

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA**

**COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

JOÃO VICTOR DA COSTA CAMPOS

JOÃO VITOR DE SOUSA DE LIMA

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE AÇO INOXIDÁVEL
DUPLEX SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE USINAGEM**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RIO DE JANEIRO

2025

JOÃO VICTOR DA COSTA CAMPOS
JOÃO VITOR DE SOUSA DE LIMA

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE AÇO INOXÍDAVEL
DUPLEX SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE USINAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Dr^a. Tatiane De Campos Chuvas

RIO DE JANEIRO

2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

C198 Campos, João Victor da Costa
Análise da integridade superficial de aço inoxidável duplex sob
diferentes condições de usinagem / João Victor da Costa Campos
[e] João Vitor de Sousa De Lima – 2025.
75f.: il. color., enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.
Bibliografia: f. 72-75.
Orientador: Tatiane De Campos Chuvas.

1. Engenharia mecânica. 2. Aço inoxidável.
3. Aço – Propriedades mecânicas. 4. Usinagem. 5. Torneamento.
I. Lima, João Vitor de Sousa De. II. Chuvas, Tatiane De
Campos (Orient.). III. Título.

CDD 620.1

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos de João Victor da Costa Campos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por toda a força e resiliência que foram essenciais nos momentos de dificuldade e que me permitiram chegar ao final dessa jornada.

Agradeço à minha mãe, Sonia da Costa, por ser uma mulher batalhadora, que sempre me mostrou o valor do esforço, da dedicação e dos estudos na vida de uma pessoa, fatores determinantes para meu sucesso na graduação, além de todo o suporte e incentivo que me proporcionou ao longo da minha vida.

Agradeço à minha noiva, Jemima Abrahão, por todo apoio e companheirismo nos momentos de dificuldade, por não me deixar desistir ou desanimar e por sempre me mostrar que eu era capaz de chegar ao fim dessa jornada.

Agradeço à minha prima e ao seu marido, Cristiane Costa e Anderson Costa, por terem me apresentado ao que me levou a cursar engenharia mecânica.

Agradeço aos amigos por todo o apoio e aconselhamento prestados durante meus momentos de dificuldade.

Agradeço à professora Dra. Tatiane Chuvas, pela orientação e suporte na elaboração do presente trabalho.

Agradeço ao professor Dr. Matheus Campolina por todo suporte na caracterização do nosso material, permitindo que o presente trabalho fosse possível.

Agradeço aos técnicos de laboratório do LAMAT por todo suporte na preparação de nossas amostras.

Agradeço ao aluno de doutorado Rafael por todo o suporte com os experimentos de usinagem conduzidos.

Agradecimentos de João Vitor de Souza de Lima

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Severina Maria e Paulo Roberto, por todo apoio e incentivo durante todos os dias da minha vida.

Agradeço à minha namorada Marianna de Assis por todo seu companheirismo e apoio, principalmente na fase final da graduação.

Agradeço à Professora Tatiane por ter aceitado o papel de orientadora, oferecendo o conhecimento necessário para elaboração deste trabalho.

Agradeço ao professor Matheus Campolina pela ajuda durante a caracterização do material recebido.

Agradeço aos técnicos de laboratório do LAMAT pela ajuda na preparação das amostras.

Agradeço ao aluno de doutorado Rafael pela ajuda com os experimentos de usinagem.

Agradeço a todos os professores que tive ao longo da minha vida, desde o ensino básico à faculdade, por todo conhecimento e experiências que contribuíram para minha formação.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica.

RESUMO

CAMPOS, João Victor Da Costa; De LIMA, João Vitor De Sousa. **Análise da Integridade Superficial de Aço Inoxidável Duplex Sob Diferentes Condições de Usinagem**. 2025. 75f. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

Os aços inoxidáveis duplex combinam alta resistência mecânica e excelente resistência à corrosão, características que os tornam ideais para aplicações em indústrias petroquímicas, navais e de papel e celulose. Essa versatilidade se deve à sua microestrutura bifásica, composta por proporções equilibradas de ferrita e austenita e pela presença de elementos de liga como cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio. Contudo, apesar dessa versatilidade, aços inoxidáveis duplex são materiais de difícil usinagem, devido à sua baixa condutividade térmica, tendência à formação de cavacos longos e alta resistência mecânica, o que afeta negativamente a vida útil das ferramentas e a qualidade superficial das peças. Com o objetivo de contribuir para a otimização do processo de usinagem por torneamento desses aços, o presente trabalho analisou a influência de condições de lubrificação (a seco, fluido abundante e Mínima Quantidade de Lubrificante – MQL) e de diferentes velocidades de corte (125 e 200 m/min) no torneamento de um aço inoxidável duplex. Foi realizada a caracterização do material além de medições de dureza e análises de rugosidade. Os resultados mostraram que a dureza superficial das amostras não sofreu alterações significativas após a usinagem, indicando possível ausência de alterações microestruturais, em termos de rugosidade, o MQL associado à maior velocidade de corte proporcionou o melhor acabamento superficial, enquanto o fluido abundante destacou-se pela baixa variação de rugosidade entre as velocidades analisadas no trabalho.

Palavras-chave: Aço inoxidável duplex. Torneamento. Lubrificação. Integridade superficial. Variação de parâmetros de corte.

ABSTRACT

CAMPOS, João Victor Da Costa; De LIMA, João Vitor De Sousa. **Surface Integrity Analysis of Duplex Stainless Steel Under Different Machining Conditions**. 2025. 75p. Final Course Project – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

Duplex stainless steel combines high mechanical strength and excellent corrosion resistance, characteristics that make them ideal for applications in the petrochemical, naval, and pulp and paper industries. This versatility is due to their biphasic microstructure, composed of balanced proportions of ferrite and austenite, as well as the presence of alloying elements such as chromium, nickel, molybdenum, and nitrogen. However, despite this versatility, duplex stainless steels are difficult to machine due to their low thermal conductivity, tendency to form long chips, and high mechanical strength, which negatively impact tool life and surface quality of the workpieces. In order to contribute to the optimization of the machining process by turning for these steels, this study analyzed the influence of lubrication conditions (dry, abundant fluid, and Minimum Quantity Lubricant – MQL) and different cutting speeds (125 *and* 200 m/min) on the turning of duplex stainless steel. Material characterization, hardness measurements, and roughness analyses were performed. The results showed that the surface hardness of the samples did not undergo significant changes after machining, indicating a possible absence of microstructural alterations. In terms of roughness, MQL associated with high cutting speed provided the best surface finish, while flood coolant stood out for the low variation in roughness between the cutting speeds evaluated in this study.

Keywords: Duplex stainless steel. Turning. Lubrication. Surface integrity. Variation of cutting parameters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Classificação dos processos de fabricação.....	15
Figura 2: Principais operações realizadas no torno	16
Figura 3: Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no torneamento.....	17
Figura 4: Classificação dos metais duros segundo a NBR ISO 513.....	20
Figura 5: Exemplos de insertos de metal duro revestidos	22
Figura 6: Classificação da integridade superficial.....	23
Figura 7: Parâmetros de rugosidade	25
Figura 8: Efeitos dos fatores geométricos para determinar o acabamento teórico da superfície de ferramentas monocortante: (a) efeito do ângulo da ponta, (b) efeito do avanço e (c) efeito do ângulo de posição da aresta secundária.	25
Figura 9: Rugosidade superficial vs velocidade de corte, OW (Óleo-Água), MO (Óleo Mineral), PO (Óleo de Pongam), SO (Óleo de Simarouga) e NO (Óleo de Neem).....	30
Figura 10: Macrografias obtidas por MEV: seco (A) e com MQL (B).....	31
Figura 11: (a) Microestrutura do Aço AISI 410 temperado; (b) Microestrutura do Aço AISI 410 revenido	33
Figura 12: Aço 409A laminado a frio com 85% de redução e recozido a 850 °C	34
Figura 13: Aço inoxidável austenítico AISI 304 solubilizado a 1050 °C e resfriado em água.	35
Figura 14: Aço inoxidável duplex UNS S31803 solubilizada a 1100 °C por 40 minutos e resfriada em água.....	36
Figura 15: Microestrutura de um AISD. Ferrita (fase escura) e Austenita (fase clara). Microscopia ótica, ataque eletrolítico com solução de 30% vol HNO ₃ . Aumento de 1000X. .	37
Figura 16: Aço 17-4PH solubilizado a 1040 °C/1h seguido de resfriamento em água.	38
Figura 17: Desempenho comparativo em usinagem em diversos tipos de aços inoxidáveis ...	40
Figura 18: Perfil de dureza das superfícies usinadas	41
Figura 19: (a) Rugosidade superficial, com variação do avanço, (b) Rugosidade superficial, com variação da velocidade de corte, onde UN (Sem revestimento), AlTiN (Com revestimento), AlTiCrN (Com revestimento).....	43
Figura 20: Aresta de corte da ferramenta no experimento com $v_c = 10$ m/min e.....	44
Figura 21: Resultados da rugosidade sob diferentes condições de usinagem	45
Figura 22: Material como recebido	47
Figura 23: Amostra após o processo de embutimento, lixamento e polimento.....	47
Figura 24: Representação das Amostras (unidades em mm).....	49
Figura 25: Peça como preparada	49
Figura 26: Insertos utilizados nas amostras	50
Figura 27: Medição da rugosidade superficial	52
Figura 28: Micrografia do material como recebido obtida por (a) microscopia óptica (MO) (b) microscopia eletrônica de varredura (MEV). Ataque: HNO ₃ (40%).....	54

Figura 29: (a) Microestrutura via MO. (b) Separação das regiões amostrais. (c) Região 1, processada via Image J. (d) Região 2, processada via Image J. (e) Região 3, processada via Image J. (f) Região 4, processada via Image J.	55
Figura 30: (a) Microestrutura via MO. (b) Separação das regiões amostrais. (c) Região 5, processada via Image J. (d) Região 6, processada via Image J. (e) Região 7, processada via Image J. (f) Região 8, processada via Image J.	56
Figura 31: Cálculo da fase ferrítica - parte branca. (a) Região 1. (b) Região 2. (c) Região 3. (d) Região 4. (e) Região 5. (f) Região 6. (g) Região 7. (h) Região 8.....	57
Figura 32: Gráfico Fração Volumétrica da Ferrita x Região de Amostragem	58
Figura 33: Espectros de EDS das fases presentes na amostra. (a) Austenita. (b) Ferrita. (c) Austenita. (d) Ferrita.....	60
Figura 34: Superfícies das amostras obtidas via estereoscópio com aumento de 10x. (a) Amostra 1. (b) Amostra 2. (c) Amostra 3. (d) Amostra 4. (e) Amostra 5. (f) Amostra 6.	61
Figura 35: Gráfico Rugosidade Ra x Velocidade de corte.....	62
Figura 36: Gráfico Rugosidade Rt x Velocidade de corte	63
Figura 37: Medições de Dureza Rockwell A.....	64
Figura 38: Morfologia dos cavacos obtidos. (a) Amostra 1. (b) Amostra 2. (c) Amostra 3. (d) Amostra 4. (e) Amostra 5. (f) Amostra 6.	66
Figura 39: Vista superior dos insertos de corte. (a) Inseto da amostra 1. (b) Inseto da amostra 2. (c) Inseto da amostra 3. (d) Inseto da amostra 4. (e) Inseto da amostra 5. (f) Inseto da amostra 6.	67
Figura 40: Aresta principal de corte. (a) Inseto da amostra 1. (b) Inseto da amostra 2. (c) Inseto da amostra 3. (d) Inseto da amostra 4. (e) Inseto da amostra 5. (f) Inseto da amostra 6.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de Ra com diferentes fluidos de corte.....	31
Tabela 2: Parâmetros do Inserto	50
Tabela 3: Condições de Análise	51
Tabela 4: Fração Volumétrica da Fase Ferrítica.....	58
Tabela 5: Resultados das medições de Rugosidade (<i>Ra</i> e <i>Rt</i>).....	62
Tabela 6: Medições de Dureza Rockwell A (HRA)	64

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	17
Equação 2	17
Equação 3	18
Equação 4	24
Equação 5	24
Equação 6	37
Equação 7	37

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVO GERAL.....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 USINAGEM.....	15
2.2 INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....	23
2.3 FLUIDOS DE CORTE.....	27
2.4 AÇOS INOXIDÁVEIS	32
2.5 USINABILIDADE EM AÇOS INOXIDÁVEIS	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 MATERIAL	47
3.2 MEDIÇÕES DE DUREZA	48
3.3 USINAGEM DAS AMOSTRAS	49
3.4 MEDIDAS DE RUGOSIDADE.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	53
4.2 INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....	60
5 CONCLUSÕES.....	69
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERENCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

O estudo da usinagem de aços duplex tem ganhado relevância devido às suas propriedades mecânicas, como boa ductilidade e tenacidade, além de elevada resistência à corrosão devido à sua composição química, características que tornam esses materiais amplamente utilizados em indústrias como a petroquímica, naval e offshore (ABRAHÃO JÚNIOR, 2022). Contudo, a usinagem de aços duplex é desafiadora devido à sua elevada dureza, baixa condutividade térmica e tendência ao encruamento, que promovem um desgaste acelerado da ferramenta e dificultam a obtenção de peças usinadas com boa qualidade superficial (BARBOSA, 2014).

Nesse contexto, analisar a integridade superficial é de suma importância pois pode afetar diretamente as condições de aplicação do material, uma vez que a qualidade superficial está diretamente relacionada com a resistência à corrosão, fadiga e outras propriedades mecânicas. Portanto, é essencial entender como diferentes parâmetros de usinagem influenciam a integridade superficial desse material.

Considerando esses aspectos, a correta seleção das condições de lubrificação e dos parâmetros de corte influenciam significativamente os resultados obtidos. Métodos como a usinagem a seco, a lubrificação abundante e a aplicação de mínima quantidade de lubrificante (MQL) afetam diretamente o desempenho da ferramenta e a qualidade superficial da peça usinada (LIMA; BORDINASSI, 2023). Portanto, investigar como cada uma dessas condições interagem com diferentes parâmetros de corte é essencial para otimizar tanto a durabilidade das ferramentas quanto a integridade das peças usinadas.

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência das condições de lubrificação (a seco, abundante e Mínima Quantidade de Lubrificante – MQL) associadas às diferentes velocidades de corte na qualidade superficial da peça e no desgaste da ferramenta durante o torneamento de um aço inoxidável duplex.

Além disso, o presente estudo busca, através dos resultados obtidos, encontrar maneiras de otimizar os processos de usinagem por torneamento dos aços inoxidáveis duplex, demonstrando as combinações que apresentam melhores resultados em termos da qualidade superficial e eficiência produtiva.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como principais objetivos esperados no presente trabalho, pode-se destacar:

- Caracterizar a microestrutura do aço recebido para análise;
- Avaliar a dureza do aço na condição recebida;
- Analisar a rugosidade superficial resultante da usinagem sob diferentes condições de corte, a saber: lubrificação e velocidades de corte;
- Analisar o cavaco resultante da usinagem;
- Avaliar a dureza do aço pós usinagem;
- Comparar as durezas obtidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 USINAGEM

A usinagem é um processo de fabricação que envolve necessariamente a remoção de material. Esse conjunto de operações modifica a geometria original de uma peça e refina seu acabamento, resultando na formação de cavaco, geralmente caracterizado por uma geometria irregular (MACHADO, *et al.*, 2015). Os processos de usinagem podem ser classificados em: processos convencionais e não-convencionais, como ilustrado na Figura 1.

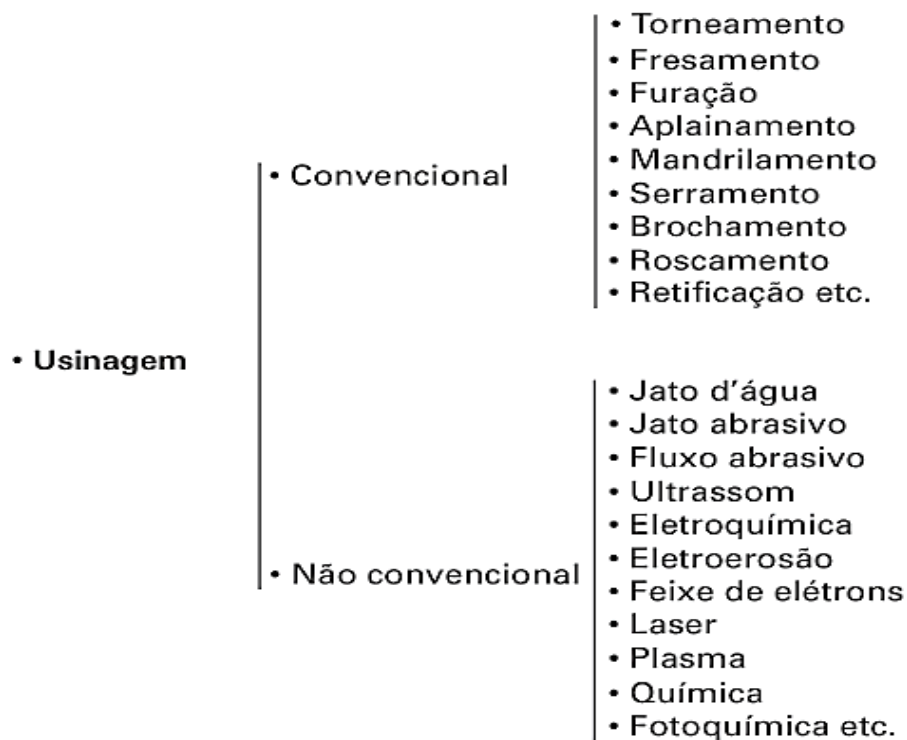


Figura 1: Classificação dos processos de fabricação
Fonte: MACHADO *et al.* (2015)

Dentre os processos de fabricação, a usinagem é a técnica de maior versatilidade, permitindo trabalhar uma ampla variedade de materiais e obter formas geométricas precisas, além de proporcionar melhores acabamentos superficiais. Por se tratar de um processo que remove material da peça bruta, não é frequentemente utilizado como principal método de fabricação, sendo reservado para as etapas finais de produção. Além de, normalmente, demandar mais tempo para dar forma ao material, ou seja, é um processo caracterizado como de alto custo. (GROOVER, 2014)

- Torneamento

O torneamento é um processo de usinagem no qual uma ferramenta remove material de uma peça em rotação. Durante o procedimento, a ferramenta avança paralelamente ao eixo de rotação da peça, seguindo velocidades de corte, avanço e profundidades de corte específicas (GROOVER, 2014). A Figura 2 mostra as principais operações realizadas pelo processo de torneamento.

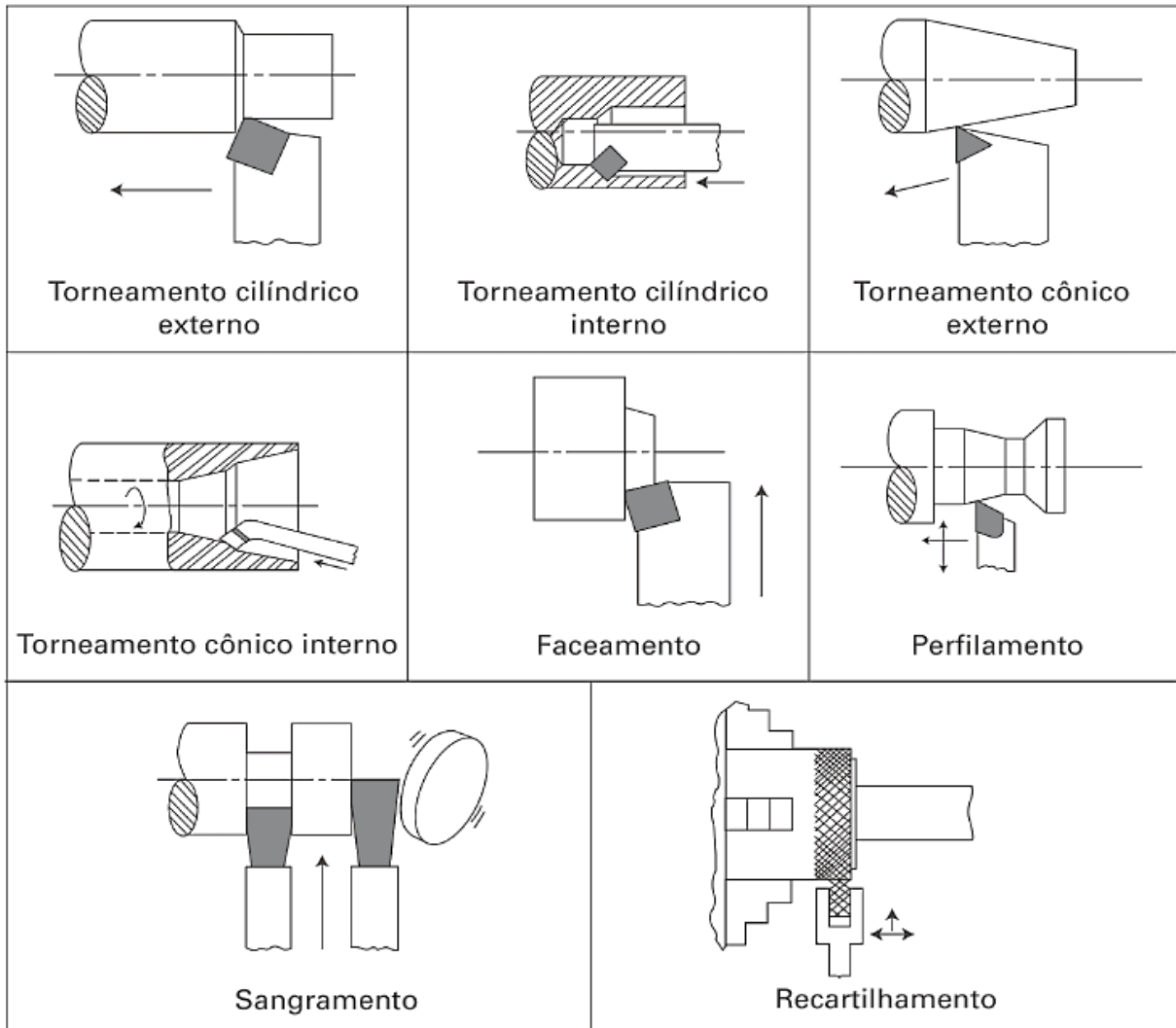


Figura 2: Principais operações realizadas no torno
 Fonte: MACHADO *et al.* (2015)

No torneamento, o movimento de corte é realizado pela rotação da peça em torno do seu eixo principal, enquanto o movimento de avanço é realizado pela ferramenta ao longo do eixo longitudinal da peça. Esses movimentos são responsáveis pela remoção de cavaco do material a ser trabalhado. A Figura 3 ilustra a representação dos movimentos de corte e avanço.

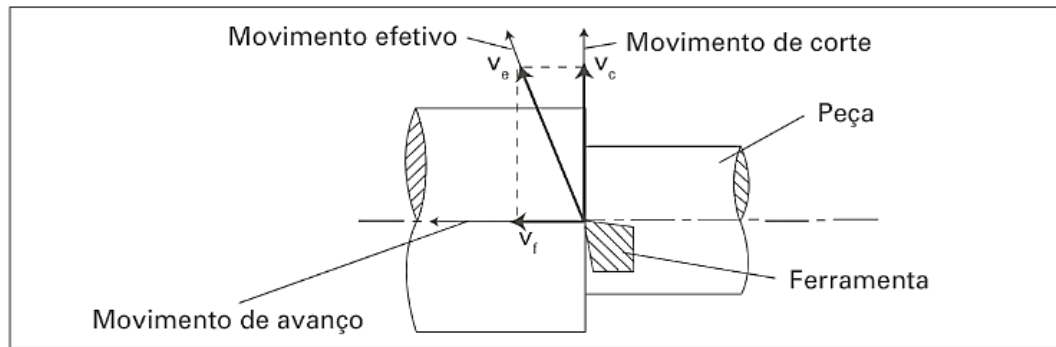


Figura 3: Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no torneamento
 Fonte: MACHADO *et al.* (2015)

- Parâmetros de usinagem

Para viabilizar os processos de usinagem é fundamental compreender os movimentos relativos inerentes a essas técnicas, bem como os parâmetros de usinagem associados. Esses parâmetros são grandezas variáveis que dependem das características da operação a ser realizada e sua correta escolha afetará diretamente na qualidade das peças a serem produzidas.

A seguir, serão apresentadas as definições dos principais parâmetros de usinagem utilizados no torneamento.

- Velocidade de corte (v_c): é um dos parâmetros mais importantes no processo de torneamento, sendo definida como a velocidade superficial da peça em relação a ferramenta (CHIAVERINI, 1977), podendo interferir na integridade superficial da peça, desgaste da ferramenta e forças de usinagem. É calculada pelo produto do diâmetro da peça (D) e a velocidade de rotação do torno (n), conforme demonstrado na Equação 1.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m/min]} \quad (1)$$

- Avanço por rotação (f): Refere-se ao deslocamento da ferramenta em relação à peça durante uma rotação completa, sendo sua grandeza representada em mm/rotação.
- Velocidade de avanço (v_f): Refere-se à velocidade de um ponto de referência da aresta de corte em relação à peça, sendo calculada pelo produto do avanço (f) e a rotação do torno (n), conforme demonstrado na Equação 2:

$$v_f = f \cdot n \Rightarrow v_f = f \cdot \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad (2)$$

- Profundidade de corte (p_c): parâmetro que indica a quantidade de material removido no processo de usinagem. Para o torneamento cilíndrico, pode ser medido pela metade da subtração do diâmetro inicial da peça (d_i) pelo diâmetro final (d_f), conforme demonstrado na Equação 3:

$$p_c = \frac{d_i - d_f}{2} \text{ [mm]} \quad (3)$$

- Ferramentas de corte

A correta seleção da ferramenta de corte a ser empregada em um processo de usinagem é fundamental para que o resultado esperado seja alcançado. Durante a usinagem, a ferramenta deve ser capaz de resistir aos esforços gerados pelo processo. Esforços que são dependentes dos parâmetros de corte adotados, da lubrificação aplicada e do material da peça trabalhada. Como consequência da variabilidade desses esforços, as ferramentas são produzidas em diversos materiais com intuito de suportar às mais diversas condições de usinagem. Entre os principais materiais utilizados estão os aços rápidos (HSS), os metais duros (como o carbetto de tungstênio), as cerâmicas e os super duros como o CBN.

No torneamento de aços em geral, o material para ferramenta de corte mais comumente utilizada é o metal duro, estando disponível no mercado para uma larga gama de aplicações. A escolha do tipo de material deve seguir os seguintes critérios (ESPANHOL, 2008):

- Dureza do material a ser usinado.
- Tipo de operação (desbaste ou acabamento).
- Tipo de lubrificação aplicada (abundante, a seco, sob diferentes tipos de pressurização).
- Parâmetros de corte adotados (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte).
- Acabamento superficial almejado.
- Custo.

Além dos critérios supracitados, a ferramenta deve ser dotada de características como: alta dureza a quente (em função das altas temperaturas que normalmente são atingidas no torneamento), boa tenacidade, alta resistência ao desgaste, alta condutividade térmica (a fim de evitar concentração de calor e consequente deterioramento da ferramenta), não interagir quimicamente com o material a ser usinado (ser inerte), alta resistência à compressão e ao cisalhamento e alta resistência ao choque térmico (ESPANHOL, 2008).

Dentre as características supracitadas, as mais importantes para o torneamento são a dureza, a resistência ao desgaste e a tenacidade. A preferência do metal duro frente aos insertos

de outros materiais, é devido à combinação de alta dureza à temperatura ambiente, alta dureza a quente, alta resistência ao desgaste e boa tenacidade proveniente das possíveis composições químicas e revestimentos, que aprimoram ainda mais as características citadas. (ESPANHOL, 2008)

O metal duro é obtido através da metalurgia do pó, processo no qual partículas de carbeto e um ligante sinterizado são combinadas para que a obtenção das características supracitadas seja possível. São, normalmente, constituídos por carboneto de tungstênio, um composto de elevada dureza e alta resistência ao desgaste, e um elemento aglomerante, normalmente cobalto, podendo ser combinado a outros carbonetos, como o de titânio, tântalo e nióbio, visando aprimorar ainda mais a dureza à temperatura ambiente (XAVIER, 2003).

Um diferencial dos insertos de metal duro é a alta variedade de geometrias e revestimentos disponíveis no mercado, que fazem com que esse tipo de inserto seja altamente versátil e adaptável a cada tipo de material e condição de corte. Dependendo da aplicação, os insertos podem ser revestidos com camadas de nitreto de titânio, carbonitreto de titânio e alumina, por exemplo, a fim de melhorar ainda mais a resistência ao calor e ao desgaste. A possibilidade de confeccionar insertos ideais para uma dada aplicação, faz com que a vida útil da ferramenta aumente consideravelmente e evite um grande número de paradas para troca de insertos, contribuindo para processos de corte mais eficientes, peças de maior qualidade superficial e geométrica e uma produção industrial mais competitiva.

Com intuito de facilitar e auxiliar a correta seleção de uma ferramenta de corte, surgiu o sistema de classificação de classes de ferramentas ISO, onde os insertos são classificados em função dos materiais que eles são aptos a usar. A Figura 4 apresenta o sistema de classificação segundo a NBR ISO 513.

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Metais duros			
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	a ↑	b ↓
M	Amarelo	Aço inoxidável: Aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	a ↑	b ↓
K	Vermelho	Ferro fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	a ↑	b ↓
N	Verde	Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	a ↑	b ↓
S	Marrom	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	a ↑	b ↓
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	a ↑	b ↓
a – Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta. b – Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.						

Figura 4: Classificação dos metais duros segundo a NBR ISO 513

Fonte: MACHADO *et al.* (2015)

Além dos dados e parâmetros contidos na Figura 4, a seguinte descrição pode ser feita acerca de cada classe (letras):

- **Classe P:** destinada à usinagem de aços carbono e aços baixa liga e, conseqüentemente, são ferramentas próprias para usinagem de materiais maleáveis e dúcteis que geram cavacos longos. Possuem boa resistência ao desgaste e dureza.
- **Classe M:** indicada à usinagem de aços inoxidáveis, que são materiais de difícil usinagem em função das propriedades mecânicas que possuem, resultando em

alto desgaste das ferramentas e altas temperaturas. Devido a esses fatores, as ferramentas dessa classe possuem elevada resistência ao desgaste, dureza e dureza a quente.

- **Classe K:** indicada para usinagem de ferros fundidos e materiais que apresentam comportamento frágil e que, por esse motivo, geram cavacos curtos e quebradiços.
- **Classe N:** aplicada para usinagem de metais não ferrosos, como alumínio, cobre e suas ligas, que possuem a tendência de se aderirem à superfície da ferramenta durante a usinagem em função de sua alta ductilidade. Devido a isso, as ferramentas dessa classe são projetadas buscando lidar com essa tendência, para que seja possível aumentar a vida útil da ferramenta e otimizar o desempenho da operação.
- **Classe S:** destinada à usinagem de superligas resistentes ao calor, como as ligas de titânio. Por se tratar de ligas que são utilizadas em ambientes exigentes como a indústria aeroespacial, as ferramentas dessa classe possuem dureza, dureza a quente e resistência ao desgaste extremamente altas, de forma que seja possível usar essas ligas, que são dotadas de excelentes propriedades mecânicas.
- **Classe H:** atribuída à usinagem de aços e ferros fundidos de elevada dureza e que, conseqüentemente, geram elevado calor durante a usinagem. Devido a isso, essa classe é usualmente empregada em operações de baixa velocidade de corte.

Segundo Machado *et al.* (2015), dentre os insertos de metal duro utilizados na indústria, mais de 95% fazem uso de algum tipo de revestimento e a tendência é esse número crescer. O uso de revestimentos em insertos de metal duro proporciona um desempenho muito superior comparado aos insertos sem revestimento e, com a evolução das técnicas de revestimentos, a gama de fornecedores de insertos revestidos aumentou, resultando em preços mais acessíveis e contribuindo para a tendência de crescimento citada. A Figura 5 apresenta alguns exemplos de insertos de metal duro revestidos.

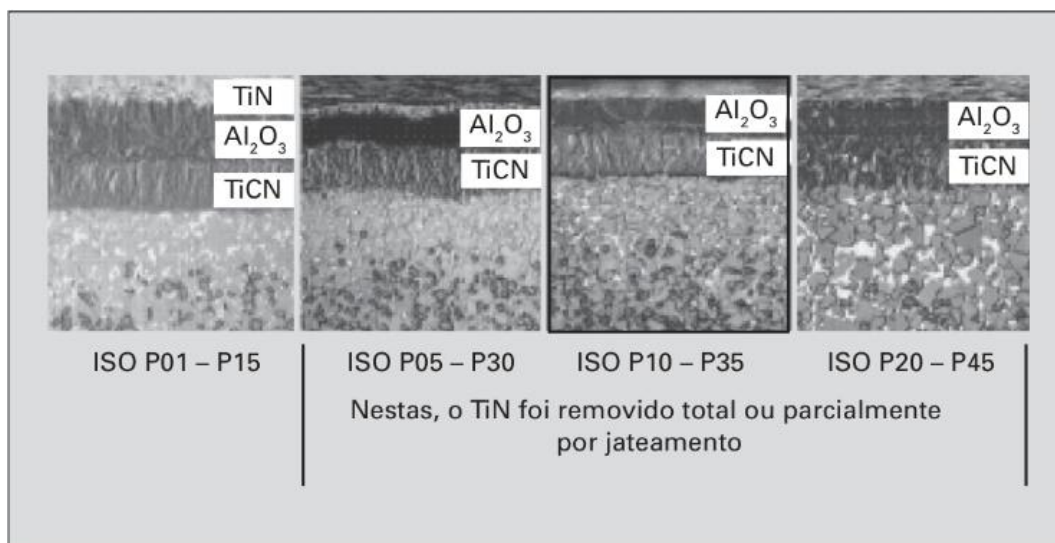


Figura 5: Exemplos de insertos de metal duro revestidos
 Fonte: MACHADO *et al.* (2015)

Os processos usualmente empregados para revestir os insertos de metal duro são a deposição química de vapor (CVD) e a deposição física de vapor (PVD). Cada processo confere características específicas à ferramenta. Dentre os revestimentos mais utilizados, estão: TiC, TiN, Al₂O₃, TiCN, TiAlN e TiAlN revestido por WC/C. Segundo Xavier (2003), as principais características dos revestimentos supracitados são:

- **Carboneto de titânio (TiC):** Apresenta baixo coeficiente de dilatação térmica e atrito, além de reduzir a ocorrência de difusão do material usinado na ferramenta.
- **Nitreto de titânio (TiN):** Possui estabilidade química maior que o TiC e diminui a tendência de difusão.
- **Óxido de alumínio (Al₂O₃):** Possui alta dureza a quente, resistência à oxidação, ações químicas e ao desgaste de cratera.
- **Carbonitreto de titânio (TiCN):** Apresenta boa resistência ao desgaste de flanco, cratera e oxidação.
- **Nitreto de titânio-alumínio (TiAlN):** Possui excelente resistência ao desgaste, oxidação e estabilidade química.
- **Nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) revestido por WC/C:** O revestimento de WC/C busca minimizar a utilização de fluidos de corte, além de reduzir o coeficiente de atrito.

2.2 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Na usinagem, a integridade superficial refere-se à qualidade final da superfície resultante de processos que envolvem deformações plásticas, recuperação elástica, geração de calor, vibrações, tensões residuais e reações químicas. Este conceito é abrangente, não se limitando apenas à textura ou forma geométrica, mas também às características das camadas subsuperficiais da peça. Assim, a integridade superficial considera tanto as alterações visíveis na superfície, como o acabamento, quanto as mudanças internas, que podem influenciar o desempenho do material em serviço. A Figura 6 abaixo demonstra as alterações que podem ocorrer no processo de usinagem. (MACHADO *et al.*, 2015)

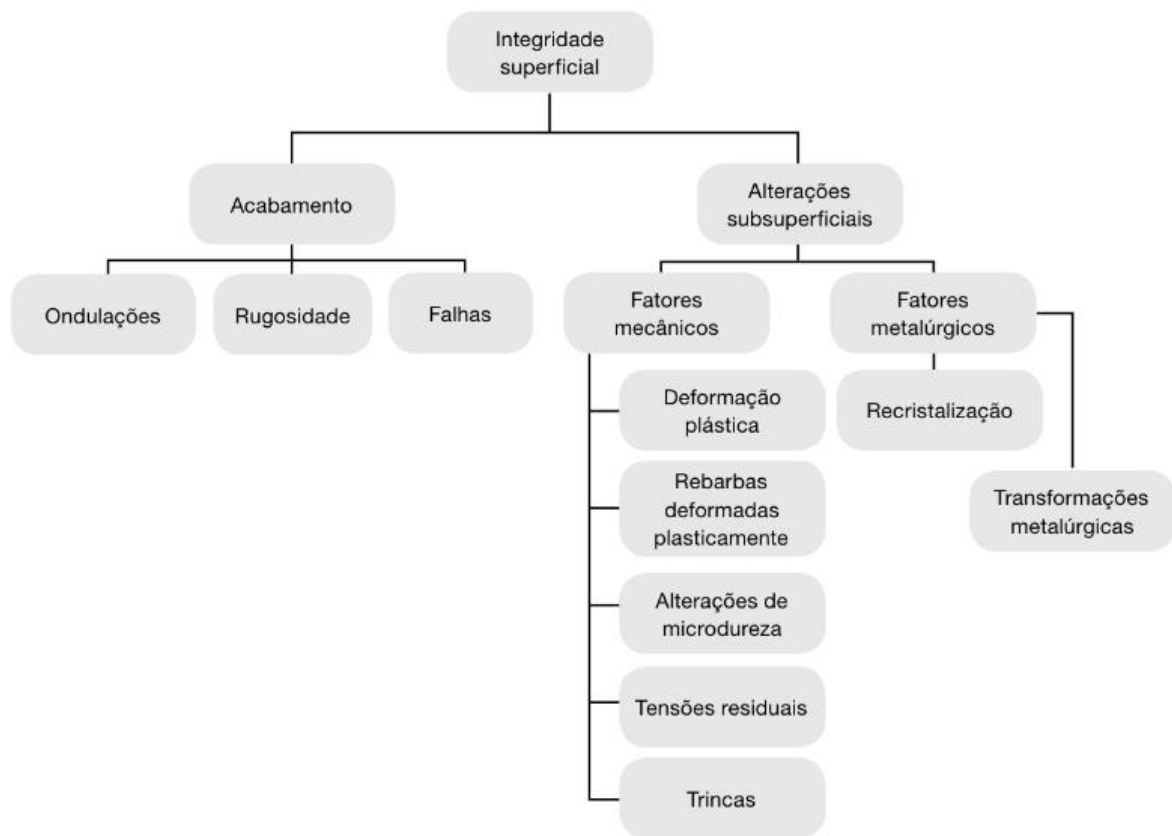


Figura 6: Classificação da integridade superficial
Fonte: FRACARO (2017)

Segundo Farias (2009), a integridade superficial exige uma abordagem interdisciplinar, envolvendo conhecimentos de metalurgia, usinagem e testes mecânicos, pois sua qualidade está diretamente relacionada à aplicação do componente. Além disso, sua quantificação é essencial para garantir condições operacionais adequadas. O autor também aprofunda o conceito de evento unitário que engloba mecanismos químicos, mecânicos e

térmicos responsáveis tanto pela remoção de material quanto pela determinação da integridade superficial.

Cada evento unitário afeta tanto a superfície quanto a subsuperfície do material, gerando camadas alteradas. Essas camadas podem ser classificadas de acordo com sua origem em: quimicamente alterada, mecanicamente alterada, termicamente alterada e alterada por tensões. Essas camadas são responsáveis por mudanças na dureza, na microestrutura, nas tensões residuais e nas deformações plásticas, influenciando a integridade superficial.

- Rugosidade superficial

A rugosidade superficial é um dos parâmetros mais importantes para a determinação da integridade superficial do material, sendo um parâmetro micro geométrico definido por uma série de irregularidades da superfície decorrente do processo de fabricação. Em relação aos fatores que definem o acabamento superficial de uma peça usinada, as ondulações e falhas devem ser evitadas, na medida em que correspondem a erros provenientes da fabricação. Por outro lado, a especificação do nível de rugosidade requerido está relacionada à aplicação do componente usinado. (NUNES, 2011)

Dentre os métodos utilizados para a quantificação da rugosidade, os mais utilizados são os parâmetros de amplitude, obtidos em função das alturas dos picos das irregularidades superficiais e/ou das profundidades dos vales, sem considerar a distância entre as imperfeições ao longo da superfície usinada. Os valores de R_a e R_t são os mais abrangentes para determinação da rugosidade, sendo demonstrado esquematicamente na Figura 7 e definidos por: (MACHADO *et al.*, 2015)

- R_a : Desvio aritmético médio, medido ao longo do comprimento de amostragem. Sendo possível calcular teoricamente para o processo de torneamento a partir da divisão do avanço da ferramenta (f) pelo raio de ponta da ferramenta (r_e), conforme Equação 4:

$$R_a = \frac{f^2}{31,2 \cdot r_e} \times 1000 [\mu\text{m}] \quad (4)$$

- R_t : Altura máxima do perfil medida entre o menor vale e maior pico do comprimento de amostragem. Sendo possível calcular teoricamente para o processo de torneamento a partir da divisão do avanço da ferramenta (f) pelo raio de ponta da ferramenta (r_e), conforme Equação 5:

$$R_t = \frac{f^2}{8 \cdot r_e} \times 1000 [\mu\text{m}] \quad (5)$$

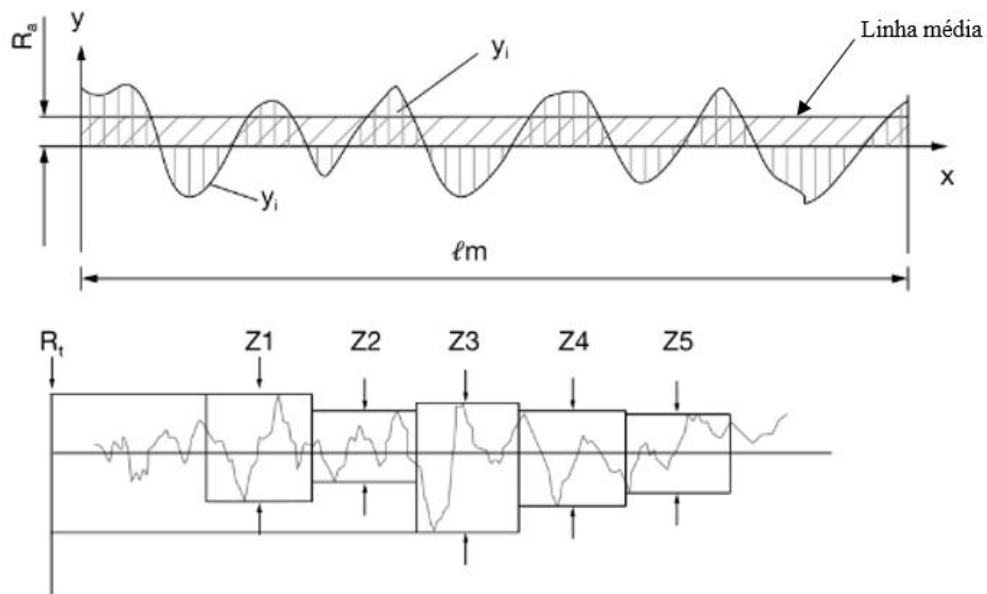


Figura 7: Parâmetros de rugosidade
 Fonte: FRACARO, 2017 (Modificado)

Vários fatores contribuem para a geometria da superfície usinada, dentre eles estão o tipo de operação de usinagem, material da peça, vibrações da máquina, geometria da ferramenta e o avanço de corte, sendo os dois últimos os parâmetros mais influentes na determinação da rugosidade superficial. A Figura 8 representa os efeitos de uma ferramenta monocortante em uma peça usinada. (GROOVER, 2014)

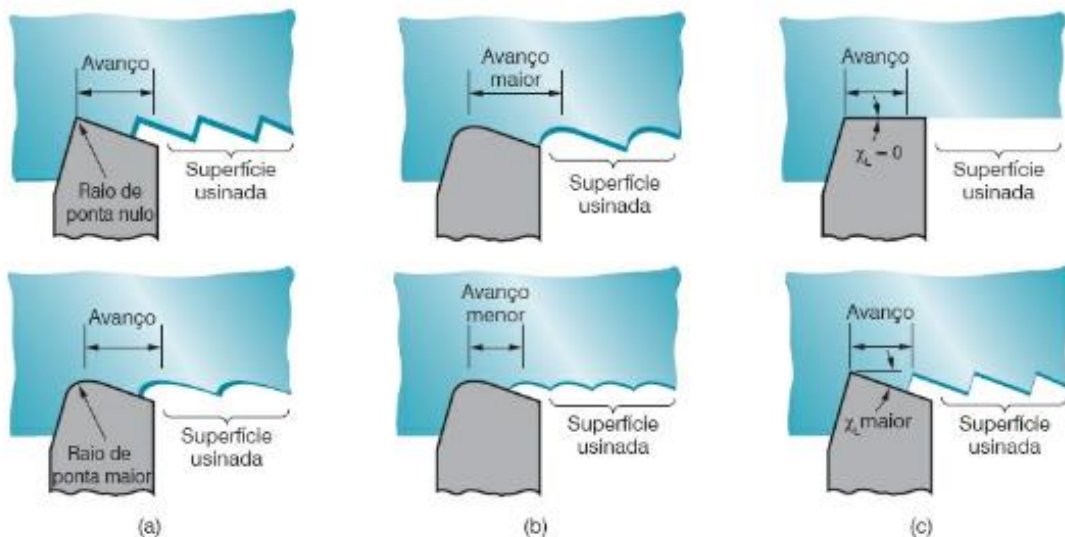


Figura 8: Efeitos dos fatores geométricos para determinar o acabamento teórico da superfície de ferramentas monocortante: (a) efeito do ângulo da ponta, (b) efeito do avanço e (c) efeito do ângulo de posição da aresta secundária.

Fonte: GROOVER, 2014

Uma das maneiras de avaliar a integridade superficial de um material usinado é verificando a sua rugosidade superficial, a fim de avaliar os efeitos dos parâmetros de corte na rugosidade. Senthilkumar *et al.* (2022) realizaram um estudo que demonstrou que o avanço (f) é o parâmetro mais influente na rugosidade superficial, seguido pela profundidade de corte (p_c) e a velocidade de corte (v_c).

Araújo *et al.* (2013) confirmam esses resultados em seu estudo sobre o torneamento de aço super duplex. Os autores investigaram como diferentes avanços influenciam as forças de corte e o acabamento superficial, utilizando ferramentas de metal duro. Os resultados indicaram que o avanço é o parâmetro mais significativo na determinação da rugosidade superficial. Além disso, o estudo destacou que um avanço maior influencia no aumento de dureza superficial do material.

O estudo de Gravalos *et al.* (2010), evidenciou a formação de uma camada superficial endurecida após o processo de torneamento sob diferentes condições de usinagem no aço inoxidável super austenítico ASTM A744 grau CN3MN, bem como a influência da rugosidade no controle de corrosão por pites, demonstrando que a escolha de um avanço e de uma profundidade de corte menores contribuem para uma menor rugosidade superficial e por consequência menor taxa de corrosão.

Apesar da rugosidade ser um dos principais parâmetros para avaliar a integridade superficial, é importante ressaltar que o processo de remoção de cavaco cria uma superfície com propriedades diferentes das anteriores ao corte, sendo essas alterações classificadas como mecânicas ou metalúrgicas. Como exemplo de alterações mecânicas estão as alterações de micro dureza e tensões residuais, sendo a primeira causada pelo efeito da temperatura durante o corte e a segunda causada pela ação da ferramenta no material. Para as alterações metalúrgicas, a principal causa é a temperatura, podendo causar recristalização dos grãos e/ou transformação de fase. (MACHADO *et al.*, 2015)

2.3 FLUIDOS DE CORTE

Durante os processos de usinagem, a aplicação de fluidos de corte é essencial para garantir eficiência, qualidade e segurança na operação. Os fluidos de corte desempenham diferentes funções e a seleção adequada do fluido de corte é um fator determinante no desempenho e no custo do processo. Segundo Diniz *et al.* (1999) as principais funções dos fluidos de corte, destacando sua importância no contexto da usinagem serão apresentadas a seguir:

- Refrigeração: Dissipam o calor gerado durante o corte, prevenindo o superaquecimento da ferramenta e da peça;
- Lubrificação: Reduzem o atrito entre a ferramenta e o material, minimizando o desgaste e aumentando a vida útil da ferramenta;
- Remoção de cavacos: Auxiliam na remoção dos cavacos da área de corte, evitando danos à peça e à ferramenta;
- Proteção contra corrosão: Formam uma camada protetora nas superfícies da peça e da ferramenta, prevenindo a oxidação.

Segundo Runge & Duarte (1989), essas funções são essenciais para o sucesso de operações de usinagem que envolvam altas temperaturas e forças de corte. A remoção eficiente de calor, a redução do atrito e a proteção contra a corrosão permitem que o processo ocorra com maior estabilidade e segurança, minimizando deformações térmicas e tensões residuais. Além disso, essas características são determinantes para prologar a vida útil das ferramentas e garantir um acabamento superficial de alta qualidade.

- Classificação dos fluidos de corte

Os fluidos de corte podem ser classificados, de maneira geral, com base em sua composição:

- Fluidos à base de água: Incluem emulsões e soluções aquosas (compostos a base de água e óleos), com alta capacidade de refrigeração, porém menor lubrificação;
- Fluidos oleosos: Compostos por óleos minerais, sintéticos ou semissintéticos, destacam-se pela elevada capacidade de lubrificação;

- Fluidos vegetais: Derivados de óleos naturais, são biodegradáveis e apresentam baixa toxicidade, sendo uma opção sustentável para várias aplicações de usinagem.

De acordo com Ferraresi (1969), cada tipo de fluido apresenta vantagens e limitações que devem ser avaliadas com base no tipo de material e na condição de corte, de forma que o melhor do fluido possa ser extraído.

- Técnicas de lubrificação

A aplicação de fluidos de corte pode ocorrer por meio de diferentes técnicas, cada uma projetada para otimizar a eficiência e atender às demandas específicas do processo de usinagem:

- Lubrificação abundante (jorro ou convencional): Envolve a aplicação abundante de fluido de corte diretamente na peça e na ferramenta. Essa abordagem é amplamente utilizada em processos de alta intensidade, pois garante uma excelente refrigeração, remoção de cavacos e proteção contra o desgaste da ferramenta;
- Mínima Quantidade de lubrificante (MQL): Essa técnica utiliza pequenas quantidades de fluido de corte, frequentemente uma mistura de óleo e ar comprimido, aplicadas em forma de névoa diretamente na zona de corte. O MQL reduz significativamente o consumo de fluidos, minimiza o impacto ambiental e facilita o descarte. Além disso, proporciona uma lubrificação eficiente e controle térmico adequado;
- Usinagem a seco: Dispensa completamente o uso de fluidos de corte, sendo adequada para materiais e ferramentas que toleram altas temperaturas. Essa técnica reduz custos operacionais e elimina o problema do descarte de fluidos, mas gera um elevado desgaste da ferramenta em determinadas condições.

- Seleção do fluido de corte

A escolha do fluido de corte ideal é uma etapa crucial que requer a análise cuidadosa de diversos aspectos técnicos e operacionais. Abaixo estão os principais fatores a serem considerados:

- Material da ferramenta: Diferentes materiais de ferramenta, como aço rápido, metal duro e cerâmica, possuem necessidades específicas de lubrificação e refrigeração. Ferramentas cerâmicas, por exemplo, suportam temperaturas mais altas e, frequentemente, dispensam fluidos em algumas aplicações específicas;
- Material da peça: A composição e a usinabilidade do material influenciam diretamente na escolha do fluido. Materiais como ligas de alumínio requerem fluidos com alta capacidade de lubrificação para evitar a adesão do material na ferramenta e a formação de aresta postiça de corte, enquanto aços demandam maior controle térmico (refrigeração);
- Parâmetros de usinagem: Variáveis como profundidade de corte, velocidade e avanço impactam diretamente as exigências sobre o fluido. Processos de alta velocidade, por exemplo, geram mais calor e requerem fluidos com alta capacidade de refrigeração;
- Condições ambientais e sustentabilidade: O impacto ambiental do fluido é uma consideração crescente. Fluidos biodegradáveis e técnicas como o MQL são frequentemente preferidos em aplicações onde a sustentabilidade é uma prioridade;
- Custo-benefício: O custo inicial do fluido e sua manutenção devem ser avaliados em relação aos benefícios proporcionados, como aumento da vida útil da ferramenta e melhora na qualidade do produto.

Cada técnica possui vantagens e limitações, e sua escolha deve considerar o material da peça, as propriedades da ferramenta e os parâmetros de usinagem. O estudo de Natesh *et al.* (2023), por exemplo, avalia a aplicabilidade de diversos tipos de lubrificantes com base em óleo vegetal sob condições de MQL, empregando o método Taguchi para otimização dos parâmetros avaliados no torneamento do aço inoxidável AISI 316L. O objetivo foi explorar o comportamento tribológico e morfológico do material durante o torneamento. Os resultados demonstraram, conforme mostra a Figura 9, que o uso de óleo vegetal de Neem, identificado

na curva “NO” apresentou as melhores condições de usinagem, como melhor rugosidade superficial, menor força de corte e menor desgaste da ferramenta de corte. Estes resultados foram obtidos com a combinação de velocidade de corte de $v_c = 140$ m/min, avanço de $f = 0,40$ mm/rot e profundidade de corte $p_c = 1,00$ mm. Além disso, evidenciou se que o mesmo lubrificante apresentou o menor desgaste da ferramenta de corte, porém para parâmetros de corte menores, com velocidade de corte de $v_c = 60$ m/min, avanço $f = 0,10$ mm/rot e profundidade de corte de $p_c = 0,20$ mm.

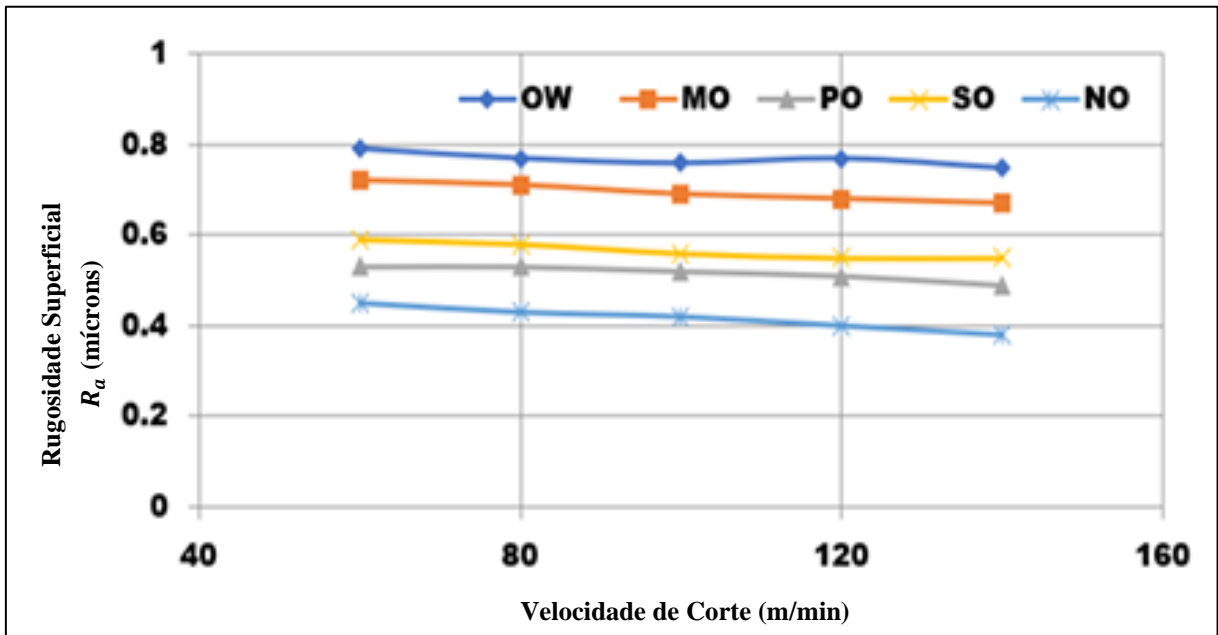


Figura 9: Rugosidade superficial vs velocidade de corte, OW (Óleo-Água), MO (Óleo Mineral), PO (Óleo de Pongam), SO (Óleo de Simarouga) e NO (Óleo de Neem)
Fonte: de Natesh *et al.*, 2023 (Modificado)

O estudo de Santos & Lima (2022) investigou a viabilidade de utilizar óleos vegetais, especificamente de coco e de soja, como alternativas aos fluidos de corte emulsionáveis tradicionais no processo de torneamento do aço ABNT 1045. Os autores mantiveram constantes a profundidade de corte $p_c = 1$ mm, avanço $f = 0,19$ mm/rot e velocidade de corte $v_c = 170$ m/min para avaliar o desempenho dos diferentes fluidos. As análises foram sobre a temperatura de corte, o desgaste médio de flanco das ferramentas e a rugosidade das peças usinadas. Dentre os fluidos testados, o óleo de coco apresentou o melhor desempenho, atingindo uma temperatura média de corte de $42,7$ °C, além de ter suportado mais passes de torneamento, sendo 129 passes até atingir o critério de vida útil determinada pelo experimento do autor. O uso de óleos lubrificantes também condicionou as amostras a uma melhor rugosidade superficial, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Valores de R_a com diferentes fluidos de corte.

Tipo de fluido	Óleo de coco	Óleo de soja	Emulsão	A seco
Média (μm)	7,492	8,893	8,331	10,475

Fonte: Santos & Lima, 2022 (Modificado)

O estudo de Halcsik *et al.*, 2019 analisou a influência do MQL em parâmetros críticos, como rugosidade superficial, desgaste da ferramenta e controle térmico, em comparação à usinagem a seco durante o torneamento do aço ABNT 1045. Os autores utilizaram o MQL com uma vazão de 50 mL/h e pressão de 0,7 Bar. Os resultados indicaram que o uso da técnica apresentou uma qualidade superficial melhor, além de terem evidenciado uma menor adesão de material na ferramenta de corte, conforme mostra a Figura 10.

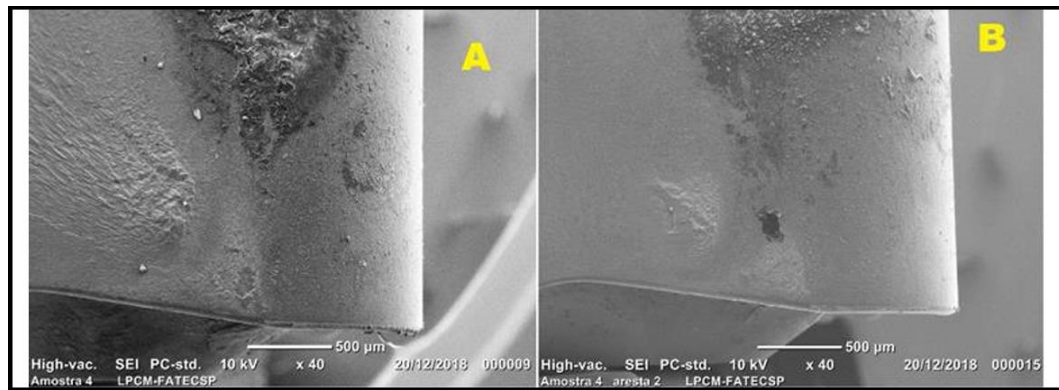


Figura 10: Macrografias obtidas por MEV: seco (A) e com MQL (B).
Fonte: Halcsik *et al.* (2019)

2.4 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro-carbono com teor mínimo de cromo de 12%, o que confere à classe resistência à corrosão superior em comparação a outros tipos de aços. A presença do cromo promove a formação de uma película de óxidos mistos (cromo, de ferro etc.) na superfície do material, que funciona como uma barreira protetora contra agentes oxidantes e corrosivos. A temperatura e o meio corrosivo são fatores que regem a resistência à corrosão, uma vez que esses fatores controlam a taxa de dissolução e a impermeabilidade da película protetora. (SILVA & MEI, 2010)

As propriedades dos aços inoxidáveis são provenientes das possíveis composições químicas existentes no mercado. Adicionalmente ao cromo, outros elementos de liga como níquel, molibdênio, manganês, nitrogênio e titânio são adicionados em teores variados para melhorar e conferir propriedades específicas como boa resistência mecânica e resistência à corrosão a altas temperaturas e em meios agressivos.

Os aços inoxidáveis são classificados em função das adições de elementos de liga e das microestruturas resultantes dessas adições, podendo ser classificados em cinco grupos: martensíticos, ferríticos, austeníticos, duplex e endurecidos por precipitação (SILVA & MEI, 2010)

- Aços inoxidáveis martensíticos

São ligas de Fe-Cr com teor de cromo entre 12% e 18% e cerca de 0,1% de carbono. São conhecidas por suas propriedades ferromagnéticas e pela capacidade de endurecimento por têmpera. A estrutura martensítica, resultante de um rápido resfriamento após tratamento térmico convencional, confere às ligas uma alta resistência mecânica e elevada dureza, o que as tornam ideais para aplicações que demandam materiais duráveis, resistentes ao desgaste e à abrasão. A Figura 11 apresenta exemplos de microestruturas do aço inoxidável martensítico AISI 410 após tratamento térmico de têmpera e revenido em diferentes condições, sendo possível observar a predominância da fase martensita na microestrutura. (LEITE, 2015)

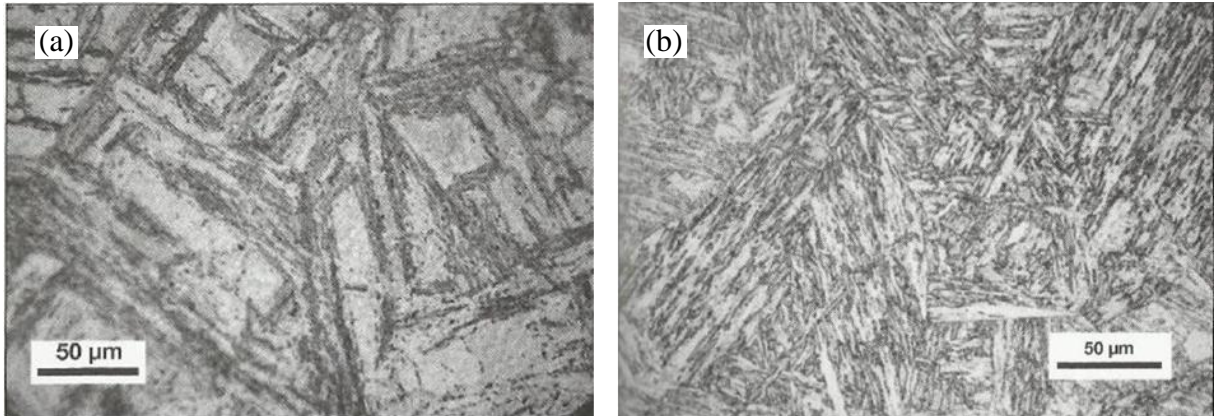


Figura 11: (a) Microestrutura do Aço AISI 410 temperado; (b) Microestrutura do Aço AISI 410 revenido
Fonte: LEITE (2015)

Aços inoxidáveis martensíticos apresentam boa resistência à corrosão, embora inferior à das ligas austeníticas. Devido a essas características, são amplamente utilizadas na fabricação de ferramentas de corte, lâminas, válvulas, e componentes que operam em ambientes severos, onde a combinação de alta dureza e resistência à corrosão é essencial.

- Aços inoxidáveis ferríticos

São ligas de Fe-Cr caracterizadas pela predominância da fase ferrítica em todas as faixas de temperatura. Diferentemente dos aços inoxidáveis martensíticos, essas ligas não são suscetíveis a endurecimento por têmpera em função da ausência da fase austenítica em sua microestrutura, resultado de um teor significativamente menor de carbono e um teor mais elevado de cromo, variando normalmente entre 12% e 30%, que são elementos de liga estabilizadores da fase austenítica e da fase ferrítica respectivamente. Na Figura 12 é possível observar a predominância supracitada da fase ferrítica na estrutura dos aços inoxidáveis ferríticos.

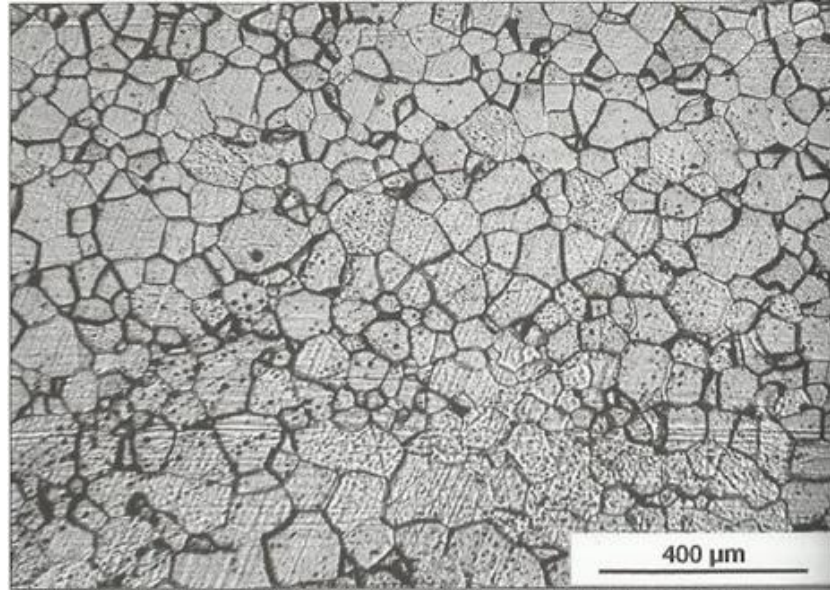


Figura 12: Aço 409A laminado a frio com 85% de redução e recozido a 850 °C
Fonte: LEITE (2015)

As características das ligas ferríticas proporcionam uma excelente resistência à corrosão, especialmente em ambientes oxidantes ou em ambientes com cloretos em concentrações moderadas. São dotadas de boa estabilidade dimensional e resistência à oxidação em altas temperaturas, o que as tornam adequadas para aplicações em indústrias químicas, petroquímicas, e na fabricação de componentes de exaustão automotiva.

Apesar de sua resistência à corrosão, as ligas ferríticas têm menor dureza e resistência mecânica em comparação aos aços martensíticos. Contudo, apresentam uma boa ductilidade e são menos propensas ao crescimento de grãos em altas temperaturas, o que facilita o processo de soldagem e a fabricação de componentes complexos. Em função das propriedades supracitadas, as ligas ferríticas são amplamente utilizadas em aplicações onde a resistência à corrosão é crucial, mas a dureza extrema não é necessária.

- Aços inoxidáveis austeníticos

São ligas de Fe-Cr-Ni contendo entre 16% e 30% de cromo, 8% e 35% de níquel e baixo teor de carbono, que desenvolvem uma estrutura predominantemente austenítica após tratamentos térmicos (SILVA & MEI, 2010). O níquel desempenha um papel crucial ao estabilizar a fase austenítica, mantendo-a estável em temperatura ambiente, o que confere a essas ligas características específicas, como a ausência de propriedades ferromagnéticas. A Figura 13 apresenta um exemplo de microestrutura de um aço inoxidável austenítico, onde é exibido a fase austenita.

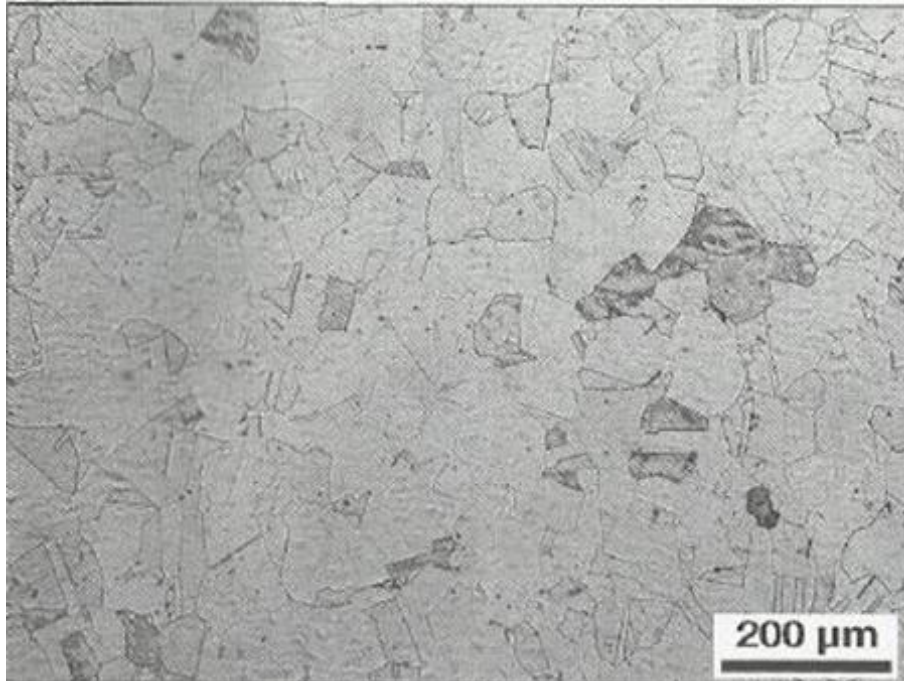


Figura 13: Aço inoxidável austenítico AISI 304 solubilizado a 1050 °C e resfriado em água.
Fonte: LEITE (2015)

A fase austenítica proporciona às ligas uma excelente resistência à corrosão em ambientes agressivos, como os que contêm ácidos fortes e cloretos, e boas propriedades mecânicas, incluindo alta tenacidade e ductilidade em uma ampla faixa de temperaturas, desde condições criogênicas até temperaturas elevadas. Como consequência dessas características, essas ligas são amplamente utilizadas em setores que exigem materiais de alto desempenho, como a indústria química, petroquímica, naval e aeroespacial, além de serem comuns na fabricação de equipamentos médicos e componentes de usinas nucleares, onde a combinação de resistência à corrosão e desempenho mecânico é fundamental.

- Aços inoxidáveis duplex

São ligas de Fe-Cr-Ni que apresentam uma microestrutura mista composta pelas fases austenita e ferrita, em proporções aproximadamente iguais (50% para cada fase). Essa proporção entre as fases, permite que essas ligas combinem as melhores propriedades dos aços austeníticos e ferríticos, tendo como diferencial uma excelente resistência à corrosão por pites associada a uma alta resistência mecânica e boa ductilidade, característica que permite a utilização dessa liga em condições de serviço rigorosas, onde tanto a resistência à corrosão e a integridade estrutural são essenciais. Um exemplo de microestrutura de aço inoxidável duplex (AID) pode ser observado na Figura 14, onde é possível observar a fase ferrita em azul e a fase austenita em amarelo (LEITE, 2015).

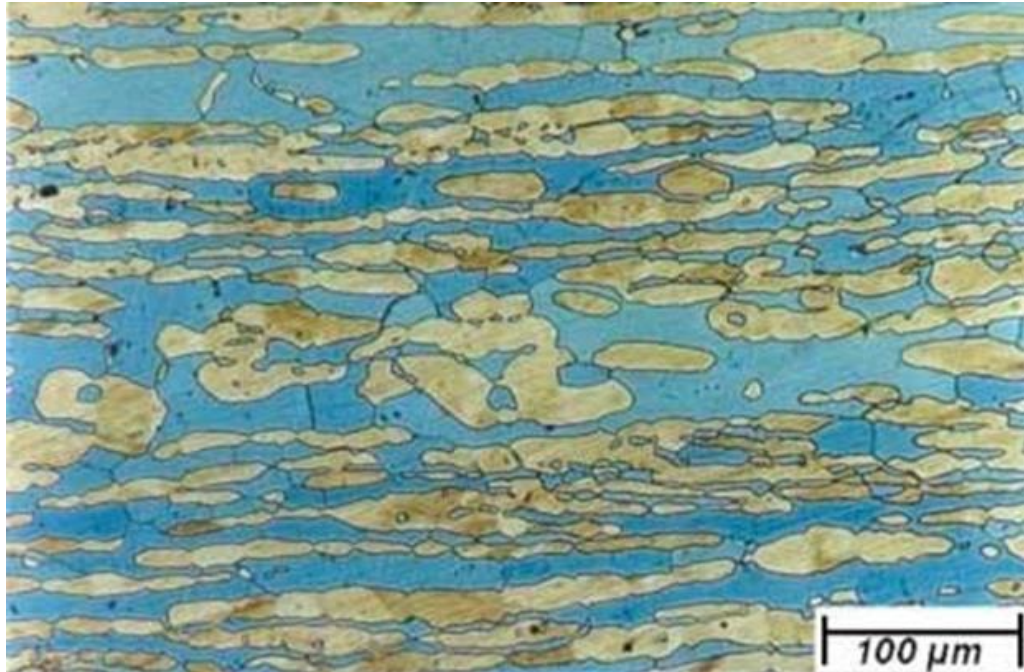


Figura 14: Aço inoxidável duplex UNS S31803 solubilizada a 1100 °C por 40 minutos e resfriada em água.
Fonte: ZUCATO *et al.* (2000)

As ligas duplex são amplamente utilizadas em aplicações que exigem uma longa vida útil, resistência a ambientes agressivos, e boa performance sob tensões elevadas, como em setores de processamento químico, petroquímico, papel e celulose e extração de petróleo *onshore* e *offshore*. (PARDAL *et al.*, 2013)

A aplicação das ligas duplex nesses setores está relacionada ao número de resistência por pites (PRE) ou (PRE_w), calculados empiricamente conforme Equações 6 e 7. As ligas que apresentam (PRE) superior a 40 são denominada aço inoxidável super duplex (AISD). (PARDAL *et al.*, 2013) Na Figura 15 pode ser observado uma microestrutura de um AISD.

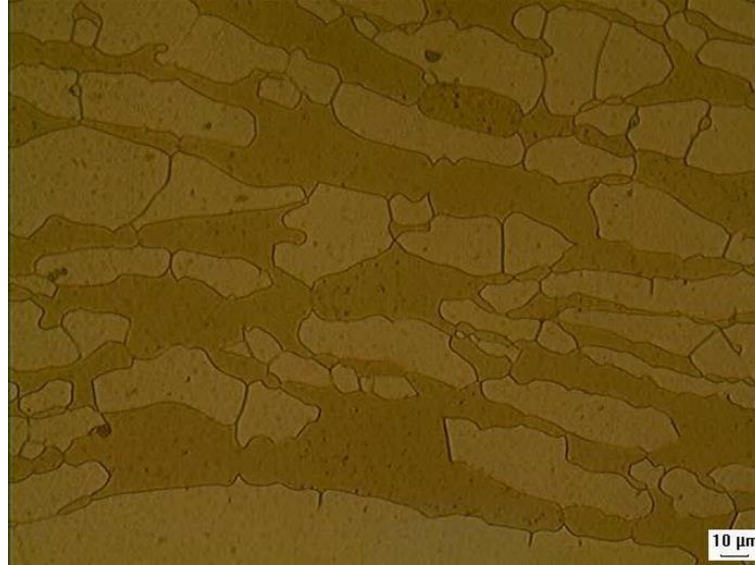


Figura 15: Microestrutura de um AISD. Ferrita (fase escura) e Austenita (fase clara). Microscopia ótica, ataque eletrolítico com solução de 30% vol HNO_3 . Aumento de 1000X.

Fonte: Barreto *et al.* (2013)

$$PRE = \%Cr + 3,3(\%Mo) + 16(\%N) \quad (6)$$

$$PRE_W = \%Cr + 3,3(\%Mo + 0,5\%W) + 16(\%N) \quad (7)$$

No entanto, embora os AID e AISD apresentem alta resistência à corrosão em diversos ambientes, especialmente em comparação com outras famílias de aços inoxidáveis, o elevado teor de elementos de liga favorece uma maior tendência à formação de fases deletérias, como chi (χ), nitreto de cromo (Cr_2N) e, principalmente, a sigma (σ). A formação dessas fases pode ocorrer em intervalos de temperatura característicos de determinados processos de fabricação mecânica, o que contribui para a deterioração das propriedades do material em condições de envelhecimento térmico. (PARDAL *et al.*, 2013; BARRETO *et al.*, 2013)

Os principais elementos de liga presentes nos AID e AISD são: cromo (Cr), principal elemento, responsável pela formação da camada passiva e estabilizador da fase ferrita (δ); molibdênio (Mo), elemento que aumenta a passividade do aço e resistência a corrosão por pites, estabilizador da fase ferrita (δ), porém sob altas temperaturas contribui para formação de fases deletérias; níquel (Ni), principal elemento estabilizador da fase austenita (γ), garantindo maior ductilidade ao material, além de retardar a formação de fases deletérias; nitrogênio (N), elemento estabilizador fase austenita (γ), também retarda a formação de carbeto de cromo devido a formação preferencial de nitretos; manganês (Mn), elemento que elimina impurezas do material, como oxigênio e enxofre, além de aumentar a resistência mecânica; tungstênio

(W), melhora a resistência mecânica e por pites em ambientes clorídricos. (VICENTE *et al.*, 2020)

- Aços inoxidáveis endurecidos por precipitação

São ligas de Fe-Cr-Ni com adições de molibdênio, que permitem o endurecimento da fase martensítica de baixo carbono por meio da precipitação de compostos intermetálicos durante o tratamento térmico. Sendo esses compostos fundamentais para o mecanismo de endurecimento por atuarem como barreiras ao movimento das discordâncias na microestrutura, limitando a deformação plástica e, conseqüentemente, aumentando a dureza e a resistência mecânica do material de forma significativa (SILVA & MEI, 2010). A Figura 16 apresenta um exemplo de microestrutura de aço inoxidável endurecido por precipitação.

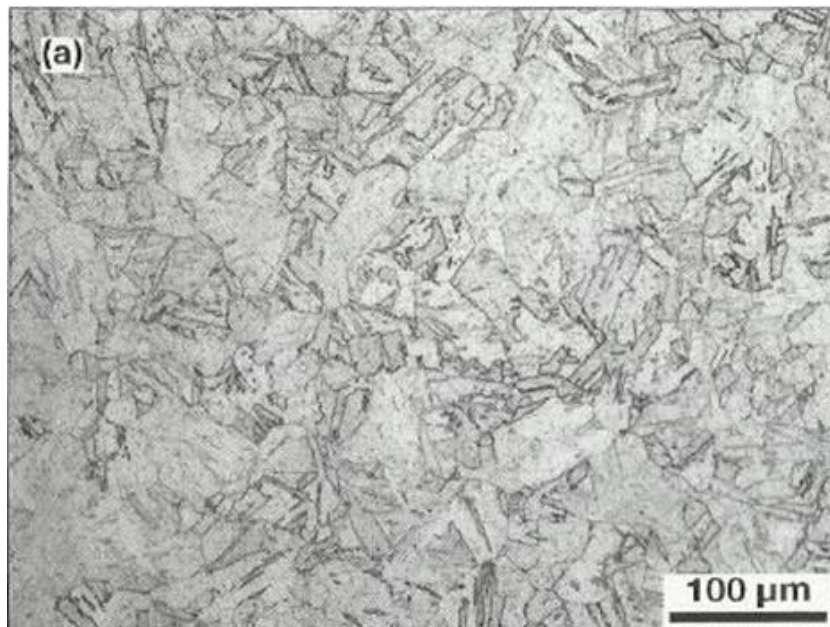


Figura 16: Aço 17-4PH solubilizado a 1040 °C/1h seguido de resfriamento em água.
Fonte: LEITE (2015)

As ligas endurecidas por precipitação são amplamente utilizadas em aplicações que exigem não apenas alta dureza e resistência ao desgaste, mas também uma excelente resistência à corrosão, como em componentes aeroespaciais, turbinas, moldes de injeção, equipamentos de perfuração de petróleo e ferramentas de precisão.

2.5 USINABILIDADE EM AÇOS INOXIDÁVEIS

A usinabilidade pode ser resumida como a facilidade do material em ser cortado sem perder suas características mecânicas. As propriedades do material que mais afetam a usinabilidade são (GAMARRA, 2017; SOUZA, 2020):

- **Dureza e Resistência Mecânica:** Valores baixos favorecem a usinagem;
- **Ductilidade:** Materiais mais dúcteis possuem tendência de formar aresta postiça de corte (APC) diminuindo a vida útil da ferramenta e piorando a qualidade superficial;
- **Condutividade Térmica:** Materiais com boa condutividade térmica tem a capacidade de dissipar o calor gerado na região de corte, diminuindo assim o desgaste da ferramenta e melhorando a tolerância dimensional;
- **Taxa de Encruamento:** Taxas de encruamento elevadas dificultam a usinagem do material devido ao aumento da resistência mecânica causada pela deformação plástica. Além disso o aumento da resistência mecânica requer mais força de usinagem, também favorecendo a APC.

Além dessas propriedades, a composição química do material também pode afetar sua usinabilidade. Nos aços inoxidáveis, elementos como o enxofre (S) podem melhorar a usinabilidade ao formar inclusões frágeis que diminuem a ductilidade e a taxa de encruamento. No entanto, essa adição reduz sua resistência a corrosão. Mesmo com essa adição, os aços inoxidáveis ainda apresentam pior usinabilidade em comparação aos aços carbono comuns. Além disso, há variações significativas no desempenho de remoção de material entre os diferentes tipos de aços inoxidáveis, como mostrado na Figura 17. (MACHADO, *et al.*, 2015; SOUZA, 2020).

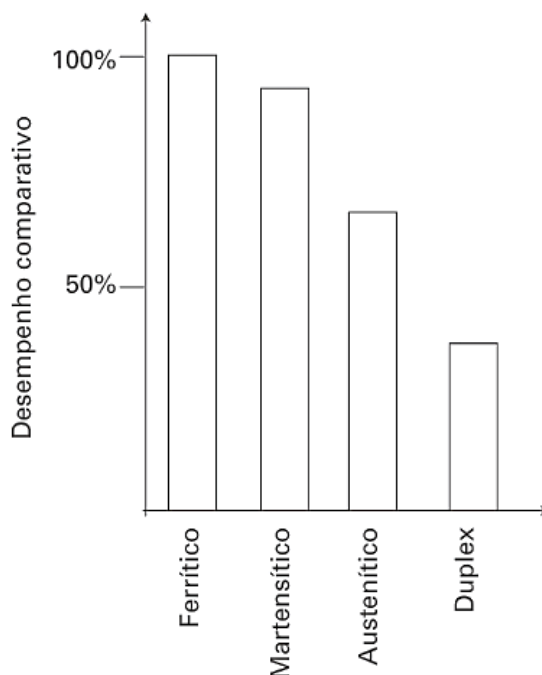


Figura 17: Desempenho comparativo em usinagem em diversos tipos de aços inoxidáveis
Fonte: MACHADO *et al.* (2015)

Os aços inoxidáveis austeníticos e duplex apresentam baixa usinabilidade devido à baixa condutividade térmica, alto coeficiente de atrito e alta dilatação térmica. Essas propriedades aliadas às condições de usinagem adversas levam ao encruamento superficial do material, devido ao aumento da temperatura superficial do material durante o corte, prejudicando a sua usinabilidade. (GRAVALOS, *et al.*, 2007)

Desta forma, é natural que as ferramentas de corte acabem sofrendo um desgaste maior quando comparadas com usinagem em aço carbono comum. Para tal são realizados experimentos que possam aumentar a vida útil da ferramenta de corte e por consequência a produtividade do material.

Gravalos *et al.* (2007) realizaram um experimento de usinagem por torneamento do aço super austenítico ASTM A351 CN3MN, onde foram mantidos constantes o avanço (f) = 0,25 mm/rot e a profundidade de corte (a_p) = 2,5 mm e variou-se a velocidade de corte (v_c) = 60 e 90 mm/min e ferramentas de corte com ângulo de saída (γ) positivos e negativos. O material apresentou um encruamento superficial, medido através do ensaio de dureza após o processo de torneamento de 1,8 vezes maior que o inicial, demonstrado na Figura 18. No mesmo estudo, foi evidenciado que um ângulo de saída positivo da aresta de corte (γ), aliado com um aumento da velocidade de corte proporcionou um menor desgaste da ferramenta de corte

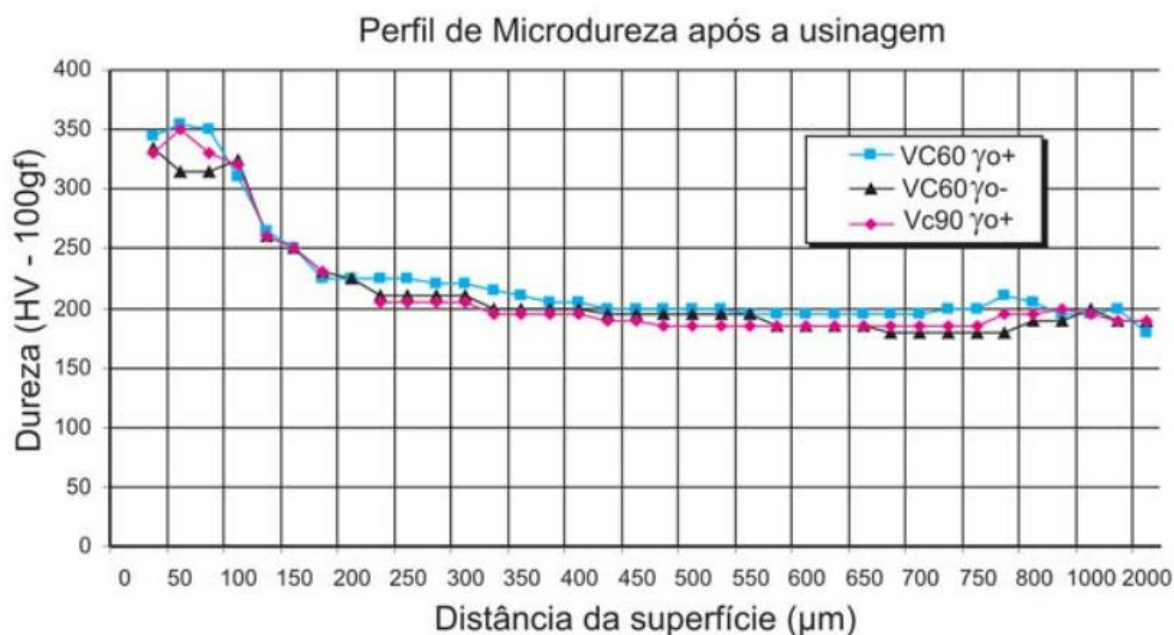


Figura 18: Perfil de dureza das superfícies usinadas
 Fonte: GRAVALOS *et al.* (2007)

Bubani *et al.* (2023) buscaram avaliar o efeito da variação dos parâmetros de corte para aços inoxidáveis, analisando o efeito de adições de outros elementos em suas composições que possam melhorar a usinabilidade. No experimento de usinagem em ligas com níquel (Ni), como os aços inoxidáveis e superligas de níquel, sendo esse elemento prejudicial à usinagem devido à sua característica de aumentar a ductilidade do material e por consequência aumentar o mecanismo de adesão do material na ferramenta de corte, foi verificado que a adição de cálcio (Ca) diminui o desgaste da ferramenta, uma vez que este elemento atua como um lubrificante natural entre o material e a ferramenta.

Binali *et al.* (2023) realizaram testes de usinagem no aço inoxidável AISI 304, que apresenta propriedades de usinabilidade ruins, especialmente no que se refere à rugosidade da superfície usinada e ao desgaste da ferramenta. Essas dificuldades são, principalmente, causadas pelo encruamento, que é o endurecimento do material devido à deformação plástica. Observou-se que a rugosidade superficial do aço diminui sob condições de alta velocidade de corte, embora essa melhoria na superfície seja acompanhada por um aumento na taxa de desgaste da ferramenta.

Os resultados do estudo realizado por Binali *et al.* (2023) indicaram que as forças de usinagem são significativamente maiores para combinações de alta velocidade de corte e profundidade de corte, tanto em operações de torneamento a seco quanto com o uso de MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante). Dentre os parâmetros analisados, a taxa de avanço foi a que mais impactou na rugosidade superficial, conforme esperado, independentemente das

condições de lubrificação. A variação da velocidade de corte mostrou pouca influência sobre a rugosidade.

Entretanto, os melhores resultados de rugosidade superficial foram observados sob condições de MQL, especialmente quando se utilizou a combinação de baixo avanço e alta velocidade de corte. Além disso, foi observada a formação de cavacos curtos e segmentados quando se utilizou MQL o que também contribui para uma melhor remoção de calor do material usinado e conseqüentemente melhor acabamento superficial.

Segundo Santos *et al.* (2020), foi constatado que ferramentas de corte com múltiplos revestimentos retardam o desgaste no torneamento de aços inoxidáveis super martensíticos. Uma característica desses aços é possuir baixa usinabilidade devido a presença de titânio (Ti) em sua composição, o que favorece a precipitação de carbonitreto de titânio (TiCN), que possui alta abrasividade, principalmente em condições de usinagem com alta velocidade de corte (v_c), aumentando assim o desgaste dela. No mesmo estudo foi demonstrado que a condição de lubrificação sob alta pressão apresentou menor desgaste da ferramenta devido a formação de uma cunha hidráulica que causa a minimização da área de contato do cavaco com o inserto.

Avaliar os efeitos de diferentes métodos de lubrificação na usinabilidade de um material é uma das formas de contornar uma baixa usinabilidade, Shaisundaram & Naveen (2023) avaliaram a qualidade superficial de um aço inoxidável duplex sob três diferentes tipos de lubrificação: emulsão convencional, MQL e a seco. Os resultados indicaram que a MQL melhora a qualidade da superfície em relação ao torneamento a seco, enquanto a emulsão convencional proporcionou a melhor qualidade de superfície entre os métodos testados. Além disso, a MQL demonstrou ser uma abordagem mais sustentável, reduzindo significativamente a quantidade de fluido de corte necessário.

O artigo de Nagy *et al.* (2019) analisa o desempenho de dois insertos, um revestido com TiAlN e o outro com TiAlSiN pelo método PVD, no torneamento a seco do aço inox super duplex GX2CrNiMoCuN 26-6-3-3. Nesse estudo foi adotado velocidade de corte constante de $v_c = 70$ m/min e avanço de $f = 0,15$ mm/rev para ambos os revestimentos. O revestimento de TiAlN possui dureza de 3200 HV e resistência à oxidação até 750 °C, enquanto o revestimento de TiAlSiN possui dureza de 4000 HV e resistência à oxidação até 800 °C, sendo mais indicado para usinagem a altas velocidades. Apesar da diferença de propriedades mecânicas supracitadas, não foram observadas diferenças consideráveis entre os revestimentos, ambos apresentaram um elevado desgaste de flanco, formação de aresta postiça e de rebarba após 5 minutos de usinagem.

Por fim, concluiu-se que a presença de elementos como cobre, que aumentam a chance de formação de partículas abrasivas como o Al_2O_3 e o padrão de formação de cavaco de aços super duplex (cavacos contínuos e longos), são fatores chave para o rápido desgaste da ferramenta e perda da qualidade superficial da peça, sendo necessário estudar a alteração da velocidade de corte empregada como forma de mitigar esse dano. (NAGY *et al.*, 2019)

Embora o uso de lubrificantes possa melhorar a usinabilidade dos aços inoxidáveis, pode ser prejudicial à saúde do operador e ao meio ambiente, por isso são pesquisadas maneiras de reduzir o seu uso sem prejudicar a usinabilidade. O estudo de Sonawane & Sargade (2020), analisou o uso de ferramentas de metal duro com revestimentos, como $\text{AlTiCrN}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlTiN}$ e sem lubrificantes no torneamento do aço inoxidável super duplex 2205. Os autores compararam o uso de diferentes parâmetros de cortes e revestimentos e, com base neste estudo, a combinação de uma alta velocidade de corte (v_c) e baixo avanço (f) resultou numa menor rugosidade superficial, mostrado na Figura 19. Além do revestimento AlTiCrN apresentar uma maior resistência à adesão de cavaco na ferramenta e por consequência uma maior vida útil.

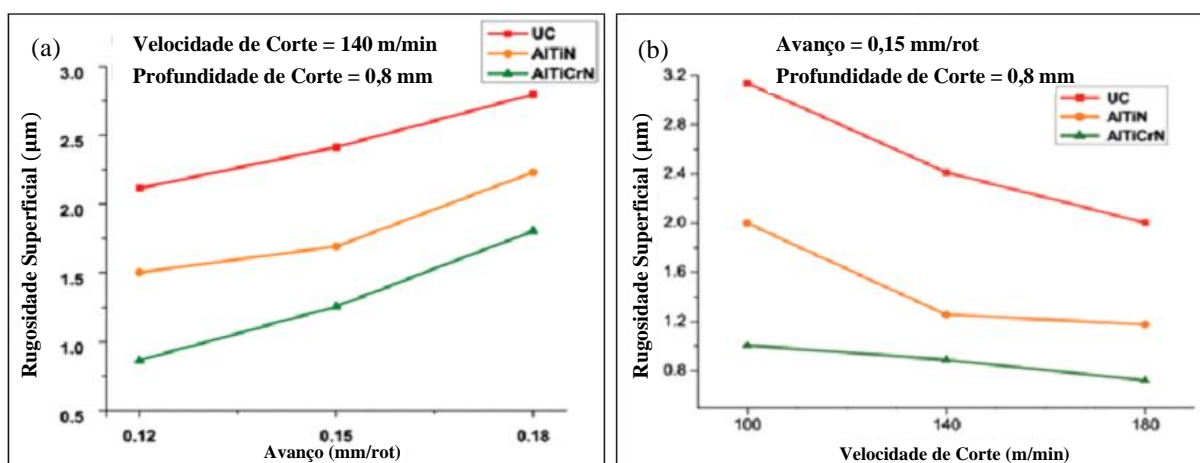


Figura 19: (a) Rugosidade superficial, com variação do avanço, (b) Rugosidade superficial, com variação da velocidade de corte, onde UN (Sem revestimento), AlTiN (Com revestimento), AlTiCrN (Com revestimento)
Fonte: Sonawane & Sargade, 2020 (Modificado)

O estudo realizado por Oliveira Junior *et al.* (2014) investigou a usinabilidade do aço inoxidável super duplex UNS S32750, conhecido comercialmente como SAF 2507. Segundo os autores, um aumento do PRE (*Pitting Resistance Equivalent*) nas ligas de aços inoxidáveis prejudica a usinabilidade, tanto pela maior presença de elementos de liga quanto pela necessidade de um controle mais rigoroso das impurezas.

Uma das razões para a difícil usinagem dos aços inoxidáveis duplex é o baixo teor de enxofre (S) em sua composição. O teor de enxofre é minimizado propositalmente, pois sua presença reduz a resistência à corrosão do material. No entanto, sua ausência impacta

negativamente a usinabilidade, já que o enxofre, quando presente em teores controlados, reage com o manganês e forma sulfeto de manganês, que auxilia na quebra dos cavacos e na redução do atrito entre a peça e a ferramenta.

Além disso, a microestrutura bifásica do material contribui para a indução de vibrações durante a remoção de material. Isso ocorre devido às propriedades mecânicas distintas das fases ferríticas e austeníticas, bem como à sua distribuição aleatória, resultando em variações na formação e remoção dos cavacos.

O trabalho avaliou a rugosidade superficial do material após o torneamento com os seguintes parâmetros: avanço e profundidade de corte constantes $f = 0,15$ mm/rev e $p_c = 1,00$ mm, com velocidade de corte variando entre 110 e 130 m/min e condições de lubrificação de baixa e alta pressão (15 e 70 bar). O experimento com $v_c = 110$ m/min e alta pressão resultou no menor desgaste da ferramenta. Todas as combinações de velocidade de corte e pressão do fluido refrigerante causaram o mesmo mecanismo de desgaste da ferramenta de corte, ou seja, o desgaste por entalhe, causado pelo atrito entre a peça e a ferramenta, mostrado na Figura 20. (OLIVEIRA JUNIOR *et al.*, 2014)

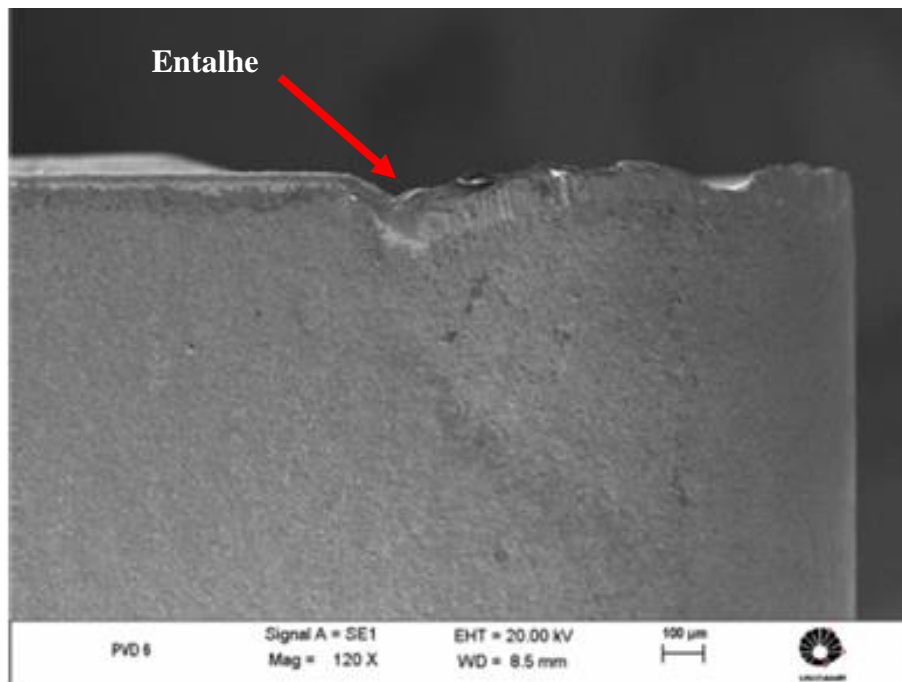


Figura 20: Aresta de corte da ferramenta no experimento com $v_c = 10$ m/min e de resfriamento de alta pressão
Fonte: OLIVEIRA JUNIOR *et al.*, 2014

Os autores realizaram medições da rugosidade ao longo dos experimentos e não houve variação significativa da rugosidade com o aumento do desgaste da ferramenta de corte. Segundo os autores, isso se deve ao fato de que o desgaste por entalhe não altera a ponta da ferramenta em contato com o material. Os experimentos indicaram que o aumento da pressão

do fluido refrigerante resultou em uma melhor rugosidade superficial devido à maior eficiência do resfriamento, conforme Figura 21, causando menos deformação plástica entre a peça e o cavaco. A diminuição da velocidade de corte também demonstrou ser melhor para a rugosidade devido à menor temperatura de trabalho. (OLIVEIRA JUNIOR *et al.*, 2014)

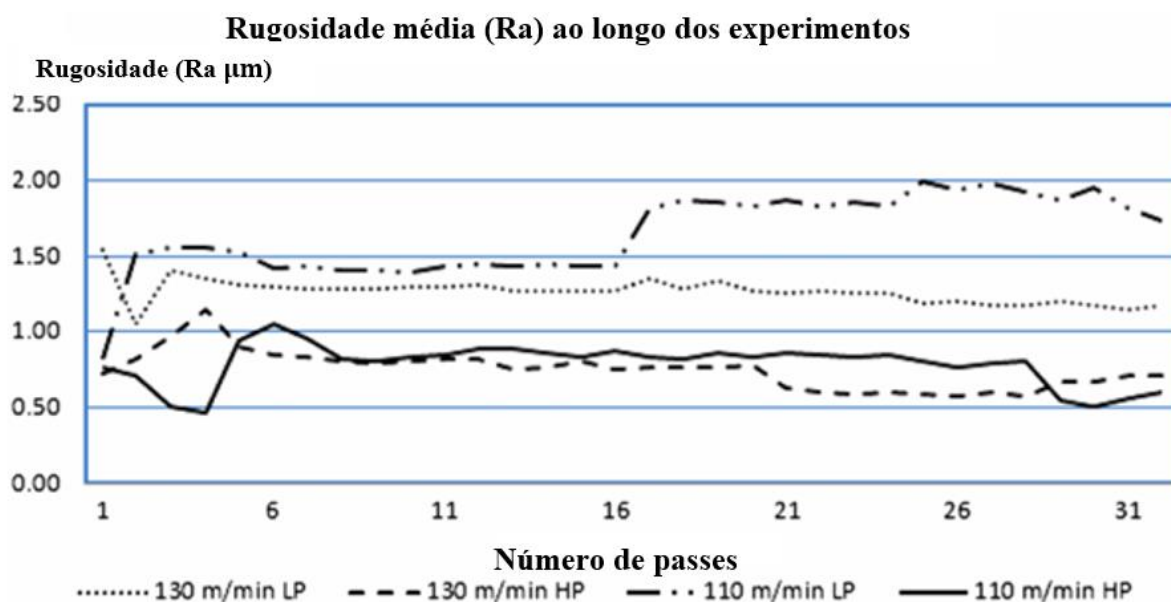


Figura 21: Resultados da rugosidade sob diferentes condições de usinagem
Fonte: OLIVEIRA JUNIOR *et al.*, 2014 (Modificado)

Além disso, o estudo indicou que o aumento da pressão do fluido refrigerante contribuiu para uma melhor resistência à corrosão por pites, devido à menor temperatura da superfície usinada. Os autores observaram que, quanto maior a rugosidade da superfície usinada, menor a resistência à corrosão por pites. Isso ocorre porque superfícies mais rugosas apresentam maior área superficial exposta ao meio corrosivo. (OLIVEIRA JUNIOR *et al.*, 2014)

Parsi *et al.* (2020) buscaram analisar o desempenho da vida útil da ferramenta e a qualidade superficial da peça acabada usinadas com insertos de metal duro revestidos com AlTiN, AlCrN, pelo método PVD, e sem revestimento no torneamento a seco do aço inoxidável super duplex UNS S32750 com avanço de 0,3 mm/rev, profundidade de corte $f = 2$ mm e velocidade de corte de $v_c = 100$ e 140 m/min.

No que tange a vida útil da ferramenta, foram realizadas medições de desgaste de flanco a cada dois passes de torneamento até que 0,6 mm de desgaste de flanco máximo fosse atingido, para ferramentas de corte novas, ou 0,3 mm de desgaste de flanco médio para ferramentas desgastadas anteriormente, conforme ISO 3685.

Para a análise de qualidade superficial da peça, foram realizadas aferições de rugosidade após os primeiros e últimos passes, de forma que foi possível definir também como o desgaste da ferramenta afetou a qualidade superficial da peça. Esse estudo revelou que insertos revestidos com AlTiN fornecem melhor acabamento ($Ra = 2,613 \mu\text{m}$ após primeiro passe e $Ra = 3,047 \mu\text{m}$ após último passe), seguido dos insertos revestidos com AlCrN ($Ra = 2,761 \mu\text{m}$ após primeiro passe e $Ra = 3,114 \mu\text{m}$ após último passe) e ($Ra = 3,192 \mu\text{m}$ após primeiro passe e $Ra = 3,588 \mu\text{m}$ após último passe) para os insertos sem revestimento. A diferença existente entre as rugosidades obtidas utilizando-se cada ferramenta é explicada através dos mecanismos de desgaste que impactam diretamente na vida útil da ferramenta e na qualidade superficial.

Insertos revestidos com AlTiN demonstraram uma vida útil significativamente maior, especialmente em baixas velocidades de corte ($v_c = 100 \text{ m/min}$), onde o desgaste se dá por adesão e abrasão principalmente. Isso ocorre em função da redução de afinidade química entre a peça e a ferramenta proporcionada pela presença do Ti, que resulta em uma menor tendência a adesão de material na ferramenta, reduzindo assim o desgaste de flanco e melhorando a qualidade superficial da peça. Insertos revestidos com AlCrN mostraram serem melhores para a usinagem em altas velocidades ($v_c = 140 \text{ m/min}$) em função da formação de uma camada de óxido protetora, promovida pela presença do Cr, que dá uma maior estabilidade para o processo, porém com maior desgaste em função do maior atrito gerado. Os insertos sem revestimento obtiveram os piores resultados do estudo em função de sua elevada suscetibilidade a adesão e formação de aresta postiça em ambas as velocidades, que levam a um elevado desgaste e, conseqüentemente, perda de qualidade superficial.

Por fim, os autores concluem que, ambos os insertos revestidos se comportam de maneira similar, de maneira geral, sendo um, um pouco melhor que o outro somente para situações específicas (altas ou baixas velocidades de corte). No que tange a acabamento e vida útil, os insertos sem revestimento se mostraram serem inferiores em todos os quesitos analisados, chegando a ter uma vida útil aproximadamente duas vezes menor que os insertos revestidos estudados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

O material utilizado no presente trabalho foi recebido em forma de tarugo laminado, com 270 mm de comprimento e 40 mm de diâmetro (Figura 22). Para realizar a caracterização do material foi necessário preparar uma amostra no Laboratório de Materiais do CEFET-RJ (LAMAT) de acordo com procedimentos convencionais de metalografia. A preparação teve início com a realização de um corte no tarugo recebido, resultando em uma seção de 10 mm de comprimento. A partir dessa seção, foram realizados outros cortes nessa amostra a fim de embutir a amostra em baquelite a quente para facilitar as operações de lixamento e polimento.

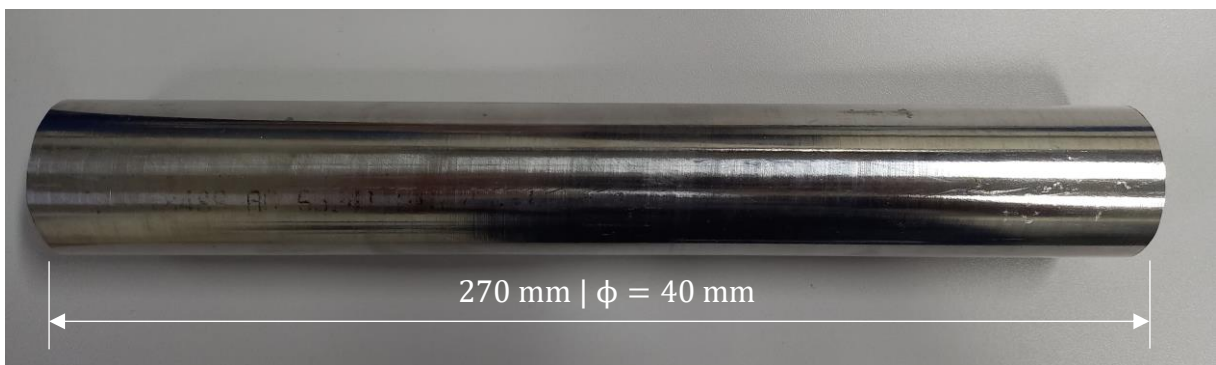


Figura 22: Material como recebido

O lixamento foi feito com lixas de granulometria de 100, 200, 400, 600, 800 e 1200 adotando o procedimento de mudança de direção em 90° a cada troca de lixa. Posteriormente foi realizado o polimento com pasta diamantada de 6, 3 e 1 μm , também adotando o procedimento de mudança de direção. A Figura 23 ilustra a amostra após o processo de embutimento, lixamento e polimento.

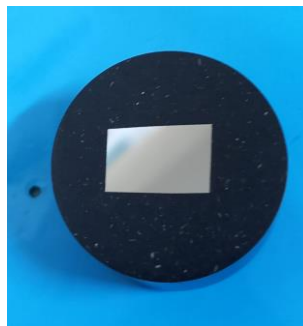


Figura 23: Amostra após o processo de embutimento, lixamento e polimento

Para o ensaio metalográfico, a amostra foi submetida a ataque eletrolítico utilizando ácido nítrico (HNO_3) em solução de 40%, aplicando e voltagem de 3V durante 10 segundos. Em seguida, a caracterização microestrutural foi realizada no microscópio Ótico Olympus BX60M do LAMAT. Foram capturadas imagens de regiões distintas da amostra, com aumentos de 200X e 500X, para realizar a medição de fração volumétrica percentual das fases ferrítica e austenítica do aço. Para a quantificação, adotou-se a metodologia *Thresholding*, que consiste na conversão de uma imagem em escala de cinza para uma imagem binária, a fim de destacar as áreas de interesse. A separação das fases microestruturais foi realizada com base em um valor de *Thresholding* previamente definido, utilizando o programa ImageJ (Fiji) para a binarização e quantificação de fases.

Para o processo de quantificação das fases ferrita e austenita, foram utilizadas duas imagens metalográficas com aumento de 200X obtidas pelo microscópio ótico, visando aumentar a precisão estatística da análise. As imagens foram divididas e ampliadas em 4 regiões cada, obtendo assim 8 regiões amostrais.

As análises químicas qualitativas foram realizadas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada à Espectrometria de Energia Dispersiva (MEV/EDS), também no LAMAT.

3.2 MEDIÇÕES DE DUREZA

Foram realizados ensaios de dureza Rockwell A utilizando o durômetro da marca Instron Wolpert, nas dependências do LAMAT, com uma carga de 60 kgf durante 10 segundos. Foram feitas três medições de dureza nas amostras, tanto nas condições de pré-usinagem quanto nas de pós usinagem, com o intuito de comparar as durezas e verificar possíveis alterações mecânicas provenientes do processo de torneamento. Os ensaios foram realizados seguindo a norma ABNT NBR ISO 6508-1 (2019).

3.3 USINAGEM DAS AMOSTRAS

Após a caracterização microestrutural, a seção remanescente do tarugo recebido foi usinada a fim de preparar as superfícies amostrais que seriam submetidas aos ensaios de torneamento. A seção foi usinada no torno mecânico NARDINI, modelo Mascote MS 205, no Laboratório de Pesquisa e Usinagem (LABUS) do CEFET-RJ. A Figura 24 apresenta o detalhamento dimensional da peça após o processo de usinagem, onde é possível observar 6 superfícies amostrais, numeradas de 1 a 6, divididas por rasgos ao longo do comprimento, com suas respectivas dimensões indicadas e a Figura 25 representa a peça como preparada.

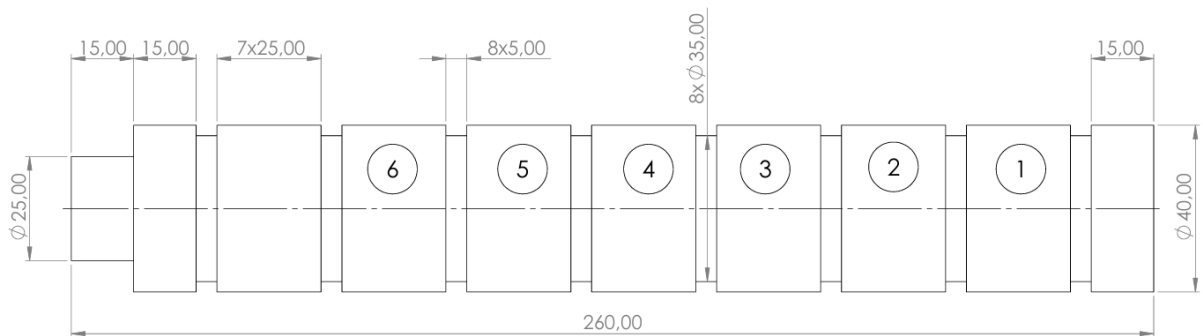


Figura 24: Representação das Amostras (unidades em mm)

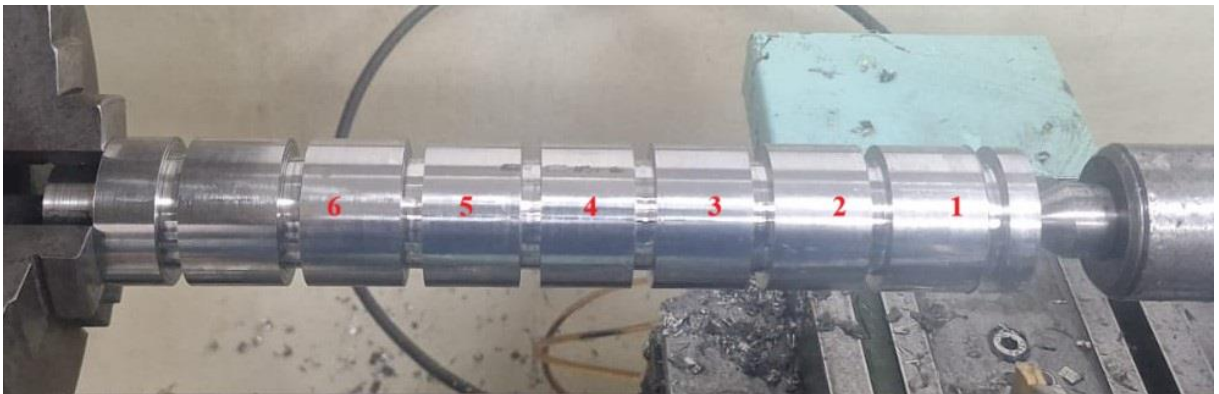


Figura 25: Peça como preparada

Para os experimentos de torneamento, foi utilizado a porta ferramenta modelo SDJCR 2525 M11 e pastilhas de metal duro DCMT 11 T3 04-UM 1115, ambos da SANDVIK, conforme Figura 26 e Tabela 2.

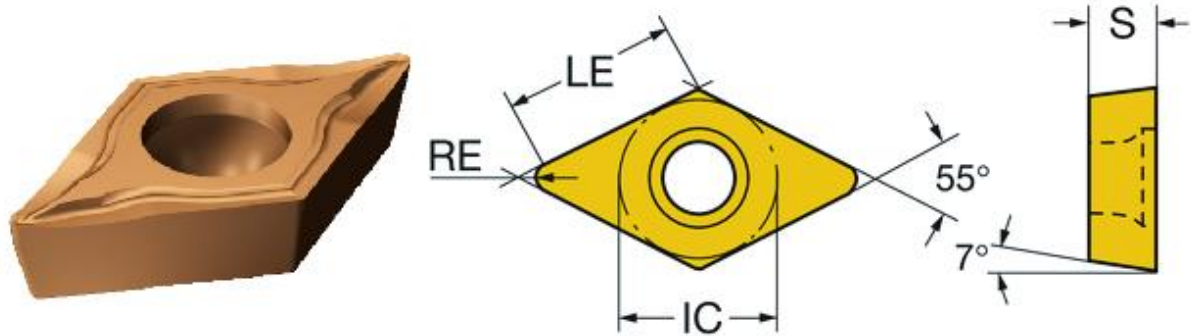


Figura 26: Insetos utilizados nas amostras
Fonte: SANDVIK.

Tabela 2: Parâmetros do Inserto
DCMT 11 T3 04-UM 1115

Tipo de Operação	Pré-Usinagem
Revestimento	PVD TiAlN + TiAlN
Diâmetro do Círculo Inscrito (IC)	9,525 mm
Comprimento Efetivo da Aresta de Corte (LE)	11,2279 mm
Raio de Ponta (RE)	0,3969 mm
Espessura (S)	3,9688 mm
v_c (ideal)	140 m/min
p_c (ideal)	1,25 mm
f (ideal)	0,2 mm/rot

Fonte: SANDVIK. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/product-details?c=DCMT%2011%20T3%2004-MF%201115>. Acesso em: 03/12/2024

Conforme as características do inserto e da classe do material a ser usinado (M), os parâmetros recomendados para usinagem, segundo o fabricante, encontram-se na faixa de velocidade de corte $v_c = 140$ a 240 m/min, profundidade de corte $p_c = 0,30$ a $4,00$ mm e avanço $f = 0,06$ a $0,3$ mm/rot. A partir dessas faixas, foi determinado o avanço $f = 0,06$ mm/rot e profundidade de corte $p_c = 0,5$ mm para todas as condições de corte.

A Tabela 3 fornece os valores de velocidade de corte e a condição de lubrificação utilizados neste trabalho. Para cada amostra, foi utilizado um gume cortante diferente, buscando

assim minimizar o efeito do desgaste da ferramenta nos resultados e permitir posterior análise do desgaste da ferramenta em função de cada velocidade de corte e condição de lubrificação utilizada.

Tabela 3: Condições de Análise

Condições de Análise			
Avanço (mm/rot)	0,06	Profundidade de Corte (mm)	0,5
Amostra	Velocidade de Corte (m/min)		Condição de Lubrificação
1	125		Sem Lubrificação
2	200		Sem Lubrificação
3	125		Fluido Abundante
4	200		Fluido Abundante
5	125		MQL
6	200		MQL

Fonte: Autores

Para os experimentos de torneamento com fluido abundante e MQL foi utilizado óleo solúvel semissintético ME-1 da Quimatic na proporção de 1:19 em água. A vazão utilizada para condição de fluido abundante foi de 3 L/min, medida experimentalmente, e na condição de MQL foi utilizada uma pressão de trabalho de 4 bar, pressão máxima atingida pelo compressor e uma vazão de 160 mL/h, também medida experimentalmente.

3.4 MEDIDAS DE RUGOSIDADE

A rugosidade superficial das amostras foi medida com o rugosímetro do Laboratório de Pesquisa e Usinagem (LABUS) do CEFET-RJ, da marca Mitutoyo modelo SJ-210 (Figura 27). As medições foram feitas nas amostras no sentido longitudinal (direção do avanço), sendo realizadas 5 medições em cada amostra com comprimento de amostragem de 2,5 mm. Os tipos de rugosidade analisados foram a rugosidade média (R_a) e a rugosidade total (R_t). A rugosidade teórica foi calculada conforme Equações 4 e 5, a fim de comparar com os valores obtidos experimentalmente.

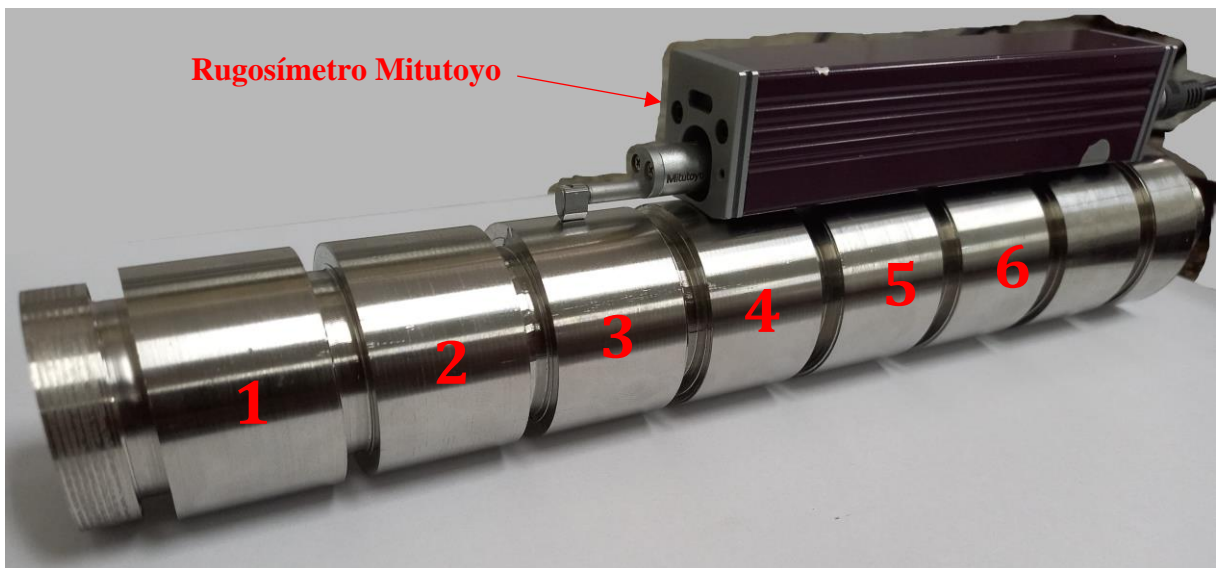


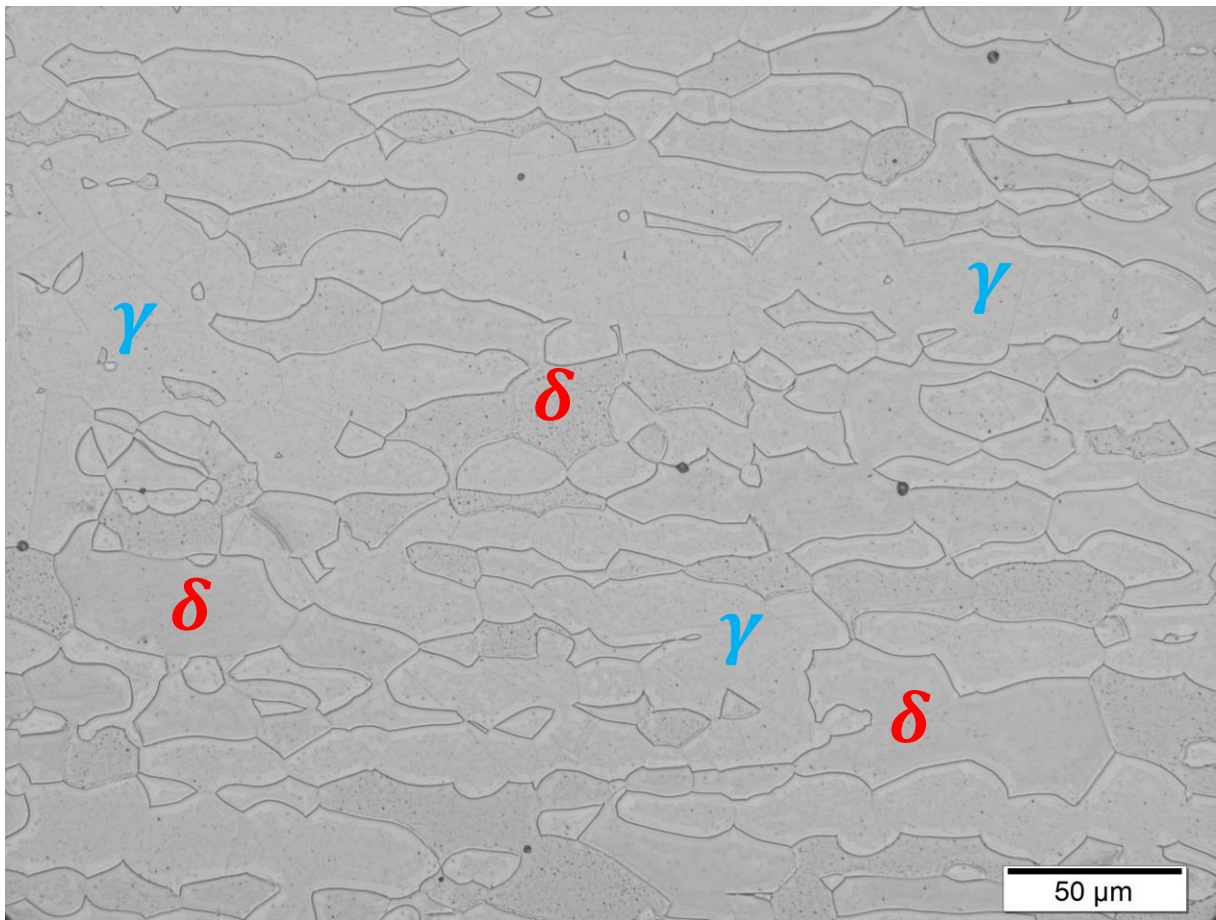
Figura 27: Medição da rugosidade superficial

Também foram realizadas análises da superfície das amostras através de capturas de imagens com aumento de 5x e 10x através do estereoscópio. O mesmo procedimento foi utilizado para análise dos cavacos das amostras e avaliação das condições dos insertos utilizados durante o torneamento, sendo realizadas também imagens capturadas a partir do microscópio óptico para visualização do desgaste de flanco principal de corte.

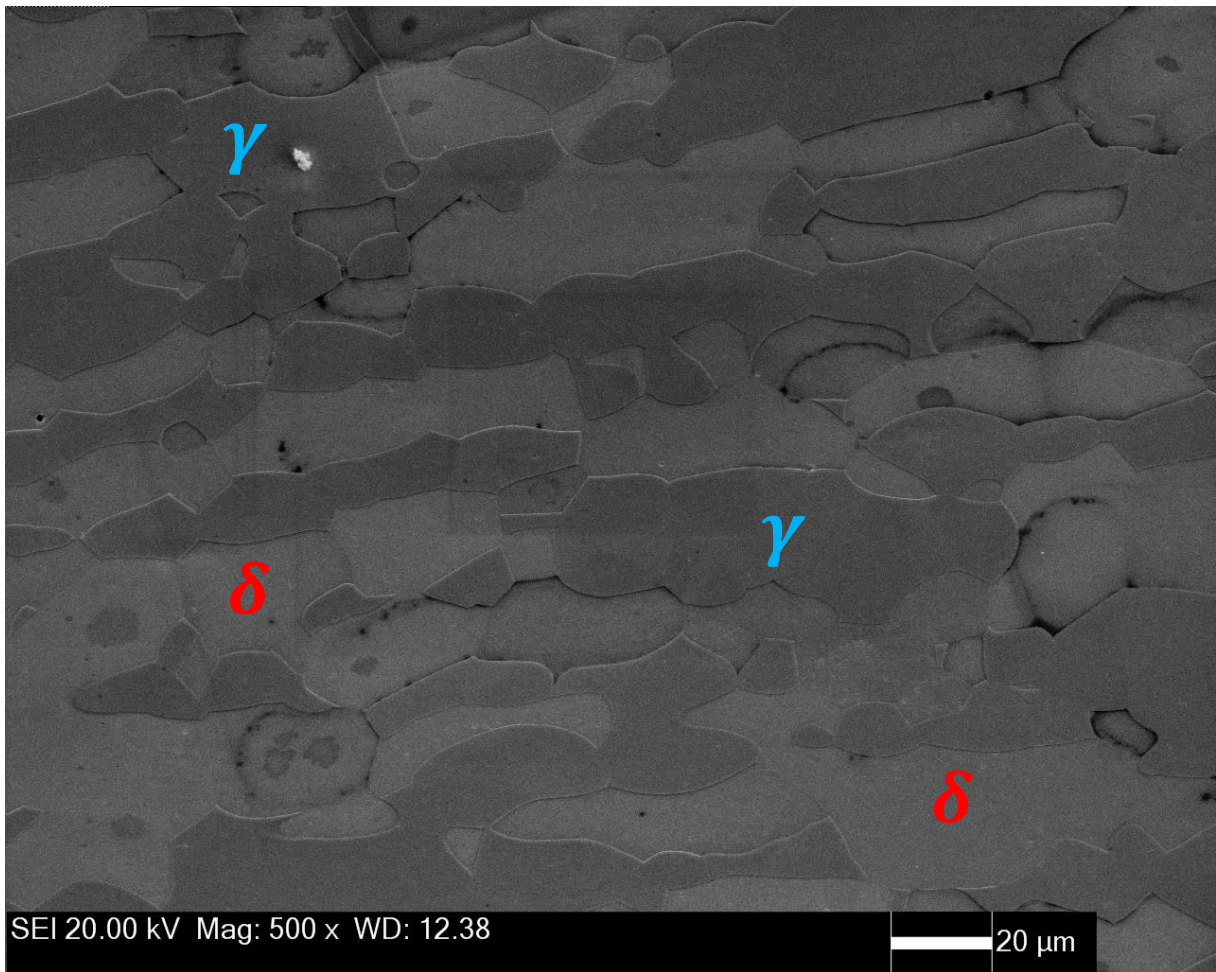
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

A Figuras 28 (a) e 28 (b) apresentam as microestruturas observadas por microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) do material como recebido. Nas imagens é possível observar as fases ferrita (δ) e austenita (γ), fases características dos aços inoxidáveis duplex e super duplex.



(a)



(b)

Figura 28: Micrografia do material como recebido obtida por (a) microscopia óptica (MO) (b) microscopia eletrônica de varredura (MEV). Ataque: HNO_3 (40%).

A fim de calcular a fração volumétrica das fases presentes na microestrutura, foi utilizado o procedimento de dividir as imagens da microscopia óptica em regiões amostrais, com o objetivo de melhorar a precisão estatística. O processo de separação e processamento das imagens podem ser observados nas Figuras 29 e 30. Todo o procedimento foi realizado utilizando o programa Image J (Fiji).

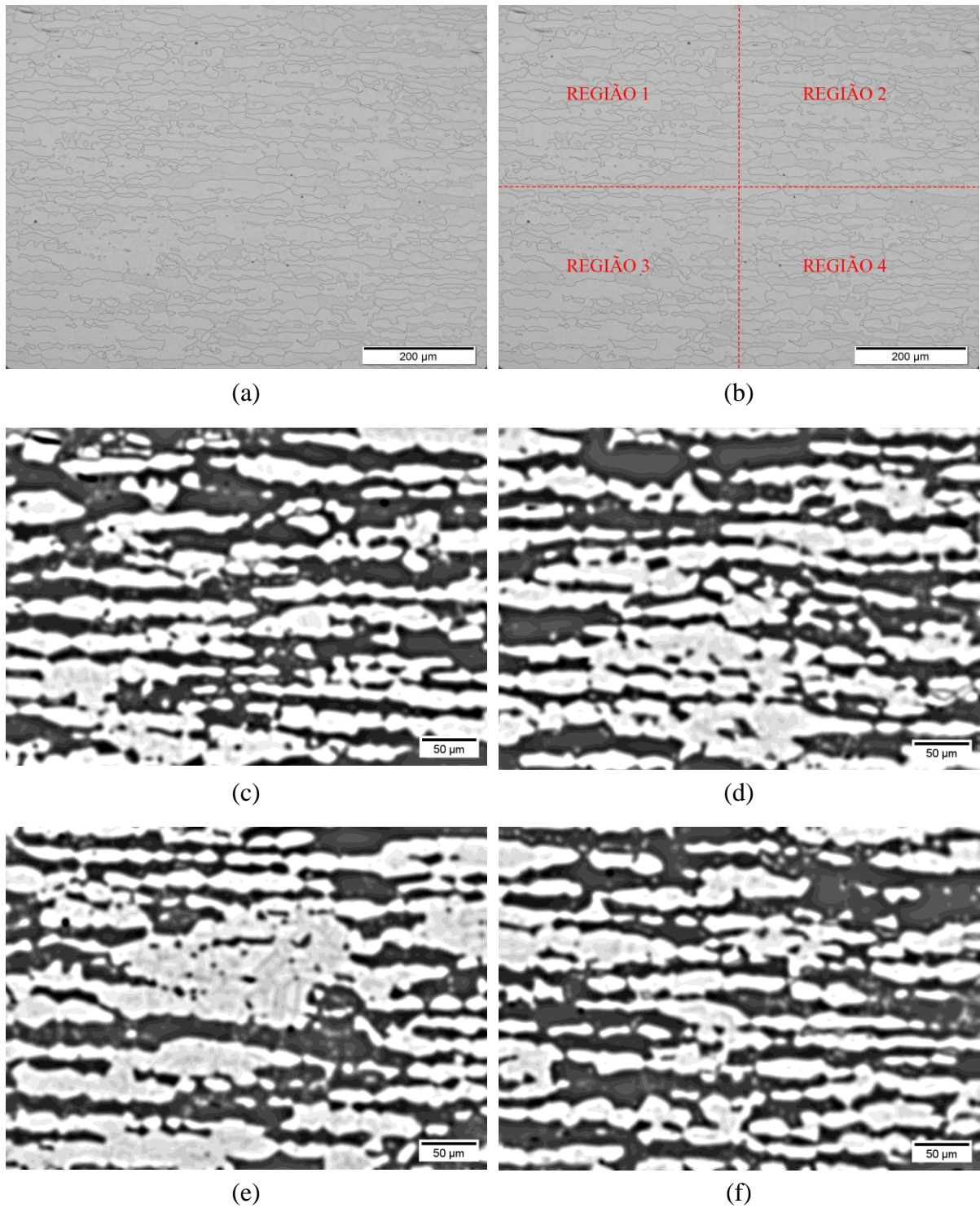


Figura 29: (a) Microestrutura via MO. (b) Separação das regiões amostrais. (c) Região 1, processada via Image J. (d) Região 2, processada via Image J. (e) Região 3, processada via Image J. (f) Região 4, processada via Image J.

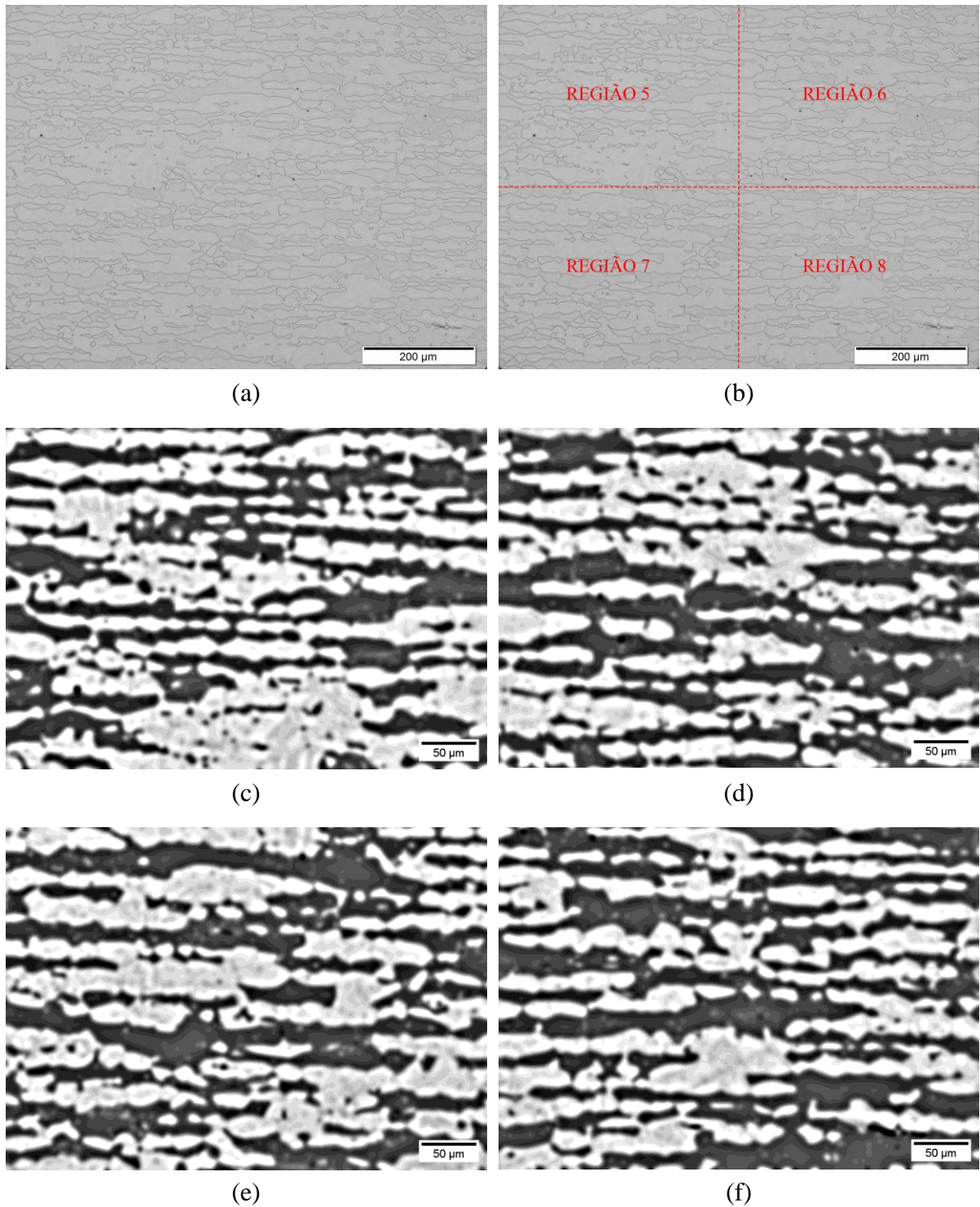


Figura 30: (a) Microestrutura via MO. (b) Separação das regiões amostrais. (c) Região 5, processada via Image J. (d) Região 6, processada via Image J. (e) Região 7, processada via Image J. (f) Região 8, processada via Image J.

Após a divisão das regiões amostrais, foi realizado o cálculo do percentual de fase ferrítica presente em cada uma das regiões amostrais, parte branca das imagens processadas, na Figura 31. A Tabela 4 e a Figura 32 apresentam os valores obtidos após cálculo de área da fase ferrítica, bem como o seu percentual.

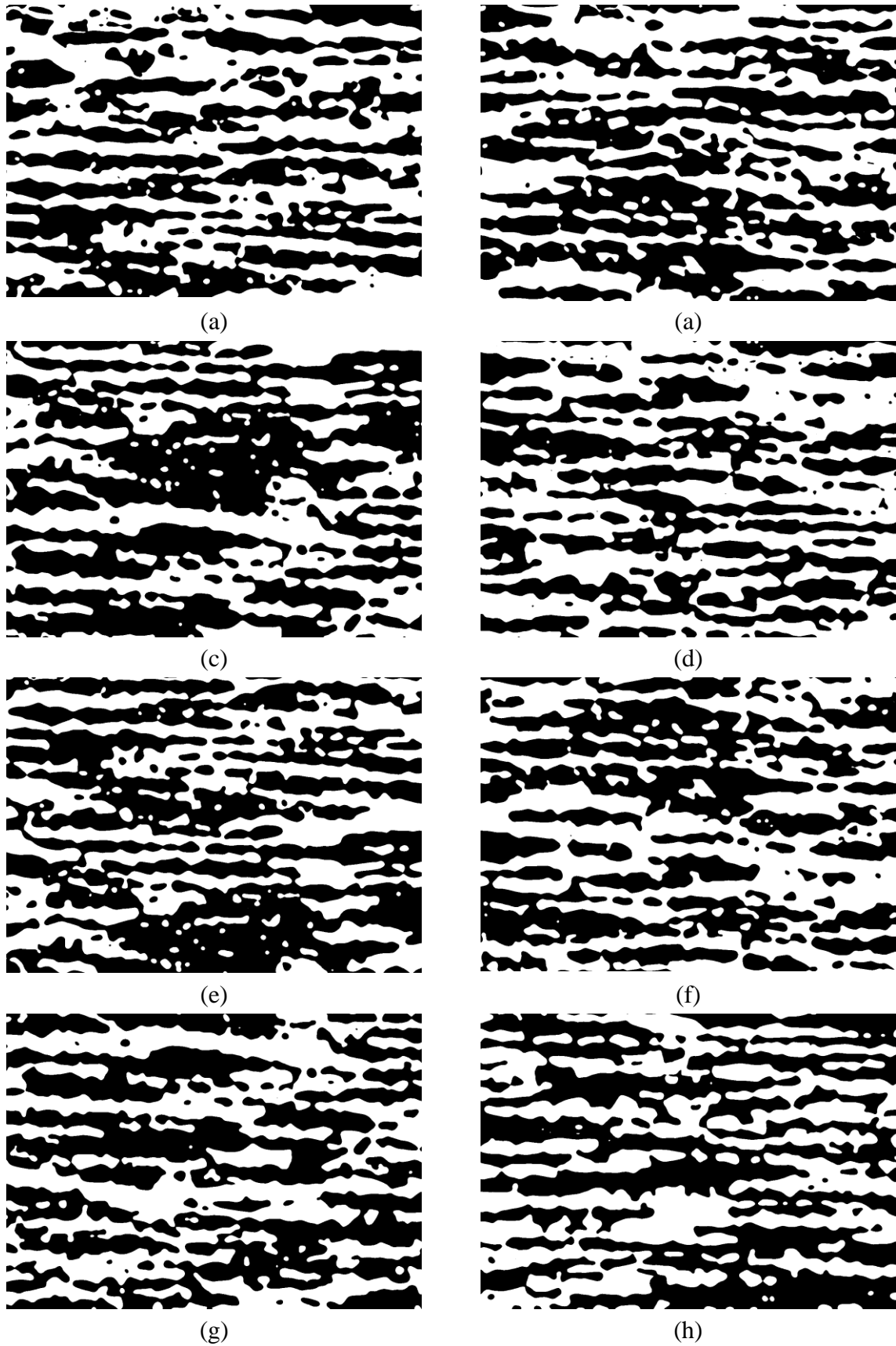


Figura 31: Cálculo da fase ferrítica - parte branca. (a) Região 1. (b) Região 2. (c) Região 3. (d) Região 4. (e) Região 5. (f) Região 6. (g) Região 7. (h) Região 8.

Tabela 4: Fração Volumétrica da Fase Ferrítica

Fração Volumétrica da Ferrita (α)		
Região de Amostragem	Área (μm^2)	Área (%)
1	72162,26	52,00
2	67857,08	48,84
3	60750,03	43,80
4	75092,95	53,88
5	60499,71	43,76
6	68570,53	49,68
7	65395,57	47,20
8	73442,28	52,92
Média	67971,30	49,01
Desvio Padrão	5518,69	3,90

Fonte: Autores

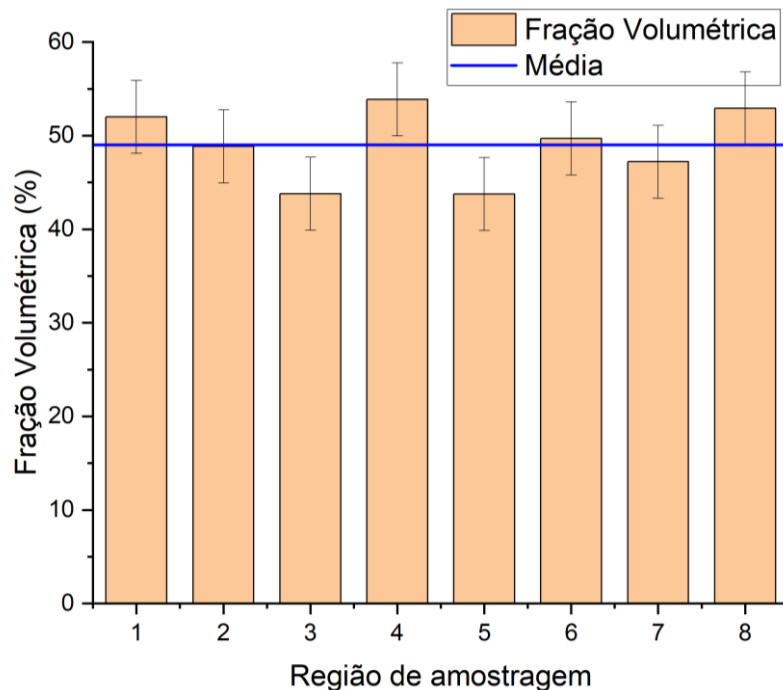
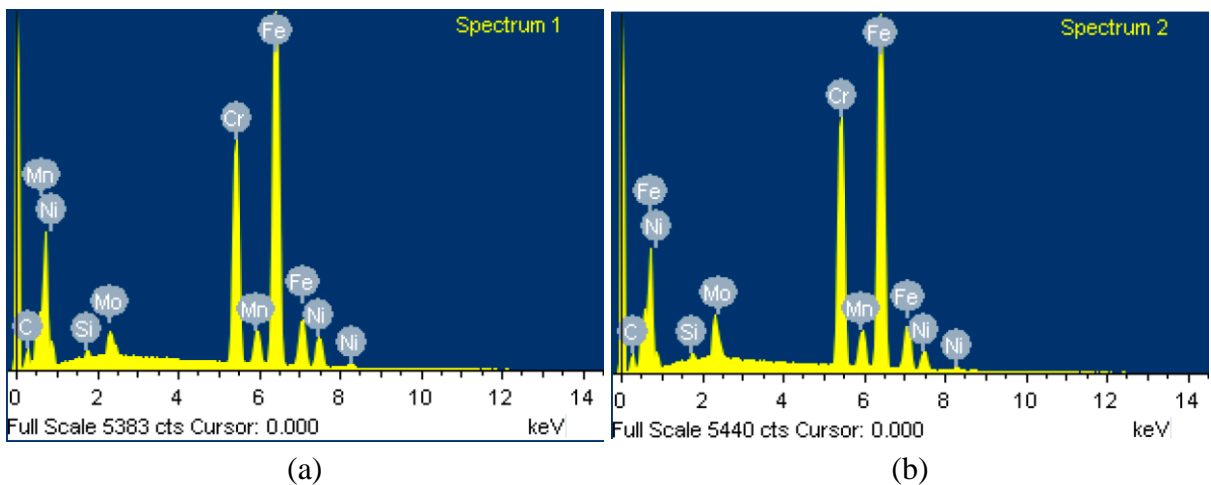
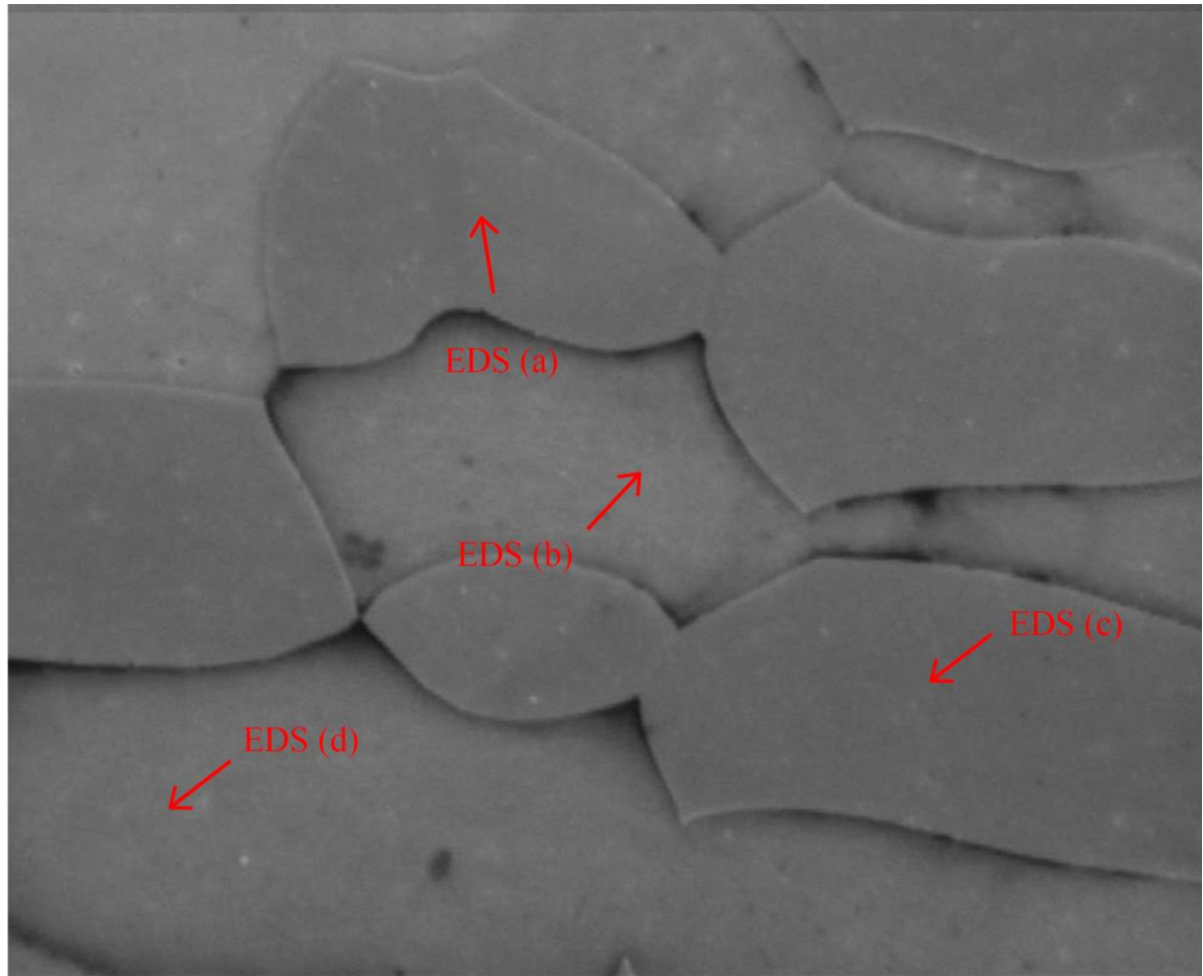


Figura 32: Gráfico Fração Volumétrica da Ferrita x Região de Amostragem

Analisando o resultado da média de fração ferrítica de 49,01% com desvio padrão de 3,90% e considerando que, para o aço inoxidável duplex a fração volumétrica de ferrita/austenita é de aproximadamente 50%, conforme visto anteriormente na revisão bibliográfica, é possível caracterizar o material, como recebido, como um aço inoxidável duplex.

A análise por espectroscopia de dispersão de energia (EDS) foi realizada para identificar os elementos presentes em cada fase da microestrutura do aço inoxidável duplex. Os resultados, presentes na Figura 33, confirmaram a presença predominante de ferro, cromo e níquel, elementos característicos desse tipo de material. Além de traços de outros elementos como molibdênio, manganês e silício. Considerando as análises apresentadas, pode-se caracterizar o aço do presente estudo como um aço inoxidável duplex.



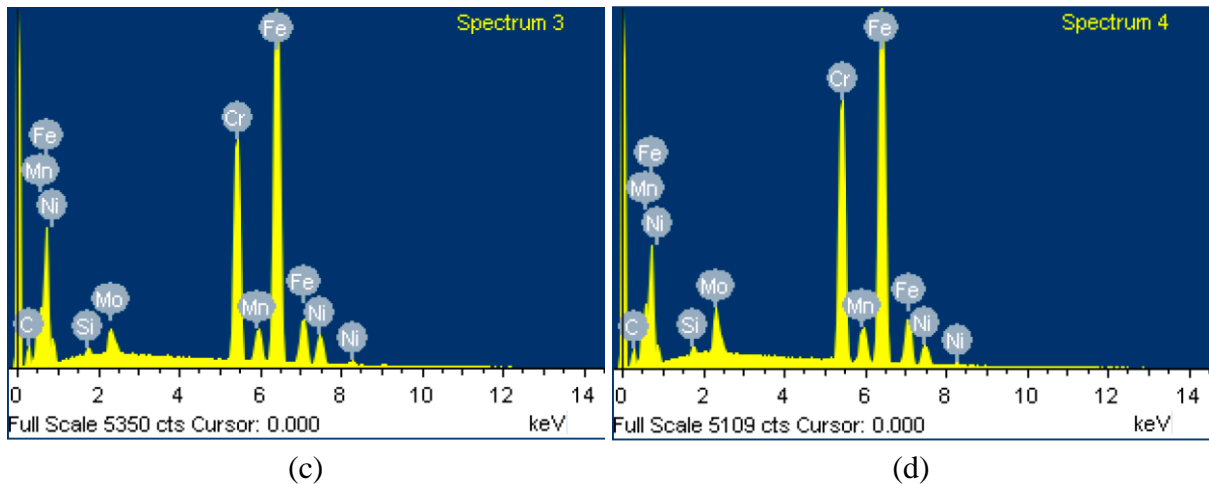


Figura 33: Espectros de EDS das fases presentes na amostra. (a) Austenita. (b) Ferrita. (c) Austenita. (d) Ferrita

4.2 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Para análise de integridade superficial do material foram utilizadas imagens da superfície das amostras, valores de rugosidade superficial, medidas experimentalmente e comparadas com os valores teóricos, conforme Equações 4 e 5, além de comparações de valores de dureza Rockwell A.

A Figura 34 representa as superfícies torneadas, capturadas com auxílio de um estereoscópio com aumento de 10x, com intuito de observar os detalhes da topografia da superfície, incluindo possíveis marcas de ferramentas, irregularidades ou defeitos, que podem ser influenciados pelas condições de usinagem, como a velocidade de corte e o método de lubrificação.

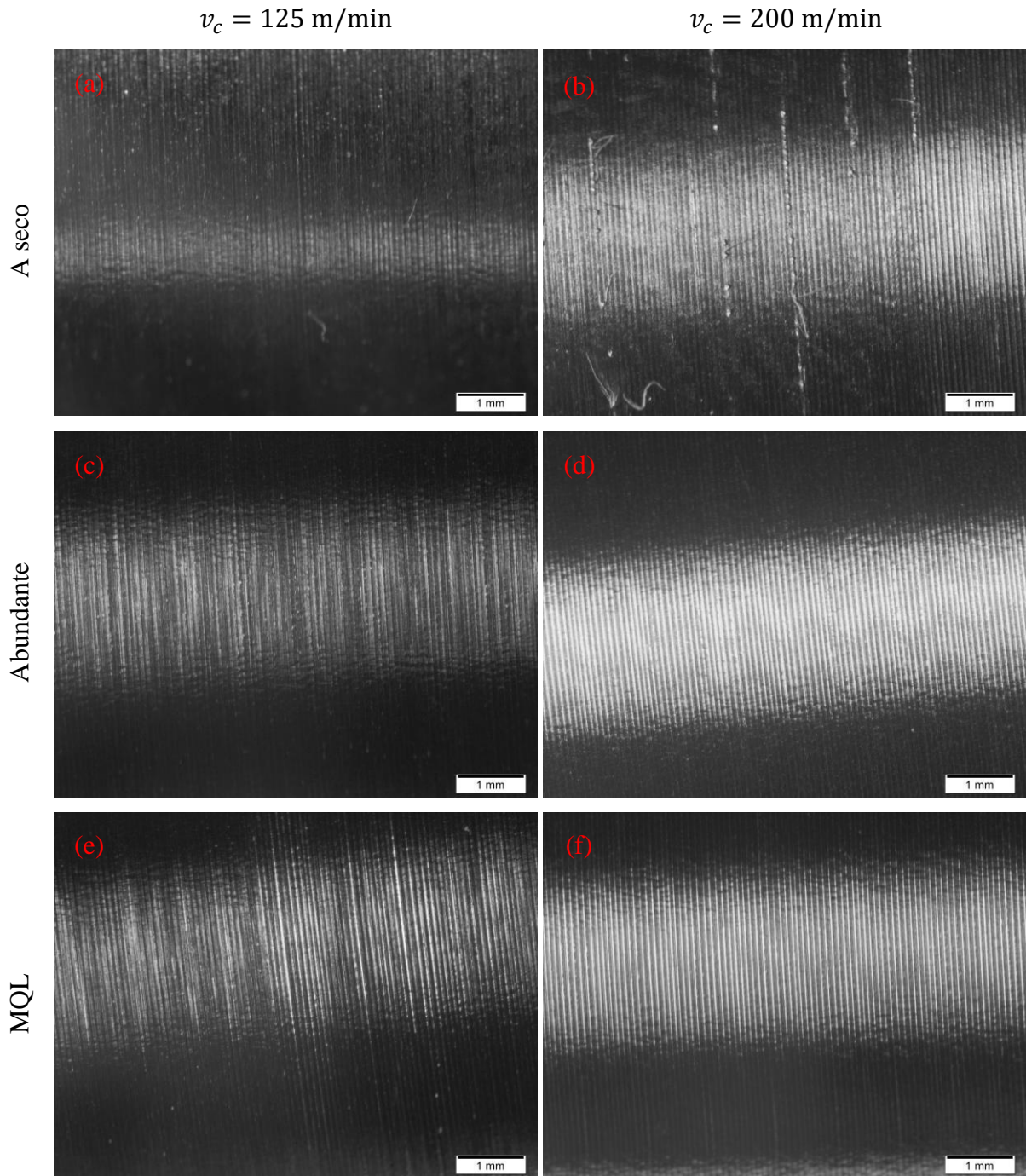


Figura 34: Superfícies das amostras obtidas via estereoscópio com aumento de 10x. (a) Amostra 1. (b) Amostra 2. (c) Amostra 3. (d) Amostra 4. (e) Amostra 5. (f) Amostra 6.

Conforme observado nas figuras acima, somente a condição de alta velocidade de corte e sem lubrificação (Figura 34 (b)) apresenta algumas deformações grosseiras na sua superfície, resultado de uma condição de corte mais agressiva ao material, uma vez que estava sob uma velocidade de corte maior e sem lubrificação. A condição de usinagem a seco resulta em temperaturas elevadas e altos níveis de atrito na zona de corte, o que resulta em deformações

plásticas na superfície usinada e, conseqüentemente, um pior acabamento, o que foi evidenciado na Figura 34 (b). As demais superfícies apresentam uniformidade nas texturas superficiais.

A Tabela 5 e as Figuras 35 e 36 apresentam os valores médios de rugosidade R_a e os maiores valores de R_t obtidos das amostras torneadas.

Tabela 5: Resultados das medições de Rugosidade (R_a e R_t)

Amostra	v_c (m/min)	Lubrificação	R_a (μm)	R_t (μm)
1	125	Seco	$0,698 \pm 0,024$	5,110
2	200		$0,962 \pm 0,188$	18,815
3	125	Abundante	$0,685 \pm 0,018$	4,877
4	200		$0,781 \pm 0,023$	6,361
5	125	MQL	$1,211 \pm 0,031$	6,807
6	200		$0,629 \pm 0,022$	4,519
Valores Teóricos			0,288	1,125

Fonte: Autores

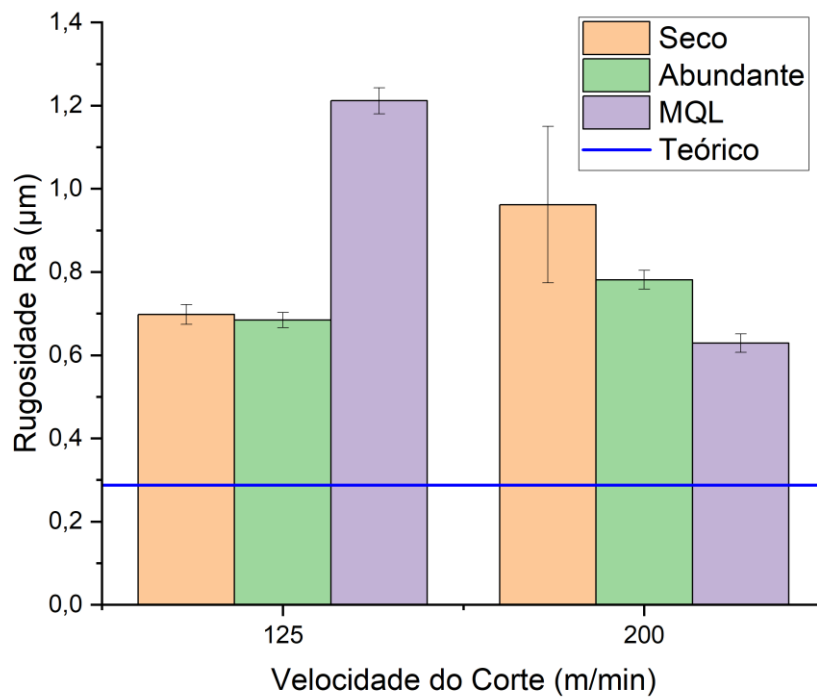


Figura 35: Gráfico Rugosidade R_a x Velocidade de corte

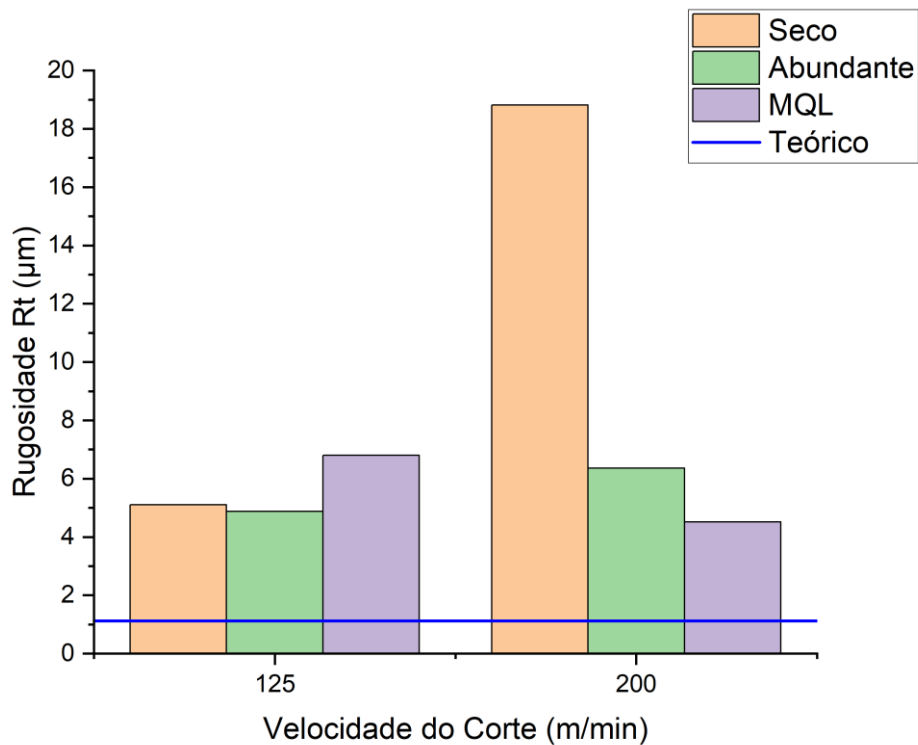


Figura 36: Gráfico Rugosidade R_t x Velocidade de corte

A partir dos resultados obtidos teoricamente e experimentalmente, observa-se que as amostras torneadas sem lubrificação e com fluido abundante apresentaram os melhores valores de rugosidade quando submetidas à baixa velocidade de corte, ao passo que a condição sob Mínima Quantidade de Lubrificante – MQL apresentou a melhor qualidade superficial sob alta velocidade de corte. Esse resultado corrobora as conclusões de Binali *et al.* (2023), que identificaram que a técnica de MQL, associada a altas velocidades de corte, proporciona um melhor acabamento superficial.

Com base nos dados apresentados, é possível concluir também que a condição de fluido abundante foi a que menos teve variação da rugosidade superficial com o aumento da velocidade de corte, resultando em um aumento de 18% nas medições de rugosidade, enquanto na condição de corte a seco o aumento foi de 38%, essa diferença se deve ao fato do fluido de corte auxiliar na remoção do cavaco da peça, impedindo assim a formação de aresta postiça de corte (APC), além de diminuir o atrito entre a peça e a ferramenta de corte, fatores esses que influenciam no acabamento superficial.

É importante ressaltar que todos os valores medidos de rugosidade R_a e R_T ficaram acima dos seus respectivos valores teóricos devido à simplicidade da Equação teórica, que não leva em consideração parâmetros importantes como, por exemplo, o tipo de lubrificação. Em

relação a rugosidade total, o valor mais alto da amostra 2 vai de encontro com os defeitos observados na Figura 34 (b).

Outro ponto importante na integridade superficial do material é a dureza obtida após o processo de corte. Devido a microestrutura do AID ser suscetível a formação de martensita induzida por deformação plástica, aumentando assim o encruamento superficial, foram realizados ensaios de dureza Rockwell A com intuito de analisar a influência das condições de corte e lubrificação na dureza final das amostras. A Tabela 6 e a Figura 37 apresentam os valores médios de dureza superficial obtidas no ensaio para as amostras usinadas em comparação com os dados obtidos na condição como-recebido.

Tabela 6: Medições de Dureza Rockwell A (HR_A)

Amostra	v_c (m/min)	Lubrificação	Dureza Rockwell A (HR_A)
1	125	Seco	$63 \pm 1,0$
2	200		$62,33 \pm 0,6$
3	125	Abundante	$64 \pm 1,0$
4	200		$64,33 \pm 2,1$
5	125	MQL	$65,33 \pm 0,6$
6	200		$61,33 \pm 2,1$
Material como-recebido			$63,33 \pm 0,6$

Fonte: Autores

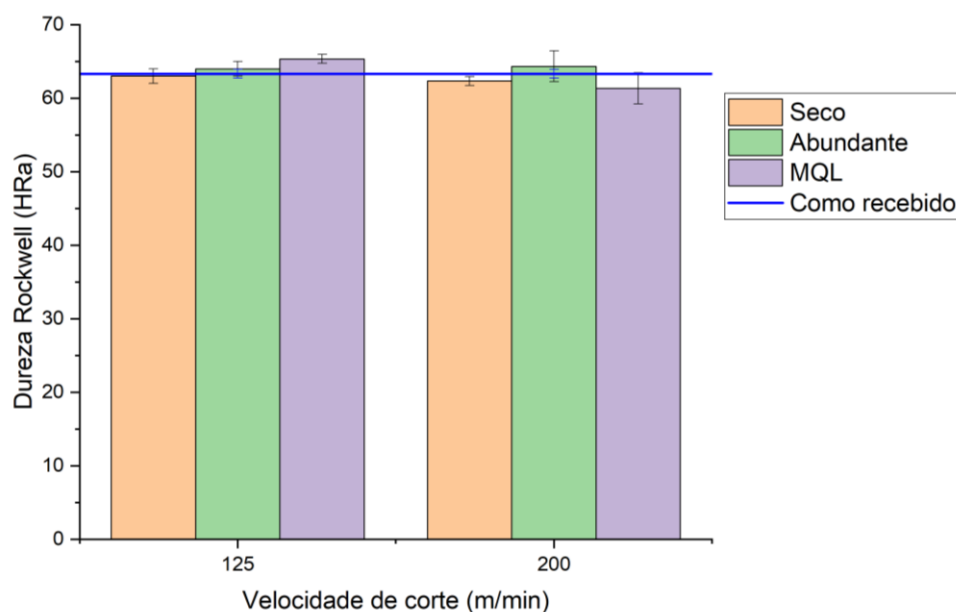


Figura 37: Medições de Dureza Rockwell A

De acordo com os resultados da Tabela 6 e Figura 37 acima, pode-se verificar que as variações de dureza são pequenas e dentro de uma faixa considerável para os AID, indicando que a camada atingida pela deformação plástica do processo deve ter sido menor do que os ensaios de dureza penetraram. Dessa forma, para melhor detalhamento do perfil da camada atingida, deve ser realizado um perfil de micro dureza. Contudo, em um estudo macro, não houve endurecimento superficial para nenhuma das condições de usinagem analisadas.

Foi observado também a morfologia dos cavacos retirados das amostras, conforme a Figura 38. Percebe-se que, para todas as condições de corte, formou-se cavaco helicoidal longo e contínuo. Esse tipo de cavaco é prejudicial à vida útil da ferramenta e à qualidade superficial, uma vez que pode causar o envelopamento de cavacos na peça usinada. Assim, não houve evidências da influência do tipo de lubrificação na formação do cavaco para os parâmetros de corte utilizados, diferentemente do estudo realizado por Binali *et al.* (2023). Essa diferença sugere que os parâmetros de corte e as condições de lubrificação adotados no presente trabalho não foram os mais adequados para a usinagem do aço inoxidável duplex utilizado.

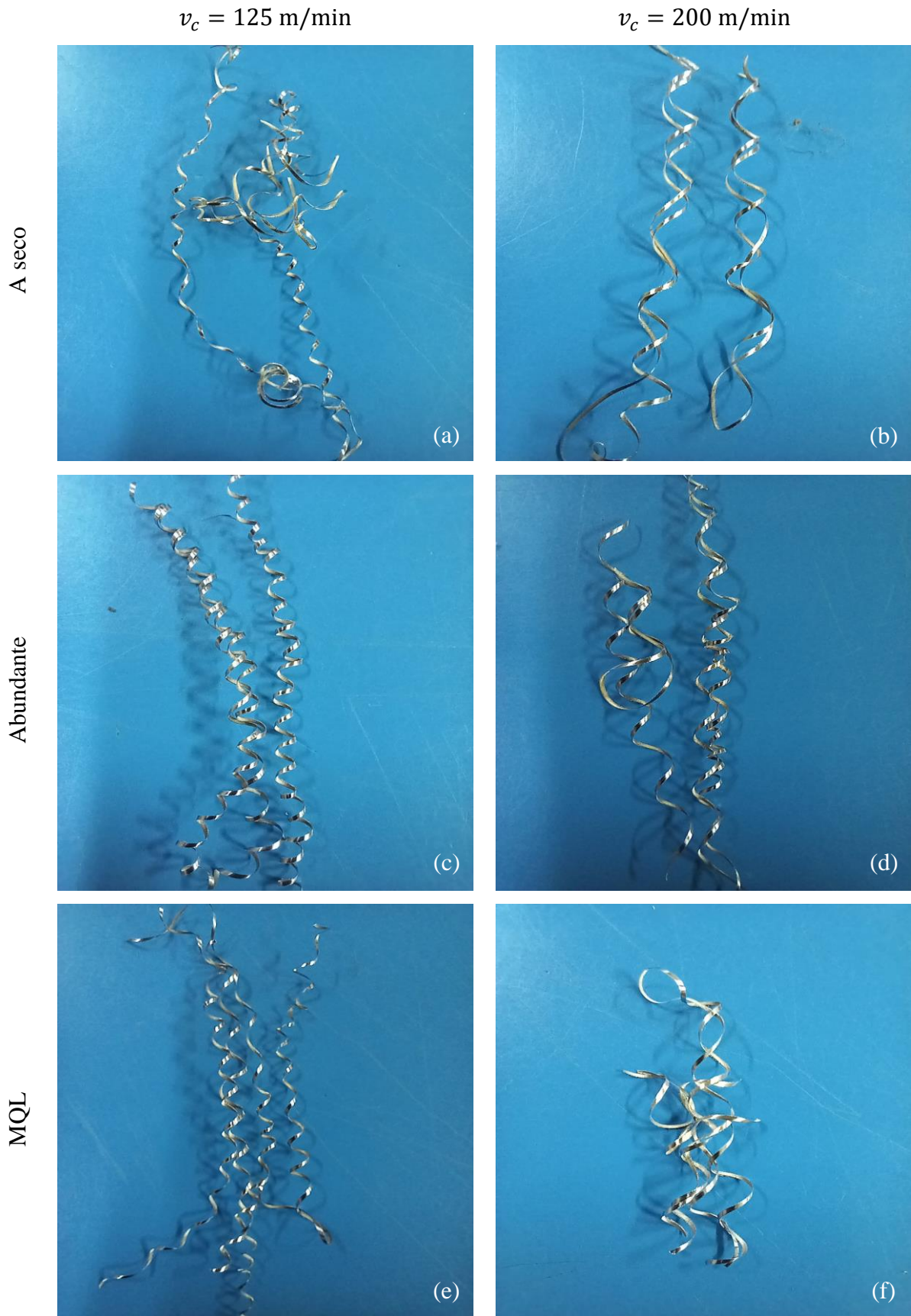


Figura 38: Morfologia dos cavacos obtidos. (a) Amostra 1. (b) Amostra 2. (c) Amostra 3. (d) Amostra 4. (e) Amostra 5. (f) Amostra 6.

As Figuras 39 e 40 apresentam as condições dos insertos utilizados neste estudo, evidenciando o desgaste de flanco resultante do mecanismo de adesão. Esse desgaste ocorre devido á soldagem do cavaco à superfície de saída da ferramenta. Além disso, as deformações observadas na amostra torneada sob alta velocidade de corte e sem lubrificação (Figura 34 (b)) podem ser atribuídas a esse mecanismo de desgaste, cuja influência é intensificada pela severidade das condições de usinagem.

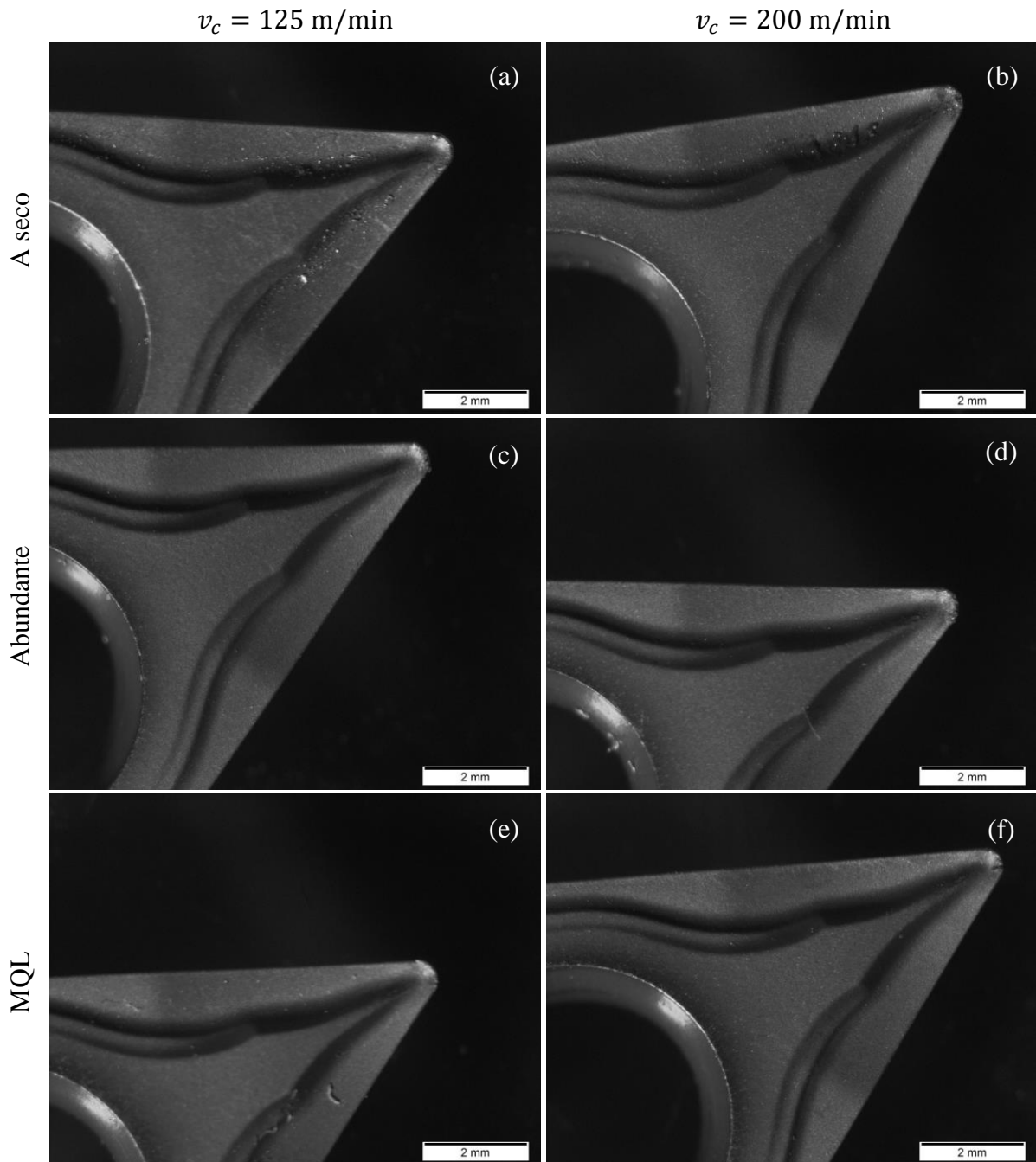


Figura 39: Vista superior dos insertos de corte. (a) Inserto da amostra 1. (b) Inserto da amostra 2. (c) Inserto da amostra 3. (d) Inserto da amostra 4. (e) Inserto da amostra 5. (f) Inserto da amostra 6.

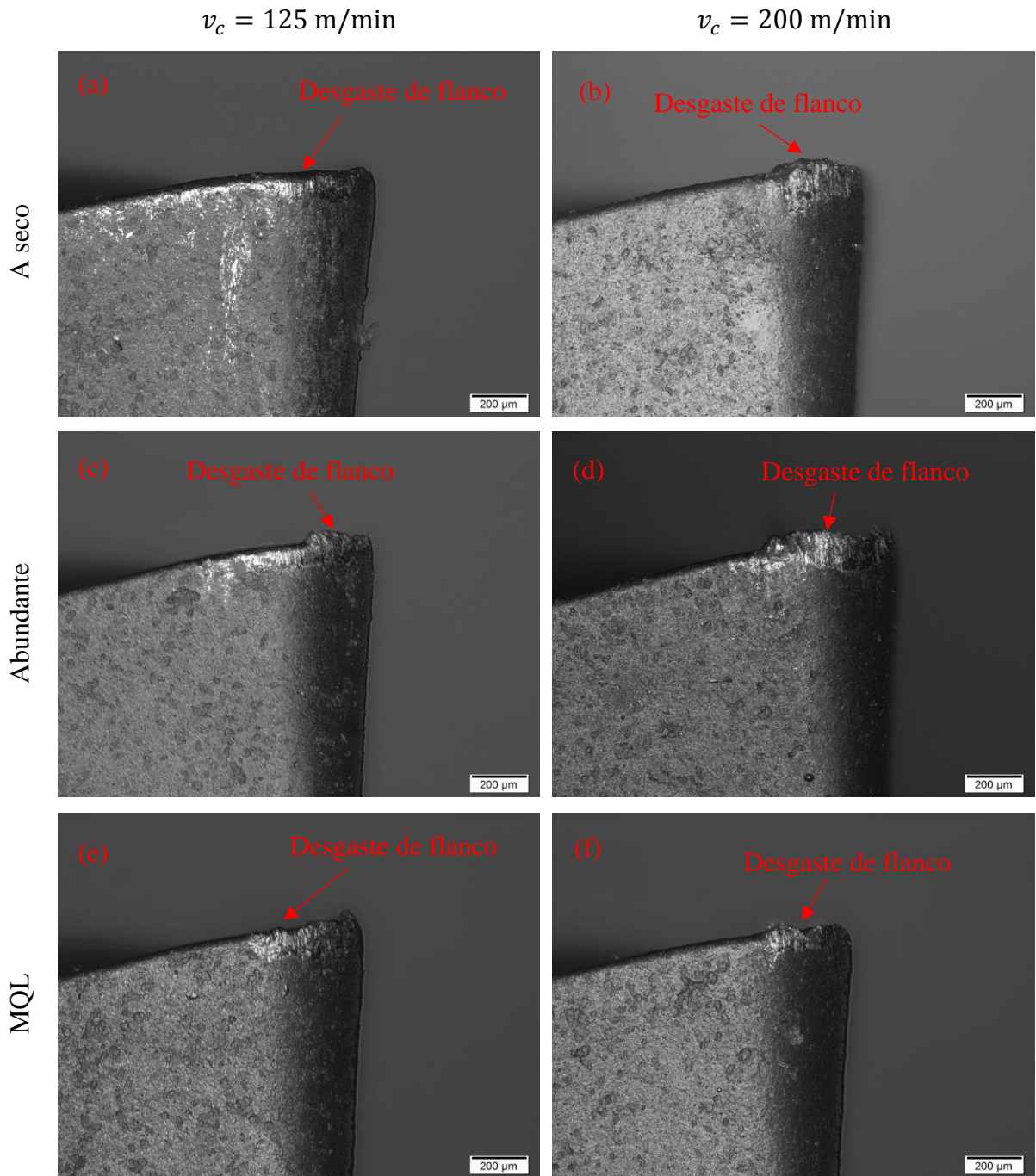


Figura 40: Aresta principal de corte. (a) Inseto da amostra 1. (b) Inseto da amostra 2. (c) Inseto da amostra 3. (d) Inseto da amostra 4. (e) Inseto da amostra 5. (f) Inseto da amostra 6.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou a integridade superficial de amostras de aço inoxidável duplex e o desgaste das ferramentas de corte sob diferentes condições de usinagem e lubrificação. A partir dos testes e resultados obtidos, pode-se concluir que:

1. A caracterização microestrutural do material recebido demonstrou que o material se trata de um aço duplex. Contudo, não foi possível afirmar com precisão de qual família de aços duplex o material estudado pertence, uma vez que somente a caracterização qualitativa foi realizada;
2. A amostra torneada sob baixa velocidade de corte e lubrificação abundante apresentou a melhor qualidade superficial dentre as condições que utilizaram baixa velocidade de corte. Esse resultado indica que o fluido abundante proporciona a melhor remoção de cavacos e redução de atrito entre os métodos de lubrificação utilizados. Em baixas velocidades de corte, o maior tempo de contato entre a amostra e a ferramenta favorece o surgimento de interferências indesejadas na qualidade superficial, como a interação de cavacos e o surgimento de forças de corte de maior magnitude, decorrentes do maior atrito. Nesse contexto, o fluido abundante mostrou ser o método mais eficaz em mitigar esses efeitos, justificando a melhor qualidade superficial obtida;
3. A amostra torneada sob alta velocidade de corte e com Mínima Quantidade de Lubrificante – MQL, apresentou a melhor qualidade superficial dentre as condições estudadas. Dessa forma, conclui-se que o uso de MQL em altas velocidades de corte é uma alternativa viável e sustentável, oferecendo uma combinação otimizada de desempenho e redução de impacto ambiental e à saúde do operador;
4. As amostras não apresentaram alterações significativas na dureza superficial após o processo de usinagem em nenhuma das condições estudadas. Logo, conclui-se que as condições de usinagem do presente trabalho, aparentemente, não geraram alterações microestruturais consideráveis na amostra como o endurecimento por deformação plástica;
5. A análise dos cavacos gerados durante o processo de usinagem sugere que os parâmetros de corte e lubrificação empregados no presente trabalho não foram os mais adequados. Sendo essa conclusão devido à incapacidade de alterar a

natureza dos cavacos resultantes da usinagem de aços inoxidáveis duplex, que permaneceram longos e contínuos, mesmo com a aplicação diferentes condições de lubrificação e ajustes nos parâmetros de corte;

6. As ferramentas de corte utilizadas no presente trabalho apresentaram desgaste de flanco devido ao mecanismo de adesão dos cavacos na aresta de corte. O presente trabalho avaliou a rugosidade do material sob passe de acabamento, portando o desgaste apresentado nas ferramentas não tiveram efeito significativo na qualidade superficial das amostras.
7. Dentre as condições estudadas no presente trabalho, conclui-se que a condição mais otimizada para torneamento do aço inoxidável duplex é sob alta velocidade de corte e com MQL. Essa condição apresentou os melhores valores de rugosidade superficial e um baixo desgaste da ferramenta de corte. Além disso essa condição favorece a produtividade por trabalhar sob altas velocidades com um baixo consumo de fluidos lubrificante, combinando sustentabilidade com alta produtividade.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de complementar este trabalho e explorar novas abordagens para o aprimoramento da usinagem de aços inoxidáveis duplex, recomenda-se o desenvolvimento das seguintes análises:

- Estudo da influência da variação de outros parâmetros de corte, como a velocidade de avanço e a profundidade de corte, associados às mesmas condições de lubrificação;
- Realização de um maior número de passes para que seja possível analisar de maneira mais consistente o desgaste gerado nas ferramentas;
- Realizar a caracterização quantitativa da composição química da peça, de forma que seja possível determinar a família do aço inoxidável duplex estudado;
- Realizar de ensaios de micro dureza Vickers, com o intuito de obter dados mais precisos acerca da dureza superficial das amostras antes e após usinagem;
- Realizar medições desgaste de flanco, a fim de estudar qual condição foi mais severa a qualidade de vida da ferramenta.

REFERENCIAS

ABRAHÃO JÚNIOR, M. **Caracterização microestrutural e avaliação de propriedades mecânicas de aços inoxidáveis duplex**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

ARAUJO, A. C.; VOGEL, J. P.; SOUZA, W. Estudo do efeito do avanço nas forças e no acabamento de um torneamento de aço super duplex. **In: 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**. Itatiaia, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508-1**: Materiais metálicos — Ensaio de dureza Rockwell - Parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 513**: Classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas – Denominação dos grupos principais e grupos de aplicação. Rio de Janeiro, 2002.

BARBOSA, P.A. **Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

BARRETO, A. D. G. *et al.* Detecção de fases deletérias no aço inoxidável superduplex UNS S32760 (Zeron 100) utilizando equipamento de ensaio EPR-DL de campo. **In: 68º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 2013**. Belo Horizonte. Minas Gerais, 2013.

BINALI, R. *et al.* Different aspects of machinability in turning of AISI 304 stainless steel: a sustainable approach with MQL technology. **Metals**, v. 13, n. 6, p. 1088, 2023.

BUBANI, F. C. *et al.* Efeito da temperatura e do teor de níquel nas propriedades mecânicas e a correlação com usinabilidade em ligas Fe-18Cr-Ni. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 63, p. 185-190, 2010.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades dos Metais e Ligas - Processos de Fabricação**, vol. 1, 1ª ed., São Paulo, Brasil, Editora McGraw-Hill, 1977.

OLIVEIRA JUNIOR, C. A. *et al.* Correlating tool wear, surface roughness and corrosion resistance in the turning process of super duplex stainless steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 36, p. 775-785, 2014.

DINIZ, A. E. *et al.* **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo, Brasil, MM Editora, 1999.

DOS SANTOS, J. B.; LIMA, R. O. C. Estudo da possibilidade de aplicação de óleos de coco e de soja em substituição de fluidos emulsionáveis no torneamento do aço SAE 1045. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 4, n. 1, p. 23-34, 2022.

ESPANHOL, V. **Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra cavaco**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2008.

FRACARO, J. **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle**. 1. ed. Curitiba: Intersaberes, 2017. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 31 jan. 2025.

FARIAS, A. **Análise da tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em material endurecido do aço ABNT 8620 cementado**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009.

FERRARESI, D. **Fundamento da Usinagem dos Metais**. São Paulo, Brasil, Editora Edgard Blücher, 1970.

GAMARRA, J. R. **Estratégias de Usinagem no Torneamento de Aço Inoxidável Super Duplex (UNS S32750)**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

GRAVALOS, M. T. *et al.* Efeito da usinagem na estrutura e propriedades mecânicas do aço superaustenítico ASTM A351 CN3MN. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 60, p. 83-88, 2007.

GRAVALOS, M. T. *et al.* Influência da rugosidade na resistência à corrosão por pite em peças torneadas de aço inoxidável superaustenítico. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 63, p. 77-82, 2010.

GROOVER, M. **Introdução aos Processos de Fabricação**. 1ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 2014.

HALCSIK *et al.* Avaliação da influência da mínima quantidade de lubrificante no torneamento em acabamento. **Tecnologia, inovação e sustentabilidade: 50 anos de Cursos de Tecnologia no Brasil**. São Paulo, 2019

LEITE, P. A. C. **CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DO AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO DIN EN 14.116 APÓS TÊMPERA E REVENIMENTO**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

LIMA, L.; BORDINASSI, É. C. **Efeito da refrigeração criogênica no desgaste de ferramenta durante o torneamento do aço inoxidável super duplex**. 2023 Trabalho de Iniciação Científica – Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT), São Caetano do Sul, 2023.

MACHADO, A.R. *et al.* **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3ª ed. São Paulo, Brasil, Editora Blücher, 2015

NAGY, A. I. *et al.* Difficulties in the machining super duplex stainless steels. **Papers on Technical Science**, v. 11, p. 141-144, 2019.

NATESH, C. P. *et al.* Tribological and morphological study of AISI 316L stainless steel during turning under different lubrication conditions. **Lubricants**, v. 11, n. 2, p. 52, 2023.

NUNES, L. T. *et al.* **Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2011.

PARDAL, J. M. *et al.* Uma revisão da resistência à corrosão em aços inoxidáveis duplex e superduplex. **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 4, p. 658-677, 2013.

PARSI, P. K. *et al.* Machinability evaluation of coated carbide inserts in turning of super-duplex stainless steel. **SN Applied Sciences**, v. 2, p. 1-19, 2020.

RUNGE, P.R.F.; DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas Indústrias: Manual Prático Para Engenheiros, Químicos e Técnicos de Produção, Manutenção e Controle**. São Paulo: Editora Triboconcept, 1989.

SANDVIK COROMANT – DCMT 11 T3 04-UM 1115. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/product-details?c=DCMT%2011%20T3%2004-UM%20%20%20%201115>. Acesso em: 03/12/2024.

SANTOS, D. V. *et al.* Avaliação da usinabilidade do aço inoxidável supermartensítico na operação de torneamento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, p. e-12639, 2020.

SENTHILKUMAR, K. M. *et al.* Optimization of surface roughness during turning operation in super duplex stainless steel. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 1939-1942, 2022.

SHAISUNDARAM, V. S.; NAVEEN, K. S. Effect of lubricant on turning characteristics of duplex stainless steel. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 3^a ed. São Paulo, Brasil, Editora Blücher, 2010

SONAWANE, G. D.; SARGADE, V. G. Machinability study of duplex stainless steel 2205 during dry turning. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 21, p. 969-981, 2020.

SOUZA, M. M. **Usinabilidade dos aços inoxidáveis - Uma Revisão**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2020.

VICENTE, A. A. *et al.* Study of the Distribution of Cr, Mo, Ni and N in Ferrite and Austenite in Duplex Stainless Steels. **Saudi Journal of Engineering and Technology**, v. 5, n. 4, p. 156-162, 2020.

XAVIER, F.A. **Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2003.