

Efeito de diferentes estratégias de fresamento sobre a qualidade de superfícies especulares em aços ferramenta

Effect of different milling strategies on the quality of specular surfaces in tool steels

Lucas Cappucio Castanheira¹, Giovani Cappucio², Fábio Antonio Xavier³, Carlos Eiji Hirata Ventura¹ 

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Rodovia Washington Luis km 235, 13565-905, São Carlos, SP, Brasil.

²Villares Metals S.A. Rua Alfredo Dumont Villares 155, 13178-902, Sumaré, SP, Brasil.

³Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Campus Universitário Reitor João David Ferreira Lima s/n, 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil.

e-mail: lucascappucio@estudante.ufscar.br, giovani.cappucio@villaresmetals.com, f.xavier@ufsc.br, ventura@ufscar.br

RESUMO

Dada a dificuldade em se usinar aços endurecidos e a complexidade das 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 uma superfície convexa (de curvatura constante) em dois tipos de materiais. A qualidade foi avaliada a partir de diferentes parâmetros de rugosidade, os quais foram correlacionados com o brilho percebido e analisados juntamente 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. 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.

ABSTRACT

Given the difficulty in machining of hardened steels and the complex geometries commonly observed in injection molds, besides the necessary surface quality to produce plastic parts without defects, an adequate milling strategy must be chosen, which consists 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 a convex (constant curvature) surface on two types of material. The quality was evaluated through distinct roughness parameters, which were correlated to the perceived gloss and analyzed in combination with the characteristics of each material, such as hardness and microstructure. From the results obtained after the finishing operation, it was possible to verify the positive influence of the parallel tool path, which led to the lowest values of average S_a and maximum S_z roughness in both steels, VH13IM and VTMPPlus, in comparison to the zig-zag tool path. The combination of low roughness values with a homogeneous topographic profile of the surface led to a higher gloss level and mirror effect.

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

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. Assim, o processo de fresamento apresenta vantagens frente a outros métodos, pois pode ser automatizado e permite curtos tempos de processamento [1].

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 [2].

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 [3].

A indústria de moldes tem forte influência sobre os custos, a qualidade e o prazo de entrega de um produto. BOUJELBENE *et al.* [4] 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. Segundo os mesmos autores, 60% do tempo de fabricação do molde podem ser atribuídos à usinagem 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 em si. 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.

Na manufatura de moldes e matrizes, são produzidas diversas superfícies consideradas complexas [5], as quais, conforme colocado por SCHÜTZER e HELLENO [6], raramente possuem definição analítica, exigindo que sua modelagem seja feita por aproximações. COSTA e VOLPATO [7] afirmam que os termos “*free-form surface*” ou “*sculptured surface*” têm sido frequentemente encontrados na literatura como sinônimos de superfícies complexas. Para a usinagem de tais superfícies, a geração da trajetória da ferramenta é a principal tarefa a ser desempenhada.

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 [8]. São encontrados muitos trabalhos sobre o tema, que tratam principalmente do desgaste da ferramenta [8–12]. Ventura [13] destaca que a trajetória da ferramenta pode influenciar o tempo real de usinagem, além das acelerações e desacelerações, envolvidas em alterações de direção dos movimentos na máquina.

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 [14–16].

TUYSUZ *et al.* [14] 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. 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.

Nos experimentos feitos por TOH [17], que executou a usinagem de um aço AISI H13 com dureza de 52 HRC em geometria plana com 75° de inclinação, obtiveram-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.

DE SOUZA *et al.* [16] apresentam diferentes tipos de posição de contato da ferramenta de ponta esférica em relação a uma superfície circular. 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.

Após o processo de usinagem, a superfície costuma apresentar diferentes camadas, com diferentes características, resultantes de deformação plástica, endurecimento ou amaciamento. Superfícies de baixa qualidade decorrem de diversos defeitos provenientes do processo de fabricação, como problemas do material, a 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 [11]. Os principais defeitos referentes à qualidade da superfície podem ser classificados como: trincas ou microfissuras; crateras, 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 descarbonetização; 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 [18].

A escolha do processo de fabricação costuma ser 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. Além das tensões residuais, afetadas pelos carregamentos termomecânicos variados em função das condições de corte e do material, como observado por SOUZA e CÂMARA [19] no fresamento do aço ABNT 4340, normalmente, o desempenho é 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 [18, 20].

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 [21]. Para GHAZALI *et al.* [22], a rugosidade é um parâmetro importante na determinação da qualidade de produtos obtidos por processo de usinagem, podendo a aspereza da superfície ser afetada pelos parâmetros de corte, propriedades do material da peça, parâmetros da ferramenta e condições da máquina-ferramenta. Os autores afirmam ainda que uma superfície com acabamento uniforme e baixa rugosidade traz benefícios em relação à resistência à fadiga e à minimização do atrito. Na usinagem do aço ABNT 4340, REIS *et al.* [23] verificaram que a mudança do material da ferramenta de metal duro para cermet não causou efeito significativo na rugosidade. Para o aço AISI 4140, MARTINS *et al.* [24] observaram que o avanço foi o parâmetro mais influente sobre esta variável de saída, tendo seu aumento gerado superfícies de pior qualidade. Já SANTOS *et al.* [25], na usinagem de um aço inoxidável supermartensítico, demonstrou que o aumento da pressão de aplicação do fluido de corte não possui influência significativa sobre a rugosidade.

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 [3]. Conforme apontaram VICENTE NETO e HELLENO [26], 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 [27].

O polimento fornece ao molde uma superfície reflexiva e brilhante, que facilita a extração da peça moldada, reduz o risco de rebarbas, a ocorrência de corrosão [28] e leva a um aumento considerável da resistência ao desgaste [29]. O brilho, conforme DE SOUZA [30], 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.* [31], 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 [30].

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 [4, 32]. 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 [3].

Tendo em vista a necessidade de obtenção de superfícies com características especulares na produção de moldes para injeção, a baixa usinabilidade de aços ferramenta utilizados nestas aplicações, o potencial de redução da rugosidade a partir da escolha correta da trajetória da ferramenta em peças com geometrias complexas e as reduções de tempo e custo possíveis com o uso do processo de fresamento de aços endurecidos em substituição ao polimento, tem-se como objetivo principal deste trabalho determinar o efeito do processo de fresamento de acabamento na qualidade de superfícies especulares produzidas a partir das estratégias de corte em paralelo e zig-zag nos aços ferramenta VH13IM e VTMPPlus, comumente utilizados na fabricação de moldes de injeção plástica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos de prova utilizados foram produzidos a partir de blocos com dimensões de 100 mm × 100 mm × 100 mm, conforme ilustrado na Figura 1a. 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 1b).

Testes de usinagem foram realizados em dois diferentes tipos de aço, VH13IM (50 HRC) e VTMPPlus (56 HRC), ambos fornecidos pela Villares Metals (Tabela 1), em um centro de usinagem cinco eixos Hermle C400, com comando numérico computadorizado Heidenhain iTNC 530. A máquina, equipada com turbina pneumática, permite rotações de até 65000 rpm e velocidades máximas de avanço de 45 m/min nos eixos X e Y e 60 m/min no eixo Z, além de precisão de posicionamento de ± 0,1 μm.

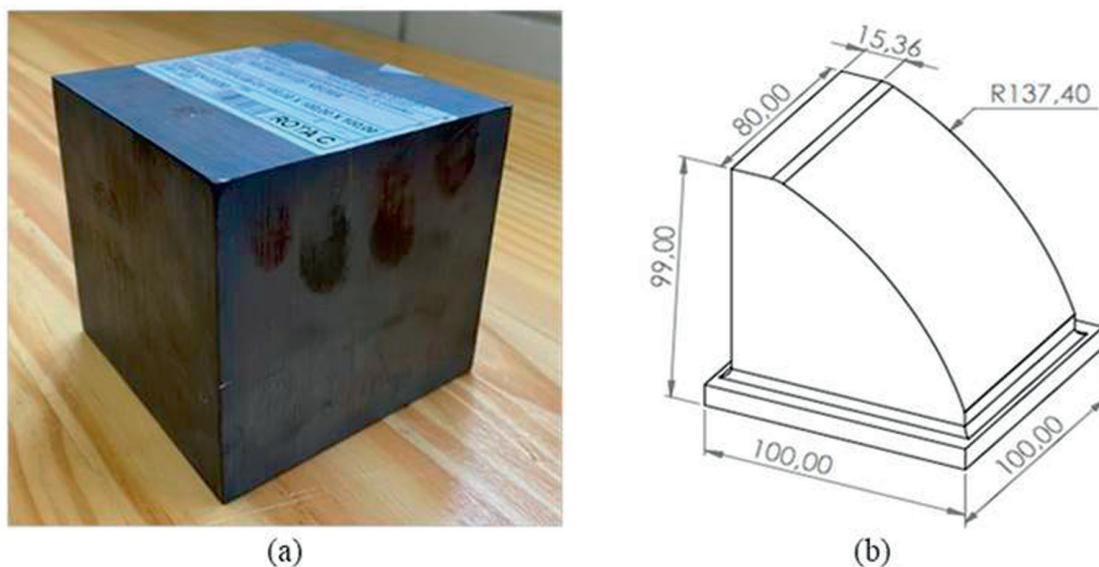


Figura 1: (a) Exemplo de bloco para confecção dos corpos de prova e (b) superfície final a ser obtida.

Tabela 1: Composição química dos aços VH13IM e VTMPPlus. [33, 34].

MARCA VILLARES METALS	AISI/ ASTM/ SAE	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	–	–

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; 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°.
- Operação de pré-acabamento 1: fresa toroidal de metal duro classe ISO H com cobertura HXT à base de silício (JHF181100E1R200.0Z4-HXT); diâmetro de 10 mm; quatro arestas de corte; raio de ponta de 2 mm; ângulo de hélice de 10° e de saída de -2°.
- 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); diâmetro de 10 mm; duas arestas de corte; ângulo de hélice de 28° e de saída de 0°.
- 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); diâmetro de 6 mm; duas arestas de corte; ângulo de hélice de 28° e de saída de 0°.

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 Seco Tools.

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 2), com o intuito de se evitar o contato do centro da ferramenta com a superfície para melhor efeito de corte.

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 do corpo de prova, totalizando a usinagem de quatro superfícies (duas estratégias utilizadas em cada material), 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 iniciou na parte inferior da peça, percorrendo somente o sentido de corte ascendente e concordante. A estratégia complementar *profile finishing* oferece funções de otimização inteligentes para usinar individualmente áreas complexas e para adaptar os caminhos controlados numericamente às propriedades do modelo. Ela permite a usinagem precisa de superfícies individuais e raios de transição com distâncias de caminho uniformes.

Todas as operações previstas nos testes de fresamento foram realizadas com parâmetros de corte constantes, independentemente do material a ser usinado. A operação de desbaste foi realizada pelo caminho de contornos sucessivos sempre no sentido concordante, utilizando-se os seguintes parâmetros: velocidade de corte $v_c = 90$ m/min, avanço $f_z = 0,57$ mm/dente, profundidade de usinagem $a_p = 0,4$ mm, penetração de trabalho $a_e = 19,2$ 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,

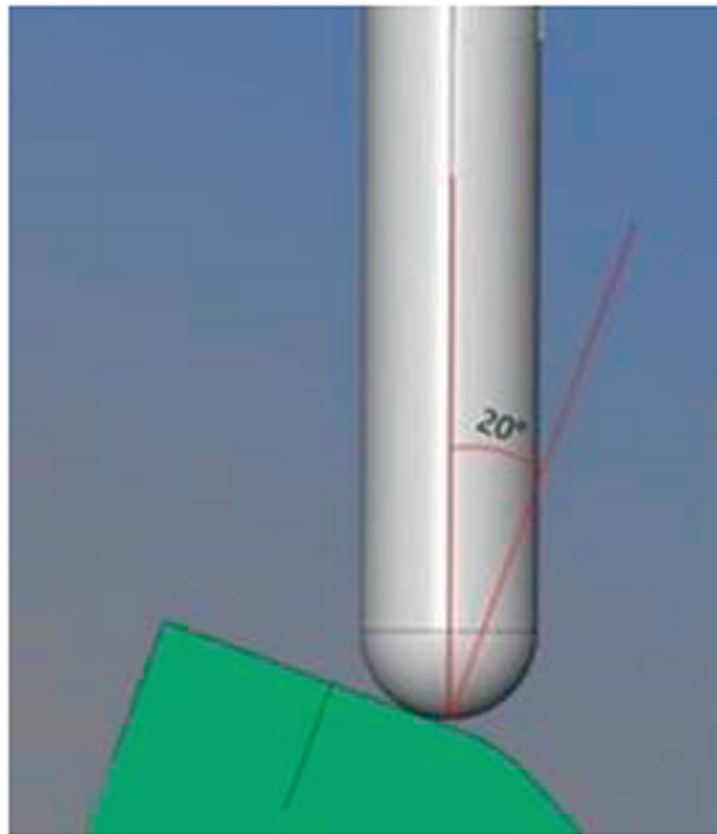


Figura 2: Inclinação entre fresa e peça durante usinagem do Platô.

com corte concordante e ascendente. Os parâmetros utilizados foram: velocidade de corte $v_c = 120$ m/min, avanço $f_z = 0,25$ mm/dente, profundidade de usinagem $a_p = 0,20$ mm, penetração de trabalho $a_e = 3$ 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: velocidade de corte $v_c = 300$ m/min, avanço $f_z = 0,1$ mm/dente, profundidade de usinagem $a_p = 0,4$ mm, penetração de trabalho $a_e = 0,1$ 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: velocidade de corte $v_c = 282$ m/min, avanço $f_z = 0,07$ mm/dente, profundidade de usinagem $a_p = 0,02$ mm, penetração de trabalho $a_e = 0,025$ mm.

Em todas as operações, foi utilizado um sistema MQL (mínima quantidade de lubrificação), a uma pressão de 6 bar, com o óleo Blaser Vascomill MMS FA 2, de modo a se obter melhores resultados em relação à rugosidade. De acordo com ALI *et al.* [35], 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 média, evitando o atrito entre a ferramenta e a peça. Melhores acabamentos também foram obtidos por DO e HSU [36], que testaram variações de óleo e diferentes pressões em aplicação MQL no fresamento do aço endurecido H13 (50 HRC).

De maneira a se analisar toda a superfície usinada, os corpos de prova foram divididos 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 3 apresenta as quatro regiões indicadas na peça final após o processo de usinagem.

Para medição da rugosidade das superfícies usinadas, os corpos de prova foram analisados no microscópio para análise tridimensional de imagens Alicona InfiniteFocus SL. 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 500× com as lentes disponíveis. Cada superfície gerada foi avaliada pelos parâmetros de área rugosidade média S_a , rugosidade máxima S_z , curtose S_{ku} (achatamento da distribuição do

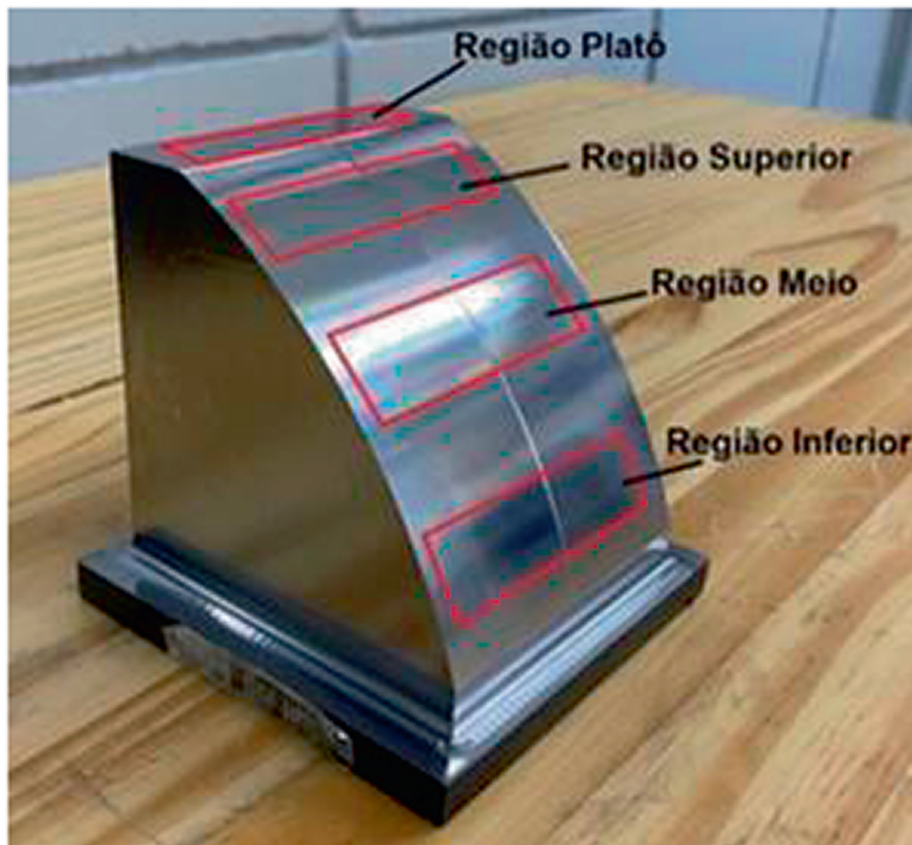


Figura 3: Regiões determinadas para análise do corpo de prova usinado.

perfil) e assimetria S_{sk} (posicionamento da distribuição do perfil) em quatro regiões de cada trecho, com áreas de 25 mm². Entre os diferentes parâmetros de rugosidade citados, o primeiro, S_a , corresponde à média aritmética da ordenada absoluta em relação ao plano médio na área de avaliação. O segundo, S_z , representa a distância entre a altura máxima de pico e a profundidade máxima de vale na área de avaliação. O terceiro, S_{ku} , descreve a distribuição da topografia, sendo a medida do grau de achatamento ou agudeza dos picos presentes 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 e vales estreitos e profundos. O último parâmetro, S_{sk} , 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 [37].

Para observação do aspecto topográfico das superfícies usinadas foi utilizado o microscópio digital HIROX KH-1300, com capacidade de ampliação de 5 a 3000 vezes. As análises metalográficas foram obtidas utilizando o microscópio metalográfico Carl Zeiss, modelo Axio Observer Z1m, com capacidade de ampliação de 50 a 1000 vezes. As imagens obtidas correspondem ao centro das regiões usinadas por cada estratégia.

Os ensaios de microdureza em escala HV 0,05/10s (Vickers) foram realizados no equipamento DURAMIN-40 AC1, nas regiões Platô e Superior, ambas próximas e seguindo uma mesma geratriz. As medições foram realizadas na subsuperfície, iniciando a 30 μm da superfície, com espaçamento de 50 μm entre cada impressão, segundo a norma ASTM E384-22 [38].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, a fim de se melhor compreender os efeitos do contato ferramenta-peça sobre o acabamento gerado, apresentam-se na Figura 4 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.

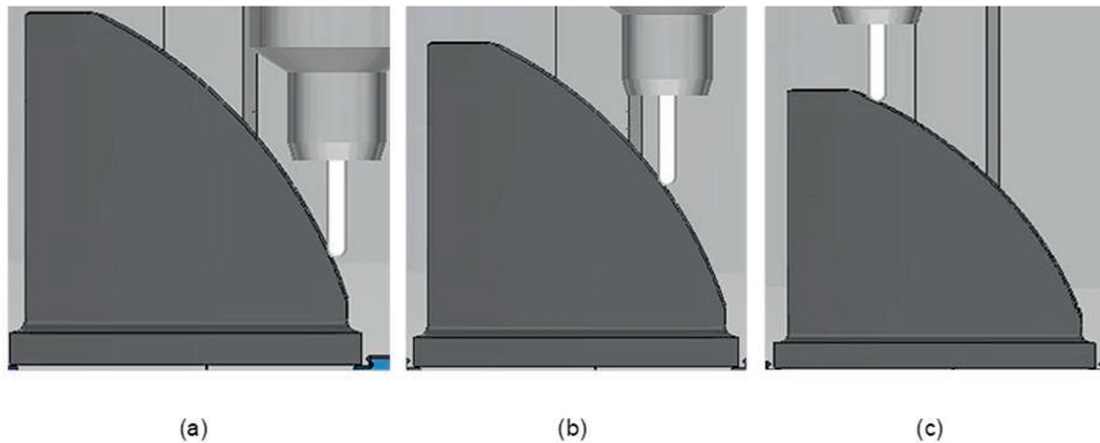


Figura 4: Contato da ferramenta durante o percurso de corte nas regiões (a) inferior, (b) meio e (c) superior.

A variação do contato da fresa acontece durante sua trajetória, fazendo com que o raio efetivo de corte varie, podendo-se atingir o centro de fresa, onde a velocidade de corte é nula. Em uma análise dos extremos, nota-se na usinagem da região Superior, com sentido descendente e corte discordante (Figura 4c), por exemplo, um contato mais próximo ao centro da fresa, o que pode levar ao esmagamento do material em detrimento do cisalhamento, produzindo deformação superficial. Para o sentido ascendente, com corte concordante, o raio efetivo de corte da fresa de ponta esférica é maior devido ao contato com a superfície, condição que é necessária para a ocorrência de cisalhamento. Na região Inferior (Figura 4a), a porção da fresa que toca a superfície possui maior diâmetro efetivo tanto no corte ascendente quanto no descendente e, por conseguinte, leva a uma maior velocidade de corte, o que pode gerar predominância de cisalhamento.

3.1. Caracterização da subsuperfície

Tendo em vista as condições mais críticas da região Superior, esta foi escolhida para análise da subsuperfície. Nas Figuras 5 e 6 são apresentadas micrografias com e sem ataque químico (Nital 4%) dos corpos de prova usinados pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag, com aumento de 100 e 500 vezes, para os aços VH131M e VTMPPlus, respectivamente.

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. 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 (Figura 7), medida nas regiões Platô e Superior, evidenciando um estado homogêneo e de integridade da superfície (sem alterações microestruturais e defeitos). De acordo com os gráficos, também não se observou encruamento dos materiais após a usinagem.

3.2. Caracterização 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 8 mostra os resultados da rugosidade média S_a para as quatro diferentes regiões analisadas nos aços VH131M e VTMPPlus.

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 [17], 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.

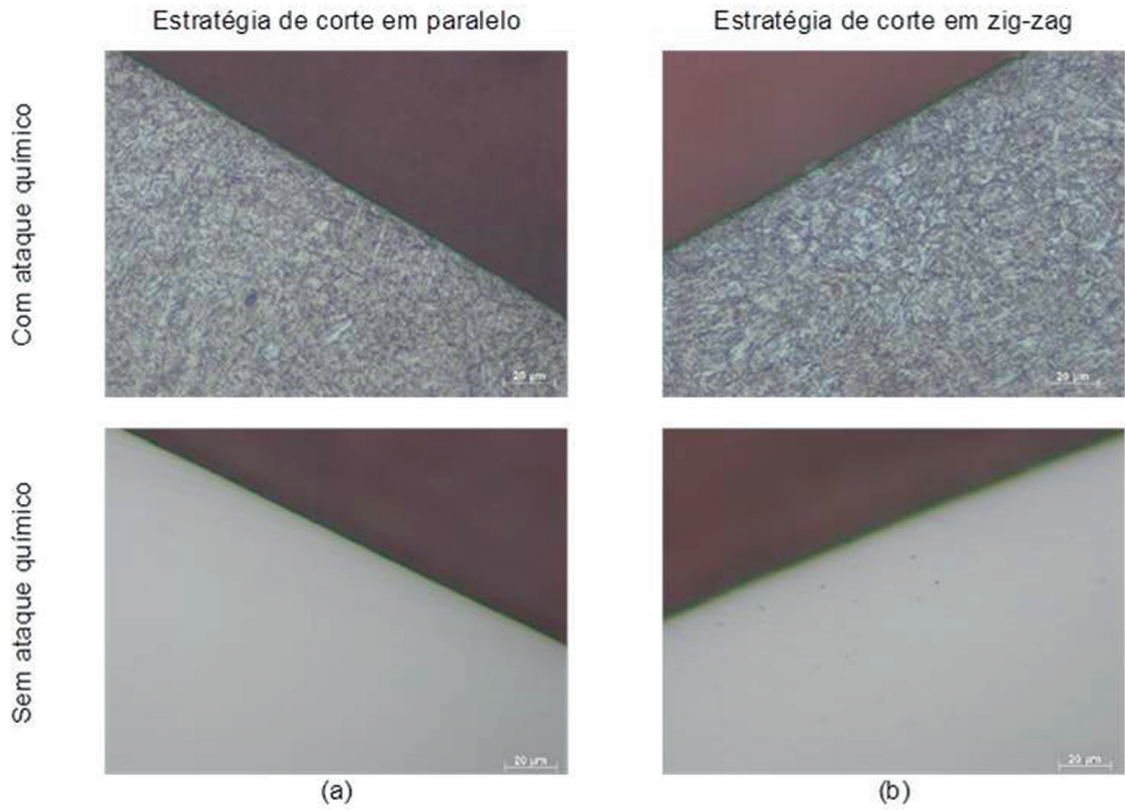


Figura 5: Micrografias da subsuperfície da região Superior do aço VH13IM após usinagem em (a) paralelo e (b) zig-zag.

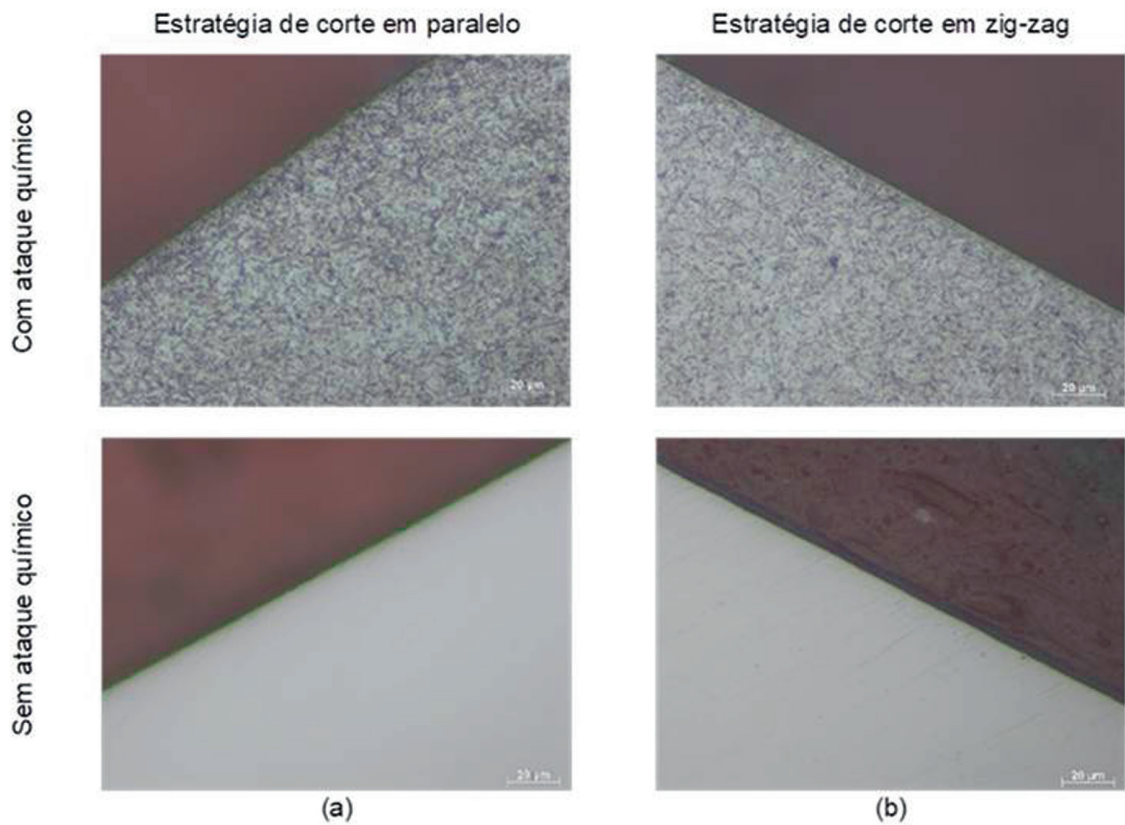


Figura 6: Micrografias da subsuperfície da região Superior do aço VTMPPlus após usinagem em (a) paralelo e (b) zig-zag.

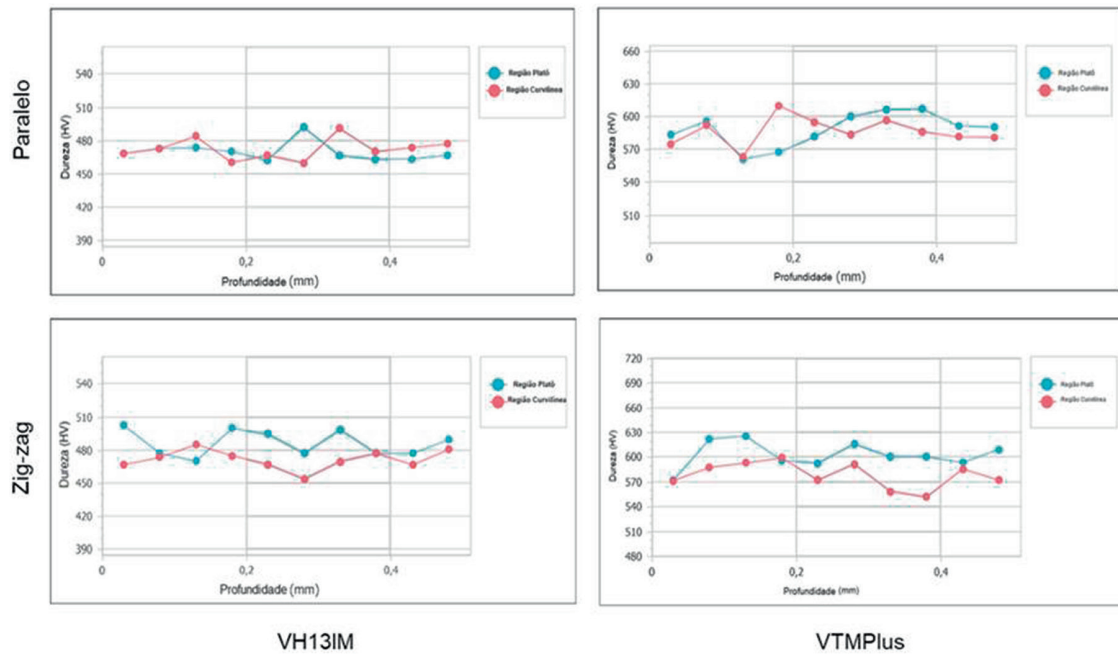


Figura 7: Valores de microdureza na subsuperfície em função da profundidade para as regiões platô e superior nos aços VH13IM e VTMLPlus fresados com estratégias de corte em paralelo e zig-zag.

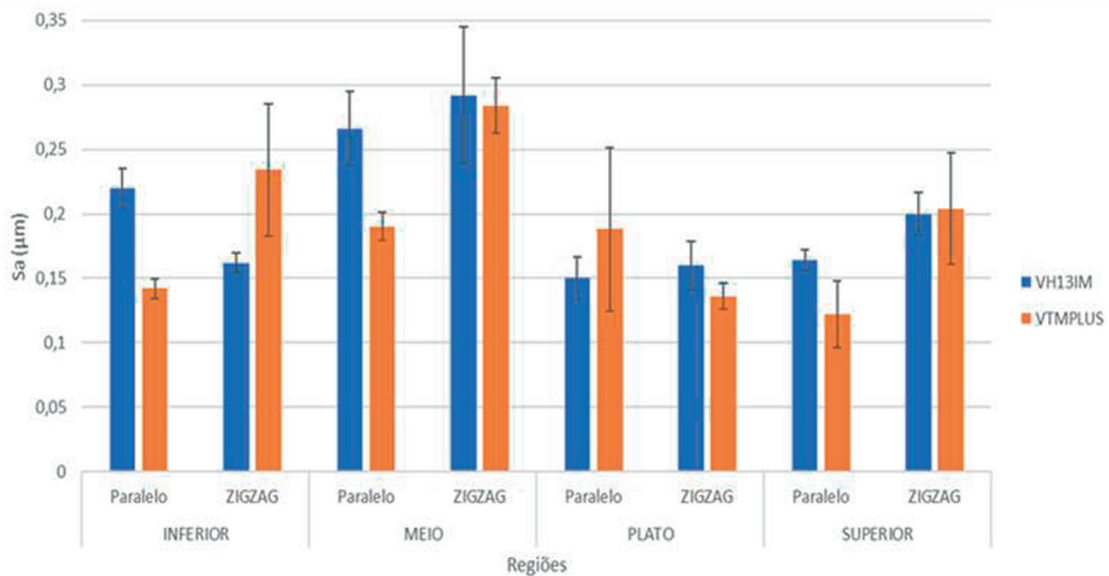


Figura 8: Rugosidade média na área S_a gerada pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões dos aços VH13IM e VTMLPlus.

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 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 Sz (Figura 9) tenha apresentado comportamento similar à da rugosidade média Sa 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.

Na Figura 10, podem ser observados os resultados relacionados à curtose Sku, que destacam a predominância de agudeza no perfil de rugosidade ($Sku > 3$) 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.

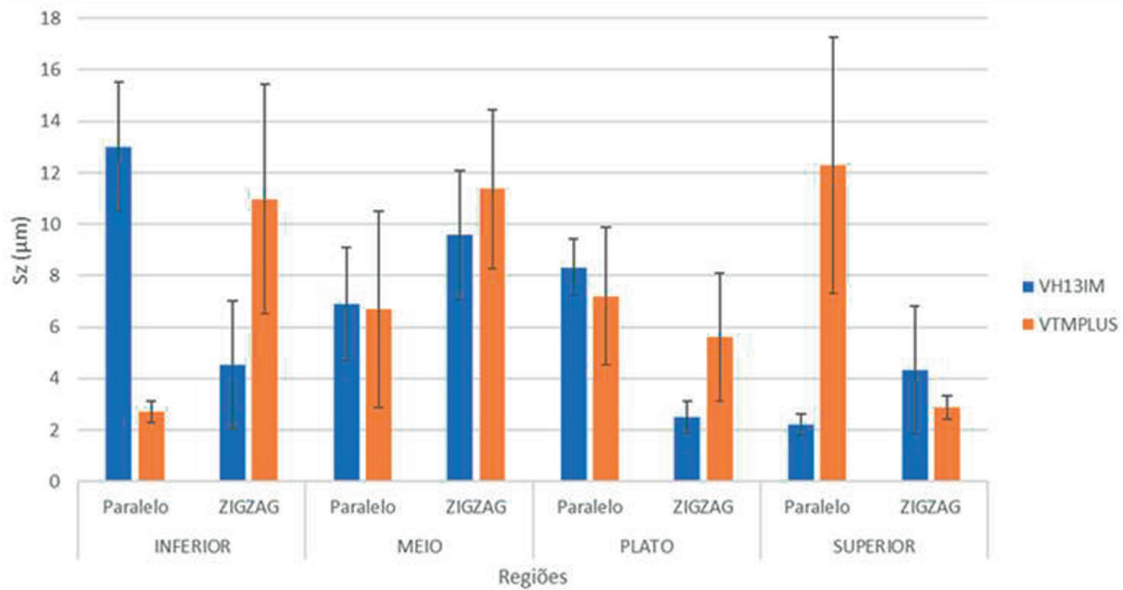


Figura 9: Rugosidade máxima na área Sz gerada pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões dos aços VH13IM e VTMPPlus.

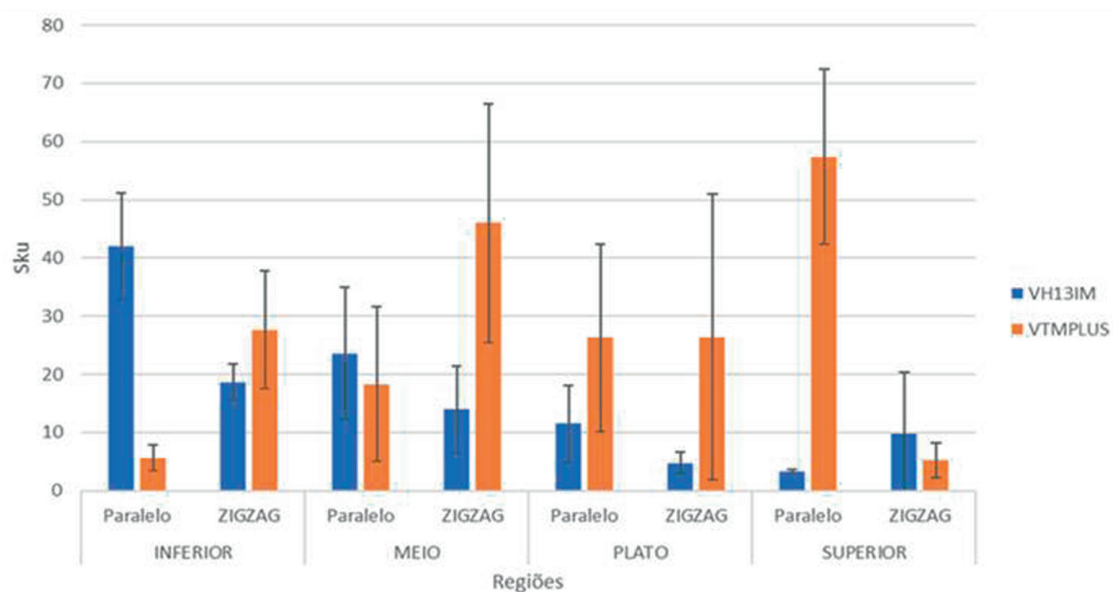


Figura 10: Valores de curtose Sku gerados pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões dos aços VH13IM e VTMPPlus.

Da mesma forma que no caso anterior, a assimetria Ssk (Figura 11) 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.

Em complemento às análises de rugosidade, as superfícies geradas foram avaliadas visualmente. A morfologia das diferentes regiões é apresentada nas Figuras 12 e 13 para os aços VH13IM e VTMPPlus, respectivamente, com as setas indicando o sentido de avanço da ferramenta, paralelo às laterais do bloco.

No aço VH13IM são observadas marcas mais claras da ferramenta sobre a peça, principalmente após a usinagem com a 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 aço VTMPPlus. As evidências para a estratégia zig-zag estão de acordo com os resultados observados por TUYSUZ *et al.* [14] 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.

3.3. Análise 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 [39].

Para classificação dessas duas superfícies (lisas e rugosas), 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 [40]. A superfície é considerada lisa quando a altura dessas asperidades, representadas pela rugosidade Ra, 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 Ra é a rugosidade média, θ é o ângulo de incidência e λ é comprimento de onda da luz.

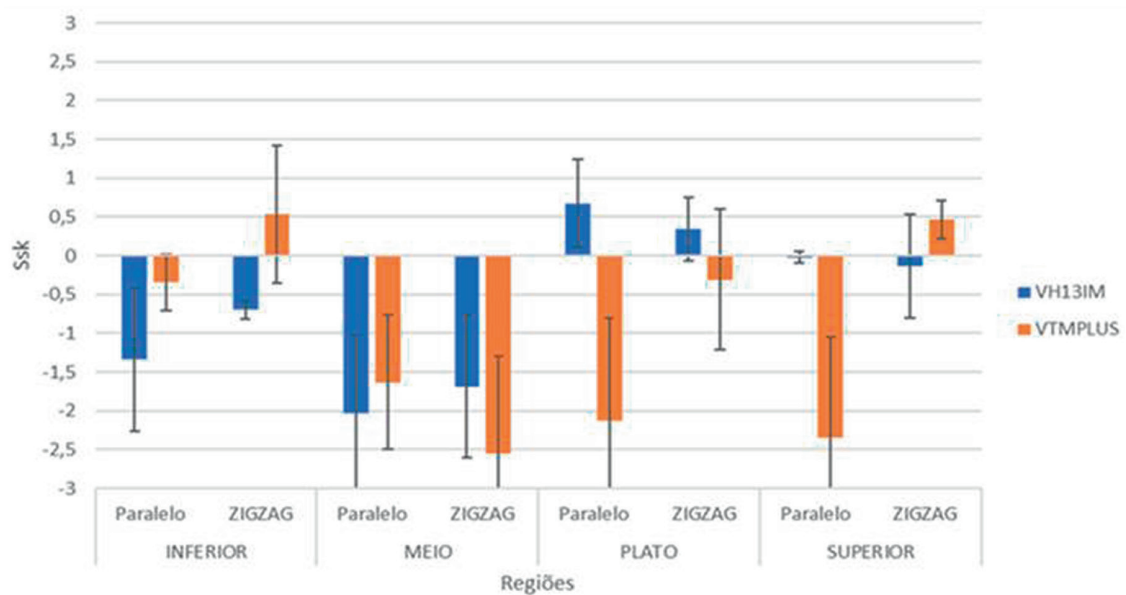


Figura 11: Valores de assimetria Ssk gerados pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões dos aços VH13IM e VTMPPlus.

$$Ra \leq \frac{\lambda}{8 \cdot \cos\theta} \tag{1}$$

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 $0,22 \mu\text{m}$ [41]. 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

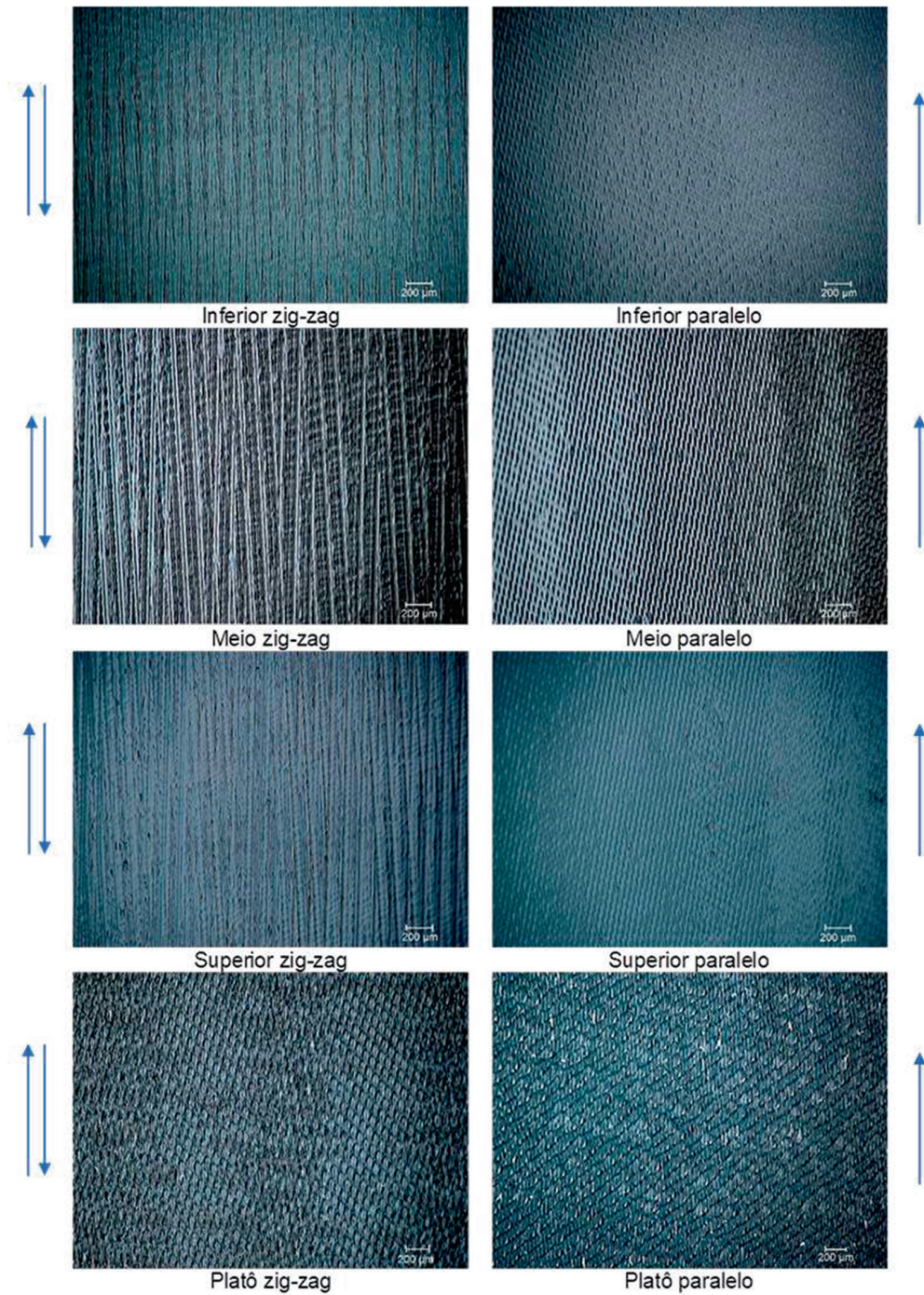


Figura 12: Superfícies geradas pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões do aço VH13IM.

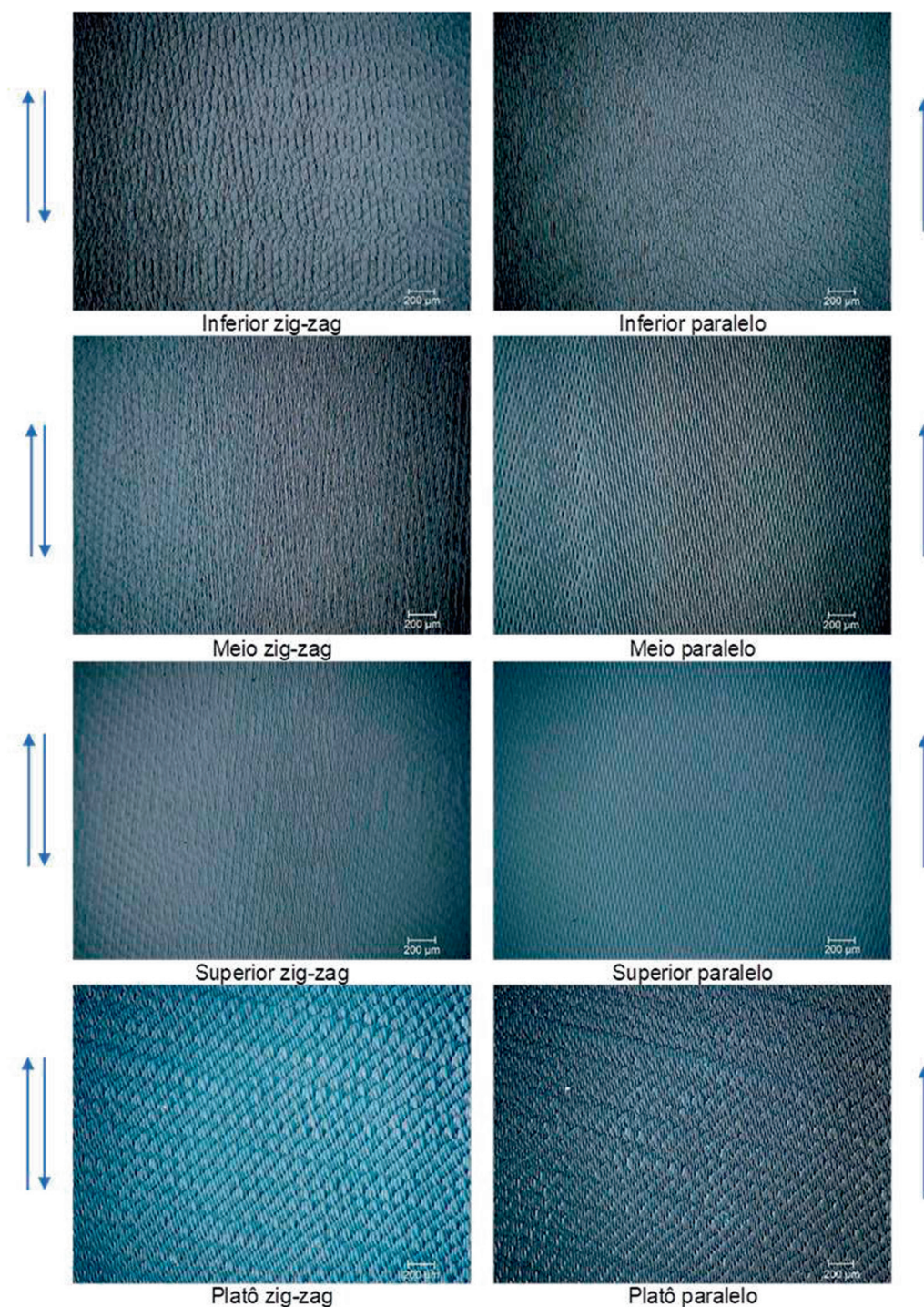


Figura 13: Superfícies geradas pelas estratégias de corte em paralelo e zig-zag nas quatro regiões do aço VTMLPlus.

Tabela 2. Nela, verifica-se que apenas as regiões Superior e Platô atingiram o critério especificado para as duas estratégias e materiais, enquanto a região Inferior teve acabamento adequado, independentemente da estratégia, para o aço VH13IM. De modo geral, é possível a obtenção de uma superfície especular em todas as regiões do aço VTMLPlus com a aplicação de uma estratégia de corte em paralelo.

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 *et al.* [42] mostraram haver relação entre o brilho instrumental e os parâmetros de análise de textura, sendo que, à medida que a rugosidade da superfície

Tabela 2: Situações com valores de rugosidade média $S_a < 0,22 \mu\text{m}$.

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
VTMPlus	0,14	X	0,19	X	0,19	0,14	0,12	0,20

aumentava, o brilho da superfície instrumental diminuía. No entanto, 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 em consonância com as imagens das superfícies geradas neste estudo apresentaram similaridade com as pesquisas de TOIGO *et al.* [40], SYLVAIN [41] e KANDI *et al.* [42] no que se refere aos níveis de rugosidade aceitáveis para uma superfície espelhada. Comparando os dois aços usinados, o VTMPlus permitiu a obtenção de menores valores de rugosidade média S_a 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 os resultados de rugosidade mais elevados nos testes realizados.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos em testes de fresamento em superfícies convexas 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 nos aços VH13IM e VTMPlus 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 VTMPlus 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 VTMPlus, 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 VTMPlus, com aplicação da estratégia de corte em paralelo, sendo o menor valor de rugosidade média obtido na região de $0,12 \mu\text{m}$.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de financiamento 001), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, Processo nº 2017/12309-7), das empresas Villares Metals, Seco Tools, Blaser Swissslube e Tecnohow para a execução deste trabalho.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] KIMINAMI, C.S., CASTRO, W.B., OLIVEIRA, M.F., *Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos*. Edgard Blücher, São Paulo, 2013.

- [2] 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*, Horizontina/RS, junho 2017.
- [3] REBEGGIANI, S., ROSÉN, B.-G., “Quantitative evaluation of the surface finish of high gloss polished tool steels”, *Surface Topography: Metrology and Properties*, v. 2, pp. 014002, 2014.
- [4] BOUJELBENE, M., MOISAN, A., TOUNSI, N., *et al.*, “Productivity enhancement in dies and molds manufacturing by the use of C1 continuous tool path”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 44, n. 1, pp. 101–107, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.08.005>
- [5] ALBANO, A.D., “*Estudo comparativo de processos de usinagem de superfícies complexas na fabricação de moldes de injeção de peças plásticas automotivas*”, Monografia de Graduação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- [6] SCHÜTZER, K., HELLENO, A.L., “Fatores que influenciam a usinagem de moldes e matrizes com altas velocidades”, *Revista de Ciencia y Tecnología*, v. 12, n. 23, pp. 7–14, 2004.
- [7] COSTA, D.D., VOLPATO, N., “Usinagem de formas complexas empregando a técnica de fatiamento,” In: *4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, São Pedro, 2007.
- [8] PATTARO JUNIOR, R., “*Estudo do consumo de energia durante a usinagem de uma cavidade de molde com diferentes estratégias*”, Tese de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.
- [9] RODRIGUES, M.A., “Desgaste das ferramentas de corte e do acabamento superficial a partir de diferentes estratégias CAD/CAM”, *Revista Máquinas e Metais*, v. 45, n. 516, pp. 112–141, 2009.
- [10] 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”, *Jixie Gongcheng Xuebao*, v. 63, n. 11, pp. 643–656, 2017.
- [11] STIPKOVIC, M.A., BORDINASSI, E., FARIAS, A., *et al.*, “Surface integrity analysis in machining of hardened AISI 4140 steel”, *Materials Research*, v. 20, n. 2, pp. 387–394, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0420>
- [12] VILA, C., AYABACAA, C., TORRES, R., *et al.*, “Analysis of different tool path strategies for free form machining with computer aided surface milling operations”, *Procedia Manufacturing*, v. 41, pp. 843–850, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2019.10.006>
- [13] VENTURA, C.E.H., “*Estudo dos esforços de corte no processo HSM aplicado à abertura de cavidades*”, Tese de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- [14] 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 & Manufacture*, v. 66, pp. 66–81, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.12.002>
- [15] DE SOUZA, A.F., MACHADO, A., BECKERT, S.F., *et al.*, “Evaluating the roughness according to the tool path strategy when milling free form surfaces for mold application”, *Procedia CIRP*, v. 14, pp. 188–193, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.089>
- [16] DE SOUZA, A.F., DINIZ, A.E., RODRIGUES, A.R., *et al.*, “Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 71, n. 9–12, pp. 1565–1577, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-013-5579-4>
- [17] TOH, C.K., “Surface topography analysis in high-speed finish milling inclined hardened steel”, *Precision Engineering*, v. 28, n. 4, pp. 386–398, 2004. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.01.001>
- [18] RECH, J., HAMDI, H., VALETTE, S., “Workpiece surface integrity”, In: Davim, J.P. *Machining: fundamentals and recent advances*. London, Springer, pp. 59–96, 2008. doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84800-213-5_3
- [19] SOUZA, A., CÂMARA, M.A., “Tensões residuais induzidas pela operação de fresamento do aço ABNT 4340 sob variação da velocidade de corte, ângulo de posição e tratamento térmico”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 2, pp. e-12632, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200002.1032>
- [20] CALIL, L.F., “*Estudo de caso para avaliação do tratamento dado à tecnologia de superfície no meio fabril*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- [21] YAN, C.Q., ZHAO, J., LI, Y.E., *et al.*, “Experimental research on surface roughness in high-speed milling of complex surface mold steel”, *Materials Science Forum*, v. 626–627, pp. 123–128, 2009. doi: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.626-627.123>

- [22] GHAZALI, M., MAZLAN, A., WEI, L., *et al.*, “Effect of machining parameters on the surface roughness for different type of materials,” *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, v. 530, pp. 012008, 2008.
- [23] REIS, B.C.M., PEREIRA, N.F.S., SANTOS, A.J., *et al.*, “Influência do material da ferramenta de corte sobre a usinabilidade do aço ABNT 4340 no torneamento”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 3, pp. e-12449, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190003.0765>
- [24] MARTINS, A.M., SOUZA, P.S., SANTOS, A.J., *et al.*, “Estudo sobre a integridade superficial do aço ABNT 4140 após a operação de torneamento”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 2, pp. e-12627, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200002.1027>
- [25] SANTOS, D.V., ABRÃO, A.M., SANTOS, A.J., “Avaliação da usinabilidade do aço inoxidável supermartensítico na operação de torneamento”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 2, pp. e-12639, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200002.1039>
- [26] VICENTE NETO, L., HELLENO, A., “Tendência na redução do ciclo de desenvolvimento de moldes e matrizes influenciada pela estratégia de usinagem e polimento,” In: *Moldes ABM 2011*, São Paulo, 2012.
- [27] DOMINGUES JUNIOR, G., “Polibilidade de aços para moldes de plástico”, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.
- [28] MENGES, G., MICHAELI, W., MOHREN, P., *How to make injection molds*, 3 ed., Munich, Hanser-Verlag, 2000.
- [29] HARADA, J., *Moldes para injeção de termoplásticos – projetos e princípios básicos*, São Paulo, Artiber, 2004.
- [30] DE SOUZA, A.F., “Contribuição ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades”, Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- [31] VORBURGER, T.V., RHEE, H.G., RENEGAR, T.B., *et al.*, “Comparison of optical and stylus methods for measurement of rough surfaces”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 33, n. 1-2, pp. 110–118, 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-007-0953-8>
- [32] MESQUITA, R., MORAES, P., “Tratamento térmico de moldes e matrizes e os aspectos de qualidade relevantes”, *EXACTA*, v. 10, n. 3, pp. 357–370, 2012. <http://dx.doi.org/10.5585/exacta.v10n3.3915>
- [33] VILARES METALS, Aço VH13IM. 2021. <https://www.villaresmetals.com.br/en/Products/Tool-steel/Hot-work/VH13IM>. acessado em setembro de 2021.
- [34] VILARES METALS, Aço VTPLUS. 2021. <https://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-quente/VTPLUS>. acessado em setembro de 2021.
- [35] ALI, M.Y., JAILANI, W.N., RAHMAN, M., *et al.*, “Effect of minimum quantity lubrication on surface roughness in tool-based micromilling”, *IJUM Engineering Journal*, v. 18, n. 1, pp. 147–154, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.31436/iiumej.v18i1.638>
- [36] DO, T.-V., HSU, Q.-C., Optimization of minimum quantity lubricant conditions and cutting parameters in hard milling of AISI H13 steel”, *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, v. 6, n. 3, pp. 83, 2016. doi: <https://doi.org/10.3390/app6030083>
- [37] ZENG, Q., QIN, Y., CHANG, W., *et al.*, “Correlating and evaluating the functionality-related properties with surface texture parameters and specific characteristics of machined components”, *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 149, pp. 62–72, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.09.044>
- [38] ASTM E384-22, Test Method for Microindentation Hardness of Materials, West Conshohocken, ASTM International, 2022.
- [39] KIGLE-BOECKLER, G., “Measurement of gloss and reflection properties of surfaces”, *Metal Finishing*, v. 93, n. 5, pp. 28–31, 1995. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0026-0576\(95\)90685-B](http://dx.doi.org/10.1016/0026-0576(95)90685-B)
- [40] TOIGO, F., MARVIN, A., CELLI, V., *et al.*, “Optical properties of rough surfaces: general theory and the small roughness limit”, *Physical Review. B, Solid State*, v. 15, n. 12, pp. 5618–5626, 1977. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.15.5618>
- [41] SYLVAIN, M., “Diffuse reflection by rough surfaces: an introduction”, *Comptes Rendus Physique*, v. 6, n. 6, pp. 663–674, 2005. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.crhy.2005.06.014>
- [42] KANDI, S., PANNAHI, B., ZOGHI, N., “Impact of surface texture on the perceptual and instrumental gloss”, *Progress in Organic Coatings*, v. 171, pp. 107028, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107028>