

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

Alvaro Araujo de Moraes

**Caracterização de superfícies texturizadas por vibração: análise de
parâmetros de rugosidade e molhabilidade**



São Carlos - SP

Março / 2026

Alvaro Araujo de Moraes

**Caracterização de superfícies texturizadas por vibração: análise de
parâmetros de rugosidade e molhabilidade**

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

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Debora Carneiro Moreira

Co-orientador: Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli

São Carlos - SP

2026

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Alvaro Araujo de Moraes, realizada em 27/03/2026.

Comissão Julgadora:

Prof^a. Dr^a. Debora Carneiro Moreira (EESC/USP)

Prof. Dr. Flávio Yukio Watanabe (UFSCar)

Prof. Dr. Daniel Iwao Suyama (UNICAMP)

Dedico esse trabalho a minha família e
amigos que sempre estiveram comigo.

AGRADECIMENTOS

Gratidão é a palavra que resume minha trajetória no mestrado. Sou grato primeiramente a Deus pela oportunidade de realizar meu sonho, um sonho que há muito tempo ardia em meu coração. Sou grato pelas bênçãos derramadas em minha vida, por todo percurso, pela provisão, pelo cuidado e por toda a força dada. Toda honra e glória são tuas, Deus.

Sou grato à minha família, aos que se fizeram mais presentes, minha mãe e jóia preciosa Vânia, meu irmão Gabriel e minhas avós Amélia e Francisca (Mozinha), que sempre me ouviram nas horas difíceis, me incentivaram nas horas de aflição e me deram força para continuar. A meu pai Ilton, a meus avôs, Francisco (Chico) e Izo, por serem suporte quando precisei. Aos meus tios Naiara, Izoeldo, Cicero e Leide por sempre acreditarem em mim. Minhas primas Isabely, Eliza e minha afilhada linda, Sofia.

Agradeço aos amigos que fiz durante o mestrado, Karen Silva, Carla Perim, Paola Velândia, Júlia Sassa (pessoa mais engraçada e gente boa que já conheci), Flávio Garzeri, Ivan Martins, Marina Holanda (Diva), Bruno Moura, Rafael Nascimento (Primo), Gabriel Chahad, Gustavo Silva, Leandro, Bruna, Juan Camilo, Lara Fernandes e Silvia Rosa. Quero deixar um agradecimento especial para meu grande amigo Benício Nacif, obrigado por aguentar minhas chateações, loucuras e crises acadêmicas, você é um presente que a pós-graduação me deu “*meu amigo véi*”.

Gostaria de agradecer a todos os professores que tive a oportunidade de conhecer nesse período, em especial à professora Debora Moreira, por toda orientação e suporte em meu trajeto, obrigado por acreditar em mim e por ser esse ser humano incrível. Ao professor Armando Antonialli, coorientador que me deu todo apoio no mestrado, muito obrigado pela paciência e comprometimento. Agradeço aos professores Daniel Suyama e Flávio Watanabe pela participação na minha banca de avaliação, suas contribuições foram enriquecedoras para o refinamento do trabalho. Ao professor Sidney Bruce, que desde o início esteve presente me ajudando em tudo que precisei. Ao professor Carlos Ventura, por me ajudar a sanar muitas dúvidas e por me permitir ficar na sala de seus alunos. Ao professor Fernando Guimarães, que foi um personagem muito importante na minha formação, me ajudando e dando oportunidades de crescimento na vida acadêmica.

Também agradeço aos técnicos Djalma e Leonildo, foi um prazer conhecê-los e trabalhar junto a eles. Obrigado por todo suporte, disponibilidade e dedicação nos

experimentos que realizamos juntos. Ao colega de trabalho Uelinton, que me ajudou na realização de alguns experimentos. Agradeço também à zeladora do NuLEEn, Simoni, por sempre ter cuidado tão bem de mim (e por todos os cafezinhos que salvavam nossa tarde no laboratório).

Quero agradecer as pessoas que foram essenciais para que eu chegasse até aqui, meus amigos da vida. Obrigado Pedro Ivo, por todo o apoio emocional nos momentos difíceis e por sempre estar torcendo por mim, te amo meu amigo. À Francislan, pelos dias de descontração e por estar presente em todos os momentos. Ao Wesley Guilherme (o maior resolvidor de demandas da UFC), obrigado por todas as conversas, pelas risadas e principalmente pelo apoio na leitura dos meus textos, você é um presente de Deus na minha vida. À Julia Targino, pela amizade de anos e por sempre ceder uma vaguinha em seu apartamento quando preciso ir em Ribeirão Preto. À Ana Luiza, parceira desde a graduação, que me ajuda nos desafios da engenharia e me ouve quando ligo desesperado porque não consegui resolver algo, você é uma benção minha amiga.

Meus agradecimentos às professoras Gilcarla Lima, que me apresentou o mundo da pesquisa no ensino médio e desde então despertou esse desejo em meu coração, e Anielle Brito, minha orientadora na graduação que me incentivou a seguir no mundo acadêmico, sou grato por cada conselho e por acreditarem em mim.

Agradeço imensamente aos meus amigos de Ribeirão Preto que sempre foram presentes, Henrique Antonelli, Divino Junior, Thaysa Prado e Heloá Silva. Vocês foram fundamentais para o meu crescimento e desenvolvimento durante toda essa jornada.

Por fim, agradeço à CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro durante todo o mestrado e à FAPESP pelo financiamento do Auxílio à Pesquisa – Projeto Geração (Processo nº 2022/06392-7).

“Deus é a causa primeira de todas as coisas e o fundamento último da verdade.”

(René Descartes)

RESUMO

A engenharia de superfícies tem se consolidado como um campo essencial para a compreensão de como características topográficas influenciam o desempenho funcional de materiais em diferentes aplicações, como por exemplo em trocadores de calor. Sendo assim, a investigação da relação entre parâmetros de fabricação, vibrações na usinagem e variação nos parâmetros de rugosidade superficial, apresenta crescente interesse científico e tecnológico. Nesse contexto, as vibrações proporcionadas por atuadores ou inerentes aos processos de usinagem podem alterar significativamente a morfologia superficial, resultando em superfícies com características distintas conforme as condições do processo. Assim, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar superfícies planas usinadas de alumínio, latão e aço inoxidável, através dos processos de torneamento e fresamento, aplicando diferentes condições de usinagem, com ênfase na análise de parâmetros de rugosidade e molhabilidade. A caracterização da topologia superficial das amostras foi realizada com microscopia confocal, sendo avaliados os parâmetros de rugosidade média (R_a), assimetria (R_{sk}) e curtose (R_{ku}). As análises de molhabilidade foram realizadas com o auxílio de um tensiômetro óptico, proporcionando medições de ângulos de contato estático, de avanço e de recuo, utilizando água destilada como fluido de trabalho. Os resultados obtidos no torneamento indicaram que, para todos os materiais analisados, as amostras produzidas com parâmetros de usinagem mais elevados apresentaram ângulos de contato superiores em relação às superfícies fabricadas com parâmetros mais suaves. Em contrapartida, observou-se comportamento oposto das amostras de alumínio fabricadas por fresamento, com maiores valores de ângulo de contato associados à condição de maior velocidade, correspondente à condição de usinagem instável. De modo geral, verificou-se uma associação consistente entre o comportamento do parâmetro de assimetria e os ângulos de contato estáticos, visto que em diversos pontos onde ocorreu variação de assimetria, também resultaram em variações de ângulo de contato estático. Esses resultados contribuem para a compreensão da influência das vibrações nas características topográficas das superfícies usinadas, auxiliando na correlação entre condições de fabricação, rugosidade superficial e molhabilidade.

Palavras-chave: Usinagem, *chatter*, ângulo de contato, texturização de superfícies.

ABSTRACT

Surface engineering has become an essential field for understanding how topographical characteristics influence the functional performance of materials in different applications, such as heat exchangers. Therefore, investigating the relationship between manufacturing parameters, machining vibrations, and variations in surface roughness parameters has attracted increasing scientific and technological interest. In this context, vibrations induced by actuators or inherent to machining processes can significantly alter surface morphology, resulting in surfaces with distinct characteristics depending on the process conditions. Thus, the present work aims to characterize flat machined surfaces of aluminum, brass, and stainless steel produced through turning and milling processes under different machining conditions, with emphasis on the analysis of roughness and wettability parameters. The characterization of the surface topology of the samples was carried out using confocal microscopy, evaluating the parameters of average roughness (R_a), skewness (R_{sk}), and kurtosis (R_{ku}). Wettability analyses were performed using an optical tensiometer, enabling measurements of static, advancing, and receding contact angles, with distilled water used as the working fluid. The results obtained from turning indicated that, for all analyzed materials, samples produced under more severe machining parameters exhibited higher contact angles compared to surfaces manufactured under milder conditions. In contrast, the opposite behavior was observed for aluminum samples produced by milling, where higher contact angle values were associated with the higher-speed condition corresponding to unstable machining. Overall, a consistent association was observed between the behavior of the skewness parameter and static contact angles, since in several cases where skewness varied, variations in static contact angle were also observed. These results contribute to the understanding of the influence of vibrations on the topographical characteristics of machined surfaces, supporting the correlation between manufacturing conditions, surface roughness, and wettability.

Keywords: Machining, chatter, contact angle, surface engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de ebulição para superfícies com rugosidades médias diferentes.....	13
Figura 2 - Diagrama de corte de metal. (a) processo de torneamento e (b) contato ferramenta-material.	16
Figura 3 - Processos de (a) faceamento e (b) fresamento.....	17
Figura 4 - Sistema regenerativo com sobreposição de corte.	18
Figura 5 - Corte com Chatter.....	20
Figura 6 - Diagrama de lóbulos de estabilidade (DLE).....	23
Figura 7 - Representação dos parâmetros de rugosidade.	25
Figura 8 - Ângulo de contato.....	27
Figura 9 - Processo de formação de bolha em ebulição.	28
Figura 10 - Movimento do líquido durante a nucleação de bolhas.	28
Figura 11 - Comparação de rugosidades superficiais com valores de 200 μm e 400 μm em suas respectivas profundidades de usinagem.....	31
Figura 12 - Superfície usinada após a medição da rugosidade e marcação das zonas estáveis e de vibração.	32
Figura 13 - Ângulos de contato estático de superfícies em contato com gotas de 4 μL de diferentes composições.....	33
Figura 14 - Fluxograma de processos do trabalho.....	35
Figura 15 - Imagens metalográficas 50 μm : (a) Alumínio; (b) Latão; (c) Aço inoxidável.	36
Figura 16 - Amostras fabricadas: (a) Moedas faceadas de alumínio, latão e Aço inoxidável 304L. (b) amostras de alumínio fresadas.....	38
Figura 17 - Porta-ferramenta DWLNR 2525M 08.	39
Figura 18 - Fabricação dos corpos de prova: Faceamento.	39
Figura 19 - Fresa de topo ROCAST DIN 844 NA - 8mm.....	41

Figura 20 - Ensaio experimental para geração da FRF.	42
Figura 21 - FRF da ferramenta.	43
Figura 22 - Modelo matemático utilizado: (a) Sistema de corpo engastado; (b) Sistema massa-mola-amortecimento.....	44
Figura 23 - FRF fixação de 50 mm (Linha preta: Experimental; Linha azul: Modelo matemático).	46
Figura 24 - Diagrama de lóbulos de estabilidade do modelo: Regiões de estabilidade e instabilidade.....	47
Figura 25 - Seleção de parâmetros de usinagem para cada condição de estabilidade....	48
Figura 26 - ALICONA Mod. INFINITEFOCUS SL.	49
Figura 27 - Regiões de coleta de dados: (a) Amostra faceada (b) Amostra fresada.....	49
Figura 28 - Medição de distâncias e faixa de medição: (a) Régua do software, (b) faixa de medição das amostras.	50
Figura 29 - Tensiômetro óptico KRÜSS DSA25S	51
Figura 30 - Medidas utilizadas para controle de distâncias.....	52
Figura 31 - Medição de ângulo de avanço e recuo, respectivamente.	52
Figura 32 - Texturas diferentes nas mesmas superfícies. (a) Moedas faceadas, (b) Amostra fresada.....	53
Figura 33 - Perfis de rugosidade das amostras de alumínio torneadas: (a) 450 RPM, (b) 1.500 RPM.....	55
Figura 34 - Valores de rugosidades médias: (a) Alumínio, (b) Latão e (c) Aço inoxidável.	56
Figura 35 - Valores de assimetria: (a) Alumínio, (b) Latão e (c) Aço inoxidável.	58
Figura 36 - Valores de curtose: (a) Alumínio, (b) Latão e (c) Aço inoxidável.	60
Figura 37 - Ângulos de contato estáticos (volume de 3 μ L).	62
Figura 38 - Ângulos de contato estáticos (volume de 1 μ L).	63
Figura 39 - Ângulo de contato dinâmico de uma amostra de alumínio (Torneamento). 65	

Figura 40 - Ângulo de contato dinâmico: (a) Ângulo de avanço, (b) Ângulo de recuo.	65
Figura 41 - Perfis de rugosidade em amostras fresadas: (a) 4.500 RPM, (b) 7.500 RPM.	66
Figura 42 - R_a das amostras fresadas: (a) 1º passe, (b) 2º passe e (c) 3º passe.....	67
Figura 43 - Assimetria das amostras fresadas: (a) 1º passe, (b) 2º passe e (c) 3º passe.	69
Figura 44 - Curtose das amostras fresadas: (a) 1º passe, (b) 2º passe e (c) 3º passe.	71
Figura 45 - Ângulo de contato estático das amostras fresadas (volume 3 μ L).....	73
Figura 46 - Ângulo de contato dinâmico de uma amostra de alumínio (Fresamento)...	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades químicas dos materiais.	37
Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos materiais.	37
Tabela 3 - Parâmetros de fabricação por faceamento dos corpos-de-prova.	40
Tabela 4 - Velocidade de corte no faceamento.	40
Tabela 5 - Características da fresa.	41
Tabela 6 - Valores de entrada referente à fresa.	44
Tabela 7 - Modelo simplificado.	46
Tabela 8 - Parâmetros de fabricação por fresamento.	47

LISTA DE SIGLAS

<i>DLE</i>	Diagrama de lóbulos de estabilidade
<i>FRF</i>	Função de resposta em frequência
<i>CTC</i>	Coefficiente de transferência de calor
<i>FCC</i>	Fluxo crítico de calor
<i>RPM</i>	Rotação por minuto
<i>NBR</i>	Norma brasileira
<i>R_a</i>	Rugosidade média
<i>R_{sk}</i>	Assimetria
<i>R_{ku}</i>	Curtose

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Massa
m_{eq}	Massa equivalente
k	Rigidez
k_{eq}	Rigidez equivalente
ρ	Densidade
A	Área da seção da ferramenta
E	Módulo de elasticidade
I	Momento de inércia geométrico da seção transversal
c	Amortecimento
c_c	Amortecimento crítico
f	Avanço
a_p	Profundidade de usinagem
F_f	Força de corte
x	Deslocamento
β	Diferença de fases
h	Espessura do cavaco
h_0	Espessura pretendida de cavaco
t	Tempo de rotação
T	Período de rotação
$y(t)$	Corte atual
$y(t - T)$	Corte anterior
\ddot{y}	Aceleração
\dot{y}	Velocidade
y	Deslocamento
K_f	Constante de corte
a	Largura de corte
ω_n	Frequência de ressonância
ω_c	Frequência <i>chatter</i> [Rad/s]
f_c	Frequência <i>chatter</i> [Hz]
$G()$	Parte real da <i>FRF</i>

$H()$	Parte imaginária da FRF
a_{lim}	Profundidade limite de usinagem
ψ	Ângulo de fase
ζ	Fator de amortecimento
β_R	Constante de amortecimento de Rayleigh
v_c	Velocidade de corte (faceamento)
D	Diâmetro da peça
n	Rotação
n_p	Número de passes calculado
$n_{p,real}$	Número de passes real
L	Largura do passe
D_f	Diâmetro da fresa
a_e	Largura de corte do fresamento
\bar{x}	Média aritmética
σ	Desvio padrão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	13
1.2 Organização do texto.....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 Texturização de superfícies por meio da usinagem.....	15
2.2 Vibração autoexcitada/ <i>Chatter</i>	18
2.3 Características superficiais	23
3. ESTADO DA ARTE.....	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.1 Preparação das amostras.....	36
4.1.2 Amostras torneadas/faceadas.....	39
4.1.3 Amostras fresadas.....	41
4.2 Caracterização das superfícies.....	48
4.3 Medições de molhabilidade.....	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1 Superfícies fabricadas por torneamento/faceamento.....	55
5.1.1 Parâmetros de rugosidade das peças faceadas.....	55
5.1.2 Medições de ângulo de contato estático das peças faceadas	62
5.1.3 Medições de ângulo de contato dinâmico das peças faceadas.....	64
5.2 Superfícies fabricadas por fresamento	66
5.2.1 Parâmetros de rugosidade das peças fresadas	67
5.2.2 Medição de ângulo de contato estático das peças fresadas	72
5.2.3 Medição de ângulo de contato dinâmico das peças fresadas.....	74
6. CONCLUSÕES	76
REFERÊNCIAS	78
ANEXO A – Certificado de qualidade dos materiais.....	83

1. INTRODUÇÃO

A engenharia de superfícies tem se consolidado como um importante campo de estudo em diversas áreas para melhorias de desempenho em diversos setores, proporcionando a produção de superfícies autolimpantes ou intensificadoras de transferência de calor, por exemplo. O estudo dos impactos de diversas características de no desempenho das superfícies, em especial relacionadas com suas texturas, tem motivado muitos trabalhos e linhas de investigação associadas à engenharia. Esse interesse se reflete diretamente: nos processos de fabricação de tais superfícies, por meio do estudo de diferentes parâmetros, como fenômenos vibracionais nos processos de usinagem; na análise da qualidade superficial, identificando parâmetros que contribuam para sua caracterização e aprimoramento, de acordo com as necessidades específicas das aplicações desejadas; e na investigação do desempenho das superfícies ao serem submetidas a condições esperadas na sua aplicação, como o a dissipação de calor por superfícies associadas a diferentes topologias.

Na natureza, é possível encontrar diversos tipos de superfícies que motivaram investigações de engenharia de superfícies, como a folha de lótus, cuja classificação como super-hidrofóbica está também associada à baixa adesão de água a sua superfície, proporcionando efeito auto-limpante, o que se deve à estrutura superficial que reduz a área efetiva de contato com a água (Wu *et al.*, 2025). Outros exemplos são estudos que envolvem a caracterização superficial da pele de peixes e tubarões, com intuito de entender e replicar as mesmas características para reduzir o arrasto de superfícies, como em aviões, navios e tubulações (RR Baeten *et al.*, 2024), assim como estudos envolvendo a superfície dos dedos de lagartixas, que estimularam a criação de superfícies microestruturadas em adesivos (Li *et al.*, 2025). Há também estudos voltados para superfícies intensificadoras de transferência de calor por ebulição, que identificaram que a superfície das pétalas de algumas flores alta adesão de água, mas com ângulo de contato elevado, característica que favorece a nucleação de bolhas, ao mesmo tempo que a superfície tende a se manter em constante contato com a fase líquida quando submetida ao fenômeno de ebulição (Allred *et al.*, 2019).

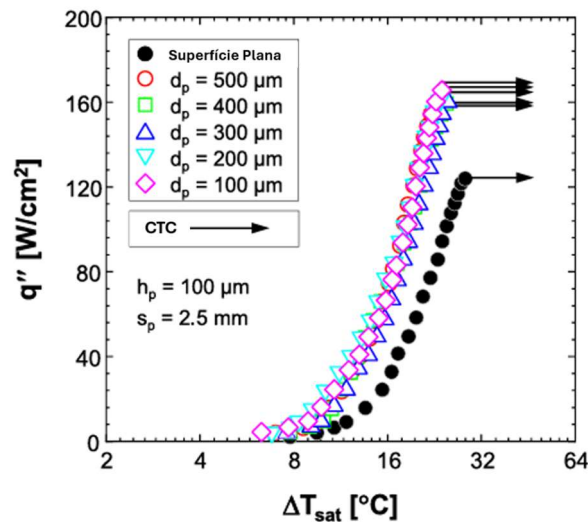
Observa-se, portanto, que a geometria das texturas produzidas desempenha papel determinante nas propriedades interfaciais, influenciando diretamente especificidades como adesão, atrito e molhabilidade. Com isso, parâmetros de rugosidade superficial e

medidas de molhabilidade são amplamente monitorados para a compreensão das suas interações e seus efeitos no desempenho de superfícies para as mais diversas aplicações. Tais estudos têm sido aplicados em engenharia de superfícies, utilizados para reproduzir e otimizar o desempenho de interfaces sólido-fluido e sólido-sólido (Ketayar et al, 2022). Apesar de muitos trabalhos envolverem tecnologias de microfabricação associadas a sistemas eletrônicos ou microeletromecânicos, a proposta de fabricar superfícies com características desejadas também motivou o estudo da variação de parâmetros em técnicas mais convencionais e facilmente escaláveis de fabricação, visando aplicações em equipamentos de grande porte e ambientes industriais que podem demandar superfícies mais robustas. Assim, diferentes técnicas têm sido empregadas para a obtenção de superfícies texturizadas, incluindo processos de usinagem controlada, tratamentos químicos, deposição de filmes finos e métodos de micro e nanotexturização a laser. Em particular, para superfícies usinadas é importante considerar, por exemplo, as particularidades do processo de fabricação, as condições de contorno impostas no processo e o material utilizado, os quais podem intervir na topologia de uma superfície, e conseqüentemente em seus parâmetros de rugosidade. Com a mudança de um ou mais desses componentes, pode haver alterações em aspectos estruturais da máquina-ferramenta e no contato da ferramenta com o material, provocando a geração de vibrações autoexcitadas na usinagem, que se refletirão nas particularidades da superfície final (Wei et al., 2022).

Além de estudos que envolvem rugosidade e molhabilidade, diversas abordagens de resfriamento por mudança de fase têm sido aplicadas, incluindo sistemas de tubos de calor, resfriamento por imersão bifásica, integrações com ciclos de compressão de vapor e armazenamento térmico. Essas tecnologias exploram a capacidade de absorção e liberação de calor durante as transições de fase (Yuan et al.,2020). Para isso, trabalhos com experimentos de ebulição em piscina têm sido conduzidos para avaliar diferentes superfícies em condições controladas. Todo o ciclo de formação de uma bolha iniciando pelo seu nascimento, depois crescimento, desprendimento e interação com as demais bolhas formadas, são investigações que impactam diretamente nas características térmicas dessas superfícies, indicando o coeficiente de transferência de calor e fluxo crítico para cada superfície. A Figura 1 mostra resultados de ebulição em superfícies com diferentes características, onde se vê que as superfícies modificadas estudadas têm capacidade de dissipar maior fluxo de calor para uma diferença de temperatura fixa,

quando comparadas com uma superfície plana do mesmo material. Indica-se que características de formação de bolhas são diferentes de acordo com a superfície avaliada, o que resulta nos maiores valores de coeficiente de transferência de calor e na dissipação de fluxos de calor mais elevados pelas superfícies modificadas (Liang *et al.*, 2020).

Figura 1 - Curva de ebulição para superfícies com rugosidades médias diferentes.



Fonte: Adaptado de Liang *et al.* (2020).

Entender como as condições de usinagem interferem nas características das superfícies e quais os impactos causados na interação líquido-superfície, pode contribuir para uma compreensão mais concreta de ambos os conceitos, ajudando na busca por uma possível correlação entre eles. Esse tipo de conhecimento pode abrir caminhos para o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas a melhorias nos processos de fabricação, investigações na área de vibrações e em análises térmicas. Tal abordagem pode ajudar no melhor desempenho de toda cadeia de fabricação e aplicação, partindo desde o aumento da vida útil de ferramentas até o aperfeiçoamento da qualidade superficial para aplicações de engenharia.

1.1 Objetivos

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral caracterizar superfícies fabricadas sob diferentes condições de usinagem, incluindo a indução de vibrações autoexcitadas (*chatter*). A topologia superficial foi avaliada através de microscopia confocal, revelando parâmetros de rugosidade, enquanto a molhabilidade foi

analisada com um tensiômetro óptico. O estudo visa atingir o objetivo geral por meio dos seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão de literatura sobre usinagem, vibrações autoexcitadas e características superficiais.
- Fabricar de superfícies por meio de faceamento e fresamento, com parâmetros de usinagem com valores baixos e elevados;
- Caracterizar as rugosidades médias (R_a), assimetrias (R_{sk}) e curtoses (R_{ku}) de todas as amostras com medições do microscópio confocal;
- Analisar os ângulos de contato estáticos e dinâmicos de cada superfície fabricada com a utilização do tensiômetro óptico;
- Correlacionar os valores de rugosidade e ângulo de contato avaliados.

1.2 Organização do texto

Este documento está organizado em seis capítulos. O primeiro se refere à introdução do assunto abordado, com motivação e objetivos. O capítulo 2 apresenta os principais conceitos e estudos realizados sobre usinagem, vibrações autoexcitadas, e características superficiais. Em sequência, no capítulo 3, são demonstrados os principais trabalhos que correlacionam as temáticas abordadas no capítulo anterior. No capítulo 4, são apresentados os materiais e métodos aplicados na fabricação e caracterização das amostras, junto com os dados experimentais. No capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos em relação à caracterização das rugosidades e molhabilidade, associando-os às condições operacionais durante a usinagem e contextualizando com dados encontrados na literatura. Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões sobre o trabalho e as sugestões de trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

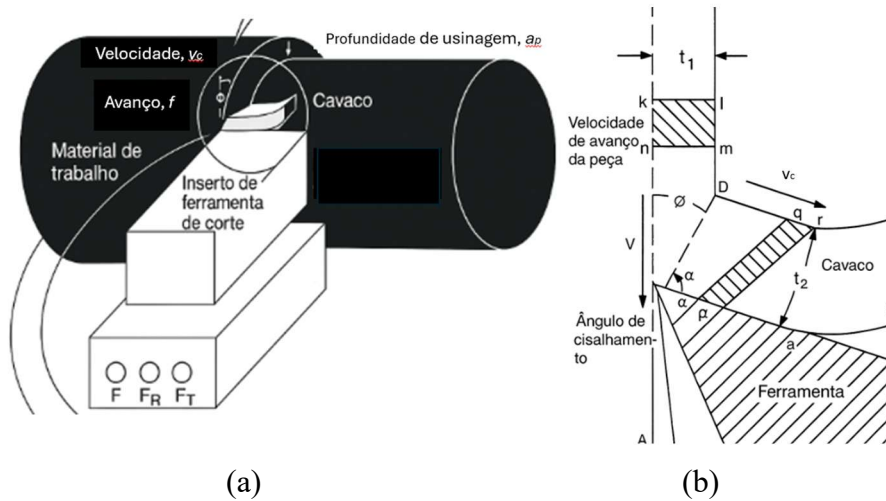
Neste capítulo são abordados os fundamentos teóricos relacionados à usinagem, com destaque para os processos de faceamento e fresamento. Também são discutidos os fenômenos de vibração, em especial aqueles associados à ocorrência de vibrações autoexcitadas em processos de usinagem, além das características superficiais pertinentes ao estudo da rugosidade e da molhabilidade.

2.1 Texturização de superfícies por meio da usinagem

Superfícies texturizadas podem ser obtidas por meio de diversas técnicas de fabricação, sendo que a texturização a partir de processos de usinagem pode ser conduzida a partir da seleção de geometrias da ferramenta, definição de parâmetros de corte, indução de vibrações, alteração de rigidez associada ao conjunto porta-ferramenta e ferramenta, dentre outros. Particularmente, processos de usinagem podem ser utilizados para produzir texturas controladas da ordem de nanômetros, ao serem combinados com atuadores para modular a trajetória da ferramenta (Wang *et al.*, 2020). Naturalmente, por se basear na remoção de material pela atuação de uma ferramenta, os processos de usinagem podem ser realizados de diversas formas, de acordo com a ferramenta utilizada, tipo de corte e maquinário, sendo assim especificados como torneamento, fresamento, furação, aplainamento, retificação, faceamento, dentre outros, a depender das suas características (Ferraresi, 1970).

Vale ressaltar, contudo, que todos os processos se baseiam no mesmo mecanismo físico de corte, diferenciando-se sua forma de aplicação. Na Figura 2 é ilustrada a interação da ferramenta de corte com uma peça em processo de torneamento, onde são identificados alguns parâmetros de corte. Características como velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem, por exemplo, são parâmetros comuns analisados nesses métodos de fabricação (Trent, 2000). O avanço (f) diz respeito à distância que a ferramenta percorre em relação ao movimento da peça durante o processo de usinagem. A velocidade de corte (v_c) é a velocidade em que a superfície entra em contato com a ferramenta de corte. Já a profundidade de usinagem (a_p) corresponde à espessura de material removido durante o processo, podendo ser na direção radial, para torneamento, ou axial para fresamento (Ferraresi, 1970).

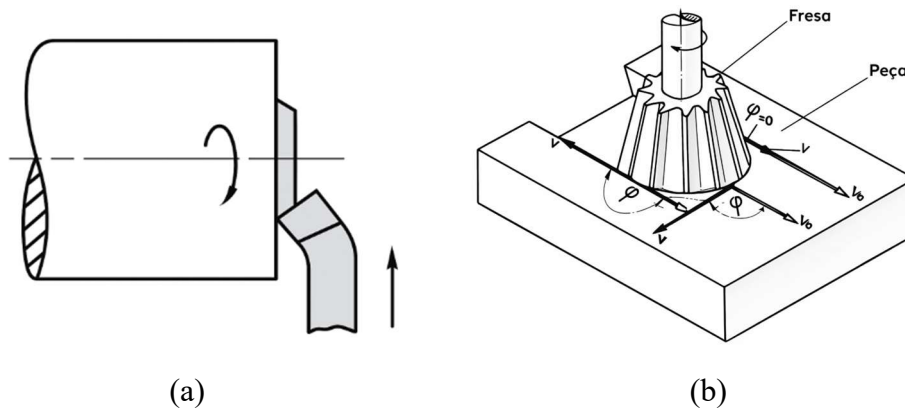
Figura 2 - Diagrama de corte de metal. (a) processo de torneamento e (b) contato ferramenta-material.



Fonte: Adaptado de Trent (2000).

Em processos de torneamento, o material é fixado em um mandril de um torno e submetido a uma rotação, enquanto a ferramenta é mantida em um porta-ferramentas e pode se deslocar de forma constante ao longo do material. Seguindo com este mesmo arranjo, também é possível realizar o processo de faceamento, que consiste na concepção de superfícies planas por meio do movimento da ferramenta da periferia até o centro da peça, seguindo uma trajetória perpendicular ao eixo de rotação, conforme ilustrado na Figura 3a. Uma particularidade deste tipo de arranjo é que para uma determinada rotação do material a ser usinado, a velocidade de corte varia de acordo com a distância da ferramenta ao eixo de rotação da peça, tendendo zero na região central. Esta particularidade pode ser controlada com alterações na rotação coordenadas com a profundidade da ferramenta em relação ao raio da peça, mas a velocidade de corte tenderá a zero com a aproximação da ferramenta à região central do material (Trent, 2000). As superfícies produzidas por faceamento, dessa forma, apresentarão marcas de usinagem com padrões circulares em torno do eixo de rotação da peça.

Figura 3 - Processos de (a) faceamento e (b) fresamento.



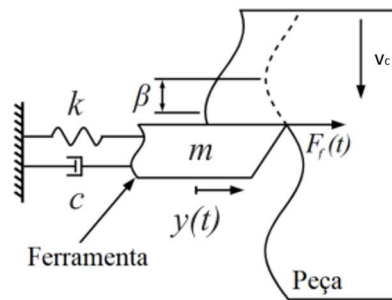
Fonte: Adaptado de Ferraresi (1970)

Em contraste com o torneamento, a Figura 3b ilustra processos de fresamento, que se baseiam na rotação da ferramenta, enquanto o material usinado se desloca em relação à mesma com base em uma trajetória especificada no plano de corte. Tais processos são bastante versáteis e são empregados para a obtenção de superfícies de diferentes geometrias, pois utilizam ferramentas com perfis variados, geralmente multicortantes. Além disso, a fabricação de geometrias complexas é possibilitada, conforme se ampliam os graus de liberdade da trajetória do material usinado (Ferraresi, 1970).

Um aspecto comum aos processos de usinagem é a ocorrência de vibrações, que muitas vezes são consideradas indesejadas, por interferir na qualidade superficial da peça usinada. Um dos principais fenômenos associados a essa instabilidade são as vibrações autoexcitadas, geradas pela interação dinâmica entre a ferramenta de corte e a peça, fenômeno chamado de *chatter*. Quando a ferramenta passa por uma superfície que já está ondulada devido a vibrações, a espessura do cavaco gerado tem variação, o que resulta em oscilação das forças de corte, que dependem diretamente da espessura de corte. Com a variação da espessura de corte e , conseqüentemente, das forças de usinagem, a ferramenta vibra, o que pode ampliar a ondulação da superfície usinada, intensificando seus efeitos, por isso o processo é chamado de autoexcitação. Um dos fatores responsáveis para que isso aconteça é o efeito regenerativo do *chatter*, quando a vibração ocorre na mesma frequência de um dos modos estruturais do conjunto máquina-ferramenta, resultando no deslocamento relativo da peça em relação a ferramenta (Pereira, 2022).

Com as variações nas forças de corte, dificulta-se a remoção eficiente do cavaco e se formam ondulações na superfície usinada, o que costuma ser indesejado por estar associado ao comprometimento da qualidade superficial e da precisão dimensional da peça. Além disso, o *chatter* tem um impacto direto na redução da vida útil da ferramenta e na queda da produtividade, sendo um dos principais desafios no controle da estabilidade em operações de usinagem (Quintana e Ciurana, 2011). O diagrama ilustrado na Figura 4 mostra o sistema dinâmico simplificado da interação da ferramenta com a peça.

Figura 4 - Sistema regenerativo com sobreposição de corte.



Fonte: Pereira (2022).

O sistema apresentado na Figura 4 mostra a interação da ferramenta com uma superfície ondulada, considerando que o sistema dinâmico que compõe o porta-ferramentas apresenta um grau de liberdade, onde estão associados ao conjunto: o coeficiente de rigidez do porta-ferramenta, representado por k , o coeficiente de amortecimento representado por c , a massa equivalente da ferramenta de corte, representada por m , a força de avanço (F), a velocidade de corte (v_c), a posição instantânea ($y(t)$), e o valor referente à diferença de fase de corte do sistema (β). Quanto menor a diferença de fase de corte do sistema, mais uniforme será a espessura de corte, o que resulta numa maior estabilidade. (Siddhpura; Paurobally, 2012).

2.2 Vibração autoexcitada/ Chatter

As condições de corte exercem influência direta sobre as forças desenvolvidas durante a operação. Partindo desse princípio, podem ser elaboradas representações gráficas capazes de identificar regiões de funcionamento estável e instável, considerando variáveis relevantes do processo, como a rotação do eixo-árvore e a profundidade de usinagem. Essa representação é conhecida como diagrama de lóbulos de estabilidade

(DLE). A obtenção do DLE, depende do real entendimento dos mecanismos de corte e o processo de formação do cavaco. Esse diagrama analisa e correlaciona as condições que envolvem os parâmetros de fabricação como: profundidade de usinagem, velocidade de corte, avanço e geometria da ferramenta, através da criação de uma curva de função de resposta em frequência (FRF) e equações de força de corte. (Munoa *et al*, 2016).

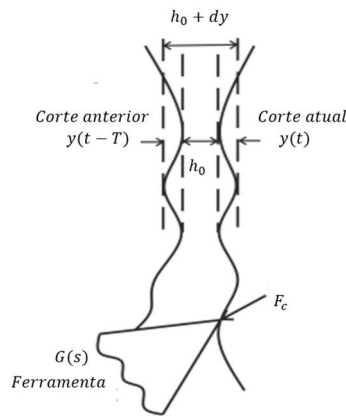
No instante inicial, durante a primeira rotação do fuso, a superfície usinada é uniforme, ou seja, sem a presença de ondulações. Entretanto, com a progressão do corte, a movimentação da ferramenta cria ondulações na superfície que passam a interferir no processo. O efeito regenerativo causado por esse tipo de vibração é decorrente de efeitos de ressonância com vibrações estruturais do sistema máquina-ferramenta, resultando assim no deslocamento relativo entre a ferramenta e peça. Assim, a amplificação das vibrações no decorrer do tempo pode levar à instabilidade do sistema de forma inesperada. (Pereira, 2022).

Com base nesse conceito, Altintas (2012) propôs um modelo matemático para a construção dos diagramas de lóbulos de estabilidade, no qual a espessura dinâmica de corte é descrita por uma relação que considera tanto a condição nominal quanto os efeitos vibratórios do processo. Assim, a variação dinâmica da espessura do cavaco ao longo do tempo t , considerando o período de rotação T é determinada pela diferença entre a espessura nominal do cavaco e a diferença de modulação interna e externa, apresentada na equação (1):

$$h(t) = h_0 - [y(t) - y(t - T)], \quad (1)$$

onde h_0 é a espessura nominal do cavaco, aproximadamente igual ao avanço, enquanto $y(t)$ representa a modulação interna associada às vibrações atuais da ferramenta e $y(t - T)$ corresponde à modulação externa, resultante da passagem anterior da ferramenta. A diferença entre esses dois termos define a variação dinâmica da espessura do cavaco ao longo do tempo t , considerando o período de rotação T . Todos esses parâmetros estão detalhados na Figura 5.

Figura 5 - Corte com Chatter.



Fonte: Adaptado de Pereira (2022).

Admitindo-se um modelo simplificado com apenas um grau de liberdade, o conjunto ferramenta–porta-ferramenta pode ser representado por um sistema massa–mola–amortecedor equivalente.

$$m_y \ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + k_y y(t) = F_f(t) \quad (2)$$

Dessa forma, o comportamento dinâmico do sistema é descrito por uma equação diferencial de movimento em que m_y , c_y e k_y correspondem, respectivamente, à massa equivalente, ao coeficiente de amortecimento e à rigidez do sistema.

As grandezas $\ddot{y}(t)$, $\dot{y}(t)$ e $y(t)$ representam a aceleração, velocidade e deslocamento da ferramenta, respectivamente. Quando aplicados na Equação 2, tem-se:

$$m_y \ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + k_y y(t) = K_f a [h_0 + y(t - T) - y(t)] \quad (3)$$

Considerando que K_f é a pressão específica de corte, a a largura de usinagem e $h(t)$ a espessura dinâmica do cavaco formada durante o processo.

Ao aplicar a Transformada de Laplace, a modulação interna pode ser expressa como $y(s) = \mathcal{L}y(t)$, enquanto a modulação externa é representada pelo termo exponencial associado ao atraso temporal T , ou seja, $e^{-sT} = \mathcal{L}y(t - T)$. Dessa forma, a equação que descreve a espessura dinâmica do cavaco passa a ser formulada no domínio da frequência, permitindo sua análise dinâmica:

$$h(s) = h_0 - y(s) + e^{-sT} y(s) = h_0 + (e^{-sT} - 1)y(s) \quad (4)$$

Produzindo assim um valor $F_f(t)$, correspondente à força de corte na direção do avanço, também representada por $K_f a h(t)$. A partir dessa força a estrutura é excitada

(ϕ) gerando vibração e conseqüentemente resultando em uma modulação interna do cavaco gerado ($y(s)$):

$$y(s) = F_f \phi(s) = K_f ah(s)\phi(s) \quad (5)$$

Substituindo a Eq. (5) na Eq. (4), é possível chegar na seguinte expressão:

$$h(s) = h_0 + (e^{-sT} - 1)K_f ah(s)\phi(s) \quad (6)$$

O comportamento vibratório do sistema é descrito por uma função de transferência (FT) associada a um sistema de um grau de liberdade, caracterizada pela razão de amortecimento ζ , frequência natural ω_n e rigidez estrutural k_y :

$$\phi(s) = \frac{y(s)}{F_f(s)} = \frac{\omega_n^2}{k_y(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (7)$$

Ao substituir essa função de transferência na equação que relaciona força e deslocamento, obtém-se uma relação direta entre a espessura dinâmica do cavaco e a espessura nominal desejada:

$$\frac{h(s)}{h_0} = \frac{1}{1 + (1 - e^{-sT})K_f a\phi(s)} \quad (8)$$

A estabilidade do processo de usinagem é então determinada a partir das raízes da equação característica do sistema (s), considerando uma solução complexa do tipo $s = \sigma + j\omega_c$, polinômio com parte real (σ). Quando a parte real da raiz é positiva ($\sigma > 0$), a resposta temporal apresenta crescimento exponencial, caracterizando um regime instável e resultando na ocorrência de *chatter*. Por outro lado, se a parte real for negativa ($\sigma < 0$), as vibrações são amortecidas e o processo permanece estável. No caso limite em que $\sigma = 0$, o sistema se encontra em condição crítica, oscilando na frequência característica do *chatter* (ω_c).

Com isso, o limite de estabilidade do processo pode ser determinado impondo-se $s = j\omega_c$, permitindo calcular a profundidade máxima de usinagem admissível sem ocorrência de *chatter*, denotada por a_{lim} .

$$1 + (1 - e^{-sT})K_f a_{lim}\phi(j\omega_c) = 0 \quad (9)$$

Para a determinação da profundidade limite ($\phi(j\omega_c)$), para a construção do gráfico que determina a estabilidade do sistema, é necessário conhecer o termo ($\phi(j\omega_c)$), calculada pela seguinte expressão:

$$\phi(j\omega_c) = G + Hj \quad (10)$$

A função de transferência do sistema pode ser decomposta em suas partes: real e imaginária, usualmente representadas por $G(\omega_c)$ e $H(\omega_c)$, respectivamente, onde:

$$G(\omega_c) = \frac{\omega_n^2 - \omega_c^2}{(\omega_n^2 - \omega_c^2)^2 + (2\zeta\omega_n) 2\omega_c^2} \quad (11)$$

$$H(\omega_c) = \frac{-(2\zeta\omega_n)\omega_c}{(\omega_n^2 - \omega_c^2)^2 + (2\zeta\omega_n) 2\omega_c^2} \quad (12)$$

A partir dessa decomposição, é possível deduzir uma expressão para a profundidade crítica de usinagem, que define a transição entre os regimes estável e instável no processo de torneamento:

$$a_{lim} = \frac{-1}{2K_f G(\omega_c)} \quad (13)$$

É importante ressaltar que essa formulação é válida apenas quando a parte real da função resposta em frequência assume valores negativos, ou seja, ($\sigma < 0$). Nessas condições, a frequência de *chatter* ocorre nos pontos em que $G(\omega_c) < 0$, e a escolha do valor mínimo dessa função garante a estabilidade do processo para qualquer rotação selecionada.

Para a construção do diagrama de lóbulos, calcula-se inicialmente o período de rotação do eixo-árvore em função do número do lóbulo considerado e do intervalo de frequências associadas ao *chatter*:

$$T = \frac{2k\pi - \beta}{2\pi f_c} \quad (14)$$

A variável k representa o número de lóbulos que estará representado no diagrama e f_c o intervalo com valor de frequência em *Hz*. O valor de β pode ser determinado pela expressão:

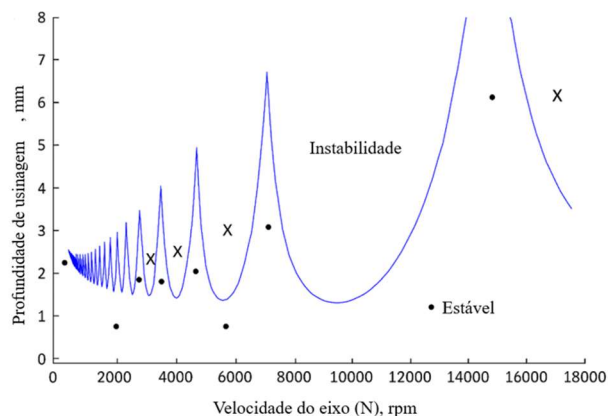
$$\beta = 3\pi + 2\Psi \quad (15)$$

Na qual, Ψ representa o ângulo de fase, em radianos, da frequência que diz respeito à parte real negativa da *FRF*. Conhecido o período de rotação, a rotação do eixo-árvore pode ser obtida diretamente, permitindo a determinação dos pares de valores entre rotação e profundidade de usinagem que delimitam as regiões estáveis e instáveis do processo:

$$n = \frac{60}{T} \quad (16)$$

Ao final, a construção do *DLE* pode ser concluída, promovendo a visualização de combinação de parâmetros de profundidade de usinagem e rotação do eixo-árvore que correspondem a condições estáveis e instáveis. No estudo realizado por Siddhpura e Paurobally (2012), há um exemplo da configuração desse diagrama com as regiões de estabilidade bem definidas, conforme visto na Figura 6. A concepção deste *DLE* foi realizada através da correlação entre a rotação (RPM) e a profundidade de usinagem (mm), seguindo procedimento similar ao modelo apresentado.

Figura 6 - Diagrama de lóbulos de estabilidade (*DLE*).



Fonte: Siddhpura & Paurobally, 2012.

2.3 Características superficiais

Ao projetar superfícies para quaisquer aplicações desejadas, é importante que se determinem as características que favoreçam o fenômeno a ser estudado e que se realize um procedimento da caracterização da superfície fabricada, a fim de verificar se a mesma se adequa às necessidades de projeto. Nesse contexto, em estudos que envolvem a engenharia de superfícies, é comum que se analisem as propriedades termofísicas dos materiais envolvidos e características superficiais, que podem envolver medições de

geometria e dimensões de micro e/ou nanoestruturas com microscópios, o cálculo de parâmetros de rugosidade, assim como a medição de propriedades interfaciais, como ângulos de contato entre fluidos e a superfície fabricada. Em condições de *chatter*, as texturas das superfícies usinadas sofrem alterações em relação àquelas resultantes dos sistemas estáveis, de modo que as variações de topografia resultantes podem alterar os parâmetros de rugosidade e outras características.

Deve-se destacar que existem diversos parâmetros de rugosidade que podem ser calculados na caracterização de superfícies, alguns exemplos comuns são: rugosidade média (R_a), desvio quadrático médio, que é o desvio padrão das alturas do perfil em relação à linha média (R_q), altura média dos cinco picos mais altos e cinco vales mais profundos (R_z), assimetria do perfil, que dita a predominância de picos ou vales (R_{sk}) e a distribuição desses perfis de rugosidade (R_{ku}) (Gadelmawla *et al.*, 2002).

De modo geral, o cálculo de muitos desses parâmetros envolve encontrar uma linha ou plano de referência e, de acordo com a topografia da superfície, analisando estatisticamente a distribuição de alturas e profundidades de picos e vales em relação à referência estabelecida. Alguns dos parâmetros de rugosidade mais comuns correspondem a alguns parâmetros estatísticos bastante conhecidos, de modo que revelam informações mais detalhadas sobre topografia da superfície (Jones, 2009).

Na Figura 7 são ilustrados alguns parâmetros de rugosidade que são abordados neste trabalho. Segundo Dagnall (2011), a rugosidade média R_a é definida como a média das variações do perfil topológico da superfície em relação a uma linha de referência, conforme ilustrado na Figura 7(a). Os valores de R_a são reportados em unidade de comprimento, geralmente em μm , e este é um dos parâmetros mais usados na análise da textura superficial para indicar se uma superfície está mais polida, com R_a baixo, ou rugosa, com R_a alto. Tendo y como a altura do pico/vale, temos:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (17)$$

O parâmetro de assimetria R_{sk} está ilustrado na Figura 7(b) e é um parâmetro estatístico associado ao formato da curva de distribuição de alturas e profundidades da superfície analisada em relação à linha média, podendo apresentar valores positivos

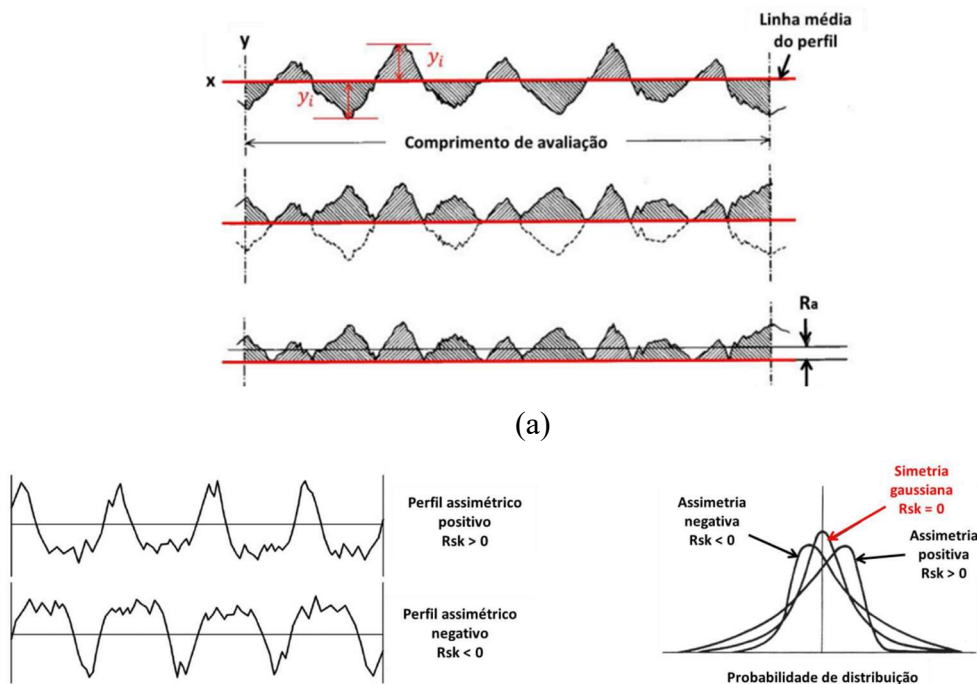
($R_{sk} > 0$), representando a predominância de vales mais largos, enquanto valores negativos ($R_{sk} < 0$), indicam a predominância de picos mais largos.

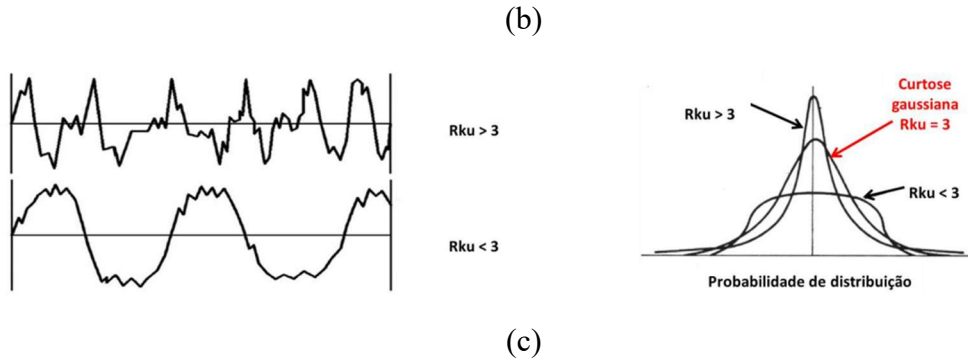
$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \int_{-\infty}^{+\infty} y^3 p(y) dy \quad (18)$$

Por fim, a Figura 7(c) mostra o parâmetro denominado como curtose R_{ku} , que pode ser compreendida como a nitidez da superfície, ou seja, uma superfície que apresenta elevada repetibilidade no comprimento de picos e vales é caracterizada por um valor elevado de R_{ku} ($R_{ku} > 3$), enquanto superfícies com maior variabilidade geométrica tendem a apresentar valores reduzidos desse parâmetro ($R_{ku} < 3$). Os parâmetros R_{sk} e R_{ku} são grandezas adimensionais.

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \int_{-\infty}^{+\infty} y^4 p(y) dy \quad (19)$$

Figura 7 - Representação dos parâmetros de rugosidade.





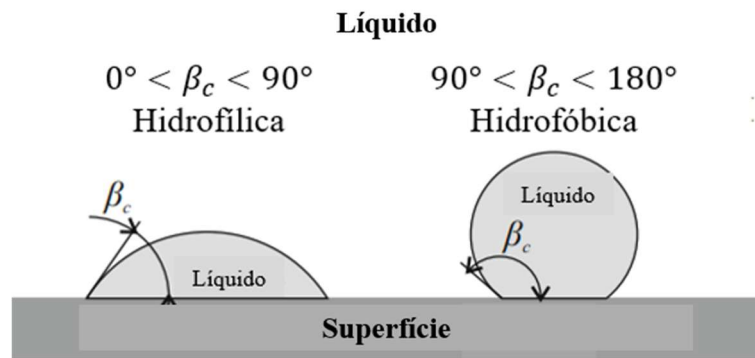
Fonte: Ba (2022).

Apesar de analisar um perfil de diversas formas, um único parâmetro de rugosidade não é capaz de caracterizar uma superfície, visto que esses analisam características diferentes da superfície. A associação de dois ou mais parâmetros de rugosidade pode representar melhor as particularidades de cada topografia superficial e auxiliar na aplicação mais adequada.

Muitos trabalhos investigam a influência da rugosidade superficial em outras características, como na capacidade de uma superfície reter lubrificantes (Wang *et al.*, 2023), ou na transferência de calor entre a superfície sólida (He *et al.* 2025) e escoamentos monofásicos ou multifásicos (Qui *et al.*, 2024). Nesses trabalhos, além de um ou mais parâmetros de rugosidade, é comum que se reporte também características de molhabilidade das superfícies estudadas. Uma forma de realizar a caracterização da molhabilidade é através da medição do ângulo de contato entre uma gota de um fluido de interesse e a superfície.

Conforme ilustrado na Figura 8, o ângulo de contato é aquele formado pela reta tangente à gota de líquido no ponto de contato triplo entre sólido, líquido e o gás circundante. Como a maior parte das medições realizadas é conduzida com água, e como a interação da superfície com gotas de água é de interesse de uma vasta gama de aplicações, as superfícies analisadas são então classificadas como hidrofílica, quando têm maior afinidade com a água, ou hidrofóbica, quando tendem a repelir a água. Assim, uma superfície é considerada hidrofílica quando o ângulo de contato formado pelo fluido é inferior a 90° , enquanto superfícies hidrofóbicas apresentam ângulos de contato superiores a 90° (Kanizawa e Ribatski, 2021).

Figura 8 - Ângulo de contato.

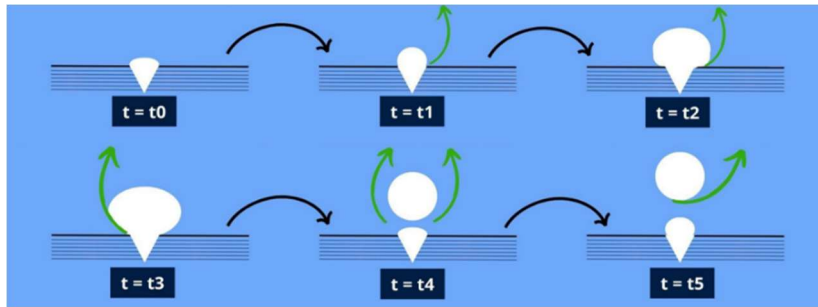


Fonte: Adaptado de Kanizawa e Ribatski (2021)

Além de fatores físico-químicos, a topologia da superfície tem influência direta em valores de ângulo de contato aparente, o que motivou muitos estudos que se basearam em superfícies bioinspiradas para fabricar superfícies. A depender desta topologia, é possível favorecer a adesão do líquido à superfície, com geometrias que facilitem seu espalhamento, ou reduzir essa adesão, utilizando geometrias que dificultem a capilaridade do líquido, reduzindo área de contato direto entre líquido e sólido. De maneira geral, quanto menos rugosa for uma superfície, menos obstáculos são encontrados para que o líquido se acomode sobre ela, favorecendo o espalhamento (Kanizawa e Ribatski, 2021).

Em aplicações que envolvem a ebulição de líquidos sobre superfícies, deve-se considerar que o processo de formação das bolhas é cíclico, partindo do estágio de nucleação, seguindo com o período de crescimento e por fim o desprendimento, conforme apresentado na Figura 9. Tipicamente, a existência de cavidades na superfície reduz a energia necessária para a formação de bolhas nesses locais, favorecendo a nucleação de bolhas, de modo que a morfologia da superfície pode impactar diretamente neste aspecto, consequentemente afetando a transferência de calor entre sólido e fluido. Na etapa de crescimento da bolha, as forças inerciais superam a tensão superficial, o que causa movimento da linha de contato triplo enquanto o vapor empurra o líquido. No processo de desprendimento, as forças de empuxo e inerciais superam as forças de retenção na parede como a tensão superficial e adesão. Quando se inicia o desprendimento dessa bolha acontece a formação de um pequeno “pescoço” até que a bolha se desprenda por completo, e nesse processo o líquido empurra o vapor, resultando no movimento da linha de contato triplo novamente até a cavidade, reiniciando o ciclo (Incropera, 2014).

Figura 9 - Processo de formação de bolha em ebulição.

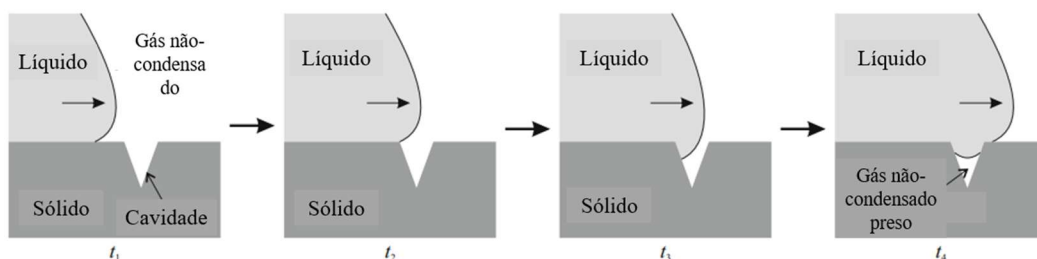


Fonte: Autor.

Com o retorno do líquido à sua posição inicial após o desprendimento da bolha, a presença de vapor remanescente nas cavidades superficiais pode ocorrer, tanto na cavidade que originou a bolha como em cavidades vizinhas, conforme ilustrado na Figura 10. Esse aprisionamento de núcleos de vapor favorece a nucleação de novas bolhas com menor aporte energético, uma vez que o processo de mudança de fase já foi previamente iniciado nessa região, e está diretamente relacionado com as características superficiais (Kanizawa e Ribatski, 2021).

Considerando ainda a distribuição dessas cavidades, a elevada geração de bolhas em regiões próximas pode levar à formação dos chamados bolsões de vapor, caracterizados pelo surgimento de uma camada contínua de vapor sobre a superfície aquecida. Nessa condição, ocorre a perda do contato direto entre o líquido e o sólido, resultando em superaquecimento da superfície e possível degradação do material. Esse fenômeno está associado ao fluxo crítico de calor (FCC), parâmetro que define o limite máximo de fornecimento de energia a partir do qual a ebulição nucleada se torna instável, dando lugar à formação de uma camada isolante de vapor (Xie, 2018).

Figura 10 - Movimento do líquido durante a nucleação de bolhas.



Fonte: Adaptado de Kanizawa e Ribatski (2021)

Dessa forma, a literatura deixa evidenciado que os fenômenos envolvidos no processo de usinagem, especialmente os que contém *chatter*, exercem influência direta

não apenas na estabilidade do processo e na integridade da peça, mas também na formação das características superficiais diferentes. Parâmetros de rugosidade mais comuns, como R_a aliados a parâmetros estatísticos da distribuição de picos e vales, como R_{sk} e R_{ku} , permitem uma caracterização mais completa da topografia gerada, enquanto propriedades funcionais da superfície, como os ângulos de contato estático e dinâmico, fornecem indicadores sobre o comportamento de molhabilidade e das interações sólido-líquido. Assim, compreender essa relação entre condições de usinagem, ocorrência de *chatter* e as diferentes tipologias da superfície torna-se fundamental para o desenvolvimento da engenharia de superfícies.

3. ESTADO DA ARTE

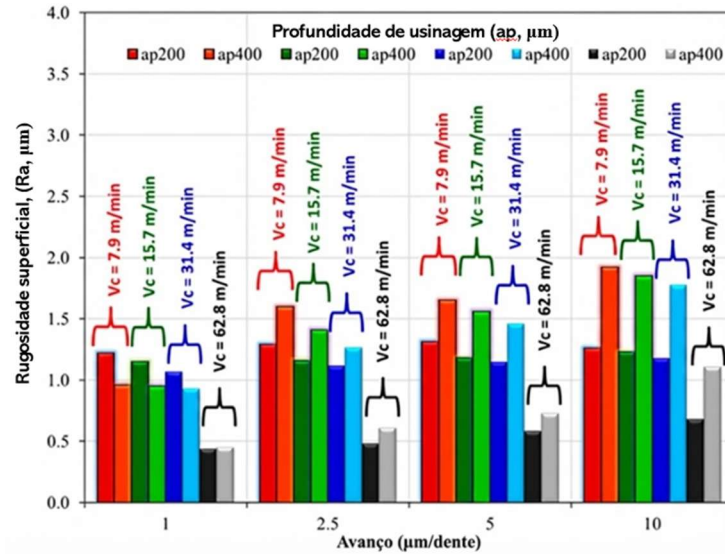
A compreensão das particularidades de uma superfície, desde sua geração no processo de fabricação até seu comportamento funcional, é fundamental para elevar a eficiência de componentes, promover a economia de material e estender seu ciclo de vida. Na literatura técnica, a correlação entre parâmetros de rugosidade e fenômenos inerentes aos processos de usinagem tem sido amplamente investigada, focando tanto na cinemática do corte quanto na estabilidade dinâmica do sistema.

Diversos estudos convergem para o fato de que a cinemática do processo é o principal determinante da textura superficial. Medina *et al.* (2025), ao analisarem o torneamento da liga de alumínio Al7075-T6, identificaram que o avanço é o parâmetro mais influente na rugosidade, sendo responsável por 85,5% do impacto total. Resultados semelhantes foram observados por Talibouya Ba *et al.* (2022) no torneamento do aço AISI 1020, onde o avanço dominou a geração de parâmetros como R_a , R_q e a família R_k , enquanto a profundidade de usinagem apresentou efeito secundário, atuando especificamente no parâmetro funcional R_{vk} .

No fresamento, a interação entre avanço e geometria é igualmente crítica. Rosa (2022) demonstrou que, no processamento da liga Ti-6Al-4V ELI, parâmetros como o raio de ponta da ferramenta e o avanço podem atingir acabamentos de classe N6 ($R_a < 0,8 \mu\text{m}$). No estudo foram avaliados 5 tipos de avanços por dente, sendo apenas a condição com raio de ponta (r_ϵ) de 0,8 mm e avanço por dente (f_z) de 0,15 mm/dente apresentaram valores maiores de rugosidade. Já a assimetria e curtose demonstraram uma distribuição normal, com $R_{sk} \approx 0$ e $R_{ku} \approx 3$.

Já no microfresamento da liga Mg13Sn, Ercetin *et al.* (2023) através da variação dos parâmetros de usinagem como velocidade de corte, avanço do dente e profundidade de usinagem, obtiveram rugosidades ainda menores, com R_a variando entre 0,188 e 0,442 μm . No presente estudo, foi destacado que a microestrutura do material, como a presença da fase Mg_2Sn , pode induzir o arrancamento de partículas e elevar a rugosidade em comparação ao metal puro, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Comparação de rugosidades superficiais com valores de 200 μm e 400 μm em suas respectivas profundidades de usinagem.

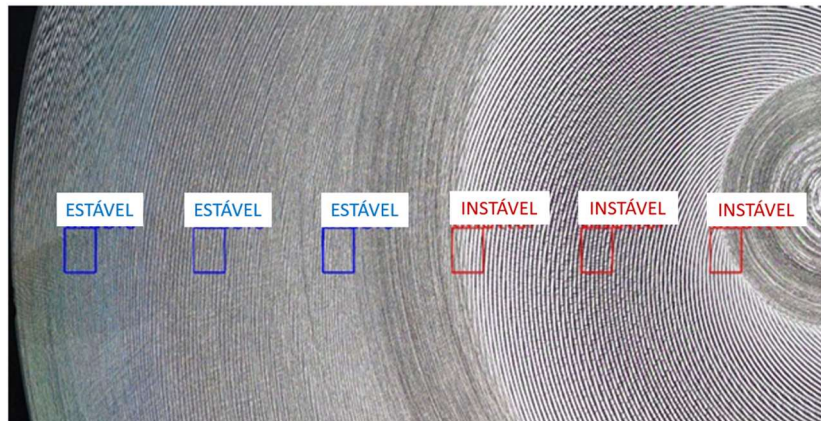


Fonte: Adaptado de Ercetin *et al.* (2023).

Além dos parâmetros dentro do processo de fabricação, outras variáveis também são analisadas, como processos de refrigeração e os tipos de revestimentos. Medina *et al.* (2025) compararam diferentes condições de lubrificação, concluindo que o arrefecimento criogênico com CO_2 superou a usinagem a seco e por inundação, atingindo um R_a de $0,736 \mu\text{m}$ e reduzindo a adesão de material. Já na avaliação dos tipos de revestimentos, Ba (2022) evidenciou que o uso de brocas revestidas com Diamond-Like Carbon (*DLC*) no aço 1045 melhora significativamente a integridade superficial ao reduzir o atrito e a rugosidade média.

Um dos maiores desafios para a integridade superficial é a ocorrência de vibrações autoexcitadas, ou *chatter*. Autores como Ho *et al.* (2023) e Wang *et al.* (2024) ressaltam que instabilidades dinâmicas, muitas vezes induzidas por pequenas excentricidades de massa na peça, geram comportamentos de ressonância que comprometem a precisão dimensional, apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Superfície usinada após a medição da rugosidade e marcação das zonas estáveis e de vibração.



Fonte: Adaptado de Ho *et al.* (2023)

É notável que a rugosidade tem sido utilizada como um indicador robusto para a detecção dessas instabilidades. Com a mudança das rugosidades sendo de fácil percepção em alguns casos, segue a necessidade de investigar melhor como cada componente dentro de um sistema de usinagem atua nesses resultados.

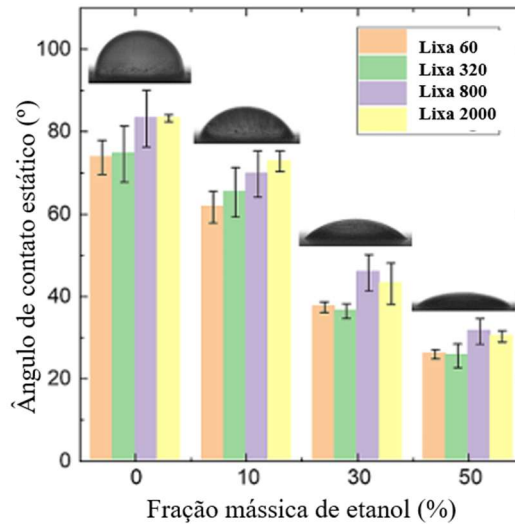
Damous *et al.* (2023) observaram que, no fresamento de paredes finas (Al 7075-T6), condições estáveis mantêm o R_a entre 0,18 e 0,30 μm . Contudo, sob regime de *chatter*, esses valores saltam para a faixa de 1,1 a 1,9 μm . Este padrão de degradação é corroborado por Abebe e Gopal (2023), Abelan-Nebot *et al.* (2024) e novamente por Medina *et al.* (2025), cujos estudos em fresamento indicam consistentemente que na instabilidade elevada, os R_a 's de patamares inferiores a 0,4 μm para valores superiores a 1,2 μm , acompanhados por marcas periódicas padronizadas.

Para além da aparência, a rugosidade define o desempenho tribológico também. Garagnani *et al.* (2024), por exemplo, utilizaram o parâmetro de assimetria (R_{sk}) para prever o desgaste nos aços S355JR, demonstrando que superfícies fresadas com R_{sk} negativo atingem o regime de desgaste estável mais rapidamente.

Já Lin *et al.* (2025), analisaram além das rugosidades, associando a rugosidade final de superfícies elaboradas com diferentes lixas ao comportamento de molhabilidade, ilustrado na Figura 13. Utilizando o alumínio como seu material de trabalho, foi verificado que os diferentes processos de abrasão impactam os ângulos de contato estáticos em superfícies semelhantes. Com gotas de 4 μL e com fluido de trabalho sendo

uma composição de água-etanol com diferentes proporções (0, 10, 30 e 50%), o ângulo de contato apresentou variações com base em cada proporção e lixa aplicada no estudo.

Figura 13 - Ângulos de contato estático de superfícies em contato com gotas de 4 μL de diferentes composições.



Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2025)

A literatura também demonstra um interesse crescente no controle da molhabilidade de superfícies metálicas por meio da modificação das rugosidades por processos de usinagem e texturização, especialmente em aplicações nas quais a interação sólido-líquido exerce papel determinante no desempenho térmico, tribológico ou de fabricação.

Um primeiro ponto comum, diz respeito à influência da escala da rugosidade, Song e Fan (2023), mostraram que as variações do R_a são suficientes para alterar significativamente a molhabilidade da água em aço inoxidável AISI 304. Os autores indicaram que a topografia atua como fator amplificador na transição entre estados hidrofóbicos e hidrofílicos, com valores passando de 105° para 89° em média. Entretanto, sob condições elevadas de temperatura e pressão, esse efeito é progressivamente reduzido, sugerindo que as propriedades interfaciais do fluido passam a dominar o comportamento de molhabilidade.

Nesse contexto, Skondras-Giousios *et al.* (2024) observaram que superfícies de Al6082 com valores intermediários de R_a (entre $2,447\mu\text{m}$ e $6,341\mu\text{m}$) apresentam maior hidrofobicidade (até 132°) do que aquelas excessivamente lisas ou excessivamente rugosas, evidenciando que a relação entre rugosidade e molhabilidade não é linear.

Essa noção de faixas ótimas de rugosidade também aparece em diversos estudos, como a realizado por Huang *et al.* (2024), que ao combinarem abrasão à laser e retificação por cinta abrasiva no processamento da liga Ti6Al4V. Os resultados mostraram que valores moderados de R_a são suficientes para promover a transição de superfícies hidrofílicas para hidrofóbicas. Os autores destacam que, além da topografia, aspectos como tensão residual e estabilidade mecânica da microestrutura, são relevantes para a durabilidade funcional da superfície.

É bastante comum também diversos trabalhos a abordagem da rugosidade média (R_a) como parâmetro de caracterização de uma superfície, mas Khaskhoussi *et al.* (2022) avaliou processos como a eletroerosão à frio, que produzem superfícies distribuídas de forma irregular, e a texturização a laser, que permite maior controle geométrico. Em ambos os casos, foi observado que parâmetros como R_{sk} e R_{ku} apresentam correlação limitada com o ângulo de contato, pois apresentaram valores padrões de distribuição ($R_{sk} \approx 0$ e $R_{ku} \approx 3$), reforçando que a geometria, a densidade e a distribuição espacial das microestruturas são mais representativas do comportamento de molhabilidade.

Para além da topografia, os autores convergem ao reconhecer que a molhabilidade final resulta da interação entre efeitos físicos e químicos. A adesão de um fluido, reportada por Skondras-Giousios *et al.* (2024) e Huang (2024), mostra-se fundamental para a estabilização de estados hidrofóbicos, enquanto Song e Fan (2023) evidenciam que em regimes termodinâmicos específicos, a influência da rugosidade pode ser suplantada pelas propriedades do fluido. Os trabalhos também compartilham a análise do impacto funcional da molhabilidade, além de sua caracterização topográfica.

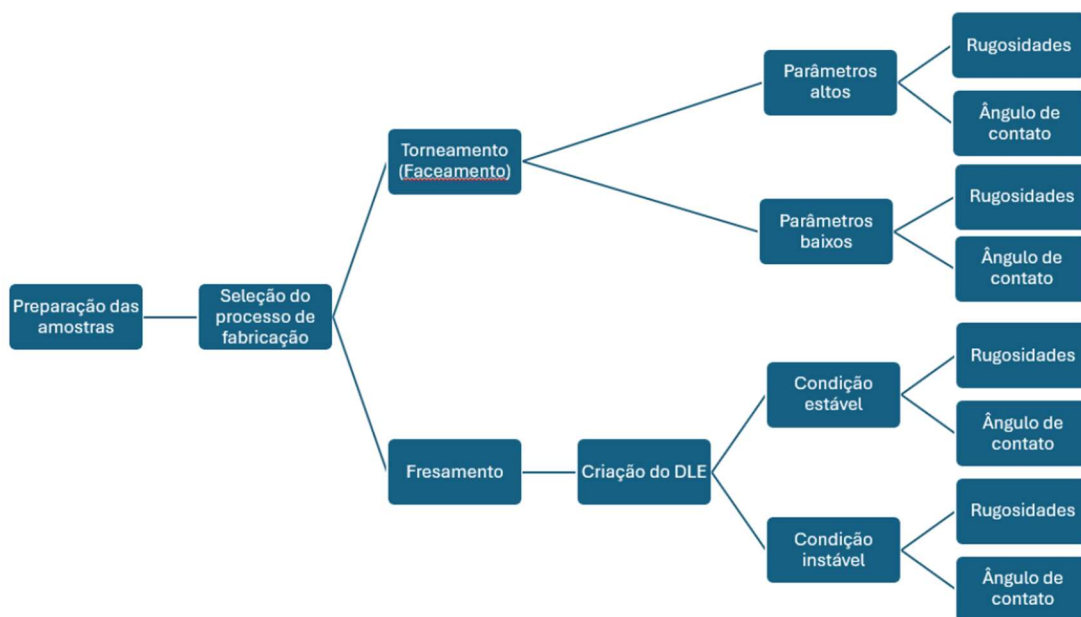
De forma geral é possível perceber que o controle da molhabilidade, por meio da usinagem e texturização superficial, depende do ajuste combinado da escala da rugosidade, da morfologia das microestruturas e das condições operacionais. Os estudos mostram que não há uma relação direta entre aumento de rugosidade e desempenho funcional, mas que há uma necessidade de superfícies projetadas de acordo com a aplicação. Esse entendimento é importante para o desenvolvimento de superfícies melhor funcionalidade para sistemas térmicos, tribológicos e qualquer outro tipo de aplicação em análises de engenharia.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos aplicados para a determinação das características das superfícies estudadas. Os processos foram subdivididos nas seguintes etapas: Preparação das amostras, seleção dos parâmetros de usinagem, fabricação das superfícies, caracterização com microscopia confocal, análise do ângulo de contato estático e dinâmico.

Com a finalidade de facilitar o entendimento sobre cada etapa desenvolvida no trabalho, foi elaborado um fluxograma com a sequência das atividades (Figura 14):

Figura 14 - Fluxograma de processos do trabalho.



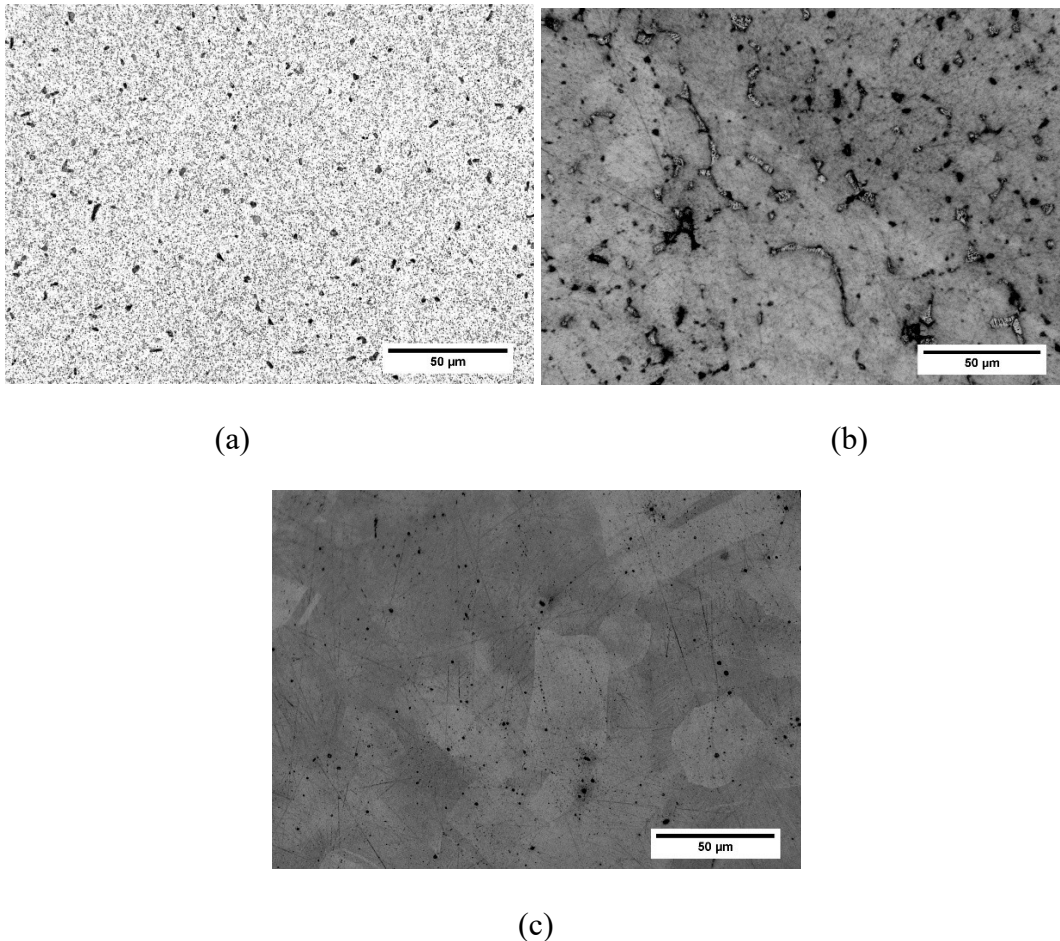
Fonte: Autor.

Partindo dessa ideia, essa seção busca demonstrar o passo a passo de todos os tópicos abordados para a obtenção dos resultados. Cada tópico abordado abrange uma etapa do processo de acordo com a execução dos ensaios realizados.

4.1 Preparação das amostras

Para a fabricação das superfícies foram selecionados corpos de prova retangulares com aresta de $\frac{3}{4}$ " dos materiais: alumínio, latão e aço inoxidável 304L. Os materiais foram submetidos a ensaios metalográficos apresentados na Figura 15:

Figura 15 - Imagens metalográficas 50 μ m: (a) Alumínio; (b) Latão; (c) Aço inoxidável.



Fonte: Chahad, *no prelo* (2026).

Além das imagens geradas também foram criadas tabelas com suas respectivas composições, conforme a Tabela 1, e suas características mecânicas, Tabela 2. Essas tabelas foram elaboradas segundo o certificado de qualidade fornecidos pelo fabricante nos ensaios de Chahad *no prelo* (2026), presentes no Anexo A.

Tabela 1 - Propriedades químicas dos materiais.

Propriedades Químicas				
Ensaio	Unid. Medida	Alumínio	Latão	Aço inoxidável 304
		Balanço	Balanço	Balanço
Al		<i>RESTANTE</i>	-	-
Cu	%	0,06	61,33	-
Fe	%	0,27	0,13	-
Mg	%	0,76	-	-
Mn	%	0,46	-	1,12
Si	%	1,04	-	0,41
Ti	%	0,02	-	-
Zn	%	0,01	35,88	-
Pb	%	-	2,66	-
C	%	-	-	0,07
Cr	%	-	-	18,15
Ni	%	-	-	8,03
P	%	-	-	0,04
S	%	-	-	0,02

Fonte: Adaptado de Chahad, no prelo (2026).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos materiais.

Propriedades Mecânicas				
Ensaio	Unid. Medida	Alumínio	Latão	Aço inoxidável 304
Alongamento	%	11,07	22	32
Limite Escoamento	MPa	291,16	353,04	699,00
Limite Resistência	MPa	315,20	462,87	782,00
Dureza	HRB	N/C	70,00	231,00

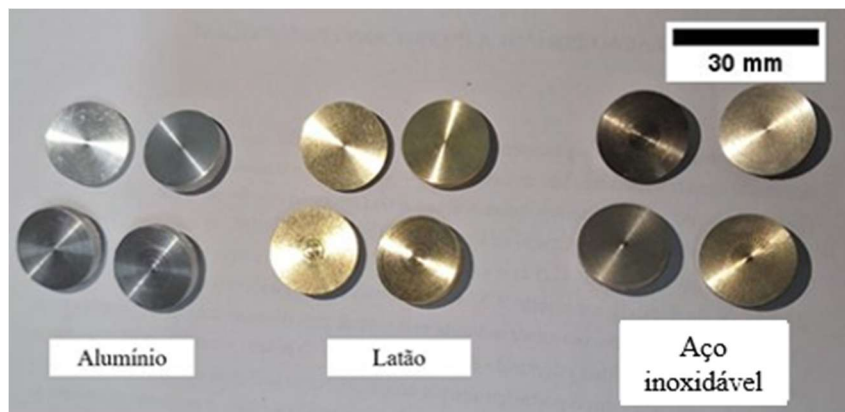
Fonte: Adaptado de Chahad, no prelo (2026).

Com base nas análises realizadas, foi constatado que se trata de uma liga de alumínio 6351 T6, uma liga CLA 360, e um aço inoxidável 304. Ambos os materiais foram selecionados pelas suas características mecânicas serem distintas, permitindo um

leque maior de comparativos para os ensaios previstos, tendo em vista principalmente a questão da estabilidade dentro de um processo de usinagem.

Para os ensaios de faceamento as barras de cada material foram usinadas previamente para se tornarem discos com 18 mm de diâmetro e 5 mm de espessura. Para as amostras do fresamento foram utilizados cubos de alumínio com 17 mm de aresta. Sendo assim, de acordo com os parâmetros de estabilidade do processo de fabricação chamados estável e instável, foram fabricadas 2 moedas de cada material para os testes de faceamento e 3 amostras de alumínio no ensaio de fresamento, conforme ilustrados nas Figuras 16a e 16b, respectivamente.

Figura 16 - Amostras fabricadas: (a) Moedas faceadas de alumínio, latão e Aço inoxidável 304L. (b) amostras de alumínio fresadas.



(a)



(b)

Fonte: Autor

A usinagem dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Processos de Fabricação (*LPF*) situado no Núcleo de Laboratórios de Ensino de Engenharia (*NuLEEn*) da Universidade Federal de São Carlos (*UFSCar*). As ferramentas necessárias foram

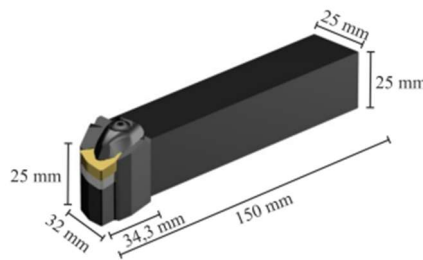
previamente selecionadas e disponibilizadas pela equipe técnica do laboratório para realização dos ensaios.

4.1.2 Amostras torneadas/faceadas.

O primeiro processo de fabricação estudado foi o torneamento a seco, mais especificamente o faceamento. As moedas dos três materiais foram usinadas utilizando torno mecânico convencional de modelo Imor prn320, com rotação máxima de 1.500 RPM no eixo-árvore. A escolha dos três materiais se deu efetivamente por possuírem valores de ductilidade diferentes, o que poderia influenciar nos resultados.

O porta-ferramentas utilizado tem como modelo *DWLNR 2525M 08* da Sandvik, e o inserto *WNMG 08 04 04-SF H13A* com raio de ponta de 0,397 mm.

Figura 17 - Porta-ferramenta DWLNR 2525M 08.



Fonte: Pereira (2022).

O porta-ferramenta em questão já havia sido utilizado em outros estudos e passou por um processo de usinagem do seu corpo, passando de uma seção quadrada para uma seção retangular, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Fabricação dos corpos de prova: Faceamento.



Fonte: Autor.

Os parâmetros de rotação, avanço e velocidade foram determinadas de forma empírica, levando em consideração uma condição com valor de rotação máxima da máquina e outra com um valor baixo. As condições de usinagem estão demonstradas na Tabela 3:

Tabela 3 - Parâmetros de fabricação por faceamento dos corpos-de-prova.

Parâmetros	Baixos	Altos
Rotação	475 rpm	1.500 rpm
Avanço	0,079 mm/volta	0,159 mm/volta
Profundidade de usinagem	1,50 mm	1,50mm

Fonte: Autor

Com o intuito de reforçar o entendimento sobre o processo de fabricação utilizado, foi realizada uma análise das velocidades em cada ponto/distância selecionada para as análises de rugosidade e ângulo de contato. Essas velocidades foram determinadas através da equação da velocidade tangencial:

$$v_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (20)$$

Com D sendo o diâmetro que será analisado e n a rotação utilizada no sistema. Com isso, foram aplicadas as devidas distâncias e rotações de acordo com cada condição de estabilidade, podendo chegar às velocidades de corte apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Velocidade de corte no faceamento.

D (mm)	v_c (mm/min)	
	n (RPM)	
	475	1500
2	2,98	9,42
6	8,95	28,26
12	17,90	56,52

Fonte: Autor.

De acordo com os resultados, nota-se que as velocidades tendem a zero a medida em que o corte se aproxima da origem. Essa diminuição de velocidades pode intervir

diretamente no corte da ferramenta e conseqüentemente nas características topológicas das superfícies fabricadas.

4.1.3 Amostras fresadas

Para a segunda etapa consistiu na fabricação das superfícies por meio do fresamento a seco. Esse processo foi realizado por meio de uma máquina *CNC Romi D600*, com uma fresa de topo com haste cilíndrica em aço rápido, modelo *ROCAST DIN 844 NA* com diâmetro de corte de 8mm, apresentado na Figura 19. O alumínio foi escolhido para o fresamento por alguns fatores, primeiramente pelo seu baixo custo de aquisição e depois pelas suas boas características de condutividade térmica, com valores de até 237 W/m.k. (Incropera, 2014).

A consideração do número de passes foi baseada nas diretrizes estabelecidas por Diniz *et al.* (2014), que afirma a forma mais usual para esses casos, sendo aplicada a condição de que o tamanho da fresa deve ser 30% maior que a superfície usinada.

Com o número de passes, com os valores da largura total da superfície usinada e o diâmetro da fresa, calcula-se então a espessura de corte aplicada no processo. Essa espessura é definida pela razão entre a largura da peça e o número de passes calculados.

Com isso, foram estabelecidos o número de 3 passes com espessura aproximada de 5,67 mm cada. Tal valor foi determinado devido as características da ferramenta, mostrados na Tabela 5, e a geometria do corpo-de-prova a ser usinado.

Figura 19 - Fresa de topo ROCAST DIN 844 NA - 8mm



Fonte: ROCAST (2025).

Tabela 5 - Características da fresa.

DIN 844 NA			
Diâmetro de corte (mm)	Diâmetro haste (mm)	Comprimento total (mm)	Comprimento corte (mm)
8,00	10,00	69,00	19,00

Fonte: ROCAST (2025).

Os parâmetros de usinagem dessa etapa foram determinados através de um diagrama de lóbulos de estabilidade (*DLE*) criado pelo modelo computacional de Totis (2017), que considera os parâmetros como rigidez equivalente, coeficiente de amortecimento, massa equivalente da ferramenta e receptância. Esses parâmetros foram extraídos através de um modelo matemático utilizado por Rao (2008) que faz a previsão de uma curva *FRF* (Função de resposta em frequência), norteado pelos valores experimentais extraídos em laboratório.

O modelo experimental foi realizado no *NuLEEn* com o auxílio de um martelo de impacto *PCB 086C03*, um acelerômetro *PCB 333B30* uniaxial fixado na ferramenta e o software para captação dos sinais. Após a análise de esbeltez da ferramenta, foi determinado um comprimento livre de 50mm.

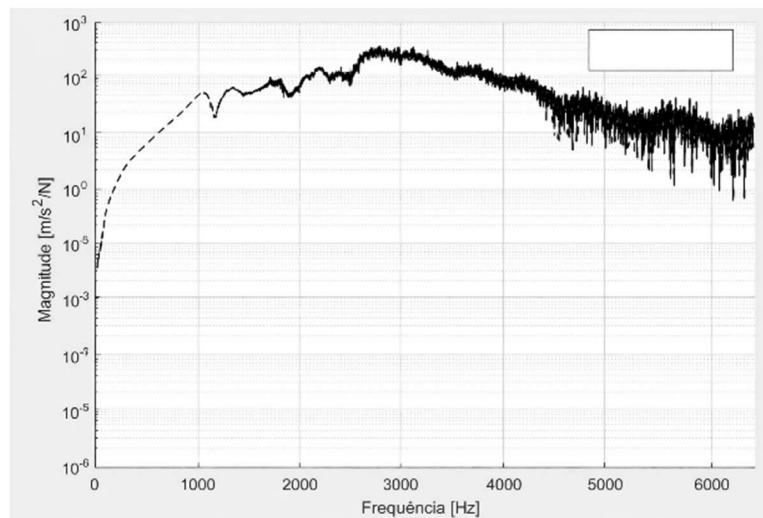
Figura 20 - Ensaio experimental para geração da *FRF*.



Fonte: Autor.

Os ensaios foram realizados com a fixação da ferramenta na máquina e em seguida a fixação do acelerômetro em sua ponta. Após essa etapa, foram aplicados golpes periódicos (cerca de 2 s de intervalo) com o martelo de impacto para a captação dos sinais. Após a realização dos experimentos os dados foram tratados, tornando possível a geração do gráfico *FRF*. Gerada a curvas *FRF*, verificou-se que os valores apresentaram um indício de qual seria o valor da frequência natural da ferramenta, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - FRF da ferramenta.

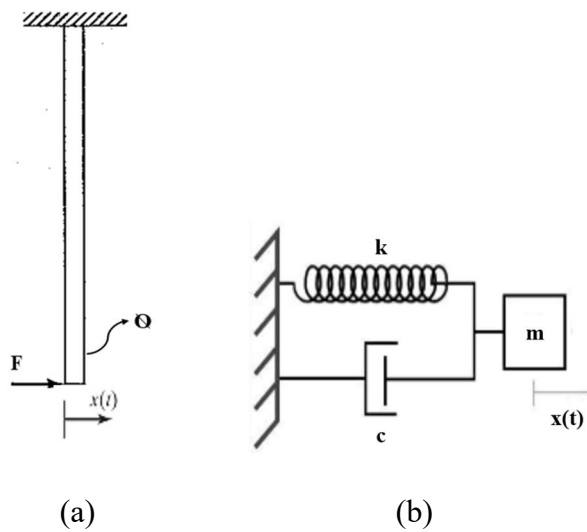


Fonte: Autor.

Os resultados tiveram a presença de ruídos em frequências acima de 1000 Hz. Tal ocorrido se deu devido à possível limitação das ferramentas utilizadas no experimento, demonstrando que sua captação não gera resultados com alto grau de confiabilidade em medições acima dessa faixa. Partindo desse cenário, foi determinada a criação de um modelo matemático que se assemelhasse ao experimento, tornando os resultados do ensaio apenas norteadores para a seleção dos valores para a geração do diagrama de lóbulos.

O modelo simplificado consiste basicamente em considerar a fresa como um corpo cilíndrico rígido, com 10 mm de diâmetro, engastado com uma força aplicada na sua extremidade, como ilustrado na Figura 22a. O valor de 10 mm foi determinado levando em consideração o diâmetro de fixação da fresa. Em seguida foi considerado um oscilador harmônico simples massa-mola-amortecimento semelhante aos aplicados em vigas em balanço, conforme apresentado na Figura 22b, e suas respectivas características, apresentadas na Tabela 6.

Figura 22 - Modelo matemático utilizado: (a) Sistema de corpo engastado; (b) Sistema massa-mola-amortecimento.



Fonte: Adaptado de Rao (2008).

Tabela 6 - Valores de entrada referente à fresa.

Propriedades do material	
ρ (kg/m^3)	7,80E+3
A (m^2)	7,90E-5
L (m)	0,05
D_f (m)	0,10
E (Pa)	2,10E+11
I (m^4)	4,90E-10

Fonte: Autor.

Com os dados da Tabela 6, o próximo passo para o cálculo do modelo é a determinação da massa equivalente do componente, nesse caso a fresa cilíndrica. O cálculo consiste na definição da massa real do elemento (m) através da densidade (ρ), área (A) e comprimento (L) (Eq. 22). Em seguida a determinação da massa equivalente (m_{eq}) apontada por Rao (2008) (Eq. 23):

$$m = \rho(AL) \tag{21}$$

$$m_{eq} = \frac{33}{140} m \tag{22}$$

Com a massa equivalente calculada, é determinada então a rigidez equivalente do material. Como já apontado anteriormente, a fresa foi considerada como uma viga engastada, sendo assim:

$$k_{eq} = \frac{3EI}{L^3} \quad (23)$$

Sendo, k_{eq} a rigidez equivalente, E o coeficiente global de estabilidade e I o momento de inércia geométrico da seção transversal. A partir da definição dessas variáveis, é definido o cálculo da frequência de ressonância, podendo ser entendida pela expressão:

$$\omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} \quad (24)$$

Nesse caso, tem-se então ω_n como a frequência de ressonância. Seguindo, é realizado o cálculo do coeficiente de amortecimento crítico (c_c):

$$c_c = 2m\omega_n \quad (25)$$

Por fim, encontra-se o fator de amortecimento (ζ), por meio da razão entre o coeficiente de amortecimento (c) e o coeficiente de amortecimento crítico (c_c):

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (26)$$

O amortecimento é determinado pela multiplicação entre a constante de amortecimento de Rayleigh (β_R) e o coeficiente de rigidez da ferramenta (k_{eq}):

$$c = \beta_R * k_{eq} \quad (27)$$

O valor de beta foi estimado de acordo com o comportamento da curva teórica em relação aos dados obtidos no ensaio experimental. Sendo assim, foi estimado um valor de β_R na grandeza de 1,6E-6.

Aplicando as equações supracitadas na geometria da ferramenta, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 7:

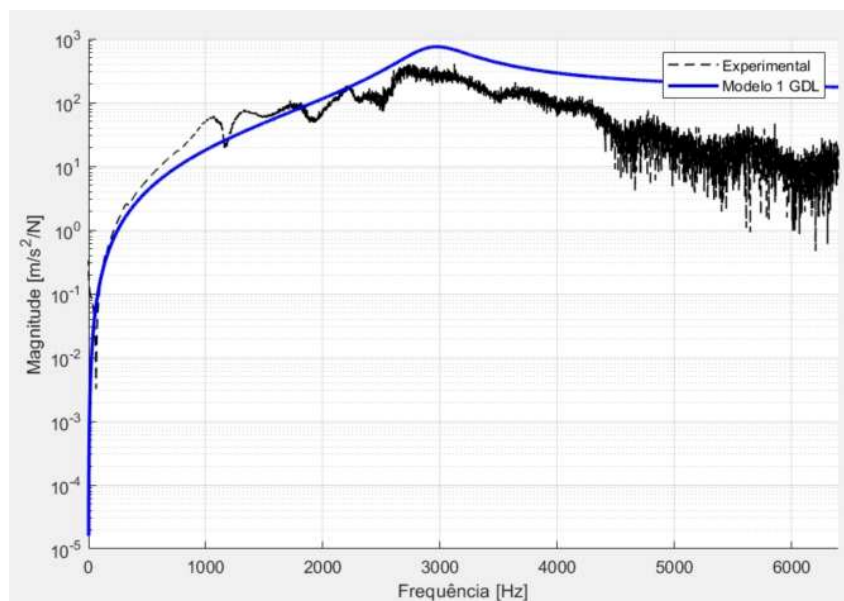
Tabela 7 - Modelo simplificado.

Massa do componente (kg)	3,06E-2
Massa equivalente (kg)	7,210E-3
Rigidez equivalente (N/m)	2,47E+6
Frequência de natural (Hz)	2,95E+3
Coefficiente de amortecimento (N.s/m)	42,54
Coefficiente de amortecimento crítico (N.s/m)	3,95
Fator de amortecimento	0,09

Fonte: Autor.

Sendo assim, as curvas teórica e experimental da fixação de 50 mm, conforme a Figura 23, foram sobrepostas para validação do modelo.

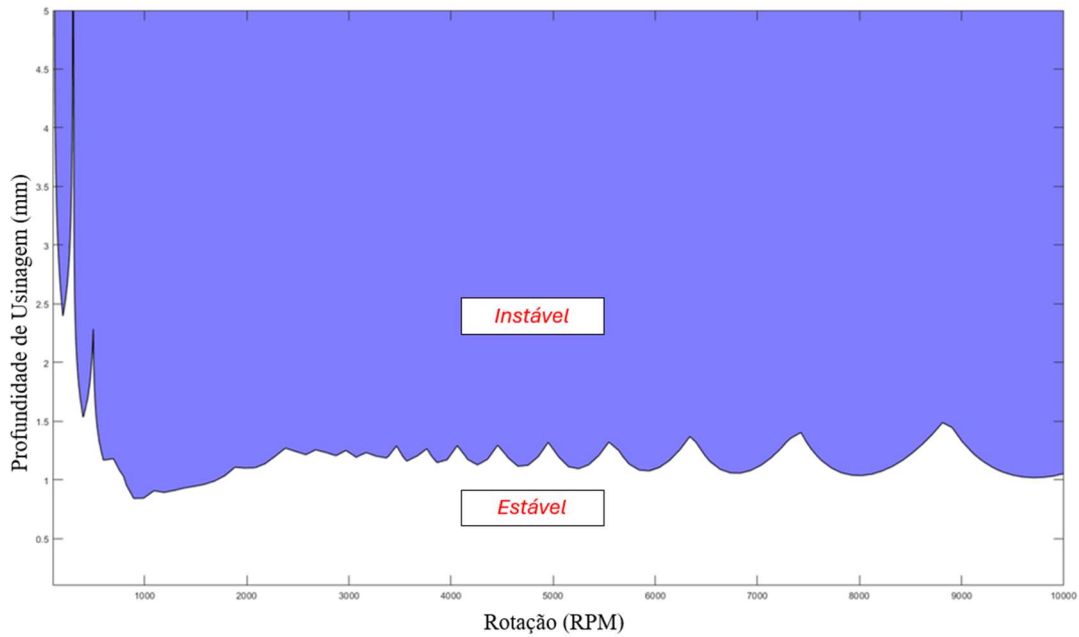
Figura 23 - FRF fixação de 50 mm (Linha preta: Experimental; Linha azul: Modelo matemático).



Fonte: Autor.

Conforme o gráfico determinou-se que a frequência de ressonância de ambas as curvas se assemelha, com valores próximos de 3.000 Hz, o que reforça a confiabilidade do modelo matemático. Sendo assim, através dos valores referentes à frequência de ressonância, massa equivalente e coeficiente de amortecimento, foi possível a geração do diagrama de lóbulos de estabilidade do modelo ilustrado na Figura 24:

Figura 24 - Diagrama de lóbulos de estabilidade do modelo: Regiões de estabilidade e instabilidade.



Fonte: Autor.

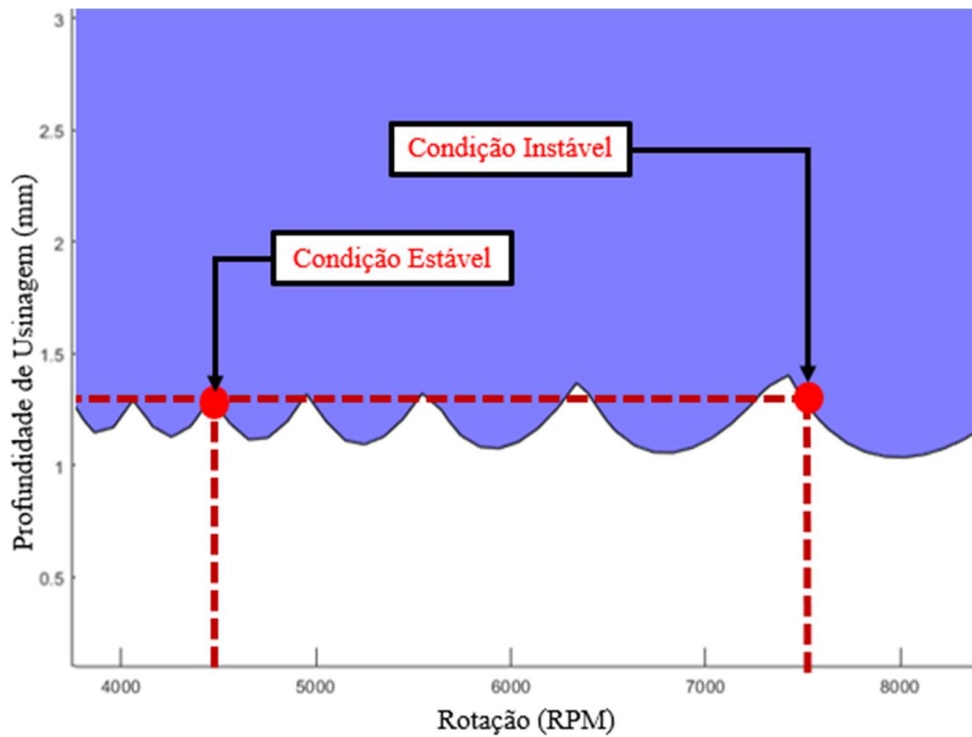
Partindo desse diagrama, foram determinados os parâmetros para o fresamento levando em consideração as regiões de estabilidade e instabilidade, como demonstrado na Tabela 8 e a Figura 25 a seguir:

Tabela 8 - Parâmetros de fabricação por fresamento.

Parâmetro	Estável	Instável
Rotação	4.500 rpm	7.500 rpm
Avanço	0,079 mm/volta	0,079 mm/volta
Profundidade de usinagem	1,30 mm	1,30 mm

Fonte: Autor.

Figura 25 - Seleção de parâmetros de usinagem para cada condição de estabilidade.



Fonte: Autor.

Realizada a seleção dos parâmetros, todas as amostras foram separadas e organizadas de acordo com o número e condição de estabilidade, para seguir com a caracterização superficial seguidas da análise de ângulo de contato. Esse procedimento foi realizado tanto para as amostras fresadas como para as faceadas.

4.2 Caracterização das superfícies

A caracterização das superfícies foi realizada por meio de um microscópio confocal de modelo *INFINITEFOCUS SL* do fabricante ALICONA, conforme a Figura 26. Ele é um equipamento de metrologia óptica avançada regularmente utilizado para a caracterizar tridimensionalmente superfícies com alta resolução por meio de varredura confocal.

Figura 26 - ALICONA Mod. INFINITEFOCUS SL.

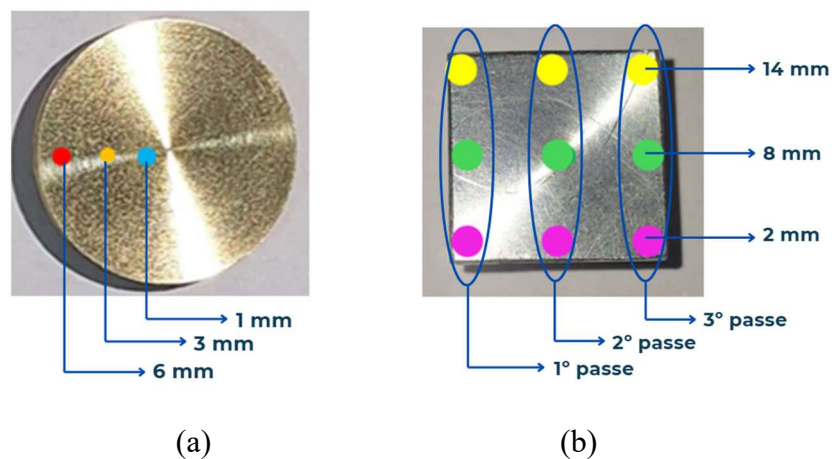


Fonte: Autor.

As análises se iniciaram com a regulação do equipamento, desde a altura, foco, e posicionamento da amostra sobre a placa. Após essas etapas foram realizados os ajustes da iluminação e zoom até a visualização nítida da superfície na tela. E por fim, coletados os resultados de cada rugosidade analisada para cada ponto selecionado.

Analogamente, foram definidas três regiões da superfície para coleta de dados, cada uma com uma distância média, de forma a diminuir ainda mais a variabilidade e melhorar a precisão dos resultados. Nas moedas faceadas, as regiões foram denominadas como centro (1 mm), intermediário (3 mm) e externo (6 mm), todas essas distâncias são em referência ao ponto central da superfície (Figura 27a). Já nas peças fresadas foram analisadas as distâncias de 2 mm (início), 8 mm (meio) e 14 mm (fim) na mesma direção onde foram realizados os passes na fabricação (Figura 27b).

Figura 27 - Regiões de coleta de dados: (a) Amostra faceada (b) Amostra fresada

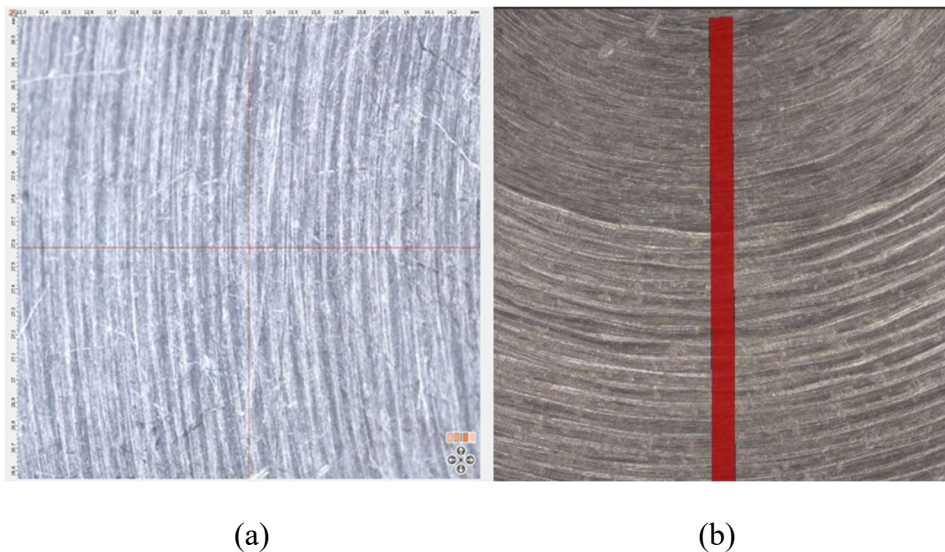


Fonte: Autor.

Nas amostras da primeira etapa (faceamento), apresentada na Figura 27a, foram selecionadas três direções radiais aleatórias. Em cada uma dessas direções, foram analisados três pontos, com as distâncias mencionadas anteriormente. Para o fresamento, as amostras foram avaliadas em nove pontos, conforme apresentado na Figura 27b, sempre do ponto de entrada do passe até a saída, e do primeiro passe até o último. Em cada passe foram extraídos os valores de rugosidade em três pontos, início (logo após a entrada da ferramenta, 2 mm), meio (medida central da peça em relação ao passe, 8 mm) e fim (antes da saída da ferramenta, 14 mm).

Para esse procedimento foram utilizadas tanto a régua do próprio software do ALICONA, Figura 28, garantindo uma maior precisão no ponto estudado, como também foi empregada uma faixa de medição com espessura de 100 μ m, conforme a Figura 28b. É importante ressaltar que todas as medidas de rugosidade extraídas tiveram ajuste do filtro conforme as orientações do fabricante do microscópio.

Figura 28 - Medição de distâncias e faixa de medição: (a) Régua do software, (b) faixa de medição das amostras.



Fonte: Autor.

Os dados coletados no ALICONA foram tabulados e em seguida calculados os valores das médias aritméticas (\bar{x}) de ambas as amostras, além disso, os valores de desvio padrão (σ) foram encontrados para determinação da barra de erro.

4.3 Medições de molhabilidade

Os ensaios de molhabilidade, foram realizados no Laboratório de engenharia térmica e fluidos (*LETef*) localizado na Universidade de São Paulo (*EESC-USP*). Foi utilizado um tensiômetro óptico da KRÜSS modelo *DSA25S*, demonstrado na Figura 29. Através desse equipamento realizaram-se os ensaios de ângulos de contato estático e dinâmico para cada uma das amostras. Utilizou-se água destilada à temperatura de 20°C, em média, como fluido de trabalho nos experimentos.

Figura 29 - Tensiômetro óptico KRÜSS DSA25S

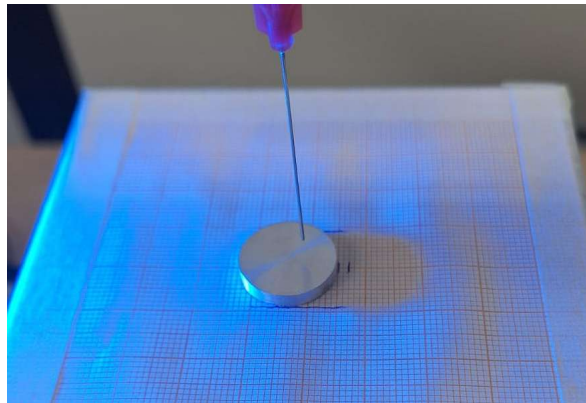


Fonte: Autor.

O primeiro passo para os experimentos foi a demarcação das distâncias de acordo com cada corpo de prova, levando em consideração os mesmos parâmetros de distâncias aplicadas nas análises de rugosidade, sendo centro, intermediário e extremidade externa, para o torneamento e início, meio e fim para o fresamento. Em seguida, os critérios de ajustes iniciais para levantamento de dados foram concebidos. Inicialmente pelo ajuste do zoom da câmera, depois o ajuste do foco no próprio software, finalizando com a calibração da escala no software (0,515 mm).

Na Figura 30 a seguir é ilustrado a demarcação das distâncias realizadas, sendo essas concebidas por meio de um papel milimetrado colado na base onde seriam posicionadas as amostras. As medidas foram rabiscadas inicialmente sobre o papel com o intuito de manter tanto o controle da posição das amostras como das medidas estariam sendo analisadas.

Figura 30 - Medidas utilizadas para controle de distâncias.

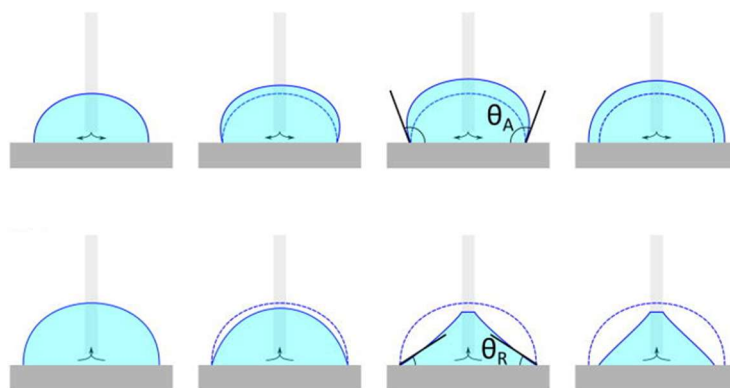


Fonte: Autor.

O ângulo de contato estático consiste na aplicação de uma gota, com um volume pré-estabelecido, sobre a superfície. Após a acomodação da gota se faz o ajuste da linha de base e finalmente a coleta do valor de ângulo de contato. Já para o ângulo de contato dinâmico se faz pela injeção de uma gota e logo em seguida a sua sucção, e paralelo a isso são feitas repetitivas medições, acompanhando seu crescimento e sua diminuição.

A avaliação do seu crescimento aponta o ângulo de avanço, ou seja, o ângulo máximo que a gota consegue se manter antes de aumentar seu diâmetro na superfície. Já a sucção auxilia na medição do ângulo de recuo, determinando qual o ângulo mínimo em que a gota consegue se manter presa à superfície sem que haja diminuição do seu ângulo de contato, essas características podem ser observadas na Figura 31 a seguir.

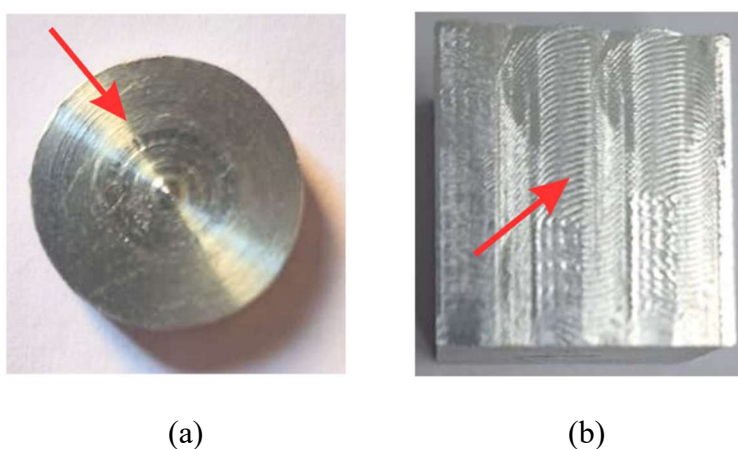
Figura 31 - Medição de ângulo de avanço e recuo, respectivamente.



Fonte: Wood *et al.* (2023)

Nos experimentos de ângulo de contato estático para o torneamento foram aplicados dois volumes diferentes, 1 μL e 3 μL , considerando 5 aplicações de cada volume em 5 direções radiais distintas. Essas duas condições de volume foram adotadas por conta da visível mudança de rugosidade nas amostras, ilustrada na Figura 32a. Considerou-se então um volume menor para que, em alguns casos, a gota se acomodasse apenas dentro dessas regiões com texturas diferentes. Já nas amostras fresadas, Figura 32b, aplicou-se apenas o volume de 3 μL , visto que as superfícies já apresentavam variações bem mais robustas em relação as peças torneadas.

Figura 32 - Texturas diferentes nas mesmas superfícies. (a) Moedas faceadas, (b) Amostra fresada.



Fonte: Autor.

Já para a determinação do ângulo de contato dinâmico, foram analisadas apenas as amostras de alumínio, a fim de comparar os sistemas de usinagem e o tipo de estabilidade de cada um. A cada amostra analisada injetava-se inicialmente uma gota de 80 μL sobre a superfície seca e em sequência a sucção de 76 μL , deixando apenas 4 μL para que se mantivesse o contato entre a agulha do equipamento e o líquido ainda presente na superfície. Essa metodologia foi adotada para que não houvesse interferência da superfície seca em relação à formação da gota, e nesse caso em específico, como se trata de gotas com maiores volumes, a gota foi aplicada no centro das superfícies.

A etapa seguinte foi uma sequência de três injeções e três sucções de gotas com volumes de 100 μL . Esse procedimento foi realizado com a utilização do software do equipamento, permitindo realizar a programação para tal feito. Em paralelo a injeção e sucção, enquanto a gota crescia e diminuía, as medições eram realizadas automaticamente

com a opção de ajuste de linha de base automática. Foram coletados ao final de cada experimento 120 pontos, sendo revisados um a um para possíveis ajustes de linha de base.

Os dados coletados foram tabulados e extraídas as médias aritméticas (\bar{x}) e desvio padrão (σ) para a geração dos gráficos e barra de erro, respectivamente. Os pontos selecionados para o ângulo de contato estático seguiram as mesmas distâncias estabelecidas no processo de caracterização das rugosidades.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

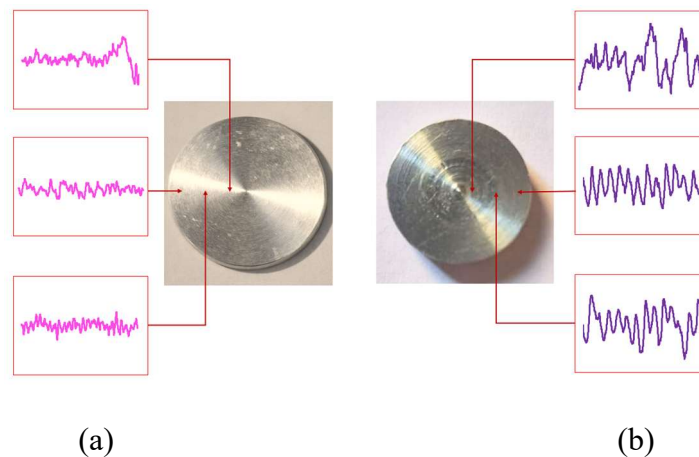
Os resultados de caracterização das superfícies fabricadas serão apresentados nesse capítulo, seguindo primeiramente com os resultados obtidos com as amostras faceadas no processo de torneamento, depois com as amostras fabricadas por fresamento.

5.1 Superfícies fabricadas por torneamento/faceamento

A partir do levantamento realizado pelo microscópio confocal, foram calculados os valores dos parâmetros de rugosidade (R_a , R_{sk} e R_{ku}), associadas a cada região de cada amostra fabricada. Para cada condição operacional, foram calculadas as médias e desvio padrão dos parâmetros de rugosidade, com base na medida das três amostras fabricadas sob condições similares.

A etapa inicial foi traçar analisar os perfis de rugosidade em cada ponto para averiguar a existência de alguma divergência entre as amostras. Com base na imagem ilustrada na Figura 33, e tendo em vista que os gráficos estão na mesma escala, é possível identificar uma mudança significativa de comportamento dos perfis para cada condição.

Figura 33 - Perfis de rugosidade das amostras de alumínio torneadas: (a) 450 RPM, (b) 1.500 RPM.

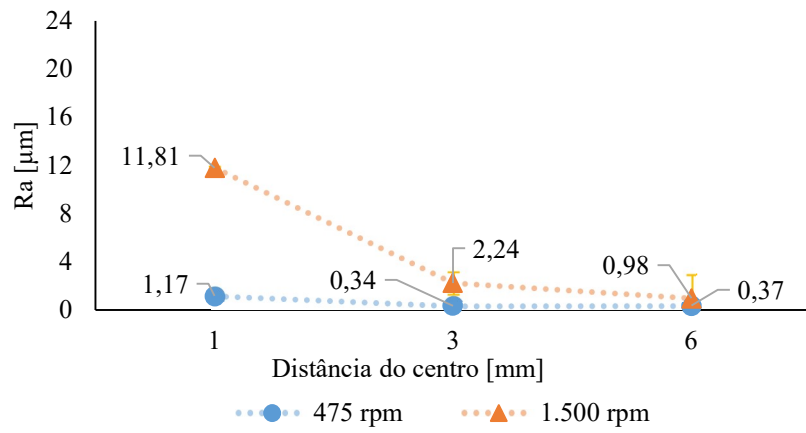


Fonte: Autor.

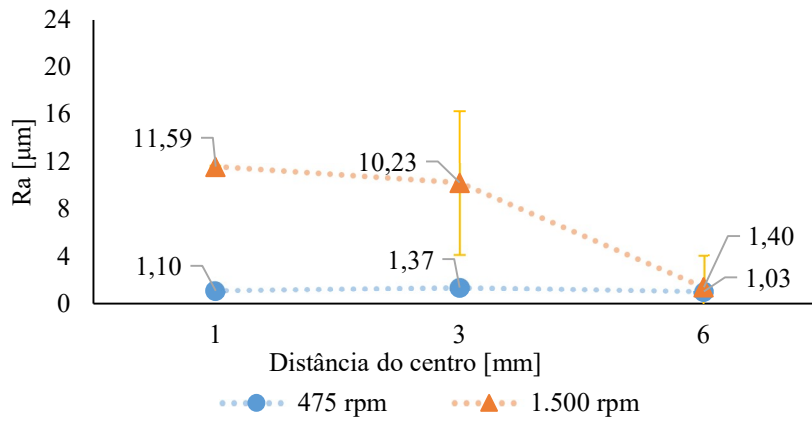
5.1.1 Parâmetros de rugosidade das peças faceadas

Tendo em vista os perfis de rugosidade apresentados na Figura 33, é perceptível que a variação de parâmetros de usinagem implicou numa expressiva mudança das alturas dos picos e profundidade dos vales em cada região. Para melhor entender essas mudanças foram avaliados os dados de rugosidade média extraídas das amostras.

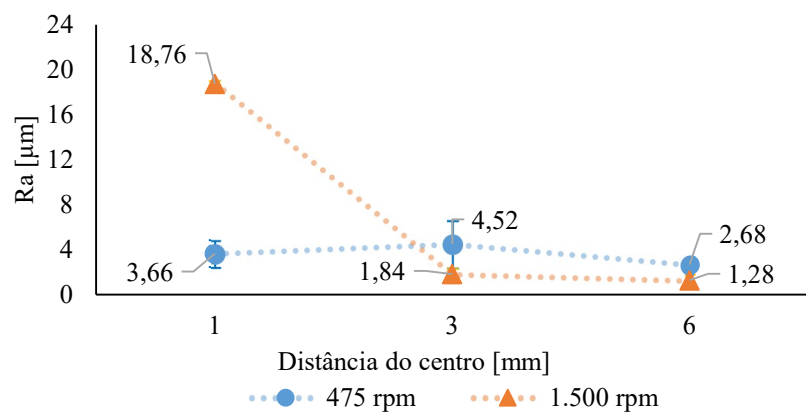
Figura 34 - Valores de rugosidades médias: (a) Alumínio, (b) Latão e (c) Aço inoxidável.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

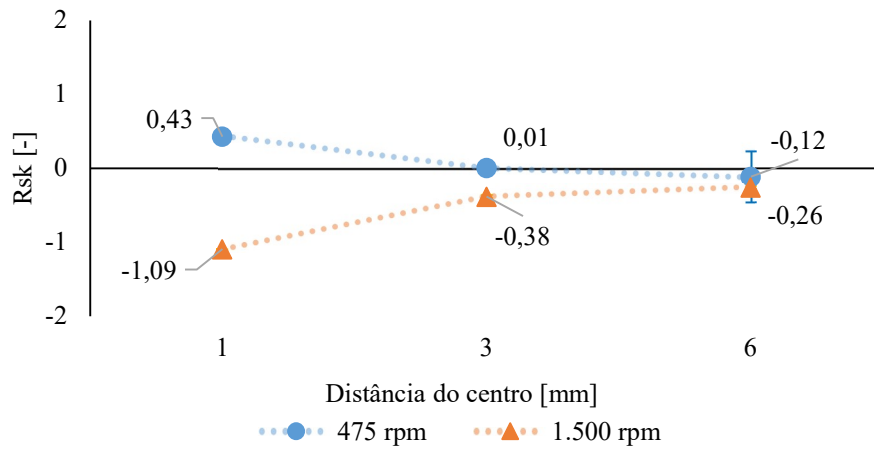
De acordo com os resultados expostos na Figura 34, valores de rugosidade média das regiões mais distantes do centro das amostras variaram ligeiramente para superfícies de diferentes materiais, mas para cada material, não se observou mudanças significativas de R_a dentre amostras fabricadas com parâmetros de fabricação mais baixos e as fabricadas com valores altos. Além disso, esses materiais são materiais com diferentes valores de ductilidade, o que pode impactar na superfície final quando fabricadas sob mesmas condições de usinagem.

Contudo, diferenças notáveis são observadas conforme o raio diminui, ou seja, em regiões mais próximas do centro. Deve-se observar, conforme descrito por Trent (2000), que a velocidade de corte é reduzida à medida que a ferramenta se aproxima do centro da peça, o que pode influenciar no acabamento superficial durante o processo de faceamento.

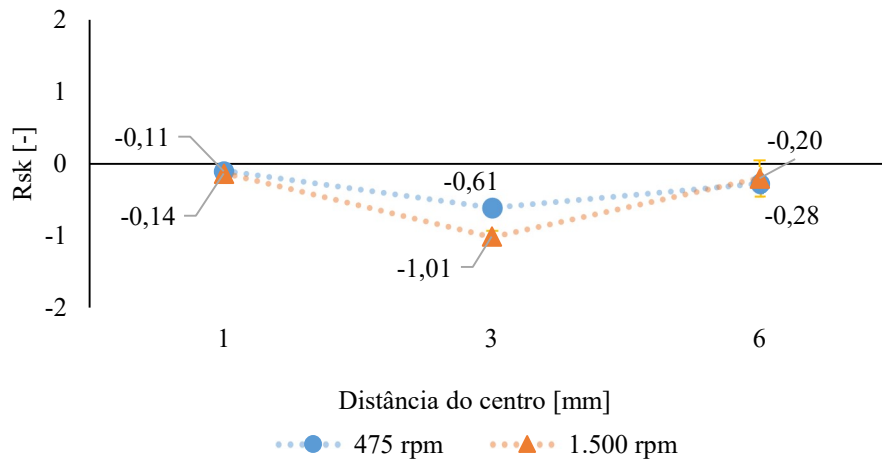
Avaliando outras regiões dentro das amostras fabricadas, é perceptível que a região intermediária do latão também teve uma variação mais acentuada, quando comparamos ambos os sistemas. Tal ocorrido pode ser um indicador de que o latão tenha sido o material mais sensível ao sistema de instabilidade, em comparação aos demais, visto que tanto na região intermediária como na central, seus resultados variaram mais em relação aos demais.

Com o intuito de aprofundar a avaliação de cada superfície fabricada, os dados de assimetria passaram por análises dos possíveis impactos da ocorrência de *chatter* na predominância de picos ou vales na superfície, esses resultados estão apresentados na Figura 35 a seguir:

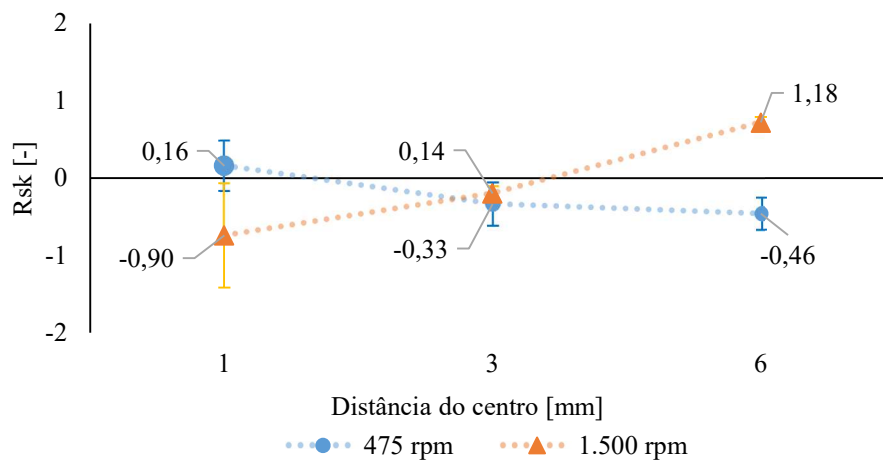
Figura 35 - Valores de assimetria: (a) Alumínio, (b) Latão e (c) Aço inoxidável.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

Os valores de assimetria se mostraram bem variados, analisando o alumínio, representado pela Figura 34a, o perfil de assimetria variou mais significativamente nas distâncias de 3 mm e 1 mm, variando da predominância de vales ($R_{sk} > 0$) para a presença maior de picos ($R_{sk} < 0$) quando comparados as duas condições. No ponto 6 mm o material não apontou mudanças na configuração do perfil, apenas uma maior predominância de vales.

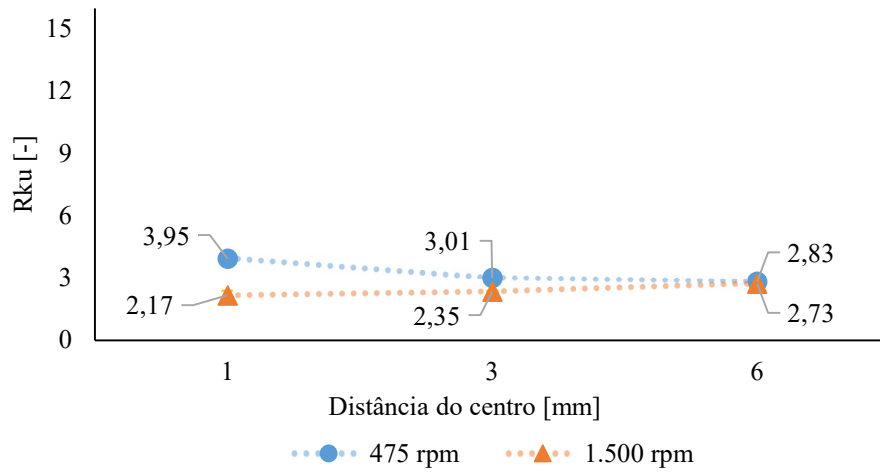
Se tratando do latão, representado pela Figura 34b, é possível apontar que não houve mudanças na predominância desses picos ou vales. Em todas as regiões obtiveram valores semelhantes de assimetria, revelando a baixa interferência do sistema de estabilidade nos valores de R_{sk} nesse material, apenas uma maior intensificação da predominância de picos no ponto 3 mm.

Em contrapartida, o aço inoxidável apontou variação da assimetria em todas as regiões analisadas, como é possível observar na Figura 34c. Nas regiões com distâncias de “6 mm” e “3 mm”, os resultados de R_{sk} passaram de negativos para positivos, indicando a mudança na predominância de picos para a de vales. E avaliando a região central, verificou-se um comportamento inverso em relação às demais regiões.

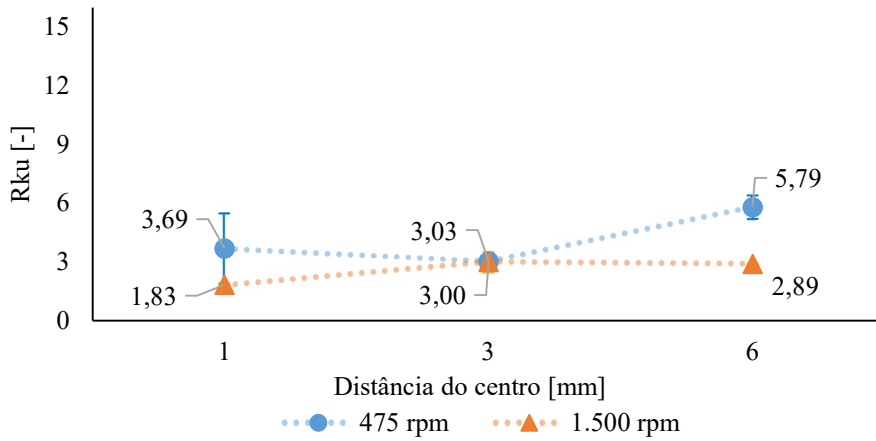
Tais resultados reforçam o real impacto do tipo de material empregado no sistema de usinagem, que além dos parâmetros de fabricação. O comportamento variado entre as amostras reforça a ideia da influência da ductilidade, pois de acordo com a ductilidade a formação de cavaco, dificuldade de usinagem e acúmulo de material da ferramenta podem ser comprometidos, refletindo na superfície final.

Os resultados de assimetria analisados só reforçam a necessidade de avaliação de outros parâmetros de rugosidade na caracterização de superfícies faceadas. Enquanto na rugosidade média foram encontradas variações mais localizadas em todas as amostras, principalmente na região de 1 mm, na assimetria não houve mudanças significativas do perfil predominante. Partindo dessa ideia os valores de curtose foram avaliados a fim de reforçar essa investigação de impacto de vibrações autoexcitadas na topografia das superfícies.

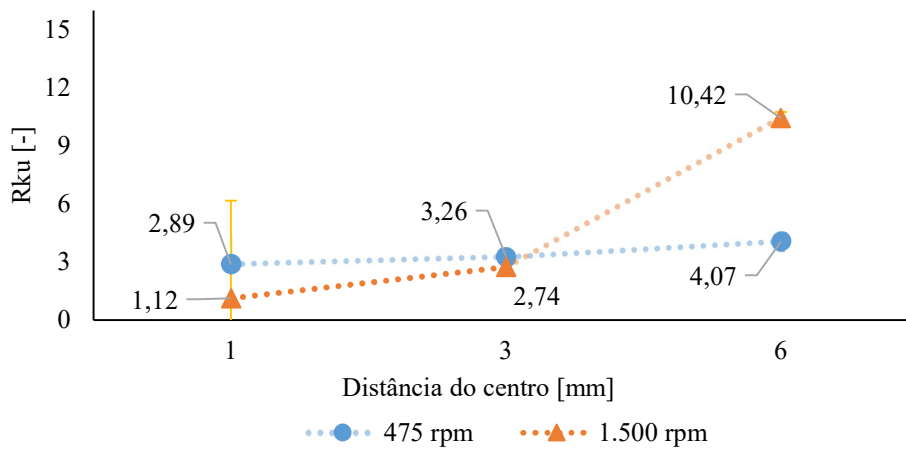
Figura 36 - Valores de curtose: (a) Alumínio, (b) Latão e (c) Aço inoxidável.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor

Na análise da curtose os resultados não revelaram grandes variações na distribuição dos perfis na maioria dos pontos. Em relação aos valores do alumínio, apresentados na Figura 36a, seus pontos não tiveram grandes mudanças de distribuição de seu perfil, pois todos os valores apresentaram resultados bem próximos de 3. Lembrando dos valores de rugosidade média e assimetria desse material, pode-se perceber que a região central do alumínio demonstrou ser uma das mais afetadas pela variação dos parâmetros de fabricação.

Analisando os dados da Figura 36b, referentes ao latão, os resultados apontaram variações mais significativas na região “6 mm” e “1 mm”, sendo essa mais acentuada na distância de “6 mm”. Nesse ponto em específico, a condição com parâmetros de usinagem mais elevados tornou a distribuição do perfil mais uniforme em relação a condição de parâmetros mais baixos, levando em consideração o valor de $R_{sk} = 3$ para um perfil mais uniforme. É importante ressaltar que seus resultados de R_a e R_{sk} tiveram maiores influências nos pontos de 1mm e 3mm, deixando claro que mesmo com esses parâmetros apontando para um certo perfil, a distribuição desse perfil variou de acordo com as condições de usinagem.

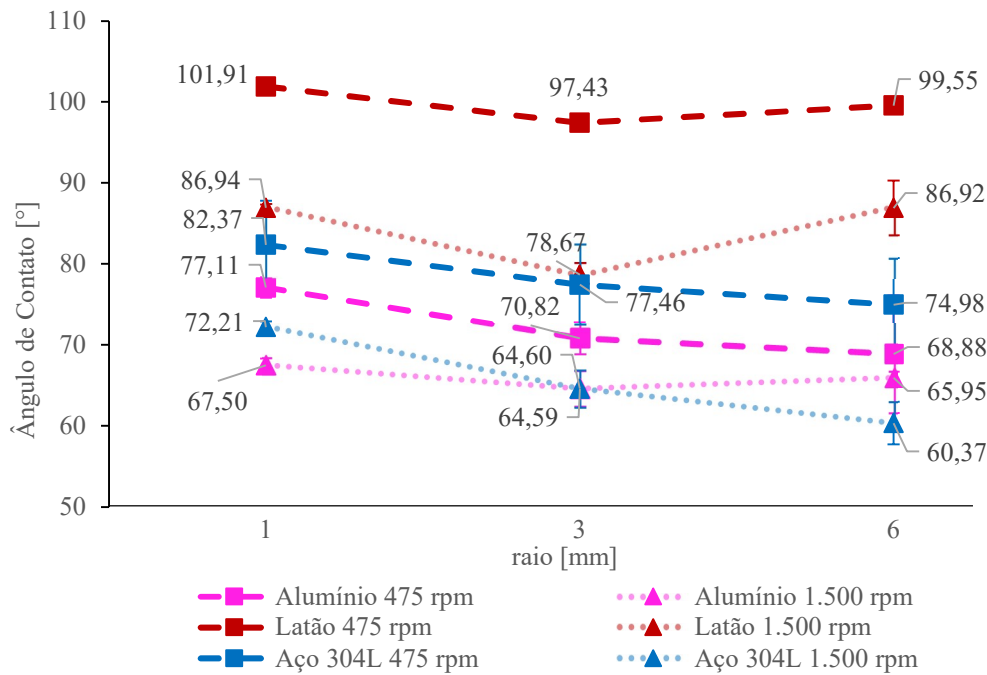
Por fim, quando avaliados os resultados do aço inoxidável, apresentados na Figura 36c, é notado um comportamento contrário ao latão, com o perfil de distribuição se tornando menos uniforme para as amostras fabricadas em velocidades mais altas quando comparados os dois tipos de sistemas aplicados. Avaliando esse comportamento, o aço inoxidável apresentou semelhanças em relação às curvas de curtose e assimetria, mas assim como os demais materiais, sua curva de rugosidade média ainda demonstra uma maior variabilidade em entre as regiões.

Para melhor caracterizar as superfícies fabricadas, foram avaliadas as medidas de ângulo de contato estático e dinâmico. Esses pontos são essenciais para entender melhor sobre o comportamento da superfície com diferentes características superficiais em contato com um fluido. Isso abre um leque de possibilidades de análises para entender se há uma associação entre as rugosidades analisadas (R_a , R_{sk} e R_{ku}) e seus respectivos ângulos de contato.

5.1.2 Medições de ângulo de contato estático das peças faceadas

Dando sequência às análises das características superficiais, os ângulos de contato estáticos foram avaliados em duas etapas, primeiro por gotas com volume de 3 μL e em seguida por gotas com volume de 1 μL . Todos os pontos de molhabilidade analisados dizem respeito aos mesmos avaliados nas rugosidades, conforme a Figura 37.

Figura 37 - Ângulos de contato estáticos (volume de 3 μL).



Fonte: Autor.

Os resultados de ângulo de contato para a gota de 3 μL , apresentado na Figura 37, revelaram um ponto importante, em todos os pontos de todos os materiais houve a redução dos ângulos de contato no comparativo entre os processos de usinagem com valores mais elevados em relação aos com valores menores. Além disso, o comportamento das curvas foi semelhante em ambas as situações, principalmente do alumínio e aço inoxidável.

O alumínio obteve superfícies hidrofílicas em ambos as fabricações, com resultados que variaram de 65,95° a 77,11°, e mesmo com velocidades e avanços mais elevados, seus ângulos de contato variaram, mas não a ponto de mudar sua classificação em relação à molhabilidade.

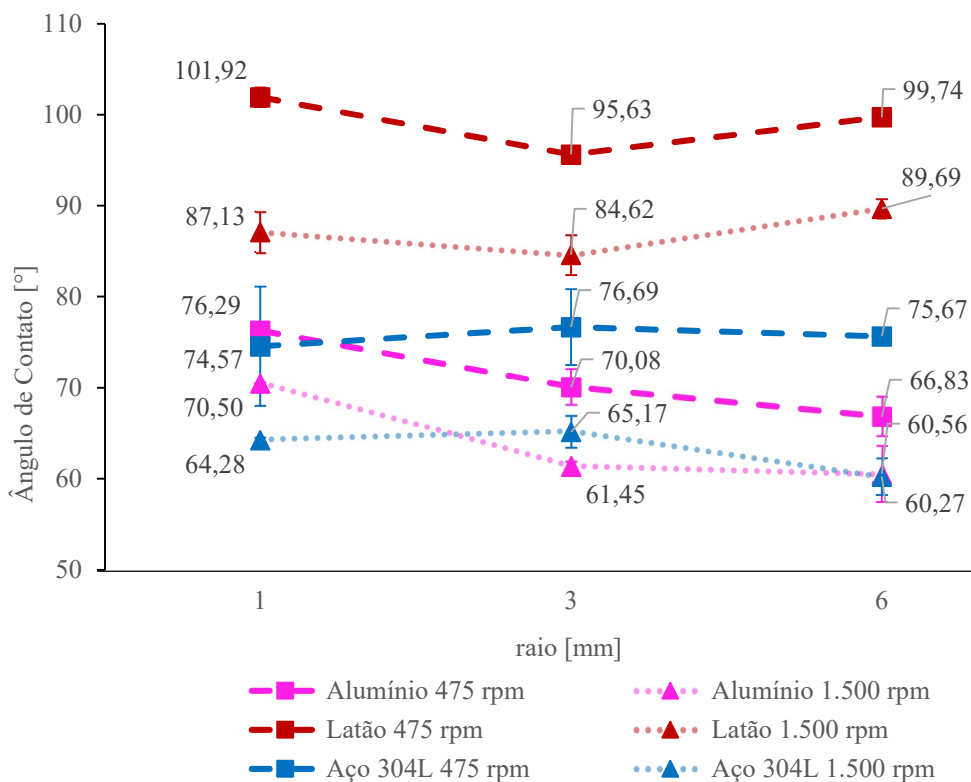
Já o latão demonstrou a mudança mais significativa dentre todos. Em todas as regiões seus ângulos de contato da superfície com velocidade de 475 RPM se mostram

hidrofóbicas, com ângulo de contato entre 99,55° e 101,91°. Na condição com 1.500 RPM de rotação, o material teve uma mudança maior na região “3mm”, tornando-se uma superfície mais hidrofílica em relação aos demais pontos.

O aço inoxidável por sua vez apresentou valores de ângulos de contato menor que 90°, demonstrando ter em todos os pontos superfícies hidrofílicas. Com rotações de 1.500 RPM esses ângulos reduziram ainda mais, com ângulos de contato entre 60,37° e 72,21°, ou seja, se tornaram ainda mais hidrofílicas. Um ponto importante é que material apresentou a curva de variação mais linear dentre os demais, com variação média entre os sistemas com valores bem próximos.

Com o intuito de melhor avaliar e caracterizar essas superfícies a análise com uma gota de menor volume pode identificar algum comportamento diferente ou até mesmo confirmar os resultados investigados com a gota de 3 µL. Para isso, foi realizado o mesmo procedimento para uma gota de 1 µL, demonstrado na Figura 38 a seguir.

Figura 38 - Ângulos de contato estáticos (volume de 1µL).



Fonte: Autor.

Os resultados encontrados com a gota de 1 µL, mostraram valores e comportamento das curvas semelhantes ao primeiro volume aplicado. Os dados apontam

comportamentos quase idênticos, mesmo com a alteração dos parâmetros de usinagem, com variações médias mais próximas às encontradas no volume de 3 μL .

As curvas do alumínio em ambos os sistemas (475 RPM e 1.500 RMP), mostram superfícies hidrofílicas, havendo alterações apenas na diminuição desses ângulos quando fabricadas na velocidade mais alta. O aço inoxidável também teve comportamento e características semelhantes ao alumínio, se diferenciando apenas na região de “3 mm”, pois com a gota de 1 μL essa região apresentou maior ângulo de contato em relação aos demais pontos. Esse comportamento acaba por indicar a influência do volume da gota nessas regiões, pois a gota maior pode acabar abrangendo regiões de diferentes topologias na mesma análise.

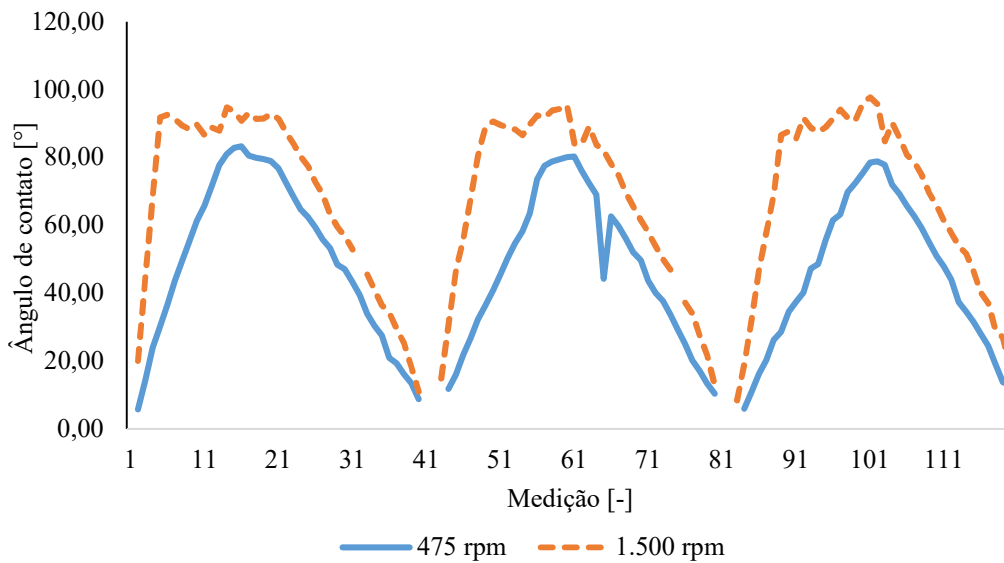
Nos pontos referentes ao latão a curva se comportou de forma mais semelhante quando comparadas as gotas de 1 μL e 3 μL . Mesmo obtendo valores muito próximos a mudança mais expressiva ocorreu no ponto “3 mm”. Esse ponto diverge do ponto com maior discrepância na gota com 3 μL , isso pode ter acontecido também pela abrangência de uma gota maior. Quando avaliado uma gota com menor volume essa condição fica um pouco mais restrita, podendo ter maior especificidade na região onde se quer avaliar.

5.1.3 Medições de ângulo de contato dinâmico das peças faceadas

Na próxima etapa, foram avaliados os ângulos de contato dinâmicos, que consiste na injeção e depois na sucção de uma gota de água com sequenciais medições durante o crescimento e diminuição da gota. Nesse quesito foram analisados os ângulos de arrasto, caracterizados pelo ângulo máximo que a gota suporta até a expansão de seu raio em seu crescimento, e o ângulo de recuo, que seria o ângulo mínimo que a gota consegue se prender à superfície sem diminuir seu raio.

As falhas de continuidade nas curvas são a ausência de medição pois em pontos específicos a leitura da linha de base de medição não foi contada, refletindo na desconsideração desses trechos por parte do software. Um exemplo dos dados levantados está apresentado na Figura 39, demonstrando como os resultados foram coletados de cada amostra e suas respectivas curvas de ângulos de contato.

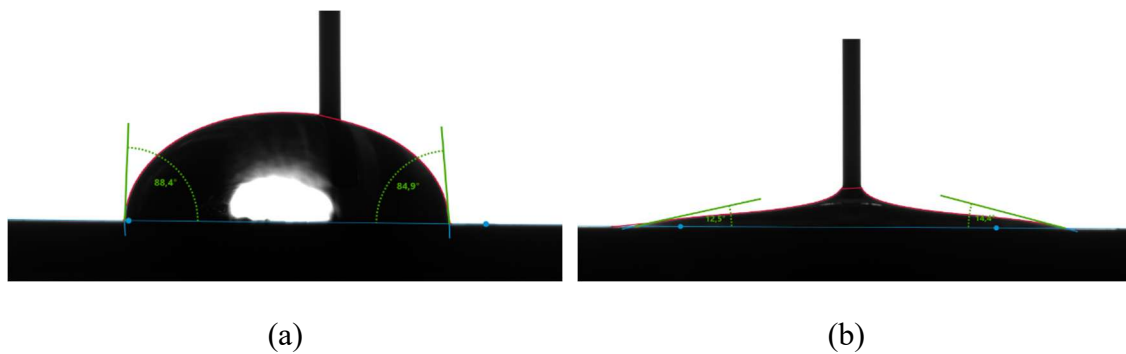
Figura 39 - Ângulo de contato dinâmico de uma amostra de alumínio (Torneamento).



Fonte: Autor.

Mesmo com as curvas geradas, os valores de ângulo de avanço e recuo só foram coletados com base nas imagens geradas durante cada medição. O resultado de cada ângulo de contato apresentado diz respeito à média dos pontos encontrados em cada curva gerada. Um exemplo das imagens captadas durante os experimentos está ilustrado na Figura 40 a seguir:

Figura 40 - Ângulo de contato dinâmico: (a) Ângulo de avanço, (b) Ângulo de recuo.



Fonte: Autor.

Nas análises de ângulo de contato dinâmico do alumínio, verificou-se que na condição com rotação de 7.500 RPM as amostras fabricadas obtiveram ângulos de avanço menores em relação às fabricadas com 4.500 RPM, isso implica que o fluido possui maior dificuldade de espalhamento na superfície da condição estável. O ângulo de avanço pode ser deduzido por meio dos pontos mais altos encontrados nas curvas, com valor médio de

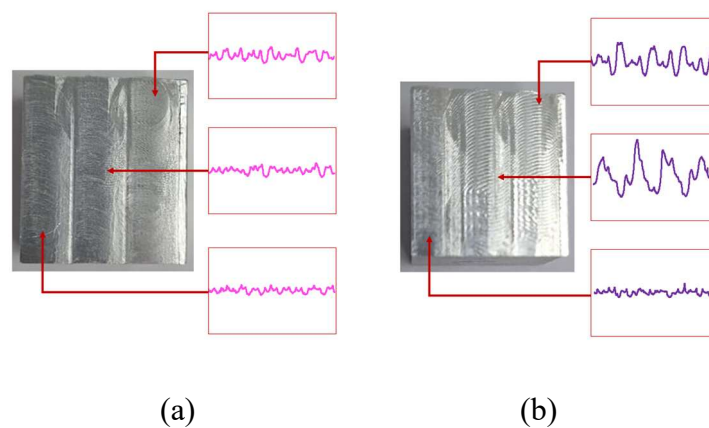
ângulo de avanço de $84,08^\circ$ e $73,21^\circ$ para os regimes estável e instável, respectivamente. Tais valores acabam coincidindo com as análises de ângulo de contato estático, pela qual foi mostrada que a superfície do alumínio demonstrou ser a mais hidrofílica, e com ângulos de contato estáticos mais baixos na condição com maior velocidade

Analisando o ângulo de recuo da curva do alumínio, percebe-se que a mesma condição se repete. Os ângulos de recuo da condição estável se mostraram superiores quando em comparação aos instáveis, com resultados de $40,35^\circ$ e $14,3^\circ$, respectivamente. Analogamente, percebe-se que na superfície instável existe uma maior dificuldade para o fluido se deslocar à medida que diminui de volume, podendo interferir diretamente em processos de ebulição, por exemplo, pois à medida que a bolha aumenta de tamanho o fluido que a envolve terá maior dificuldade de se deslocar.

5.2 Superfícies fabricadas por fresamento

Inicialmente, ao avaliar os perfis de rugosidade das amostras fresadas foi possível identificar a olho nu uma expressiva mudança nas texturas das superfícies, reforçando a presença de vibrações autoexcitadas em algumas regiões específicas. Em concordância disso, os perfis de rugosidade de cada ponto foram avaliados para reforçar a presença dessas vibrações em suas respectivas regiões, conforme apresentado na Figura 41.

Figura 41 - Perfis de rugosidade em amostras fresadas: (a) 4.500 RPM, (b) 7.500 RPM.

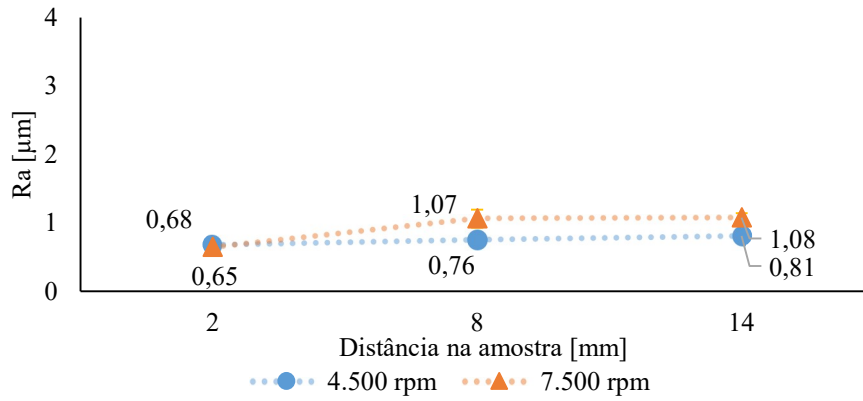


Fonte: Autor.

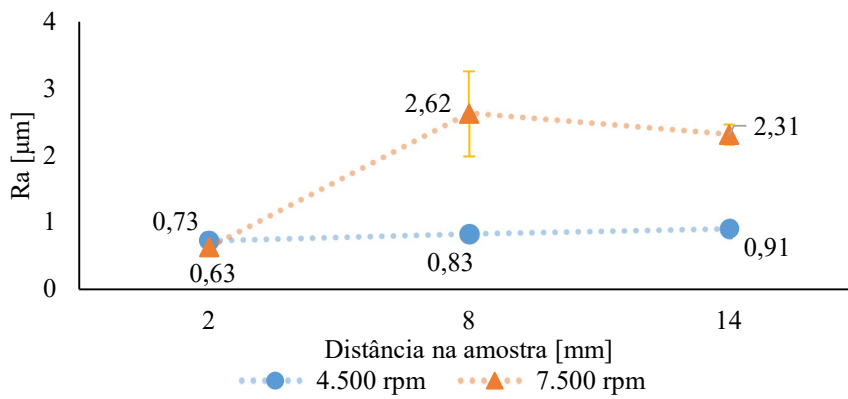
5.2.1 Parâmetros de rugosidade das peças fresadas

Assim como nas amostras faceadas, foram realizadas análises de rugosidade média para cada distância em seu respectivo passe, ilustrado na Figura 42:

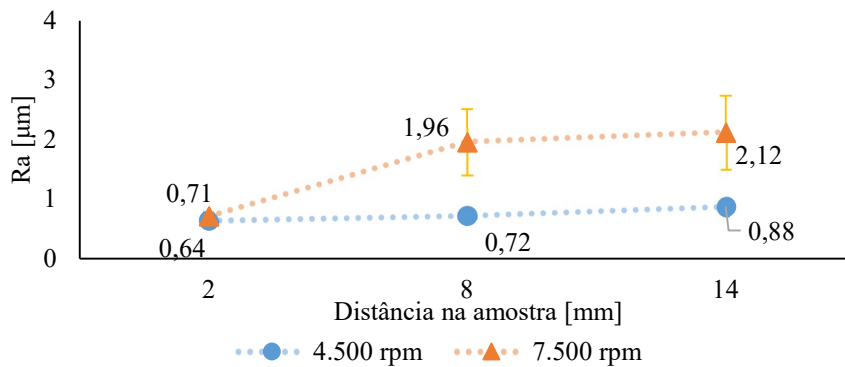
Figura 42 - R_a das amostras fresadas: (a) 1º passe, (b) 2º passe e (c) 3º passe.



(a)



(b)



(c)

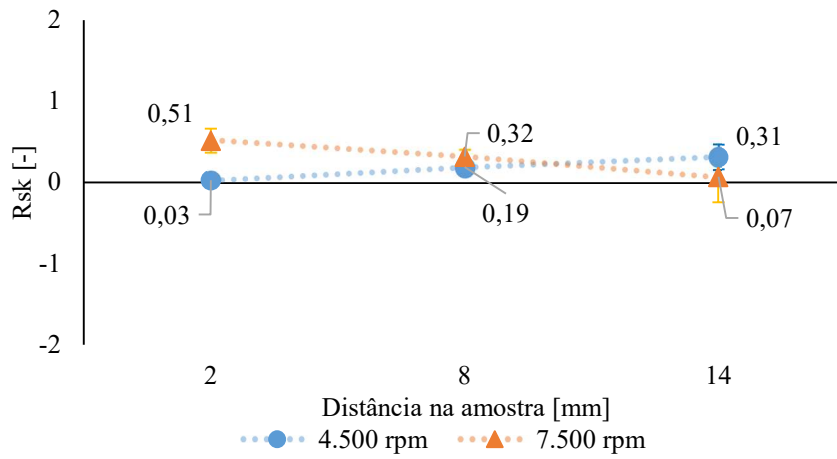
Fonte: Autor.

Com base nos resultados obtidos, pode-se perceber que o primeiro passe, Figura 42a, apresentou menores variações de rugosidade média em relação aos demais passes, o fato de ser a primeira camada de material removido, alguns fatores como acúmulo de material ou a própria instabilidade do sistema não tenha afetado de forma expressiva.

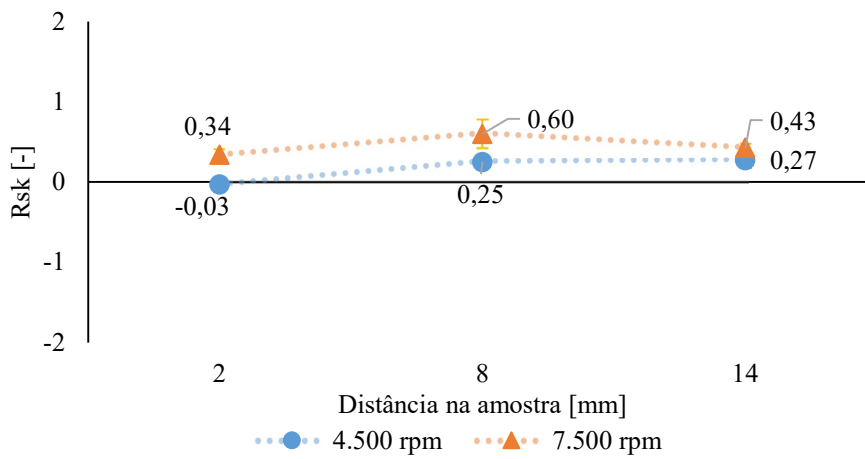
O segundo e terceiro passe apresentaram variações mais relevantes em relação ao primeiro, especialmente nas regiões “8 mm” e “14 mm”. Além disso, essas regiões apresentaram maior variabilidade entre as três amostras, podendo ser visualizadas pela barra de erro nos gráficos. Essa dispersão de valores demonstra que existe uma faixa de variação maior da média entre os resultados de cada amostra.

Analogamente, apesar de que em alguns casos haja uma variação pequena dos valores de rugosidade, as regiões “8 mm” e “14 mm” de todos os passes obtiveram maiores rugosidades médias em relação aos pontos “2 mm”. A questão do segundo e terceiro passe estarem com maior variabilidade de resultados pode ser explicada pela influência do contato da ferramenta com a superfície durante o passe, como também a possível presença de material impregnado na ferramenta, além da variável principal, a ocorrência de vibrações autoexcitadas. Para melhor entender o comportamento dessas superfícies em relação aos parâmetros de usinagem utilizados, foram levantados os dados de assimetria, segundo apresentado na Figura 43, a fim de investigar alguma evidência da influência dessas vibrações.

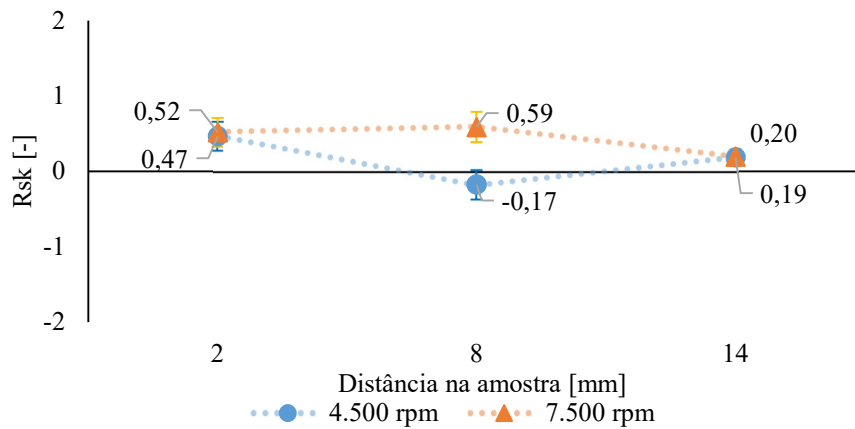
Figura 43 - Assimetria das amostras fresadas: (a) 1º passe, (b) 2º passe e (c) 3º passe.



(a)



(b)



(c)

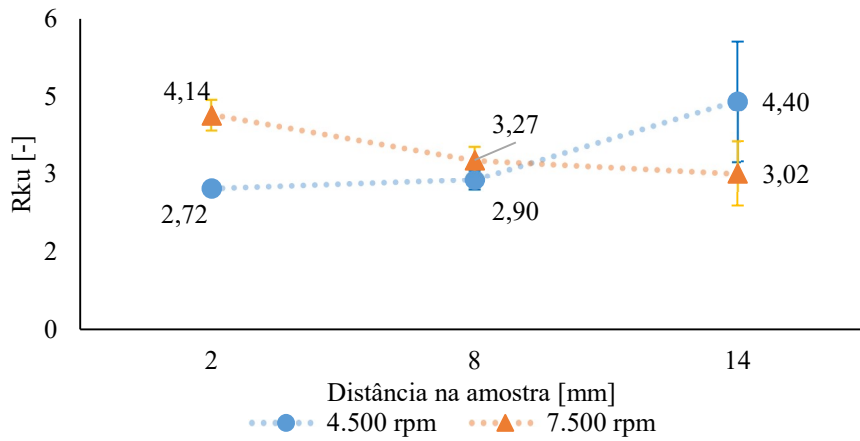
Fonte: Autor.

Como demonstrado, o R_{sk} acabou por não apontando variações significativas em nenhum dos passes, quando comparados os dois sistemas de estabilidade. Apesar de haver variações em alguns pontos, os valores estão bem próximos da curva gaussiana ($R_{sk}=0$), o que leva a entender de que a assimetria dos perfis, apesar de obterem rugosidades média distintas, acabaram tendo resultados aproximados, significando um baixo impacto nesse quesito.

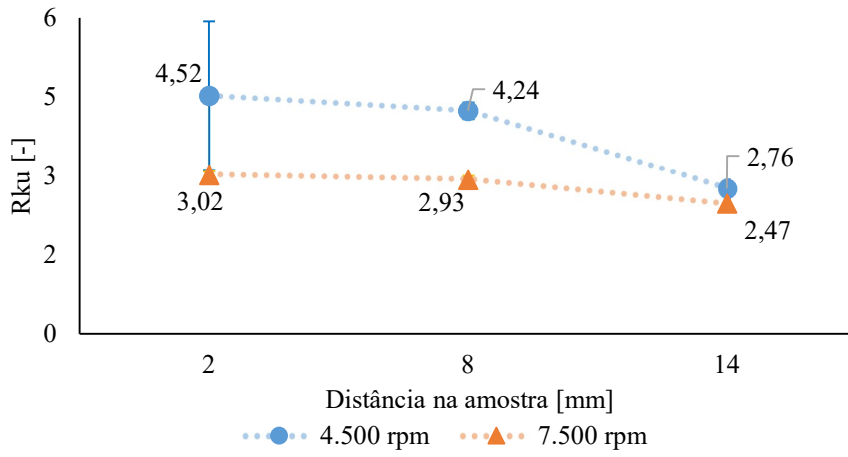
Vale ressaltar que as regiões com maior discrepância foram os pontos “2 mm” do primeiro passe e “8mm” no terceiro passe, com variação de assimetria de 0,54 e 0,76, respectivamente. Esse comportamento demonstra que, no ponto “2 mm” do primeiro passe, mesmo com rugosidades médias semelhantes a presença de pico e vales variam de acordo com sistema de estabilidade. Diferente do que ocorreu na região “8mm” do terceiro passe, demonstrando alta variabilidade tanto no R_a como no R_{sk} .

Seguindo as análises, os valores de curtose foram analisados para verificação da influência do *chatter* na distribuição desses perfis, sendo assim, o R_{ku} apresentou os seguintes resultados:

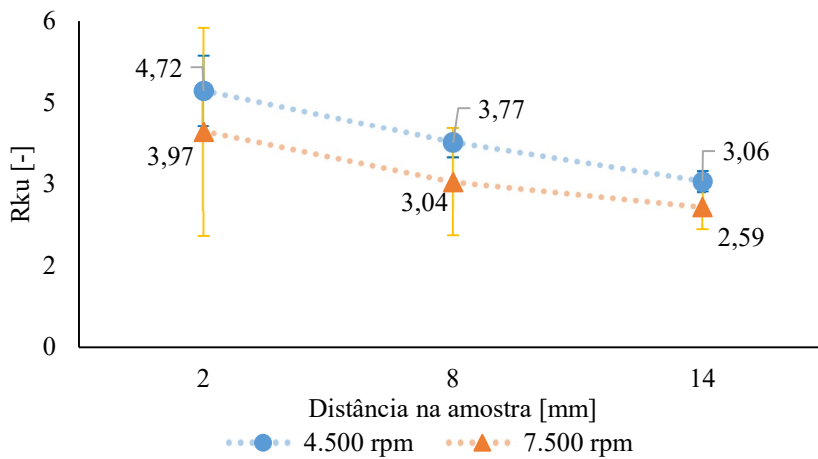
Figura 44 - Curtose das amostras fresadas: (a) 1º passe, (b) 2º passe e (c) 3º passe.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

Os resultados da curtose também não mostraram nenhum padrão quando comparados os três passes, pois em cada passe houve um comportamento diferente das curvas de R_{ku} . Quando comparadas as condições de estabilidade, os gráficos do primeiro passe se comportaram de forma mais heterogênea em relação aos demais, pois nas regiões de entrada e saída da ferramenta na superfície, houve diferentes graus de distribuição do perfil. Em ambos os passes, essas dispersões de resultados estão mais acentuadas nas condições de instabilidade (7.500 RPM), pois nessa condição os dados tiveram um intervalo maior entre as amostras.

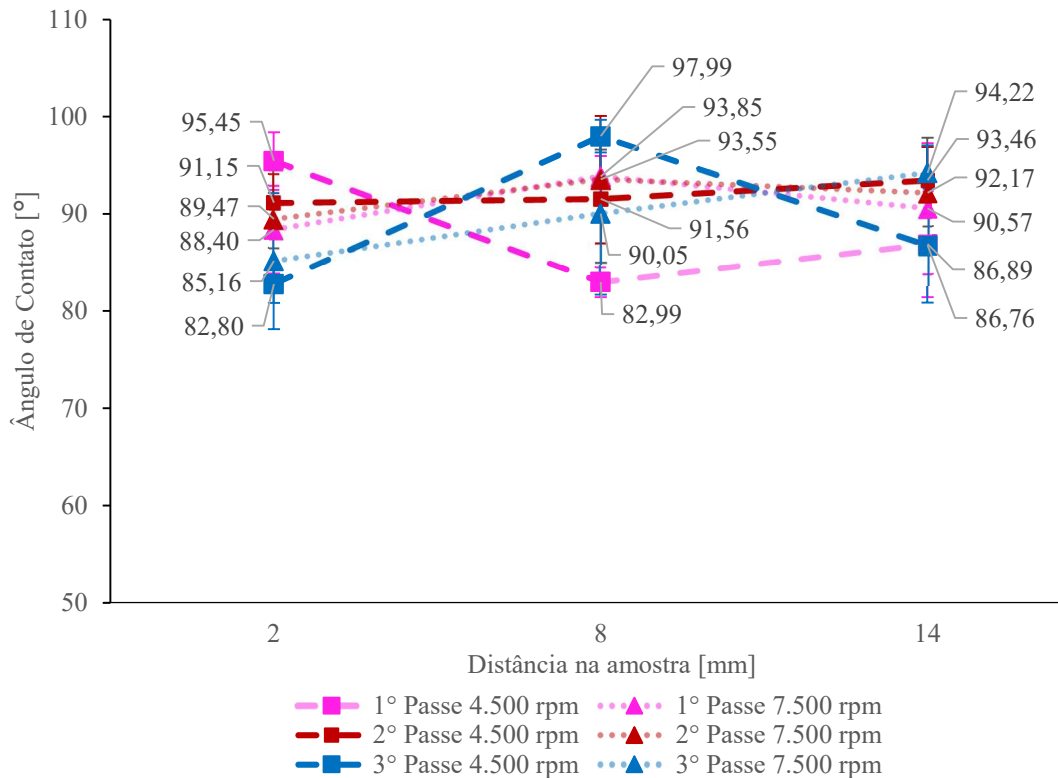
Os dados de R_{ku} demonstraram então que, assim como a assimetria, não houve variações expressivas quando comparados os passes e seus sistemas de estabilidade ($R_{sk} \approx 3$), apesar das curvas terem comportamentos diferentes. Outro ponto é que apesar da rugosidade média possuir variações bem mais acentuadas nas regiões “8 mm” e “14 mm” do segundo e terceiro passe, na curtose as diferenças estão mais presentes na região “2 mm”.

Para melhor entender a influência das rugosidades, foram levantados os dados de ângulos de contato estáticos e dinâmicos com a finalidade de melhor categorizar essas superfícies e entender melhor como cada uma delas se comportaria em condição de contato com um fluido.

5.2.2 Medição de ângulo de contato estático das peças fresadas

Os dados coletados sobre os ângulos de contato estáticos nas amostras fresadas foram agrupados e organizados a fim de entender o comportamento das superfícies usinadas de acordo com os parâmetros aplicados, com a aplicação de uma gota com 3 μL de volume, os pontos avaliados seguiram a mesma lógica dos pontos avaliados nas rugosidades, resultando assim nas seguintes curvas.

Figura 45 - Ângulo de contato estático das amostras fresadas (volume 3μL)



Fonte: Autor.

Partindo dos gráficos apresentados na Figura 44, é possível identificar que o primeiro e o terceiro passe foram os que mais sofreram interferência do *chatter*. No primeiro passe verifica-se que o ponto “2 mm” obteve ângulo de contato superior na condição estável, condizendo com os parâmetros de assimetria analisados, pois apesar da rugosidade média ter valores semelhantes nesse ponto, a assimetria e curtose tiveram comportamentos semelhantes, com resultados mais elevados na condição com velocidade mais baixa. Tal condição pode ser um importante indicador da influência do R_{sk} e R_{ku} nos ângulos de contato, tendo em vista essa convergência dos comportamentos das curvas.

O segundo passe obteve menos variações, pois ambos os pontos avaliados não estão com divergências tão expressivas como nos demais passes. Esse comportamento condiz com os resultados de assimetria adquiridos, pois apenas do R_a e R_{ku} terem mudanças consideráveis quando ocorre a mudança de velocidade no sistema, no segundo passe a curva de valores do R_{sk} se comportaram de forma semelhante.

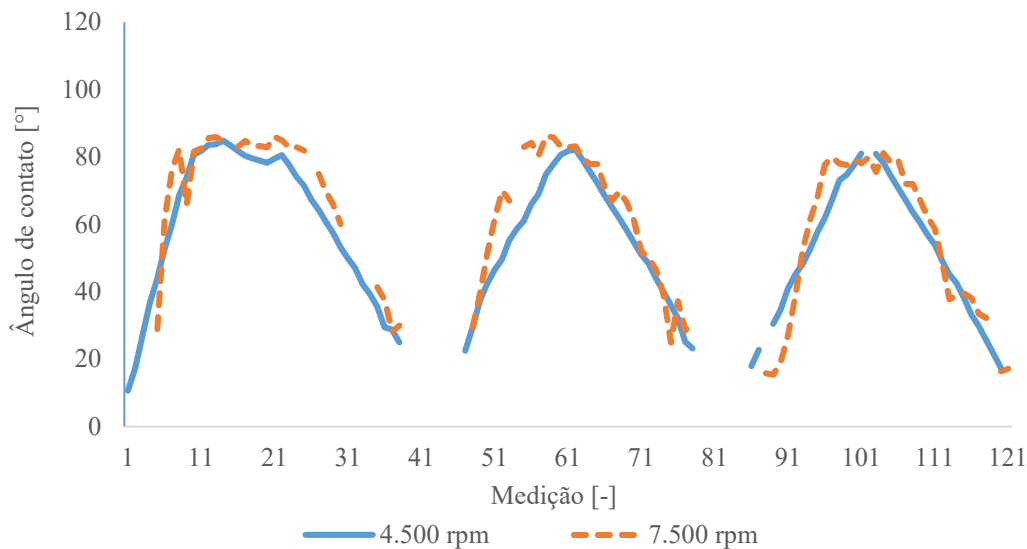
Por fim, analisando o ponto “8mm” do terceiro passe, ocorreu do o ângulo de contato está mais elevado na superfície fabricada com 4.500 RPM, do que na superfície da condição com 7.500 RPM. Esse fator pode ter ocorrido também pela influência da assimetria, pois mesmo com rugosidade média sendo superior na condição instável (7.500 RPM), a assimetria da superfície nesse ponto foi maior em relação aos demais, e isso pode ter influenciado no processo de espalhamento da gota sobre a superfície, pois a predominância de vales pode interferir no processo de espalhamento. Os demais pontos do terceiro passe apresentaram um comportamento mais padronizado, com ângulos de contato menores na condição estável em relação a instável.

Para maior compreensão da interação sólido-líquido, os ângulos de contato dinâmico foram avaliados com a finalidade de investigar melhor esses comportamentos.

5.2.3 Medição de ângulo de contato dinâmico das peças fresadas

Com os valores de ângulo de contato estáticos coletados, as amostras foram submetidas aos ensaios de ângulo de contato dinâmico. A partir dos experimentos foram obtidas as curvas apresentadas na Figura 46 a seguir:

Figura 46 - Ângulo de contato dinâmico de uma amostra de alumínio (Fresamento).



Fonte: Autor.

Com a apuração dos dados, os gráficos não apresentaram uma diferença significativa entre as superfícies de cada condição. Os ângulos de avanço das amostras fabricadas no sistema estável tiveram como média o valor de $80,74^\circ$ e as do sistema instável $85,04^\circ$. Esses resultados podem ter sido influenciados por algumas variáveis como o crescimento preferencial da gota para uma determinada direção, percebida durante os ensaios, dificultando o espalhamento uniforme desta sobre a superfície. Outra possibilidade seria a desuniformidade das características superficiais, sendo observada sempre uma variação do primeiro passe em relação aos outros dois. As investigações de ângulo de recuo também variaram de acordo com o sistema de estabilidade, sendo $27,6^\circ$ para o estável e $34,8^\circ$ para o instável, deixando a entender que o fluido terá mais aderência à superfície fabricada sob regime estável.

Partindo desses resultados, é possível definir que existe uma influência direta do sistema de usinagem aplicado e a estabilidade do sistema sobre os valores de rugosidade e ângulo de contato. Enquanto em todas as peças torneadas as superfícies do sistema estável possuem ângulos de contato maiores, nas amostras fresadas o comportamento foi semelhante em ambas as curvas. Outro ponto importante é que a assimetria (R_{sk}) impactou nos ângulos de contato, sendo possível ser notado devido a regiões como o ponto “8mm” do primeiro e terceiro passe não possuírem diferenças de rugosidade média expressivas, e mesmo assim esses pontos apresentaram ângulos de contato com maior variação, quando comparados seus sistemas de estabilidade.

De acordo com os dados analisados, observa-se que os parâmetros de rugosidade e molhabilidade apresentaram divergências mais acentuadas nas peças faceadas, uma vez que as amostras fabricadas sob regimes mais elevados exibiram valores significativamente distintos em relação àquelas usinadas com parâmetros mais brandos. No fresamento, essas variações foram menos expressivas, visto que foram analisadas peças do mesmo material sob uma velocidade de corte constante. Além disso, os resultados entre os passes evidenciaram regiões mais bem definidas sob a influência de vibrações autoexcitadas, diferentemente do observado nas peças faceadas.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram que o tipo de processo de usinagem e as condições de estabilidade do sistema exercem influência direta sobre as características superficiais e, conseqüentemente, sobre o comportamento de molhabilidade das superfícies produzidas. A presença de vibrações autoexcitadas promoveu alterações significativas nos parâmetros de rugosidade, refletindo-se principalmente nos ângulos de contato dinâmicos, com aumento da resistência ao espalhamento e ao desprendimento do fluido.

Nos processos de faceamento, observou-se tendência de aumento da rugosidade média em direção ao centro das peças, associada à redução da velocidade de corte, enquanto, nos processos de fresamento, as maiores variações ocorreram entre passes executados sob condição instável. Os resultados de rugosidade entre ambos obtiveram uma diferença expressiva, com as amostras de torneamento tendo valores de rugosidade média por volta de 11,81 enquanto as peças fresadas tiveram valores mais sutis, cerca de 2,62. Isso enfatiza que não somente o sistema de estabilidade, mas também o processo de fabricação sobre da superfície tem impacto direto nos valores de rugosidade.

De maneira geral, verificou-se que os parâmetros associados à distribuição do perfil superficial, especialmente a assimetria, apresentaram correlação com as variações de molhabilidade, indicando maior sensibilidade desse parâmetro à interação sólido-líquido. Em regiões específicas foi possível notar essa correlação, pois mesmo com rugosidades médias variadas, a predominância de picos e vales nesses pontos influenciaram diretamente nos resultados de ângulo de contato estático.

Além disso, os ângulos de contato dinâmico também foram norteadores sobre a influência do tipo de usinagem utilizado na superfície, pois em amostras faceadas as variações de ângulo e avanço e recuo foram muito mais expressivas quando comparadas as peças fresadas.

Dessa forma, o estudo evidencia que a indução de vibrações não apenas compromete a qualidade superficial, mas também modifica o comportamento das superfícies em condições de interação com fluidos, destacando seu potencial impacto em diversas aplicações, podendo tornar essas características, tidas como negativas, em superfícies que melhorem as condições térmicas, tribológicas e de transferência de calor.

Com o desenvolvimento da pesquisa, alguns pontos de análises foram avaliados e apontados como próximos passos para entender de forma mais específica a proposta da pesquisa. Com isso, para a continuidade deste estudo, o presente trabalho propõe:

- Obtenção de *DLE* com modelos que considerem mais graus de liberdade;
- Aplicação de análises estatísticas mais robustas para identificação dos parâmetros de maior influência;
- Avaliação do desempenho térmico das superfícies por meio de ensaios de ebulição em piscina, visando à determinação de parâmetros como coeficiente de transferência de calor e fluxo crítico de calor.

REFERÊNCIAS

ABEBE, Robsan; GOPAL, Mahesh. Exploring the effects of vibration on surface roughness during CNC face milling on aluminum 6061-T6 using sound chatter. *Materials Today: Proceedings*, v. 90, p. 43–49, 2023.

ABELLÁN-NEBOT, José V.; VILA PASTOR, Carlos; SILLER, Hector R. A review of the factors influencing surface roughness in machining and their impact on sustainability. *Sustainability*, v. 16, n. 5, p. 1917, 2024.

ALLRED, T. P., WEIBEL, J. A., & GARIMELLA, S. V. (2019). The petal effect of parahydrophobic surfaces offers low receding contact angles that promote effective boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 135, 403-412.

ALTINTAS, Yusuf. *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

ALZGHOUL, Mohammad; SARKA, Ferenc; SZABÓ, Ferenc János. Analytical and experimental techniques for chatter prediction, suppression and avoidance in turning: literature survey. *Design of Machines and Structures*, v. 12, n. 2, p. 33–43, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 4287: especificações geométricas do produto (GPS) – rugosidade: método do perfil – termos, definições e parâmetros de rugosidade*. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

BA, Elhadji Cheikh Talibouya. *Análise da influência do avanço e da velocidade de corte no processo de furação sobre os parâmetros de assimetria (R_{sk}) e curtose (R_{ku}) na caracterização superficial utilizando brocas de aço-rápido com e sem revestimento DLC (Diamond-Like Carbon)*. 2022.

CHAHAD, Gabriel. *Avaliação da influência de condições de usinagem em parâmetros de rugosidade e molhabilidade de superfícies metálicas para aplicações em ebulição nucleada*. 2026. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2026. No prelo.

DAMOUS, Mohamed et al. Prediction of chatter stability of thin-walled parts during high-speed milling considering a variation of dynamic characteristics based on surface roughness measurement. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 127, n. 11, p. 5729–5744, 2023.

DAGNALL, H. *Exploring surface texture: a fundamental guide to the measurement of surface finish*. 2. ed. Leicester: Rank Taylor Hobson, 1986.

DA SILVA, J. D.; MOREIRA, D. C.; RIBATSKI, G. An overview on the role of wettability and wickability as a tool for enhancing pool boiling heat transfer. *Advances in Heat Transfer*, v. 53, p. 187–248, 2021.

EMAMI, Mohsen; KARIMIPOUR, Atiyeh. Theoretical and experimental study of chatter vibration in wet and MQL machining conditions in turning process. *Precision Engineering*, v. 72, p. 41–58, 2021.

ERCETIN, Ali et al. Optimization of machining parameters to minimize cutting forces and surface roughness in micro-milling of Mg13Sn alloy. *Micromachines*, v. 14, n. 8, p. 1590, 2023.

FERRARESI, Dino. *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

GADELMAWLA, Elamir S. et al. Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 123, n. 1, p. 133–145, 2002.

GARAGNANI, Gian Luca et al. Influence of the machining process on the wear properties of self-mated structural steel in dry sliding conditions. *Metals*, v. 14, n. 6, p. 679, 2024.

HE, Wei et al. Development and application of superhydrophobic coatings with high thermal conductivity and self-healing properties: synergistically enhancing condensation heat transfer through surface modification. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 194, p. 108934, 2025.

INCROPERA, Frank P.; DE WITT, David P. *Fundamentos da transferência de calor e de massa*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

JIANG, Hantao et al. Experimental investigation of the effect of cylindrical array structure on heat transfer performance during nucleate boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 174, p. 121319, 2021.

JEANOPTIK. *Roughness measuring systems from Hommel Etamic: surface texture parameters in practice*. 2008. Disponível em: <https://www.jenoptik.com>. Acesso em: 12 set. 2025.

JONES, B. J.; MCHALE, J. P.; GARIMELLA, S. V. The influence of surface roughness on nucleate pool boiling heat transfer. 2009.

KANIZAWA, Fabio Toshio; RIBATSKI, Gherhardt. *Flow boiling and condensation in microscale channels*. Cham: Springer, 2021.

KATIYAR, Shivani et al. A short review on investigation and suppression of tool chatter in turning operation. *Materials Today: Proceedings*, v. 51, p. 1206–1210, 2022.

KHASKHOUSI, Amani et al. Investigation of the wettability properties of different textured lead/lead-free bronze coatings. *Lubricants*, v. 10, n. 5, p. 82, 2022.

LI, Denghui et al. Chatter suppression in diamond turning using magnetic field assistance. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 321, p. 118150, 2023.

LI, S., Tian, H., Zhu, X., Fan, Y., Nie, B., Wang, C., ... & Shao, J. (2025). Gecko-inspired self-sensing adhesive for intelligent adhesion. *Chemical Engineering Journal*, 168354.

LIANG, Gangtao et al. Nucleate boiling heat transfer and critical heat flux (CHF) from micro pit surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 152, p. 119510, 2020.

LIN, Yukai et al. Wetting dynamics and heat transfer of droplet evaporation around boiling point: facile manipulation by surface roughness. *Applied Thermal Engineering*, v. 258, p. 124851, 2025.

LIU, Bin et al. Enhanced nucleate pool boiling by coupling the pinning act and cluster bubble nucleation of micro-nano composited surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 157, p. 119979, 2020.

MEDINA, Santiago et al. Evaluation of machining parameters in turning Al7075-T6 aluminum alloy using dry, flooded, and cryogenic cutting fluid conditions. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, v. 9, n. 10, p. 328, 2025.

MOHAMMED, Tawfeeq W.; ABDULREHMAN, Mohammed A. A review on the utilization of phase change materials for space cooling purposes. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol: IOP Publishing, 2020. p. 012139.

MUNOA, J. et al. Chatter suppression techniques in metal cutting. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 65, n. 2, p. 785–808, 2016.

NAROOEI, K. Danesh; RAMLI, R. Optimal selection of cutting parameters for surface roughness in milling machining of AA6061-T6. *International Journal of Engineering*, v. 35, n. 6, p. 1170–1177, 2022.

PENYASHKI, Todor et al. Study of the influence of coating roughness on the properties and wear resistance of electrospark deposited Ti6Al4V titanium alloy. *Tribology in Industry*, v. 46, n. 1, p. 13, 2024.

PEREIRA, Adailton Gomes. *Aplicação do shunt piezoelétrico para controle passivo de chatter no processo de torneamento da liga Ti-6Al-4V ELI*. 2022. Dissertação (Mestrado).

QIN, Siyu et al. Review of enhancing boiling and condensation heat transfer: surface modification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 189, p. 113882, 2024.

QUINTANA, G.; CIURANA, J. Chatter in machining processes: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 51, n. 5, p. 363–376, 2011.

RAO, Singiresu S. *Vibrações mecânicas*. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

RR BAETEN, Stan et al. Characterization of shark skin properties and biomimetic replication. *Bioinspiration & Biomimetics*, v. 19, n. 5, p. 051002, 2024.

ROSA, Edson Bruno Lara. *Influência da geometria do inserto de fresamento sobre a integridade superficial de uma liga de titânio*. 2022. Trabalho acadêmico.

SANDVIK COROMANT. *Turning tools*. [S.l.]: Sandvik Coromant, 2015.

SAVELLA, Felipe Bertolotti. *Influência das condições dinâmicas de usinagem no torneamento sobre a integridade superficial de um aço endurecido*. 2021. Dissertação (Mestrado).

SHI, Lin et al. A study of interface evolution triggering different nucleate boiling heat transfer phenomena on structured surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 190, p. 122754, 2022.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 61, p. 27–47, 2012.

SONG, Jia-Wen; FAN, Li-Wu. Understanding the effects of surface roughness on the temperature and pressure relevancy of water contact angles. *Colloids and Surfaces A*, v. 656, p. 130391, 2023.

SONG, Zhao et al. Investigation of surface structure-wettability coupling on heat transfer and flow characteristics in nanochannels. *Applied Thermal Engineering*, v. 218, p. 119362, 2023.

TALIBOUYA BA, Elhadji Cheikh; MARTINS, Paulo Sérgio; DUMONT, Marcello Rosa. Statistical study of surface texture and chip formation during turning of AISI 1020 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 121, n. 11, p. 8257–8283, 2022.

THE HO, Quang Ngoc et al. Turning chatter detection using a multi-input convolutional neural network via image and sound signal. *Machines*, v. 11, n. 6, p. 644, 2023.

THOMSON, William T. *Teoria da vibração com aplicações*. Rio de Janeiro: Interciência, 1978.

TOTIS, Giovanni. Breakthrough of regenerative chatter modeling in milling by including unexpected effects arising from tooling system deflection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 89, n. 9, p. 2515–2534, 2017.

TRENT, Edward M.; WRIGHT, Paul K. *Metal cutting*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

UNNO, Noriyuki et al. Boiling heat transfer enhancement by self-excited vibration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 153, p. 119588, 2020.

XIE, Shangzhen et al. Review of critical-heat-flux enhancement methods. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 122, p. 275–289, 2018.


WANG, Jianjian et al. Modulated vibration texturing of hierarchical microchannels with controllable profiles and orientations. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 30, p. 58–67, 2020.

WANG, Pan et al. Effect of nanoscale surface roughness on sliding friction and wear in mixed lubrication. *Wear*, v. 530, p. 204995, 2023.

WU, Zhijing et al. Lotus leaf-inspired superhydrophobic piezoelectric nanofiber films for moisture-proof pressure sensing and energy harvesting. *Chemical Engineering Journal*, v. 504, p. 158874, 2025.

WOOD, Michael J. et al. Introducing a graphical user interface for dynamic contact angle determination. *Physics of Fluids*, v. 35, n. 7, 2023.

ANEXO A – Certificado de qualidade dos materiais.

SHOCK METAIS NAO FERROSOS LTDA 55-11-20651611				
				
CERTIFICADO DE QUALIDADE - 000398117-01/030575.000002553.0014				
Produto:	AVQ53030000190500000K - AL VERG QUAD 6351 T6 19,05MM			
Cliente:	002157417/0001 - ABENETO COMERCIAL DE METAIS LTDA			
Nota Fiscal:	000398117			
Data de emissão:	15/07/2024			
Lote:	030575.000002553.0014			
Tamanho do lote:	59,00 KG			
Número do pedido:	291220			
Pedido do cliente:	01			
PROPRIEDADES MECANICAS				
Ensaio	Unid.Medida	Lim.Minimo	Lim.Máximo	Encontrado
Alongamento	%	8,000	>>>>	11,070
Limite Escoamento	MPa	255,000	>>>>	291,160
Limite Resistencia	MPa	290,000	>>>>	315,200
PROPRIEDADES QUIMICAS				
Ensaio	Unid.Medida	Lim.Minimo	Lim.Máximo	Encontrado
Al				RESTANTE
Cu	%	<<<<	0,100	0,060
Fe	%	<<<<	0,500	0,270
Mg	%	0,400	0,800	0,760
Mn	%	0,400	0,800	0,460
Si	%	0,700	1,300	1,040
Ti	%	<<<<	0,200	0,020
Zn	%	<<<<	0,200	0,010
Laudo:	APROVADO SEM RESTRICOES ***			
Data do laudo:	10/07/2024			
Emitido por:	E.D.J			
Impresso por:	rafael.silva			
Data:	15/07/2024			



RNR Usinagem EIRELI - EPP

Endereço: RUA DAS TAQUARAS 342
Telefone: 56716731
CNPJ: 24.281.696/0001-30
Email: rnrusinagem@gmail.com

CEP: 04370-060 - SAO PAULO - SP
Fax:
I.E. Nr. 140.572.274.117
Site:

CERTIFICADO DE QUALIDADE Nº 3117

Cliente: ABENETO COMERCIAL DE METAIS LTDA

Nº do Pedido: 0000021503

Nota Fiscal: 001437

Emissão: 27/03/2023

MATERIAL

Código	Quantidade	UN	Descrição	Especificação Nº de Corrida Nº Cert. de Origem	Norma / Liga	Ano de Revisão
CLA09	19,000	Kg	VERGALHAO LATAO QOAO 3/4	003199/2023	CLA 360	2023

ANÁLISE QUÍMICA

C %	Mn %	P %	S %	Si %	Cr %	Ni %	Mo %	Al %	Fe %	Cu %	Mg %	Zn %	Ti %	V %	Pb %	Outros 2	Outros 3	Outros 4
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,13200	61,32600	0,00000	35,69300	0,00000	0,00000	2,45900	0,00000	0,00000	0,00000

ENSAIOS / TESTES - PROPRIEDADES MECANICAS E AFINS

Limite de Escoamento 36,000 kgf/mm²	Limite de Resistência 47,200 kgf/mm²	Alongamento % 22,000 %	Estricção %	Dureza 70,000 HRB	Achatamento	Dobramento	Flangeamento	Teste de Hidrostático	Teste de Pneumático	Eddy Current	Acabamento	Tratamento Térmico

Observações:

Ce certificados originais encontram-se em nosso poder à sua disposição.
Certificamos que o material supra está aprovado, de acordo com as especificações acima mencionadas.

Data: 27/03/2023

Controle de Qualidade: 
RNR USINAGEM EIRELI - EPP



Certificado de Qualidade Quality Certificate



1059054/2023

Cliente (Customer): ABENETO COMERCIAL DE METAIS LTDA.

Nota Fiscal (Invoice): 523707

Pedido Cliente (Customer order): EMAIL

Pedido(Order): 990172

Data (Date): 24/01/2023

Material (Product)

Descricao (Description): Barra Quadrada 304 - 19,05 mm (3/4") (BR 21/02391/1)-(1 pcs) Num. Rast. BR 21/02391/1
Corrida (Heat): 61950 Placa/O.P.: Norma (Standard): ASTM A276/A276M 17
Peso (Weight): 17,00 KG
Observacao (Observation): TREFILADO A FRIO / RECOZIDO / SOLUBILIZADO 1050°C

Analise Quimica (Chemical Composition)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Ti	P
0,022	0,260	1,5	18,3	8,02	0,33	0,0730		0,037
S	Cu	Al	N2	Nb	Co			
0,024	0,75				0,17			

Analise Mecanica (Mechanical Properties)

Limite de Escoamento (Yield Stress): 0,2% 644 MPa
Resistencia a Tracao (Strizione): 758 MPa
Reduc. Area Minima (Reduction of Area): 64 %
Alongamento (Elongation): 36 % Estricção (Stricture):
Tam. do Grao (Grain Size): Dureza (Toughness): 225HBW

Cadastro certificado:
LIZETE DIAS

Material (Product)

Descricao (Description): Barra Quadrada 304 - 15,87 mm (5/8") (BR 22/00148/1)-(2 pcs) Num. Rast. BR 22/00148/1
Corrida (Heat): A2297 Placa/O.P.: Norma (Standard): ASTM A276/A276M 17
Peso (Weight): 24,00 KG
Observacao (Observation): TREFILADO A FRIO / POLIDO

Analise Quimica (Chemical Composition)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Ti	P
0,072	0,410	1,12	18,15	8,03				0,037
S	Cu	Al	N2	Nb				
0,019								

Analise Mecanica (Mechanical Properties)

Limite de Escoamento (Yield Stress): 0,2% 699 MPa
Resistencia a Tracao (Strizione): 782 MPa
Reduc. Area Minima (Reduction of Area): 67 %
Alongamento (Elongation): 32 % Estricção (Stricture):
Tam. do Grao (Grain Size): Dureza (Toughness): 231HBW

Cadastro certificado:
LIZETE DIAS