obtenção de superfícies especulares para moldes de injeção de plástico.

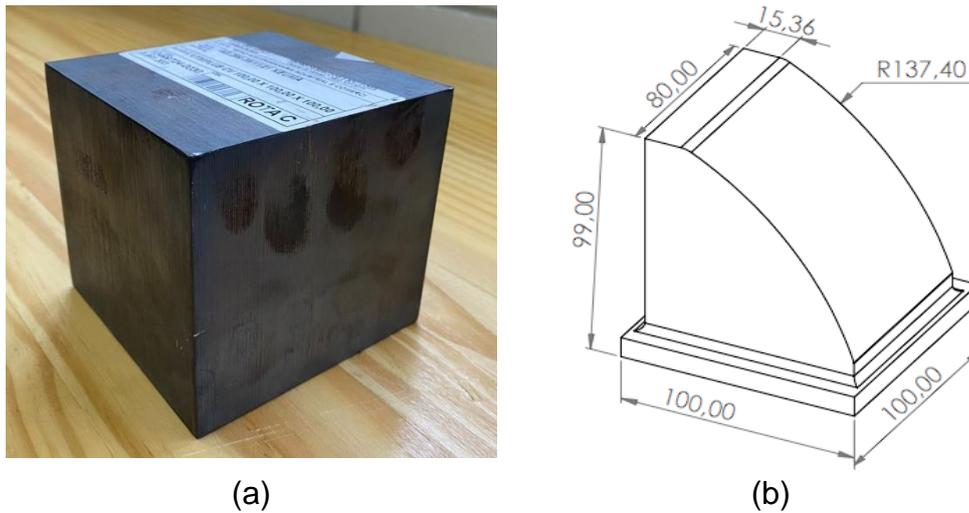
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as informações relativas à metodologia que foi empregada para o desenvolvimento do trabalho.

4.1 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados foram produzidos a partir de blocos com dimensões de 100 mm x 100 mm x 100 mm, conforme ilustrado na Figura 7a. A superfície final a ser analisada, com largura de 80 mm, é composta por uma superfície plana superior, com espessura de 15,36 mm, e uma superfície cilíndrica, com raio de 137,40 mm e arco de 73,19° (Figura 7b).

Figura 7 - (a) Exemplo de bloco para confecção dos corpos de prova e (b) superfície final a ser obtida



Fonte: Próprio autor.

Testes de usinagem foram realizados em dois diferentes materiais: aços VH13IM e VTMPPlus, ambos fornecidos pela Villares Metals, cujas composições químicas estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Composição química dos aços VH13IM e VTMPPlus

Marca Villares Metals	AISI / ASTM / SAEt	DIN	C %	Si %	Mn %	Co %	Cr %	Mo %	Ni %	V %	W %	Outros
VH13IM	H13 refundido	1.2344	0,40	1,00	0,35	-	5,20	1,30	-	0,90	-	-
VTMPPlus	-	-	0,50	0,30	0,30	-	3,85	3,05	-	0,50	-	-

Fonte: VILLARES METALS (2021).

Os materiais foram temperados conforme orientações dos catálogos da Villares Metals em Forno Rubig tipo H6 (capacidade 800 kg, dimensões máximas 600 mm x 600 mm x 800 mm) para tratamento a vácuo e triplamente revenidos em fornos de revenimento sob atmosfera neutra (dimensões máximas 600 mm x 600 mm x 1300 mm), cujos parâmetros estão descritos na Quadro 2.

Quadro 2 - Parâmetros de tratamento térmico para beneficiamento dos aços VH13IM e VTMPPlus

Tipo de Material	Austenitização (Temp. / tempo)		Pressão de resfriamento (bar)	1º Revenimento (Temp. / tempo)	2º Revenimento (Temp. / tempo)	3º Revenimento (Temp. / tempo)	Dureza (HRC/HV)
VH13IM	1020 °C	30 min	6	500 °C / 3 horas	595 °C / 3 horas	530 °C / 3 horas	50/513
VTMPPlus	1020 °C	30 min	6	500 °C / 3 horas	595 °C / 3 horas	530 °C / 3 horas	56/613

Fonte: VILLARES METALS (2022).

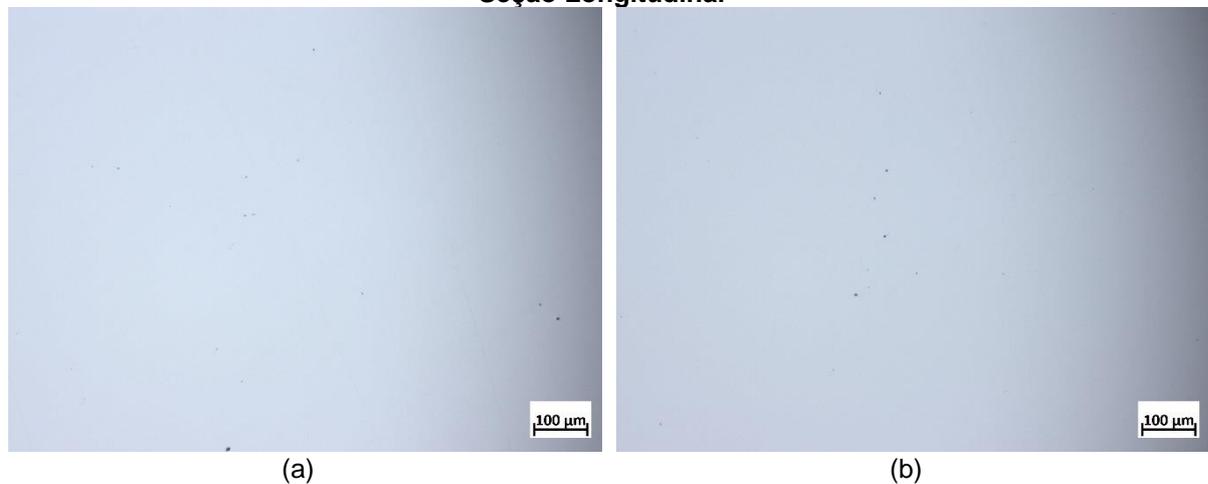
O aço VH13IM é amplamente utilizado em matrizes para fundição por gravidade e sob pressão de ligas leves, especialmente ligas de Al e Mg, em peças complexas ou de maior porte, moldes para injeção de polímeros termoplásticos com alto grau de polimento e alta resistência mecânica, matrizes de alto desempenho para forjamento em prensa e facas de tesouras a quente, enquanto o aço VTMPPlus corresponde a uma alternativa ao anterior, sendo aplicado em matrizes e punções para forjamento a quente e a morno, matrizes de extrusão de alumínio e outros metais não ferrosos, matrizes e insertos de geometria complexa para injeção de alumínio, lâminas para corte a quente e aplicações em trabalho a frio com exigência de alta tenacidade.

A medição de dureza, realizada no Durômetro WILSON R574, seguiu a norma ASTM E18, que contém métodos para determinação da dureza Rockwell de materiais metálicos. As respectivas durezas encontradas nos corpos de prova após o tratamento térmico foram 50 HRC para o VH13IM e 56 HRC para o VTMPPlus. O balanceamento químico do VTMPPlus propicia alcançar durezas mais elevadas, tanto

na superfície quanto em camadas mais internas em comparação ao VH13IM, graças à sua maior temperabilidade.

A preparação das amostras para análise metalográfica foi feita por meio do seguinte procedimento: corte por serra *cut-off* com disco abrasivo de óxido de alumínio; embutimento a quente com baquelite; lixamento com lixas 100, 220, 320, 400 e 600#; polimento em politriz automática MAPS 2, com pastas de diamante de 6, 3 e 1 μm . Nessa condição, após o polimento, a amostra está apta para a classificação do nível de inclusões em que se encontra o material. O procedimento de classificação das inclusões não metálicas foi feito por microscopia óptica utilizando um microscópio metalográfico Carl Zeiss, modelo Axio Observer Z1m e com o auxílio de mapas descritos na norma ASTM E45 método A (pior campo), que classifica as inclusões por tipos, formas, tamanhos, quantidades e distribuições. As micrografias sem ataque químico dos aços VH13IM e VTMPPlus são apresentadas na Figura 8 e seus resultados classificados conforme a Tabela 1.

Figura 8 - Micrografias sem ataque químico dos aços (a) VH13IM e (b) VTMPPlus - Aumento 100x Seção Longitudinal



Fonte: Próprio autor.

Tabela 1 - Classificação das microinclusões dos aços VH13IM e VTMPPlus

Material	Tipos de inclusões (G = Grossa / F = Fina)			
	A (Sulfetos)	B (Silicatos)	C (Alumina)	D (Óxidos)
VH13IM	G 0,0 / F 0,0	G 0,0 / F 0,0	G 0,0 / F 0,0	G 0,0 / F 1,0
VTMPPlus	G 0,0 / F 0,0	G 0,0 / F 0,0	G 0,0 / F 0,0	G 0,0 / F 1,0

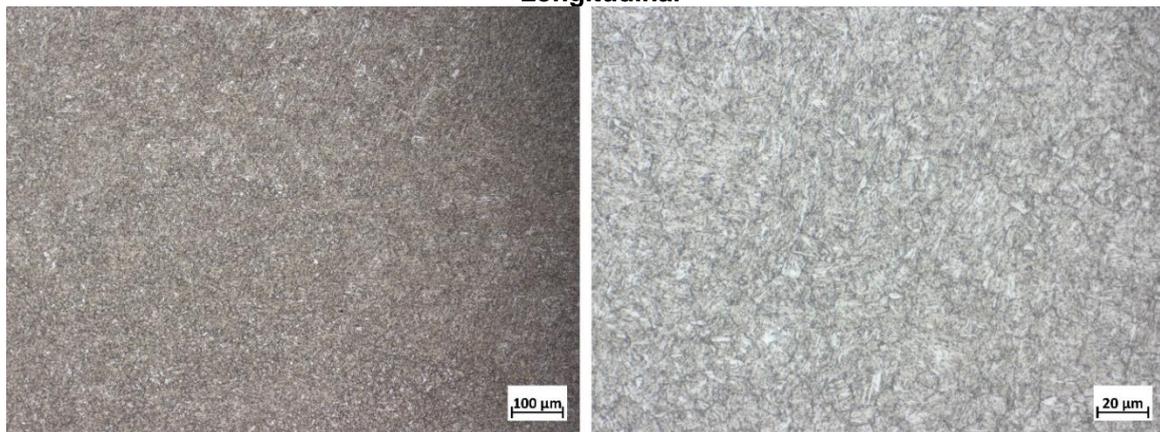
Fonte: ASTM E45.

Os resultados acima demonstram um alto grau de limpeza dos aços, característicos de materiais produzidos por processo ESR (*Eletro Slag Remelting*), no

qual são observadas poucas microinclusões de óxidos dispersos na matriz para ambos os aços.

Após análise das microinclusões, as amostras foram submetidas a ataque químico com Nital 4% e avaliadas em microscópio óptico. As microestruturas dos aços VH13IM e VTMPPlus são apresentadas nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 - Microestrutura do aço VH13IM (a) Aumento 100x (b) Aumento 500x - Seção Longitudinal

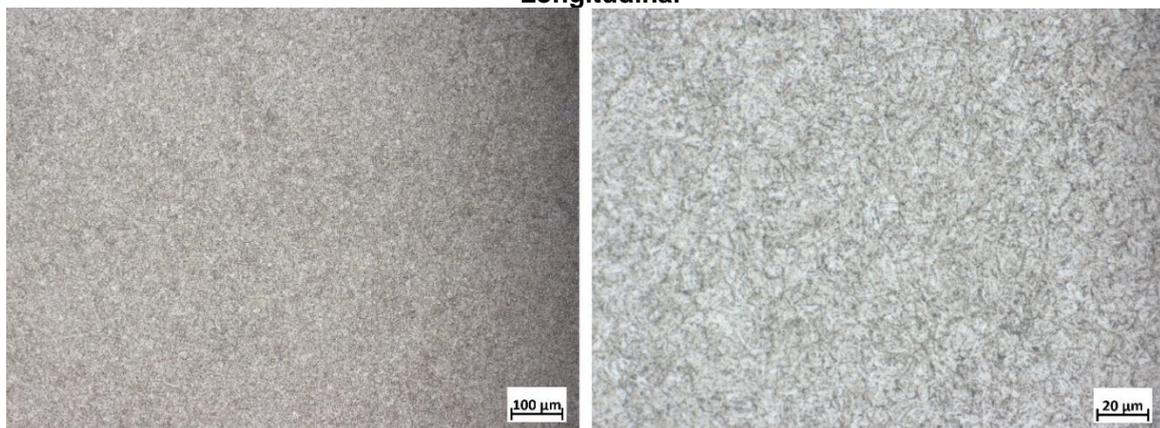


(a)

(b)

Fonte: Próprio autor.

Figura 10 - Microestrutura do aço VTMPPlus (a) Aumento 100x (b) Aumento 500x - Seção Longitudinal



(a)

(b)

Fonte: Próprio autor.

Ambas as microestruturas possuem carbonetos finos dispersos em matriz martensítica revenida de granulação fina e homogênea 7 ASTM.

4.2 CENTRO DE USINAGEM E FERRAMENTAS

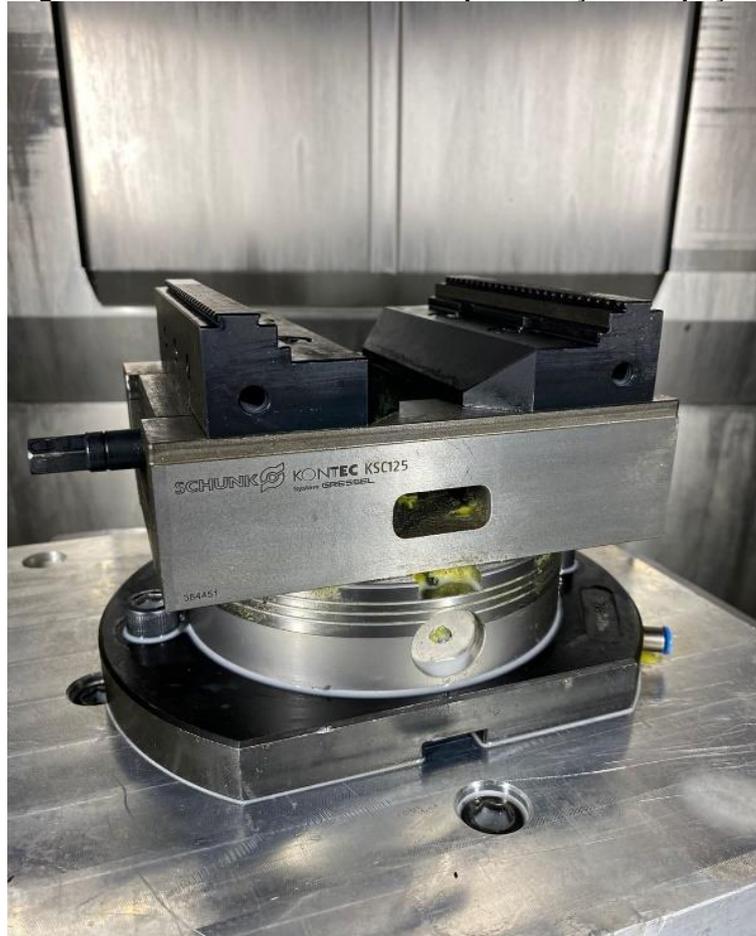
Os experimentos foram realizados no centro de usinagem cinco eixos Hermle C400 (Figura 11), com comando numérico computadorizado Heidenhain iTNC 530, alocado no Tech Center da empresa Tecno-How, em Sorocaba/SP. O equipamento, equipado com turbina para alimentação de ar comprimido a *spindle* podendo gerar rotações até 65000 rpm, permite velocidades máximas de avanço de 45 (eixos X e Y) e 60 m/min (eixo Z) e precisão de posicionamento de $\pm 0,1 \mu\text{m}$. A morsa utilizada para fixação das peças foi a KSC 125 da marca Schunk, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 11 - CENTRO CNC HERMLE C400



Fonte: Próprio autor.

Figura 12 - Morsa KSC 125 Schunk para fixação das peças



Fonte: Próprio autor.

Sequencialmente, até a operação de acabamento final para análise da superfície, as peças foram submetidas a uma operação de desbaste e duas de pré-acabamento. As ferramentas utilizadas, da fabricante Seco Tools, são apresentadas a seguir:

- Operação de desbaste: cabeçote de fresa de topo *High Feed* (LPHW09T420TR-D12 MH1000) acoplada em cone mandril Combimaster (Figura 13); diâmetro de 32 mm; quatro insertos de metal duro classe ISO H com cobertura de composição (Al, Ti, N) aplicada por processo PVD (VP15TF); ângulo de posição de 11°, de saída de 0° e de inclinação de 14°.

Figura 13 - Fresa de topo *High Feed* para operação de desbaste



Fonte: Próprio autor.

- Operação de pré-acabamento 1: fresa toroidal de metal duro classe ISO H com cobertura HXT à base de silício (JHF181100E1R200.0Z4-HXT) (Figura 14); diâmetro de 10 mm; quatro arestas de corte; raio de ponta 2 mm; ângulo de hélice de 10° e de saída de -2°.

Figura 14 - Fresa toroidal para operação de pré-acabamento 1



Fonte: SECOTOOLS (2022).

- Operação de pré-acabamento 2: fresa sólida de ponta esférica de metal duro classe ISO H com cobertura HXT à base de silício (JH112100E3B.0Z2-HXT) (Figura 15); diâmetro de 10 mm; duas arestas de corte; ângulo de hélice de 28° e de saída de 0°.

Figura 15 - Fresa de ponta esférica para operação de pré-acabamento 2



Fonte: SECOTOOLS (2022).

- Operação de acabamento final: fresa sólida de ponta esférica de metal duro classe ISO H com cobertura HXT à base de silício (JH112060D2B.0Z2-HXT) (Figura 16); diâmetro de 6 mm; duas arestas de corte; ângulo de hélice de 28° e de saída de 0°.

Figura 16 - Fresa sólida de metal duro, com ponta esférica, diâmetro de 6 mm



Fonte: SECOTOOLS (2022).

A fim de se evitar o efeito do desgaste da ferramenta sobre as características superficiais dos corpos de prova fresados, utilizou-se uma fresa por superfície. A fixação da última fresa para a operação de acabamento foi feita no Mandril Hidráulico porta pinça (E930458340870) fornecido pela SECOTOOLS, conforme Figura 17.

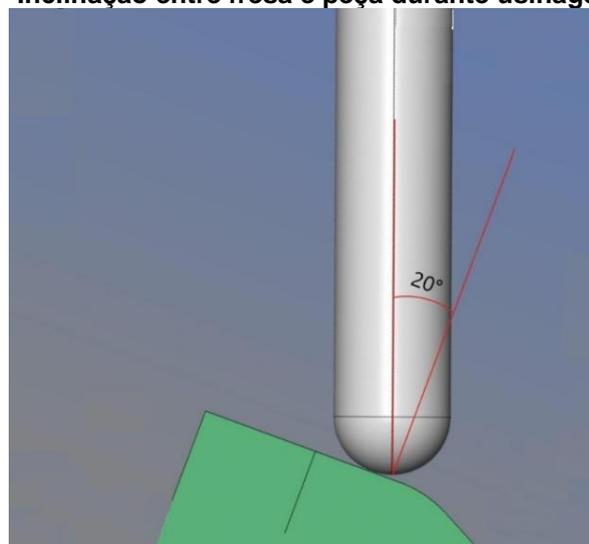
Figura 17 - Mandril hidráulico para fixação da fresa utilizada no acabamento final



Fonte: Próprio autor (2022).

Foram utilizados três eixos principais da máquina CNC para executar a operação de acabamento, de modo a minimizar instabilidades provenientes dos eixos extras. Assim, na superfície curva, o eixo da ferramenta se manteve paralelo ao eixo Z da máquina. Para a usinagem da superfície superior plana (aqui chamada de Platô) na última operação de acabamento, foi utilizado o quarto eixo do centro de usinagem para inclinação da mesa em 20° (Figura 18) com o intuito de se evitar o contato do centro da ferramenta com a superfície para melhor efeito de corte.

Figura 18 - Inclinação entre fresa e peça durante usinagem do Platô



Fonte: Próprio autor.

4.3 EQUIPAMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Para medição da rugosidade das superfícies usinadas, os corpos de prova foram analisados no microscópio para análise tridimensional de imagens Alicona InfiniteFocus SL (Figura 19), alocado no Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar. O equipamento, ligado a um computador pessoal com o software Alicona Metrology Measurement, possibilita o cálculo de diferentes parâmetros de rugosidade e de perfil, com aumento de até 500x com as lentes disponíveis.

Figura 19 - Microscópio confocal Alicona InfiniteFocus SL



Fonte: Próprio autor.

Para observação do aspecto topográfico das superfícies usinadas foi utilizado o microscópio digital HIROX KH-1300 (Figura 20), com capacidade de ampliação de 5 a 3000 vezes, disponibilizado no centro de pesquisa da Villares Metals.

Figura 20 - Microscópio Digital HIROX KH-1300



Fonte: Próprio autor.

4.4 EQUIPAMENTOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA SUBSUPERFÍCIE

As análises metalográficas deste trabalho foram obtidas utilizando o microscópio metalográfico Carl Zeiss modelo Axio Observer Z1m (Figura 21) com capacidade de análise e ampliação de 50 a 1000 vezes, alocado no laboratório metalográfico da empresa Villares Metals.

Figura 21 - Microscópio metalográfico Carl Zeiss



Fonte: Próprio autor.

Para ensaio de microdureza da subsuperfície das amostras usinadas de ambos os aços VH13IM e VTMPPlus, foi utilizado o microdurômetro DURAMIN-40 AC1 (Figura 22) alocado no laboratório metalográfico da empresa Villares Metals.

Figura 22 – Microdurômetro DURAMIN-40 AC1



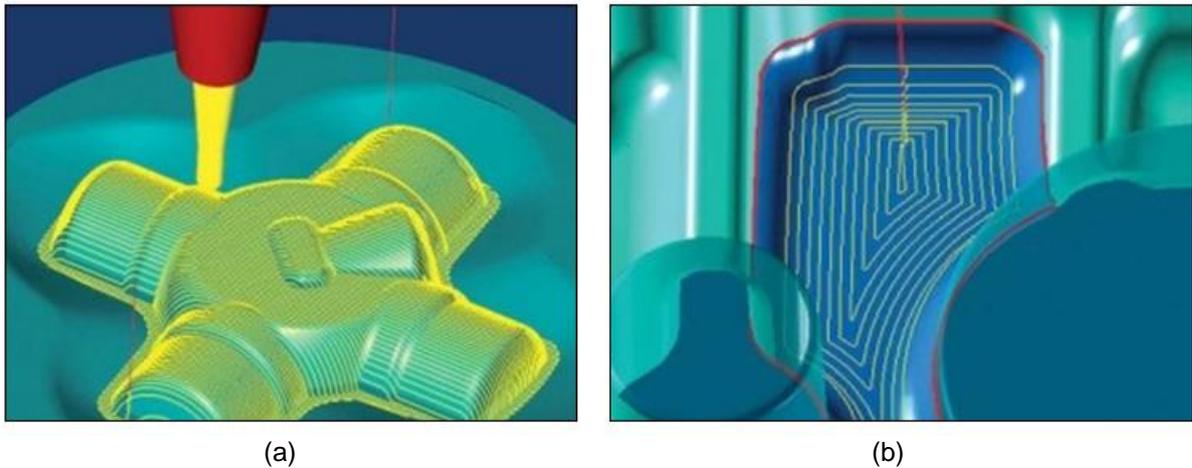
Fonte: Próprio autor.

4.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a geração das superfícies finais pela operação de acabamento foram testadas duas estratégias de usinagem (i) Zig-zag e (ii) Paralelo (mesma direção), ambas associadas à estratégia complementar *profile finishing*, conforme nomenclatura do fabricante do *software* CAM Hypermill. Cada estratégia foi aplicada em uma das metades da superfície convexa de cada material, totalizando a usinagem de quatro superfícies (duas estratégias utilizadas em cada corpo de prova), sem a realização de réplicas. Para a estratégia de corte em zig-zag, o corte teve início na parte inferior do corpo de prova, percorrendo a superfície no sentido ascendente e concordante até a parte superior e retornando no sentido descendente e discordante. Na estratégia de corte em paralelo, a ferramenta inicia na parte inferior da peça, percorrendo somente o sentido de corte ascendente e concordante.

A estratégia complementar *profile finishing* oferece funções de otimização para usinar individualmente áreas complexas e para adaptar os caminhos controlados numericamente às propriedades do modelo. Tem como característica o fresamento perto dos contornos (OPEN MIND, 2019), conforme é mostrado na Figura 23.

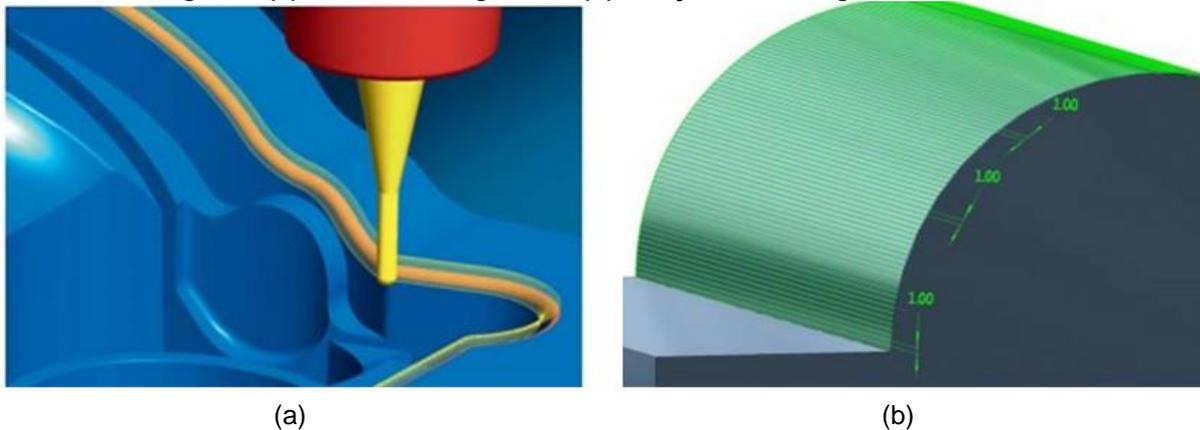
Figura 23 - Simulação da trajetória da ferramenta com estratégia complementar *profile finishing* em associação às estratégias (a) Paralelo à superfície e (b) Contornos sucessivos



Fonte: Open Mind (2019).

A estratégia permite usinagem precisa de superfícies individuais e raios de transição com distâncias de caminho uniformes. Ela pode ser realizada com alinhamento global (Figura 24a) ou definindo a direção de usinagem com curvas ISO (isoparamétricas) de superfície NURBS (*Non-Uniform Rational Basis Spline*) (Figura 24b). NURBS é uma fórmula matemática que permite representar a geometria de curvas, círculos, arcos e superfícies em espaço tridimensional. Nesta última, os caminhos de fresamento seguem as curvas ISO U e V, que compõem a superfície NURBS que indica as direções (U e V), formando a grade ou uma malha com os pontos de controle aos quais são alinhadas automaticamente, facilitando o fresamento de várias superfícies sem retrainer a ferramenta. A estratégia de alinhamento global determina automaticamente a direção de fresamento ideal com base no limite mais longo da superfície selecionada. O usuário define se a trajetória da ferramenta prossegue diagonal ou livremente (OPEN MIND, 2019).

Figura 24 - Simulação da trajetória da ferramenta com estratégia complementar *profile finishing* com (a) alinhamento global e (b) direção de usinagem com curvas ISO



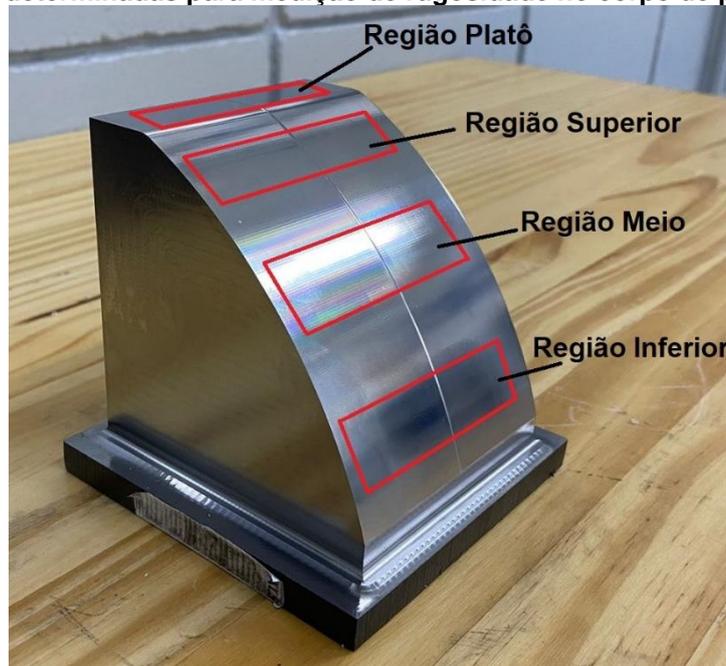
Fonte: Open Mind (2019).

Todas as operações previstas nos testes de fresamento foram realizadas com parâmetros de corte constantes, escolhidos para cada operação em comum acordo com as empresas fornecedoras dos materiais, das ferramentas e do software CAM, independentemente do material a ser usinado.

O sistema MQL (mínima quantidade de lubrificante) foi utilizado em todos os processos de usinagem a uma pressão de 6 bar com o óleo Vascomill MMS FA 2, fornecido pela empresa Blaser, de modo a se obter melhores resultados em relação à rugosidade. De acordo com Ali et al. (2017), a utilização do MQL em comparação à usinagem a seco no fresamento da liga de alumínio 1100, variando as rotações do eixo árvore, levou a menores valores de rugosidade Ra, principalmente quando houve o aumento dessa variável, evitando o atrito entre a ferramenta e a peça e, desse modo, controlando a temperatura de usinagem e garantindo melhores resultados na rugosidade. Melhores acabamentos também foram obtidos por The-Vinh et al. (2016), que testaram variações de óleo e diferentes pressões em aplicação MQL no fresamento do aço endurecido H13 (50 HRC). Os autores constataram que estas são as duas variáveis que mais impactam na rugosidade da superfície, pois contribuem para o menor desgaste da ferramenta, preservando a integridade da superfície.

De maneira a se analisar toda a superfície convexa e evitar uma análise apenas parcial, as superfícies geradas foram divididas em quatro regiões, sendo elas: região inferior, 10 mm acima do final da curvatura; região meio, 50 mm acima da região inferior; região superior, 10 mm abaixo da aresta de intersecção entre o Platô e a superfície curva; região Platô, cerca de 9 mm da aresta externa da peça. A Figura 25 apresenta as quatro regiões indicadas na peça final após o processo de usinagem.

Figura 25 - Regiões determinadas para medição de rugosidade no corpo de prova usinado

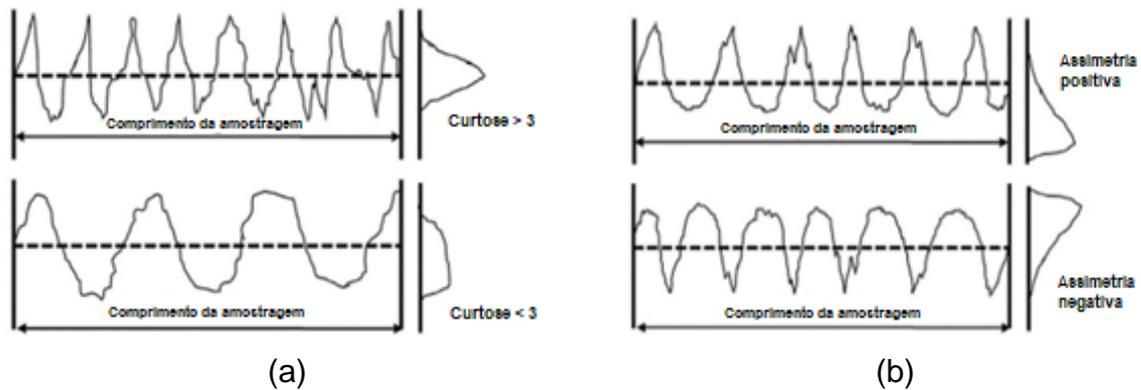


Fonte: Próprio autor.

Após os experimentos, cada superfície gerada foi avaliada pelos parâmetros de área rugosidade média S_a , rugosidade máxima S_z , curtose S_{ku} (achatamento da distribuição do perfil) e assimetria S_{sk} (posicionamento da distribuição do perfil) em quatro regiões de cada metade definida, com áreas de 25 mm^2 .

Entre os diferentes parâmetros de rugosidade citados, o primeiro, S_a , corresponde à média aritmética da ordenada absoluta $Z(x, y)$ na área de avaliação, representa a média da diferença da altura média para o plano médio; o segundo, S_z , representa a soma da altura máxima do pico e a profundidade máxima do vale na área de avaliação; o terceiro, S_{ku} (Figura 26a), descreve a distribuição do perfil, sendo a medida do grau de achatamento ou agudeza dos picos presentes nesse perfil dentro da área analisada. Sendo o valor de S_{ku} menor que três, a superfície apresenta picos mais achatados e vales com menor profundidade; se o valor for igual a três, apresenta uma distribuição Gaussiana no perfil das alturas; e caso o valor seja maior que três, a superfície pode apresentar picos altos e agudos, ou vales estreitos e profundos. O último parâmetro, S_{sk} (Figura 26b), é uma medida do grau de assimetria das alturas de uma superfície em relação a um plano médio. Um valor negativo indica uma predominância de vales estreitos e picos largos na superfície, enquanto um valor positivo indica a ocorrência de vales largos e picos estreitos (ZENG et al., 2018).

Figura 26 - Definições dos parâmetros de (a) curtose e (b) assimetria em um perfil bidimensional



Fonte: Adaptado de ZENG et al (2018).

Em complemento dos parâmetros de rugosidade, a topografia das superfícies geradas no trabalho foi analisada no microscópio digital HIROX KH-1300, na condição apresentada na Figura 20. As imagens (Figuras 43 e 44) obtidas correspondem ao centro de cada região usinada por sua estratégia, localizado a 20 mm das bordas da peça sob ampliação de 100 vezes.

A preparação das amostras para análise metalográfica teve como referência um corte paralelo 40 mm abaixo da superfície Platô da peça usinada (Figura 25) englobando a região Superior curvilínea, utilizando uma Serra Fita de metal duro. Na sequência essa sessão foi dividida longitudinalmente em máquina de corte abrasivo *cut-off* em quatro partes iguais de 20 mm de largura (Figura 27), que propiciou a análise do contorno na região central de cada estratégia utilizada.

Figura 27 - Esquema de corte de amostras para análise metalográfica das subsuperfícies usinadas



Fonte: Próprio autor.

Conforme Figura 27, as setas (1) e (2) indicam as faces de perfil das regiões usinadas pelas estratégias zig-zag e paralelo respectivamente, que foram embutidas a quente com baquelite (Figura 28). As etapas de lixamento e polimento para o embutimento seguiram o procedimento já descrito anteriormente no item 4.1. Para a análise metalográfica foi utilizado o equipamento microscópio metalográfico Carl Zeiss modelo Axio Observer Z1m com ampliação de 500 vezes para identificação de anomalias subsuperficiais, com e sem ataque químico.

Figura 28 - Amostras embutidas das regiões Platô e Curvilínea Superior para análises metalográficas e de microdureza



Fonte: Próprio autor.

Os ensaios de microdureza em escala HV 0,05/10s (Vickers) foram realizados no equipamento DURAMIN-40 AC1, nas regiões Platô e curvilínea Superior, ambas próximas e seguindo uma mesma geratriz. As medições foram realizadas iniciando a 30 μm da superfície, com espaçamento de 50 μm entre cada impressão segundo norma ASTM E384-22.

4.5.1 Descrição das operações

Na usinagem dos corpos de prova foram aplicadas as operações de desbaste, pré-acabamento 1, pré-acabamento 2 e acabamento, tendo sido utilizadas as mesmas condições para todos eles.

A operação de desbaste foi realizada pelo caminho de contornos sucessivos sempre no sentido concordante, utilizando-se os seguintes parâmetros: rotação do eixo árvore (n) de 895 rpm, velocidade de avanço (v_f) de 2041 mm/min, velocidade de corte (v_c) de 90 m/min, avanço por dente (f_z) de 0,57 mm, profundidade de usinagem (a_p) de 0,4 mm, largura de corte (a_e) de 19,2 mm, sobremetal deixado de 0,5 mm.

A operação de pré-acabamento 1 tem por finalidade apenas eliminar o excedente de material deixado pelo desbaste. Para isso, foi utilizada uma trajetória de corte paralela à superfície, com corte concordante e ascendente. Os parâmetros utilizados foram: rotação do eixo árvore (n) de 3820 rpm, velocidade de avanço (v_f) de 3820 mm/min, velocidade de corte (v_c) de 120 m/min, avanço por dente (f_z) de 0,25 mm, profundidade de usinagem (a_p) de 0,20 mm, largura de corte (a_e) de 3 mm.

Para o pré-acabamento 2, etapa complementar da operação anterior, foi aplicada uma estratégia de corte paralelo à superfície, com sentido ascendente e direção concordante. Os parâmetros utilizados foram: rotação do eixo árvore (n) de 9550 rpm, velocidade de avanço (v_f) de 1910 mm/min, velocidade de corte (v_c) de 300 m/min, avanço por dente (f_z) de 0,1 mm, profundidade de usinagem (a_p) de 0,4 mm; largura de corte (a_e) de 0,1 mm, sobremetal deixado de 0,05 mm.

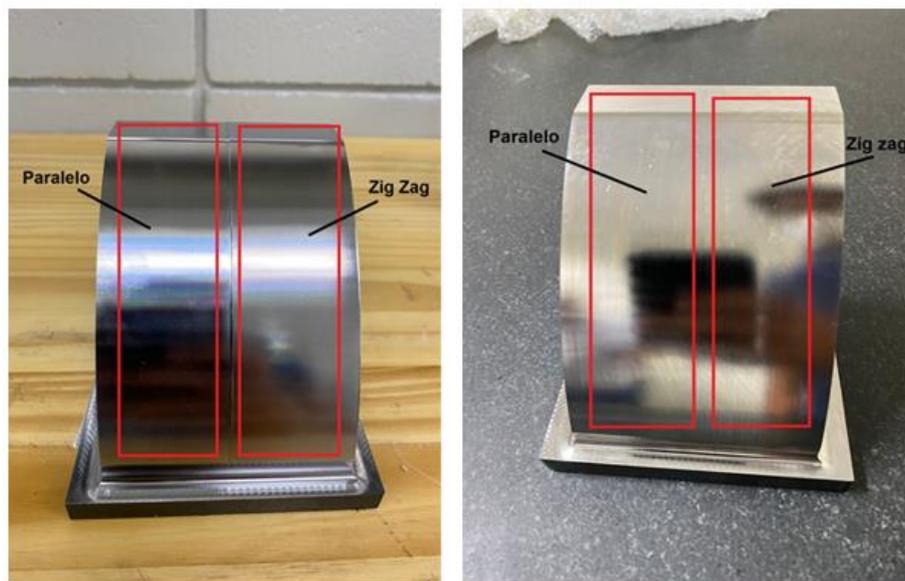
A operação de acabamento final confere à superfície suas características definitivas e, assim, é a operação utilizada para analisar a influência das estratégias sobre o acabamento da superfície. Os parâmetros utilizados foram: rotação do eixo árvore (n) de 15000 rpm, velocidade de avanço (v_f) de 2000 mm/min, velocidade de

corte (v_c) de 282 m/min, avanço por dente (f_z) de 0,07 mm, profundidade de usinagem (a_p) de 0,02 mm, largura de corte (a_e) de 0,025 mm.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste capítulo correspondem às caracterizações da subsuperfície, da topografia e do brilho percebido para ambos os aços VH13IM e VTMPPlus usinados pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag, conforme indica a Figura 29.

Figura 29 - Peças usinadas dos aços (a) VTMPPlus e (b) VH13IM



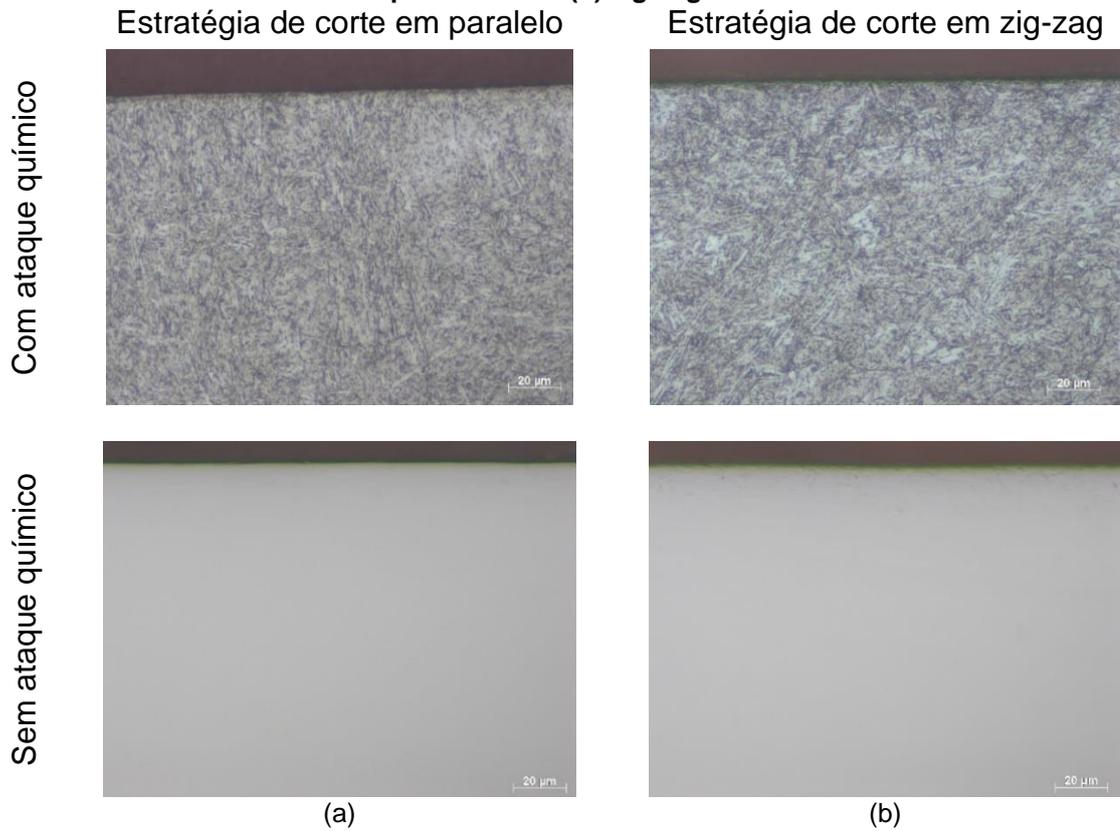
a) VTMPPLUS

b) VH13IM

Fonte: Próprio autor.

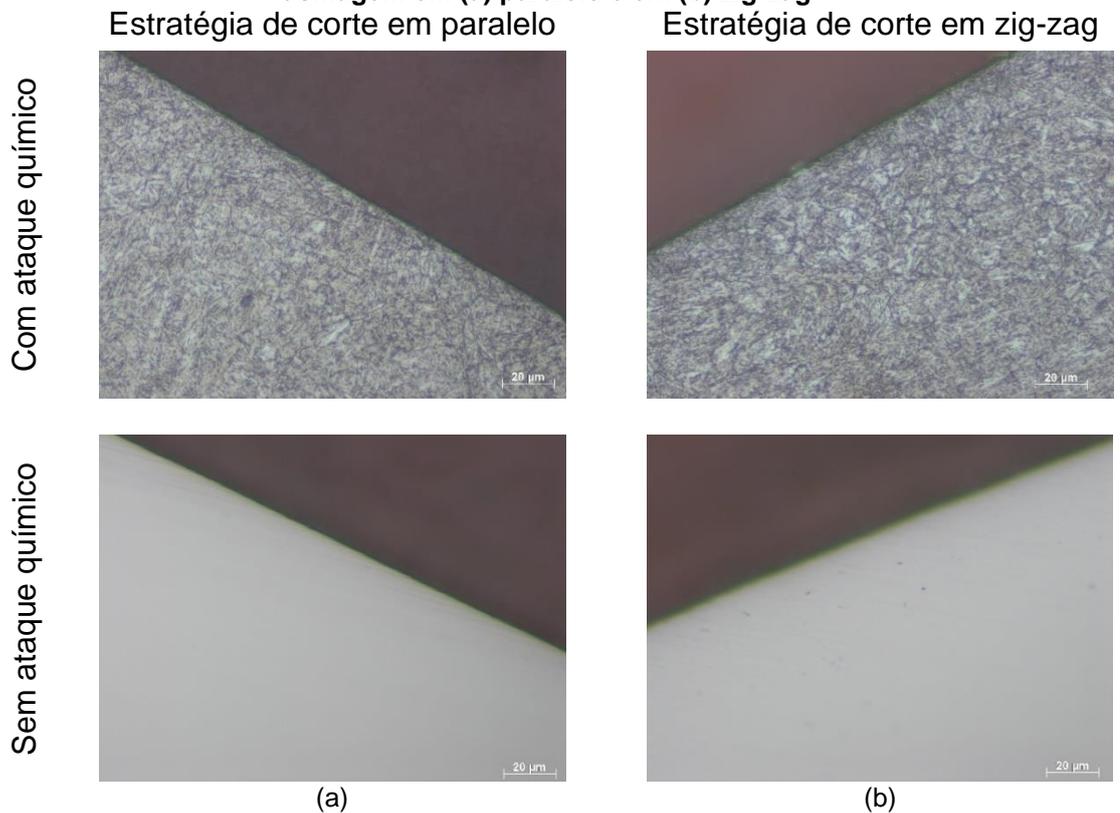
A fim de se melhor compreender os efeitos do contato ferramenta-peça sobre o acabamento gerado, apresentam-se na Figura 30 ilustrações das situações de contato em três diferentes regiões da superfície convexa: (a) inferior (b) meio e (c) superior. O eixo da ferramenta permanece paralelo ao eixo Z da máquina durante todo o percurso.

Figura 31 - Micrografias da subsuperfície da região Platô do aço VH13IM após usinagem em (a) paralelo e em (b) zig-zag



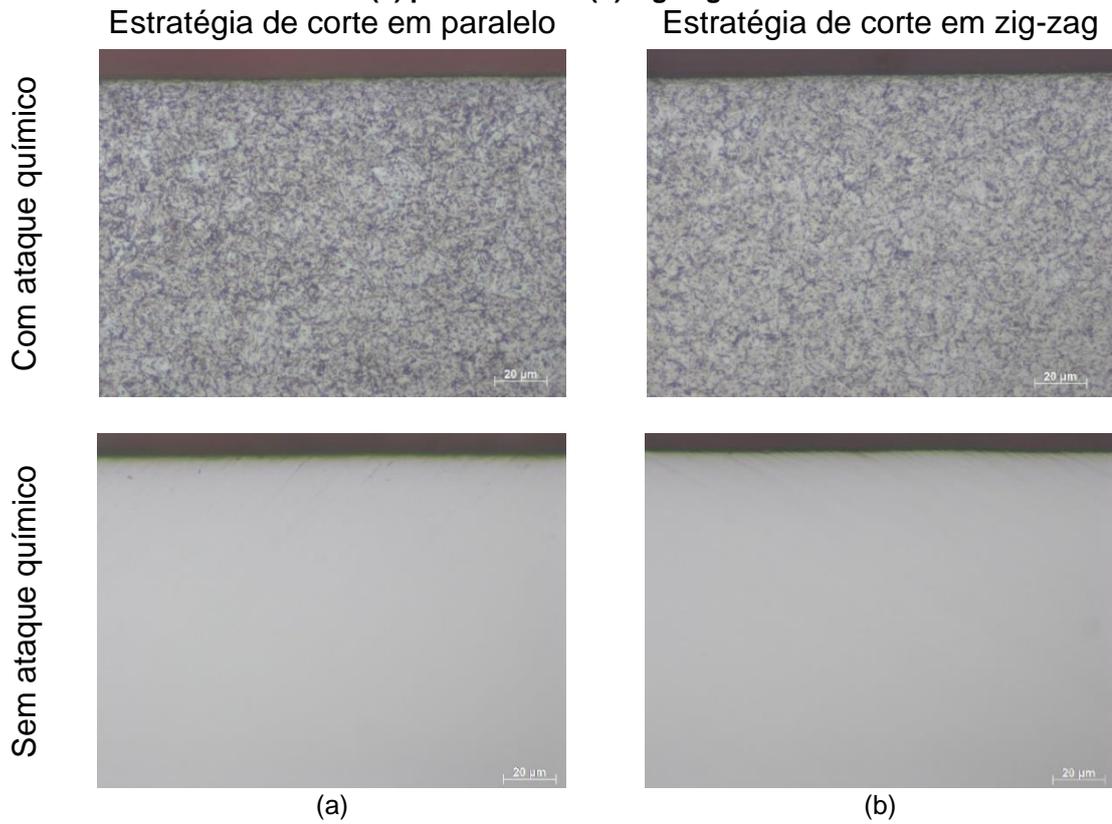
Fonte: Próprio autor.

Figura 32 - Micrografias da subsuperfície da região Curvilínea Superior do aço VH13IM após usinagem em (a) paralelo e em (b) zig-zag



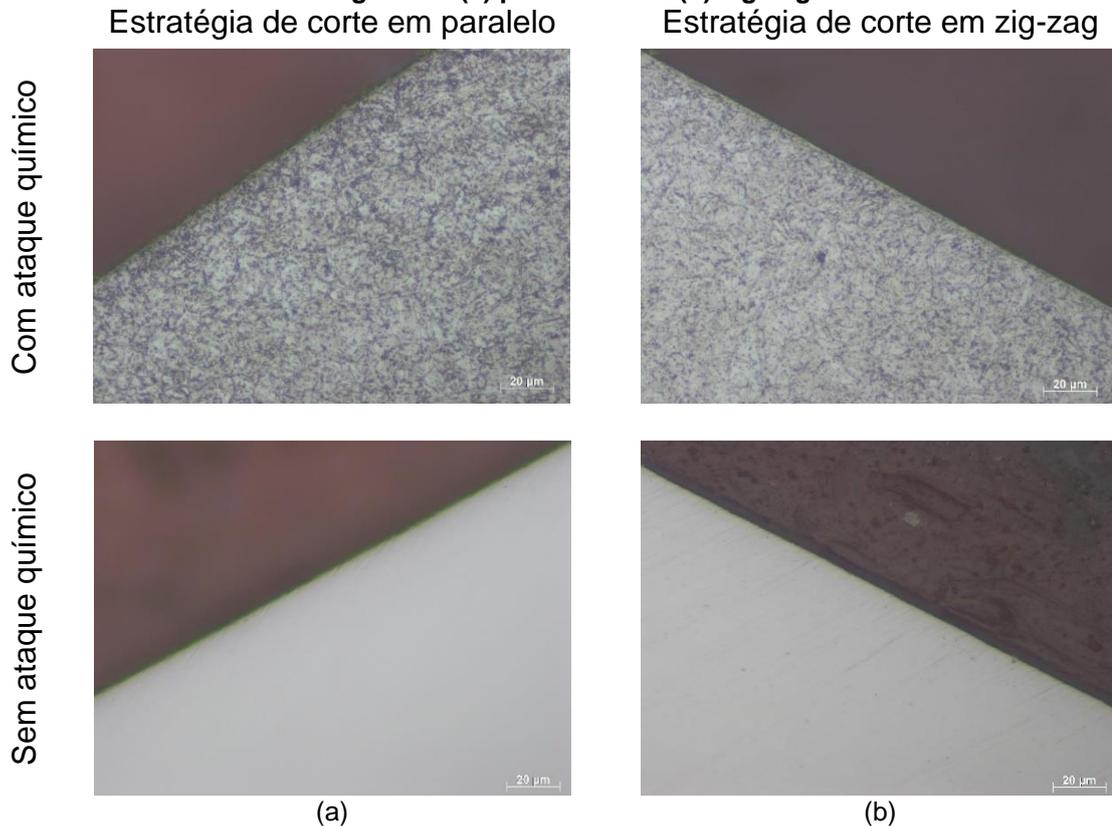
Fonte: Próprio autor.

Figura 33 - Micrografias da subsuperfície da região Platô do aço VTMPPlus após usinagem em (a) paralelo e em (b) zig-zag



Fonte: Próprio autor.

Figura 34 - Micrografias da subsuperfície da região Curvilínea Superior do aço VTMPPlus após usinagem em (a) paralelo e em (b) zig-zag



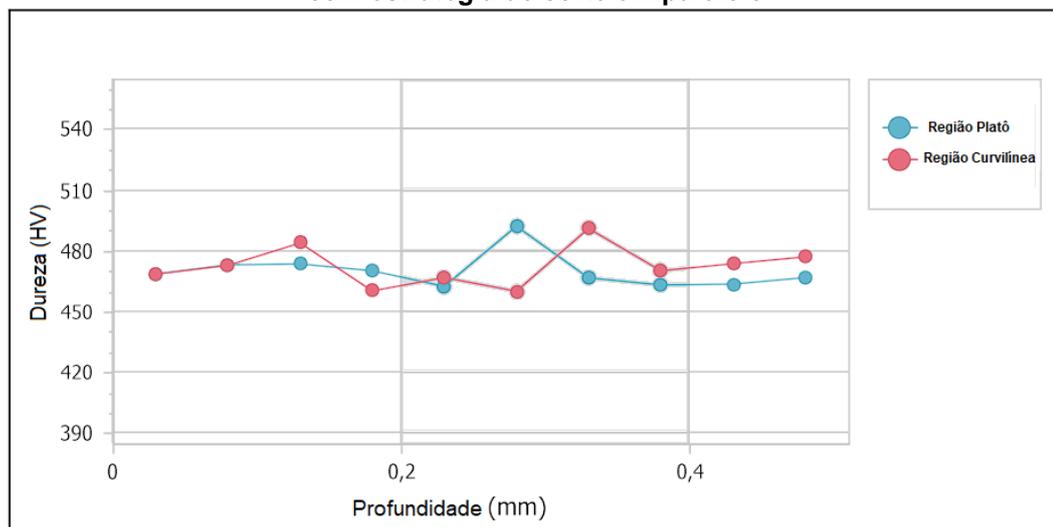
Fonte: Próprio autor.

As micrografias sem ataque químico demonstraram que ambas as estratégias de corte resultaram em perfis homogêneos, isentos de danos da superfície (marcas ou entalhes) ou químicos e não geraram camada encruada (afetada pela usinagem). Alterações de origem térmica (microestruturais) também não foram observadas nas micrografias com ataque químico.

Devido a limitação de tempo e recurso necessários para preparação das amostras que cobrissem toda a superfície usinada, que inclui cortes, lixamento, polimento e embutimento, foram priorizadas as regiões adjacentes Platô e Superior que permitiram um mesmo embutimento sob uma mesma geratriz e condições homogêneas de polimento.

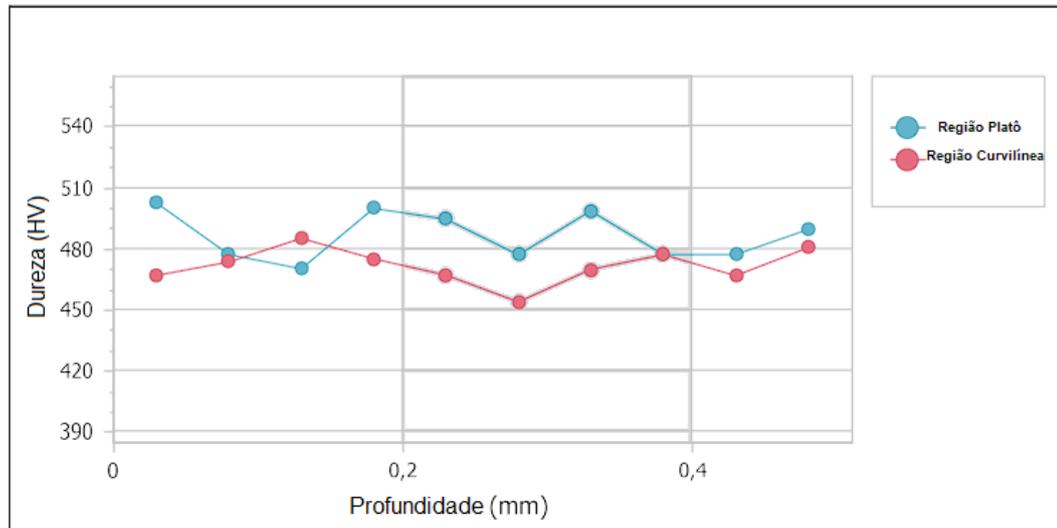
Os resultados observados indicam uma condição de superfície apta à obtenção de superfícies especulares, conforme pode ser adicionalmente constatado para ambos os aços nos gráficos de avaliação de microdureza (Figuras 35 a 38), evidenciando um estado homogêneo e de integridade da superfície (sem alterações microestruturais e defeitos).

Figura 35 - Curvas de microdureza Vickers na subsuperfície em função da profundidade a partir da superfície usinada para as regiões Platô e Curvilínea Superior do aço VH13IM fresado com estratégia de corte em paralelo



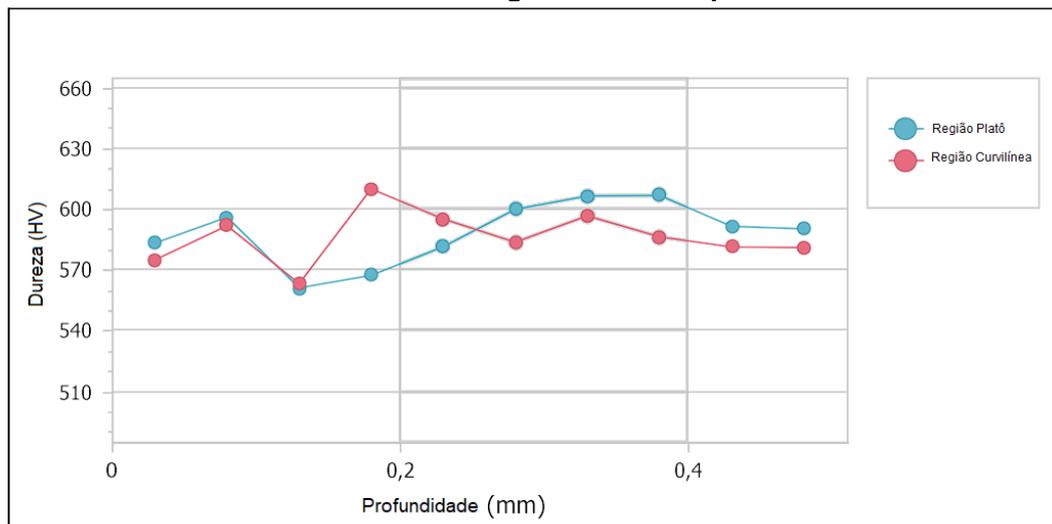
Fonte: Próprio autor.

Figura 36 - Curvas de microdureza Vickers na subsuperfície em função da profundidade a partir da superfície usinada para as regiões Platô e Curvilínea Superior do aço VH13IM fresado com estratégia de corte em zig-zag



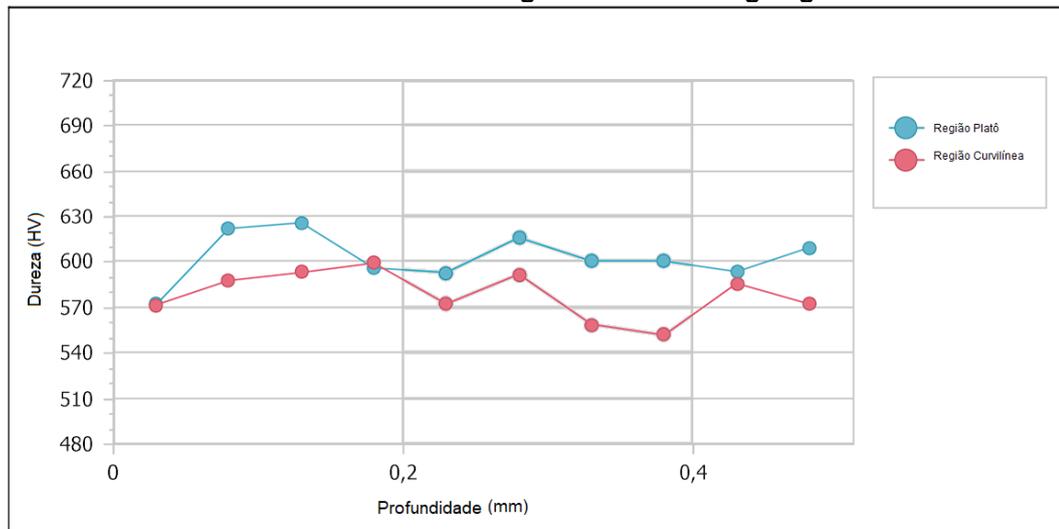
Fonte: Próprio autor.

Figura 37 - Curvas de microdureza Vickers na subsuperfície em função da profundidade a partir da superfície usinada para as regiões Platô e Curvilínea Superior do aço VTMPPlus fresado com estratégia de corte em paralelo



Fonte: Próprio autor.

Figura 38 - Curvas de microdureza Vickers na subsuperfície em função da profundidade a partir da superfície usinada para as regiões Platô e Curvilínea Superior do aço VTMPPlus fresado com estratégia de corte em zig-zag



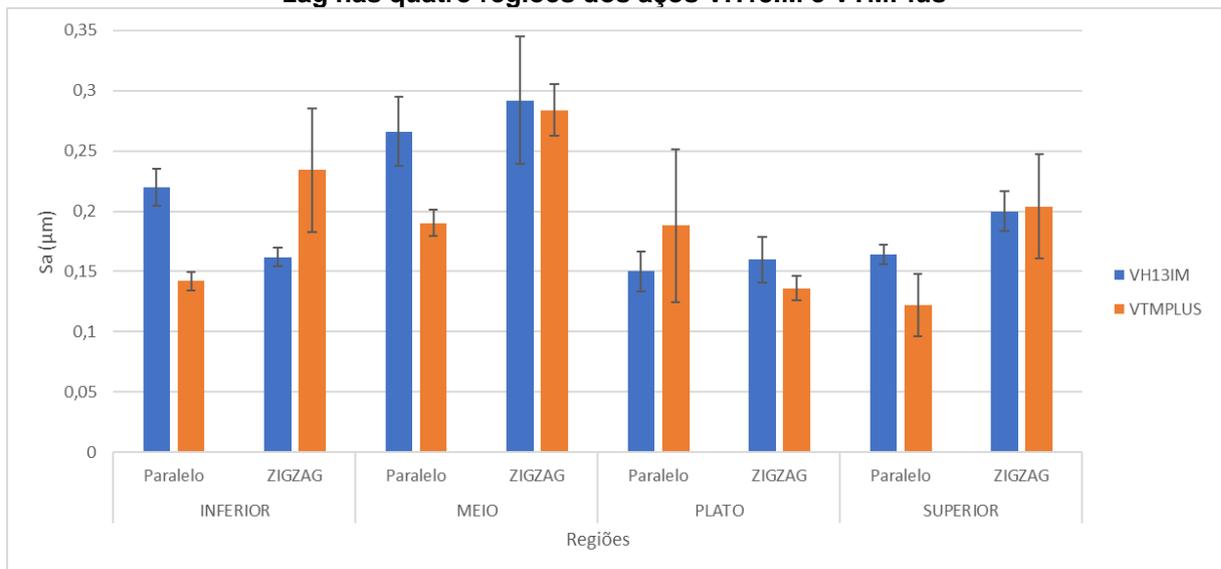
Fonte: Próprio autor.

De acordo com os resultados de microdureza apresentados acima, são confirmadas as evidências reportadas na análise das metalografias, nas quais não se observa deformação plástica da microestrutura (encruamento) nas camadas subsuperficiais.

5.2 CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA DA SUPERFÍCIE

Nesta seção, são analisados os parâmetros de rugosidade de área das superfícies usinadas em todas as regiões, para ambos os materiais e estratégias. A Figura 39 mostra os resultados da rugosidade média S_a para as quatro diferentes regiões analisadas nos aços VH13IM e VTMPPlus.

Figura 39 - Rugosidade média na área S_a gerada pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões dos aços VH13IM e VTMPPlus



Fonte: Próprio autor.

Observando-se os resultados, pode-se afirmar que a estratégia de corte em paralelo gerou melhores superfícies em comparação à estratégia zig-zag, principalmente para o VTMPPlus, nas regiões Inferior, Meio e Superior. Resultados mais consistentes e superiores da estratégia de corte em paralelo neste caso podem estar relacionados ao modo sempre concordante, ao maior diâmetro efetivo da fresa e, conseqüentemente, à maior velocidade de corte ao longo da trajetória, gerando redução do efeito do esmagamento do material. A isso, pode-se somar a menor deformação do material proporcionada por sua maior dureza.

Quanto maior a proporção de material deformado frente ao cisalhado, maior o fluxo lateral de cavaco e menor a efetividade do corte. Segundo Toh (2004^b), o sentido de corte ascendente é mais apropriado para usinar peças de geometrias complexas com fresas de ponta esférica, devido à menor variação do raio efetivo de corte da ferramenta e ao menor contato entre o centro da ponta da fresa e a superfície usinada.

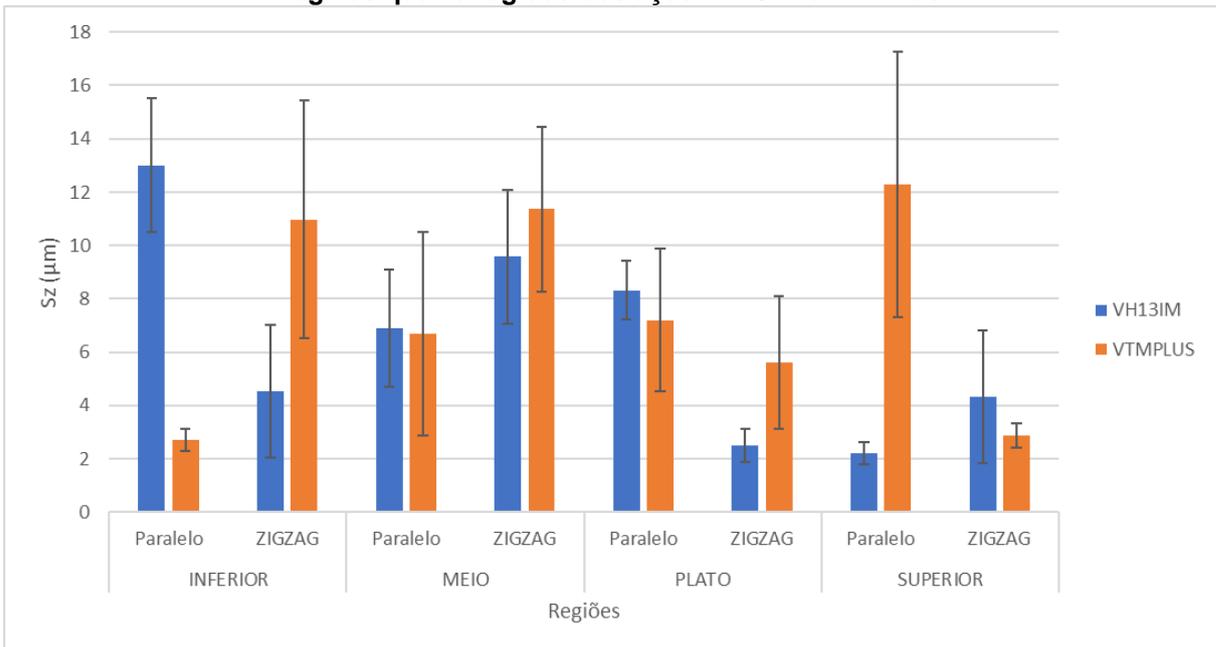
Para o VH13IM, de forma clara, menores rugosidades com a aplicação da estratégia de corte em paralelo foram observadas apenas nas regiões Meio e Superior, sendo um resultado inverso notado na região Inferior, que pode ter ocorrido em função da combinação da direção dos esforços (predominantemente horizontal) sobre a ferramenta nesta região e da menor dureza do material, o que pode ter provocado aumento da vibração. Na estratégia de corte em zig-zag, este efeito pode ter sido amenizado com o corte discordante em certos momentos da usinagem, que reduz o impacto provocado pela entrada do dente no material.

Na região Platô, em ambos os materiais, as variações entre as estratégias foram pouco significativas, mas foram registrados, de modo geral, menores valores de rugosidade, devido ao contato constante da ferramenta com a peça. Menores valores de rugosidade foram verificados também na região curvilínea Superior, onde a distribuição dos esforços é predominante na direção vertical.

Os maiores valores foram obtidos no VH13IM, na região Meio, com ambas as estratégias, o que, em comparação ao VTMPPlus, pode estar associado à sua menor dureza.

Devido às elevadas dispersões, não se pode afirmar que a rugosidade máxima S_z (Figura 40) tenha apresentado comportamento similar à da rugosidade média S_a para os diferentes materiais, estratégias e regiões. Tal fato pode ser decorrente da deformação do material na superfície, tanto nos picos quanto nos vales, devido às pequenas espessuras nominais de cavaco escolhidas para a operação de acabamento.

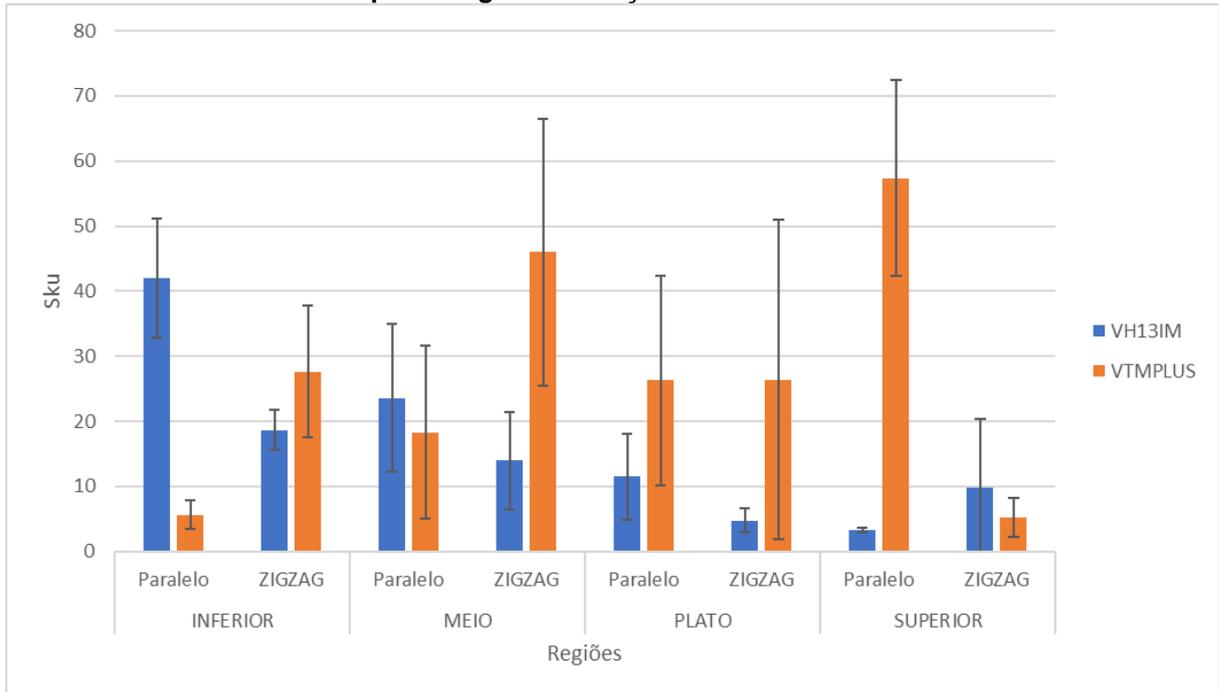
Figura 40 - Rugosidade máxima na área Sz gerada pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões dos aços VH13IM e VTMPPlus



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 41, podem ser observados os resultados relacionados à curtose S_{ku} , que destacam a predominância de agudeza no perfil de rugosidade ($S_{ku} > 3$) em todas as regiões, independente da estratégia utilizada e do material, não havendo tendência clara de comportamento. Valores mais elevados, apesar da alta dispersão, foram medidos no VTMPPlus, nas regiões Inferior, Meio e Platô após a usinagem com a estratégia em zig-zag e nas regiões Platô e Superior com a estratégia em paralelo. No VH13IM, maiores valores de curtose foram observados nas regiões Inferior e Meio, com aplicação da estratégia de corte em paralelo.

Figura 41 - Valores de curtose Sku gerados pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões dos aços VH13IM e VTMPPlus

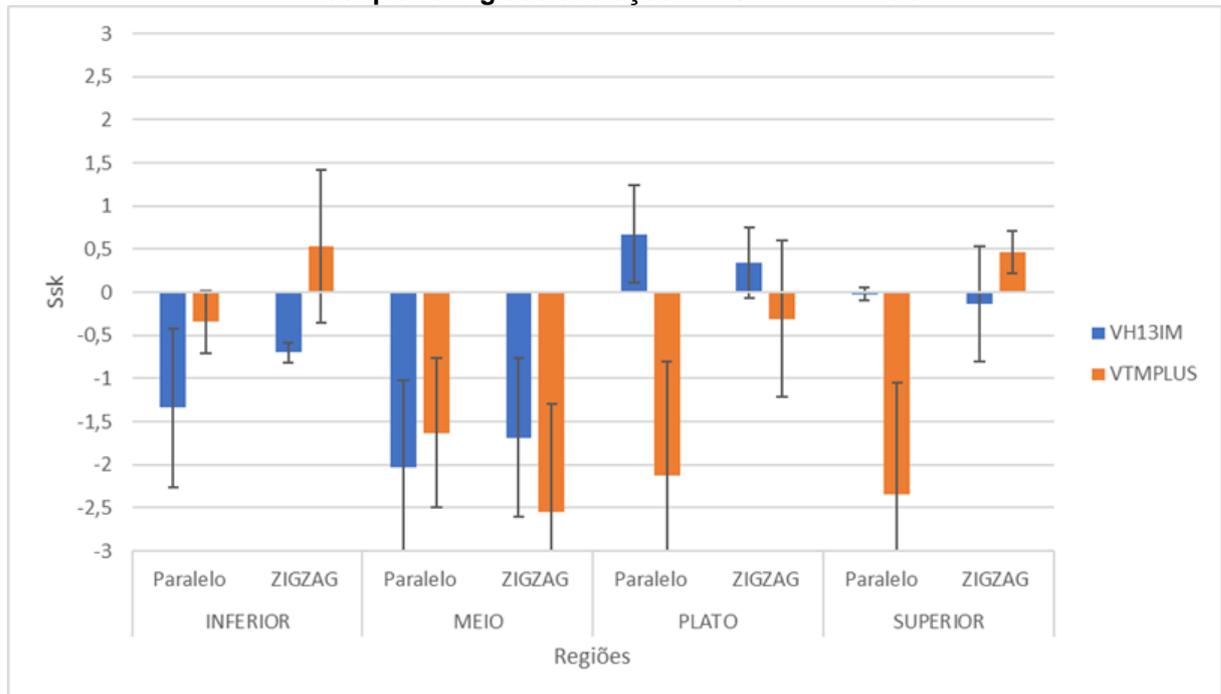


Fonte: Próprio autor.

Da mesma forma que no caso anterior, a assimetria Ssk (Figura 42) não apresentou tendência clara quando comparados os diferentes materiais, estratégias e regiões. Para o aço VH13IM, são observados, de modo geral, valores próximos de zero nas regiões Platô e Superior e negativos para Inferior e Meio, sendo estes últimos maiores em módulo para a estratégia de corte em paralelo, o que indica uma superfície com predominância de vales mais estreitos em comparação aos picos.

A predominância de valores negativos de assimetria pode ser notada para o VTMPPlus nas regiões Meio, Platô e Superior combinadas à estratégia de corte em paralelo. Um valor negativo significativo foi encontrado após a aplicação da estratégia zig-zag apenas na região Meio.

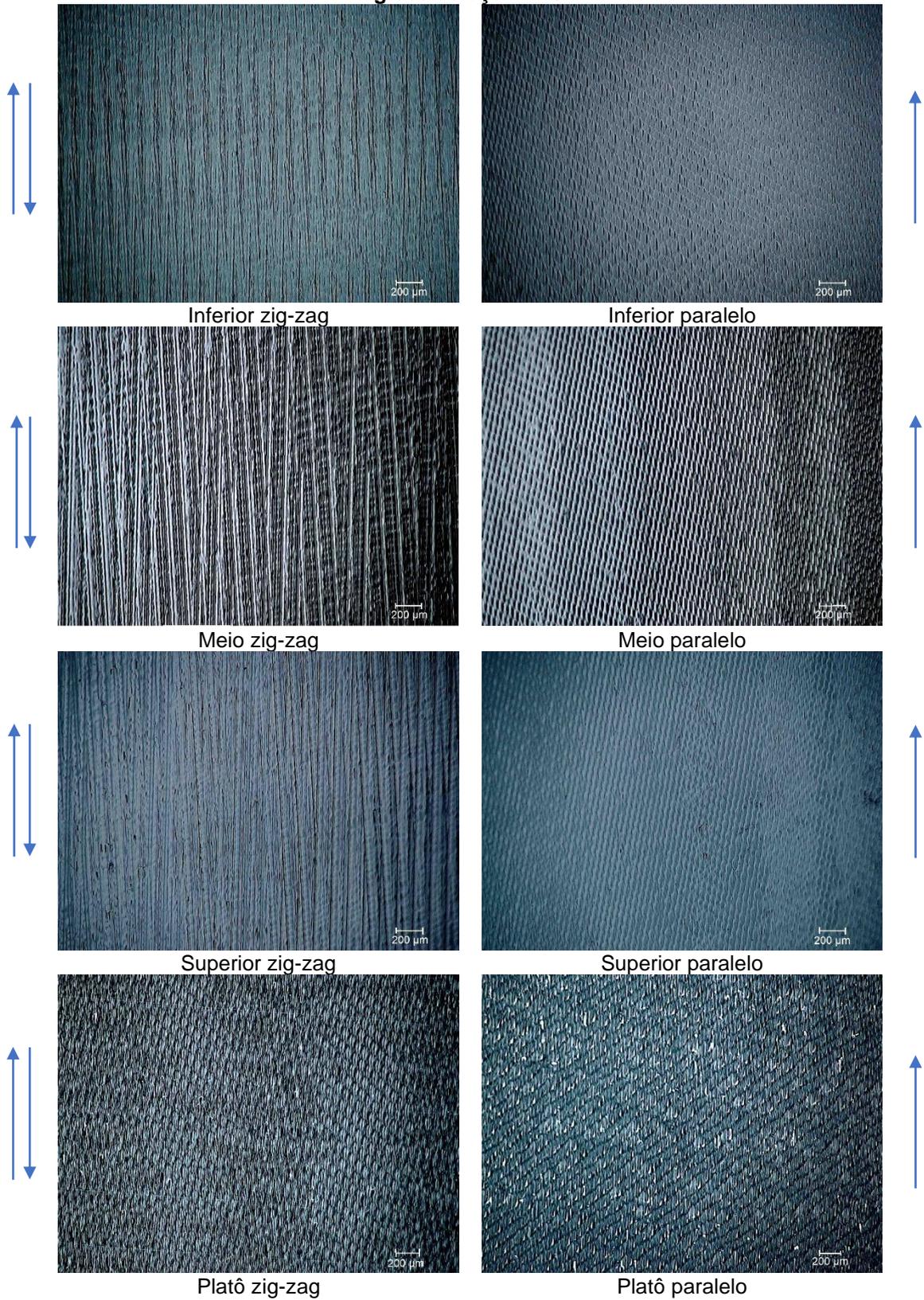
Figura 42 - Valores de assimetria Ssk gerados pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões dos aços VH13IM e VTMPPlus



Fonte: Próprio autor.

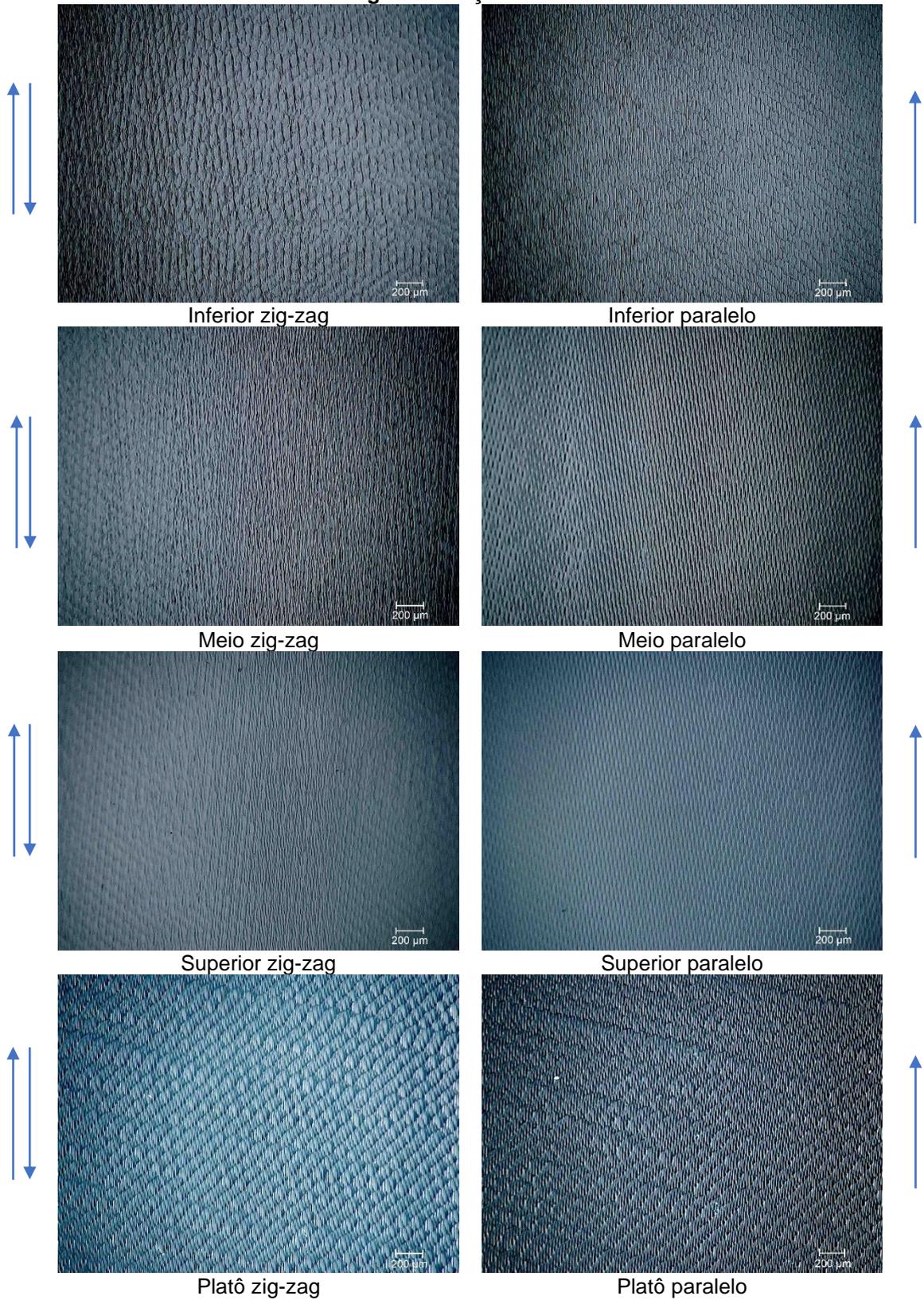
Em complemento às análises de rugosidade, as superfícies geradas foram avaliadas visualmente. A morfologia das diferentes regiões é apresentada nas Figuras 43 e 44, com as setas indicando o sentido de avanço da ferramenta, paralelo às laterais do bloco.

Figura 43 - Superfícies geradas pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões do aço VH13IM



Fonte: Próprio autor.

Figura 44 - Superfícies geradas pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões do aço VTMPPlus



Fonte: Próprio autor.

No aço VH13IM são observadas marcas mais claras da ferramenta sobre a peça principalmente após a usinagem com estratégia de corte em zig-zag, possivelmente associadas aos maiores valores de rugosidade devido ao corte discordante e à menor dureza, enquanto superfícies mais homogêneas, com marcas menos regulares, são notadas para as outras estratégias e também para o VTMPPlus.

As evidências para a estratégia zig-zag estão de acordo com os resultados observados por Tuysuz; Altintas e Feng (2013) no que se refere ao movimento de avanço no sentido descendente apresentar predominância de deformação em relação ao sentido ascendente por manter contato do centro da fresa de ponta esférica com a superfície da peça, gerando maiores valores de rugosidade.

5.3 QUANTIFICAÇÃO DO BRILHO

Superfícies com alto brilho são aquelas com alta capacidade de reflexão de luz incidente majoritariamente em uma mesma direção, chamada de direção especular. Essa capacidade é influenciada pela qualidade da superfície do produto. A capacidade de reflexão de luz de forma homogênea em uma mesma direção é vista em superfícies lisas, que apresentam baixa absorção da luz, possibilitando a formação de uma imagem em sua superfície. Por outro lado, a reflexão da luz em várias direções desordenadas, conhecida como reflexão difusa, é encontrada em superfícies rugosas, que não possuem capacidade de formar imagens nítidas (KIGLE-BOECKLER, 1995).

Para classificação dessas duas superfícies (lisa e rugosa), é utilizado o critério de Rayleigh, que considera a defasagem das asperidades da superfície que conduzem de forma variada os caminhos óticos em ondas de feixes coerentes e adjacentes (TOIGO et al., 1977). A superfície é considerada lisa quando a altura dessas asperidades, representadas pela rugosidade R_a , não gerar uma diferença de fase entre as luzes refletidas após contato com a superfície menor que $\pi/2$. Tal condição de superfície lisa pode ser expressa pela Equação 1, na qual R_a é a rugosidade média, θ é o ângulo de incidência e λ é comprimento de onda da luz.

$$R_a \leq \frac{\lambda}{8 \cos \theta} \quad (1)$$

Em aplicações industriais, são empregados equipamentos de medição de brilho (brilhômetros) com os valores de $\theta = 60^\circ$ e $\lambda = 0,88 \mu\text{m}$, indicando que, para a superfície ser considerada lisa, o valor da rugosidade Ra deve ser menor que $0,22 \mu\text{m}$ (SYLVAIN, 2005). Valores de rugosidade Sa igual ou menor foram alcançados em doze dos dezesseis resultados obtidos para os dois aços (VH13IM e VTMPPlus) no presente trabalho, conforme aponta a Tabela 2.

Tabela 2 - Situações com valores de rugosidade média Sa < 0,22 μm

Material	Inferior		Meio		Platô		Superior	
	Paralelo	Zig-zag	Paralelo	Zig-zag	Paralelo	Zig-zag	Paralelo	Zig-zag
VH13IM	0,22	0,16	X	X	0,15	0,16	0,16	0,20
VTMPPlus	0,14	X	0,19	X	0,19	0,14	0,12	0,20

Fonte: Próprio autor.

O brilho e a textura são duas propriedades ópticas dos materiais com um papel indispensável na determinação da aparência visual dos objetos. O brilho é afetado pela textura e pequenas mudanças na rugosidade podem resultar em mudanças significativas no brilho. No entanto, existem diferenças entre o brilho percebido pelo olho humano e o brilho medido por instrumentos. Kandi; Panahi; Zoghi (2022) mostraram haver relação entre o brilho instrumental e os parâmetros de análise de textura, sendo que, à medida que a rugosidade da superfície aumentava, o brilho da superfície instrumental diminuía. No entanto, os resultados da avaliação visual diferiram das medidas instrumentais. À medida que a rugosidade da superfície aumentava, o brilho diminuía, mas, ao se atingir certo ponto, o brilho aumentava significativamente. Em seguida, o brilho diminuía novamente à medida que a rugosidade aumentava. Esses resultados demonstraram a falta de uma relação simples entre o brilho visual e os parâmetros de análise de rugosidade, enfatizando a necessidade de se encontrar um parâmetro de superfície adequado, que tenha boa correlação com o brilho visual.

Os resultados dos parâmetros de rugosidade obtidos (Figuras 39 a 42) em consonância com as imagens das superfícies geradas (Figuras 43 e 44) neste estudo apresentaram similaridade com as pesquisas de Toigo (1977), Sylvain (2005) e Kandi; Panahi; Zoghi (2022) no que se refere aos níveis de rugosidade aceitáveis para uma superfície espelhada. Comparando os dois aços usinados, o VTMPPlus permitiu a obtenção de menores valores de rugosidade média Sa e suas superfícies apresentaram morfologia mais homogênea em comparação ao VH13IM, que

apresentou marcas no sentido de avanço da ferramenta. Em relação às estratégias de corte, notou-se a presença de marcas principalmente após a aplicação da estratégia de corte em zig-zag, corroborando assim com os resultados de rugosidade mais elevados nos testes realizados.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nos testes de fresamento de aços endurecidos com fresas de topo esférico e duas estratégias de usinagem, foram tiradas as seguintes conclusões:

- A influência das estratégias de corte em paralelo e zig-zag sobre os parâmetros de rugosidade média S_a e máxima S_z obtidos nas peças de aço VH13IM e VTMPPlus ocorre principalmente devido à variação do contato do centro da ferramenta com a superfície curvilínea. A estratégia de corte em paralelo, por aplicar somente o sentido de corte ascendente, mostrou-se mais adequada, devido à menor variação do raio efetivo de corte da ferramenta em comparação ao sentido descendente.
- Devido à maior dureza, o aço VTMPPlus possibilitou, de modo geral, a obtenção de menores valores de rugosidade, os quais foram gerados principalmente nas regiões Platô e Superior.
- Para todas as condições testadas, notou-se a predominância de agudeza do perfil de rugosidade, tendo como resultado, de modo geral, uma curtose $S_{ku} > 3$.
- Já a assimetria S_{sk} , com valores dispersos e sem tendência, não demonstrou um comportamento regular entre as diferentes estratégias, regiões e materiais, indicando um perfil de rugosidade heterogêneo, com propensão à ocorrência de vales estreitos e picos mais largos ($S_{sk} < 0$).
- Visualmente, em comparação ao aço VTMPPlus, notaram-se marcas mais claras da ferramenta no aço VH13IM, principalmente quando da aplicação da estratégia de corte em zig-zag. Nos outros casos, verificaram-se superfícies com textura mais homogênea.
- Tendo em vista as condições dos ensaios e a relação entre brilho e rugosidade média, verifica-se que a superfície com maior brilho foi aquela obtida no aço VTMPPlus, com aplicação da estratégia Paralelo à superfície, sendo o menor valor de rugosidade medido na região $0,12 \mu\text{m}$.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São apresentados abaixo sugestões para trabalhos futuros para continuidade da pesquisa na área:

- Realizar a medição do brilho da superfície obtida.
- Realizar o polimento manual da superfície e medir o tempo necessário para se obter um parâmetro aceitável de rugosidade e brilho praticado na indústria automobilística.

REFERÊNCIAS

- ALI, M. Y.; JAILANI, W. N.; RAHMAN, M.; HASAN, M. H.; BANU, A. Effect of minimum quantity lubrication on surface roughness in tool-based micromilling. **IJUM Engineering Journal**, [S. l.], v. 18, n. 1, 2017, pp. 147–154.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - **Rugosidade**: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- ALMEIDA, P. S. **Processos de usinagem**: utilização e aplicações das principais máquinas operatrizes. São Paulo: Érica, 2015.
- ALBANO, A. D. **Estudo comparativo de processos de usinagem de superfícies complexas na fabricação de moldes de injeção de peças plásticas automotivas**. Monografia [Graduação] Universidade de São Paulo, 2007.
- BAGCI, E.; YÜNCÜOĞLU, E. The Effects of Milling Strategies on Forces, Material Removal Rate, Tool Deflection, and Surface Errors for the Rough Machining of Complex Surfaces. **Journal of Mechanical Engineering**. v. 63, n. 11, 2017, pp. 643-656.
- BOUJELBENE, M.; MOISAN, A.; TOUNSI, N.; BRENIER, B. Productivity enhancement in dies and molds manufacturing by the use of C1 continuous tool path. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 44, n. 1, 2004, pp. 101-107.
- CALIL, L. F. **Estudo de caso para avaliação do tratamento dado à tecnologia de superfície no meio fabril**. Dissertação [Mestrado] Universidade Federal de Santa Catarina. Engenharia Mecânica, 2013.
- CHIANG, S.-T.; TSAI, C.-M.; LEE, A.-C. Analysis of cutting forces in ball-end milling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 47, n. 3-4, 1995, pp. 231-249.
- COSTA, D. D.; VOLPATO, N. Usinagem de formas complexas empregando a técnica de fatiamento. In: **4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Estância de São Pedro. Anais... congresso COBEF. SÃO PAULO: ABCM. 2007.
- ÇOLAC, O.; KURBANOĞLU, C.; KAYAKAN, M. Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. **Materials & Design**. v.28, n.2, 2007, pp. 657-666.
- DE SOUZA, A. F.; MACHADO, A.; BECKERT, S. F.; DINIZ, A. E. Evaluating the Roughness According to the Tool Path Strategy When Milling Free Form Surfaces for Mold Application. **Procedia CIRP**, v. 14, 2014a, p. 188-193.
- DE SOUZA, A. F.; DINIZ, A. E.; RODRIGUES, A. R.; COELHO, R. T. Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 71, n. 9-12, 2014b, p. 1565-1577.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9ª edição. São Paulo: Artliber Editora, 2014.

DOMINGUES JUNIOR, G. **Polibilidade de aços para moldes de plástico**. Dissertação [Mestrado] Universidade Federal de Uberlândia. Engenharia Mecânica. 2009.

ELBESTAWI, M. A.; EL-WARDANY, T.; CHEN, L.; BECZE, C. High-speed Milling of Dies and Molds in Their Hardened State. **Annals of the CIRP**. v. 46, n. 1, 1997, pp. 57- 62.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1982.

FRITZ, G. O.; DALCIN, L. R.; DALCIN, R. Usinagem de aços endurecidos com ferramentas de geometria definida: estudo de caso. In: **7ª SIEF - Semana Internacional das Engenharias e Economia FAHOR** em: Horizontina/RS, junho, 2017.

GHAZALI, M.; MAZLAN, A.; WEI, L.; TYING, C.; SZE, T.; JAMIL, M. Effect of Machining Parameters on the Surface Roughness for Different Type of Materials. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. v. 530, n. 1, 2008, pp. 1- 13.

GRIFFITHS, B. **Manufacturing Surface Technology**. London: Penton Press; 2001.

GORJI KANDI, S.; Panahi, B.; Zoghi, N. Impact of surface texture on the perceptual and instrumental gloss. **Progress in Organic Coatings**, v. 171, 2022, pp.107028.

GROOVER, M. **Fundamentos da moderna manufatura**. Vol. 2. 5ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2017.

HARADA, J. **Moldes para Injeção de Termoplásticos – Projetos e Princípios Básicos**. São Paulo: Artiber, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2813:2014. **Paints and varnishes — Determination of gloss value at 20°, 60° and 85°**, 2014.

KALPAKJIAN, S. **Manufacturing Engineering and Technology**, 3rd ed. Reading: Addison-Wesley; 1995.

KIGLE-BOECKLER, G. Measurement of gloss and reflection properties of surfaces. **Metal finishing**, v. 93, n. 5, 1995, pp. 28-31.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

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

- MENGES, G.; MICHAELI, W.; MOHREN, P. **How to make injection molds**. 3rd ed. Munich: Hanser, 2000.
- MESQUITA, R.; MORAES, P. Tratamento térmico de moldes e matrizes e os aspectos de qualidade relevantes. **EXACTA**. v. 10, n. 3, 2012, pp. 357-370.
- NUNES, J.; GOMES, J.; SOUZA, G.; SUTÉRIO, R. Influência da Interpolação da trajetória da ferramenta no fresamento a altas velocidades de superfícies complexas. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**. v. 4, n. 4, 2008, pp. 37-42.
- OLIVEIRA, E.; DE SOUZA, A. F.; DINIZ, A. E. Evaluating the influences of the cutting parameters on the surface roughness and form errors in 4-axis milling of thin-walled free-form parts of AISI H13 steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. v. 40, 2018, pp. 1-14.
- OPEN MIND Technologies AG. **CAM strategies and functions for efficient manufacturing**. 2019. Disponível em: < <https://www.openmind-tech.com/fileadmin/pdf/cam/strategies/bro-cam-strategies-en.pdf> > acesso em: set. 2021.
- PATTARO JUNIOR, R. **Estudo do consumo de energia durante a usinagem de uma cavidade de molde com diferentes estratégias**. Dissertação [Mestrado] Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. 2019.
- RECH, J.; HAMDÍ, H.; VALETTE, S. Workpiece Surface Integrity. In: Davim, J. P. **Machining: Fundamentals and Recent Advances**. Springer: London, UK, 2008.
- REINKE, G. **Fresamento de um molde para lente esférica com diferentes estratégias com o auxílio do software CAD/CAM**. Monografia [Graduação] Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. 2013.
- REBEGGIANI, S.; ROSÉN, B.-G. Quantitative evaluation of the surface finish of high gloss polished tool steels. **Surface Topography: Metrology and Properties**, v. 2, n.1, 2014, pp. 1- 11.
- RODRIGUES, M. A. Desgaste das ferramentas de corte e do acabamento superficial a partir de diferentes estratégias CAD/CAM. **Revista Máquinas e Metais**. Ano XLV, n. 516, 2009, p.112-141.
- SANTOS, G. A. **Tecnologias mecânicas: materiais, processos e manufatura avançada**. São Paulo: Érica, 2021.
- SCANDIFFIO, I.; DINIZ, A. E.; DE SOUZA, A. F. The influence of tool-surface contact on tool life and surface roughness when milling free-form geometries in hardened steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, 2017, pp. 615-626.
- SONI, H. A review on optimization of end milling for stainless steel (AISI 316). **Indian Journal of Applied Research**. v. 5, n. 5, 2015, pp. 19 – 21.

STIPKOVIC, M. A.; BORDINASSI, E.; FARIAS, A.; DELIJAICOV, S. Surface Integrity Analysis in Machining of Hardened AISI 4140 Steel. **Materials Research**. v. 20, n. 2, 2017, pp. 387-394.

SCHÜTZER, K.; HELLENO, A. L. Fatores que Influenciam a Usinagem de Moldes e Matrizes com Altas Velocidades. **Revista de Ciência & Tecnologia**. v.12, n. 23, 2004, pp. 7-14.

SCHÜTZER, K.; STANIK, M.; DE SOUZA, A. F. **A usinagem HSC na manufatura de moldes e matrizes**. Máquina e Metais, São Paulo, janeiro 2001., pp. 92-103.

SECOTOOLS. **Ferramenta JHF181120E1R300.0Z4-HXT**. 2022. Disponível em:<https://www.secotools.com/article/p_03067304?language=en> acesso em: jun. 2022.

SECOTOOLS. **Ferramenta JH112060D2B.0Z2-HXT**. 2022. Disponível em:<https://www.secotools.com/article/p_02970123?language=en> acesso em: jun. 2022.

SECOTOOLS. **Ferramenta JH112030D2B.0Z2-HXT**. 2022. Disponível em:<https://www.secotools.com/article/p_02970120?language=en> acesso em: jun. 2022.

SECOTOOLS. **Ferramenta: JH112020G1B.0Z2-HXT**. 2022. Disponível em:<https://www.secotools.com/article/p_02970112?language=en> acesso em: jun. 2022.

DE SOUZA, A. F. D. **Contribuição ao fresamento de Geometrias Complexas Aplicando a Tecnologia de Usinagem com Altas Velocidade**. Tese [Doutorado] Engenharia Mecânica - USP - Universidade de São Paulo. Faculdade de Engenharia Mecânica, Escola de engenharia de São Carlos. São Carlos - SP, p. 171. 2004.

SOUSA, F. J. P. **Análise de aspectos cinemáticos do processo industrial de polimento de porcelanatos**. Tese [Doutorado]. Universidade Federal de Santa Catarina. 2007.

DE SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC** - Princípios e Aplicação. São Paulo: Artiber, 2009.

SYLVAIN, M. Diffuse reflection by rough surfaces: an introduction. **Comptes Rendus Physique**, v. 6, n. 6, 2005, pp. 663-674.

THE-VINH, D.; HSU, Q. Optimization of Minimum Quantity Lubricant Conditions and Cutting Parameters in Hard Milling of AISI H13 Steel. Department of Mechanical Engineering, National Kaohsiung University of Applied Sciences, **Applied Sciences**, v. 6, n. 83; 2016, pp. 2-11.

TOH, C. K. Surface topography analysis in high-speed finish milling inclined hardened steel. **Precision Engineering**, v. 28, n. 4, 2004^a, pp. 386-398.

TOH, C. A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling, **Journal of Materials Processing Technology**. v. 152, 2004^b, pp. 346-356.

TOIGO, F., MARVIN, A., CELLI, V., HILL, N. R. Optical properties of rough surfaces: general theory and the small roughness limit. **Physical Review B**, v. 15, n. 12, 1977, p. 5618.

TUYSUZ, O.; ALTINTAS, Y.; FENG, H.-Y. Prediction of cutting forces in three and five-axis ball-end milling with tool indentation effect. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 66, 2013, pp. 66-81.

VALIM, D. B. **Usinagem**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

VICENTE NETO, L.; HELLENO, A. Tendência na redução do ciclo de desenvolvimento de moldes e matrizes influenciada pela estratégia de usinagem e polimento. **Anais: Moldes ABN**. Sede da ABM, São Paulo, 10 – 12 agosto, 2012.

VILA, C.; AYABACAA, C.; TORRES, R.; GUTIÉRREZ, S.; MESEGUERA, A.; YANGA, X. Analysis of Different Tool Path Strategies for Free Form Machining with Computer Aided Surface Milling Operations. **Procedia Manufacturing**, v. 41, 2019, pp. 843-850.

VENTURA, C. E. H. **Estudo dos esforços de corte no processo HSM aplicado à abertura de cavidades**. Dissertação [Mestrado]. Universidade Estadual De Campinas. Engenharia Mecânica. Campinas, 2010.

VILARES METALS – **AÇO VH13IM**. 2021. Disponível em:<
<https://www.villaresmetals.com.br/en/Products/Tool-steel/Hot-work/VH13IM>> acesso em: set. 2021.

VILARES METALS – **AÇO VTPLUS**. 2021. Disponível em:<
<https://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-quente/VTPLUS> > acesso em: set. 2021.

VORBURGER, T. V.; RHEE, H. G.; RENEGAR, T. B.; SONG, J. F.; ZHENG, A. Comparison of optical and stylus methods for measurement of rough surfaces. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 33, 2007, pp. 110-118.

YAN, C. Q.; ZHAO, J.; LI, Y.E.; HAN, S. G. Experimental Research on Surface Roughness in High-Speed Milling of Complex Surface Mold Steel. **Materials Science Forum**. v.626 - 627, 2009, pp. 123-128.

WEBBER, C. B. **Brunimento Plano Rotativo Com Oscilação (Bpro) De Porcelanatos Esmaltados: Simulação Cinemática e Reprodução em Escala Laboratorial**. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis. 2021.

WEINERT, K.; GUNTERMANN, G. Usinagem de superfícies complexas. **Máquinas e Metais**, São Paulo, Ano.36 n. 415, 2000. pp. 18-27.

ZENG, Q.; QIN, Y.; CHANG, W.; LUO, X. Correlating and evaluating the functionality-related properties with surface texture parameters and specific characteristics of machined components. **International Journal of Mechanical Sciences**, v.149, 2018, pp. 62–72.