

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES MEIOS LUBRIRREFRIGERANTES NA RUGOSIDADE  
GERADA POR FRESAMENTO EM AMOSTRAS FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA  
METÁLICA EM AÇO MARAGING C300

por

Franciele Juliana Rebelo

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 14 de agosto de 2023

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES MEIOS LUBRIRREFRIGERANTES NA RUGOSIDADE  
GERADA POR FRESAMENTO EM AMOSTRAS FABRICADAS POR MANUFATURA  
ADITIVA METÁLICA EM AÇO MARAGING C300

por

Franciele Juliana Rebelo  
Engenheira Mecânica

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Aprovada por:

Prof. Dr. Arnaldo Rubén Gonzalez ..... PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Carlos Schuch Bork ..... IFSUL

Prof. Dr. Durval João De Barba Júnior ..... IFSUL

Prof. Dr. Milton Luiz Polli ..... DAMEC/UTFPR

Prof. Dr. Felipe Roman Centeno  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 14 de agosto de 2023

*“Ninguém ignora tudo.  
Ninguém sabe tudo.  
Todos nós sabemos alguma coisa.  
Todos nós ignoramos alguma coisa.  
Por isso aprendemos sempre.”*

*Paulo Freire*

## AGRADECIMENTOS

A todos que ajudaram, direta e indiretamente, na trajetória de mais uma etapa que se completa em minha vida.

Ao professor orientador Dr. André João de Souza pela compreensão, apoio, dedicação e ensinamentos.

Aos membros da banca de avaliação deste trabalho pelas considerações construtivas.

A todos os colegas do Instituto SENAI de Inovação em Soluções Integradas em Metalmeccânica, em particular ao Dr. Victor Gomes e ao Dr. Vitor Nardelli pelas contribuições, apoio e pela compreensão em permitir a utilização de recursos da unidade e me proporcionar a flexibilidade de horários para me dedicar ao Mestrado.

À minha mãe, Carmen Silvia Ferreira, que é a base de tudo e minha referência como pessoa, agradeço imensamente pelo apoio em todos os momentos de minha vida.

À UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) e ao PROMEC (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica), pela oportunidade de realizar este trabalho.

## RESUMO

Os sistemas de manufatura aditiva metálica (MAM) vêm ganhando destaque nos últimos anos pela possibilidade de produzir peças metálicas com geometrias complexas, as quais não poderiam ser fabricadas por processos de usinagem convencional. Por outro lado, percebe-se uma lacuna no estado da arte em analisar o acabamento superficial em amostras de aço maraging fabricadas pelo método SLM (*Selective Laser Melting*), após o processo de fresamento, com diferentes meios lubrificadorrefrigerantes. Entende-se que, devido à aplicabilidade deste material, uma boa qualidade superficial é essencial, e a escolha do lubrificadorrefrigerante pode afetá-la diretamente. Com isso, o trabalho visa comparar o desempenho de diferentes meios lubrificadorrefrigerantes aplicados ao processo de fresamento tangencial e frontal em amostras de aço maraging C300 fabricadas por SLM. Para esse propósito, o fresamento foi executado a seco, com fluido de corte em abundância, aplicando mínima quantidade de lubrificante (MQL) e usando ar comprimido refrigerado a 0 °C, mantendo os parâmetros de corte constantes. A intenção é descobrir se as técnicas ambientalmente amigáveis podem ou não substituir a aplicação do fluido em abundância na geração do acabamento da superfície usinada. A textura da superfície foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura e a medição da rugosidade por um perfilômetro, observando os parâmetros Ra, Rz e Rt. Foram avaliadas as composições químicas por espectroscopia de energia dispersiva de raios-X e as possíveis alterações de microdureza também foram mensuradas após o processo de usinagem. Os resultados mostraram que o fresamento tangencial concordante com aplicação de fluido de corte em abundância é a melhor condição para o acabamento das peças em aço maraging C300 fabricadas por SLM ( $Ra \leq 0,62 \mu\text{m}$ ,  $Rz \leq 3,2 \mu\text{m}$  e  $Rt \leq 4,9 \mu\text{m}$ ). Porém, o fresamento frontal com MQL também resultou em amostras com rugosidade baixa ( $Ra \leq 0,81 \mu\text{m}$ ,  $Rz \leq 3,6 \mu\text{m}$  e  $Rt \leq 5,1 \mu\text{m}$ ). Assim, dependendo da aplicação técnica do componente, a diferença encontrada nos valores de rugosidade pode ser irrelevante. No entanto, sob o ponto de vista ambiental, a aplicação de MQL torna-se mais pertinente. Observou-se também que os valores de microdureza mais elevados produzidos após o fresamento (aumento de aproximadamente 15%) correspondem aos casos de melhor acabamento, mostrando que há uma correlação entre menor rugosidade e maior microdureza geradas nas superfícies das amostras fabricadas por SLM.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva metálica; Aço maraging C300; Fresamento tangencial e frontal; Meios lubrificadorrefrigerantes; Acabamento da superfície.

## ABSTRACT

Metal additive manufacturing (MAM) systems have gained prominence in recent years due to the possibility of producing metallic parts with complex geometries, which could not be manufactured by conventional machining processes. On the other hand, there is a gap in the state-of-the-art in analyzing the surface finish on maraging steel samples manufactured using the SLM (Selective Laser Melting) method after the milling process, with different lubricooling conditions. It is understood that, due to the applicability of this material, a good surface finish is essential, and the choice of lubricoolant can directly affect it. Thus, the work aims to compare the performance of different lubricooling conditions applied to the peripheral and face milling process on C300 maraging steel samples manufactured by SLM. For this purpose, milling was performed in dry cutting, in flood machining, with minimum quantity lubrication (MQL), and using compressed air cooled at 0 °C, keeping constant the cutting parameters. The intention is to detect whether environmentally friendly techniques can or cannot replace the application of abundant cutting fluid in achieving the machined surface finish. Surface texture was assessed through scanning electron microscopy and surface roughness measurement through a profilometer, observing the parameters Ra, Rz, and Rt. The chemical compositions were evaluated by energy-dispersive X-ray spectroscopy, and the possible changes in microhardness were also measured after the machining process. The results showed that peripheral down-milling with abundant cutting fluid is the best condition for finishing parts in maraging steel C300 manufactured by SLM ( $R_a \leq 0,62 \mu\text{m}$ ,  $R_z \leq 3,2 \mu\text{m}$  and  $R_t \leq 4,9 \mu\text{m}$ ). However, face milling with MQL also resulted in samples with low roughness ( $R_a \leq 0,81 \mu\text{m}$ ,  $R_z \leq 3,6 \mu\text{m}$  and  $R_t \leq 5,1 \mu\text{m}$ ). Therefore, depending on the component's technical application, the difference in the roughness values may be irrelevant. Nevertheless, from an environmental perspective, MQL application becomes more pertinent. It was also observed that the highest microhardness values produced after milling (an increase of around 15%) correspond to cases with better finishing, showing a correlation between lower roughness and higher microhardness generated on the surfaces of samples manufactured by SLM.

**Keywords:** Metallic additive manufacturing; C300 maraging steel; Peripheral and face milling; Lubricooling conditions; Surface finish.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos.....	5
1.2	Motivação.....	5
1.3	Organização do Trabalho .....	6
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	7
2.1	Manufatura Aditiva Metálica .....	7
2.2	Processo de Fresamento .....	10
2.3	Acabamento da Superfície Usinada.....	13
2.3.1	Textura.....	14
2.3.2	Integridade.....	17
2.4	Meios Lubrificadores.....	19
2.4.1	Fluido de corte em abundância.....	21
2.4.2	MQL .....	22
2.4.3	Ar comprimido refrigerado.....	24
2.4.4	Usinagem a seco .....	25
2.4.5	Efeito da lubrificação nas características de usinabilidade por fresamento .....	26
2.5	Considerações Finais do Capítulo 2 .....	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1	Aço Maraging C300 .....	28
3.2	Experimentação .....	29
3.3	Imagem da Textura.....	30
3.4	Medição de Rugosidade .....	31
3.5	Medição de Microdureza.....	32
3.6	Considerações Finais do Capítulo 3 .....	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
4.1	Amostras Fabricadas por MAM.....	33
4.2	Superfícies Produzidas por Fresamento Tangencial.....	36

4.2.1	Rugosidades das superfícies usinadas .....	36
4.2.2	Imagens de textura.....	39
4.2.3	Verificação da alteração de microdureza .....	42
4.3	Superfícies Geradas por Fresamento Frontal .....	43
4.3.1	Rugosidades das superfícies usinadas .....	44
4.3.2	Imagens de textura.....	45
4.3.3	Verificação da alteração de microdureza .....	47
4.4	Considerações Finais do Capítulo 4 .....	48
5	CONCLUSÕES .....	49
5.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	50
6	Referências .....	51
APÊNDICE A – Medições de Rugosidade .....		61
APÊNDICE B – Medições de Microdureza.....		66
APÊNDICE C – Imagens das Texturas via MEV .....		69
APÊNDICE D – Análise EDS das Texturas .....		81



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Panorama das tecnologias aplicadas em MAM [Adaptado de Ampower, 2023]....	1
Figura 1.2	Diferentes métodos de usinagem ambientalmente conscientes [Swain et al., 2022]. .....	4
Figura 1.3	Relação de publicações sobre o tema do trabalho. ....	5
Figura 2.1	(a) Esquema do processo de feixe de laser em pó metálico (SLS, SLM, DMLS); (b) Parâmetros do processamento em leito de pó [Adaptado de Siddiqui et al., 2017].	8
Figura 2.2	Feixe de laser e superfície gerada por deposição de camadas [Rabelo, 2016]. ....	8
Figura 2.3	MAM: (a) superfície gerada por deposição de camadas [Gibson et al., 2021]; (b) comparativo do arquivo STL com a peça pronta [Araújo, 2018]. ....	9
Figura 2.4	Fresamento tangencial [Adaptado de Jasinevicius, 2022]. ....	11
Figura 2.5	Tipos de fresamento tangencial: (a) concordante; (b) discordante [Sandvik, 2022]. .....	11
Figura 2.6	Fresamento Frontal [Adaptado de Jasinevicius, 2022]. ....	12
Figura 2.7	Tipos de fresamento frontal (a) Simétrico de rasgo (b) Simétrico comum de facear (d) Assimétrico com toda a superfície sendo usinada (d) Assimétrico [Almeida, 2019]. ....	12
Figura 2.8	Representação esquemática da superfície de um metal [Astakhov, 2010]. ....	13
Figura 2.9	Fatores que afetam a rugosidade da superfície [Adaptado de Bajić et al., 2012].	15
Figura 2.10	Representação gráfica do parâmetro Ra [Piratelli Filho, 2011]. ....	16
Figura 2.11	Representação gráfica do parâmetro Rt [Piratelli Filho, 2011]. ....	16
Figura 2.12	Representação gráfica do parâmetro Rz [Piratelli Filho, 2011]. ....	17
Figura 2.13	Deformação plástica na usinagem [Astakhov, 2010]. ....	18
Figura 2.14	Classificação dos meios lubrificantes [Adaptado de Sharma et al., 2016].	19
Figura 2.15	Custo dos sistemas de lubrificação na usinagem em função da sustentabilidade [Adaptado de Benedicto et al., 2017]. ....	21
Figura 2.16	Rugosidade em diferentes materiais de ferramenta sob resfriamento convencional (CC) e técnica MQL [Sharma et al., 2016]. ....	23
Figura 2.17	Consumo de energia: (a) fluido em abundância b) MQL [Najiha et al., 2016]. ....	24
Figura 2.18	Representação esquemática do princípio de funcionamento do tubo de vórtice [Adaptado de Jozić et al., 2015]. ....	25
Figura 2.19	Impacto positivo do corte a seco [Adaptado de Khanna et al., 2022b]. ....	26

Figura 3.1	Sistema experimental.....	28
Figura 3.2	Peça removida da plataforma de impressão. ....	29
Figura 3.3	Montagem dos testes: (a) com ar resfriado a 0 °C; (b) com aplicação de MQL e fluido de corte em abundância.....	30
Figura 3.4	Microscópio eletrônico de varredura: (a) MEV JEOL JSM-6010 LA ( <a href="https://forbones.org/jeol-sem">https://forbones.org/jeol-sem</a> ); (b) amostra posicionada no sistema de fixação. .	30
Figura 3.5	Medição da rugosidade da superfície usinada por fresamento: (a) distribuição dos cinco pontos de medição e o sentido de deslocamento do apalpador; (b) indicação dos sentidos de medição A e B.....	31
Figura 4.1	Imagens MEV da textura da amostra fabricada por MAM. ....	34
Figura 4.2	Análise EDS da amostra fabricada por MAM.....	36
Figura 4.3	Resultado da medição de rugosidade Ra, Rz e Rt para as diferentes condições analisadas no fresamento tangencial. As barras de erros representam o desvio-padrão. ....	37
Figura 4.4	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento concordante aplicando: (a) fluido de corte em abundância; (b) MQL. ....	40
Figura 4.5	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento a seco concordante. ....	40
Figura 4.6	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento discordante aplicando ar refrigerado a 0 °C. ....	41
Figura 4.7	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento a seco discordante. ....	41
Figura 4.8	Variações na composição química das amostras antes e após o fresamento tangencial.....	42
Figura 4.9	Gráfico dos resultados da medição de microdureza para as diferentes condições de operação no fresamento tangencial.....	43
Figura 4.10	Resultado da medição de rugosidade Ra, Rz e Rt para as diferentes condições lubrificantes no fresamento frontal. As barras de erros representam o desvio-padrão. ....	44
Figura 4.11	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento frontal com: (a) MQL; (b) fluido de corte em abundância. ....	45
Figura 4.12	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento frontal: (a) a seco; (b) com ar refrigerado a 0 °C .....	46
Figura 4.13	Variações na composição química das amostras antes e após o fresamento frontal. ....	47

Figura 4.14	Gráfico dos resultados da medição de microdureza para as diferentes condições lubrificantes no fresamento frontal.....	47
Figura C.1	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento concordante a seco .....	69
Figura C.2	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento concordante com MQL .....	70
Figura C.3	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento concordante com ar refrigerado .....	71
Figura C.4	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento concordante com fluido de corte em abundância .....	72
Figura C.5	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento discordante a seco .....	73
Figura C.6	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento discordante com MQL .....	74
Figura C.7	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento discordante com ar refrigerado .....	75
Figura C.8	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento discordante com fluido de corte em abundância .....	76
Figura C.9	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento frontal a seco .....	77
Figura C.10	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento frontal com MQL .....	78
Figura C.11	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento frontal com ar refrigerado ...	79
Figura C.12	Imagens MEV das texturas geradas por fresamento frontal com fluido de corte em abundância .....	80
Figura D.1	Análise EDS da amostra usinada por fresamento concordante a seco. ....	81
Figura D.2	Análise EDS da amostra usinada por fresamento concordante com MQL. ....	81
Figura D.3	Análise EDS da amostra usinada por fresamento concordante com ar refrigerado. ....	81
Figura D.4	Análise EDS da amostra usinada por fresamento concordante com fluido de corte em abundância. ....	82
Figura D.5	Análise EDS da amostra usinada por fresamento discordante a seco. ....	82
Figura D.6	Análise EDS da amostra usinada por fresamento discordante com MQL.....	82
Figura D.7	Análise EDS da amostra usinada por fresamento discordante com ar refrigerado. ....	83
Figura D.8	Análise EDS da amostra usinada por fresamento discordante com fluido de corte em abundância. ....	83
Figura D.9	Análise EDS da amostra usinada por fresamento frontal a seco. ....	83
Figura D.10	Análise EDS da amostra usinada por fresamento frontal com MQL. ....	84

Figura D.11	Análise EDS da amostra usinada por fresamento frontal com ar refrigerado. ....	84
Figura D.12	Análise EDS da amostra usinada por fresamento frontal com fluido de corte em abundância. ....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Composição do aço maraging C300 (% massa) [Ben-Artzy et al., 2021].....	28
Tabela 4.1	Valores de rugosidade das amostras fabricadas por MAM .....	33
Tabela 4.2	Valores de rugosidade das amostras produzidas por fresamento tangencial.....	37
Tabela 4.3	Valores de rugosidade das amostras produzidas por fresamento frontal.....	44
Tabela A.1	Medições de rugosidade em amostras submetidas ao fresamento tangencial .....	61
Tabela A.2	Medições de rugosidade em amostras submetidas ao fresamento frontal .....	64
Tabela B.1	Medições de microdureza em amostras submetidas ao fresamento tangencial.....	66
Tabela B.2	Medições de microdureza em amostras submetidas ao fresamento frontal.....	68

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
MA	Manufatura Aditiva
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BJT	<i>Binder Jetting</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
DED	<i>Direct Energy Deposition</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
GL	Graus de Liberdade
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MAM	Manufatura Aditiva Metálica
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificação
NBR	Norma Técnica Brasileira
NIOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>
NT	Não Tratadas
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>
PT	Parcialmente Tratadas
QM (Aj.)	Quadrados Médios Ajustados
SHL	<i>Sheet Lamination</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SQ (Aj.)	Soma de Quadrados Total Ajustado
STA	Tratamento de Solução e Envelhecimento
STL	<i>Standard Triangle Language ou Standard Tessellation Language</i>
TT	Tratadas Totalmente
WC-Co	Carboneto de Tungstênio + Cobalto (metal-duro)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_p$	Profundidade de corte [mm]
$a_e$	Penetração de trabalho [mm]
$f_z$	Avanço por dente [mm/dente]
Ra	Rugosidade média [ $\mu\text{m}$ ]
Rz	Rugosidade média parcial [ $\mu\text{m}$ ]
Rt	Rugosidade total [ $\mu\text{m}$ ]
$l_e$	Comprimento de amostragem [mm]
$l_m$	Comprimento de medição ou avaliação [mm]
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação
Valor F	Compara a variabilidade entre os grupos com a variabilidade dentro dos grupos
Valor-p	Probabilidade de significância
$v_c$	Velocidade de corte [m/min]

# 1 INTRODUÇÃO

A indústria tem buscado alternativas para melhorar seus processos produtivos, principalmente em relação à redução de custo. Além disso, a evolução tecnológica dos produtos tem gerado uma permanente redução das tolerâncias geométricas, acompanhada por uma diminuição da variabilidade nos desvios das peças fabricadas, bem como pela redução da incerteza com que pode ser realizada as medições [Spíndola Filho, 2020]. Com isso, a manufatura aditiva metálica (MAM) tem-se mostrado uma solução para o desenvolvimento de produtos com geometrias mais complexas, as quais não poderiam ser fabricadas por processos de usinagem convencionais, possibilitando assim novos modelos de negócio [Horst et al., 2018; Lindemann et al., 2012]. A MAM permite trabalhar com vários tipos de materiais (dentre eles, o aço maraging), dispensa pós-processamento e pós-cura, não necessita de estrutura de suporte e possibilita a fabricação de várias peças simultaneamente, maximizando o volume de trabalho [Gomes e Wiltgen, 2020]. Além disso, ainda é possível trabalhar com pó ou fio metálico, e a fonte de energia pode vir de laser ou feixe de elétrons [Harris, 2017]. Atualmente há diversas tecnologias disponíveis para manufatura aditiva metálica. A Figura 1.1 apresentada as principais tecnologias mapeadas [Ampower, 2023].

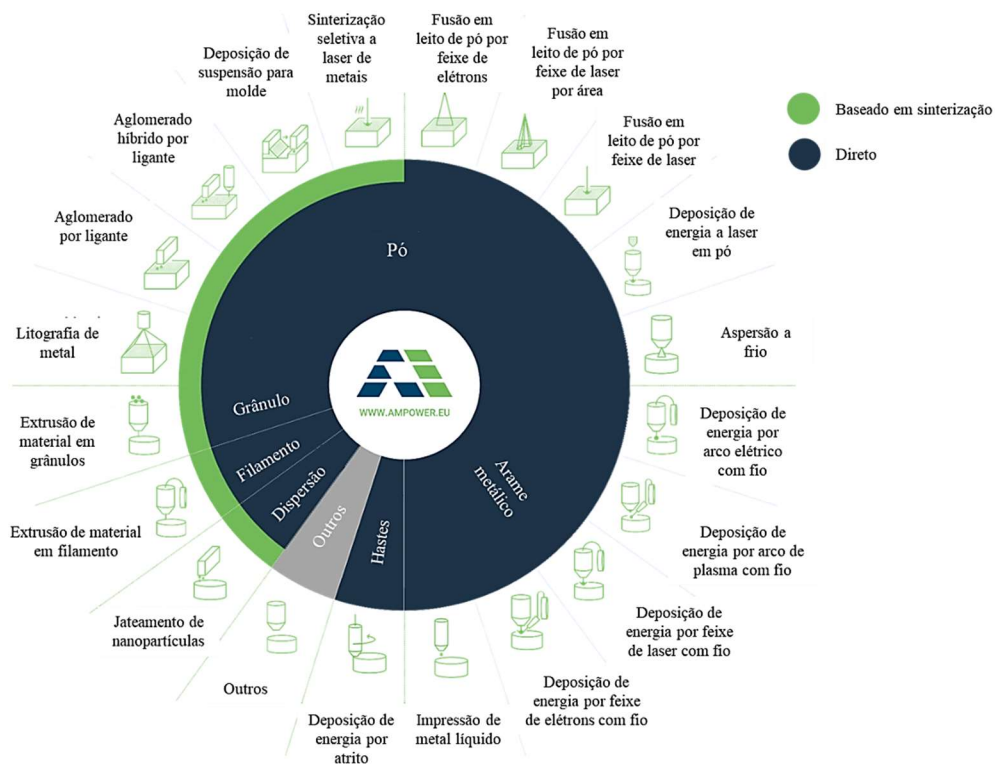


Figura 1.1 – Panorama das tecnologias aplicadas em MAM [Adaptado de Ampower, 2023].



O aço maraging é um aço martensítico (liga a base de Fe-Ni) que apresenta boas propriedades mecânicas, tais como alta resistência ao escoamento, alta ductilidade, alta tenacidade à fratura, boa temperabilidade, boa resistência a corrosão e boa soldabilidade quando comparado com aços convencionais de alta resistência [Floreen, 1968; Fortunato et al., 2018; Guo et al., 2022; Kempen et al., 2011]. A martensita não é causada por um alto teor de carbono, comumente encontrada em outros aços ferramenta, mas sim por uma alta concentração de níquel [Azizi et al., 2019; Solberg et al., 2021], o que reduz sua usinabilidade. Os aços maraging da classe com 18% em peso de Ni mais comuns são C200, C250, C300 e C350, onde a designação numérica representa o limite de escoamento (em ksi) [Moshka et al., 2015]. As principais aplicações deste aço são nas áreas automobilística, aeroespacial, aeronáutica, militar, naval, biomédica, odontológica e na fabricação de moldes e matrizes [Ahmadkhaniha et al., 2021; Azizi et al., 2019; Casalino et al., 2015; Floreen, 1968; Guo et al., 2022; Kempen et al., 2011; Solberg et al., 2021; Van Swan et al., 1974; Varghese et al., 2019c]. Como a MAM é efetivamente um processo de microsoldagem de alta velocidade, são as propriedades favoráveis de soldabilidade do aço maraging que incentivam a sua indicação-para este processo [Azizi et al., 2019].

Contudo, muitas das tecnologias de MAM ainda precisam de ajustes para se conseguir fabricar uma peça dentro dos limites de tolerância aceitáveis, em casos que exigem, por exemplo, precisão dimensional e/ou geométrica [Spíndola Filho, 2020], principalmente quando se faz necessário montar um conjunto mecânico para uma função específica, chamado também de intercambialidade de peças.

De acordo com Wang et al., 2023, a baixa qualidade superficial é uma das desvantagens do processo de MAM e, por vezes, pode limitar a sua aplicação. Segundo Wüst et al., 2020, geralmente as peças fabricadas por meio da MAM têm uma qualidade de superfície insatisfatória devido à alta rugosidade. Beard et al., 2023, mencionam que, normalmente, os componentes fabricados por MAM, que são destinados para aplicações complexas, requerem uma rugosidade superficial média ( $R_a$ ) inferior a  $1 \mu\text{m}$ . Alguns pesquisadores [Alrbaey et al., 2014; Tian et al., 2017; Yang et al., 2019] tentaram otimizar os parâmetros do processo para melhorar a qualidade da superfície. No entanto, alcançaram valores de  $R_a$  superiores a  $1 \mu\text{m}$ , o que limita o uso de tais componentes para aplicação posterior na indústria. Desta forma, o pós-processamento subtrativo, por processos de usinagem como fresamento ou polimento, acaba sendo necessário para atender aos requisitos desejados [Bai et al., 2021]. Contudo, esta etapa de trabalho adicional envolve mais esforço, disponibilidade de equipamento e custo. Além disso, a alta dureza, combinada com boa resistência, torna o aço maraging um material difícil de usinar [Fortunato et al., 2018]. Por isso, os

processos de usinagem precisam ser constantemente aprimorados para que se possa obter um produto com alta qualidade e custo aceitável.

Uma das formas de aperfeiçoar a usinagem e melhorar o acabamento superficial das peças é pela escolha de um método de lubrificação adequado. Este envolve a técnica de aplicação e o tipo fluido utilizado. Sabe-se que o fluido de corte tem como principais funções a redução da temperatura (ação refrigerante) nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, a redução do atrito (ação lubrificante) nestas interfaces, e a expulsão do cavaco da zona de corte. Isso proporciona aumento na vida da ferramenta e melhoria na qualidade da superfície usinada. No entanto, os fluidos convencionais à base de óleo mineral não são ambientalmente amigáveis [Debnath et al., 2014; Fratila, 2013]. De acordo com o estudo realizado por Khanna et al., 2022a, esses fluidos estão sendo usados de forma descontrolada no mundo. Estima-se que cerca de mais de 13 milhões de toneladas foram consumidos em 2016, com previsão de aumento de 1% ao ano. Um uso tão grande cria um impacto adverso no meio ambiente se não for descartado adequadamente. Os autores mencionam ainda que os custos com aquisição, armazenamento, utilização e descarte destes fluidos compõem de 7 a 17% do custo total na fabricação da peça. Além disso, elementos químicos adicionados para melhorar suas propriedades tribológicas, principalmente cloro e enxofre, são prejudiciais à saúde do operador (representam 80% do total de doenças ocupacionais relacionadas à pele) e ao meio ambiente.

Consequentemente, os fatores ambientais associados à fabricação tornam-se um aspecto problemático emergente em todos os processos de fabricação devido ao crescimento de regulamentações cada vez mais rígidas sobre resíduos, efluentes, emissões, saúde e segurança dos trabalhadores. Além disso, cada vez mais os processos de usinagem estão mais modernos e exigem redução dos custos de produção e produtos com alta qualidade. Com isso, para manter a competitividade, faz-se necessário ir ao encontro de novas oportunidades para melhorar os processos de usinagem, sem diminuir a qualidade do produto [Fratila, 2009].

Com o objetivo de buscar alternativas para eliminar, minimizar ou substituir o uso de fluidos de corte em abundância, pesquisadores e fabricantes têm concentrado suas pesquisas em estratégias alternativas de lubrificação, amigáveis ao meio ambiente (Figura 1.2). As principais técnicas que podem ser citadas são o corte a seco, a mínima quantidade de lubrificação (MQL) e a utilização de ar resfriado ou criogenia [Debnath et al., 2014; Fratila, 2013].

Os principais benefícios associados à usinagem a seco estão relacionados ao fator ambiental, pois caracteriza uma fabricação mais limpa, não gera contaminação e resíduos nocivos ao ambiente e à saúde dos operadores. Contudo, o corte a seco está associado à geração de altas

temperaturas, que reduzem a dureza a quente da ferramenta, estimulando as falhas na mesma e reduzindo sua vida. As falhas ainda prejudicam o acabamento da superfície usinada. Tais obstáculos podem ser superados utilizando uma ferramenta com alta resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito e/ou aplicando mínima quantidade de lubrificação (MQL) [Debnath et al., 2014; Goindi e Sarkar, 2017].

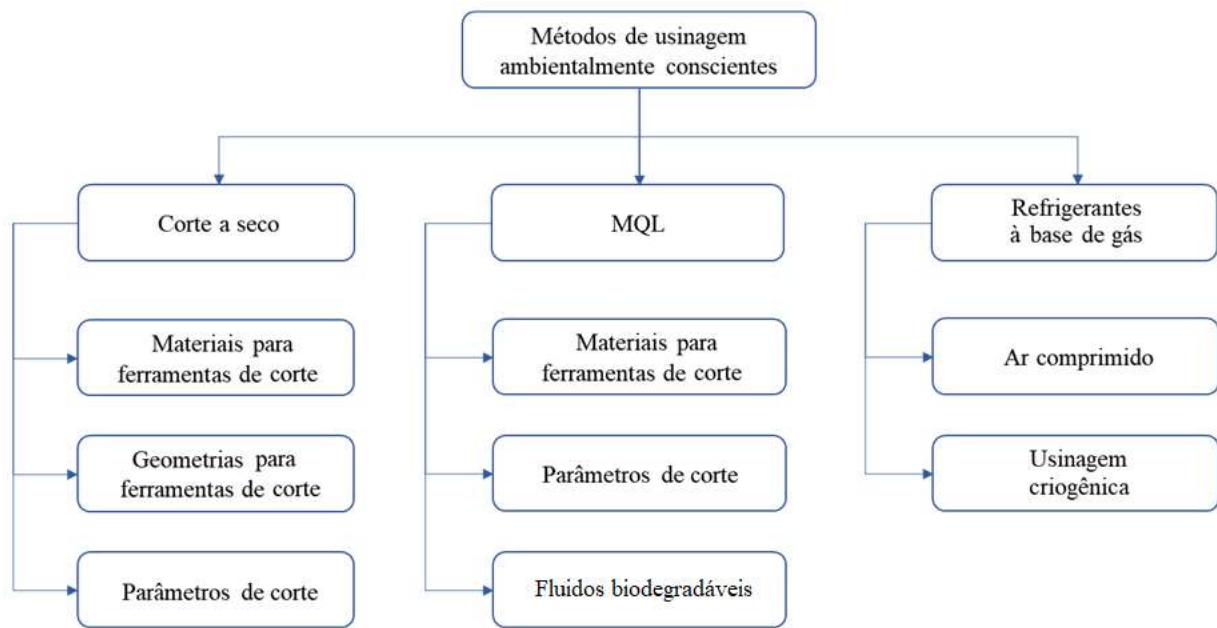


Figura 1.2 – Diferentes métodos de usinagem ambientalmente conscientes [Swain et al., 2022].

A técnica MQL se caracteriza pela aplicação de pequenas gotas de óleo direcionadas por ar comprimido, diretamente na zona de corte. Assim, a MQL surge como uma alternativa às usinagens a seco e com fluido de corte em abundância, pois possibilita a redução no consumo de óleo, a possibilidade aplicar óleos biodegradáveis, e a facilidade de penetração na zona de corte [Sharma et al., 2015; Sivaiah e Chakradhar, 2018].

O emprego de ar comprimido refrigerado como meio de arrefecimento em usinagem é uma estratégia relativamente nova. A técnica baseia-se no resfriamento por tubo de vórtice e atua sobre a peça (evita dilatação térmica), sobre a ferramenta (manter a dureza a quente) e sobre o cavaco (fragilização). Por conseguinte, a aplicação permite reduzir as forças de usinagem, diminuir a rugosidade da superfície, e aumentar a vida da ferramenta de corte, sem ocasionar nenhum efeito adverso sobre a saúde do operador e o meio ambiente [Jozić et al., 2015; Sabudhi e Sen, 2015; Swain et al., 2022].

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste em investigar, de maneira comparativa, a influência do fresamento tangencial e frontal no acabamento (rugosidade média, textura e microdureza) da superfície de amostras produzidas por manufatura aditiva metálica em aço maraging C300. Serão avaliados os efeitos de quatro meios lubrificantes (corte a seco, mínima quantidade de lubrificação, ar comprimido refrigerado e fluido de corte em abundância). A intenção é descobrir se as técnicas ambientalmente amigáveis podem ou não substituir a aplicação do fluido de corte em abundância na geração do acabamento usinado.

## 1.2 Motivação

Considerando a oportunidade de explorar as condições de uma usinagem mais alinhada com os cuidados que o meio ambiente requer, bem como com a necessidade de pós-processo em peças fabricadas por MAM, realizou-se uma busca associada aos termos: (i) manufatura aditiva & aço maraging C300; (ii) fresamento & meio lubrificante; (iii) acabamento superficial & rugosidade da superfície usinada; (iv) usinagem ambientalmente amigável. A Figura 1.3 apresenta a relação de publicações na base de dados Scopus em 2023, referente ao período de 2017 a 2023.

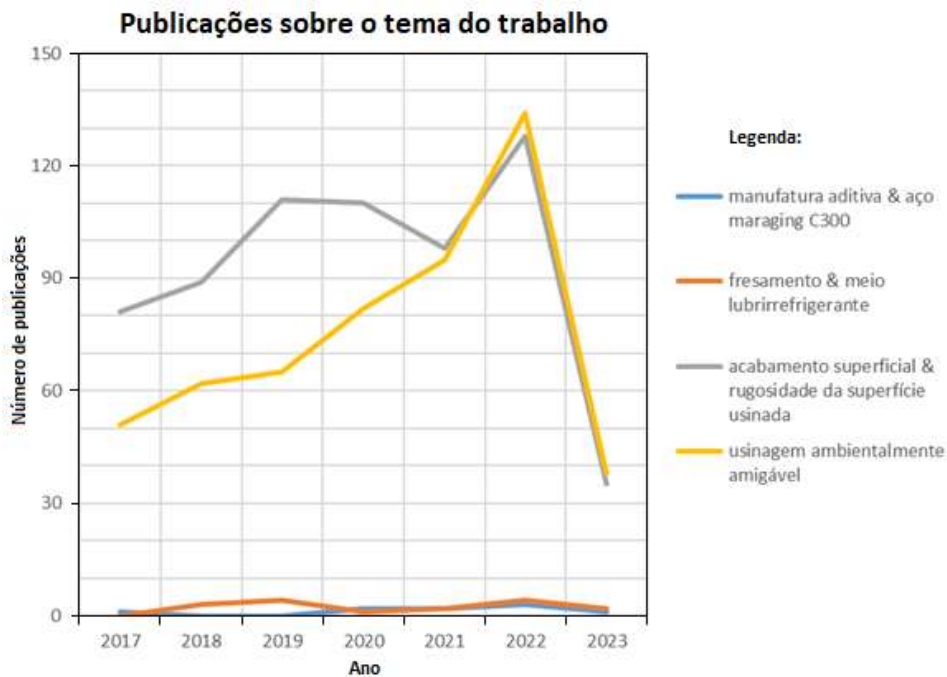


Figura 1.3 – Relação de publicações sobre o tema do trabalho.

Percebe-se pelos resultados da busca que há uma lacuna de trabalhos com o foco na avaliação da influência do fresamento no acabamento da superfície de amostras fabricadas por manufatura aditiva metálica em aço maraging C300 sob diferentes meios lubrificantes. Todavia, diferentes pesquisadores [Bai et al., 2021; Casalino et al., 2015; Kempen et al., 2011] concentraram-se em pesquisar a influência dos parâmetros do processo de MAM e do tratamento térmico nas propriedades mecânicas do aço maraging, enquanto houve estudos menos abrangentes sobre as características microscópicas do aço maraging produzido por MAM. Desta forma, justifica-se a necessidade de aprofundar os estudos no tema deste trabalho, uma vez que o pós-processamento subtrativo, como fresamento, acaba sendo necessário para atender aos requisitos de tolerâncias dimensionais, exigidas nas aplicações complexas.

### 1.3 Organização do Trabalho

A estrutura do trabalho é composta por sete capítulos descritos nos itens que se seguem.

- Capítulo 1: Introdução ao tema e sua relevância em relação aos objetivos propostos, incluindo os objetivos e a motivação da pesquisa.
- Capítulo 2: O referencial teórico apresenta um conjunto de informações relevantes em relação ao tema proposto tais como manufatura aditiva metálica, fresamento e meios lubrificantes.
- Capítulo 3: Os materiais e métodos exibem as características do maraging C300, da ferramenta de corte, da máquina-ferramenta, dos equipamentos utilizados e dos procedimentos adotados para análise da superfície usinada: medição de rugosidade e análise da textura.
- Capítulo 4: Os resultados e discussões mostram os dados experimentais obtidos de rugosidade e textura, as respectivas análises e a comparação com os resultados obtidos em trabalhos semelhantes.
- Capítulo 5: Conclusões a partir dos resultados obtidos e sugestões para futuros trabalhos.
- **Referências:** Lista de bibliografias citadas no trabalho.
- **Apêndices:** Informações sobre medições de rugosidade, imagens das texturas via (MEV) e análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) das texturas que complementam a análise dos resultados.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta conceitos relacionados às técnicas de manufatura aditiva metálica, processos de fresamento tangencial e frontal, textura de uma superfície técnica, além das vantagens e desvantagens dos principais meios lubrificantes utilizados nos processos de usinagem.

### 2.1 Manufatura Aditiva Metálica

A indústria tem buscado alternativas para melhorar seus processos produtivos, principalmente em relação à redução de custo. Com isso, a manufatura aditiva metálica (MAM) tem-se mostrado uma solução para a geração de peças com geometrias complexas, as quais não poderiam ser fabricadas por processos de usinagem convencional, possibilitando novos modelos de negócio. A MAM é um processo que permite produzir peças metálicas com elevada densidade, com redução de poros e imperfeições no seu interior, possibilitando obter propriedades mecânicas similares a outros processos de beneficiamento [Horst et al., 2018; Lindemann et al., 2012].

De acordo com a ISO/ASTM 52900, 2021, são apresentados sete tipos de manufatura aditiva, sendo que quatro destes são aplicados a materiais metálicos: *Powder Bed Fusion* (PBF), *Direct Energy Deposition* (DED), *Binder Jetting* (BJT) e *Sheet Lamination* (SHL). O PBF é uma das técnicas mais utilizadas, que consiste na fusão do pó metálico por um feixe de laser, com foco na fabricação de peças altamente complexas e em pequenos lotes. Para essa técnica, há métodos específicos de fusão do pó metálico, destacando-se o SLM (*Selective Laser Melting*) [Gomes e Wiltgen, 2020]. A Figura 2.1 apresenta um esquema das principais etapas do processo e fusão de materiais metálicos em forma de pó.

O processo de fusão seletiva a laser (SLM) representa uma evolução do processo *Selective Laser Sintering* (SLS) desenvolvido e patenteado por Carl Deckard e Joe Beaman na Universidade do Texas, EUA, em meados da década de 1980, para a produção de protótipos de plástico. O SLM começou no *Fraunhofer Institute for Laser Technology em Aachen*, Alemanha, em 1995, resultando na patente básica ILT SLM DE 19649865 [Casalino et al., 2015]. Na tecnologia SLM, a matéria-prima metálica é utilizada em forma de pó ou pequenas partículas. As peças são formadas gradativamente pela deposição de camadas de pó, fundidas localmente pela radiação laser, formando peças fundidas que, então, se solidificam e se ligam metalurgicamente à camada previamente fundida [Ahmadkhaniha et al., 2021], conforme ilustrado na Figura 2.2. A varredura percorrida por este feixe de laser é definida a partir de um modelo CAD (*Computer Aided Design*),

projetado previamente conforme especificações que a peça ou protótipo deve conter [Gibson et al., 2021; Lin, 2016; Venkatesh e Nandini, 2013].

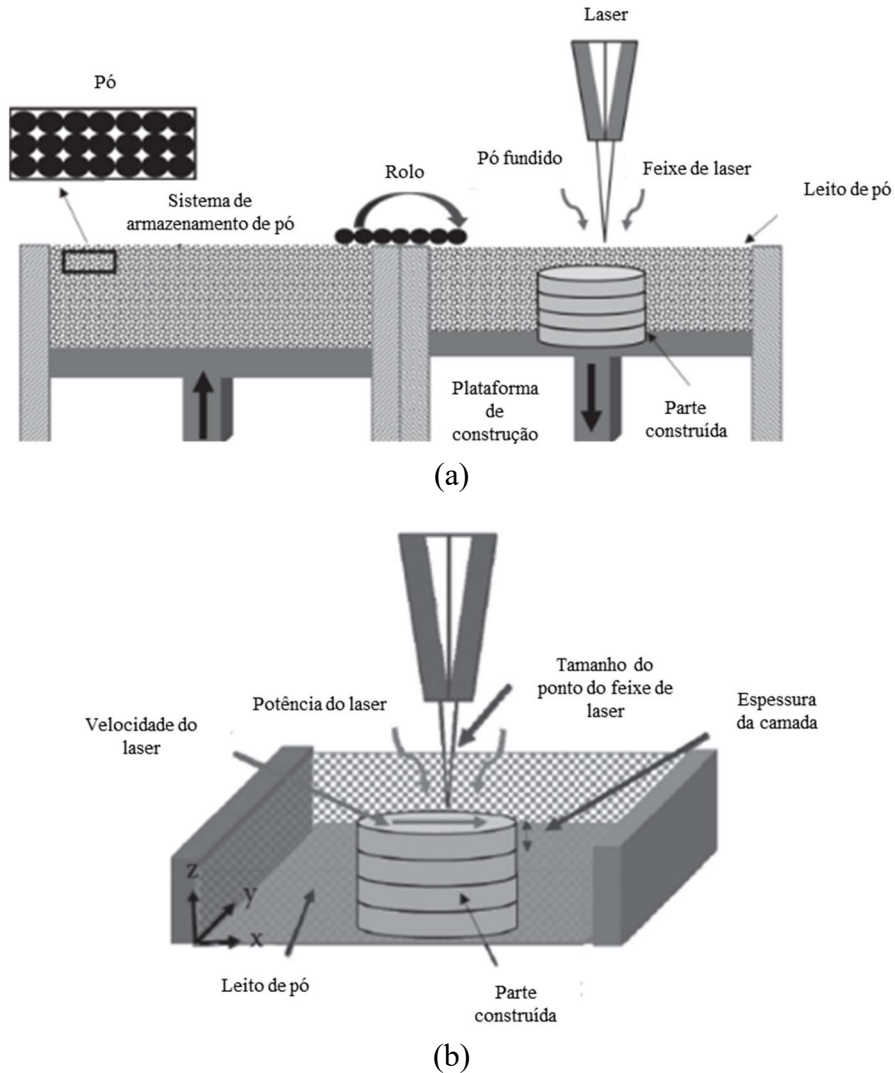


Figura 2.1 – (a) Esquema do processo de feixe de laser em pó metálico (SLS, SLM, DMLS);  
(b) Parâmetros do processamento em leito de pó [Adaptado de Siddiqui et al., 2017].

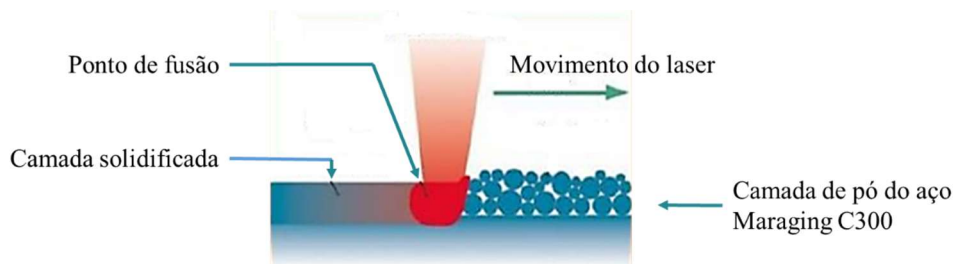


Figura 2.2 – Feixe de laser e superfície gerada por deposição de camadas [Rabelo, 2016].

Como a peça é modelada em 3D a partir da impressão de camadas por camadas [Ahmadkhaniha et al., 2021], é necessário que o arquivo esteja em um formato STL (*Standard Triangle Language* ou *Standard Tessellation Language*), criado pela 3D Systems, e que hoje é um formato de domínio público. Este formato de arquivo cria uma réplica do modelo projetado em vários triângulos, que variam de tamanho e qualidade, de acordo com a complexidade da superfície e a resolução requerida. Desta forma, a qualidade da superfície da peça está atrelada à espessura das camadas de material depositadas (Figura 2.3a) e de acordo com o tamanho e quantidade dos triângulos (Figura 2.3b) [Araújo, 2018; Gibson et al., 2021].

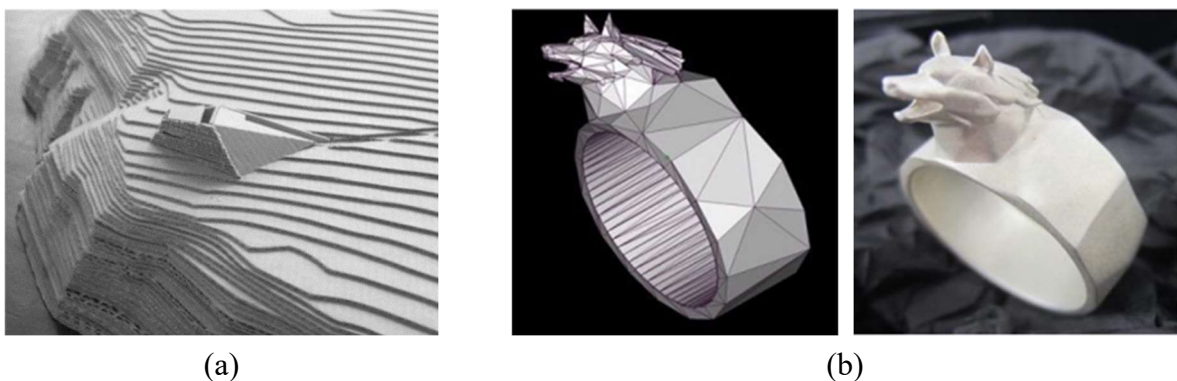


Figura 2.3 – MAM: (a) superfície gerada por deposição de camadas [Gibson et al., 2021];  
(b) comparativo do arquivo STL com a peça pronta [Araújo, 2018].

A técnica SLM permite trabalhar com vários tipos de pós metálicos, como aço inoxidável 17-4 PH, AISI 316L, aço maraging, Ti-6Al-4V, dentre outros [Danish et al., 2023], dispensa pós-processamento e pós-cura, não necessita de estrutura de suporte e possibilita a fabricação de várias peças simultaneamente, maximizando o volume de trabalho [Gomes e Wiltgen, 2020]. Basicamente, a fabricação das peças por SLM pode ser dividida nas seguintes etapas [Lin, 2016]:

- Desenvolvimento da informação geométrica e estrutural da peça, que é definido como o modelo CAD 3D.
- Adição da matéria-prima ou mistura no depósito de pó no interior da câmara de alimentação.
- Deposição de uma fina camada de pó sob uma plataforma de impressão.
- Fusão do material depositado por um feixe de laser, cuja trajetória é determinada no *software* da máquina a partir do modelo CAD 3D.
- Repetição do processo até a obtenção da peça completa.
- Finalização da fabricação da peça com a operação de acabamento realizada em uma etapa subsequente.



Vale ressaltar que obter um acabamento superficial adequado é um desafio para o método SLM. Mesmo que a espessura da camada seja diminuída para aumentar a qualidade da superfície, ainda assim as características de superfície desejadas podem não ser obtidas, o que dificulta as aplicações [Danish et al., 2023]. Com isso, um processo posterior torna-se necessário para ajustar formas, dimensões e/ou acabamento do componente e garantir a sua aplicabilidade técnica e sua integridade durante a utilização. Para isso, o fresamento é comumente utilizado [Jozić et al., 2015].

## 2.2 Processo de Fresamento

Após a MAM, o acabamento torna-se necessário para reduzir a rugosidade da peça e corrigir erros dimensionais, de modo a garantir um bom desempenho em serviço do componente. Desta forma, diferentes processos, técnicas, ferramentas, parâmetros e condições podem ser empregados para obter o melhor resultado. Dos principais processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, o fresamento continua sendo o mais importante devido à possibilidade de produzir, de maneira eficiente, formas geométricas complexas [Jozić et al., 2015].

O fresamento é um processo de usinagem em que a remoção de cavaco ocorre de forma intermitente pelo movimento rotativo da ferramenta multicortante (múltiplas arestas de corte) gerando superfícies das mais variadas formas geométricas. De modo geral, tanto a peça como a fresa podem assumir movimentos relativos, independentes ou combinados, permitindo a realização de uma ampla variedade de operações, gerando superfícies planas ou curvas, ranhuras, ressaltos, roscas, engrenagens e outras configurações. Quanto aos métodos de fresar superfícies, segundo a disposição dos dentes ativos da fresa, classifica-se a operação em: fresamento tangencial (ou periférico) e fresamento frontal [Pangrácio, 2003].

O fresamento tangencial é destinado a obter uma superfície plana, paralela ao eixo de rotação da ferramenta. Pode ser realizado em fresadoras horizontais (fresamento plano) ou verticais (fresamento cilíndrico). Os dentes ativos da fresa estão na superfície tangencial da ferramenta. No caso, a profundidade de corte axial ( $a_p$ ) é significativamente maior que a profundidade de corte radial ( $a_e$ ), como mostra a Figura 2.4 [Jasinevicius, 2022]. No fresamento tangencial, podem ser aplicados dois sentidos de corte: concordante e discordante.

Considerando o movimento relativo ferramenta-peça, no fresamento concordante, o vetor velocidade de avanço é no mesmo sentido do vetor velocidade de corte (Figura 2.5a). Neste caso, a espessura do cavaco gerado varia de um máximo para um mínimo. O choque da aresta de corte com a peça no contato inicial é maior. Entretanto, o acabamento gerado tende a ser melhor, além disso, dependendo do material, a fresa pode apresentar uma vida mais longa, menor força e

potência para o avanço e um caminho mais curto da aresta durante o corte. No fresamento discordante, o vetor velocidade de avanço é no sentido contrário ao vetor velocidade de corte no movimento relativo ferramenta-peça (Figura 2.5b). Tem-se a variação da espessura do cavaco de um mínimo para um máximo. O atrito elevado no contato inicial ferramenta-peça aumenta a temperatura, aumentando a taxa de desgaste e a consequente diminuição da vida da fresa. Além disso, o acabamento tende a ser inferior que no concordante [Dib et al., 2015; Sandvik, 2022].

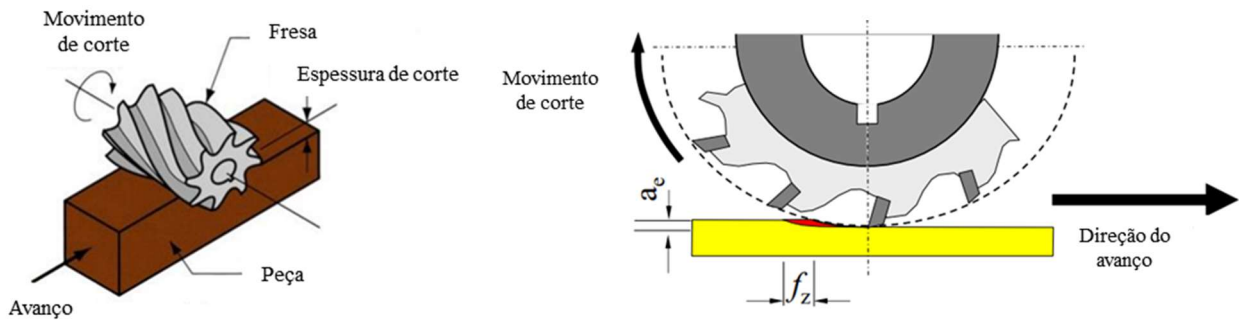


Figura 2.4 – Fresamento tangencial [Adaptado de Jasinevicius, 2022].

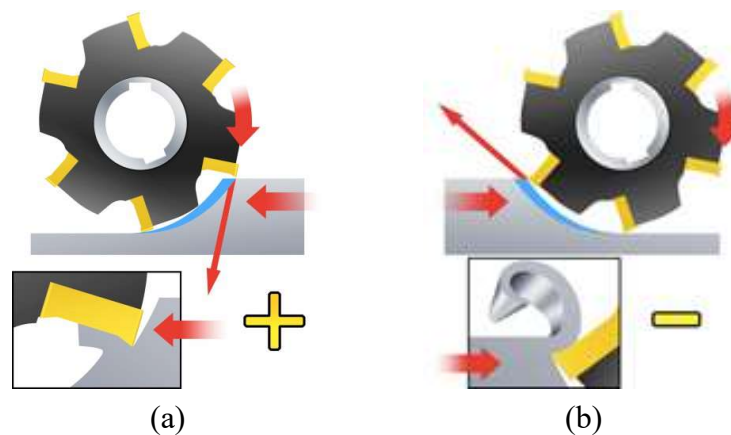


Figura 2.5 – Tipos de fresamento tangencial: (a) concordante; (b) discordante [Sandvik, 2022].

O fresamento frontal é destinado à obtenção de uma superfície perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta. É comumente realizado em fresadoras verticais e as ferramentas de corte podem ser fresas frontais ou fresas de topo. Vale ressaltar que os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta. A profundidade de corte radial ( $a_e$ ) é consideravelmente maior que a profundidade de corte axial ( $a_p$ ), como ilustra a Figura 2.6 [Jasinevicius, 2022; Santos, 2018]. O fresamento frontal pode ser simétrico ou assimétrico, como mostra a Figura 2.7. O fresamento frontal simétrico ocorre quando o deslocamento do eixo da fresa se faz sobre o eixo de simetria da

peça em usinagem, ou seja, este posicionamento resulta no menor contato de cada aresta com a peça, portanto aumenta a vida da ferramenta. Para a operação de fresamento frontal assimétrico, o corte não se dá sobre o eixo de simetria da peça em usinagem quando toda superfície está sendo usinada [Almeida, 2019].

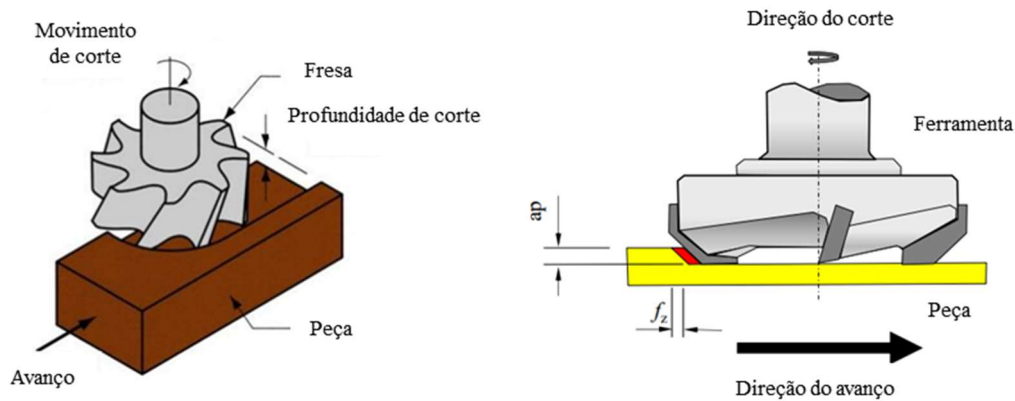


Figura 2.6 – Fresamento Frontal [Adaptado de Jasinevicius, 2022].

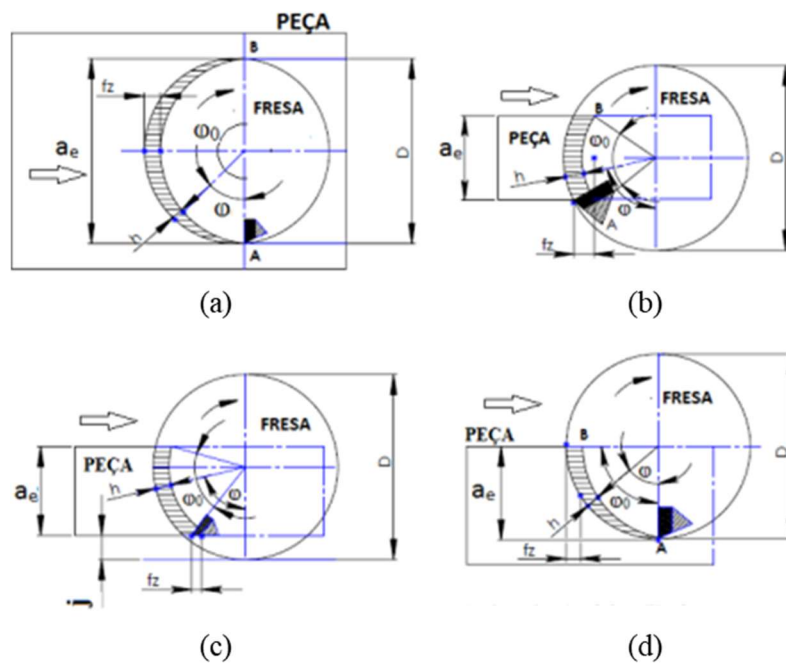


Figura 2.7 – Tipos de fresamento frontal (a) Simétrico de rasgo (b) Simétrico comum de facear (c) Assimétrico com toda a superfície sendo usinada (d) Assimétrico [Almeida, 2019]

O fresamento frontal assimétrico com largura de corte ( $a_e$ ) maior que o raio da ferramenta é vantajoso quando o diâmetro da fresa ( $D$ ) é grande em relação à largura da peça, pois, neste caso, tem-se um maior número de dentes simultaneamente no corte, gerando menores esforços de corte

por dente e, portanto, um corte mais suave. Além disso, quando o corte é assimétrico, existe uma menor tendência a vibrações devido à variação da direção da componente radial da força de usinagem ser bem menor que no corte simétrico [Santos, 2018].

Quando se compara o fresamento frontal com o tangencial, observa-se algumas vantagens do primeiro em relação ao segundo: melhor relação de remoção de material por potência consumida; maior rigidez da ferramenta; força de corte mais bem distribuída; maior eficiência de corte e um menor tempo requerido para mudança de ferramenta [Almeida, 2019].

### 2.3 Acabamento da Superfície Usinada

Todos os processos de usinagem que promovem a remoção do cavaco por cisalhamento do material geram uma superfície danificada na peça. Esses processos causam alterações nas características do material, na superfície ou na camada subsuperficial, reduzindo a resistência à fadiga do componente [Santos e Sales, 2007]. Vários fatores presentes na usinagem, como deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibrações, tensões residuais e reações químicas, têm influência na geração dessa nova superfície [Machado et al., 2015].

Assim, o acabamento da superfície usinada deve abranger tanto os aspectos geométricos de textura e topografia da superfície (rugosidade, ondulações, marcas e falhas) quanto os fatores mecânicos (deformação plástica, microdureza, trincas e tensões residuais), cristalográficos (recristalização e transformações metalúrgicas) e físico-químicos (adsorção e oxidação) da superfície relacionados à integridade [Petropoulos et al., 2010]. A Figura 2.8 mostra a representação esquemática dos itens que compõem a textura e a integridade de uma superfície.

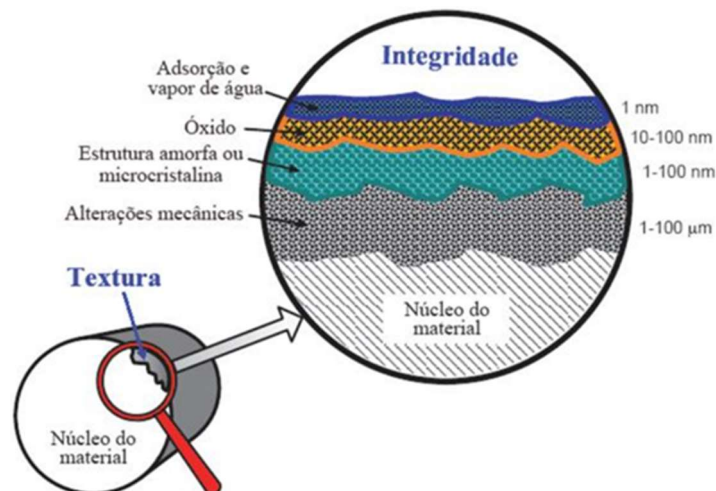


Figura 2.8 – Representação esquemática da superfície de um metal [Astakhov, 2010]

Quando a superfície de uma peça é alterada mecanicamente pela usinagem, ocorre deformação plástica das camadas superficiais. Dependendo do processo envolvido na geração desta superfície, uma zona de material endurecido por trabalho irá ocupar a base das camadas adicionais, acima da qual estará uma estrutura amorfa ou microcristalina que é o resultado do fluxo da superfície durante a usinagem. Uma camada de óxido é formada logo acima, devido ao oxigênio disponível no ambiente e aos mecanismos de oxidação. Uma camada de adsorção ocupa a região mais externa e é formada pelo vapor d'água e hidrocarbonetos do ambiente que foram condensados e absorvidos pela superfície [Astakhov, 2010].

Tradicionalmente, a textura da superfície usinada é o principal fator para verificar o acabamento da peça; entretanto, a integridade tornou-se um importante fator para ser controlado durante o processamento de materiais, podendo aumentar ou diminuir a vida do componente e sua capacidade de resistir a ciclos de carga térmica e mecânica em serviço [Outeiro, 2012]. A integridade superficial do material após o processo de fabricação tenta explicar, por meio do máximo de informações possíveis retiradas do próprio material, qualquer alteração ocorrida na superfície e subsuperfície da peça, visando prever a vida útil deste material pós-fabricação. Portanto, tal investigação torna-se fundamental, principalmente quando estes componentes são aplicados em áreas críticas da Engenharia, como nas indústrias aeronáutica, automobilística e biomédica [Paulo, 2008; Boing, 2016].

### **2.3.1 Textura**

A textura é um parâmetro de saída de fácil constatação que reflete as variações no processo de usinagem, tais como mudança na composição química da matéria-prima, desgaste excessivo da ferramenta de corte, escolha de parâmetros inadequados e instabilidades na máquina [Santos e Sales, 2007]. Normalmente utiliza-se a textura como parâmetro principal de medida de desempenho do processo de usinagem. As características da textura são definidas em três níveis (ondulações, rugosidades e falhas) conforme as irregularidades se apresentam.

As ondulações são irregularidades superficiais ou erros geométricos que tem espaçamentos maiores que a rugosidade, causadas geralmente por flexões da ferramenta e/ou peça devido às forças de usinagem, vibrações, temperatura de corte ou também erros de fixação da peça ou ferramenta. As falhas são interrupções na topografia típica de uma superfície comumente relacionadas a defeitos inerentes do material como inclusões, trincas, bolhas, ou também surgir durante o processo de corte. A rugosidade é composta de erros microgeométricos ou irregularidades finas resultantes da ação de corte. Ondulações e falhas devem ser evitadas na

fabricação de uma superfície, visto que são considerados erros de fabricação. No entanto, a rugosidade é um parâmetro especificado de acordo com a aplicação da superfície usinada [Machado et al., 2015].

A rugosidade é resultado de vários fatores simultâneos que podem ocorrer em usinagem. Características da ferramenta de corte, propriedades do material da peça, variação dos parâmetros de corte e fenômenos do processo podem afetar a rugosidade da superfície usinada [Bajić et al., 2012], como mostra o diagrama de causa e efeito da Figura 2.9.

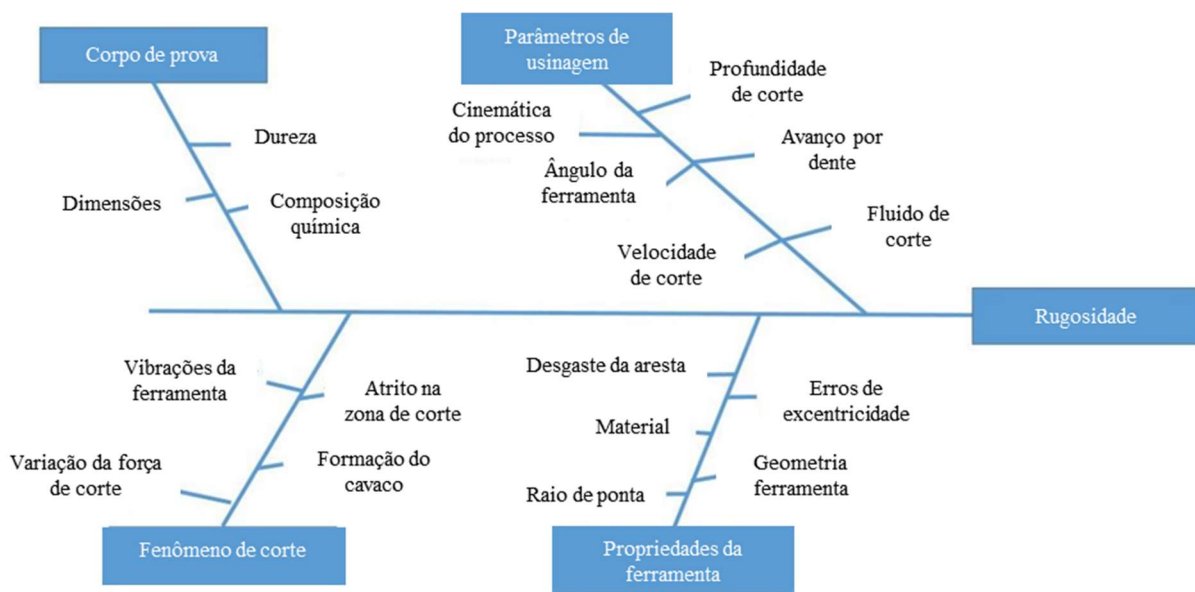


Figura 2.9 – Fatores que afetam a rugosidade da superfície [Adaptado de Bajić et al., 2012].

A norma ABNT NBR ISO 4287, 2002, estabelece definições e parâmetros para estado da superfície. O comprimento de amostragem ( $l_e$ ), ou *cut-off*, é o comprimento útil da medição usado para identificar as irregularidades características do perfil avaliado. Já o comprimento de medição ou avaliação ( $l_m$ ) engloba um ou mais comprimentos de amostragem e é utilizado para o cálculo dos parâmetros de rugosidade. Normalmente recomenda-se que o comprimento de avaliação seja dividido em cinco comprimentos de amostragem. Existem diversos parâmetros para caracterizar a rugosidade. Neste trabalho serão considerados a rugosidade média ( $R_a$ ), a rugosidade total ( $R_t$ ) e a rugosidade média parcial ( $R_z$ ).

O desvio médio aritmético ou rugosidade média ( $R_a$ ) considera a média dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de avaliação ( $l_m$ ) em relação à linha média do perfil primário [Petropoulos et al., 2010], como mostra a Figura 2.10. O parâmetro  $R_a$  é de fácil definição e medição e pode ser usado quando for necessário o controle contínuo da rugosidade nas linhas de

produção, em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos de usinagem bem orientados (como em fresamento) e em superfícies de pouca responsabilidade como em acabamentos com fins apenas estéticos [Piratelli Filho, 2011; Tavares, 2012].

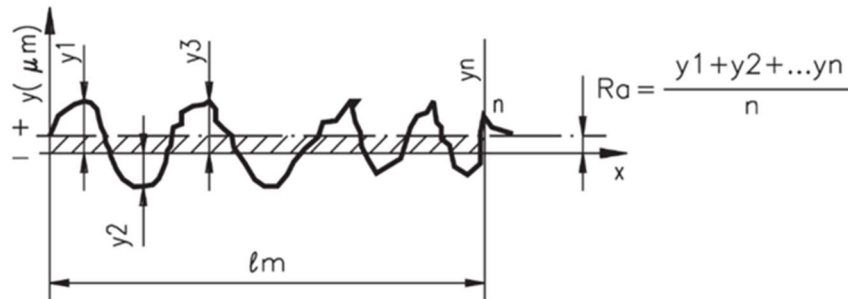


Figura 2.10 – Representação gráfica do parâmetro  $R_a$  [Piratelli Filho, 2011].

Embora seja pobre em significado físico, o  $R_a$  é estabelecido em quase todas as normas de padronização para apontar a rugosidade. Entretanto, não tem sensibilidade a pequenas variações do perfil, não distingue picos e vales e não diferencia a forma das irregularidades do perfil (um mesmo valor de  $R_a$  pode ser obtido para superfícies geradas por diferentes processos). [Petropoulos et al., 2010].

A rugosidade máxima pico a vale ( $R_t$ ) estabelece a distância entre o pico mais alto ( $R_p$ ) e o vale mais profundo ( $R_v$ ) do perfil de rugosidade filtrado no comprimento de avaliação ( $l_m$ ). Este parâmetro tem alta sensibilidade de desvios da linha média, como arranhões ou rebarbas. [Petropoulos et al., 2010]. A Figura 2.11 apresenta essas definições.

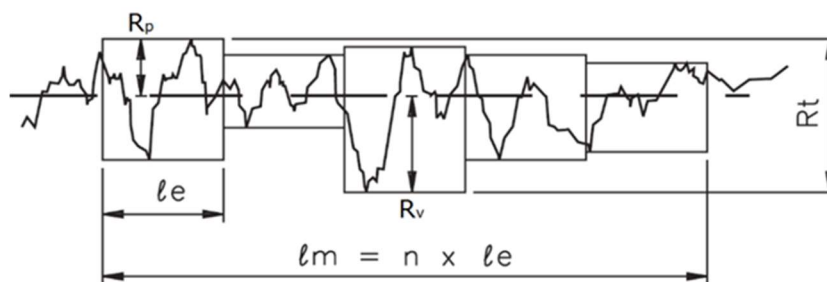


Figura 2.11 – Representação gráfica do parâmetro  $R_t$  [Piratelli Filho, 2011].

O parâmetro  $R_t$  pode ser empregado em superfícies de vedação, assentos de anéis de vedação, superfícies dinamicamente carregadas, tampões em geral, parafusos altamente carregados, superfícies de deslizamento em que o perfil efetivo é periódico. Como vantagens pode-se citar que ele informa a máxima deterioração da superfície vertical da peça e é de fácil obtenção

quando o equipamento fornece o gráfico da superfície. Como desvantagem, a rigidez de avaliação leva a resultados enganosos [Piratelli Filho, 2011; Tavares, 2012].

A rugosidade média parcial ( $R_z$ ) suaviza grandes desvios que não sejam representativos para o perfil de rugosidade, correspondendo à média aritmética dos “i” valores de rugosidade parcial ( $Z_i$ ). Na representação gráfica do perfil, “ $Z_i$ ” corresponde à altura entre o maior pico ( $R_p$ ) e o maior vale ( $R_v$ ) do perfil em cada comprimento de amostragem ( $l_e$ ), como mostra a Figura 2.12 [Petropoulos et al., 2010].

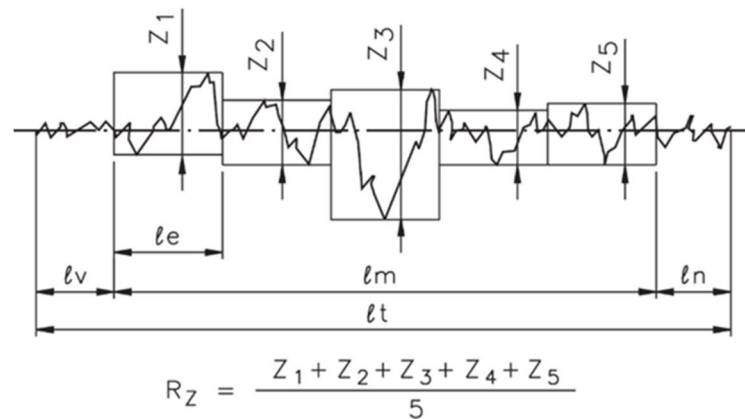


Figura 2.12 – Representação gráfica do parâmetro  $R_z$  [Piratelli Filho, 2011].

O parâmetro  $R_z$  pode ser empregado nos casos em que pontos isolados não influenciam na função da peça a ser controlada (ex.: superfícies de apoio e de deslizamento, ajustes prensados etc.) e em superfícies onde o perfil é periódico e conhecido (como no processo de fresamento). Porém, em algumas aplicações, não é aconselhável a consideração parcial dos pontos isolados, pois um ponto acentuado será considerado somente em 20%, mediante a divisão de  $1/i$ . Outra desvantagem é que  $R_z$  não possibilita nenhuma informação sobre a forma do perfil, bem como da distância entre as ranhuras [Piratelli Filho, 2011; Tavares, 2012].

### 2.3.2 Integridade

Os processos de usinagem introduzem mudanças estruturais na superfície da peça (componente ou elemento de máquina) que ocorre devido à ação das forças de corte e atrito da ferramenta. Qualquer alteração superficial (mecânica, metalúrgica e química) pode limitar a qualidade da peça. Portanto, o comportamento de um material depende, entre outros fatores, de sua superfície de contato e do ambiente em que trabalhará [Astakhov, 2010].



A integridade trata das possíveis modificações metalúrgicas que ocorrem nas proximidades da superfície usinada da peça devido aos esforços mecânicos e elevadas temperaturas em função da ferramenta de corte. As transformações estão relacionadas a deformações plásticas, micro e macro trincas, transformações de fase, fragmentos de material aderido e tensões residuais [Farias, 2009]. Essas deformações superficiais (Figura 2.13) resultarão no trabalho da camada superficial, acarretando o aumento da dureza e da resistência à tração. Assim, todas estas alterações podem provocar distorções e diminuição das resistências à fadiga, ao desgaste e à corrosão, influenciando significativamente o comportamento em uso do componente [Astakhov, 2010].



Figura 2.13 – Deformação plástica na usinagem [Astakhov, 2010].

Alguns defeitos podem ser causados ou produzidos durante a produção de uma peça e podem ser classificados como os que o material já possui e aqueles impostos durante a fabricação [Astakhov, 2010]:

- Deformação plástica: alteração severa da forma geométrica da superfície devido ao atrito da ferramenta durante a usinagem.
- Transformações metalúrgicas: mudanças microestruturais causadas por altas temperaturas e altas pressões de contato.
- Tensões residuais: tensões trativas ou compressivas causadas por forças, deformações e temperaturas envolvidas no processo.

Fortunato et al., 2018, avaliaram experimentalmente o fresamento realizado em amostras de aço maraging C300 produzidos por fusão seletiva a laser (SLM) com o objetivo de obter os parâmetros ótimos de usinagem em função de diferentes variáveis de resposta, dentre elas a dureza superficial. Os autores concluíram que a dureza média de todas as amostras aumenta, ligeiramente, após a operação de fresamento devido à deformação plástica associada.

Bai et al., 2021, avaliaram a microestrutura, a microdureza, a força de usinagem, a rugosidade da superfície, o desgaste da ferramenta e a formação de cavacos no fresamento a seco do aço maraging fabricado por MAM com e sem tratamento térmico. O estudo apontou variação significativa da usinabilidade em função da microestrutura das amostras. A microdureza superficial das amostras tratadas termicamente aumentou e o valor da rugosidade diminuiu (de 10  $\mu\text{m}$  para  $< 0,4 \mu\text{m}$ ) após a operação de fresamento.

Du et al., 2016, estudaram novo método de fabricação híbrida aditiva/subtrativa, combinando as vantagens da fusão seletiva a laser (SLM) com o fresamento de precisão para melhorar o acabamento da superfície e a precisão geométrica e dimensional de uma peça de aço maraging C300. Os autores analisaram a microestrutura da peça via MEV e as variações de microdureza, comparando os efeitos do novo método com os demais métodos. Concluíram que a amostra fabricada pelo novo método possuía alta densidade relativa (99,2%) e uma microestrutura de finos dendritos celulares ao longo da direção da construção. A dureza da amostra apresentou valores muito superiores aos da técnica tradicional SLM e dos aços maraging forjados. Entretanto, não apresenta grande variação de dureza em suas superfícies superior e lateral.

## 2.4 Meios Lubrificadorrefrigerantes

Os meios lubrificadorrefrigerantes são líquidos, gases (ou névoa) e, às vezes, particulados sólidos (MnS, MoS<sub>2</sub>), aplicados na ferramenta e no material que está sendo usinado, a fim de facilitar a operação de corte. Os lubrificadorrefrigerantes (Figura 2.14) são utilizados na indústria com a função de refrigerar, lubrificar, proteger contra a oxidação e limpar a zona de corte [Tamaru, 2019].

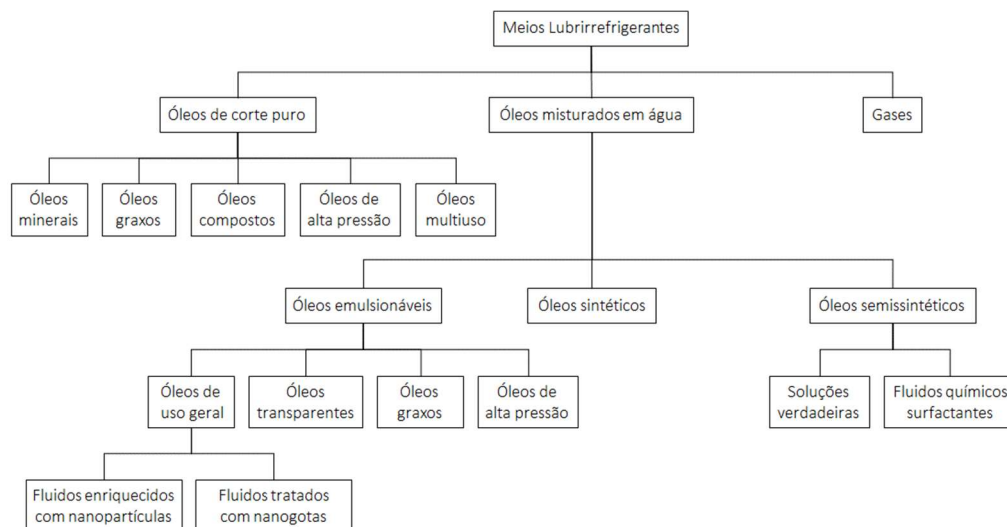


Figura 2.14 – Classificação dos meios lubrificadorrefrigerantes [Adaptado de Sharma et al., 2016].

Ao se utilizar o fluido de corte em abundância como lubrificador, sua principal característica é atuar sobre a peça para evitar sua dilatação e, com isto, permitir a obtenção da precisão dimensional [Martins, 2022], além de melhorar tanto a tensão residual superficial quanto o acabamento em peças usinadas [Tomaz et al., 2019].

Na ferramenta, a refrigeração é importante para manter as características de resistência e dureza. Ao se utilizar como lubrificante, facilita o deslizamento do cavaco sobre a ferramenta e diminui o atrito entre a peça e a ferramenta. Além disso, minimiza o surgimento de aresta postiça de corte (APC), reduz o coeficiente de atrito na região ferramenta-cavaco e diminui a solitação dinâmica da máquina. Outra característica relevante é sua função protetora contra a oxidação, protegendo a peça e a ferramenta de tais efeitos. O fluido de corte em abundância também pode auxiliar na proteção da própria máquina em relação à oxidação [Martins, 2022].

Apesar de todas as características importantes que os óleos misturados em água apresentam para o processo de usinagem, estudos apontam que o consumo excessivo cria inúmeras complicações ecológicas, como contaminação ambiental causada pela alteração química dos fluidos em temperaturas elevadas, e poluição da água e do solo durante o descarte de fluidos usados. Além destes danos citados, também há os problemas de saúde causados ao operador. Segundo a IARC (*International Agency for Research on Cancer*), o óleo mineral pode causar câncer de pele. Somando-se a isso, há o alto risco de doenças pulmonares, uma vez que durante a usinagem, os fluidos de corte podem vaporizar em grande quantidade formando uma “névoa” e as partículas transportadas pelo ar podem ser facilmente inaladas pelos trabalhadores. O NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) estimou que 1,2 milhão de trabalhadores, em todo o mundo, já foram expostos aos efeitos tóxicos dos lubrificantes. O custo também é considerado uma desvantagem adicional. De fato, o consumo de lubrificador é alto na indústria metal mecânica: estima-se que os custos de aquisição, armazenamento, uso e descarte ultrapassem quatro vezes o custo das ferramentas de corte utilizadas no processo de usinagem [Tebaldo et al., 2017], como mostra a Figura 2.15.

Dependendo do tipo de fluido de corte, da sua quantidade e da aplicação inadequada do mesmo em um determinado processo de usinagem, isso pode diminuir a eficiência da lubrificação, reduzir a vida da ferramenta e aumentar a rugosidade da superfície usinada, promovendo assim queda na produtividade do processo [Sreejith e Ngoi, 2000]. A maioria dos fluidos convencionais são óleos minerais à base de petróleo com emulsificantes e aditivos especiais, ou seja, sua composição química os torna nocivos ao ambiente natural e perigosos para a segurança e saúde dos operadores de máquinas-ferramenta [Tomaz et al., 2019].

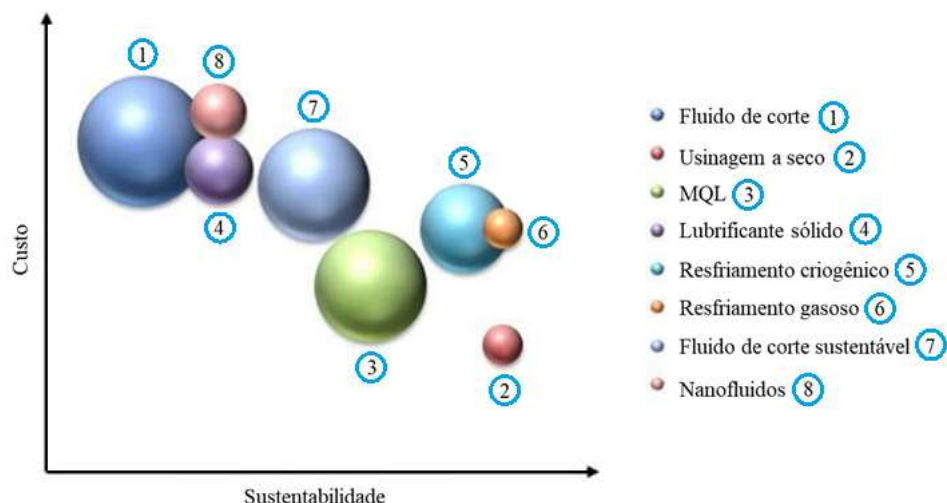


Figura 2.15 – Custo dos sistemas de lubrificação na usinagem em função da sustentabilidade  
[Adaptado de Benedicto et al., 2017].

Como alternativa, fabricantes e pesquisadores estão se concentrando em usinagens ecologicamente corretas e sustentáveis. Atualmente, as pesquisas se concentram principalmente em duas técnicas: mínima quantidade de lubrificação (MQL) e gases em baixas temperaturas [Debnath et al., 2014; Fratila, 2013; Tebaldo et al., 2017]. Além disso, bons resultados podem ser obtidos na usinagem a seco ao usar ferramentas de corte com propriedades adequadas (geometrias, materiais e revestimentos).

#### 2.4.1 Fluido de corte em abundância

Na técnica tradicional, com aplicação em abundância, o fluido de corte é fornecido diretamente na zona de corte em um fluxo contínuo de baixa pressão, e o fluido residual é então drenado. Como é uma quantidade muito grande de fluido de corte (vazão de até 12 l/min), existem algumas sérias desvantagens associadas a este modo [Sharma e Kumar, 2021]:

- Aumento do custo de produção: no estudo apresentado pelos autores, verificou-se que os custos associados ao fluido de corte em abundância variam de 8% a 16% do custo total da peça usinada. Além da aquisição e armazenagem, os custos estão associados ao tratamento do fluido para posterior descarte, transporte de fluido contaminado, e limpeza do piso, da máquina e do componente acabado.
- Limitações do processo: em usinagens a altas velocidades, o fluido de corte falha em alcançar as interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça; portanto, a lubrificação e a refrigeração não são executadas com eficiência.

- Perigos para a saúde: a exposição repetida aos fluidos de corte, principalmente à base de óleos minerais, tem riscos associados à saúde, como problemas de pele e efeitos cancerígenos. Além disso, qualquer derramamento no chão pode levar a escorregões acidentais. Em altas temperaturas, são gerados vapores de fluidos de corte que causam distúrbios respiratórios quando inalados por períodos prolongados.
- Danos ao meio ambiente: a lubrificação por inundação geralmente resulta em danos ao meio ambiente. Erhan et al., 2008, apontaram que até 50% dos lubrificantes acabam no meio ambiente por volatilidade, derramamento ou aplicação de perda total.

No que diz respeito aos danos ambientais causados, a fabricação sustentável é vital para a criação de bens que beneficiem a economia, a sociedade e o meio ambiente. Aspectos críticos da sustentabilidade ambiental do produto incluem consumo de energia, desperdício de material, vários tipos de emissões poluentes e redução no uso de recursos não renováveis [Hassan, 2022].

#### 2.4.2 MQL

O MQL (mínima quantidade de lubrificação) é uma técnica de lubrificação que mistura ar comprimido e o lubrificante, aplicados sob pressão, com vazão muito baixa, e na forma de névoa ou pequenas gotículas [Sharma et al., 2015; Sivaiah e Chakradhar, 2018]. A vazão em MQL fica em torno de 2 a 8 ml/min, o que é significativamente menor que a aplicação em abundância, na qual a vazão pode chegar a 12 l/min [Sharma e Kumar, 2021].

Os principais benefícios do MQL são a redução no consumo de lubrificante pela vazão reduzida, a possibilidade de combinação com óleos biodegradáveis, e a facilidade de penetração na zona de corte, de modo que a redução no atrito e a extração do calor sejam feitas o mais próximo possível da zona. Com uma pressão de aplicação adequada, o MQL também pode auxiliar na quebra e remoção do cavaco [Sharma et al., 2015; Sivaiah e Chakradhar, 2018].

Em velocidades de corte e avanço mais altos, o MQL apresenta melhor lubrificação que o fluido de corte em abundância devido à sua maior facilidade de penetração nas interfaces [Sharma et al., 2016], como mostra a Figura 2.16. Além disso, quando as gotas entram em contato com a zona de corte aquecida, elas evaporam e assim auxiliam na remoção do calor da zona de corte [Sharma e Kumar, 2021]. O MQL ainda diminui significativamente os impactos perigosos dos fluidos de corte no meio ambiente pela diminuição da quantidade utilizada.

A maioria dos estudos experimentais mostram que a aplicação de MQL produz uma superfície com melhor qualidade que a usinagem a seco e semelhante à gerada pela usinagem com fluido de corte em abundância. O MQL também reduz as forças de corte, as temperaturas na zona

de corte, os desgastes da ferramenta e o coeficiente de atrito em comparação com a usinagem a seco e com fluido abundante sob condições de usinagem semelhantes [Sharma et al., 2016].

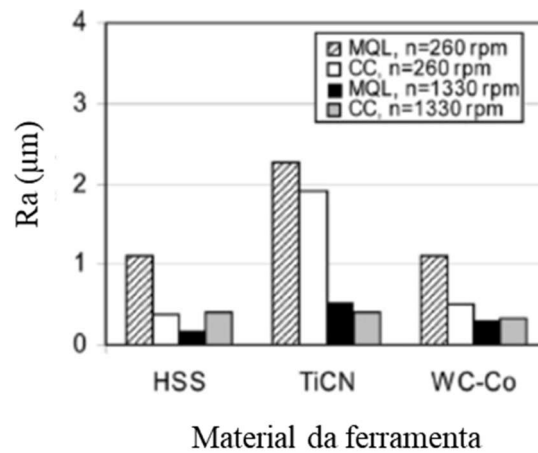


Figura 2.16 – Rugosidade em diferentes materiais de ferramenta sob resfriamento convencional (CC) e técnica MQL [Sharma et al., 2016].

Salur et al., 2021, avaliaram os efeitos do MQL e do corte a seco no desgaste da ferramenta durante o fresamento frontal do aço AISI 1040. Os autores constataram que o MQL apresentou melhor desempenho em relação ao corte a seco, reduzindo o desgaste, a temperatura de corte e a energia consumida, além da capacidade de remover cavacos e de resfriar e lubrificar a zona de corte. Tomaz et al., 2019, compararam a aplicação de fluido de corte à base de óleo vegetal em MQL e em abundância no fresamento de topo do aço maraging C300 para diferentes parâmetros de corte. Os autores notaram que o MQL diminuiu as forças de usinagem na maioria das condições testadas e reduziu o valor da rugosidade média (Ra) em aproximadamente 10% na comparação com a condição em abundância. Verificaram também que o MQL é capaz de produzir menores tensões residuais de tração que o fluido em abundância quando baixo avanço por dente é usado.

Najiha et al., 2016, citam que na usinagem com aplicação de fluido de corte em abundância, o consumo de energia é fixo e só pode ser reduzido melhorando a eficiência de corte e diminuindo o tempo de ciclo (Figura 2.17a). Ao aplicar a técnica de MQL, a energia relacionada ao fluido de corte é minimizada, o que resulta automaticamente em economia de energia (Figura 2.17b). Portanto, há uma grande conquista na economia de custos para os processos de fabricação.

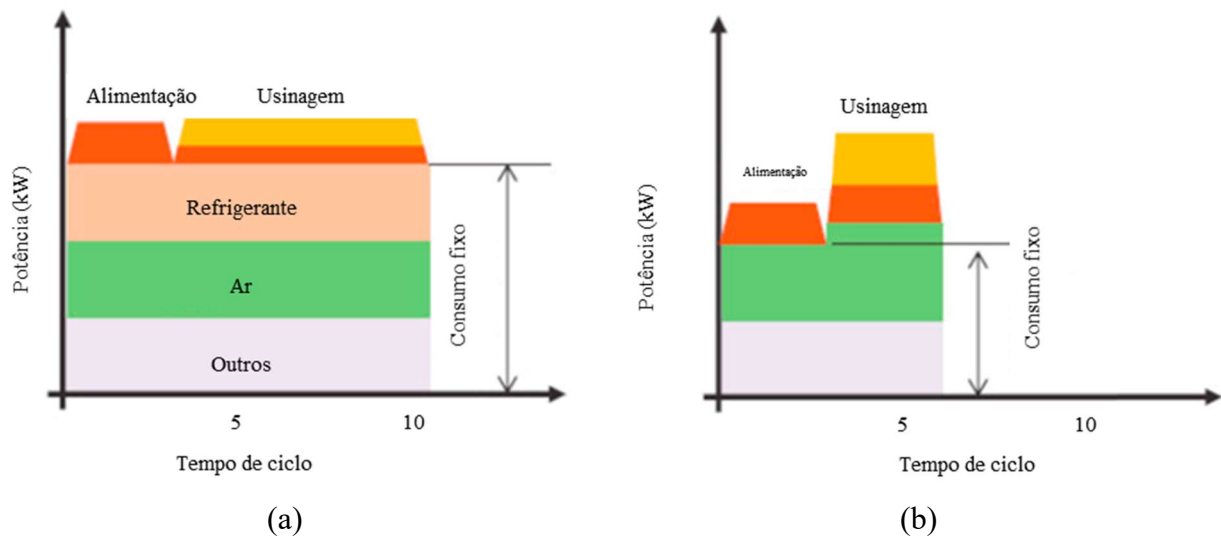


Figura 2.17 – Consumo de energia: (a) fluido em abundância b) MQL [Najiha et al., 2016].

### 2.4.3 Ar comprimido refrigerado

O uso do ar comprimido refrigerado é uma técnica relativamente nova que tem atraído a atenção de muitos pesquisadores. Como o meio de resfriamento é ar, pode-se definir como o método mais limpo e ecológico de resfriamento em operações de corte [Shokrani et al., 2012].

O sistema de ar comprimido frio tem como base a teoria do fluxo de vórtice. A corrente de ar de alta pressão, que é gerado pelo compressor, entra tangencialmente em um tubo e se divide em duas correntes de ar com pressões mais baixas, uma quente e outra fria. O fluxo de ar frio sai do tubo de vórtice por um orifício central próximo ao bocal de entrada, enquanto a corrente de ar quente flui em direção à válvula de controle e sai do tubo (Figura 2.18). Uma das principais vantagens deste dispositivo é que não há a necessidade de acoplar componentes móveis, e o ar resfriado é obtido apenas com a ajuda do ar comprimido. Atualmente, o tubo de vórtice está disponível comercialmente para aplicações industriais, e são capazes de produzir uma queda expressiva da temperatura [Jozić et al., 2015; Sabudhi e Sen, 2015; Swain et al., 2022].

O ar comprimido refrigerado atua sobre a peça para evitar sua dilatação e com isto garantir a precisão dimensional. Na ferramenta, a refrigeração é importante para manter as características de resistência e dureza. O ar frio favorece a redução da taxa de desgaste da ferramenta quando os parâmetros de corte apresentam valores mais baixos. O ar frio também reduz a rugosidade da superfície se as condições de corte forem definidas para valores mais altos. Além disso, em muitos casos, as forças de usinagem tendem a ser mais baixas ao aplicar ar frio ao invés de fluido de corte em abundância. Assim, o ar comprimido refrigerado pode melhorar a precisão dimensional da peça

e a qualidade do acabamento da superfície, além de não ter nenhum efeito adverso sobre a saúde do operador [Jozić et al., 2015].

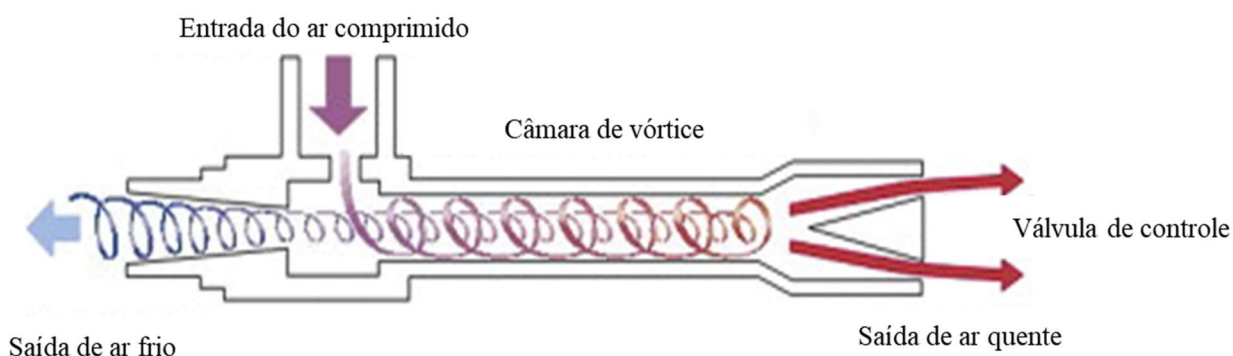


Figura 2.18 – Representação esquemática do princípio de funcionamento do tubo de vórtice [Adaptado de Jozić et al., 2015].

Swain et al., 2022, realizaram uma revisão de trabalhos que aplicaram ar comprimido refrigerado na usinagem de diferentes materiais. Eles concluíram que o método pode ser uma opção melhor do que a lubrificação em abundância ou a usinagem a seco. Ressaltam que o processo de resfriamento por tubo de vórtice pode ser tratado como uma técnica ambientalmente amigável, não perigosa e sustentável. Citam também que é uma estratégia ainda em estudo que até agora não foi totalmente adotada pela indústria.

Kumar e Gandotra, 2021, apresentam um estudo sobre o efeito do ar comprimido refrigerado por tubo de vórtice no torneamento do aço AISI 4340 endurecido a 45 HRC, usando insertos de metal duro revestidos com TiAlN. Além do ar frio (mantido a 2 °C), também foram consideradas as usinagens a seco, com MQL e com fluido em abundância. Os resultados indicam que o ar frio proporcionou as maiores reduções na taxa de desgaste de flanco, na rugosidade e na força de usinagem. Ao usar ar frio, vida da ferramenta aumentou 112,25%, a rugosidade diminuiu 58,26% e a força de corte reduziu 55,50% em comparação com a usinagem a seco (pior resultado).

#### 2.4.4 Usinagem a seco

Os principais benefícios associados à usinagem a seco estão relacionados ao fator ambiental, pois caracteriza uma fabricação mais limpa, não gera contaminação e resíduos nocivos ao ambiente e à saúde dos operadores. A redução do impacto ambiental é um tópico importante na produção sustentável. Além disso, é possível reduzir o custo com fluidos de corte e com o tratamento dos mesmos para posterior descarte. Na década de 1980, os custos com fluidos



representavam cerca de 3% dos custos de usinagem, enquanto em 2015 atingiram o patamar de 17% [Jozić et al., 2015]. Comparativamente, os custos de compra e substituição de ferramentas representam uma parcela de 2% a 4% dos custos de produção. No entanto, Khanna et al., 2022b, mostram que a maior contribuição do corte a seco é para a saúde humana, seguido por ecossistema e, por último, pela disponibilidade de recursos, como mostra a Figura 2.19.



Figura 2.19 – Impacto positivo do corte a seco [Adaptado de Khanna et al., 2022b].

A usinagem a seco apresenta resultados promissores no processo de fresamento. No entanto, a técnica está geralmente associada à geração de altas temperaturas na zona de corte, o que reduz a vida da ferramenta devido à diminuição da sua dureza a quente, e cujas falhas ainda comprometem o acabamento. Tais obstáculos podem ser contornados com a utilização de ferramentas com alta resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito ou com a aplicação de MQL [Debnath et al., 2014; Goindi e Sarkar, 2017].

#### 2.4.5 Efeito da lubrificação nas características de usinabilidade por fresamento

Não existe um indicador único para definir a usinabilidade do material; normalmente são analisados três aspectos, a vida da ferramenta, o acabamento da superfície usinada e as forças de usinagem [Montevecchi et al., 2016]. Assim, como supramencionado, o meio lubrificante pode favorecer a usinabilidade, ou seja, diminuir a taxa de desgaste da ferramenta, reduzir a rugosidade da peça e minimizar as forças geradas durante o processo. Contudo, poucos trabalhos na literatura tratam da usinabilidade de materiais fabricados por MAM.

Fortunato et al., 2018, investigaram o fresamento a seco em amostras de aço maraging C300 parcialmente tratadas (PT), não tratadas (NT) e tratadas totalmente (TT). Verificaram que houve um desgaste mínimo da ferramenta na usinagem das amostras PT e máximo na das amostras NT. As forças de usinagem aumentaram devido ao desgaste da ferramenta, mas o aumento foi máximo durante o corte das amostras NT e mínimo no das TT. O aumento da velocidade de corte

diminuiu a rugosidade média (Ra) para as amostras PT e TT. O estudo apresentou  $Ra < 0,45 \mu\text{m}$  em todas as combinações, provavelmente porque o fresamento após o tratamento térmico produz valores de rugosidade muito baixos e reduzido desgaste da ferramenta.

Varghese et al., 2019a, avaliaram o desempenho de insertos de metal duro revestidos com AlCrN e AlTiN durante o fresamento de topo do aço maraging C250, utilizando como técnicas de lubrificação o corte a seco, com fluido em abundância e aplicando nitrogênio líquido (LN<sub>2</sub>). Concluíram que o ambiente criogênico diminuiu a rugosidade da superfície usinada, reduziu a força de usinagem e aumentou a vida da ferramenta de corte em comparação com as demais condições lubrificantes. Varghese et al., 2019b, estudaram também o efeito do tratamento criogênico (CT) a -196 °C em insertos de metal duro sem revestimento (WC-Co), considerando diferentes tempos de imersão (18 h, 24 h e 32 h), em comparação ao inserto sem tratamento, no fresamento de topo a seco do aço C250. Os resultados revelaram que os insertos tratados criogenicamente apresentaram maior tempo de vida e geraram melhor acabamento e menores forças de usinagem durante o fresamento aplicando diferentes rotações. Constataram também que o tempo ideal de imersão é de 24 h (CT-24), além do qual não há melhora na microdureza e na resistência ao desgaste da ferramenta. Em outro trabalho, Varghese et al., 2019c, combinaram o efeito do CT-24 em insertos WC-Co sem revestimento durante o fresamento de topo do aço C250 aplicando corte a seco, com fluido abundante e criogenia. Constataram que a vida do inserto CT-24 foi até 24% maior durante o fresamento com LN<sub>2</sub> a uma rotação de 270 rpm.

## **2.5 Considerações Finais do Capítulo 2**

Pode-se destacar neste capítulo que a indústria tem buscado alternativas para melhorar seus processos e reduzir custos, e a MAM se apresenta como uma boa opção. No entanto, faz-se necessário um processo de usinagem posterior para ajustar formas, dimensões e/ou acabamento do componente. O fresamento é um dos mais importantes, pois permite produzir formas geométricas complexas e possibilita melhorar o acabamento superficial das peças. Contudo, a escolha do meio lubrificante adequado é fundamental. No entanto, os pesquisadores têm concentrado seus esforços para buscar métodos alternativos de lubrificação em usinagem, que ofereçam menor risco à saúde dos operadores e, ao mesmo tempo, sejam ambientalmente amigáveis.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será apresentado o método definido para este estudo, os materiais envolvidos para execução dos testes e como os experimentos foram planejados. A Figura 3.1 ilustra o sistema experimental.

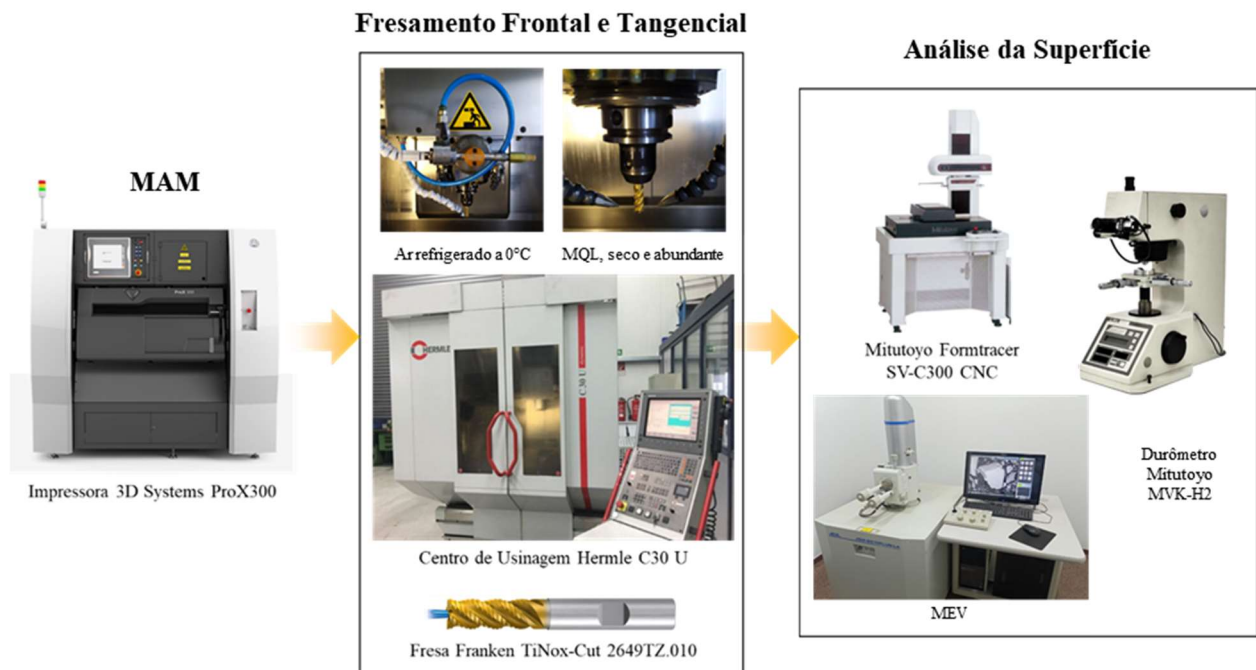


Figura 3.1 – Sistema experimental.

#### 3.1 Aço Maraging C300

A escolha do aço maraging C300 é por ele ser um aço martensítico com boas propriedades mecânicas quando comparado com aços convencionais de alta resistência. Como mencionado, a martensita não é causada por um alto teor de carbono, mas por uma alta concentração de níquel, o que reduz sua usinabilidade. O teor de Ni nos aços maraging pode variar de 12 a 25% em peso. No entanto, descobriu-se que 18% em peso de Ni possui uma combinação de propriedades mais desejável em relação a outras e, como tal, alcançou proeminência na engenharia ao longo dos anos [Asala et al., 2023]. A composição química do material é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição do aço maraging C300 (% massa) [Ben-Artzy et al., 2021].

Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr	C	Mn, Si	P, S	Fe
17 – 19	8,5 – 9,5	4,5 – 5,2	0,6 – 0,8	0,05 – 0,15	< 0,50	< 0,03	< 0,10	< 0,01	Rest.

Doze corpos de prova de aço maraging C300, em formato cúbico com 20 mm de aresta, foram fabricadas em MAM pela tecnologia SLM em uma máquina de impressão 3D Systems modelo ProX300. Após a fabricação, as peças foram removidas da plataforma de impressão pelo processo de eletroerosão a fio (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Peça removida da plataforma de impressão.

### 3.2 Experimentação

Na experimentação (fresamento tangencial e frontal) foi utilizado o centro de usinagem Hermle C30 U Dynamic e a fresa de topo inteiraça de metal duro Franken TiNox-Cut 2649TZ.010 com revestimento TiN/TiAlN, quatro arestas, 10 mm de diâmetro, 22 mm de comprimento de corte e ângulo de hélice de 45°. Os parâmetros de corte utilizados no fresamento tangencial foram velocidade de corte  $v_c = 120$  m/min, avanço por dente  $f_z = 0,04$  mm/dente, profundidade de corte axial  $a_p = 1$  mm e profundidade de corte radial  $a_e = 4$  mm. Estes níveis permaneceram inalterados, com o objetivo de avaliar se o meio lubrificante influencia na rugosidade e no aspecto superficial (textura) das amostras fabricadas por MAM. Os meios utilizados foram o fluido de corte miscível em água Fuchs Ecocool aplicado em abundância, o corte a seco, o ar comprimido refrigerado por tubo de vórtice a 0 °C direcionado na zona de corte a uma pressão de 400 kPa (Figura 3.3a) e o MQL com aplicação do fluido de corte Fuchs Ecocut Mikro Plus 20 a uma vazão de 80 ml/h e pressão de 156 kPa (Figura 3.3b).

Na primeira etapa, as amostras foram submetidas às operações de fresamento tangencial concordante e discordante. Em quatro amostras foi efetuado um passe no sentido concordante e, nas outras quatro amostras, um passe no sentido discordante para cada meio lubrificante com os parâmetros de corte fixos, totalizando oito amostras analisadas. Na segunda etapa, quatro amostras foram submetidas à operação de fresamento frontal, com os mesmos níveis de parâmetros e meios lubrificantes utilizados na operação de fresamento tangencial. Vale mencionar que a profundidade axial do fresamento frontal equivale à profundidade radial do fresamento tangencial, e vice-versa.

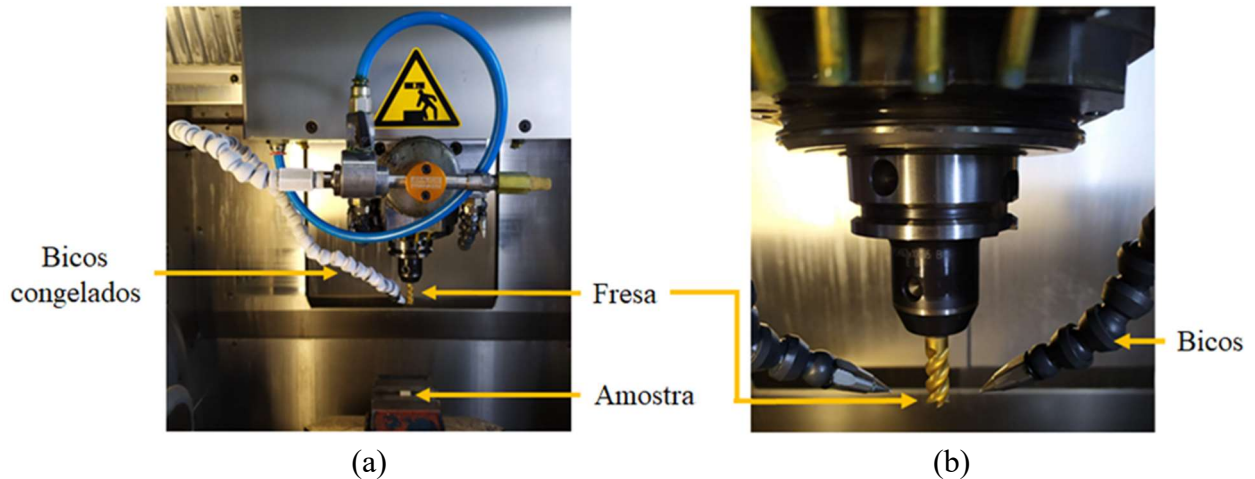


Figura 3.3 – Montagem dos testes: (a) com ar resfriado a 0 °C; (b) com aplicação de MQL e fluido de corte em abundância.

### 3.3 Imagem da Textura

Neste estudo foram obtidas as imagens por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) por incidência de feixe de elétrons JEOL, modelo JSM-6010 LA (Figura 3.4a), com aumento de até 300.000x. As imagens foram capturadas para todas as amostras antes e após a operação de fresamento e para cada um dos métodos de lubrificação, com objetivo de realizar uma análise comparativa das texturas superficiais das amostras (Figura 3.4b).



Figura 3.4 – Microscópio eletrônico de varredura: (a) MEV JEOL JSM-6010 LA (<https://forbones.org/jeol-sem>); (b) amostra posicionada no sistema de fixação.

As imagens foram capturadas com uma voltagem de 15 kV e magnificação de 250x, 1000x, 2500x e 5000x. Não houve necessidade de preparação das amostras, apenas limpeza. Além das imagens também foram realizadas as análises de Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS), para cada uma das amostras, com o objetivo de avaliar se o processo de fresamento em conjunto com o meio lubrificante pode apresentar alterações na composição química superficial das amostras.

### 3.4 Medição de Rugosidade

Após as análises MEV/EDS, as amostras foram submetidas à medição de rugosidade. Neste trabalho foram considerados, além da rugosidade média ( $R_a$ ), também a rugosidade média parcial ( $R_z$ ) e a rugosidade total ( $R_t$ ). Os valores de  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_t$  foram adquiridos no medidor de rugosidade e contorno Mitutoyo Formtracer SV-C300 CNC sob condições controladas de temperatura ( $20,0 \pm 0,5$  °C) e umidade do ar (abaixo de 65%). A análise dos parâmetros de rugosidade foi realizada com filtro de onda Gaussiana, comprimento de amostragem  $l_e = 0,8$  mm e comprimento de avaliação  $l_m = 20 \cdot l_e = 16$  mm. As medições foram realizadas com a utilização de um apalpador com raio de  $2 \mu\text{m}$ , ângulo da ponta de  $60^\circ$ , força de medição de  $0,75$  mN e velocidade de avanço de  $1,0$  mm/s. Foram realizadas cinco medições em diferentes posições distribuídas na superfície de cada amostra. Basicamente, essas posições de medição concentram-se nas extremidades e na região central da amostra, proporcionando um resultado com maior confiabilidade em relação às variações da superfície. A Figura 3.5a representa as posições e deslocamentos de avanço do apalpador nos sentidos de medição A e B, perpendiculares entre si. Na Figura 3.5b estão ilustrados os sentidos A e B representados na amostra.

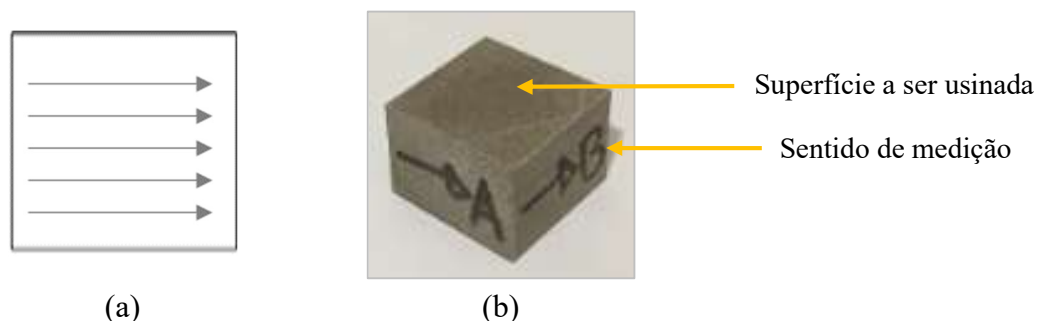


Figura 3.5 – Medição da rugosidade da superfície usinada por fresamento: (a) distribuição dos cinco pontos de medição e o sentido de deslocamento do apalpador; (b) indicação dos sentidos de medição A e B

Após as medições de rugosidade (Ra, Rz e Rt), os resultados para cada combinação entre meio lubrificador e fresamento foram avaliados para propor qual a melhor alternativa para a condição analisada, os resultados encontram-se na Tabela A.1 (APÊNDICE A).

### **3.5 Medição de Microdureza**

A medição da microdureza das amostras foi realizada antes e após a usinagem com o durômetro Mitutoyo MVK-H2, utilizando um padrão de dureza Mitutoyo 307 HV<sub>0,1</sub>, com força aplicada de 0,1 kgf, penetrador em cone de diamante 136° e tempo de força aplicada de 10 s. Antes do fresamento, a medição de microdureza foi realizada em uma das amostras, admitindo-se que se houvessem diferenças entre as amostras, ela não seria significativa. Assim, a média de cinco medições de dureza apresentou uma dureza de 310 HV<sub>0,1</sub>. Após o fresamento, a medição foi realizada na face usinada de todas as amostras, e os resultados encontram-se no APÊNDICE B.

### **3.6 Considerações Finais do Capítulo 3**

Este capítulo apresenta o método utilizado para execução dos testes, demonstrando quais equipamentos foram necessários para conduzir o estudo, além de qual preparação foi necessária para executar tal atividade. Como citado anteriormente, a análise da rugosidade é um dos principais indicadores de qualidade de um produto acabado ou semiacabado. As imagens obtidas pelo MEV e as composições químicas por EDS complementam as análises da superfície das amostras. Este tipo de estudo em amostras fabricadas por MAM com pós-processamento em fresamento são raras na literatura, principalmente em relação à comparação de meios lubrificantes orientada a minimizar os impactos ecológicos e sanitários.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As seções a seguir apresentarão os resultados relacionados a medição de rugosidade, avaliação da textura via MEV/EDS e verificação da microdureza, para as operações de fresamento (tangencial e frontal) com diferentes meios lubrificantes.

### 4.1 Amostras Fabricadas por MAM

Considerando os sentidos de medição A e B (Figura 3.5), os valores de rugosidade registrados (média  $\pm$  desvio padrão) na amostra gerada por manufatura aditiva metálica (MAM), antes do processo de fresamento, estão registrados na Tabela 4.1. Percebe-se que o menor valor de Ra é apresentado no sentido de medição A, enquanto Rz e Rt exibem menores valores no sentido B. Porém, é importante observar que o desvio padrão em alguns casos é elevado, podendo deixar os resultados equilibrados. Salienta-se que as amostras fabricadas por MAM são conhecidas por terem superfícies relativamente rugosas, causadas por diferentes parâmetros como tamanho do pó, espessura da camada, parâmetros de varredura e energia do laser [Yang et al., 2017].

Tabela 4.1 – Valores de rugosidade das amostras fabricadas por MAM

Sentido de Medição	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]
A	5,475 $\pm$ 0,404	33,052 $\pm$ 1,732	57,758 $\pm$ 4,921
B	5,590 $\pm$ 0,339	32,234 $\pm$ 2,980	55,692 $\pm$ 5,946

A microestrutura fabricada por MAM é tipicamente anisotrópica, com uma textura de grão direcional. A deposição de pó multicamada, em conjunto com as cargas de aquecimento cíclico aplicadas às camadas previamente solidificadas, resulta em uma microestrutura totalmente diferente. Assim, as propriedades mecânicas são diferentes nas direções horizontal e vertical. Devido à alta taxa de resfriamento durante a solidificação, os grãos tendem a se alongar perpendicularmente aos limites da poça de fusão [Solberg et al., 2021]. As amostras orientadas verticalmente apresentam maior concentração de tensão que as orientadas horizontalmente devido ao fluxo de calor nas baixas temperaturas [Bhardwaj e Shukla, 2018] o que, provavelmente, também impactou nos resultados da medição de rugosidade encontrados neste estudo, em que as direções A e B apresentam valores de rugosidade distintos. Ahmadkhaniha et al., 2021, observaram partículas isoladas parcialmente fundidas e aderidas à superfície das amostras, obtendo valor de rugosidade média ainda maior que o registrado neste estudo (Ra = 9,2  $\mu\text{m}$ ).



A Figura 4.1 apresenta a imagem da textura da amostra gerada por MAM observada por meio do MEV. Observam-se porosidades na superfície da amostra devido às camadas de pó sequenciais, bem como o caminho percorrido pelo laser para realizar a fusão seletiva do pó (SLM), o que faz com que a porosidade seja localizada, principalmente, na fronteira entre as camadas, observada com mais evidência. A presença de irregularidades na superfície da amostra provavelmente tem relação direta com a porosidade causada pelo processo de fusão do material. As imagens estão de acordo com as observadas por Townsend et al., 2016.

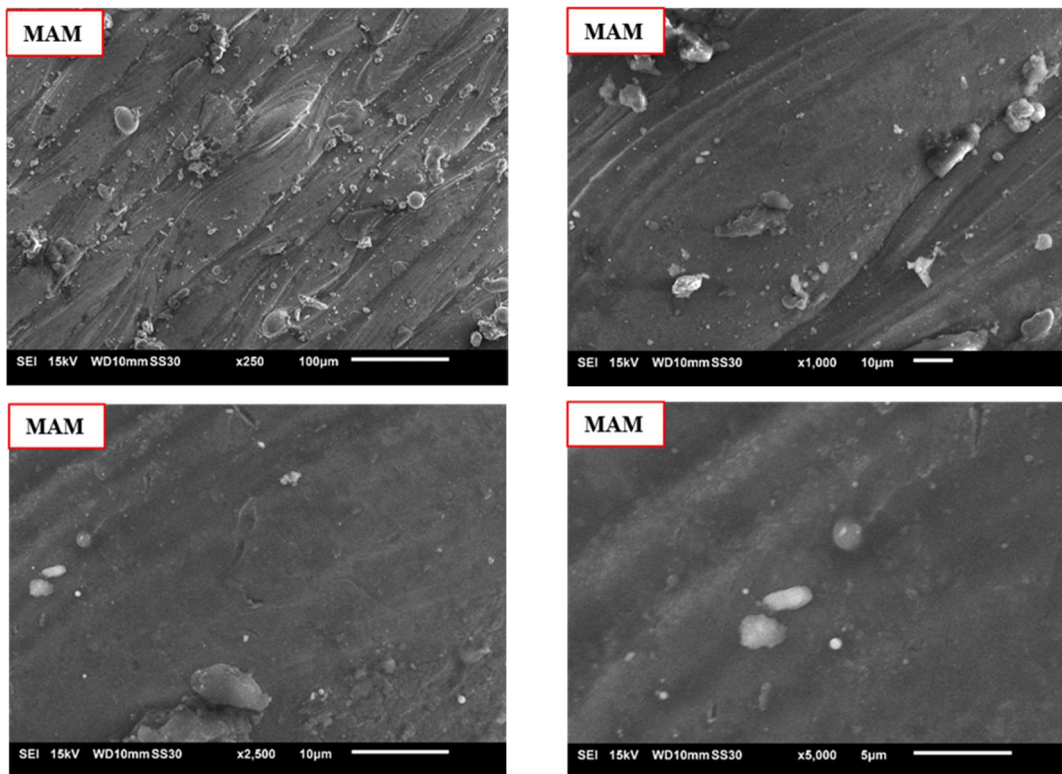


Figura 4.1 – Imagens MEV da textura da amostra fabricada por MAM.

Ahmadkhaniha et al., 2021, citam que, devido às altas taxas de resfriamento e solidificação em camadas no processamento da MAM, a microestrutura do material é prejudicada, impactando em microestruturas anisotrópicas e fora do equilíbrio, incluindo fases metaestáveis, porosidade, pó não fundido e aprisionamento de gás. De acordo com Habassi et al., 2023, esses defeitos são tipicamente o resultado da fusão incompleta do pó e das bolhas de gás presas na fusão solidificação em camadas. Além disso, Tian et al., 2017 mencionam que quando a potência de varredura é muito alta, aumenta a ocorrência de salpicos de pó devido à intensidade de energia excessiva na poça de fusão, o que pode levar a um acabamento superficial comparativamente ruim. Percebe-se na Figura 4.1 que alguns fatores afetam consideravelmente a rugosidade da superfície (ver Tabela 4.1),

provavelmente os mesmos citados pelos autores (fusão incompleta do pó e até mesmo salpicos de pó durante a fusão do material).

Shamsdini et al., 2021, explicam que tensões internas resultantes de gradientes de temperatura acentuados e altas taxas de resfriamento são os fatores que afetam fortemente as propriedades mecânicas, a microestrutura resultante e a ocorrência de poros e falhas na superfície. Além disso, Ahmadkhaniha et al., 2021, mencionam que superfícies mais rugosas atuam como concentradores de tensão perto da superfície do material, reduzindo a resistência à fadiga e causando falha prematura do componente. Desta forma, o pós-processamento subtrativo, como fresamento, acaba sendo necessário para atender aos requisitos desejados. No presente trabalho também foram obtidos resultados melhores de rugosidade e microdureza após o processo de fresamento, conforme mostrarão as Seções 4.2 e 4.3.

Solberg et. al, 2021, analisaram o comportamento à fadiga direcional, indicando o efeito da orientação do crescimento da trinca, de acordo com as camadas de construção, paralela e perpendicular. Verificaram que o comportamento à fadiga está correlacionado com a orientação da construção e a rugosidade da superfície. Concluíram que os corpos de prova construídos na orientação vertical têm uma vida de fadiga mais longa em comparação com os construídos na orientação horizontal. No presente trabalho, o comportamento à fadiga não foi analisado, mas uma pequena variação nos valores de rugosidade em relação aos sentidos de medição A e B foi observada, mostrando que este é um fator sem influência sobre o acabamento.

Azizi et al., 2019, citam que a microestrutura e as reações de precipitação no C300 durante o SLM mostraram que uma estrutura celular-dendrítica muito fina se desenvolve durante o processo, juntamente com austenita revertida. A formação de austenita revertida é relatada como resultado do enriquecimento local com Ni, que surge durante o envelhecimento. Como o Ni é um dos principais elementos de liga nos aços maraging, ele é um elemento estabilizador da austenita. Assim, a temperatura de transição local da martensita para a austenita é reduzida. Como resultado da distribuição não-homogênea dos elementos de liga, o material apresenta porosidade limitada (menos de 1,0 vol.%) por toda parte, juntamente com alguns detalhes da estrutura. Neste trabalho também se observou uma distribuição não-homogênea dos elementos da liga. A análise EDS apresenta a distribuição dos elementos encontrados na amostra (Figura 4.2).

Casalino et al., 2015, estudaram a influência dos parâmetros do processo SLM do aço maraging C300 e concluíram que a dureza, a resistência mecânica e a rugosidade da superfície correlacionam-se positivamente com a densidade das amostras. Como indicado na Tabela 4.1, a rugosidade das amostras é alta, e a Figura 4.1 mostrou porosidades na superfície da amostra, que

tem relação direta com a densidade. A microdureza também apresenta diferenças antes e após o fresamento: antes, o valor é de 310 HV<sub>0,1</sub>; após, os valores aumentaram, chegando a 357 HV<sub>0,1</sub>.

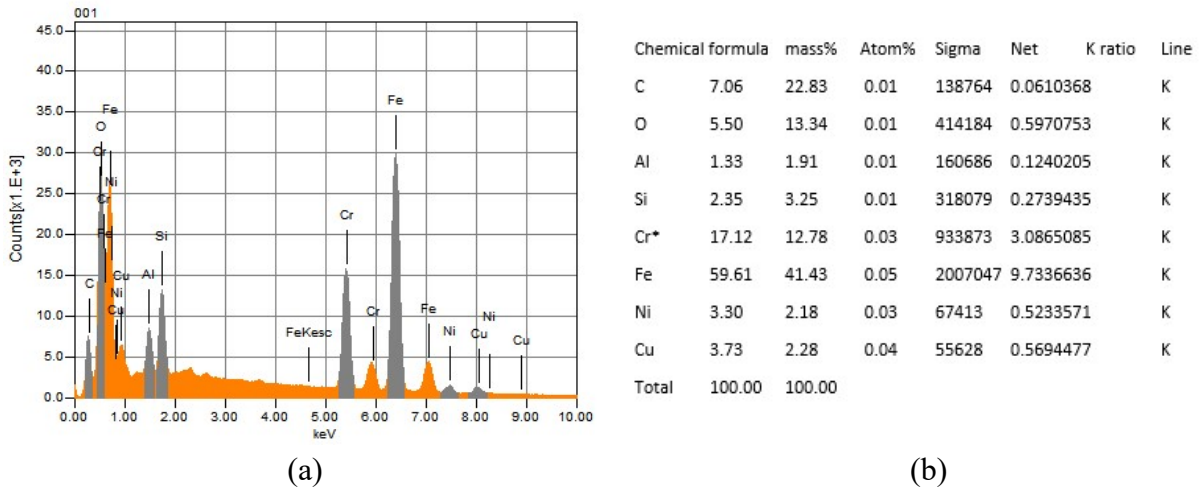


Figura 4.2 – Análise EDS da amostra fabricada por MAM.

## 4.2 Superfícies Produzidas por Fresamento Tangencial

Esta seção foca nos resultados obtidos pelas operações de fresamento tangencial concordante e discordante, contemplando a medição de rugosidade da superfície usinada (parâmetros Ra, Rz e Rt). Além disso, também serão apresentadas as imagens das texturas obtidas por MEV, as análises de EDS e as medições de microdureza.

### 4.2.1 Rugosidades das superfícies usinadas

A Figura 4.3 e a Tabela 4.2 apresentam os resultados da medição de rugosidade (média  $\pm$  desvio padrão) para os parâmetros Ra, Rz e Rt, obtidos em diferentes condições de operação no fresamento tangencial do aço maraging C300. Realizou-se uma média considerando os valores coletados nos sentidos A e B, pois acredita-se que avaliar os resultados separadamente após o fresamento não é relevante, uma vez que a superfície foi submetida a um processo de acabamento. Todos os valores mensurados estão na Tabela A.1 (APÊNDICE A). As linhas tracejadas indicam a média das médias em cada parâmetro.

Avaliando Ra, percebe-se que os menores valores foram produzidos no fresamento concordante com fluido de corte em abundância, seguido do corte com ar comprimido refrigerado a 0 °C, depois com aplicação de MQL e por último no corte a seco. Por outro lado, os piores resultados foram obtidos no fresamento discordante, apresentados maiores valores para Ra com

aplicação de MQL, na sequência o corte com ar refrigerado a 0 °C, depois o corte com fluido em abundância, e por último o corte a seco. Nota-se que o corte a seco é a única condição em que o fresamento discordante favorece a obtenção de menores valores para Ra que o concordante.

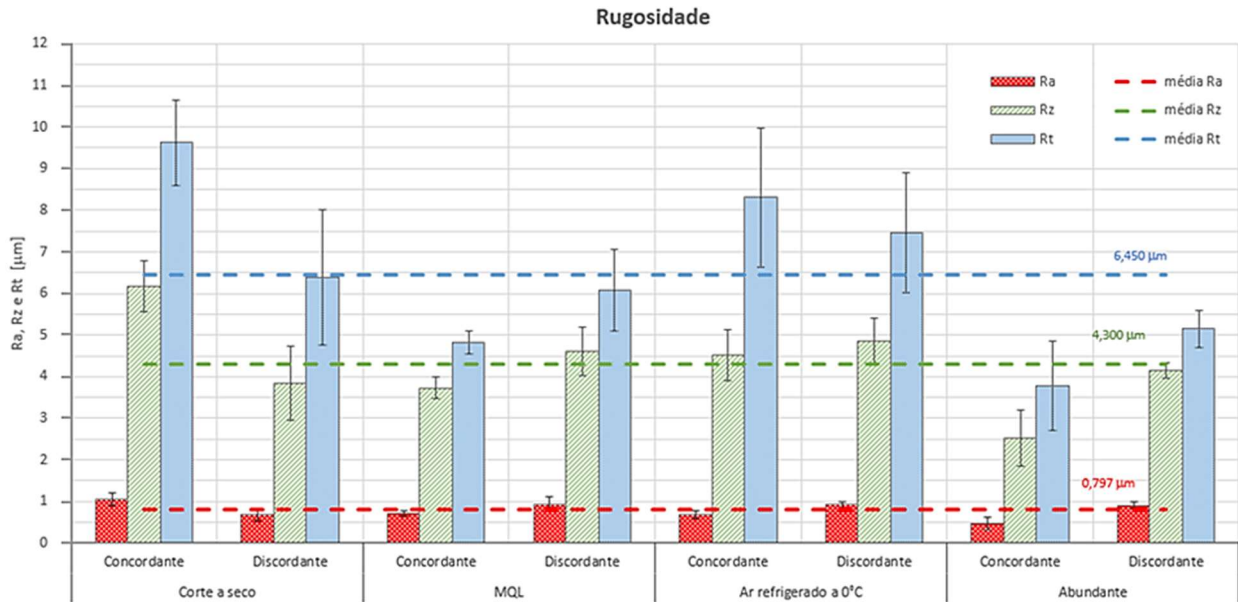


Figura 4.3 – Resultado da medição de rugosidade Ra, Rz e Rt para as diferentes condições analisadas no fresamento tangencial. As barras de erros representam o desvio-padrão.

Tabela 4.2 – Valores de rugosidade das amostras produzidas por fresamento tangencial

Lubrificante	Sentido do corte	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]
Abundante	concordante	0,466 $\pm$ 0,154	2,532 $\pm$ 0,669	3,788 $\pm$ 1,074
	discordante	0,910 $\pm$ 0,071	4,157 $\pm$ 0,189	5,156 $\pm$ 0,440
MQL	concordante	0,721 $\pm$ 0,061	3,734 $\pm$ 0,259	4,817 $\pm$ 0,277
	discordante	0,939 $\pm$ 0,165	4,607 $\pm$ 0,573	6,069 $\pm$ 0,979
Ar refrigerado	concordante	0,688 $\pm$ 0,095	4,509 $\pm$ 0,618	8,307 $\pm$ 1,675
	discordante	0,918 $\pm$ 0,075	4,862 $\pm$ 0,540	7,447 $\pm$ 1,442
Corte a seco	concordante	1,042 $\pm$ 0,153	6,170 $\pm$ 0,621	9,626 $\pm$ 1,024
	discordante	0,690 $\pm$ 0,153	3,830 $\pm$ 0,153	6,389 $\pm$ 1,634

Para Rz, os menores valores foram produzidos no fresamento concordante com fluido de corte em abundância, seguido do corte com aplicação de MQL, depois com ar refrigerado e por último o corte a seco. Os piores resultados foram obtidos no fresamento discordante, apresentados valores maiores para Rz no corte com ar comprimido a 0 °C, seguido pela aplicação de MQL,

depois com fluido em abundância, e por último o corte a seco. Novamente o corte a seco teve seu menor resultado no fresamento discordante em comparação ao concordante.

Investigando  $R_t$ , os menores resultados foram obtidos no corte concordante com aplicação de lubrificação em abundância, seguido por MQL, depois com ar comprimido refrigerado a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  e por último no corte a seco. O fresamento discordante gerou os piores resultados, apresentando os maiores valores para  $R_t$  com aplicação de ar comprimido a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , seguido pelo corte a seco, depois pela aplicação de MQL e por último com aplicação de lubrificação abundante. Observa-se também que no corte a seco e com ar refrigerado que os resultados foram melhores no fresamento discordante que no concordante.

Percebe ainda pela análise dos resultados que os valores de  $R_z$  e  $R_t$  são menores quando o corte é realizado com ação lubrificante, preferencialmente em abundância, seguido da aplicação em MQL. De acordo com Shokrani et al., 2012, os fluidos de corte têm sido usados em operações de usinagem há décadas para reduzir o atrito (efeito lubrificante) nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça e remover o calor gerado na zona de corte (efeito refrigerante) devido à deformação plástica severa do cavaco.

Os resultados também apontam que o fresamento concordante tende a gerar os melhores resultados, exceto para o corte a seco, em que os melhores foram no sentido discordante. Segundo Jasinevicius, 2022, o corte concordante possibilita menores vibrações e melhor qualidade superficial. Além disso, a maior espessura no início do corte pode ter facilitado a penetração do lubrificadorrefrigerante, reduzido o atrito (ação lubrificante do MQL e do fluido abundante) e proporcionado melhor acabamento.

No caso do ar comprimido refrigerado a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Shokrani et al., 2012, mencionam que a aplicação de ar refrigerado geralmente proporciona melhor rugosidade que o corte a seco. No entanto, quando comparado com MQL, o uso do ar refrigerado produz um acabamento inferior, assim como os resultados obtidos neste estudo, principalmente nos valores de  $R_z$  e  $R_t$ .

No fresamento discordante, tem-se a variação da espessura do cavaco de um mínimo para um máximo, e o atrito elevado no contato inicial ferramenta-peça tende a prejudicar o acabamento [Jasinevicius, 2022]. Como no primeiro caso o fluido está presente em abundância na zona de corte, o atrito tende a ser menor (diferentemente do efeito causado pela dificuldade de penetração do MQL e do ar refrigerado). Por outro lado, no corte a seco, esse atrito tende a elevar a temperatura, e o maior calor gerado pela ausência de lubrificadorrefrigeração pode ter reduzido a resistência ao corte do material, favorecendo a penetração da ferramenta [Sharma et al., 2022] e a redução da rugosidade.

Conforme Deonísio et al., 1999, não se pode generalizar qual sentido de fresamento é mais adequado, concordante ou discordante, pois depende da máquina-ferramenta e do tipo de material a ser usinado. Sempre haverá predominância de um em relação ao outro, no que se refere à rugosidade obtida. Materiais mais dúcteis, com maiores tendências para a formação da aresta postiça de corte, tendem a apresentar resultados mais satisfatórios quando submetidos ao fresamento discordante. Em contrapartida, materiais que apresentam maior tenacidade, como o aço maraging C300, os valores de rugosidade tendem a ser menores quando produzidos por fresamento concordante, convergindo com a maioria dos resultados encontrados neste estudo.

Por fim, não foram encontrados trabalhos na literatura que abordem o fresamento tangencial concordante e discordante, em aço maraging, com diferentes condições de lubrificação. Este assunto ainda pode ser explorado, uma vez que, como supracitado, a baixa qualidade superficial das peças fabricadas por MAM pode muitas vezes limitar a sua aplicação.

#### **4.2.2 Imagens de textura**

Optou-se por analisar via MEV as imagens das texturas das amostras produzidas por fresamento concordante aplicando fluido de corte em abundância (Figura 4.4a) e MQL (Figura 4.4b), pois são as que geraram os menores valores de rugosidade. No caso,  $R_t$  foi o parâmetro utilizado como principal critério de avaliação; ele permite realizar uma avaliação mais completa, pois considera a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação [Piratelli Filho, 2011].

Nota-se nas imagens que a textura da superfície resultante da aplicação de fluido de corte em abundância apresenta boa homogeneidade e marcas suaves causadas pela ferramenta. Isso reflete os menores valores de  $R_z$  e  $R_t$  medidos, ou seja, boa uniformidade na superfície da amostra. Aplicando MQL, observa-se que a textura também foi favorecida pela ação lubrificante do fluido.

O pior resultado obtido foi no corte concordante a seco, em que se observam marcas acentuadas na superfície da amostra causadas pela ferramenta de corte sem ação lubrificante (Figura 4.5). Isso afetou os valores de rugosidade. Além disso, as temperaturas mais elevadas na zona de corte, em função da ausência de lubrificação, podem ter contribuído para adesão do material à superfície usinada.

O segundo pior resultado de rugosidade foi no fresamento discordante com aplicação de ar refrigerado a 0 °C (Figura 4.6). Segundo Sartori et al., 2016, isso pode ter relação com o resfriamento da superfície induzida pelo uso do ar refrigerado: a expansão térmica na zona de corte e a fragilização do material durante a sua remoção podem ser as causas dos defeitos superficiais.



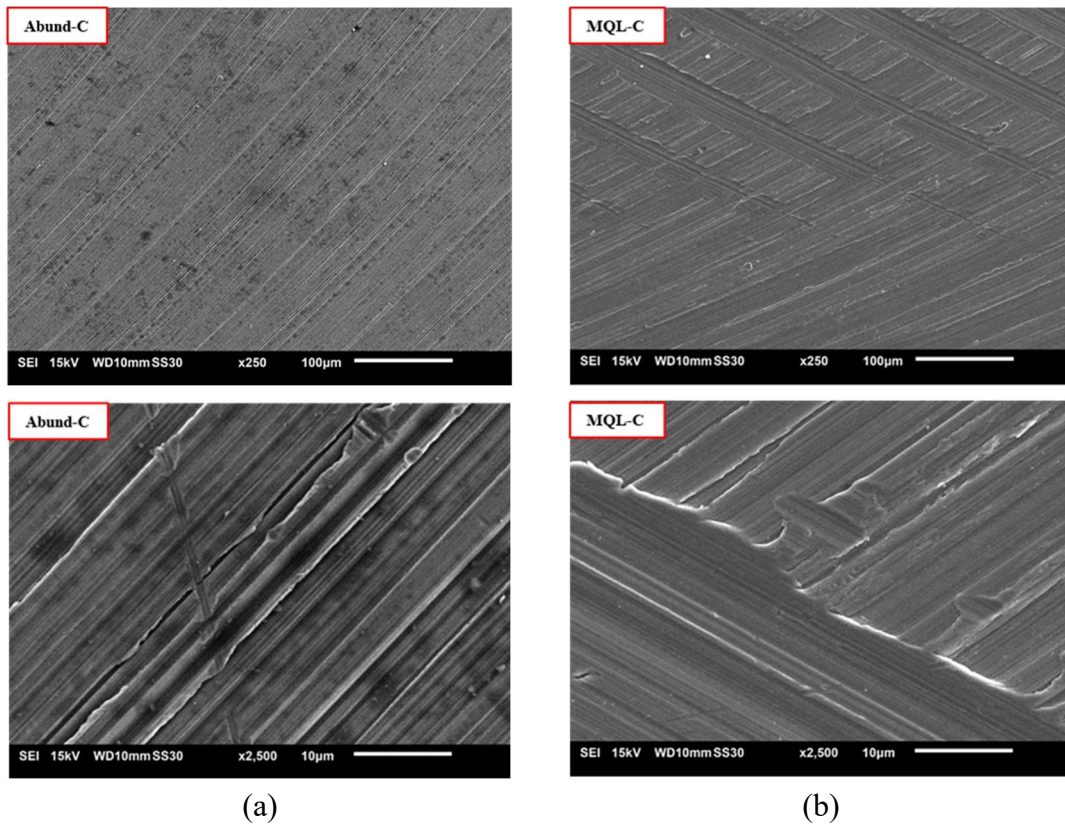


Figura 4.4 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento concordante aplicando: (a) fluido de corte em abundância; (b) MQL.

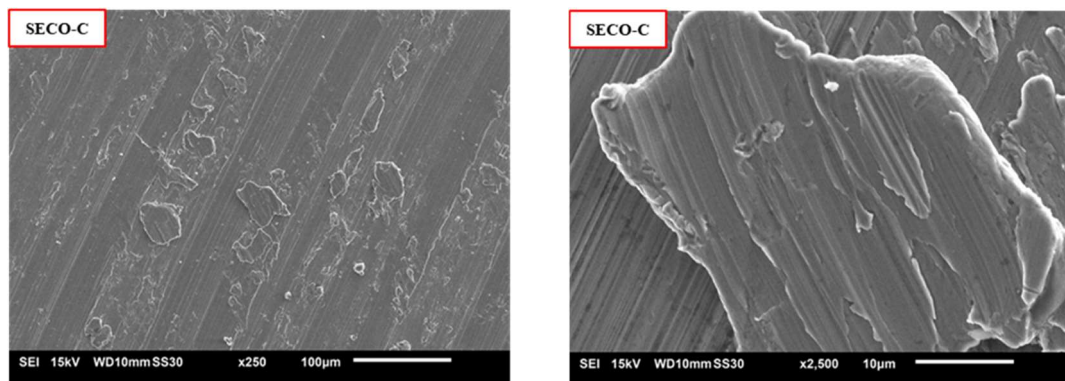


Figura 4.5 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento a seco concordante.

Ainda no fresamento discordante, o corte a seco teve resultado surpreendente, pois a superfície usinada apresentou bons resultados de rugosidade. O valor de  $R_a$  foi o menor quando o corte a seco é comparado às demais condições de lubrificação aplicadas; os valores de  $R_z$  e  $R_t$  foram desfavoráveis apenas na comparação com fluido em abundância. Notou-se também no

fresamento discordante a seco (Figura 4.7) que a presença de material aderido foi menor que no concordante a seco (Figura 4.5), favorecendo assim a obtenção de menores valores de rugosidade.

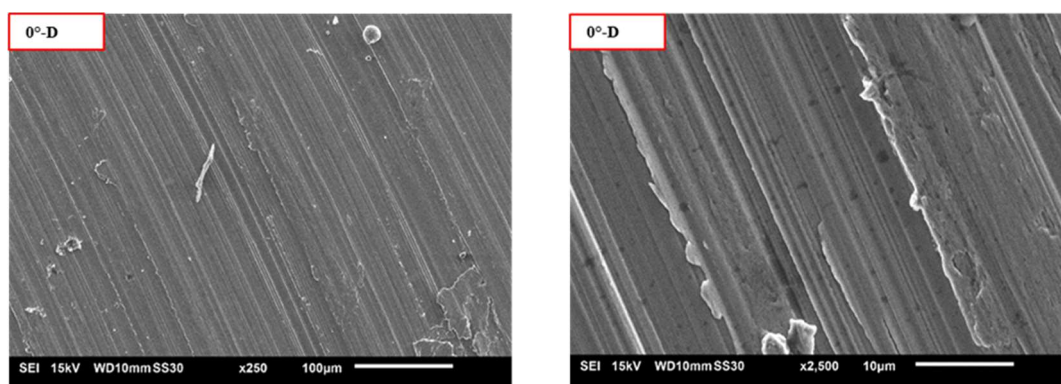


Figura 4.6 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento discordante aplicando ar refrigerado a 0 °C.

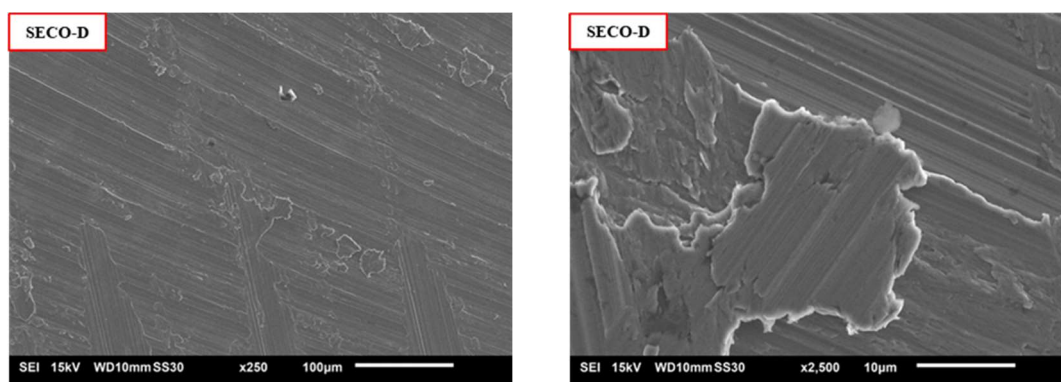


Figura 4.7 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento a seco discordante.

As demais imagens MEV tomadas após o fresamento tangencial sob diferentes meios lubrificantes estão mostradas da Figura C.1 à Figura C.8 (APÊNDICE C).

Em relação às composições químicas das amostras obtidas via análise EDS (ver APÊNDICE D), foram observadas variações no acumulado de alguns elementos químicos antes e após a operação de fresamento tangencial, para todos os meios lubrificantes, conforme apresentado na Figura 4.8.

Como supracitado, o aço maraging C300 obtido por SLM apresenta distribuição não-homogênea dos elementos de liga [Azizi et al., 2019], e as análises mostram tais variações. No caso, observa-se que o oxigênio e o alumínio são elementos encontrados na amostra antes do fresamento tangencial e que não são mais detectados após o processo; além disso, o teor de ferro



fica cerca de 15% maior após a operação de corte. A presença de O pode ser um fator de oxidação. Além disso, conforme Hassanpour et al., 2016, a porcentagem em peso de carbono é aumentada na superfície, podendo ser o resultado de austenita retida e decomposição de lubrificante à base de mineral na superfície e difusão de C para a peça de trabalho.

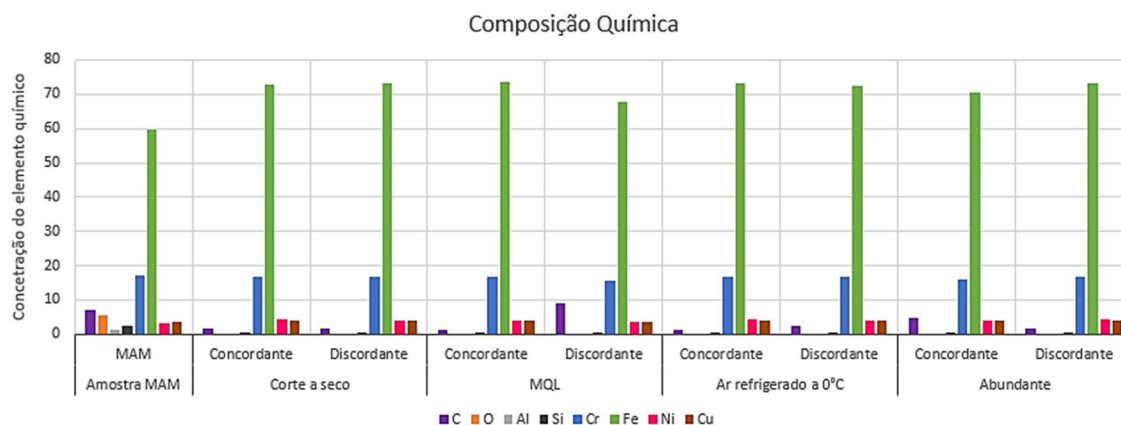


Figura 4.8 – Variações na composição química das amostras antes e após o fresamento tangencial.

Segundo Jäggle et. al, 2014, a quantidade de transformação de martensita em austenita depende da composição da liga. Para os clássicos aços maraging 18 Ni, o alto teor de Ni em combinação com Ti do revestimento da fresa de topo leva à precipitação da fase  $Ni_3Ti$ . Nesta fase, os átomos da sub-rede de Ni podem ser (parcialmente) substituídos por Fe, enquanto os átomos da sub-rede de Ti podem ser substituídos por Al. Provavelmente por isso houve aumento da concentração de Fe o que, conseqüentemente, impactará também na microdureza.

O teor de carbono também varia: sua maior concentração foi percebida no fresamento discordante com aplicação da técnica MQL, seguido do concordante com fluido em abundância. Isso provavelmente pode ter alguma relação com a afinidade química do aço maraging com os fluidos utilizados e/ou com a ferramenta de corte. Também pode estar relacionado com o resultado de austenita retida e decomposição de lubrificante à base de mineral na superfície e difusão de C para a peça de trabalho [Hassanpour et al., 2016].

#### 4.2.3 Verificação da alteração de microdureza

A Figura 4.9 ilustra os valores obtidos na medição de dureza das amostras submetidas ao processo de fresamento tangencial. Realizou-se uma média de cinco medições e todos os valores mensurados estão na Tabela B.1 (APÊNDICE B). A linha tracejada indica a média das médias.

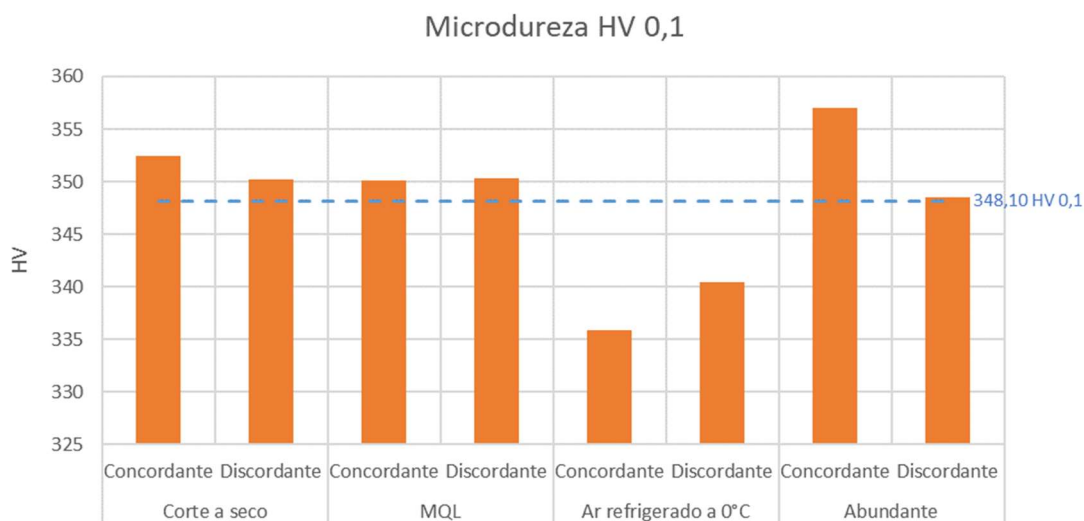


Figura 4.9 – Gráfico dos resultados da medição de microdureza para as diferentes condições de operação no fresamento tangencial.

A partir do gráfico, nota-se que os valores se mantiveram próximo da média (348 HV<sub>0,1</sub>) nas condições a seco, MQL e no corte discordante com fluido de corte em abundância. O maior valor foi no corte concordante com fluido em abundância (357 HV<sub>0,1</sub>) e os menores valores no fresamento concordante (336 HV<sub>0,1</sub>) e discordante (340 HV<sub>0,1</sub>) com ar refrigerado. Constata-se que o fresamento tangencial aumentou em cerca de 11% em relação à média dos valores de microdureza, uma vez que o valor medido antes da usinagem apresentava dureza de 310 HV<sub>0,1</sub>.

Segundo Ahmadkhaniha et al., 2021, durante o processo de solidificação rápida na MAM, tensões internas e alta concentração de discordâncias nos contornos dos grãos são obtidas. Quando realizado o pós-processo, esses efeitos são reduzidos, pois a maior microdureza pode estar associada a um menor tamanho médio de grão e efeitos de alívio de tensões. Além disso, o aumento da concentração de Fe em cerca de 15% após o fresamento tangencial, conforme dados obtidos pela análise de EDS (Figura 4.8), podem reforçar o resultado obtido neste estudo.

### 4.3 Superfícies Geradas por Fresamento Frontal

Esta seção aborda os resultados obtidos na superfície usinada do aço maraging C300 pelo fresamento frontal, considerando a medição dos parâmetros Ra, Rz e Rt. Também serão analisadas as imagens das texturas via MEV/EDS e as medições de microdureza.

### 4.3.1 Rugosidades das superfícies usinadas

A Figura 4.10 e a Tabela 4.3 apresentam os resultados da medição (média  $\pm$  desvio padrão) de rugosidade (Ra, Rz e Rt) da superfície usinada do aço maraging C300 por fresamento frontal, nas diferentes condições de lubrificação. Considerou-se a média dos valores obtidos nos sentidos A e B pelos mesmos motivos apresentados na Subseção 4.2.1. Todos os valores mensurados estão na Tabela A.2 (APÊNDICE A). As linhas tracejadas indicam a média das médias em cada parâmetro.

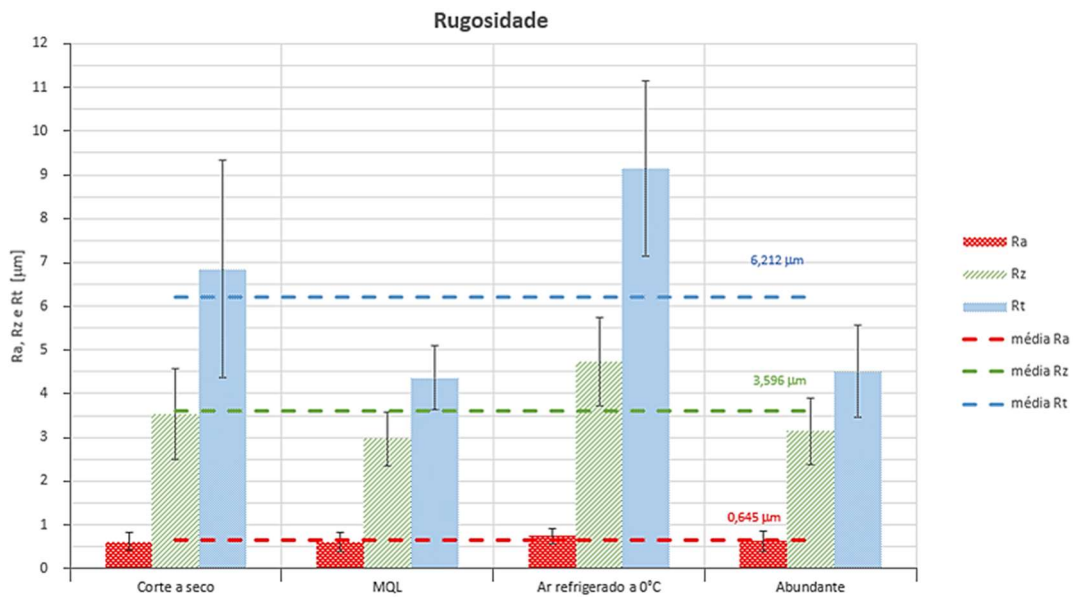


Figura 4.10 – Resultado da medição de rugosidade Ra, Rz e Rt para as diferentes condições lubrificantes no fresamento frontal. As barras de erros representam o desvio-padrão.

Tabela 4.3 – Valores de rugosidade das amostras produzidas por fresamento frontal

Lubrificador	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]
MQL	0,601 $\pm$ 0,212	2,964 $\pm$ 0,618	4,352 $\pm$ 0,731
Abundante	0,623 $\pm$ 0,240	3,140 $\pm$ 0,768	4,507 $\pm$ 1,061
Corte a seco	0,612 $\pm$ 0,205	3,537 $\pm$ 1,042	6,844 $\pm$ 2,487
Ar refrigerado	0,743 $\pm$ 0,170	4,744 $\pm$ 1,010	9,147 $\pm$ 1,996

Avaliando apenas os valores de Ra, percebe-se uma proximidade dos resultados obtidos para as condições MQL, fluido de corte em abundância e corte a seco ( $\approx$  0,02  $\mu\text{m}$ ). Contudo, ao verificar também os valores de Rz e Rt e suas respectivas barras de erros (mais ou menos uma vez o desvio padrão), nota-se que o MQL e o fluido em abundância são as melhores opções, pois

resultam em superfícies mais uniformes e com picos e vales menos expressivos, quando comparados ao corte a seco e com ar comprimido refrigerado a 0 °C.

### 4.3.2 Imagens de textura

A Figura 4.12 ilustra as imagens das texturas das superfícies usinadas para os menores valores de rugosidade média ( $R_a$ ) obtidos no fresamento frontal com MQL e fluido em abundância e a Figura 4.12 na usinagem a seco e com ar refrigerado a 0 °C.

Percebe-se pelas imagens que, ao aplicar MQL (Figura 4.12a) e fluido de corte em abundância (Figura 4.12b), as ações proporcionaram um acabamento mais homogêneo, com menos marcações decorrentes da ferramenta e aparentemente sem resíduos de material aderido.

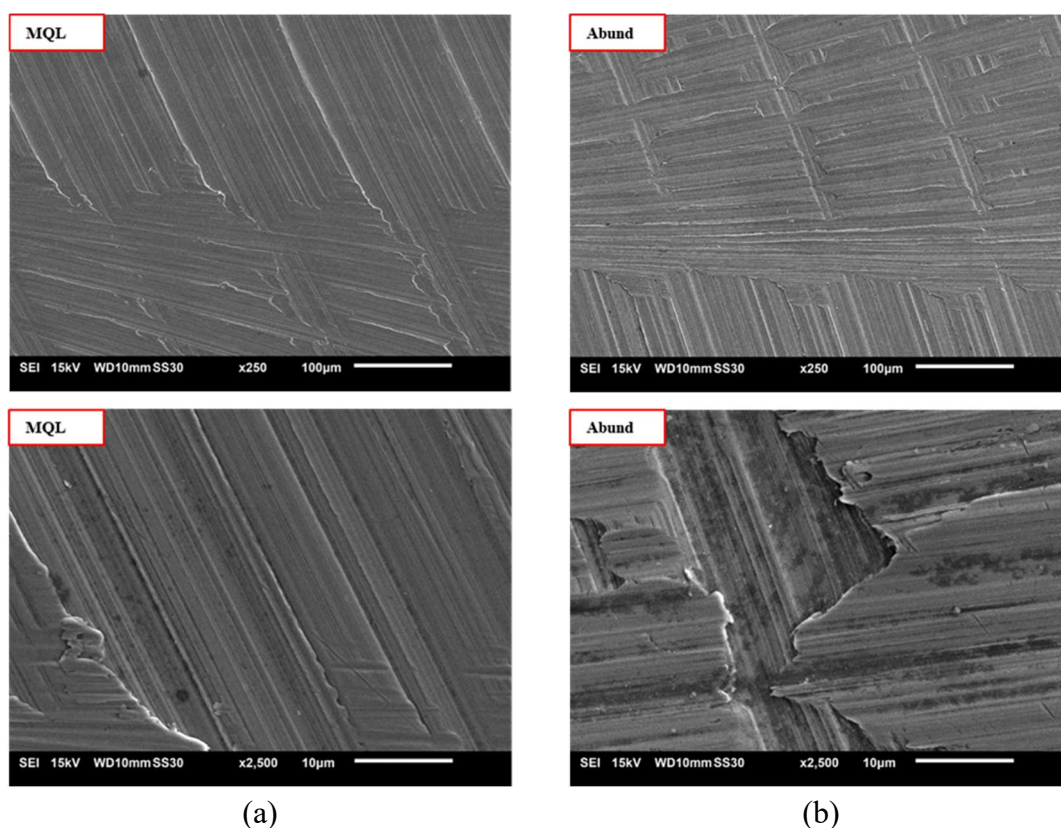


Figura 4.11 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento frontal com: (a) MQL; (b) fluido de corte em abundância.

Nas amostras resultantes do fresamento a seco (Figura 4.12a) e com ar refrigerado (Figura 4.12b), observa-se a formação de ranhuras bem definidas e um possível acúmulo de material aderido na superfície, possivelmente devido à ausência de lubrificação, o que favoreceu a irregularidade da superfície (principalmente com ar refrigerado) e impactou na rugosidade.

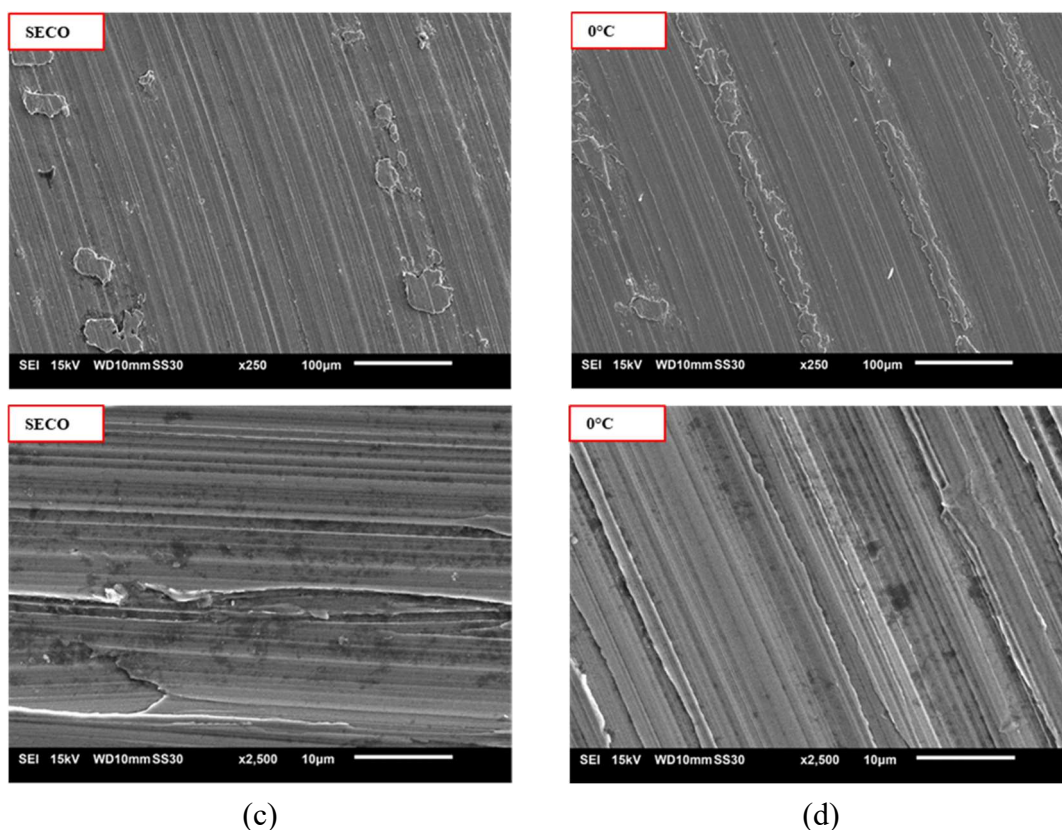


Figura 4.12 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento frontal: (a) a seco; (b) com ar refrigerado a 0 °C

Todas as imagens MEV coletadas após o fresamento frontal sob diferentes meios lubrificantes estão apresentadas na Figura C.9 à Figura C.12 (APÊNDICE C).

Em relação às composições químicas das amostras geradas por fresamento frontal e analisadas via análise EDS (ver APÊNDICE D), observam-se variações no acumulado de alguns elementos químicos, para todos os meios lubrificantes, conforme apresentado na Figura 4.13. Isto se deve à distribuição não-homogênea dos elementos de liga do aço maraging C300 fabricado por SLM [Azizi et al., 2019], como supracitado. Novamente, o oxigênio e alumínio são elementos encontrados na amostra de MAM antes do fresamento frontal e que não são mais detectados após o processo, a presença de oxigênio pode ser um fator de oxidação [Hassanpour et al., 2016]; além do mais, a concentração de ferro fica cerca de 20% maior após a operação de corte, bem como citado na subseção 4.2.2.. A concentração dos demais elementos químicos sofreu poucas variações, mantendo valores muito próximos para os diferentes meios lubrificantes. Isso mostra que não houve difusão de elementos químicos entre a ferramenta, a peça e os fluidos utilizados durante o fresamento frontal.

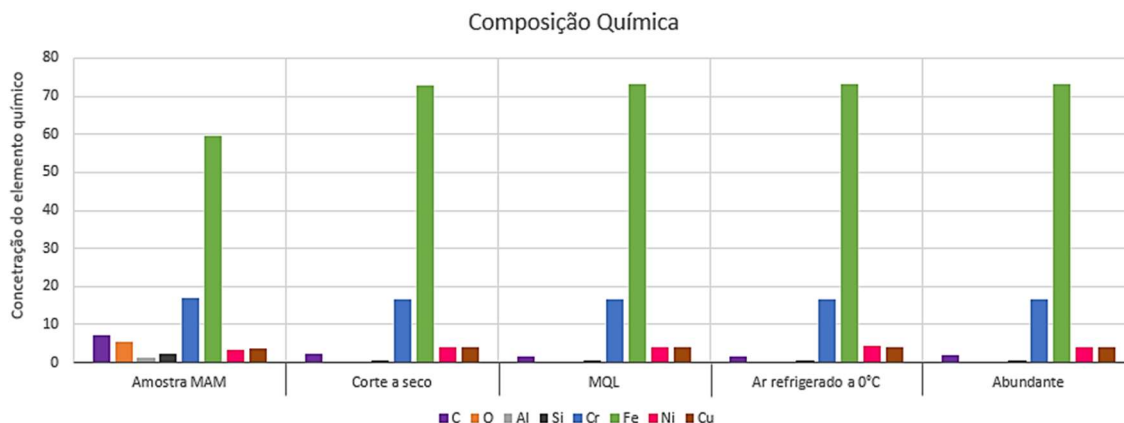


Figura 4.13 – Variações na composição química das amostras antes e após o fresamento frontal.

### 4.3.3 Verificação da alteração de microdureza

A Figura 4.14 apresenta os valores obtidos na medição de dureza das amostras submetidas ao processo de fresamento frontal. Realizou-se uma média de cinco medições e todos os valores mensurados estão na Tabela B.2 (APÊNDICE B). A linha tracejada indica a média das médias (348 HV<sub>0,1</sub>). Observa-se que o fresamento com MQL proporcionou o maior valor de microdureza (356 HV<sub>0,1</sub>) na superfície usinada, além de gerar os melhores resultados de rugosidade. O menor valor (326 HV<sub>0,1</sub>) foi obtido com a aplicação do ar comprimido refrigerado a 0 °C (pior acabamento gerado), o que provavelmente está associado ao acúmulo de tensões, principalmente devido à rápida refrigeração da superfície e alta concentração de discordâncias nos contornos dos grãos [Ahmadkhaniha et al., 2021].

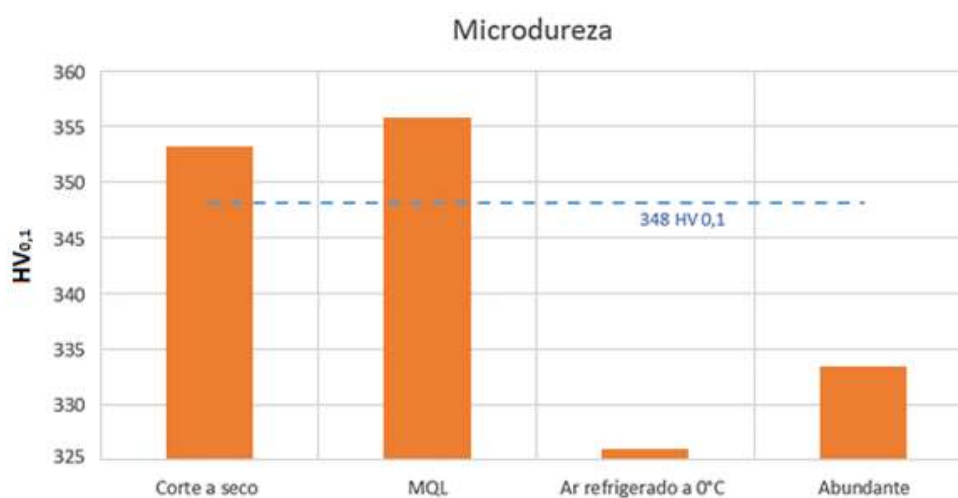


Figura 4.14 – Gráfico dos resultados da medição de microdureza para as diferentes condições lubrificantes no fresamento frontal.



#### 4.4 Considerações Finais do Capítulo 4

Considerando os parâmetros de corte utilizados ( $v_c = 120$  m/min,  $a_p = 1$  mm,  $a_e = 4$  mm e  $f_z = 0,04$  mm/dente) e os resultados de rugosidade obtidos, a melhor condição para acabamento das peças fabricadas em aço maraging C300 por MAM é o fresamento tangencial concordante com aplicação de fluido de corte em abundância ( $R_a = 0,312 \sim 0,620$   $\mu\text{m}$ ,  $R_z = 1,863 \sim 3,201$   $\mu\text{m}$  e  $R_t = 2,714 \sim 4,862$   $\mu\text{m}$ ). Porém, o fresamento frontal com MQL também resultou em amostras com rugosidade baixa ( $R_a = 0,389 \sim 0,813$   $\mu\text{m}$ ,  $R_z = 2,346 \sim 3,582$   $\mu\text{m}$  e  $R_t = 3,621 \sim 5,083$   $\mu\text{m}$ ). Assim, dependendo da aplicação do componente, a diferença encontrada nos valores de rugosidade pode ser irrelevante.

Percebe-se que há também uma proximidade nos valores de microdureza obtidos, nas melhores condições, para o fresamento tangencial concordante com aplicação de fluido de corte em abundância (357 HV<sub>0,1</sub>) e para o fresamento frontal com MQL (356 HV<sub>0,1</sub>). Em ambos os casos, os valores de microdureza mais elevados correspondem aos casos de melhor acabamento, mostrando que há uma correlação entre menor rugosidade e maior microdureza geradas nas superfícies das amostras fabricadas por MAM, com pós-processamento em fresamento. Isso provavelmente está relacionado ao uso de lubrificação com arrefecimento adequado que ajuda a controlar a temperatura na zona de corte, o que pode minimizar a resistência por atrito e preservar a microdureza desejada na superfície da peça.

## 5 CONCLUSÕES

A peça fabricada por SLM (*Selective Laser Melting*) apresentou valores de rugosidade elevados ( $R_a \cong 5,5 \mu\text{m}$ ,  $R_z \cong 32,6 \mu\text{m}$  e  $R_t \cong 56,7 \mu\text{m}$ ). Estes resultados mostram a necessidade de uma operação de usinagem posterior para se obter um bom acabamento, visto que os componentes fabricados por MAM destinados a aplicações complexas requerem  $R_a < 1,0 \mu\text{m}$ . Vale salientar que os menores valores de rugosidade obtidos ficaram cerca de 90% menores após o fresamento.

Após o fresamento tangencial, os menores valores de rugosidade foram produzidos no corte concordante com aplicação de fluido de corte em abundância ( $R_a \cong 0,47 \mu\text{m}$ ,  $R_z \cong 2,5 \mu\text{m}$  e  $R_t \cong 3,8 \mu\text{m}$ ). Além disso, o corte concordante com aplicação de mínima quantidade de lubrificação (MQL) também apresentou bons resultados ( $R_a \cong 0,72 \mu\text{m}$ ,  $R_z \cong 3,7 \mu\text{m}$  e  $R_t \cong 4,8 \mu\text{m}$ ). Por outro lado, os maiores valores de rugosidade foram gerados no corte concordante a seco ( $R_a \cong 1,0 \mu\text{m}$ ,  $R_z \cong 6,2 \mu\text{m}$  e  $R_t \cong 9,6 \mu\text{m}$ ), ainda assim aproximadamente 82% menores que antes da usinagem.

As diferenças entre os menores e maiores valores de rugosidade após o fresamento tangencial concordante é que a maior espessura no início do corte pode ter facilitado a penetração do fluido (abundante ou em mínima quantidade), reduzido o atrito e proporcionado uma superfície com boa homogeneidade e marcas suaves provocadas pela ferramenta. Ademais, as temperaturas mais elevadas na zona de corte, em função da ausência de lubrificação no corte a seco, podem ter contribuído para adesão do material à superfície usinada.

Após o fresamento frontal, o melhor acabamento da superfície usinada foi gerado com a utilização de MQL ( $R_a \cong 0,60 \mu\text{m}$ ,  $R_z \cong 3,0 \mu\text{m}$  e  $R_t \cong 4,4 \mu\text{m}$ ), valores também bem menores que antes da operação de corte. Outro bom resultado foi com fluido em abundância ( $R_a \cong 0,62 \mu\text{m}$ ,  $R_z \cong 3,1 \mu\text{m}$  e  $R_t \cong 4,5 \mu\text{m}$ ). Em contrapartida, o pior acabamento foi resultante do uso de ar comprimido refrigerado a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $R_a \cong 0,74 \mu\text{m}$ ,  $R_z \cong 4,7 \mu\text{m}$  e  $R_t \cong 9,1 \mu\text{m}$ ), valores também muito menores (por volta de 85%) que antes da operação de corte.

No caso, a ação lubrificante do fluido (abundante ou em mínima quantidade) proporcionou um acabamento mais homogêneo, com menos marcações decorrentes da ferramenta e aparentemente sem resíduos de material aderido, impactando nos melhores valores de rugosidade. Novamente a ausência de lubrificação no corte com ar refrigerado pode ter contribuído para adesão do material à superfície usinada, afetando negativamente os valores de rugosidade.

Desta forma, é possível obter um acabamento com baixos valores de rugosidade em amostras de aço maraging submetidas ao fresamento tangencial ou frontal, com redução de lubrificante (MQL) na operação de corte e reduzindo custos.



As análises de EDS nas amostras submetidas à usinagem mostraram um aumento de 15% na concentração de Fe após o fresamento tangencial e de 20% após o fresamento frontal. Isso, provavelmente, impactou na microdureza. Além disso, notou-se que os valores de microdureza mais elevados correspondem aos casos de melhor acabamento. As superfícies das amostras fabricadas por MAM apresentavam uma dureza média de 310 HV<sub>0,1</sub>. Após o fresamento concordante com aplicação de fluido de corte em abundância, a superfície apresentava 357 HV<sub>0,1</sub>; após o fresamento frontal com MQL, 356 HV<sub>0,1</sub>, um aumento de aproximadamente 15%.

Por fim, observou-se que o método de fresamento e o meio de lubrificação influenciam diretamente nos resultados obtidos para a rugosidade da superfície usinada. Desta forma, entende-se que para se obter o melhor acabamento, é necessário escolher a melhor combinação entre tais fatores, sempre observando qual é a aplicação requerida.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Considerando as amostras produzidas por MAM em aço maraging C300, seguem algumas sugestões de trabalho:

- Investigar o efeito da potência do laser, da velocidade de varredura e da sua interação combinada (densidade de energia) na textura das amostras produzidas por MAM.
- Estudar o efeito dos parâmetros de corte em fresamento (velocidade de corte, avanço por dente, profundidades de corte radial e axial) sobre o acabamento da superfície usinada das amostras e sobre as componentes da força de usinagem.
- Avaliar a influência do sistema MQCL (mínima quantidade de lubrificação refrigerada) no processo de fresamento das amostras.
- Analisar as tensões residuais na superfície das amostras antes e após o fresamento.
- Aumentar o comprimento usinado e monitorar as falhas (desgastes e avarias) na ferramenta de corte durante o processo de fresamento das amostras.

## 6 REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 4287. **Termos, Definições e Parâmetros de Rugosidade. Especificações Geométricas do produto (GPS) – Rugosidade - Método do Perfil.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 18p., 2002.

Ahmadkhaniha, D., Möller, H. e Zanella, C. Studying the microstructural effect of selective laser melting and electropolishing on the performance of maraging steel. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 30, p. 6588-6605, 2021.

Almeida, M. A. M. **Monitoramento das Forças e Desgaste da Ferramenta Durante o Fresamento Concordante e Discordante do Aço ABNT 4140.** Dissertação de Mestrado, UFMG, 108 p, 2019.

Alrbaey, K. et. al. On Optimization of Surface Roughness of Selective Laser Melted Stainless Steel Parts: A Statistical Study. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 23, p. 2139-2148, 2014.

Araújo, G. G. Fabricação aditiva: tecnologias e parâmetros. **Regrad – Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM**, v. 10, n. 1, p. 417-432, 2018.

Asala, G., Ola, O. T. e Ojo, O. A. Effects of process variables on the quality and mechanical properties of 18%Ni-M350 maraging steel produced by direct energy deposition laser additive manufacturing. **Materials Science and Engineering: A**, v. 866, p. 144646, 2023.

Astakhov, V. P. Surface integrity: definition and importance in functional performance. In: **Surface Integrity in Machining**, Springer-Verlag, London, p. 1-35, 2010.

Azizi, H., Ghiaasiaan, R., Prager, R., Ghoncheh, M. H., Samk, K. A., Lausic, A., Byleveld, W. e Phillion, A. B. Metallurgical and mechanical assessment of hybrid additively-manufactured maraging tool steels via selective laser melting. **Additive Manufacturing**, v. 27, p. 389-397, 2019.

Bai, Y., Zhao, C., Yang, J., Hong, R., Weng, C. e Wang, H. Microstructure and machinability of selective laser melted high-strength maraging steel with heat treatment. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 288, p.116906, 2021.

Bajić, D.; Celent, L.; Jozić, S., Modeling of the influence of cutting parameters on the surface roughness, tool wear and cutting force in face milling in off-line process control. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 58, p. 673-682, 2012.

Beard, W., Lancaster, R., Barnard, N., Jones, T. e Adams, J. The influence of surface finish and build orientation on the low cycle fatigue behaviour of laser powder bed fused stainless steel 316L. **Materials Science and Engineering: A**, v. 864, p. 144593, 2023.

Ben-Artzy, A., Reichardt, A., Borgonia, J. -P., Dillon, R. P., McEnerney, B., Shapiro, A. A. e Hosemann, P. Compositionally graded SS316 to C300 maraging steel using additive manufacturing. **Materials & Design**, v. 201, p. 109500, 2021.

Benedicto, E. et al. Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems Used in Machining Processes. **Procedia Engineering**, v. 184, p. 99-116, 2017.

Bhardwaj, T. e Shukla M. Direct metal laser sintering of maraging steel: effect of building orientation on surface roughness and microhardness. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 9, p. 20485-20491, 2018.

Boing, D. **Transição da Aplicação de Metal-duro Revestido e do PCBN no Torneamento de Aços Endurecidos em Função da Dureza e do Teor de Carbonetos**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 287p, 2016.

Brown, D. et al. Surface integrity of Inconel 718 by hybrid selective laser melting and milling. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 13, p. 26-31, 2018.

Casalino, G., Campanelli, S.L., Contuzzi, N. e Ludovico, A.D. Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel. **Optics & Laser Technology**, v. 65, p. 151-158, 2015.

Danish, M., Rubaiee, S., Gupta, M. K., Yildirim, M. B. e Ahmed, A. Technological and tribological characteristics improvement of additively manufactured SS 316L components machined under sustainable cooling conditions. **Tribology International**, v. 181, p. 108329, 2023.

Debnath, S., Reddy, M. e Yi, Q. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques inf machining: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33-47, 2014.

Deonísio, C. C. C., Novaski, O., Krabbe, D. F. M. e Damião, A. J. A influência da velocidade de avanço na textura superficial de componentes usinados. **Anais do 15º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM)**, Águas de Lindóia, SP, 1999.

Dib, M. H. M., Benjamin, G. M. e Jasinevicius, R. G. Uma análise experimental do fresamento discordante e concordante. **Revista Iuminart**, v. 7, n. 13, p. 113-128, 2015.

Du, W., Bai, Q. e Zhang, B. A novel method for additive/subtractive hybrid manufacturing of metallic parts. **Procedia Manufacturing**, v. 5, p. 1018-1030, 2016.

Erhan, S. Z., Sharma, B. K., Liu, Z. e Adhvaryu, A. Lubricant base stock potential of chemically modified vegetable oils. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, p. 8919-8925, 2008.

Farias, A. **Análise da Tensão Residual e Integridade Superficial no Processo de Torneamento em Material Endurecido do Aço ABNT 8620 Cementado**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, POLI-USP, São Paulo, 191 p., 2009.

Floreen, S. The physical metallurgy of maraging steel. **Metallurgical Reviews**, v. 13, n. 1, p. 115-128, 1968.

Fortunato, A., Lulaj, A., Melkote, S., Liverani, E., Ascari, A. e Umbrello, D. Milling of maraging steel components produced by selective laser melting. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, p. 1895-1902, 2018.

Fratila, D. Evaluation of near-dry machining effects on gear milling process efficiency. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, p. 839-845, 2009.

Fratila, J. P. Sustainable manufacturing through environmentally-friendly machining. In: **Green Manufacturing Processes and Systems**, Springer, Berlin-Heidelberg, p. 1-21, 2013.

Gibson, I., Rosen, D. e Stucker, B. **Additive Manufacturing Technologies**, Springer, New York, 498 p, 2021.

Goindi, G. S. e Sarkar, P. Dry machining: A step towards sustainable machining – challenges and future directions. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 1557-1571, 2017.

Gomes, J. e Wiltgen, F. Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas. **Revista Tecnologia**, v. 41, p. 1-16, 2020.

Guo, L., Zhang, L., Andersson, J e Ojo, O. Additive manufacturing of 18% nickel maraging steels – defects, structure and mechanical properties: a review. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 120, p. 227-252, 2022.

Guo, P. et al. Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 240, p. 12-22, 2017.

Habassi, F., Houria, M., Barka, N. e Jahazi, M. Influence of post-treatment on microstructure and mechanical properties of additively manufactured C300 maraging steel. **Materials Characterization**, v. 202, p. 112980, 2023.

Harris, I. D., Development and implementation of metals additive manufacturing. Separata de Badiru, A. B., **Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry**, CRC Press, cap. 13, 2017.

Hassan, K. Comparative life cycle analysis of environmental and machining performance under sustainable lubrication techniques. **Hybrid Advances**, v. 1, p. 100004, 2022.

Hassanpour, H., Sadeghi, M. H., Rasti, A. e Shajari, S. Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication. **Journal of Cleaner Production**, v. 120, p. 124-134, 2016.

Horst, D. J., Duvoisin, C. A. e Vieira, R. A. Additive manufacturing at industry 4.0: a review. **International Journal of Engineering and Technical Research**, v. 8, n. 8, p. 3-8, 2018.

ISO/ASTM 52900. **Additive Manufacturing – General Principles – Fundamentals and Vocabulary**. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 28 p, 2021.

Jäggle, E. A., Choi, P. -P., Humbeeck, J. V. e Raabe, D. Precipitation and austenite reversion behavior of a maraging steel produced by selective laser melting. **Journal of Material Research**, v. 29, n. 17, p. 2072-2080, 2014.

Jasinevicius, R. G. Processos de Fresamento. **Material de Apoio em Processos de Usinagem**. Universidade de São Paulo – USP. [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2036771/mod\\_resource/content/2/Aula%20Fresamento.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2036771/mod_resource/content/2/Aula%20Fresamento.pdf). Acesso em 04-01-2023.

Jozić, S., Bajić, D. e Celent, L. Application of compressed cold air cooling: achieving multiple performance characteristics in end milling process. **Journal of Cleaner Production**, v. 100, p. 325-332, 2015.

Kempen, K., Yasa, E., Thijs, L., Kruth, J. -P., Humbeeck, J. V. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted 18Ni-300 steel. **Physics Procedia**, v. 12, p. 255-263, 2011.

Khanna, N., Shah, P., Sarikaya, M. e Pusavec, F. Energy consumption and ecological analysis of sustainable and conventional cutting fluid strategies in machining 15–5 PHSS. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 32, p. e00416, 2022a.

Khanna, N., Wadhwa, J., Pitroda, A., Shah, P., Schoop, J. e Sarikaya, M. Life cycle assessment of environmentally friendly initiatives for sustainable machining: a short review of current knowledge and a case study. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 32, p. e00413, 2022b.

Kumar, S., Gandotra, S. Effect of cooling air on machining performance during hard turning. **Materials Today: Proceedings**, v. 38, p. 2213-2216, 2021.

Lin, W. **Desenvolvimento de um Sistema de Deposição de Pó Metálico Aplicável para os Processos SLS/SLM**. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 142 p, 2016.

Lindemann, C., Jahnke, U., Moi, M. e Kock, R. Analyzing product lifecycle costs for a better understanding of cost drivers in additive manufacturing. **International Solid Freeform Fabrication Symposium**, Austin, TX, USA, v. 23, p. 177-188, 2012.

Machado A. R., Abrão A. M., Coelho R. T., Silva M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3.ed., Blucher, São Paulo, 2015

Martins, V. **Operação de Fresamento**. Usinagem III. Instituto Federal Sul-rio-grandense. [http://static.sapucaia.ifsul.edu.br/professores/vmartins/Arquivo/Disciplina%20usinagem%20III/P arte\\_1\\_Fresamento.pdf](http://static.sapucaia.ifsul.edu.br/professores/vmartins/Arquivo/Disciplina%20usinagem%20III/P arte_1_Fresamento.pdf). Acesso em 06-12-2022.

Montevecchi, F., Grossi, N., Takagi, H., Scippa, A., Sasahara, H. e Campatelli, G. Cutting forces analysis in additive manufactured AISI H13 alloy. **Procedia CIRP**, v. 46, p. 476-479, 2016.

Montgomery, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8 ed., John Wiley & Sons, New York, 2013.

Moshka, O., Pinkas, M., Brosh, E., Ezersky, V. e Meshi, L. Addressing the issue of precipitates in maraging steels: unambiguous answer. **Materials Science and Engineering: A**, v. 638, p. 232-239, 2015.

Najiha, M. S., Rahman, M. M. e Yusoff, A. R. Environmental impacts and hazards associated with metal working fluids and recent advances in the sustainable systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 1008-1031, 2016.

Outeiro, J. C. Optimization of machining parameters for improved surface integrity of AISI H13 tool steel. **Machines Et Usinage À Grande Vitesse**, MUGV, France, p. 1-10. 2012.

Pangrácio, M. L. **Análise da qualidade de furos realizados por fresamento helicoidal interpolado**. Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba, 103 p, 2003.

Paulo, R. G. R. **Avaliação da integridade superficial e usinabilidade de engrenagens forjadas utilizando fresamento com alta velocidade de corte**. Dissertação de Mestrado, Unesp, Ilha Solteira, 176 p, 2008.

Petropoulos, P. G., N. Pandazaras, N. P., Davim J. P. Surface texture characterization and evaluation related to machining. In: **Surface Integrity in Machining**. Springer-Verlag London, p. 37-66, 2010.

Piratelli Filho, A. **Rugosidade Superficial**. 3º Seminário de Metrologia. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 42 p, 2011.

Rabelo, A. **Influência do tratamento térmico sobre a microestrutura e propriedades mecânicas do aço maraging C300 obtido por fusão seletiva a laser (FSL)**. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 186 p, 2016.

Sabudhi, S. e Sen, M. Review of Ranque–Hilsch vortex tube experiments using air. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 172-178, 2015.

Salur, E., Kuntoğlu, M., Aslan, A. e Pimenov, D. Y. The effects of MQL and dry environments on tool wear, cutting temperature, and power consumption during end milling of AISI 1040 steel. **Metals**, v. 11, n. 11, p. 1674, 2021.

Sartori, S. et al. Analysis of the Surface Integrity in Cryogenic Turning of Ti6Al4 V Produced by Direct Melting Laser Sintering. **Procedia CIRP**, v. 45, p. 123-126, 2016.

Sandvik. **Fresamento Concordante vs. Fresamento Discordante**. Sandvik Coromant. [www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx). Acesso em 08-12-2022.

Santos, S. C., Sales, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. Artliber, São Paulo, 2007.

Santos, M. M. **Estudo do Fresamento Frontal Assimétrico com Mínima Quantidade de Fluido do Aço 4340 endurecido**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, UNESP, Guaratinguetá, 77 p, 2018.

Shamsdini, S. A. R., Pirgazi, H., Ghoncheh, M. H., Sanjari, M., Amirkhiz, B. S., Kestens, L. e Mohammadi, M. A relationship between the build and texture orientation in tensile loading of the additively manufactured maraging steels. **Additive Manufacturing**, v. 41, p. 101954, 2021.

Sharma, A. K., Tiwari, A. K. e Dixit, A. R. Effects of minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: a comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 1-18, 2016.

Sharma, A. e Kumar, R. Potential use of minimum quantity lubrication (MQL) in machining of biocompatible materials using environment friendly cutting fluids: an overview. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 5315-5319, 2021.



Sharma, R., Pahuja, V., Jha, B. K. e Sharma, S. Evaluation of machinability on duplex stainless steel 2205 under dry and wet condition. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 3357-3361, 2022.

Sharma, V. S., Singh, G. R. e Sørby, K. A review on minimum quantity lubrication for machining processes. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 30, n. 8, p. 935-953, 2015.

Shokrani, A., Dhokia, V. e Newman, S. T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 57, p. 83-101, 2012.

Siddiqui, S. F. et al. Selective laser melting (SLM) of NI-based superalloys: A mechanics of materials review. Separata de Badiru, A. B., **Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry**, CRC Press, cap. 14, 2017.

Sivaiah, P. e Chakradhar, D. Effect of cryogenic coolant on turning performance characteristics during machining of 17-4 PH stainless steel: A comparison with MQL, wet, dry machining. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 21, p. 86-96, 2018.

Solberg, K., Hovig, E. W., Sørby, K. e Berto, F. Directional fatigue behaviour of maraging steel grade 300 produced by laser powder bed fusion. **International Journal of Fatigue**, v. 149, p. 106229, 2021.

Spíndola Filho, A. J. **Desenvolvimento de uma metodologia para avaliação metrológica do processo de modelagem por fusão e deposição (FDM) através de um planejamento fatorial fracionário**. Dissertação de Mestrado, UNB, Brasília, 143 p, 2020.

Sreejith, P.S. e Ngoi B. K. A. Dry machining: machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 101, n. 1-3, p. 287-291, 2000.

Swain, S., Patra, S. K., Roul, M. K. e Sahoo, L. K. A short review on cooling process using compressed cold air by vortex tube in machining. **Materials Today: Proceedings**, v. 64, p. 382-389, 2022.

Tamaru. **O que são Fluidos de Corte e para que servem na Usinagem**. Tamaru Industria e Comercio de Ferramentas Ltda, 2019. Disponível em: <https://www.tamaru.com.br/post/o-que-são-fluidos-de-corte-e-para-que-servem-na-usinagem>

Tavares, J. M. R. S., **Indicação dos Estados de Superfície**. Concepção e Fabrico Assistidos por Computador, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012.

Tebaldo, V., di Confiengo, G. G. e Faga, M. G. Sustainability in machining: “eco-friendly” turning of Inconel 718. Surface characterisation and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1567-1577, 2017.

Tian, Y., Tomus, D., Rometsch, P. e Wu, X. Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting. **Additive Manufacturing**, v. 13, p. 103-112, 2017.

Tomaz, I. V., Pardal, J. M. e Fonseca, M. C. Influence of minimum quantity lubrication in the surface quality of milled maraging steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, p. 4301-4311, 2019.

Townsend, A., Senin, N., Bunt, L., Leach, R. K. e Taylor, J. S. Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review. **Precision Engineering**, v. 46, p. 34-47, 2016.

Van Swan, L. F., Pelloux, R. M. e Grant, N. J. Properties of maraging steel 300 produced by powder metallurgy. **Powder Metallurgy**, v. 17, n. 33, p. 33-45, 1974.

Varghese, V., Akhil, K., Ramesh, M. R. e Chakradhar, D. Investigation on the performance of AlCrN and AlTiN coated cemented carbide inserts during end milling of maraging steel under dry, wet and cryogenic environments. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 43, p. 136-144, 2019a.

Varghese, V., Ramesh, M. R. e Chakradhar, D. Influence of deep cryogenic treatment on performance of cemented carbide (WC-Co) inserts during dry end milling of maraging steel. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 37, p. 242-250, 2019b.

Varghese, V., Ramesh, M. R. e Chakradhar, D. Experimental investigation of cryogenic end milling on maraging steel using cryogenically treated tungsten carbide-cobalt inserts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, p. 2001-2019, 2019c.

Venkatesh, K. V. e Nandini, V. V. Direct metal laser sintering: A digitised metal casting technology. **The Journal of Indian Prosthodontic Society**, v. 13, n. 4, p. 389-392, 2013.

Wang, C., Loh, Y. M., Cheung, C. F., Liang, X., Zhang, Z. e Ho, L. T. Post processing of additively manufactured 316L stainless steel by multi-jet polishing method. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 23, p. 530-550, 2023.

Wüst, P., Edelmann, A. e Hellmann, R. Areal surface roughness optimization of maraging steel parts produced by hybrid additive manufacturing. **Materials**, v. 13, p. 418, 2020.

Yang, T. et al. The influence of process parameters on vertical surface roughness of the AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 266, p. 26-36, 2019.

Yang, T. et al. Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting. **Additive Manufacturing**, v. 13, p. 103-112, 2017.

## APÊNDICE A – MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE

Tabela A.1 – Medições de rugosidade em amostras submetidas ao fresamento tangencial

Lubrificante	Sentido de Corte	Sentido de Medição	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )
Corte a seco	Concordante	A	0,857	6,085	9,982
Corte a seco	Concordante	A	1,021	6,953	9,651
Corte a seco	Concordante	A	1,263	7,058	9,884
Corte a seco	Concordante	A	1,289	6,777	9,388
Corte a seco	Concordante	A	1,192	5,664	8,399
Corte a seco	Concordante	B	1,034	6,512	11,534
Corte a seco	Concordante	B	0,960	6,118	10,566
Corte a seco	Concordante	B	0,896	5,516	9,525
Corte a seco	Concordante	B	0,954	5,433	7,860
Corte a seco	Concordante	B	0,952	5,583	9,473
<b>Média</b>			<b>1,042</b>	<b>6,170</b>	<b>9,626</b>
<b>Desvio Padrão</b>			<b>0,153</b>	<b>0,621</b>	<b>1,024</b>
Corte a seco	Discordante	A	0,548	3,008	6,057
Corte a seco	Discordante	A	0,439	2,549	4,295
Corte a seco	Discordante	A	0,534	2,973	4,822
Corte a seco	Discordante	A	0,651	3,271	4,014
Corte a seco	Discordante	A	0,949	5,523	7,771
Corte a seco	Discordante	B	0,788	4,446	8,938
Corte a seco	Discordante	B	0,749	4,349	7,898
Corte a seco	Discordante	B	0,743	4,004	6,197
Corte a seco	Discordante	B	0,721	3,951	6,749
Corte a seco	Discordante	B	0,777	4,226	7,151
<b>Média</b>			<b>0,690</b>	<b>3,830</b>	<b>6,389</b>
<b>Desvio Padrão</b>			<b>0,149</b>	<b>0,887</b>	<b>1,634</b>
MQL	Concordante	A	0,846	4,028	5,104
MQL	Concordante	A	0,791	4,056	4,567
MQL	Concordante	A	0,723	3,921	5,183
MQL	Concordante	A	0,729	3,850	4,365
MQL	Concordante	A	0,750	3,994	4,724
MQL	Concordante	B	0,705	3,608	5,096
MQL	Concordante	B	0,656	3,444	5,011
MQL	Concordante	B	0,658	3,433	4,875
MQL	Concordante	B	0,664	3,546	4,630
MQL	Concordante	B	0,692	3,464	4,610
<b>Média</b>			<b>0,721</b>	<b>3,734</b>	<b>4,817</b>
<b>Desvio Padrão</b>			<b>0,061</b>	<b>0,259</b>	<b>0,277</b>

Lubrirrefrigerante	Sentido de Corte	Sentido de Medição	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )
MQL	Discordante	A	1,151	5,191	5,643
MQL	Discordante	A	1,101	5,205	6,066
MQL	Discordante	A	1,097	5,101	5,885
MQL	Discordante	A	1,075	5,242	7,960
MQL	Discordante	A	1,045	4,985	5,610
MQL	Discordante	B	0,807	4,195	7,794
MQL	Discordante	B	0,761	4,054	5,388
MQL	Discordante	B	0,766	4,061	5,384
MQL	Discordante	B	0,798	4,064	5,552
MQL	Discordante	B	0,793	3,974	5,405
<b>Média</b>			<b>0,939</b>	<b>4,607</b>	<b>6,069</b>
<b>Desvio Padrão</b>			<b>0,165</b>	<b>0,573</b>	<b>0,979</b>
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	A	0,717	4,655	7,949
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	A	0,569	4,012	6,286
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	A	0,608	4,110	7,995
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	A	0,824	5,052	8,555
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	A	0,869	5,928	10,653
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	B	0,708	4,544	11,802
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	B	0,647	3,981	7,417
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	B	0,646	4,101	7,043
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	B	0,620	4,036	7,679
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	B	0,673	4,672	7,692
<b>Média</b>			<b>0,688</b>	<b>4,509</b>	<b>8,307</b>
<b>Desvio Padrão</b>			<b>0,095</b>	<b>0,618</b>	<b>1,675</b>
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	A	1,011	4,894	5,820
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	A	0,843	4,330	5,551
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	A	0,894	4,370	6,628
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	A	0,950	4,653	5,842
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	A	1,082	6,252	9,900
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	B	0,900	5,078	8,156
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	B	0,873	4,713	7,605
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	B	0,871	4,650	8,834
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	B	0,872	4,895	8,073
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	B	0,886	4,786	8,059
<b>Média</b>			<b>0,918</b>	<b>4,862</b>	<b>7,447</b>
<b>Desvio Padrão</b>			<b>0,075</b>	<b>0,540</b>	<b>1,442</b>

Lubrificante	Sentido de Corte	Sentido de Medição	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )
Abundante	Concordante	A	0,548	3,058	4,521
Abundante	Concordante	A	0,627	3,167	4,623
Abundante	Concordante	A	0,628	3,062	3,778
Abundante	Concordante	A	0,208	1,297	1,820
Abundante	Concordante	A	0,255	1,542	2,117
Abundante	Concordante	B	0,665	3,264	5,114
Abundante	Concordante	B	0,443	2,577	4,613
Abundante	Concordante	B	0,426	2,406	3,594
Abundante	Concordante	B	0,425	2,506	3,866
Abundante	Concordante	B	0,438	2,439	3,832
<b>Média</b>			<b>0,466</b>	<b>2,532</b>	<b>3,788</b>
<b>Desvio Padrão</b>			<b>0,154</b>	<b>0,669</b>	<b>1,074</b>
Abundante	Discordante	A	1,023	4,580	4,962
Abundante	Discordante	A	0,991	4,264	5,079
Abundante	Discordante	A	0,927	3,930	4,567
Abundante	Discordante	A	0,934	3,986	4,743
Abundante	Discordante	A	0,980	4,093	4,816
Abundante	Discordante	B	0,817	3,988	4,943
Abundante	Discordante	B	0,840	4,254	5,551
Abundante	Discordante	B	0,864	4,116	5,389
Abundante	Discordante	B	0,853	4,229	5,974
Abundante	Discordante	B	0,872	4,133	5,532
<b>Média</b>			<b>0,910</b>	<b>4,157</b>	<b>5,156</b>
<b>Desvio Padrão</b>			<b>0,071</b>	<b>0,189</b>	<b>0,440</b>
<b>Média das Médias</b>			<b>0,797</b>	<b>4,300</b>	<b>6,450</b>

Tabela A.2 – Medições de rugosidade em amostras submetidas ao fresamento frontal

Lubrificante	Sentido de Medição	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )
Corte a seco	B	0,520	3,504	9,538
Corte a seco	B	0,522	3,068	7,014
Corte a seco	B	0,553	3,390	6,728
Corte a seco	B	0,537	3,115	6,506
Corte a seco	B	0,560	3,884	9,451
Corte a seco	A	0,908	4,067	6,072
Corte a seco	A	0,269	1,829	2,521
Corte a seco	A	0,971	5,738	9,627
Corte a seco	A	0,554	2,629	3,170
Corte a seco	A	0,725	4,146	7,813
<b>Média</b>		<b>0,612</b>	<b>3,537</b>	<b>6,844</b>
<b>Desvio Padrão</b>		<b>0,205</b>	<b>1,042</b>	<b>2,487</b>
MQL	B	0,515	2,756	5,541
MQL	B	0,522	2,799	4,588
MQL	B	0,500	2,814	4,939
MQL	B	0,489	2,697	4,589
MQL	B	0,502	2,656	4,597
MQL	A	0,943	3,778	4,158
MQL	A	0,292	1,951	2,999
MQL	A	0,980	4,167	4,611
MQL	A	0,638	2,874	3,415
MQL	A	0,629	3,150	4,084
<b>Média</b>		<b>0,601</b>	<b>2,964</b>	<b>4,352</b>
<b>Desvio Padrão</b>		<b>0,212</b>	<b>0,618</b>	<b>0,731</b>
Ar refrigerado a 0°C	B	0,840	5,347	12,910
Ar refrigerado a 0°C	B	0,654	4,190	9,176
Ar refrigerado a 0°C	B	0,744	4,567	8,416
Ar refrigerado a 0°C	B	0,689	5,089	10,511
Ar refrigerado a 0°C	B	0,587	3,766	7,910
Ar refrigerado a 0°C	A	1,007	5,862	9,232
Ar refrigerado a 0°C	A	0,510	4,059	7,801
Ar refrigerado a 0°C	A	1,000	6,252	10,186
Ar refrigerado a 0°C	A	0,595	2,986	5,376
Ar refrigerado a 0°C	A	0,803	5,317	9,948
<b>Média</b>		<b>0,743</b>	<b>4,744</b>	<b>9,147</b>
<b>Desvio Padrão</b>		<b>0,170</b>	<b>1,010</b>	<b>1,996</b>

Lubrificante	Sentido de Medição	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )
Abundante	B	0,529	2,814	4,810
Abundante	B	0,528	2,858	4,980
Abundante	B	0,499	2,738	4,475
Abundante	B	0,500	2,643	4,180
Abundante	B	0,465	2,463	3,878
Abundante	A	1,188	5,003	7,053
Abundante	A	0,568	3,237	3,635
Abundante	A	0,931	3,915	4,972
Abundante	A	0,532	2,983	3,500
Abundante	A	0,487	2,746	3,589
<b>Média</b>		<b>0,623</b>	<b>3,140</b>	<b>4,507</b>
<b>Desvio Padrão</b>		<b>0,240</b>	<b>0,768</b>	<b>1,061</b>
<b>Média das Médias</b>		<b>0,645</b>	<b>3,596</b>	<b>6,212</b>



## APÊNDICE B – MEDIÇÕES DE MICRODUREZA

Tabela B.1 – Medições de microdureza em amostras submetidas ao fresamento tangencial

Lubrificante	Sentido de Corte	Pontos de Medição	D1 ( $\mu\text{m}$ )	D2 ( $\mu\text{m}$ )	Dureza (HV <sub>0,1</sub> )
Corte a seco	Concordante	1	22,74	23,20	351,5
Corte a seco	Concordante	2	23,29	22,62	352,0
Corte a seco	Concordante	3	23,36	22,60	351,1
Corte a seco	Concordante	4	22,13	22,68	353,4
Corte a seco	Concordante	5	22,51	23,28	353,8
<b>Média</b>					<b>352,4</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>1,18</b>
Corte a seco	Discordante	1	22,50	23,51	349,6
Corte a seco	Discordante	2	23,05	23,12	349,0
Corte a seco	Discordante	3	22,36	23,57	351,6
Corte a seco	Discordante	4	23,54	22,60	348,5
Corte a seco	Discordante	5	22,52	23,38	352,1
<b>Média</b>					<b>350,2</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>1,60</b>
MQL	Concordante	1	22,90	23,16	349,6
MQL	Concordante	2	22,59	23,47	349,6
MQL	Concordante	3	22,62	23,28	352,1
MQL	Concordante	4	22,58	23,52	349,0
MQL	Concordante	5	22,42	23,61	350,2
<b>Média</b>					<b>350,1</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>1,19</b>
MQL	Discordante	1	23,43	22,61	350,0
MQL	Discordante	2	22,51	23,41	351,8
MQL	Discordante	3	23,2	22,92	348,8
MQL	Discordante	4	22,77	23,34	348,9
MQL	Discordante	5	22,55	23,36	351,9
<b>Média</b>					<b>350,3</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>1,50</b>

Lubrificante	Sentido de Corte	Pontos de Medição	D1 ( $\mu\text{m}$ )	D2 ( $\mu\text{m}$ )	Dureza ( $\text{HV}_{0,1}$ )
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	1	23,39	23,73	334,0
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	2	22,98	23,97	336,5
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	3	22,44	24,35	338,8
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	4	22,94	24,20	333,8
Ar refrigerado a 0°C	Concordante	5	22,95	24,00	336,4
<b>Média</b>					<b>335,9</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>2,06</b>
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	1	22,54	24,06	341,6
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	2	23,38	23,48	337,8
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	3	23,81	22,91	339,9
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	4	22,64	23,90	342,5
Ar refrigerado a 0°C	Discordante	5	23,67	23,02	340,3
<b>Média</b>					<b>340,4</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>1,79</b>
Abundante	Concordante	1	22,37	23,08	359,1
Abundante	Concordante	2	23,19	22,38	357,2
Abundante	Concordante	3	22,40	23,15	357,6
Abundante	Concordante	4	23,12	22,51	356,3
Abundante	Concordante	5	23,36	22,36	354,7
<b>Média</b>					<b>357,0</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>1,62</b>
Abundante	Discordante	1	22,93	23,31	347,0
Abundante	Discordante	2	22,93	23,13	349,6
Abundante	Discordante	3	22,65	23,50	348,3
Abundante	Discordante	4	23,87	23,26	348,6
Abundante	Discordante	5	23,12	22,98	349,1
<b>Média</b>					<b>348,5</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>0,98</b>
<b>Média das Médias</b>					<b>348,1</b>

Tabela B.2 – Medições de microdureza em amostras submetidas ao fresamento frontal

Lubrificante	Pontos de Medição	D1 ( $\mu\text{m}$ )	D2 ( $\mu\text{m}$ )	Dureza ( $\text{HV}_{0,1}$ )
Corte a seco	1	22,82	23,26	349,3
Corte a seco	2	23,72	21,87	356,9
Corte a seco	3	23,76	22,06	353,3
Corte a seco	4	23,30	22,54	353,0
Corte a seco	5	22,93	22,87	353,6
<b>Média</b>				<b>353,2</b>
<b>Desvio Padrão</b>				<b>2,70</b>
MQL	1	22,76	22,85	356,6
MQL	2	22,60	23,15	354,5
MQL	3	22,02	22,82	355,9
MQL	4	22,88	22,70	357,1
MQL	5	22,82	22,88	355,1
<b>Média</b>				<b>355,8</b>
<b>Desvio Padrão</b>				<b>1,06</b>
Ar refrigerado a 0°C	1	23,52	24,28	324,7
Ar refrigerado a 0°C	2	24,40	23,53	322,9
Ar refrigerado a 0°C	3	23,44	24,25	326,2
Ar refrigerado a 0°C	4	23,2	24,58	324,8
Ar refrigerado a 0°C	5	23,1	24,22	331,3
<b>Média</b>				<b>326,0</b>
<b>Desvio Padrão</b>				<b>3,20</b>
Abundante	1	22,80	24,43	332,5
Abundante	2	23,28	23,88	333,6
Abundante	3	23,87	23,41	331,9
Abundante	4	22,96	24,18	333,7
Abundante	5	23,05	23,97	335,4
<b>Média</b>				<b>333,4</b>
<b>Desvio Padrão</b>				<b>1,34</b>
<b>Média das Médias</b>				<b>342,1</b>

## APÊNDICE C – IMAGENS DAS TEXTURAS VIA MEV

### Fresamento Tangencial Concordante

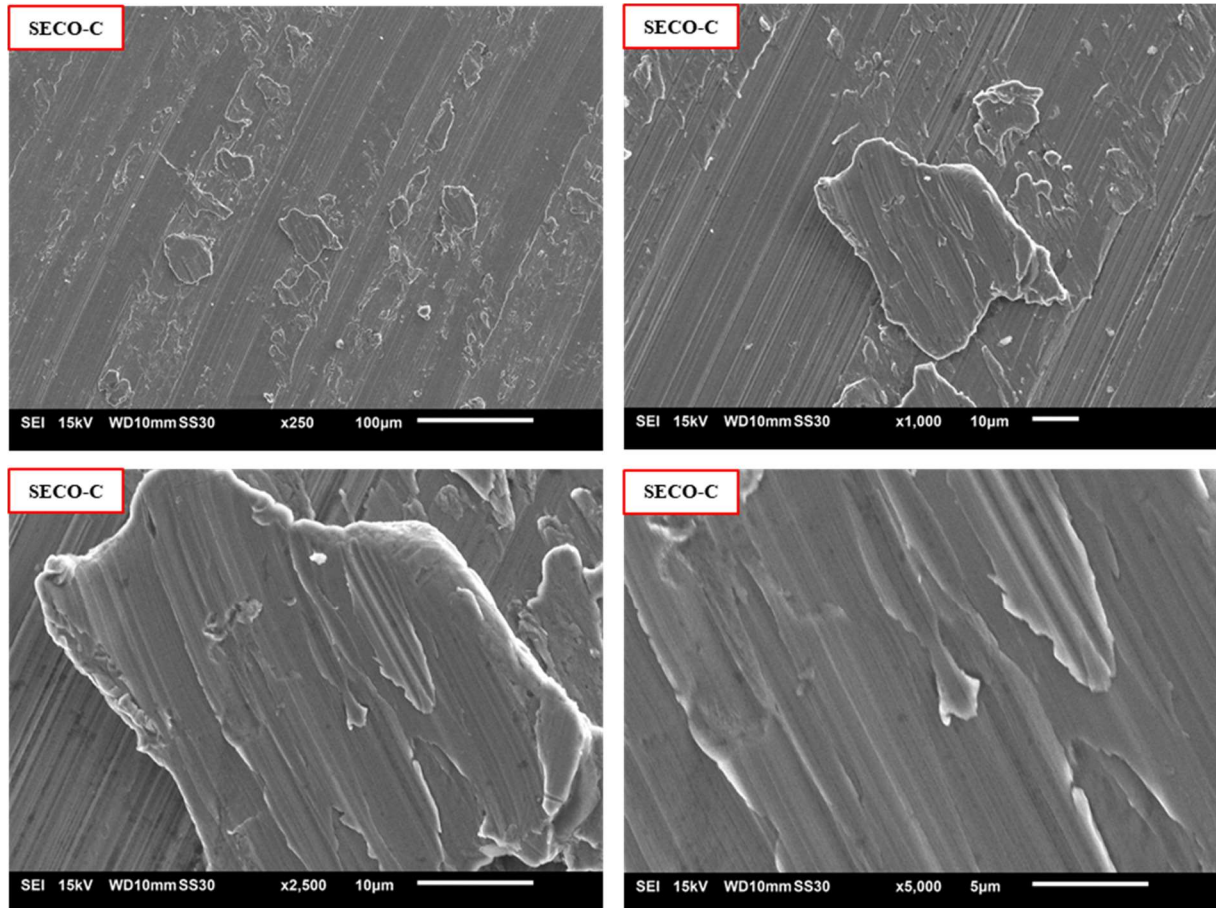


Figura C.1 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento concordante a seco

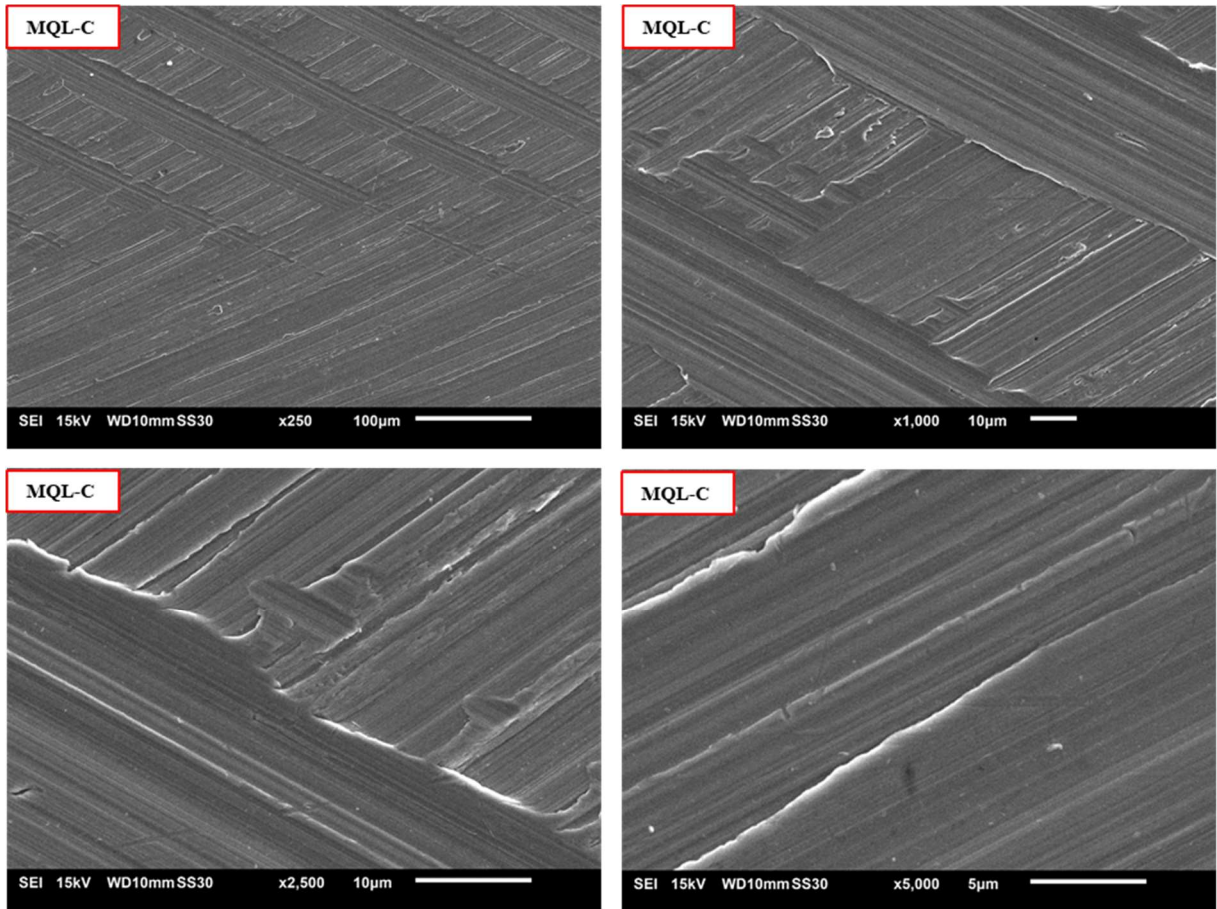


Figura C.2 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento concordante com MQL



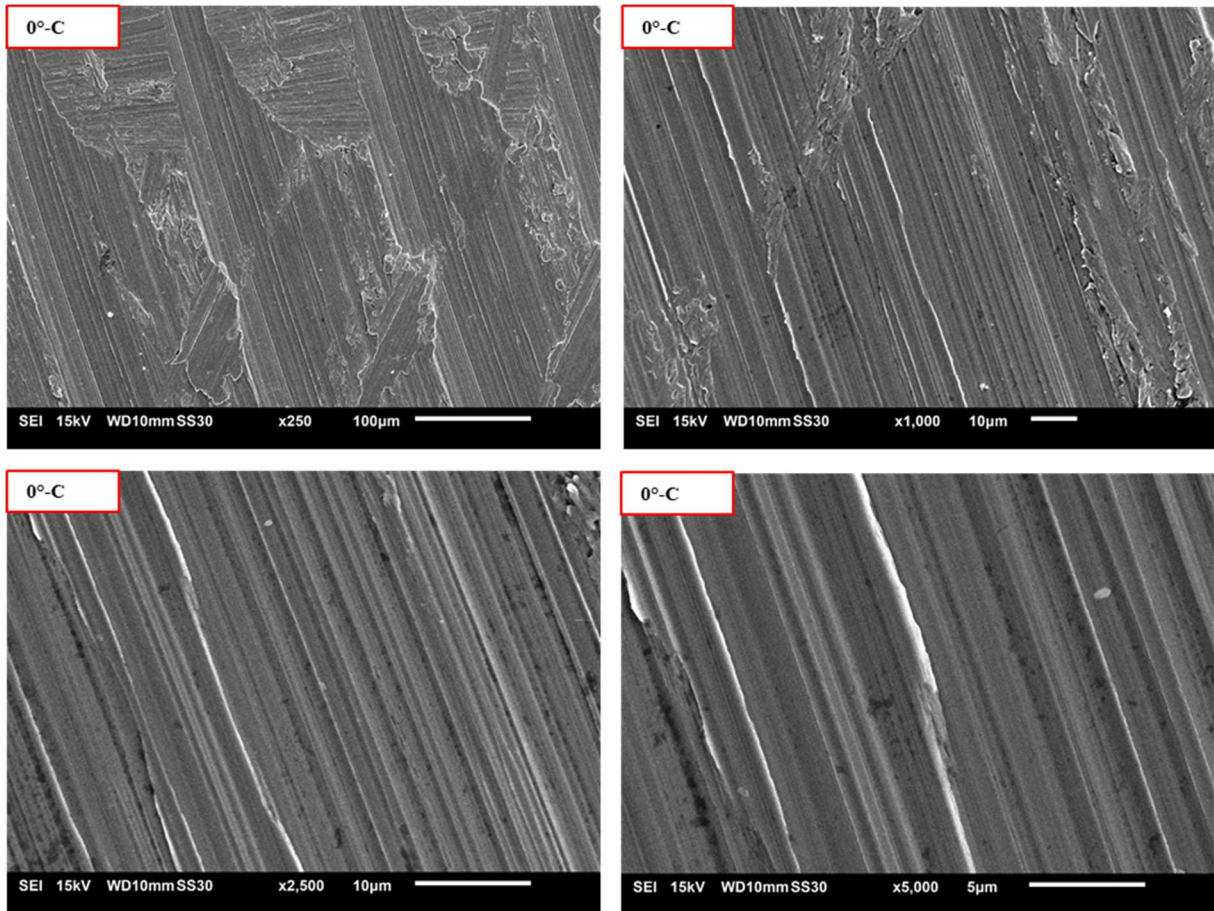


Figura C.3 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento concordante com ar refrigerado

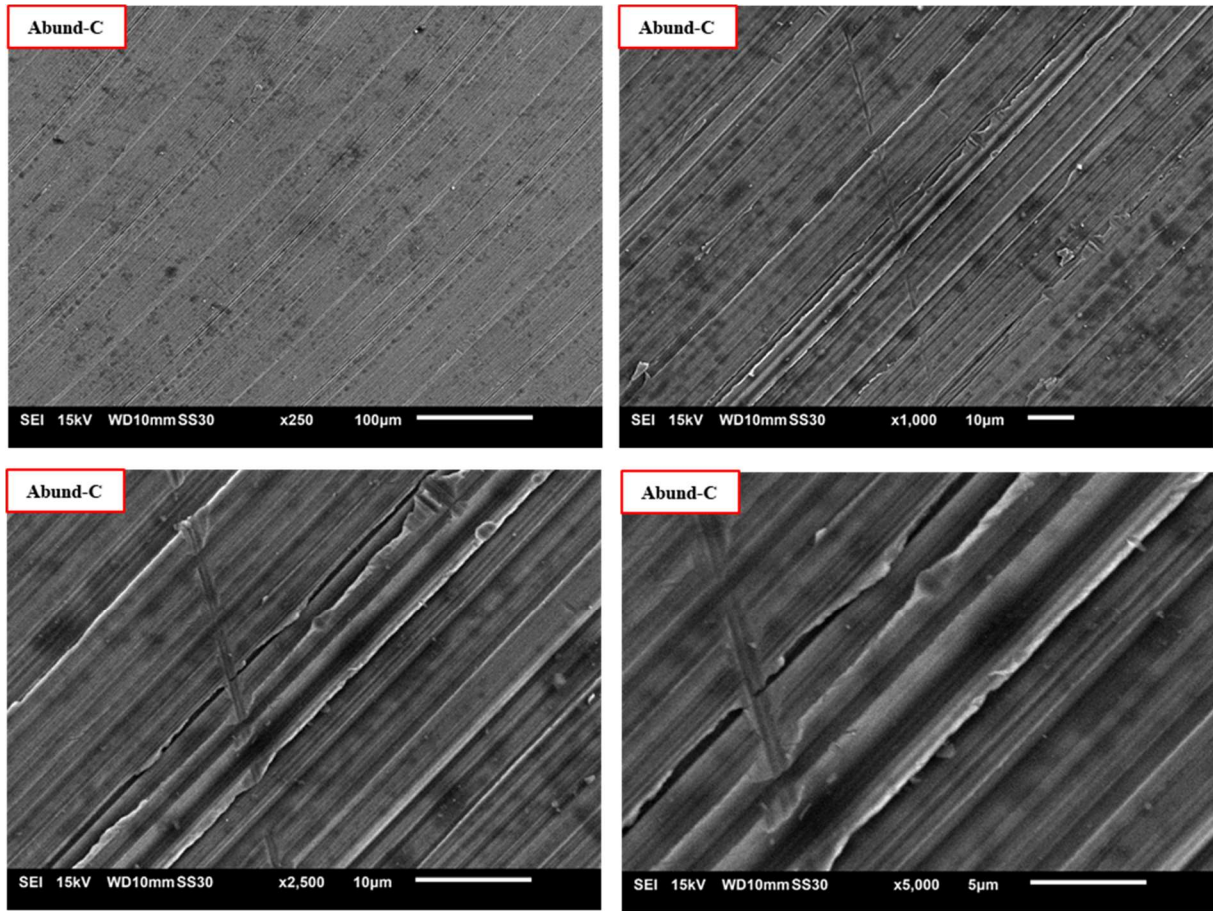


Figura C.4 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento concordante com fluido de corte em abundância

## Fresamento Tangencial Discordante

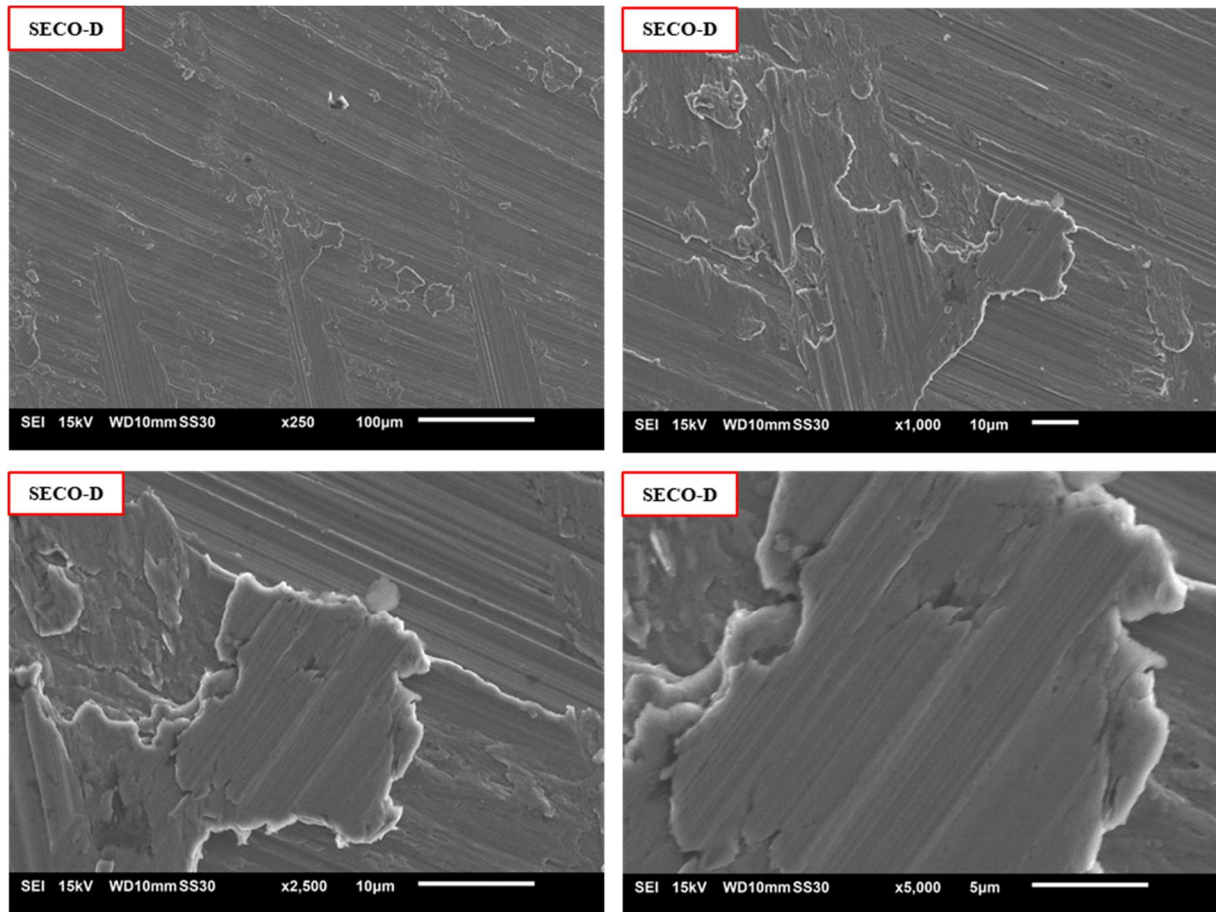


Figura C.5 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento discordante a seco



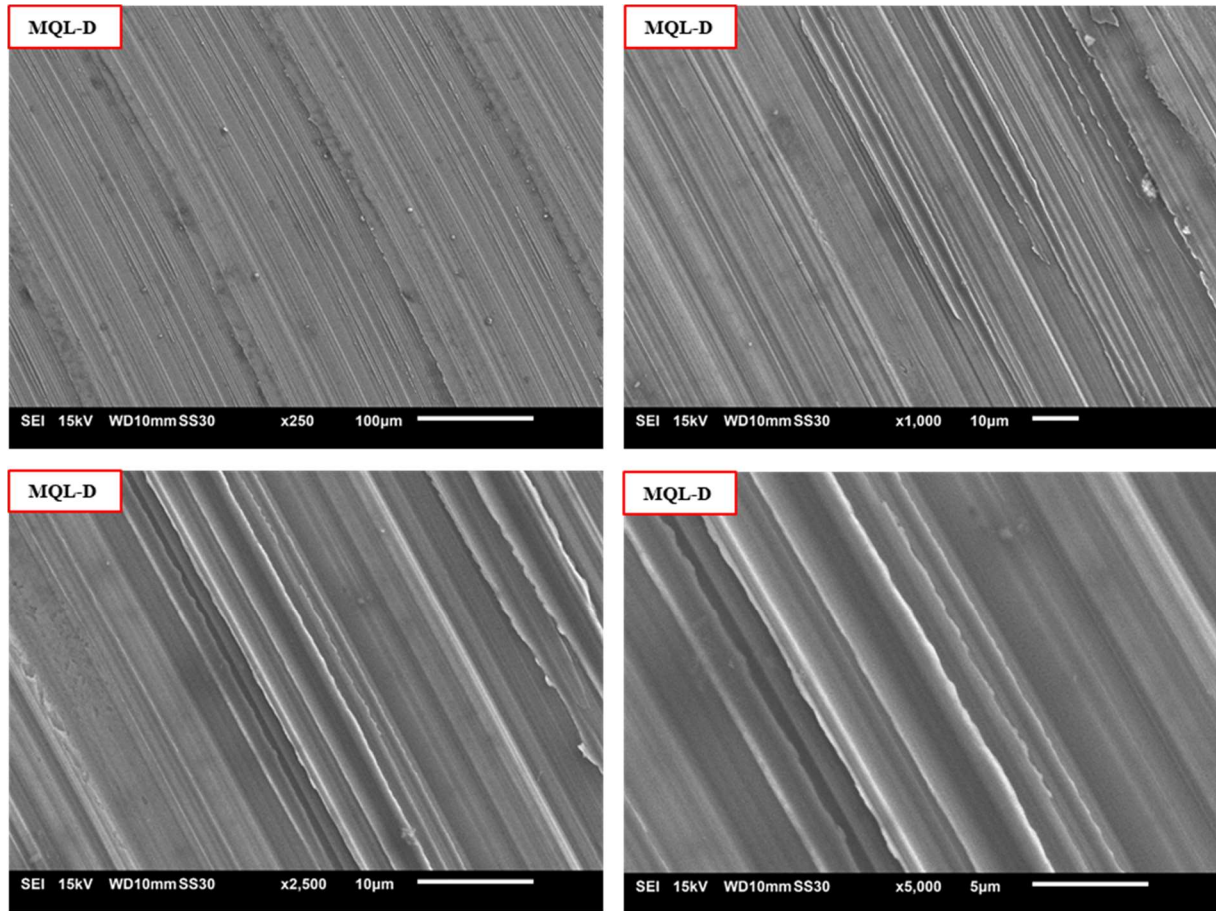


Figura C.6 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento discordante com MQL

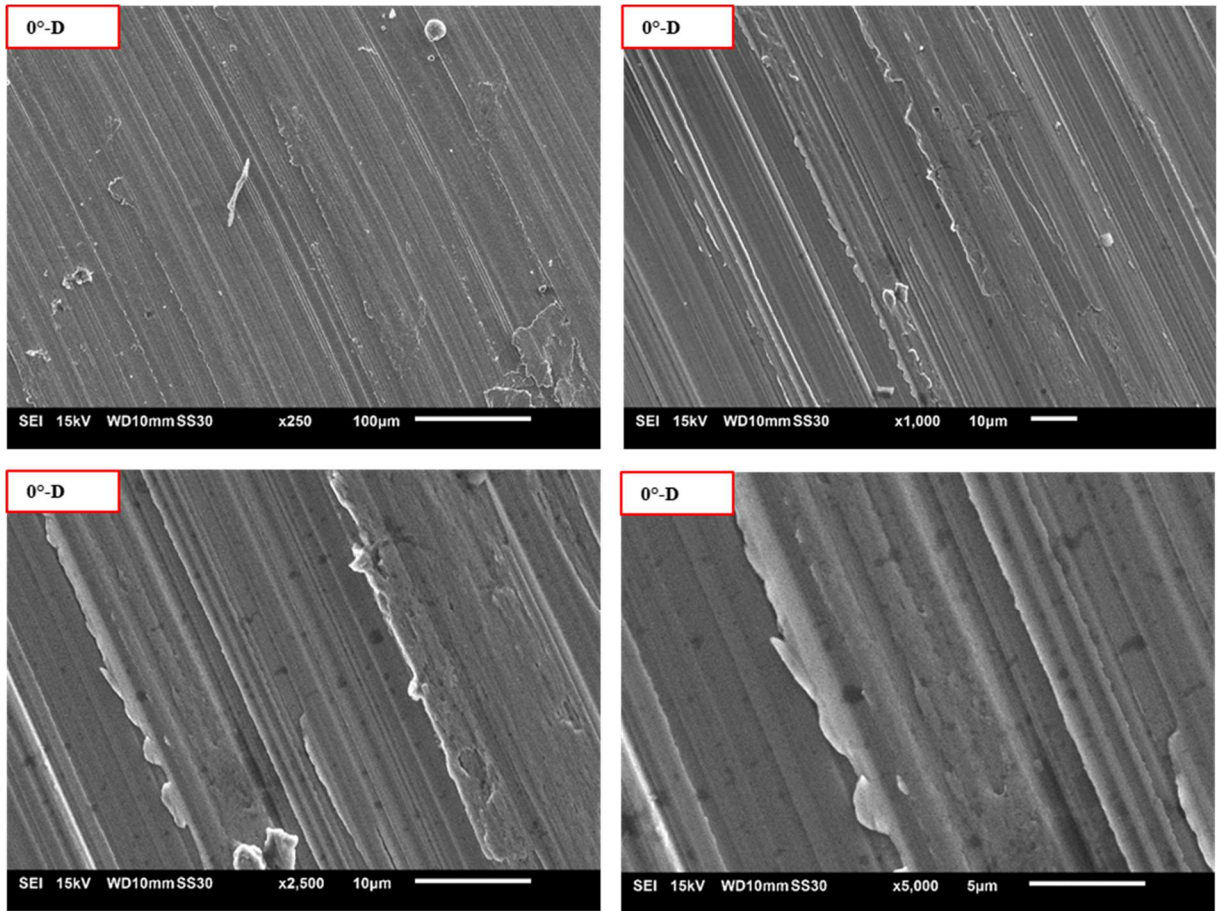


Figura C.7 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento discordante com ar refrigerado

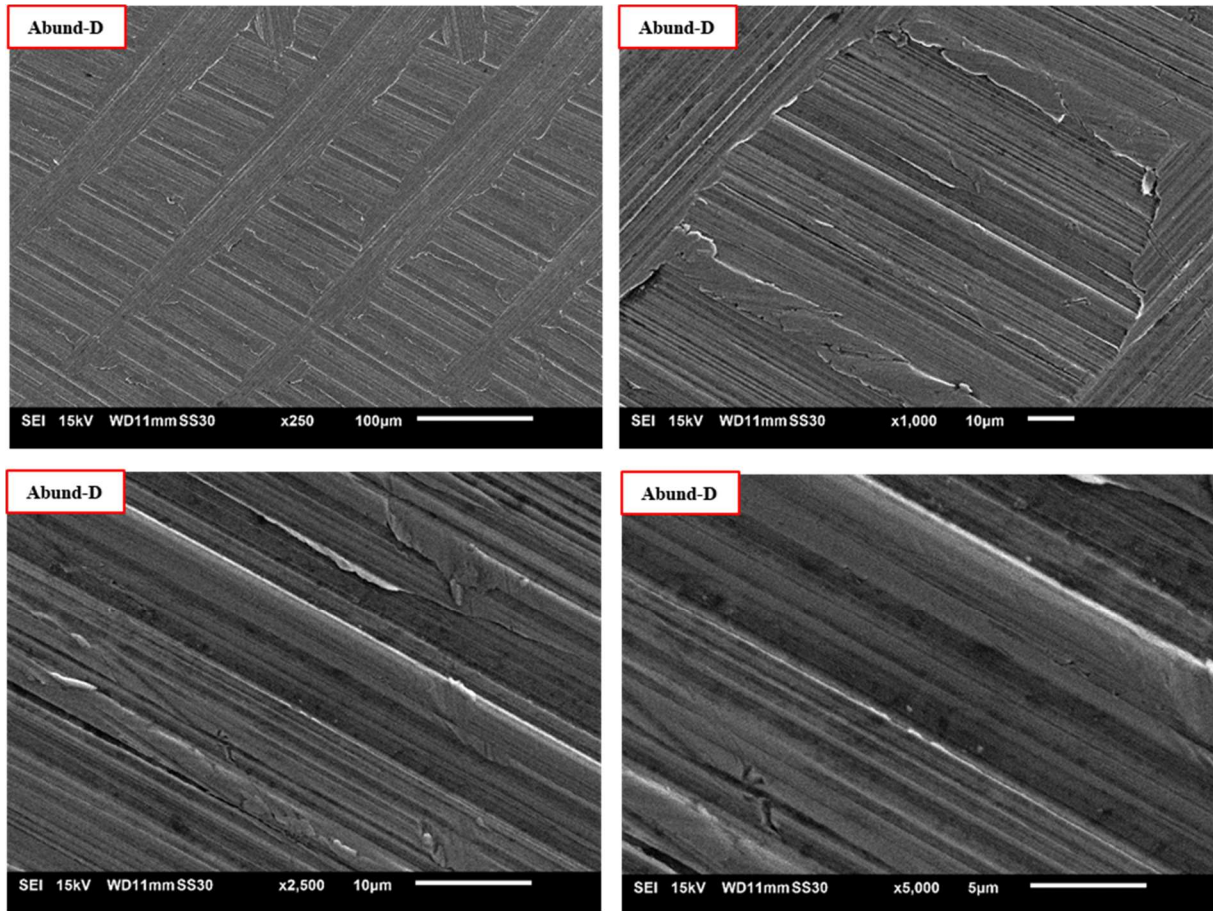


Figura C.8 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento discordante com fluido de corte em abundância



## Fresamento Frontal

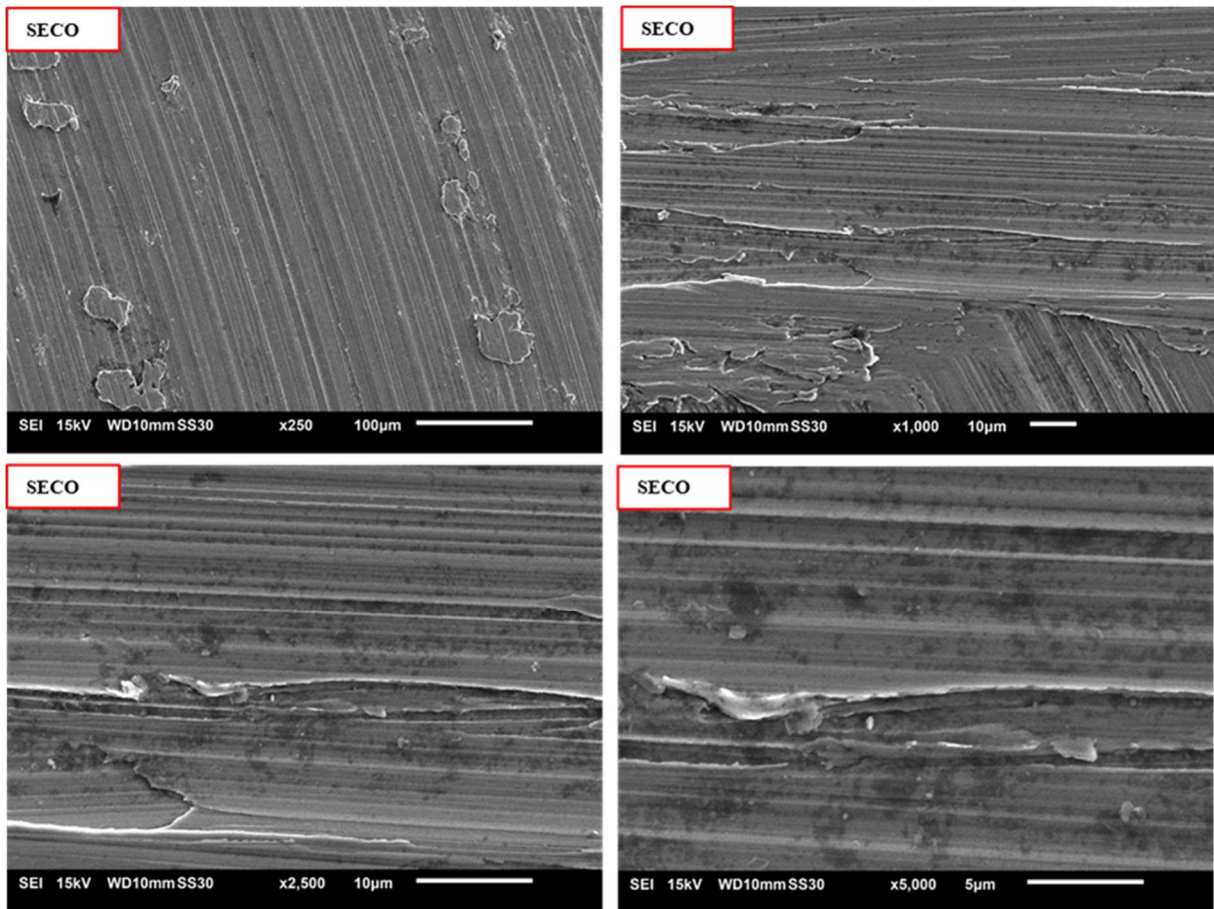


Figura C.9 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento frontal a seco

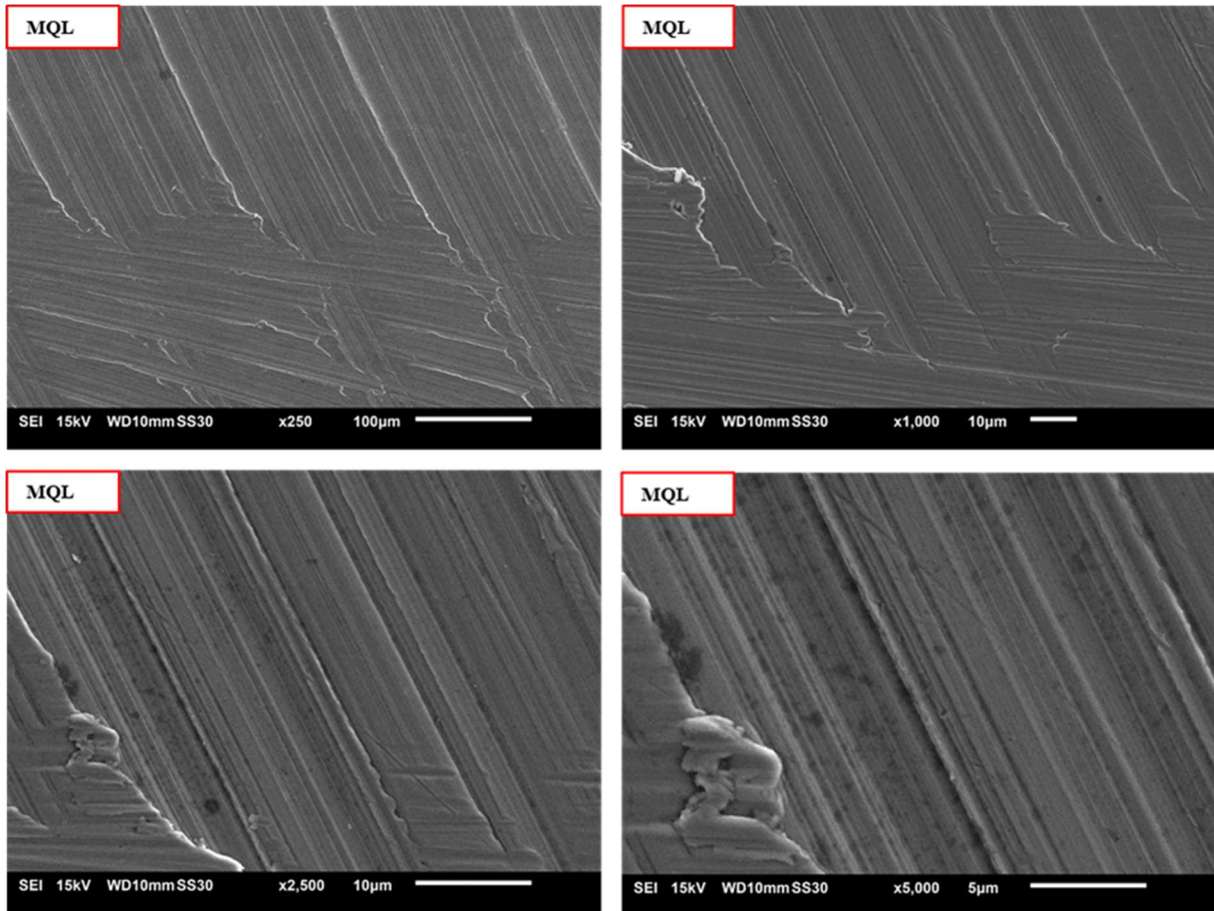


Figura C.10 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento frontal com MQL

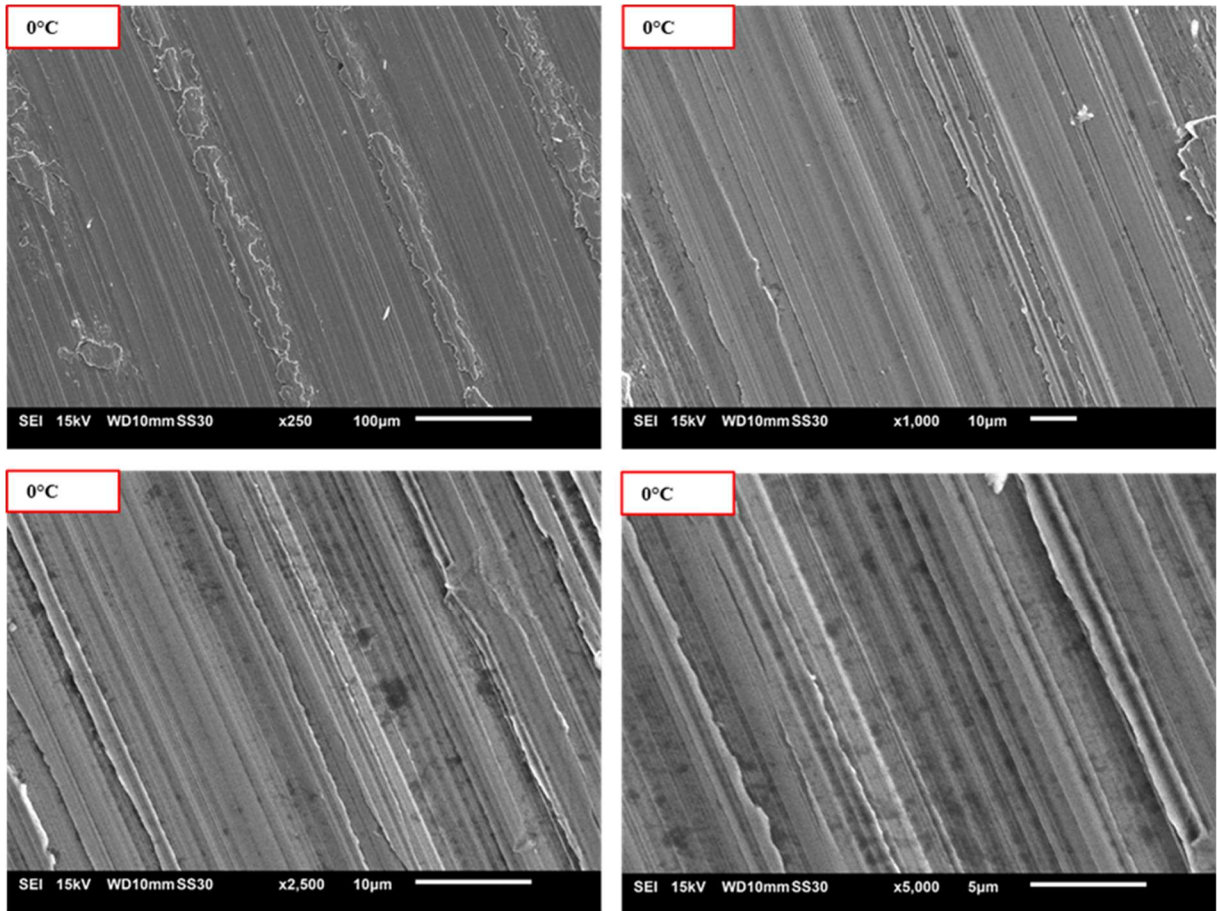


Figura C.11 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento frontal com ar refrigerado

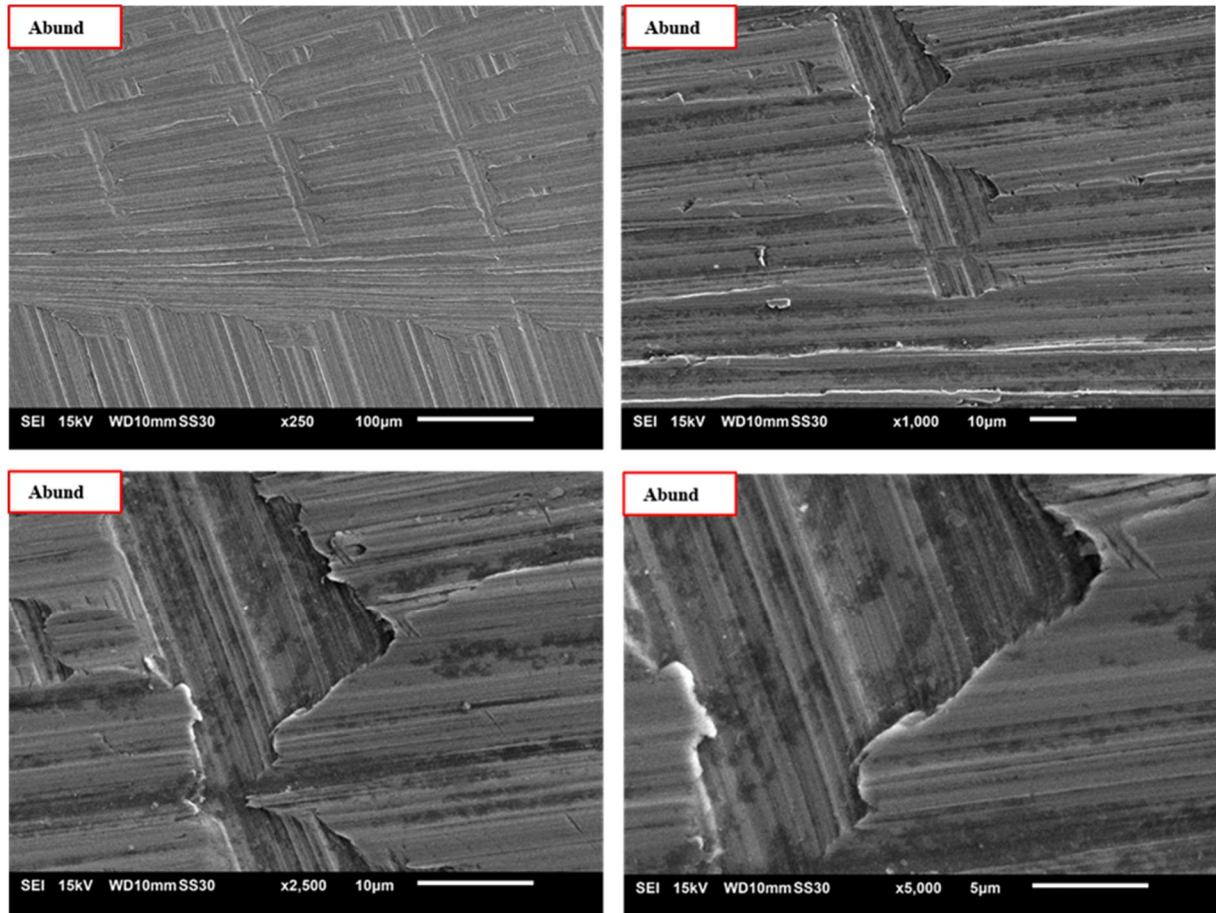
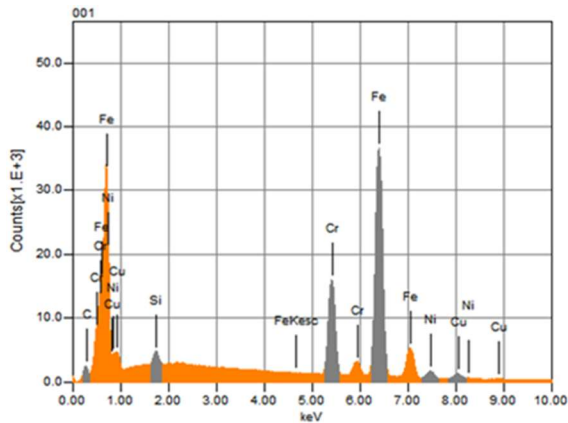


Figura C.12 – Imagens MEV das texturas geradas por fresamento frontal com fluido de corte em abundância



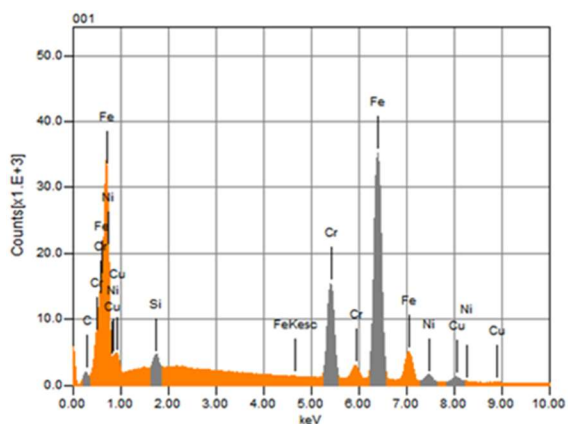
## APÊNDICE D – ANÁLISE EDS DAS TEXTURAS

### Fresamento Tangencial Concordante



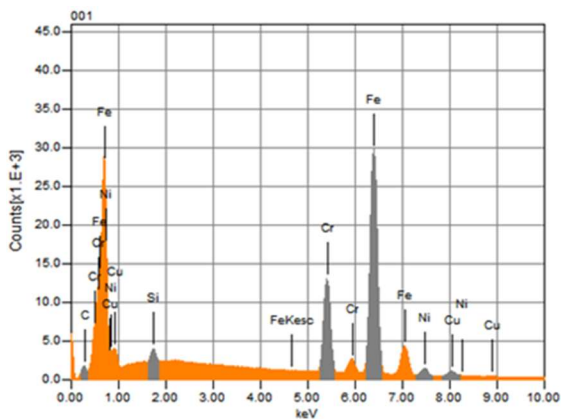
Chemical formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C	1.75	7.59	0.00	35828	0.0157595	K
Si*	0.45	0.83	0.01	59923	0.0516084	K
Cr	16.69	16.69	0.03	941034	3.1101742	K
Fe	73.00	67.97	0.06	2509094	12.1684599	K
Ni	4.19	3.71	0.03	86856	0.6742978	K
Cu	3.93	3.21	0.04	59500	0.6090846	K
Total	100.00	100.00				

Figura D.1 – Análise EDS da amostra usinada por fresamento concordante a seco.



Chemical formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C*	1.32	5.81	0.00	25666	0.0112894	K
Si*	0.45	0.85	0.01	57335	0.0493795	K
Cr	16.70	16.95	0.03	895545	2.9598324	K
Fe	73.59	69.53	0.06	2403876	11.6581821	K
Ni	4.05	3.64	0.03	79777	0.6193460	K
Cu	3.88	3.22	0.04	55882	0.5720465	K
Total	100.00	100.00				

Figura D.2 – Análise EDS da amostra usinada por fresamento concordante com MQL.



Chemical formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C*	1.42	6.24	0.00	23556	0.0126479	K
Si*	0.44	0.82	0.01	47037	0.0494508	K
Cr	16.73	16.92	0.03	763561	3.0805871	K
Fe	73.38	69.09	0.06	2040964	12.0827065	K
Ni	4.21	3.77	0.03	70643	0.6694680	K
Cu	3.83	3.17	0.04	46916	0.5862610	K
Total	100.00	100.00				

Figura D.3 – Análise EDS da amostra usinada por fresamento concordante com ar refrigerado.



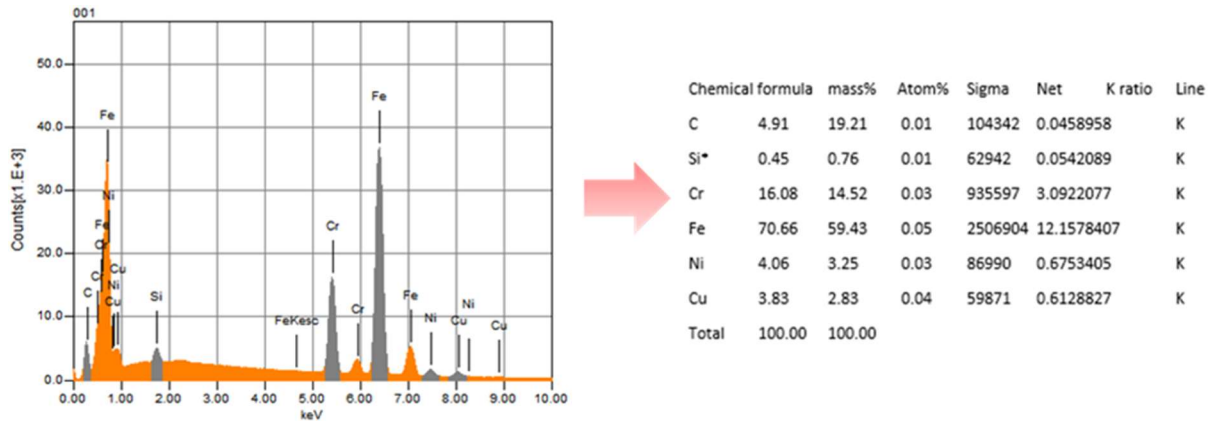


Figura D.4 – Análise EDS da amostra usinada por fresamento concordante com fluido de corte em abundância.

### Fresamento Tangencial Discordante

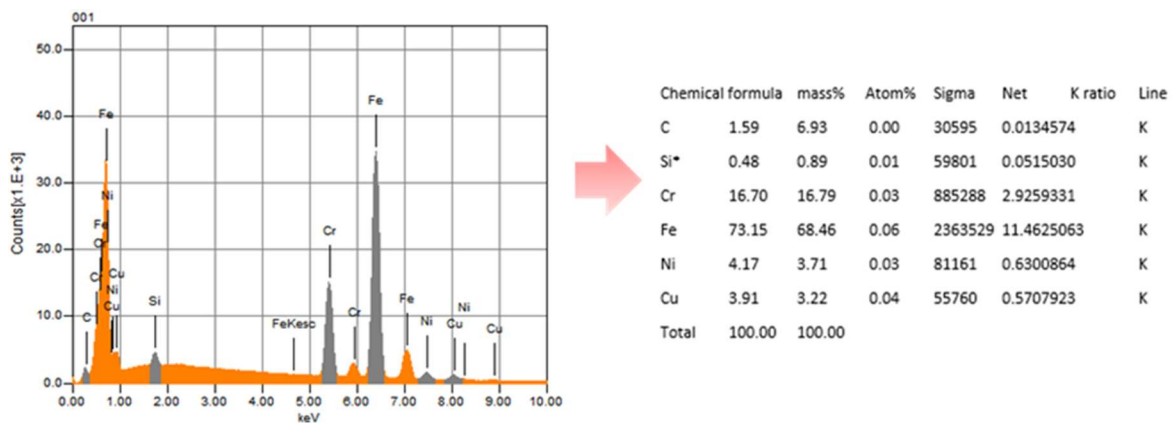


Figura D.5 – Análise EDS da amostra usinada por fresamento discordante a seco.

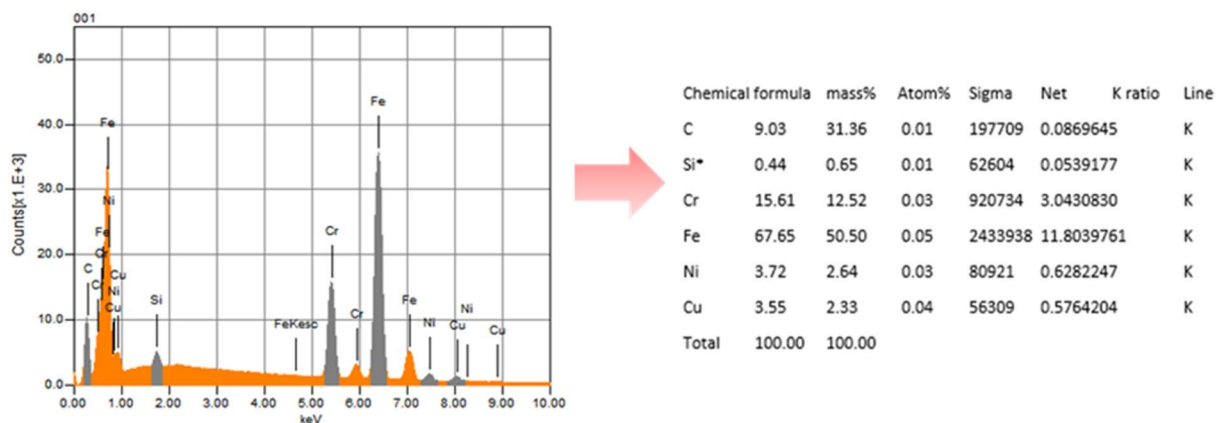


Figura D.6 – Análise EDS da amostra usinada por fresamento discordante com MQL.

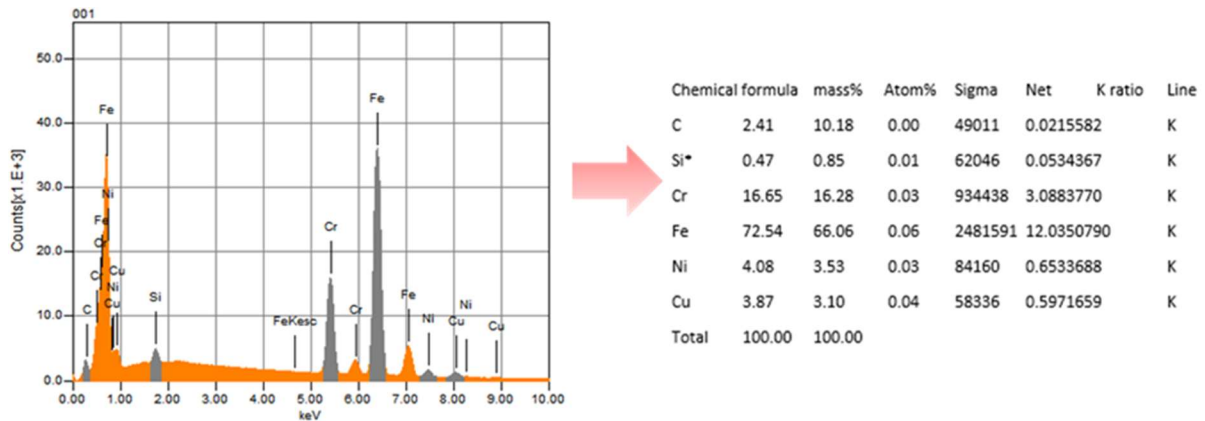


Figura D.7 – Análise EDS da amostra usinada por fresamento discordante com ar refrigerado.

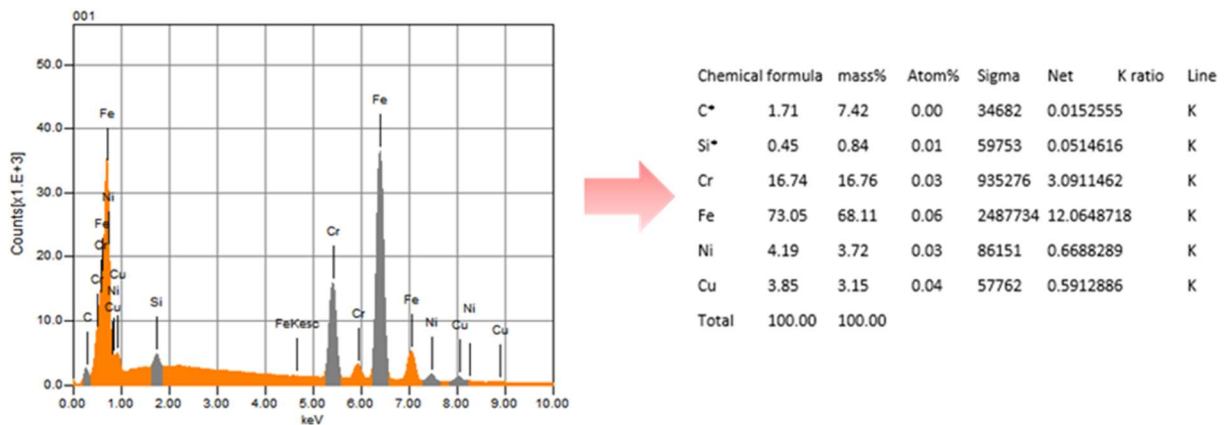


Figura D.8 – Análise EDS da amostra usinada por fresamento discordante com fluido de corte em abundância.

## Fresamento Frontal

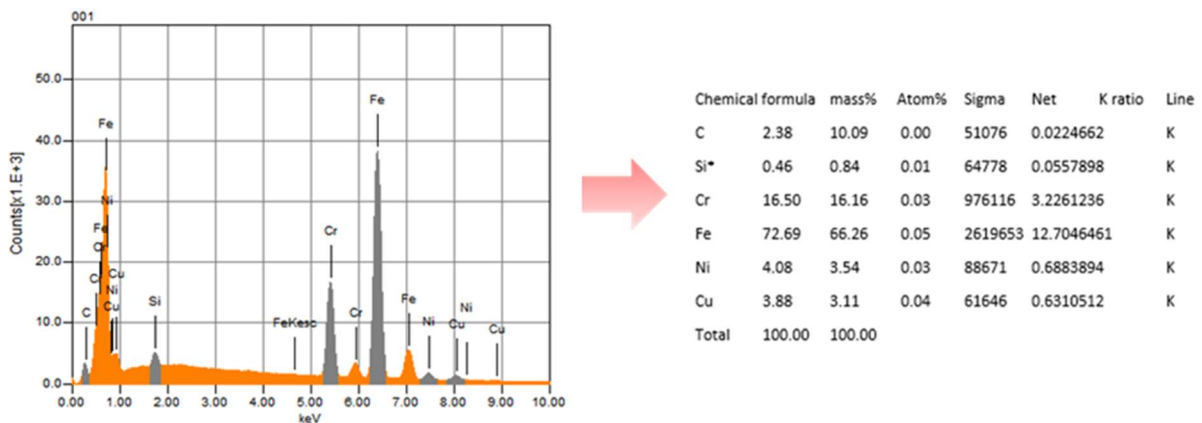
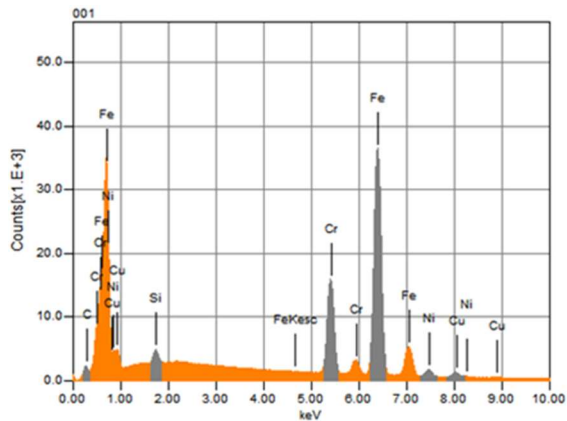
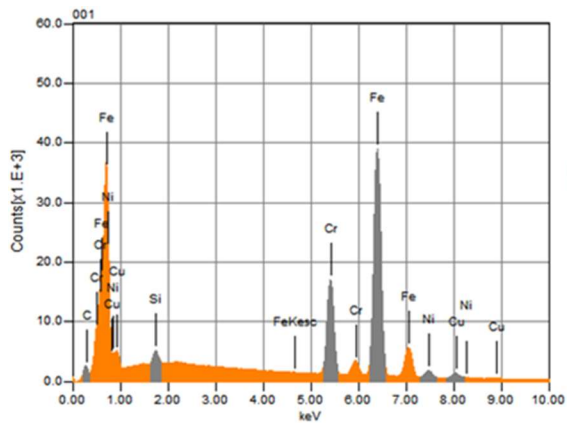


Figura D.9 – Análise EDS da amostra usinada por fresamento frontal a seco.



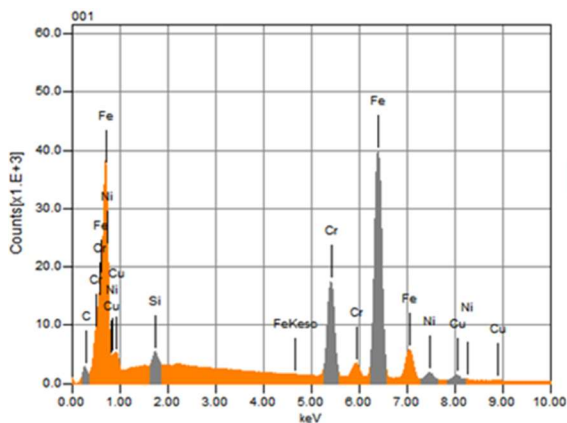
Chemical formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C*	1.61	7.02	0.00	32409	0.0142554	K
Si*	0.44	0.81	0.01	56990	0.0490827	K
Cr	16.68	16.77	0.03	924861	3.0567231	K
Fe	73.21	68.50	0.06	2472973	11.9932823	K
Ni	4.16	3.71	0.03	84802	0.6583555	K
Cu	3.89	3.20	0.04	57973	0.5934497	K
Total	100.00	100.00				

Figura D.10 – Análise EDS da amostra usinada por fresamento frontal com MQL.



Chemical formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C*	1.60	6.96	0.00	34469	0.0151617	K
Si*	0.45	0.84	0.01	63445	0.0546420	K
Cr	16.68	16.77	0.03	992733	3.2810452	K
Fe	73.09	68.41	0.05	2651151	12.8574009	K
Ni	4.24	3.78	0.03	92819	0.7205924	K
Cu	3.94	3.24	0.04	62998	0.6448888	K
Total	100.00	100.00				

Figura D.11 – Análise EDS da amostra usinada por fresamento frontal com ar refrigerado.



Chemical formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C	1.87	8.05	0.00	41547	0.0182787	K
Si*	0.45	0.83	0.01	65658	0.0565585	K
Cr	16.56	16.50	0.03	1017552	3.3637459	K
Fe	73.08	67.79	0.05	2735692	13.2700577	K
Ni	4.15	3.66	0.03	93752	0.7279829	K
Cu	3.88	3.17	0.04	64082	0.6561188	K
Total	100.00	100.00				

Figura D.12 – Análise EDS da amostra usinada por fresamento frontal com fluido de corte em abundância.