

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M

PAULO ROBERTO HOFFMANN

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA INTEGRIDADE
SUPERFICIAL DE UM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316L
SUBMETIDO À PROCESSO DE TORNEAMENTO CILÍNDRICO
EXTERNO

PORTO ALEGRE, RS

2023

PAULO ROBERTO HOFFMANN

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA INTEGRIDADE
SUPERFICIAL DE UM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316L
SUBMETIDO À PROCESSO DE TORNEAMENTO CILINDRICO
EXTERNO

Dissertação apresentada à diretoria do curso de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Porto Alegre

2023

PAULO ROBERTO HOFFMANN

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA INTEGRIDADE
SUPERFICIAL DE UM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316L
SUBMETIDO À PROCESSO DE TORNEAMENTO CILÍNDRICO
EXTERNO

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Alexandre da Silva Rocha

Coordenador PPGE3M: Prof. Dr. Afonso Reguly

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando Michelin Marques, IFSC - SC

Prof. Dr. Halley Welther Jacques Dias, IFSC - SC

Prof. Dr. Vinicius Wachter Dias, Demet - UFRGS

Dedico este trabalho

Primeiramente aos meus pais, Hugo e Ilga, pelos tantos sacrifícios feitos em suas vidas e pelos frequentes e incansáveis incentivos para que eu pudesse chegar onde cheguei. Em especial, à minha filha, Joanne, que foi e é fonte de inspiração da minha vida. Com você aprendi o que é um amor único, especial e inconstitucional. Hoje, amanhã e sempre, eu tudo farei pela sua felicidade sem qualquer hesitação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, magnânimo e onipotente, pela oportunidade concedida e pela força nos momentos de dificuldade.

Ao orientador Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha, pela orientação, generosidade, apoio técnico e científico durante o transcorrer deste trabalho e principalmente pela paciência e crédito de confiança.

Ao amigo, professor Dr. Fernando Michelin Marques, que muito me apoiou e incentivou para a realização do trabalho sempre com incentivo e comprometimento para conclusão de mais uma etapa da vida.

Ao IFSC campus Chapeco, por ceder o espaço e maquinário para a realização dos experimentos práticos, em especial o servidor Deiwis Lellis Hoss e ao bolsista Ricardo Perin, pelo apoio e ajuda na preparação dos corpos de prova para análise metalográfica.

Ao IFSC campus Araranguá, em especial ao professor Ariel Teixeira, pela ajuda na realização dos ensaios de dureza.

Aos colaboradores do LAMEF, que auxiliaram na condução dos ensaios de tensões residuais, especialmente ao Igor Luis Diehl pelo auxílio na realização das análises.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram com a realização desta dissertação.

E, por fim, a banca de avaliação da dissertação pela disponibilidade e contribuições.

RESUMO

A integridade superficial de peças usinadas tem sido uma constante preocupação na indústria metalmeccânica, impulsionada pelo fato de que grande parte de produtos acabados contém peças usinadas. Viemos testemunhando uma maior procura por materiais para fabricação de componentes críticos, tais como as ligas de aço inoxidável austenítico, principalmente devido à alta resistência mecânica e à capacidade de manter propriedades mecânicas em temperaturas elevadas e em ambientes corrosivos. No entanto, a usinagem desse material representa um desafio por suas características adversas ao corte, sendo que, a alta taxa de encruamento e a alta dureza relativa reduzem sua usinabilidade. Os processos de fabricação são capazes de deformar plasticamente e induzir tensões nos materiais de diferentes formas, afetando a integridade superficial dos mesmos. Além da natureza do processo, os parâmetros utilizados na operação também são capazes de influenciar a integridade superficial e a resistência à fadiga mecânica do material. Com o objetivo de estudar e entender o comportamento do material, este trabalho avaliou a influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade superficial, microestrutura, perfil de dureza, e tensões residuais superficiais do aço inoxidável austenítico AISI 316L. O material foi usinado variando-se os valores de velocidade de corte, avanço e raio de ponta da ferramenta. Como era de se esperar, os resultados observados nos ensaios demonstram que o avanço foi o parâmetro que exerceu a maior influência sobre a rugosidade R_a e R_z , seguido do raio de ponta da ferramenta. A variação da velocidade de corte apresentou pouca significância para os resultados da rugosidade nas situações testadas neste trabalho. Em relação à região de medição da rugosidade, verificou-se que quanto mais próximo da placa de fixação do torno, menores são os valores de rugosidade. Os resultados da dureza subsuperficial indicaram que a combinação da menor velocidade de corte com o maior raio de ponta da ferramenta resultou numa maior camada endurecida. Entretanto, a maior velocidade de corte combinada com o menor raio de ponta da ferramenta gerou a menor dureza na superfície do material. As análises de tensões residuais apresentaram maiores variações no sentido axial, sendo as mesmas percebidas ao variar o avanço e o raio de ponta da ferramenta. Ao utilizar o menor raio de ponta de ferramenta e com o incremento do avanço, as tensões residuais que eram compressivas, passam a se tornar trativas no sentido axial. Já para o aumento do raio de ponta, há incremento nas tensões residuais de tração axial. Já a variação da velocidade de corte influenciou as tensões residuais radiais, as quais apresentaram redução com o aumento da velocidade.

Palavras-chave: usinagem; parâmetros de corte; integridade superficial, aço inoxidável austenítico AISI 316L

ABSTRACT

The surface integrity of machined parts has been a constant concern in the metal-mechanical industry, driven by the fact that a large part of finished products contains machined parts. We have witnessed a greater demand for materials for the manufacturing of critical components, such as austenitic stainless steel alloys, mainly due to the high mechanical strength and the ability to maintain mechanical properties at elevated temperatures and in corrosive environments. However, the machining of this material represents a challenge due to its adverse characteristics when cutting, and the high hardening rate and high relative hardness that decrease its usability. The manufacturing processes are capable of plastically deforming and inducing stresses in materials in different ways, affecting their surface integrity. In addition to the nature of the process, the parameters used in the operation are also able to influence the surface integrity and resistance to mechanical fatigue of the material. In order to study and understand the behavior of the material, this work evaluated the influence of the cutting parameters on the surface roughness, microstructure, hardness profile and surface residual stresses of AISI 316L austenitic stainless steel. The material was machined by varying the cutting speed, feed rate and tip radius of the tool. As expected, the results observed in the tests show that the feed rate was the parameter that exerted the greatest influence on the R_a and R_z roughness, followed by the tool tip radius. The variation in the cutting speed has little significance for the results of the roughness in the situations tested in this work. Regarding the roughness measurement region, it was found that the closer to the lathe clamping plate, the lower the roughness values. The subsurface hardness results indicated that the combination of the lowest cutting speed with the highest tool tip radius resulted in a larger hardened layer. However, the highest cutting speed combined with the smallest tool tip radius generated the lowest hardness on the material surface. The residual stress analysis showed greater variation for the axial direction, the same being observed when varying the advanced and the tool tip radius. When using the smallest tool tip radius and feed rate increment, axial residual stress become tensile. Increasing the tool tip radius, there is also an increase in the axial residual stresses.

Key words: machining; cutting parameters; surface integrity, austenitic stainless steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Velocidade de corrosão, em termos de perda de peso de ligas de ferro-cromo, em situações de oxidação, sob calor no ar a temperatura de 1000°C.	19
Figura 2 - Remoção mecânica e restauração da camada passiva.....	20
Figura 3 - Classificação dos aços inoxidáveis	21
Figura 4 - Família dos aços inoxidáveis austeníticos	26
Figura 5 - Classificação dos processos de fabricação	29
Figura 6 - Variáveis de entrada e saída do processo de torneamento	31
Figura 7 - Desempenho comparativo na usinagem das principais classes de aços inoxidáveis.....	34
Figura 8 - Camadas da integridade superficial.....	37
Figura 9 - Alterações superficiais em superfícies usinadas	38
Figura 10 - Fatores superficiais - ondulações, falhas e rugosidade	40
Figura 11 - Rugosidade média "Ra"	41
Figura 12 - Definição dos parâmetros "Rp, Rv e Rt"	44
Figura 13 - Definição do parâmetro "Rz"	44
Figura 14 - Efeito das tensões residuais nas propriedades dos materiais.....	45
Figura 15 - Tensões residuais: (a) macroscópicas; (b) microscópicas; (c) submicroscópicas.....	47
Figura 16 - Tensões nas superfícies do metal antes e após a passagem da ponta da ferramenta ..	48
Figura 17 - Análise metalográfica preliminar do material	52
Figura 18 - Usinagem das três amostras do corpo de prova	55
Figura 19 - Torno CNC utilizado nos testes.....	56
Figura 20 - Rugosímetro utilizado nas medições de rugosidade	56
Figura 21 - Microdurômetro utilizado nos ensaios de dureza.....	57
Figura 22 - Indentações na amostra submetida ao ensaio de dureza	58
Figura 23 - Equipamento de difração de raios-X utilizado nas análises das amostras	59
Figura 24 - Variação da rugosidade média "Ra" nas diferentes amostras de cada condição	61
Figura 25 - Variação da rugosidade média "Rz" nas diferentes amostras de cada condição.....	61
Figura 26 - Gráfico da rugosidade média "Ra" em função das condições de usinagem	63
Figura 27 - Gráfico da rugosidade média "Rz" em função das condições de usinagem.....	64
Figura 28 - Influência da velocidade de corte na rugosidade média Ra.....	66
Figura 29 - Influência da velocidade de corte na rugosidade média Rz	66
Figura 30 - Influência do raio de ponta da ferramenta na rugosidade média Ra.....	67
Figura 31 - Influência do raio de ponta da ferramenta na rugosidade média Rz.....	68
Figura 32 - Influência do avanço da ferramenta na rugosidade média Ra.....	69
Figura 33 - Influência do avanço da ferramenta na rugosidade média Rz	70
Figura 34 - Gráficos dos principais efeitos dos três fatores sobre a rugosidade Ra e Rz.	73
Figura 35 - Microestruturas das amostras usinadas das condições: a) 145.15.4 e b) 145.30.4.....	74
Figura 36 - Microestruturas das amostras usinadas das condições: a) 195.15.4 e b) 195.30.4.....	75
Figura 37 - Microestruturas das amostras usinadas das condições: a) 145.15.8 e b) 145.30.8.....	75
Figura 38 - Microestruturas das amostras usinadas das condições: a) 195.15.8 e b) 195.30.8.....	76
Figura 39 - Perfil de microdureza variando os parâmetros de vc e fn e ferramenta com r_e de 0,4 mm	77
Figura 40 - Perfil de microdureza variando os parâmetros de vc e fn e ferramenta com r_e de 0,8 mm	78

Figura 41 - Tensões residuais na direção longitudinal das condições analisadas	80
Figura 42 - Tensões residuais na direção transversal das condições analisadas.....	80
Figura 43 - Gráficos do efeito do raio de ponta nas tensões residuais.....	82
Figura 44 - Gráficos do efeito do avanço nas tensões residuais	83
Figura 45 - Gráficos do efeito da velocidade de corte nas tensões residuais.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos aços 316 e 316L.....	28
Tabela 2 - Classificação dos processos de usinagem.....	30
Tabela 3 – Parâmetros de corte recomendados pelo fabricante das ferramentas.....	50
Tabela 4 - Composição química do aço inoxidável AISI 316L (% em peso)	52
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 316L	53
Tabela 6 – Valores de cada parâmetro utilizados no trabalho.....	53
Tabela 7 - Condições de usinagem empregadas	55
Tabela 8 - Valores da rugosidade média Ra teórico e real em cada condição	62
Tabela 9 - Matriz dos dados do DoE com três fatores de entrada e como saída a rugosidade média Ra e Rz.....	72
Tabela 10 – Resposta de cada critério analisado conforme condição utilizada.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
Ap	Profundidade de corte
f	Avanço
HV	Dureza vickers
IR	Índice de rugosidade
kW	Kilowatts
Le	Comprimento de amostragem
Lm	Percurso de medição, apenas trecho útil
Ln	Final do trecho de medição, utilizado para estabilização
Lt	Percurso total de apalpamento
Lv	Início do trecho de medição, utilizado para estabilização
MPa	Mega Pascal
m/min	Metros por minuto
P	Termo representativo dos parâmetros do processo
Po	Plano ortogonal da ferramenta
Pp	Plano passivo da ferramenta
Pr	Plano de referência da ferramenta
Ps	Plano do gume da ferramenta
r ϵ	Raio de quina
Ra	Rugosidade média aritmética
Rmáx	Rugosidade máxima no percurso de medição
Rt	Rugosidade teórica
Rz	Rugosidade média das máximas parciais
S	Desvio padrão
Vc	Velocidade de corte
Zi	Rugosidade máxima parcial
α	Ângulo de folga
α_n	Ângulo de incidência
β_n	Ângulo de cunha
γ	Ângulo de saída
ϵ	Deformação
ϵ_r	Ângulo de quina
θ	Metade do ângulo de difração
Kr	Ângulo de posição do gume principal
K'r	Ângulo de posição do gume secundário
λ	Comprimento de onda da radiação
λ_s	Ângulo de inclinação do gume principal
μm	Micrômetro
σ	Tensão residual
χ_r	Ângulo de direção
φ	Ângulo entre a componente na direção x no plano da superfície e a direção da medida
Ψ	Ângulo entre a direção normal da amostra e a normal do plano de difração

LISTA DE ABREVIATURAS

CCC	Estrutura cristalina cúbica de corpo centrada
CFC	Estrutura cristalina cúbica de face centrada
CNC	Comando numérico computadorizado
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
RPM	Rotação por minuto
PVD	Deposição Física de Vapor
TCC	Estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivo geral	17
1.2 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Aços Inoxidáveis	18
2.2 Tipos de aços Inoxidáveis.....	21
2.2.1 Aços Inoxidáveis Martensíticos	22
2.2.2 Aços Inoxidáveis Ferríticos	22
2.2.3 Aços Inoxidáveis Duplex.....	23
2.3 Aços Inoxidáveis Austeníticos	25
Aço Inoxidável Austenítico AISI 316L	27
2.4 Usinagem dos Materiais	28
2.4.1 Torneamento.....	30
2.4.2 Usinabilidade dos aços inoxidáveis	33
2.4.3 Geometria da Ferramenta e a Rugosidade da Peça.....	35
2.5 Integridade da Superfície.....	36
2.5.1 Rugosidade da Superfície Usinada	40
2.5.2 Tensões Residuais	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1 Introdução.....	49
3.2 Materiais	49
3.2.1 – Corpos de Prova	49
3.2.2 – Ferramentas de Corte.....	50
3.3 Metodologia.....	50
3.3.1 – Primeira etapa: caracterização do aço AISI.....	51
3.3.1.1 – Composição Química.....	51
3.3.1.2 – Análise Metalográfica.....	52
3.3.1.3 – Propriedades Mecânicas	53
3.3.2 – Segunda etapa: teste de torneamento	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
4.1 Rugosidade da Superfície Usinada.....	60

4.1.1 Variação da Rugosidade nas Três Amostras Obtidas em cada Condição.....	60
4.1.2 Análise da Variação da Rugosidade Média (Ra).....	62
4.1.3 Análise da Variação da Rugosidade Média (Rz)	64
4.1.4 Influência da Velocidade de Corte na Rugosidade.....	65
4.1.5 Influência do Raio de Ponta da Ferramenta na Rugosidade	67
4.1.6 Influência do Avanço da Ferramenta na Rugosidade.....	69
4.1.7 Utilização de Planejamento Experimental (DoE) na análise da influência dos fatores nas rugosidades médias.....	72
4.2 Caracterização Microestrutural.....	73
4.3 Perfil de Dureza Obtido nas Condições Analisadas	76
4.4 Tensões Residuais	79
4.4.1 Influência do Raio de Ponta nas Tensões Residuais.....	81
4.4.2 Influência do Avanço nas Tensões Residuais	82
4.4.3 Influência da Velocidade de Corte nas Tensões Residuais.....	83
4.5 Quadro Comparativo Qualitativo das Respostas Obtidas.....	85
5 CONCLUSÕES	87
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

1 INTRODUÇÃO

A atual situação de forte pressão competitiva obriga as empresas a aumentarem desempenho nos processos de fabricação. Esta situação representa um desafio importante para todas as empresas produtivas baseado numa melhoria dos processos de fabricação que permitem fabricar com rapidez, qualidade e baixo custo. No setor de corte de metais é fundamental fabricar produtos de maior valor adicional e qualidade, com custos e tempos reduzidos em materiais de alta performance. Para atingir esses objetivos, novas tecnologias foram desenvolvidas, cujos principais benefícios são a obtenção de peças com maior qualidade superficial e precisão dimensional em tempos de fabricação reduzidos e com menores custos de produção. Essas melhorias são alcançadas graças ao profundo conhecimento do comportamento dos materiais que são usinados e os parâmetros de corte empregado.

A ideia de melhorar o desempenho das operações com a manutenção dos parâmetros de corte não deve ser reduzido somente à técnica de torneamento, mas deve ser estendido a outras técnicas de usinagem de materiais, como o fresamento.

O processo de torneamento é bem conhecido e vem sendo amplamente estudado, no entanto, ainda existem inúmeras limitações no torneamento de certos materiais, devido fundamentalmente à falta de informação sobre o seu comportamento e caracterização. Este é o caso dos aços inoxidáveis austeníticos, que apesar de serem materiais de grande importância econômica e tecnológica, poucos dados confiáveis estão disponíveis que permitem abordar a usinagem desses materiais.

Os aços inoxidáveis são materiais altamente sustentáveis e com alta durabilidade, fatores estes que os tornam materiais de alto uso, tendo grande importância econômica, pois representam 10% da produção mundial de aços, e dentro deles os austeníticos respondem por 70%. A elevada demanda pelo aços inoxidáveis austeníticos pode ser explicada devido às suas altas propriedades mecânicas e excelente resistência à corrosão. Estes materiais são utilizados em inúmeros setores, fundamentalmente na indústrias químicas, alimentícias, médicas, de construção e automotivas, sendo que um elevado percentual dessas aplicações requerem alguma operação de usinagem, por isso é uma área que está em constante crescimento e estudo, um vez que na indústria não existem dados tecnológicos sobre o torneamento de aços inoxidáveis austeníticos que são suficientemente confiáveis e atualizados no que diz respeito à nível de desenvolvimento tecnológico.

O torneamento de aço inoxidável é usado em uma ampla variedade de peças com diferentes tamanhos e requisitos para tolerâncias dimensionais, acabamento e integridade

superficial. Um setor de importante consumo de aço inoxidável é o torneamento de barras, onde são fabricadas grandes séries de peças de pequeno e médio porte destinadas a um grande número de setores como automotivo, pequenos eletrodomésticos, eletricidade, termometria e manometria industrial, médica entre outros. A necessidade de fabricar componentes com os menores tempos possíveis sem afetar significativamente as condições de acabamento e integridade superficial do material, torna necessário dedicar especial atenção as condições de corte empregadas nessas operações.

O aço inoxidável austenítico, assim como os outros aços inoxidáveis, apresentam baixa usinabilidade devido a sua alta taxa de encruamento, baixa condutividade térmica, alta resistência à fratura, elevados valores de resistência mecânica e ductilidade, alta taxa de dilatação térmica e alto coeficiente de atrito. Tais características geram problemas na usinagem como: formação de aresta postiça, pior acabamento superficial, baixas velocidades de corte e desgaste excessivo da ferramenta, motivo pelo qual torna-se necessário um estudo comparativo deste material levantando melhores parâmetros de usinagem de acordo com as ferramentas de corte empregadas. Com o intuito de observar quais os melhores dados de corte entre as ferramentas testadas, foi analisada a integridade superficial resultante das peças.

Atualmente a preocupação dos pesquisadores no ramo de usinagem vai além dos custos de produção, acabamento da peça e controle dimensional. O importante é usinar a peça sem que ocorram perdas nas propriedades do material devido as oscilações de esforços mecânicos e térmicos. Dito isso, optou-se por verificar a integridade superficial das peças submetidas ao processo de usinadas com os diferentes parâmetros de corte.

A integridade da superfície representa a natureza de estado da mesma após ser submetida à algum processo de fabricação. Há dois aspectos importantes a serem analisados, a saber, as características topográficas e as alterações na subsuperfície. A topografia da superfície compreende rugosidade, ondulação, erros e falhas. As características da camada subsuperficial que podem mudar devido ao processamento incluem a deformação plástica, tensões residuais, fissuras, dureza, microestrutura, mudanças de fase, recristalização e ataque intergranular.

Este trabalho teve por objetivo estudar os efeitos causados pela operação de torneamento e identificar uma correlação das principais condições de corte utilizadas no torneamento com parâmetros de qualidade da superfície usinada como: rugosidade, variação da microestrutura, dureza e tensão residual.

1.1 Objetivo geral

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência dos parâmetros de usinagem nos critérios de integridade superficial, tais como a rugosidade média (Ra) e altura máxima média do perfil (Rz), das tensões residuais geradas na superfície da peça e o perfil de dureza resultante do processo de torneamento cilíndrico externo do aço inoxidável austenítico AISI 316L, com vistas a encontrar os melhores parâmetros que assegurem uma boa integridade da superfície usinada dentro de uma perspectiva de usinagem ambientalmente amigável.

1.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- testar diferentes combinações de parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e raio de ponta da ferramenta) na usinagem de aço inoxidável austenítico, de forma a verificar sua influência sobre a integridade superficial;
- analisar a influência dos parâmetros de corte nos valores de tensão residual;
- avaliar estatisticamente a influência dos fatores controláveis sobre a resposta;
- identificar os parâmetros de usinagem ótimos para o melhor acabamento possível da superfície;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços Inoxidáveis

A classificação de aços inoxidáveis é dada às ligas ferro (Fe), carbono (C) e cromo (Cr) contendo uma quantidade mínima de cromo (Cr) de 10,5% em peso, além da adição de outros elementos químicos, caso do níquel (Ni) e o molibdênio (Mo). Alguns aços inoxidáveis possuem mais de 30% de Cr ou menos de 50% de Fe (ATLAS, 2013; CAMPOS, 2019; ROSA, 2017).

Este material, nasceu no início do século XX, da necessidade da engenharia de tentar solucionar problemas de resistência à corrosão e oxidação, pois os produtos fabricados em aço até então não possuíam resistência à corrosão. Em 1911 nos Estados Unidos, quando Christian Dantszen inicia seus experimentos com ligas contendo entre 14% e 16% de cromo e baixo teor de carbono, surgiram os primeiros aços inoxidáveis ferríticos, muito resistentes a corrosão (PADILHA; GUEDES, 1994).

Em 1912, o inglês Harry Brearly estudava uma liga Fe-Cr (13%) e, no momento em que buscava fazer alguns ensaios metalográficas, constatou que a liga fabricada resistia à grande parte dos reagentes que se empregavam na época em metalografia. Por isso, denominou-a de "*stainless steel*" que, ao pé da letra, quer dizer "aço sem manchas" (GAMARRA, 2017). Este estudo oportunizou o desenvolvimento dos aços inoxidáveis martensíticos.

Na Alemanha, um ano após, Eduard Maurer, analisou uma liga Fe-Cr que possuía, além dos elementos da liga de Brearly, em torno de 8% de Ni, dando origem aos aços inoxidáveis austeníticos. Como resultado, constatou que a liga resistiu vários meses a vapores agressivos no laboratório no qual trabalhava (OLIVEIRA JUNIOR, 2013).

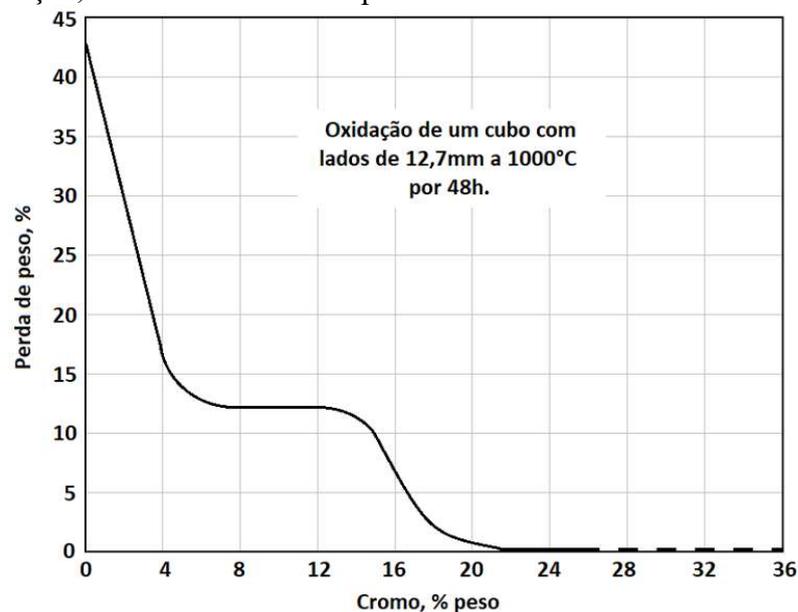
Aços inoxidáveis são aços de alta liga, os quais possuem como característica principal, a resistência à corrosão em ambientes agressivos (água do mar, soluções ácidas e básicas, ambientes industriais) além de resistência à oxidação em altas temperaturas e a resistência à corrosão química (ROSA, 2017) (BHATTACHARJEE; AMARNATH; DUTTA, 2017)

Esta resistência à corrosão e oxidação destes materiais é decorrente da presença de uma fina camada ou película superficial protetora de óxido de cromo (Cr_2O_3), ferro e outros elementos, isolando o metal do meio corrosivo. Nesta camada, fina, invisível e estável, com espessura na ordem de alguns microns (1-3 μm), a concentração de cromo é maior que no restante do metal. Esta propriedade típica que certos materiais adquirem, de permanecerem

inalterados no meio circunvizinho, em função do aparecimento dessa película de óxidos é chamada de passividade.

Nas ligas comerciais, o percentual de cromo varia de 12 a 28%, sendo que, em termos gerais, pode-se concluir que quanto maior este percentual, maior será a resistência à corrosão, tanto em condições de corrosão úmida como sob o efeito da oxidação pelo calor (Figura 1), uma vez que o aumento de cromo facilita a formação da camada de óxido (em especial óxido e hidróxido de cromo) na superfície (filme passivo) protegendo o material (BONIARDI; CASAROLI, 2014).

Figura 1 - Velocidade de corrosão, em termos de perda de peso de ligas de ferro-cromo, em situações de oxidação, sob calor no ar a temperatura de 1000°C.



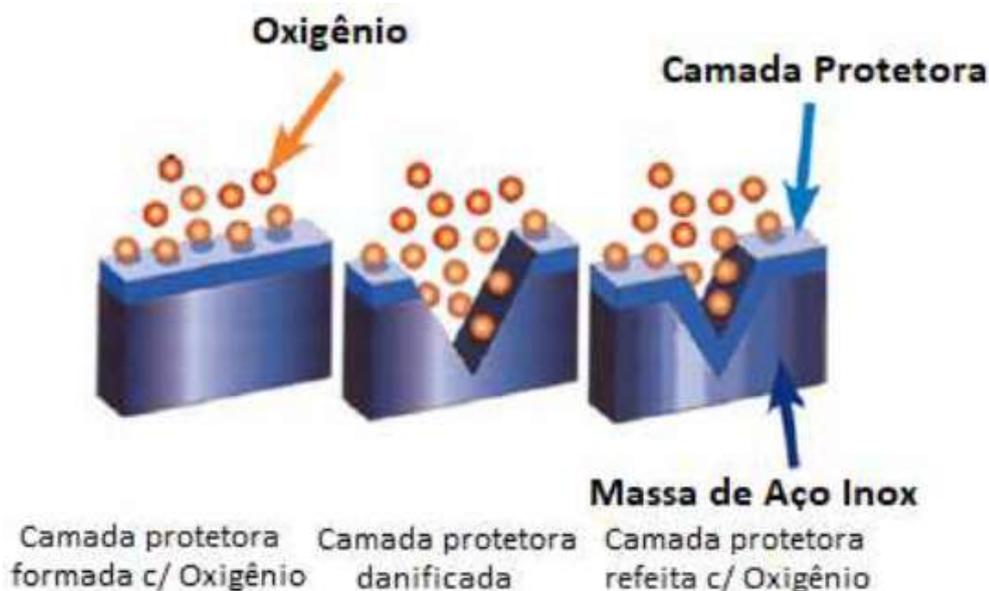
Fonte: Adaptado de (BONIARDI; CASAROLI, 2014)

O filme passivo possui uma propriedade muito importante, uma vez arranhado ou danificado mecanicamente, se forma novamente de maneira espontânea na superfície da liga, restaurando imediatamente a proteção contra qualquer ação corrosiva (LABIAPARI et al., 2017; MITU, 2013), conforme ilustrado na Figura 2. Não há outro elemento, com exceção do Cr, que por si só atribui à propriedade de “inoxidável” ao aço.

A camada protetora é formada espontaneamente devido ao percentual de cromo presente na liga do aço inoxidável em contato com o ar ou, com maior velocidade, se o material for imerso em uma solução de ácido nítrico por poucos minutos, por um tratamento de passivação. Contudo, estes materiais podem se tornar susceptíveis a corrosão se esta película protetora for dissolvida (SILVA; MEI, 2010). Fenômenos como a sensibilização em certas condições de

temperatura podem ocasionar a corrosão intergranular assim como a existência de íons de cloreto podem romper a camada passivadora, provocando a perda da resistência à corrosão (POURBAIX, 1974).

Figura 2 - Remoção mecânica e restauração da camada passiva



Fonte: Adaptado de (BONIARDI; CASAROLI, 2014)

Diversos elementos podem ser adicionados para melhorar as características destes materiais, controlando a microestrutura e/ou melhorando suas propriedades, como níquel, molibdênio, cobre, titânio, alumínio, silício, nióbio, nitrogênio, enxofre e selênio (DAVIS, 1994). Todavia, a adição de diferentes elementos de liga pode produzir estruturas cristalinas variadas como CCC ou CFC, e ao oposto da maioria dos materiais, os aços inoxidáveis são nomeados pela microestrutura que apresentam em temperatura ambiente, devido a sua composição química (BARBOSA, 2014). Existem vários tipos de aços inoxidáveis, com resistência à corrosão em diferentes graus.

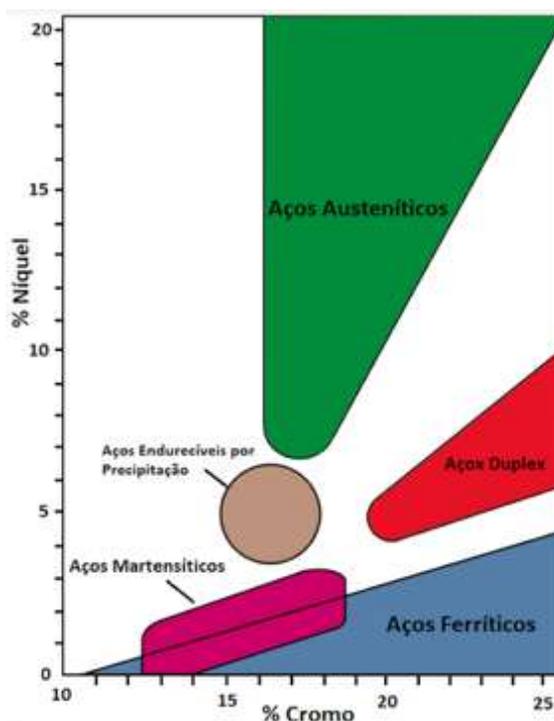
A resistência à corrosão em altas temperaturas e ao ataque de elementos químicos redutores pode ser melhorada pela adição de outros elementos de liga, como molibdênio (Mo) e níquel (Ni). Enquanto a adição de molibdênio (Mo) melhora as condições de resistência a altas temperaturas, estabilizando a condição de passivação em presença de cloretos e aumentando a resistência à corrosão localizada (*pitting*). Já a adição de níquel (Ni) favorece a formação e a estabilização da estrutura austenítica, combinando-o ao Cr, eleva o grau de resistência ao ataque de elementos químicos redutores prejudiciais a camada de óxido de Cr (GENTIL, 1996).

2.2 Tipos de aços Inoxidáveis

Independentemente de ter o cromo como elemento principal da liga, os aços inoxidáveis estabelecem uma complexa família de ligas, divididas em cinco grupos, cada um com suas características de microestrutura, elementos de liga e faixas de propriedades (ASM, 1989). A classificação destes materiais é definida pela “American Iron and Steel Institute” (AISI).

Destes cinco grandes grupos, quatro são caracterizados pelas suas características microestruturais: austenítico, ferrítico, martensítico e duplex (austeníticos e ferríticos). No quinto grupo, estão alocados todos os aços endurecíveis por precipitação, os quais possuem sua distribuição baseada no tipo de tratamento térmico empregado (SÓRIA, 2016). Apresentamos na Figura 3 uma classificação dos aços inoxidáveis de acordo com os percentuais de cromo e níquel (ATLAS, 2013).

Figura 3 - Classificação dos aços inoxidáveis



Fonte: Adaptado de (ATLAS, 2013)

A *American Iron and Steel Institute - AISI* adotou números para designar em torno de 60 composições químicas de aços inoxidáveis e aços resistentes a elevadas temperaturas, mesmo que existam adicionalmente mais de cem composições industriais não normalizadas e comercializadas nos dias de hoje com nomes próprios dos fabricantes (DOSSETT; BOYER, 2006).

2.2.1 Aços Inoxidáveis Martensíticos

São ligas de Fe-Cr-C de estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC), com teores de cromo limitado, normalmente na faixa de 10,5 a 18 % e teores de carbono entre os mais altos dos aços inoxidáveis mais utilizados, geralmente entre 0,1 e 1%, podendo até mesmo exceder 1,2%. O cromo e o carbono são balanceados para que o material tenha uma estrutura austenítica em alta temperatura e martensítica à temperatura ambiente após têmpera (ASM, 1990; BONIARDI; CASAROLI, 2014).

A presença de um alto teor de carbono, faz com que estas matérias sejam endurecíveis por tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, gerando martensita com elevados níveis de dureza e resistência mecânica, no entanto, também tendem a auxiliar na formação de carbonetos (LISCHKA, 2013). Assim sendo, os aços inoxidáveis martensíticos, entre todos os tipos, são os menos resistentes a corrosão, fato que limita sua aplicação a ambientes não muito agressivos (BONIARDI; CASAROLI, 2014).

Os aços inoxidáveis martensíticos apresentam microestrutura ferrítica no estado recozido e é nesta condição que são usinados, conformados ou trabalhados a frio. A adição de elementos como enxofre e silício melhoram sua usinabilidade. Níobio, selênio tungstênio e vanádio podem ser adicionados a esta liga para mudar a temperabilidade (DAVIS, 1994).

Foram desenvolvidas algumas ligas de aços inoxidáveis martensíticos com adição de nitrogênio e níquel, entretanto, com menores teores de carbono que os tipos tradicionais. Tais elementos conferem ao aço melhor tenacidade, soldabilidade e resistência a corrosão (MODENESI, 2001).

2.2.2 Aços Inoxidáveis Ferríticos

São os aços inoxidáveis mais simples e de menor custo (MCGUIRE, 2008), estas ligas essencialmente de Fe-Cr, de estrutura cristalina cúbica de corpo centrada (CCC), sendo, portanto, magnéticos, com teores de cromo tipicamente entre 10,5 e 30% e teores de carbono não ultrapassando o excepcional valor de 0,35%, contudo, em geral, este percentual é mantido abaixo de 0,12% (CHIAVERINI, 1979; DAVIS, 2003).

A estrutura austenítica destes materiais será inteiramente eliminada, devido aos baixos teores de carbono. Um aço com teor de cromo de 17% ou mais, e com baixo teor de carbono (0,1%), com qualquer que seja a velocidade de resfriamento, resultará sempre numa estrutura ferrítica em temperatura ambiente e, portanto, não podendo ser endurecível por tratamento

térmico. Trabalho a frio também não aumentará significativamente sua resistência, entretanto, reduz substancialmente a ductilidade, enquanto que uma melhor usinabilidade pode ser obtida com adição de enxofre e selênio (BONIARDI; CASAROLI, 2014; DAVIS, 2003; LABIAPARI et al., 2017).

Os aços inoxidáveis ferríticos disponíveis no mercado estão divididos em três famílias, com baixo, médio e alto teor de carbono, podendo conter também outros elementos de liga, tais como alumínio, silício e titânio acrescentados com o objetivo de estabilizar a estrutura ferrítica e melhorar a resistência à oxidação sob elevadas temperaturas. Para melhorar a resistência a corrosão, pode ser acrescentado molibdênio, enquanto que titânio e nióbio são utilizados para evitar a precipitação de carbonetos de cromo prejudiciais (BONIARDI; CASAROLI, 2014)

2.2.3 Aços Inoxidáveis Duplex

A mais nova família de aços inoxidáveis são as ligas autenítico-ferrítico, também chamadas de duplex ou bifásicas, que possuem sua composição química e seu processamento ajustado para se obter uma microestrutura bifásica, com quantidades iguais de ferrítica e austenítica (CCC e CFC) quando em temperatura ambiente, determinadas, sobretudo pelos teores de ferro, cromo e níquel (BONIARDI; CASAROLI, 2014; SILVERSTEIN; ELIEZER; GLAM, 2017).

Esta mistura de fases em sua estrutura, contendo teores de cromo que variam de 18 a 28%, teor de níquel entre 4 e 7% e em muitos casos molibdênio entre 3 e 4%, concebe ao aço inoxidável duplex maior resistência à corrosão por pites, corrosão por frestas e corrosão sob tensão em ambientes ricos em cloreto do que outro material com apenas uma destas fases (GUNN, 1997; MCGUIRE, 2008).

Estes materiais, com altos teores de cromo, além de possuírem boa resistência a corrosão, não possuem a mesma resistência a altas temperaturas, podendo apresentar fases de fragilização em temperaturas acima de 300° C, sendo materiais excepcionais entre -100 e 300° C. A adição de nitrogênio neste material pode apresentar ainda um aumento da resistência mecânica (MCGUIRE, 2008).

Inicialmente, quando comparados aos aços inoxidáveis austeníticos, algumas vantagens são bastante aparentes, em especial a resistência ao escoamento, que em função da estrutura composta por grãos finos chegam a ter resistência o dobro maior que os aços inoxidável austeníticos, mantendo ainda assim uma boa ductilidade (DAVISON; REDMOND, 1990).

Inúmeras são as alterações microestruturais que podem acontecer durante os tratamentos térmicos e termomecânicos desses aços, das quais a transformação da ferrita em austenita é a mais importante mudança estrutural durante o processamento à quente. Tal transformação dá-se através da nucleação e crescimento de estruturas austeníticas que tem forma acircular do tipo Widmanstätten, seguido da relação de orientação Kurdjumov-Sachs que são, portanto, coerentes com a matriz ferrítica (JORGE; REIS; BALANCIN, 2011).

2.2.4 Aços Inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação

Os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação foram criados com o objetivo de melhorar o comportamento dos aços inoxidáveis martensíticos, principalmente a tenacidade à fratura aumentando ao mesmo tempo a resistência a corrosão. Eles são classificados com base na microestrutura que possuem no tratamento térmico de recozimento, sendo divididos em martensíticos, semi-austeníticos e austeníticos (BONIARDI; CASAROLI, 2014).

A composição química destes aços possui variações de cromo de 12 a 17% em peso, níquel de 4 a 8% em peso, molibdênio de 0 a 2% em peso, com adição de outros elementos, permite o endurecimento da martensita de baixo carbono pela precipitação de intermetálicos, formados principalmente por alumínio, cobre, nióbio e/ou titânio, através de tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento (MCGUIRE, 2008). Estes aços podem ser fabricados em um estado relativamente macio, e seguidamente endurecidos com muito pequena mudança dimensional.

Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação do tipo martensítico geralmente são recozidos em temperaturas entre 1030° C e 1060° C, sendo em seguida resfriados ao ar, apresentando uma microestrutura martensítica de baixo carbono, caracterizada por possuírem baixa dureza uma boa deformabilidade plástica a frio e boa usinabilidade (BONIARDI; CASAROLI, 2014).

Já os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação austeníticos, possuem um elevado teor de níquel em sua composição e, desta forma, apresentam uma estrutura completamente austenítica e muito estável mesmo após deformação plástica à frio. Seu tratamento de recozimento deve ser feito em temperaturas entre 970° C e 1050° C, sendo em seguida resfriados em água ou óleo e sendo envelhecido entre 650° C e 750° C (BONIARDI; CASAROLI, 2014).

2.3 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são considerados um tipo comum e importante dentro da família dos aços inoxidáveis, representam, em média, de 60 a 70% da produção mundial de aços inoxidáveis, sendo que os mesmos constituem a maior família dos aços inoxidáveis em número de ligas (CARBÓ, 2008). São ligas ferro-carbono-cromo-níquel que possuem elevada resistência à corrosão e podem ser subdivididos em cinco grupos: Cr-Mn, Cr-Ni, Cr-Ni-Mo, alta performance e resistentes a altas temperaturas (SILVA; MEI, 2010). Os aços inoxidáveis austeníticos mais comuns são os da série 300 que são, basicamente, ligas de Fe-Cr-Ni.

São materiais paramagnéticos e apresentam assim como o nome já descreve, após tratamento térmico, estrutura austenítica (CFC) em temperatura ambiente. Microestrutura essa provocada pelo alto teor de níquel, pois este elemento, além do manganês e nitrogênio, é estabilizador da fase austenita (SILVA; MEI, 2010). Além de servir de estabilizador da austenita, o níquel em teores elevados permite também aumentar os valores de resistência à corrosão. No entanto, a presença de níquel neste material, principalmente em percentuais elevados, causa uma variação no custo, já que o níquel é um dos mais onerosos elementos de liga, com uma alta flutuação no mercado.

Em função desta alta flutuação no mercado e onerosidade causada pela adição do níquel nas ligas de aços inoxidáveis austeníticos, pode-se substituir todo, ou ao menos parte do níquel por manganês ou nitrogênio. Desta forma, fazem parte do grupo dos aços inoxidáveis austeníticos as ligas da série 200 (201, 202 e 204). Alguns dos aços da série 200 foram desenvolvidos e utilizados durante a Segunda Guerra Mundial quando, devido à escassez de níquel, o manganês substituiu parte deste elemento utilizado em sua liga para obtenção dos mesmos.

Os aços inoxidáveis austeníticos tem muitas vantagens do ponto de vista metalúrgico, podendo serem feitos macio o suficiente (200 Mpa) para serem facilmente conformados com as mesmas ferramentas utilizadas no aço carbono, no entanto, eles também podem ficar muito resistentes através do trabalho a frio, atingindo até 2000 Mpa de resistência (MCGUIRE, 2008). Sendo esta ductilidade a principal característica responsável para estes aços serem amplamente empregados na fabricação de produtos por processos de conformação mecânica (DAVIS, 2000).

Estes materiais não podem ser endurecidos por tratamento térmico quando possuem um teor de carbono restrito, devido ao fato da austenita estar estabilizada pelo níquel e não mudar sua estrutura cristalina quando submetido a elevadas temperaturas, mas suas resistências a

tração e dureza podem ser aumentadas por encruamento. Em geral, possuem excelentes propriedades criogênicas, por não sofrerem transição dúctil-frágil, e boa resistência mecânica em altas e baixíssimas temperaturas (SILVA; MEI, 2010).

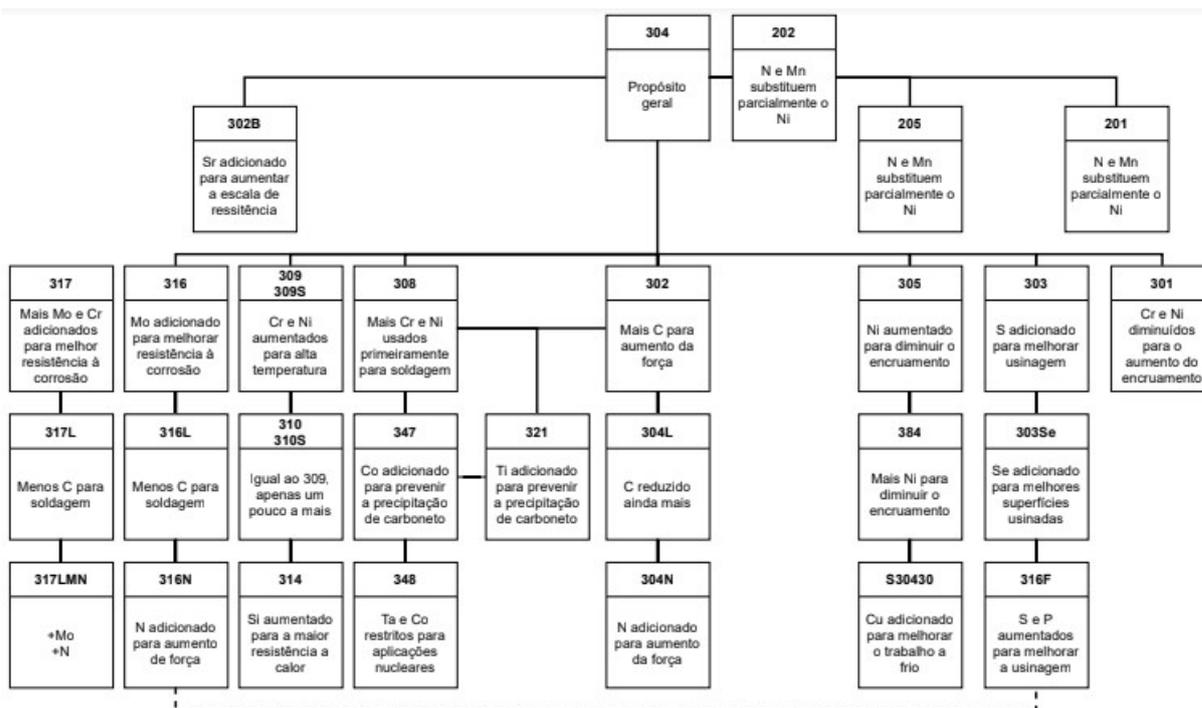
Estes aços possuem uma ampla faixa de composição química, na qual o cromo pode variar de 18 a 30% e níquel na faixa de 8 a 32%, com os teores de carbono em baixas concentrações, variando de 0,02 a 0,06%. Os aços inoxidáveis austeníticos com baixo teor de carbono, como o AISI 304L e 316L, foram criados para melhor desempenho na soldagem, pois diminuem a ocorrência da formação de carbonetos de cromo, sendo assim menos suscetíveis à sensitização (CAMPOS, 2019).

Assim, a classe austenítica é comumente a mais utilizada dentre os aços inoxidáveis, por fornecer níveis previsíveis de resistência a corrosão com excelentes propriedades mecânicas. Usando estes materiais com sabedoria, pode-se obter uma significativa economia nos custos dos produtos durante a fase de projetos. São ligas fáceis de usar e com custo do ciclo de vida de produtos fabricados totalmente menor do que muitos outros materiais.

Uma maneira bastante tradicional de apresentar os aços inoxidáveis é através de um diagrama conforme apresentado na

Figura 4. Diagramas como este tratam as ligas como uma evolução em uma espécie de árvore genealógica, trazendo como base o aço 302 (MCGUIRE, 2008).

Figura 4 - Família dos aços inoxidáveis austeníticos



Fonte: Adaptado de (MCGUIRE, 2008)

Muitas destas ligas foram empurradas para a obsolescência por causa dos avanços tecnológicos e de processamento. Desta forma, o 302 deu lugar ao 304 de baixo carbono (304L) em função deste ser menos suscetível a sensitização por resfriamento lento após solubilização ou forjamento, alívio de tensões na faixa de precipitação de carbonetos ou na soldagem. No entanto, outras classes ainda podem ser preferidas para aplicações especiais, caso do 321 utilizado na indústria aeroespacial e do tipo 347, utilizado em serviços de refinaria.

Na área médica os aços inoxidáveis austeníticos são empregados como material para fabricação de agulhas, pinos guia, retratores torácicos, placas de impressão odontológica e outros artefatos e instrumentos onde a facilidade de conformação é essencial. Tendo sido muito utilizado também como matéria prima para confecção de implantes humanos. Mesmo não sendo suficientemente resistentes à corrosão em implantes de longa duração, seu uso tem se tornado cada vez mais comum. Quando usados para implante, a passividade dos aços austeníticos à corrosão em meios agressivos pode ser aumentada por passivação por ácido nítrico antes da esterilização para a embalagem do implante fabricado (DAVIS, 2003).

Aço Inoxidável Austenítico AISI 316L

Os aços inoxidáveis austeníticos da classe 316 apresentam um teor de carbono máximo de 0,08%, o que favorece o processo de sensitização. Com a finalidade de mitigar a formação

de carbonetos de cromo neste material, a redução do teor de carbono é uma solução, obtendo-se assim o aço inoxidável austenítico 316L, o qual possui um teor máximo de carbono de 0,03% (DOERR et al., 2017; KUMAR; REDDY, 2013).

O aço inoxidável austenítico AISI 316L é amplamente utilizado na indústria metalmeccânica por sua excelente resistência à corrosão e conformabilidade. Apesar disso, sua aplicação é prejudicada pela sua relativamente baixa resistência mecânica (FENG et al., 2015).

As propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico AISI 316L são inferiores às do aço inoxidável austenítico AISI 316, vide Tabela 1, devido à redução do teor de carbono, que mesmo sendo benéfica para reduzir a sensibilização e melhorar sua soldabilidade, reduz os limites de escoamento e de resistência.

A exposição do aço AISI 316L a altas temperaturas por longos períodos pode ocasionar a formação de inúmeras fases deletérias, como a fase sigma por exemplo, que se nucleia nos contornos de grãos e pode ser encontrada nessas matérias após exposição dos mesmos a temperatura de 800°C por aproximadamente 100 horas (AYDOGDU; AYDINOL, 2006).

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos aços 316 e 316L

Tipo	σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	Alongamento mínimo na direção longitudinal (%)	Alongamento mínimo na direção transversal (%)
316	205	515	35	25
316L	170	485	35	25

Fonte: (ASTM A312/A3120M-17, 2017)

Dentre as aplicações mais importantes desse aço, pode-se destacar: válvulas, tubos, para-raios, equipamentos para indústrias químicas, petróleo e gás, farmacêuticas, papel e celulose, dentre outras.

2.4 Usinagem dos Materiais

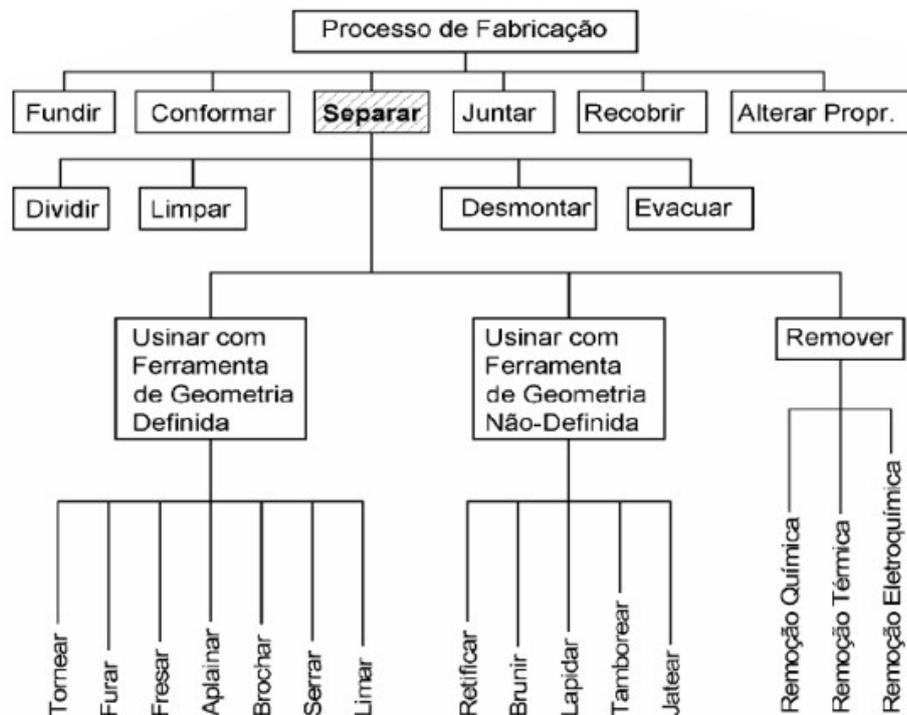
Dentre os processos de fabricação, existem diversos métodos que podem ser empregados para produzir um determinado produto. Diversos fatores devem ser levados em consideração para determinar qual método em particular será utilizado a cada etapa de uma rota de fabricação. É incontestável que a fabricação de um produto, podendo ser ele um parafuso,

um celular, um computador ou um veículo, requer também, além das noções de projeto, materiais e processos, vasta interação entre distintas áreas produtivas. A necessidade de interação cresce, conforme se eleva a complexidade do produto (MACHADO et al., 2015). A classificação dos processos de fabricação é mostrada na Figura 5.

Entre os mais variados processos usados para dar forma aos materiais, podemos destacar a usinagem, por englobar uma grande variação das grandezas de operação. Praticamente todos os metais e ligas podem ser usinados, apesar de suas características intrínsecas distintas, tais como: frágil ou dúctil, mole ou elevada dureza, produto fundido ou conformado, com alto ou baixo ponto de fusão. Além disso, também há possibilidade de variação no tamanho dos componentes, desde pequenos componentes para relógios até turbinas e asas de aviões com vários metros de comprimento podem ser usinadas (TRENT; WRIGHT, 2000).

O processo de usinagem é reconhecido como sendo o processo de fabricação mais popular do mundo, o qual transforma em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais, empregando dezenas de milhões de pessoas (TRENT; WRIGHT, 2000).

Figura 5 - Classificação dos processos de fabricação



Fonte: Adaptado de (DIN8580, 2003)

Segundo (FERRARESI, 2003), operações de usinagem são aquelas que, ao conferir à peça determinada forma, dimensões ou acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses

três itens, produzem cavaco. É definido como cavaco, a porção de material da peça retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular.

Machado et al. (2015) classificam os processos de usinagem como sendo convencionais e não convencionais, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação dos processos de usinagem

	Convencional		Não-convencional
	Geometria Definida	Geometria Não-Definida	
Processo de Usinagem	Torneamento	Retificação	Feixe de Elétrons
	Fresamento	Brunimento	Eletroquímica
	Furação	Lapidação	Eletroerosão
	Aplainamento	Lixamento	Jato D'água
	Serramento	Polimento	Química
	Brochamento	Jateamento	LASER
	Roscamento		Plasma
	Alargamento		Ultrassom
			Jato Abrasivo

Fonte: Adaptado de (MACHADO et al., 2015)

Os processos de usinagem convencionais são subdivididos entre processos com ferramentas de geometria definida e processos com ferramenta de geometria não definida.

Na usinagem com ferramentas de geometria definida (ângulos e dimensões devidamente especificados), as quais realizam a remoção de material por meio de corte e cisalhamento (ex. torneamento, fresamento e furação) (KLOCKE, 2011).

2.4.1 Torneamento

Segundo (FERRARESI, 2003), o torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo.

A operação de torneamento é o processo mais comum de usinagem podendo ser dividida em diversas aplicações básicas (faceamento, perfilamento ou torneamento longitudinal), entre outras operações, exigindo ferramentas específicas para cada ocasião. O torneamento utilizado no presente trabalho será o torneamento longitudinal, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea. Mais especificamente, o torneamento cilíndrico externo.

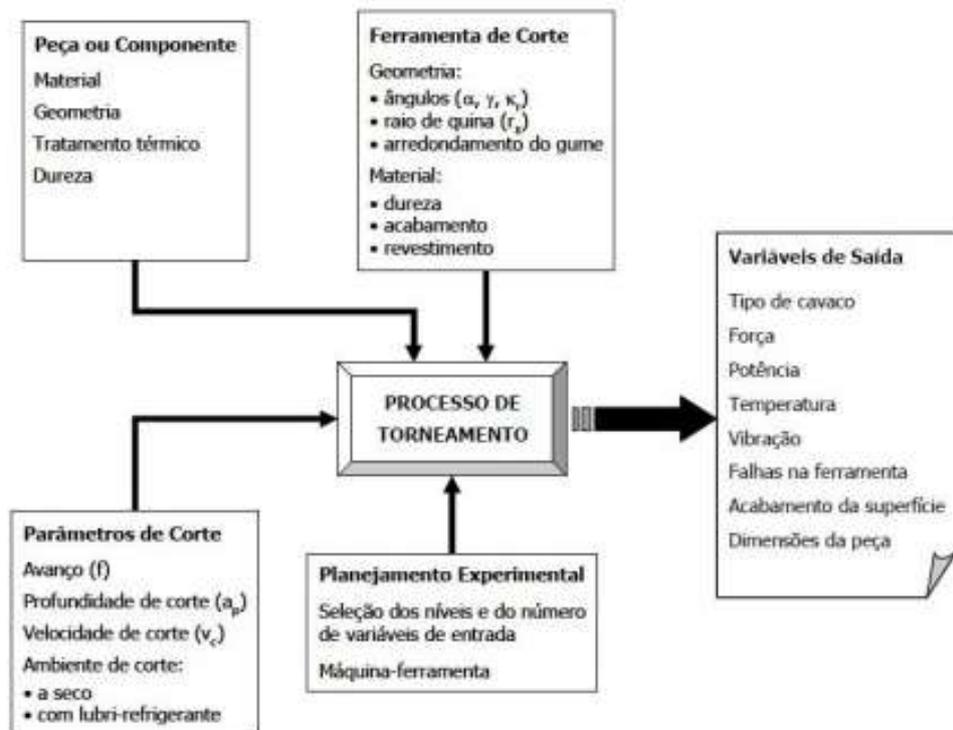
O resultado final do processo é basicamente dependente do material da peça e da ferramenta empregada na operação, no entanto, existem dois fatores que influenciam este

resultado, e que são determinados pelo operador, sendo eles os parâmetros de corte e a geometria da aresta de corte da ferramenta.

Os principais parâmetros de corte no torneamento são a velocidade de corte (V_c), que é a velocidade linear relativa entre a ponta da ferramenta e a peça em rotação, expressa normalmente em m/min. A profundidade de corte (a_p) sendo a profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho e o avanço (f), que é a distância percorrida pela ferramenta em cada revolução da peça. Tendo estes dois últimos seu valor expresso em mm (TRENT; WRIGHT, 2000).

Dentre as variáveis envolvidas no processo de torneamento, existem aquelas nas quais se pode intervir (variáveis independentes de entrada) e aquelas nas quais não se pode intervir (variáveis dependentes de saída), já que sofrem influência da mudança nas variáveis de entrada. Uma maneira de controlar o processo de usinagem é atuando diretamente nas variáveis independentes de entrada e mensurar seus efeitos através da verificação das variáveis dependentes de saída (LARA; FAVRETTO; POLLI, 2016). Na Figura 6 estão resumidas as relações entrada/saída associadas ao processo de torneamento.

Figura 6 - Variáveis de entrada e saída do processo de torneamento



Fonte: (LARA; FAVRETTO; POLLI, 2016)

O torneamento é o processo mais empregado para o estudo da usinabilidade. Este processo pode ser classificado em torneamento de desbaste ou acabamento (KLOCKE, 2011).

No desbaste é atingida uma alta taxa de remoção de material, geralmente sendo utilizadas baixas velocidades de corte e maiores avanços e profundidades de corte. Na operação de acabamento são empregadas maiores velocidades de corte, combinadas com menores avanços e profundidades de corte, tendo como resultado uma menor taxa de remoção de material (MACHADO et al., 2015). O objetivo principal da operação de acabamento é realizar o processo com um elevado nível de precisão e qualidade dimensional através de pequena remoção de cavaco (KLOCKE, 2011).

Ao realizar a operação de torneamento com aços inoxidáveis, é necessário seguir algumas recomendações como: utilizar máquina-ferramenta rígida, não usar um raio de quina maior que o necessário, empregar sempre ferramentas com gumes afiados, utilizar a ferramenta com a menor extensão possível, usar insertos de metal-duro revestidos com PVD e quebra cavaco positivo e aplicar sempre uma profundidade de corte maior que a profundidade da camada endurecida resultante de passes anteriores (IMOA, 2009).

2.4.2 Usinabilidade dos aços inoxidáveis

A usinabilidade pode ser definida como a facilidade ou a dificuldade de realizar diferentes operações ou técnicas de usinagem para um determinado material. Devido as complexas relações existentes nestes processos, não é possível avaliar as operações em termos de um único critério padronizado. A usinabilidade pode ser avaliada em função dos critérios de força de usinagem, vida de ferramenta, formação de cavacos, acabamento superficial, dentre outros (KLOCKE, 2011).

Além dos fatores associados às propriedades do material, a usinabilidade também é influenciada pela rigidez da máquina-ferramenta, características da ferramenta de corte, sistema de fixação da peça, condições de usinagem e do tipo de operação empregada (FERRARESI, 2003).

A usinabilidade não é uma propriedade do material, mas a maneira como este se comporta durante a usinagem em condições específicas. A usinabilidade de um material pode ser relativa quando se fala de uma ou de outra característica tomada como parâmetro para o material a ser trabalhado. Desta forma, um material pode ter um valor de usinabilidade baixa em certas condições de usinagem e um valor maior em outras condições de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Por causa da grande variedade de aços inoxidáveis disponíveis, uma caracterização simples de sua usinabilidade pode ser um tanto quanto imprecisa. A usinabilidade de aços inoxidáveis varia de baixa a muito alta, dependendo da escolha final da liga. No entanto, de modo geral, os aços inoxidáveis são considerados de difícil usinagem, principalmente os austeníticos, pelo alto grau de encruamento, os duplex e superduplex, pela alta resistência e os martensíticos e supermartensíticos, pela elevada dureza, devido à presença de martensita e de partículas duras e abrasivas de carboneto de cromo, exige maiores esforços de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Segundo (ASM, 1995), os aços inoxidáveis caracterizam-se por um comportamento “pastoso” durante o corte, mostrando uma tendência de formar cavacos longos e flexíveis, com aderência de material à ferramenta, o que leva ao desenvolvimento da aresta postiça de corte, além de tornar difícil a remoção dos mesmos; isto pode resultar em redução da vida da ferramenta e acabamento superficial insatisfatório.

Os aços inoxidáveis austeníticos possuem algumas características que exercem grande influência em sua usinabilidade (MACHADO et al., 2015; TRENT; WRIGHT, 2000).

- Alta taxa de encruamento;

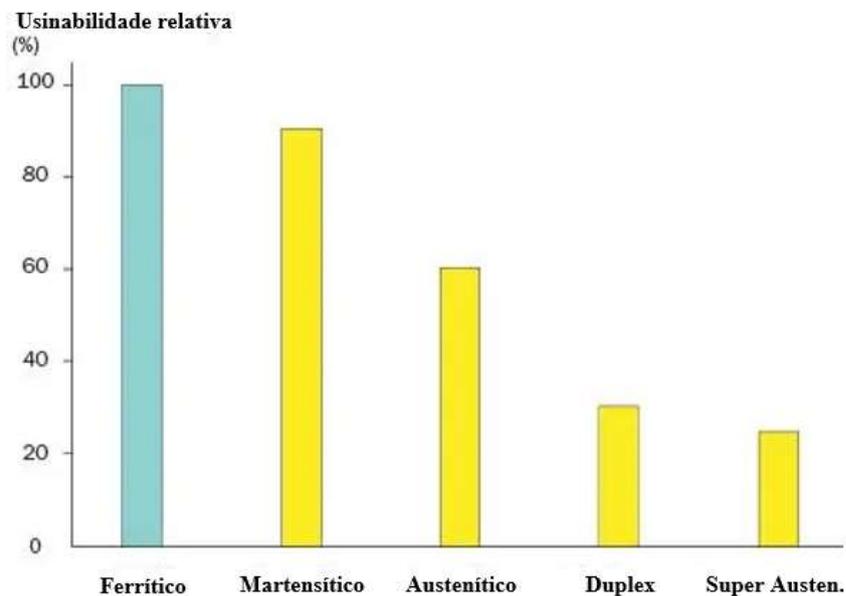
- Elevada ductilidade;
- Elevada resistência à fratura (tenacidade);
- Baixa condutividade térmica;
- Altos valores de resistência mecânica;
- Tendência à formação de arestas postiças de corte.

Essa combinação de características do material resulta em elevadas forças de usinagem, altas temperaturas, difícil retirada de calor da zona de corte, aumento no desgaste e suscetibilidade ao desgaste por entalhe, dificuldades de quebra do cavaco, formação de rebarbas acentuadas e pobre acabamento da superfície usinada.

A usinagem dos aços inoxidáveis, em geral, é mais difícil que a dos aços carbono comuns, sendo que os ferríticos e martensíticos apresentam uma melhor usinabilidade em relação aos austeníticos e duplex (CHIAVERINI, 1979; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014) conforme pode ser observado na

Figura 7.

Figura 7 - Desempenho comparativo na usinagem das principais classes de aços inoxidáveis



Fonte: Adaptado de (SANDVIK COROMANT, 2010)

O emprego de técnicas de lubrificação e refrigeração podem melhorar a usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos, sendo que esta técnica resulta em uma usinagem mais fácil, com menor tendência à formação de aresta postiça (ASM, 1995).

Outra alternativa para melhorar a usinabilidade dos aços inoxidáveis é a adição de elementos de liga que formam inclusões frágeis, reduzindo a ductilidade promovendo a quebra do cavaco. Geralmente o elemento mais empregado é o enxofre (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014; MACHADO et al., 2015). Adições de telúrio e selênio também melhoram a usinabilidade, porém provocam quedas em outras propriedades, produzindo efeitos secundários indesejáveis (CHIAVERINI, 1979; MACHADO et al., 2015).

2.4.3 Geometria da Ferramenta e a Rugosidade da Peça

A geometria da ferramenta de corte exerce ampla influência no desempenho da usinagem e na vida da própria ferramenta. O material da ferramenta pode ser o melhor possível, se a sua geometria não for preparada adequadamente, não haverá êxito na operação. Existem características e dimensões específicas que precisam ser formadas com máxima precisão para promover o corte com eficiência. O raio de quina, ângulo de incidência, a união entre ambos e suas faces ou mesmo o gume primário e secundário são exemplos de elementos críticos da ferramenta (TRENT; WRIGHT, 2000).

De acordo com (GAMARRA, 2017), diversos elementos constituintes da geometria das ferramentas de corte podem ser modificados visando otimizar seu desempenho. Pode haver uma combinação dos seguintes elementos da cunha cortante: raio de ponta, ângulo de saída, ângulo de inclinação, ângulo de folga, ângulo de posição, quebra-cavaco, chanfro da aresta de corte, entre outros.

O ângulo de folga (α) possui a função de evitar o atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, variando normalmente de 5° a 20° . Quando α é muito elevado, a cunha da ferramenta perde resistência, podendo soltar pequenas lascas ou até mesmo quebrar. No entanto, quando α é muito pequeno, a cunha da ferramenta não penetra adequadamente na peça, neste caso a ferramenta perderá sua afiação rapidamente, em função da elevada temperatura gerada, prejudicando ainda o acabamento da peça (MACHADO et al., 2015).

O ângulo de cunha da ferramenta (β) tem como principal função aumentar a resistência mecânica da ferramenta, tendo em vista que durante o processo de usinagem é exercida uma maior pressão próximo à aresta de corte, fazendo com que uma cunha menos aguda seja empregada. Quanto maior for β , maior a resistência da ferramenta de corte e maior a área para dissipação do calor, uma vez que na região próxima à aresta tem-se ainda o maior aquecimento (SOUZA, 2011).

O raio de ponta da pastilha (r_ϵ) é um fator de extrema importância nas operações de usinagem, sua escolha depende do avanço (f) e da profundidade de corte (a_p) empregadas. A escolha destes dois parâmetros tem influência direta nos resultados da resistência da pastilha, formação e controle de cavacos e do acabamento superficial obtido. Segundo (KLOCKE, 2001), o aumento do raio de ponta da ferramenta promove um aumento na força de usinagem.

A relação existente entre raio de ponta e avanço tem uma grande influência no acabamento das superfícies. Enquanto que por um lado, um grande raio de ponta diminui a rugosidade pela diminuição da contribuição geométrica, por outro lado, pode gerar um aumento na rugosidade em razão do aumento da vibração que é gerada devido ao aumento da força de corte radial, além do aumento do atrito causado pela maior área de contato entre a ferramenta e a peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

2.5 Integridade da Superfície

No início da década de 1960, profundas investigações foram motivadas em função da falha prematura de algumas peças. Como o projeto e a matéria prima utilizada não apresentavam erros, o foco das investigações foi o processo de fabricação. Foi constatado que alterações na camada superficial e em camadas subsuperficiais da ordem de grandeza de micrometros podem reduzir a resistência a fadiga do componente. Desde então, surgiu a linha de pesquisa intitulada de “integridade superficial” (SANTOS; SALES, 2007).

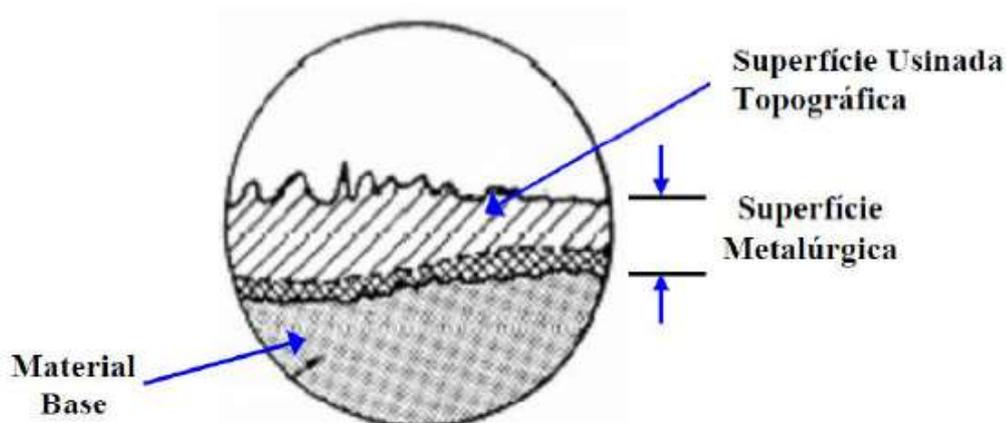
A integridade superficial é a soma de todos os elementos que descrevem as condições existentes sobre a superfície de uma peça acabada (TISHLER, 1970). De maneira geral, esta integridade da superfície pode ser dividida em dois aspectos: o primeiro que aborda a topografia da superfície e descreve a rugosidade e textura da camada mais externa da peça, a sua interface com o ambiente e o segundo que aborda a metalurgia, microestrutura, propriedades mecânicas e tensões residuais da região imediatamente abaixo da superfície (DAVIM, 2010; TISHLER, 1970). A Figura 8 ilustra a topografia e a metalurgia da superfície.

Existe uma grande variedade de modelos de ferramentas de corte, com diferentes materiais, geometrias e coberturas. Cada processo de remoção de metal produz uma alteração superficial característica. Tais alterações podem modificar as propriedades das camadas superficiais sem modificar as propriedades do interior do material, podendo ela ser extensa e profunda ou superficial e rasa.

Utilizamos a expressão integridade superficial para caracterizar as condições e a qualidade das superfícies usinadas, decorrência da combinação dos processos de recuperação

elástica, deformação plástica, propagação de trincas, geração de calor, tensões residuais, vibrações e, muitas vezes, reações químicas, e forma de energia utilizada na remoção do cavaco. (POLLY, 2019). A ação de todos esses mecanismos, seja em conjunto ou não, pode ter efeitos diferentes na nova superfície. Desta forma, o termo integridade superficial é usado para caracterizar a qualidade de uma superfície, e abrange um grande número de alterações sofridas por ela.

Figura 8 - Camadas da integridade superficial



Fonte: Adaptado de (TISHLER, 1970)

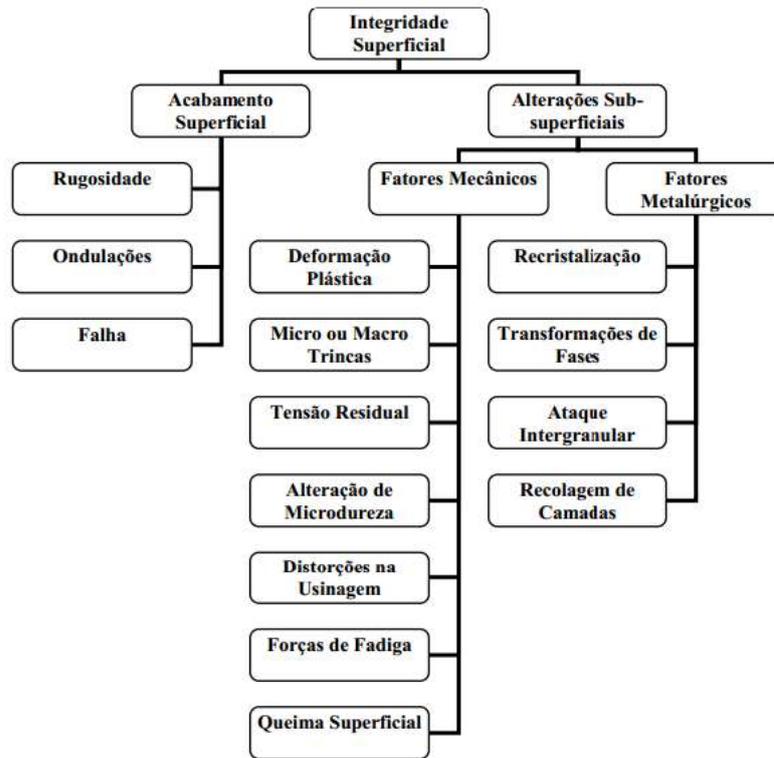
Segundo (DAVIM, 2010), para a engenharia, a integridade da superfície pode ser estabelecida como um conjunto de propriedades que abrange tanto a superfície quanto a camada abaixo da superfície, a fim de garantir segurança, confiabilidade, longevidade e desempenho da superfície. No diagrama da Figura 9, são apresentadas as possíveis alterações superficiais que podem ocorrer em superfícies usinadas e uma classificação destas.

Neste contexto, o acabamento superficial corresponde aos aspectos geométricos da superfície (rugosidade, ondulações, marcas e falhas), à medida que as alterações subsuperficiais abordam fatores mecânicos (deformação plástica, alteração de microdureza, micro ou macro trincas e tensões residuais), metalúrgicos (recristalização e transformações de fases) e químicos (adsorção, oxidação) da camada limite (ROSA, 2017).

Parâmetro de saída de fácil constatação, o acabamento superficial, reflete as alterações no processo de usinagem, particularmente, mudanças na composição química da matéria-prima, desgaste excessivo da ferramenta de corte, escolha de parâmetros inadequados e instabilidades na máquina (SANTOS; SALES, 2007). O acabamento da superfície usinada pode ser

considerado a “impressão digital do processo de fabricação” estando ligada diretamente com a função que o componente irá desempenhar.

Figura 9 - Alterações superficiais em superfícies usinadas



Fonte: Adaptado de (MACHADO et al., 2015)

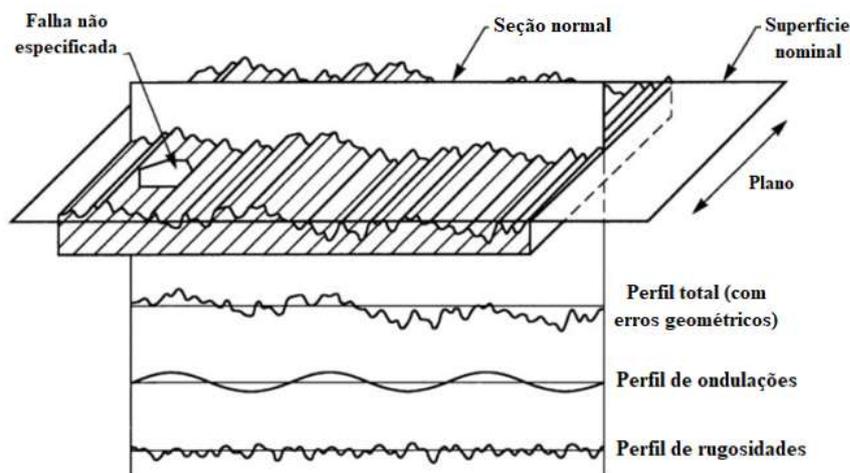
Desta forma, o acabamento superficial normalmente é utilizado como principal parâmetro de medida de desempenho do processo de usinagem e controle da qualidade de uma superfície. São estabelecidos três níveis para as características de acabamento (falhas, ondulação e rugosidade) conforme se apresentam as irregularidades.

As falhas são consideradas as interrupções na topografia típica de uma superfície, ondulações são irregularidades superficiais ou erros geométricos maiores que as irregularidades consideradas rugosidade e a rugosidade são irregularidades finas ou erros microgeométricos, menores que aqueles considerados como ondulações, resultantes da ação de processos de fabricação (MACHADO et al., 2015). Essas questões são exibidas visualmente na

Figura 10.

Existem vários princípios de medição, instrumentos e métodos para analisar o acabamento superficial, e também inúmeros parâmetros que descrevem a macro e microgeometria da superfície. Destes aspectos geométricos, podemos destacar a rugosidade, que em muitos processos de usinagem é usada como parâmetro de saída do processo produtivo.

Figura 10 - Fatores superficiais - ondulações, falhas e rugosidade



Fonte: Adaptado de (ASME, 2009)

2.5.1 Rugosidade da Superfície Usinada

No processo de fabricação de uma superfície, normalmente, ondulações e falhas devem ser evitadas, pois são considerados erros de fabricação. Em contra partida, a rugosidade é um parâmetro especificado, de acordo com a aplicação da peça. Baixos valores de rugosidade são adequadas para mancais, superfícies de escoamento de fluidos e gases, superfícies reflexivas e estética e aplicação de pintura (MACHADO et al., 2015).

A rugosidade consiste em irregularidades finas ou em erros microgeométricos que resultam da ação de vários fatores simultâneos que podem ocorrer em processos de usinagem, é constituída por sulcos ou marcas oriundas do processo, tais como, marcas de avanço, partículas abrasivas, aresta postiça de corte, defeitos do material e desgaste da ferramenta (MACHADO et al., 2015). No torneamento, a rugosidade é afetada pelas condições da máquina, propriedades do material da peça, fixação da ferramenta, deformação e fluxo lateral do cavaco, avanço e raio de ponta. No entanto, o processo possui uma influência maior que a máquina (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

A avaliação da rugosidade de uma superfície é muito importante na análise e resolução de vários problemas fundamentais, como atrito, deformação de contato, aderência de revestimentos, resistência a corrosão e ao desgaste, condução de calor e corrente elétrica, estanqueidade de juntas de contato e precisão posicional (TAVARES, 2012).

Atualmente existe um grande número de parâmetros relacionados a rugosidade que são adotados por normas internacionais, fato que é atribuído à forma usualmente complexa dos perfis das superfícies. A rugosidade 2D de uma superfície usinada normalmente é classificada

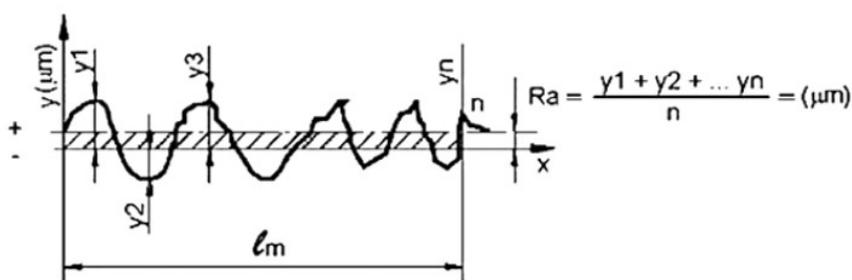
de acordo com a sua funcionalidade em parâmetros de amplitude, espaçamento e híbridos. Os mais importantes na caracterização da topografia da superfície são os parâmetros de amplitude, sendo usados na medição de características verticais de desvios (GALDEMAWLA et al., 2002).

Os parâmetros de amplitude avaliam o comportamento do perfil da superfície mediante as profundidades dos vales ou pelas alturas dos picos, ou ainda pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície. Entre os parâmetros de amplitude mais utilizados estão:

- R_a : altura média aritmética

A rugosidade “ R_a ” é o desvio médio absoluto das irregularidades de rugosidade da linha média do perfil primário ao longo do comprimento de medição (l_m), conforme representado na Figura 11. De acordo com a norma (ABNT NBR ISO 4287, 2002), o comprimento de amostragem (l_e) – chamado também de *cutoff* – é o comprimento na direção x usado para identificar as irregularidades características do perfil de avaliação, enquanto que o comprimento de medição (l_m) é definido como sendo o comprimento na direção x usado para estabelecer o perfil de avaliação e pode conter um ou mais comprimentos de amostragem. Para se obter uma maior confiabilidade dos dados, é recomendado usar $l_m = 5.l_e$.

Figura 11 - Rugosidade média “ R_a ”



Fonte: Adaptado de (SÓRIA, 2016)

Também conhecido como rugosidade média, por ser de fácil definição e medição, este é o parâmetro de rugosidade mais utilizado para controle geral da qualidade, pode ser usado no controle contínuo da rugosidade nas linhas de produção em superfícies que apresentam sulcos de usinagem bem orientados e peças destinadas para fins estéticos.

Para (MACHADO et al., 2015), o parâmetro R_a pode ser obtido teoricamente através de cálculo, que resulta na menor rugosidade possível que se pode atingir durante a usinagem. No entanto, o valor calculado é apenas indicativo, em razão de que os resultados reais são influenciados também por diversos outros fatores como vibração e desgaste da ferramenta. Para processos de torneamento, a rugosidade média teórica R_a -th pode ser calculada em função do raio de ponta da ferramenta ($r\epsilon$) e do avanço (f) através da Equação 2.1.

$$Ra = 41,66 \cdot \left(\frac{f^2}{r}\right) \quad (2.1)$$

- *R_p: altura máxima do pico do perfil de rugosidade*

Este parâmetro equivale à altura máxima do pico de rugosidade, ou seja, o valor entre a linha de referência até o pico mais elevado dentro do perfil de rugosidade analisado. Parâmetro utilizado na mensuração de R_t .

- *R_v: profundidade máxima do vale do perfil de rugosidade*

O R_v informa o valor máximo entre a linha de referência e o vale mais profundo do perfil de rugosidade. O parâmetro “ R_v ” tem se mostrado importante, pois indica a capacidade da superfície de reter óleo em determinadas aplicações ou pode ser relacionada com a resistência mecânica em estruturas sob grandes níveis de tensão (DAVIM, 2010).

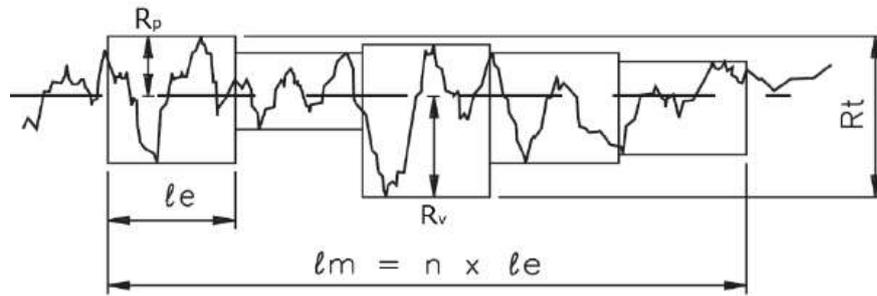
- *R_t/R_{tmax}: altura máxima do perfil*

Este parâmetro é muito sensível aos picos ou vales profundos. Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo encontrado ao longo do comprimento de medição (l_m).

Aplicado em superfícies de vedação, superfícies carregadas dinamicamente e superfícies de deslizamento onde o perfil efetivo é periódico (MARQUES, 2012). A

Figura 12 ilustra os parâmetros R_p , R_v e R_t .

Figura 12 - Definição dos parâmetros “Rp, Rv e Rt”

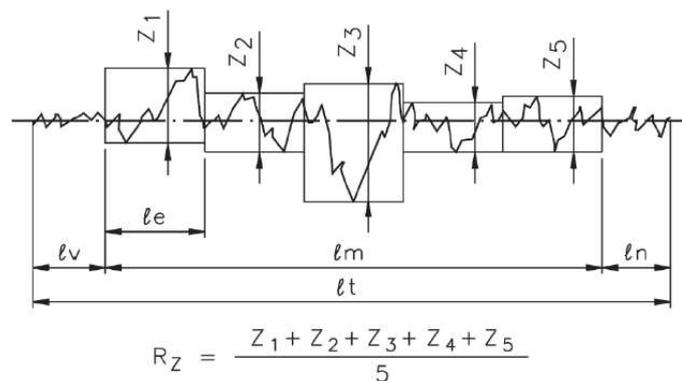


Fonte: Adaptado de (TAVARES, 2012)

- *Rz: média do pico ao vale do perfil de rugosidade*

É obtido através da média aritmética dos “i” valores de rugosidade parcial (Z_i). Sendo (Z_i) o valor absoluto da ordenada do ponto de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existente em cada comprimento de amostragem (l_e) conforme Figura 13. Este parâmetro suaviza grandes desvios que não sejam representativos para o perfil de rugosidade. Seu uso é recomendado nos casos onde pontos isolados não influenciam na função da peça a ser controlada.

Figura 13 - Definição do parâmetro "Rz"



Fonte: Adaptado de (TAVARES, 2012)

(PANDA; DAS; DHUPAL, 2017), avaliaram a influência da velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e raio de ponta da ferramenta na rugosidade média (R_a) gerada no torneamento do aço AISI 4340 endurecido usando ferramentas de cerâmica mista. Os resultados mostraram que o raio de ponta foi o parâmetro de maior influência sobre R_a , seguido pelo avanço. Foi verificado também que a rugosidade média aumentou de forma constante com o crescimento do desgaste da ferramenta.

2.5.2 Tensões Residuais

Define-se como tensões residuais aquelas que permanecem atuando no material ou componente após este ter sido processado ou fabricado, na ausência de gradientes térmicos ou de forças externas. As tensões residuais estão em equilíbrio para o corpo como um todo, ou seja, a soma das forças e momentos resultantes destas tensões tem que ser zero. Estas tensões são auto equilibrantes, o que significa que qualquer perturbação como aplicação de carregamentos mecânicos ou térmicos, ou ainda a remoção de material, altera o seu estado e causa sua redistribuição com finalidade de reestabelecer o equilíbrio das tensões novamente.

O desempenho dos materiais, em componentes mecânicos, pode ser modificado de forma significativa com a presença de tensões residuais, como por exemplo, a capacidade dos elementos de suportar cargas externas. Na Figura 14 estão ilustradas algumas propriedades que podem ser influenciadas pelas modificações nas tensões residuais.

Figura 14 - Efeito das tensões residuais nas propriedades dos materiais



Fonte: Adaptado de (LU, 2002)

As tensões residuais podem ser introduzidas nos materiais propositalmente ou de forma não intencional durante os diversos processos de fabricação, como por exemplo nas operações de conformação mecânica de forjamento, trefilação, laminação, dobramento, tratamentos térmicos, soldagem e nos processos mecânicos de usinagem ou jateamento de partículas, dentre outros (CARVALHO FILHO, 2015). As tensões residuais podem acelerar ou frear o início da deformação plástica, elas podem ser de extrema importância no desempenho dos materiais, quando aplicadas de forma intencional e controlada, como nos processos de shot peening.

Tensões residuais trativas superficiais em um material, ao serem somadas às tensões de serviço, podem acarretar em nucleação e propagação de trincas, levando o componente à ruptura prematura, em contrapartida, as tensões residuais compressivas aumentam a resistência à corrosão sob tensão e favorecem a vida longa em fadiga. O estado de tensões residuais presente nas camadas superficiais do material possui significativa influência na resistência mecânica dos materiais metálicos (SOUZA, 2017).

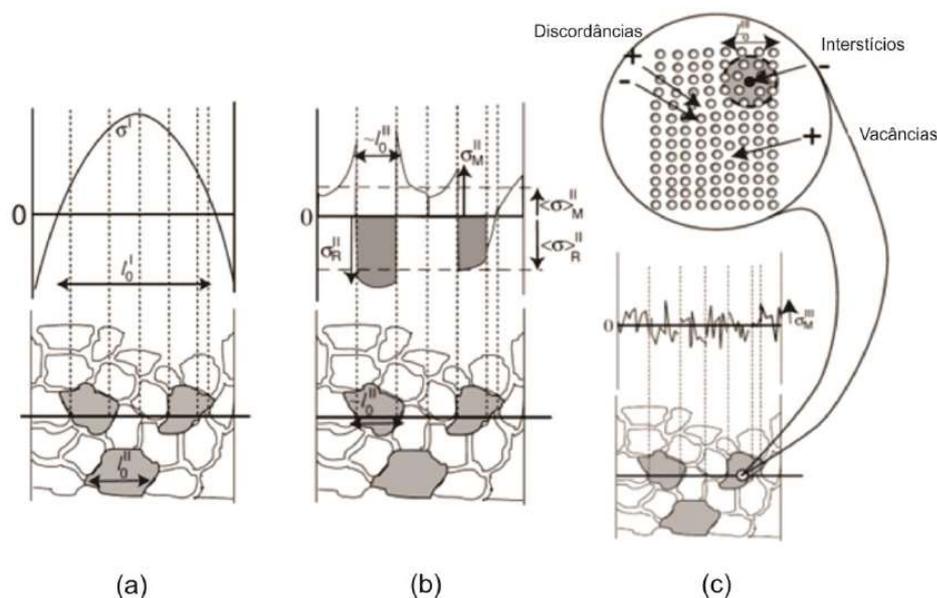
As tensões residuais podem existir em diferentes escalas, dando a estas, características e nomenclaturas diferentes, sendo macroscópica, microscópica e submicroscópica.

As tensões macroscópicas (tipo I), denominadas também como macrotensões residuais, são provenientes de condições ou fontes mecânicas, térmicas ou químicas, são distribuídas em larga escala e atuam em grandes volumes ou porções do material quando comparadas ao tamanho de grão. Por serem tensões de grandes porções, podem causar instabilidade dimensional nos componentes. Tensões microscópicas (tipo II), também conhecidas como tensões microestruturais, são aquelas que atuam entre os grãos dos materiais, encontram-se presentes em materiais policristalinos, são ocasionadas pelas heterogeneidades no retículo cristalino, materiais com fases diferentes e ou tamanho de grãos diferentes. Enquanto que as tensões submicroscópicas (tipo III) ou tensões microlocalizadas, são consideradas aquelas tensões que atuam na escala atômica, abrangendo a porção de um grão. Ocorrem em regiões com defeitos cristalinos como, átomos intersticiais, substitucionais, impurezas, vacância ou falhas de empilhamento, dentre outros, causando distorções no parâmetro de rede do cristal (CARVALHO FILHO, 2015). A Figura 15 ilustra esquematicamente como os diferentes níveis de tensão atuam no interior do material.

As tensões residuais do tipo II e III, consideradas as micro e submicrotensões, não podem ser evitadas em materiais policristalinos, sendo estas as mais importantes para o comportamento microestrutural, enquanto que as tensões residuais do tipo I são consideradas fundamentais para projetos mecânicos e estruturais.

Dentre os processos de fabricação, a usinagem pode imprimir tensões residuais nas camadas superficiais da peça, sendo estas tensões um fator de primordial influência sobre a integridade superficial de um componente usinado. As tensões residuais na superfície do componente podem ser geradas pela ação das variações térmicas, das transformações microestruturais e deformações inerentes ao corte durante as operações de usinagem, como torneamento, fresamento e retificação. De uma maneira geral, o processo de torneamento induz tensões residuais de tração (NASCIMENTO, 2016).

Figura 15 - Tensões residuais: (a) macroscópicas; (b) microscópicas; (c) submicroscópicas



Fonte: Adaptado de (HUTCHINGS et al., 2005)

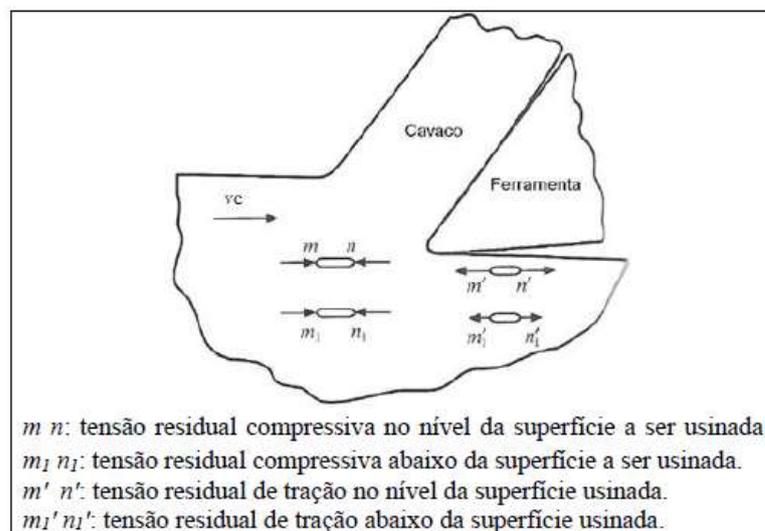
A origem das tensões na superfície de um material dúctil durante a usinagem pode ser descrita conforme ilustrado na Figura 16. Verifica-se que os elementos $m n$ e $m_1 n_1$ de um material dúctil no nível da superfície a ser usinada estão sujeitos à tensão compressiva antes de ser alcançados pela aresta de corte. Assim que a ponta da ferramenta passar por esta superfície, é liberada uma grande quantidade de energia de deformação armazenada no elemento $m' n'$. Sendo esta energia suficientemente alta (alta velocidade de corte e grandes espessuras de corte), com a passagem da aresta de corte, a expansão de $m' n'$ pode exceder a tensão de escoamento, resultando em tensão residual de tração. Com o aumento da profundidade abaixo da superfície usinada, diminui a tensão de tração dos elementos $m'_1 n'_1$ e $m' n'$ (SANTOS, 2019; SHAW, 2005).

As propriedades mecânicas do material podem influenciar o nível de tensões residuais, ou seja, de modo geral, materiais que possuem propriedades mecânicas mais elevadas, terão também uma elevação nos níveis de tensões residuais. Além disso, o aumento nas tensões residuais em virtude de incremento nos parâmetros de corte não depende do material que está sendo usinado, no entanto, a magnitude do aumento está intimamente relacionada às propriedades mecânicas deste material. No processo de usinagem, os principais mecanismos de formação de tensões residuais são os efeitos térmicos associados aos gradientes de temperatura e os efeitos mecânicos associados as deformações plásticas (NASCIMENTO, 2016).

As técnicas de medição de tensões residuais são classificadas de acordo com o dano introduzido no material em: destrutivos, semidestruativos e não destrutivos. As técnicas

destrutivas comprometem a integridade do material, já que é necessário a utilização total do material para obtenção de dados relativos a tensões residuais, como principais técnicas podemos citar o seccionamento e a deflexão.

Figura 16 - Tensões nas superfícies do metal antes e após a passagem da ponta da ferramenta



Fonte: (SANTOS, 2019)

As técnicas semidestrutivas, como a técnica do furo cego e da remoção de camadas por exemplo, causam algum dano no componente, sendo que de modo geral compromete sua integridade ou operação, com exceção para peças estruturais muito grandes, como pontes por exemplo. As técnicas não destrutivas não requerem remoção de partes do componente, não comprometendo assim a sua integridade, pois se baseiam nas variações de parâmetros físicos ou cristalográficos do material analisado, relacionando com as tensões residuais que ocasionam essas alterações. São exemplos de técnicas potencialmente não destrutivas o ultrassom, magnético, difração de nêutrons e difração de raios-X (SOUZA, 2017).

A escolha da técnica a ser empregada deve levar em consideração, além da classificação acima, o local onde será realizada a medida, o tempo disponível para a medida e apresentação dos resultados, a geometria do componente, a precisão e repetitividade do método, custo final da medida, dentre outras variáveis (LU, 1996).

Além de ser uma técnica de caráter não destrutiva, a difração de raios-X, possui excelente grau de confiabilidade, avalia cada fase individualmente e possibilita obter as tensões residuais em diferentes níveis, podendo estas ser macro ou micro, o que potencializa o uso da mesma. Sua limitação está relacionada à quantidade de microconstituintes e fases precipitadas, as quais devem possuir concentrações superiores a 3% em volume na microestrutura (MACHADO, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo descrever os materiais, o planejamento experimental, as técnicas de caracterização, bem como os equipamentos e adotados ao longo da realização deste trabalho. O procedimento experimental está baseado no estudo do comportamento da integridade superficial do aço inoxidável austenítico AISI 316L submetido a operação de torneamento com diferentes parâmetros de usinagem.

A primeira etapa está pautada na caracterização do aço AISI 316 L por meio de análise microestrutural, química e de ensaios mecânicos. A segunda etapa compreende os testes de torneamento sem uso de fluido de corte, utilizando diferentes velocidades de corte, velocidade de avanço e raio de quina da ferramenta de corte.

Os testes de torneamento e análise da rugosidade superficial gerada foram realizados no Laboratório de Usinagem e Automação do IFSC campus Chapecó/SC, assim como a análise microestrutural do material que foi realizada no Laboratório de Materiais da mesma instituição. Os ensaios de dureza Vickers foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do IFSC campus Araranguá/SC. Para finalizar, os testes para análise de tensões residuais foram realizados no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS.

3.2 Materiais

3.2.1 – Corpos de Prova

Como material para os corpos de prova utilizou-se neste trabalho o aço inoxidável austenítico (AISI) da classe 316L, produzido pelo processo de laminação e normalmente encontrado e conhecido no mercado como aço inoxidável austenítico com baixo teor de carbono. O material foi adquirido na forma de barras laminadas descascadas com diâmetro de 25,4 mm, sendo os corpos de prova cortados em tamanhos iguais, tendo eles comprimento de 200mm.

3.2.2 – Ferramentas de Corte

As ferramentas de corte utilizadas nos ensaios de torneamento foram insertos de metal duro da marca Sandvik Coromant R-K 2035 (correspondente à classe ISO M20), possuindo quebra-cavacos com ângulo de saída positivo e cobertura PVD (do inglês *Physical Vapor Deposition*) de TiAlN+TiN. Estes insertos apresentam geometria ISO TNMG 16 04 04 e TNMG 16 04 08, recomendadas pelo fabricante para usinagens médias, os quais foram montados em um porta-ferramenta SANDVIK código MTJNR 2020K 16M1.

Estes insertos são recomendados pelo fabricante para a usinagem do material utilizado neste trabalho, assim como as condições de corte empregadas. A Tabela 3, exibe as especificações indicadas pelo fabricante para os insertos empregados, necessárias para estipular os parâmetros aplicados no experimento.

Tabela 3 – Parâmetros de corte recomendados pelo fabricante das ferramentas

Especificação do inserto ISO	Parâmetros de corte		
	v_c [m/min]	f_n [mm/volta]	a_p [mm]
TNMG 16 04 04R-K 2035	170 (145 - 195)	0,22 (0,14 - 0,30)	2,5 (0,7 - 5,0)
TNMG 16 04 08R-K 2035	145 (110 - 195)	0,30 (0,14 - 0,50)	3,0 (0,8 - 5,0)

Fonte: Autoria própria

3.3 Metodologia

As atividades foram desenvolvidas em duas etapas, sendo que inicialmente foi realizada a primeira etapa, que trata da caracterização do aço inoxidável austenítico AISI 316L, tratando de verificar a análise da microestrutura, análise química e de propriedades mecânicas. Na sequência foi realizada a segunda etapa, que trata dos ensaios de torneamento com os diferentes parâmetros de corte, realizadas as medições de rugosidade (parâmetros Ra e Rz), verificação da microestrutura superficial resultante, análise do perfil de dureza e medição das tensões residuais.

3.3.1 – Primeira etapa: caracterização do aço AISI

O embutimento das amostras foi realizado a frio, com a utilização de resina acrílica e líquido polimerizante. A mistura destas duas substâncias forma um líquido viscoso que deve ser vazado dentro de um molde plástico no qual se encontra a amostra, sendo que sua polimerização pode ocorrer após um período que varia de 10 minutos a 24 horas, dependendo do tipo de resina empregada e da proporção de líquido polimerizante e resina utilizada na mistura.

A preparação das amostras que foram analisadas microestruturalmente foi realizada através da técnica de lixamento manual e úmida, a qual consiste em lixar as amostras sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se a direção em 90° a cada lixa subsequente até as marcas da lixa anterior desaparecerem. Foram utilizadas as lixas de 80, 120, 160, 220, 320, 400, 600, 800, 1200 e 2000 mesh, seguindo para o procedimento de polimento mecânico utilizando alumina com grãos granulometria de 3 µm.

Para revelar homogeneamente a microestrutura e os contornos de grão, as amostras foram submetidas ao ataque eletroquímico em solução com concentração volumétrica de 60% de HNO₃ em H₂O, por um tempo de 120 segundos com passagem de corrente e tensão, após o ataque as amostras foram enxaguadas em água corrente, efetuada limpeza com álcool etílico e posterior secagem através de jato de ar quente e levadas ao microscópio para análise. Para a aquisição das imagens da microestrutura foi utilizado um microscópio óptico.

3.3.1.1 – Composição Química

A composição química do material utilizado é apresentada na Tabela 4, de acordo com certificado de garantia fornecido juntamente com o material. Através desta tabela podemos confirmar que tratasse de um aço inoxidável austenítico pertencente a classe AISI 316L, pois a composição química do mesmo está de acordo com as especificações estabelecidas na norma (ABNT NBR 5601, 2011).

Tabela 4 - Composição química do aço inoxidável AISI 316L (% em peso)

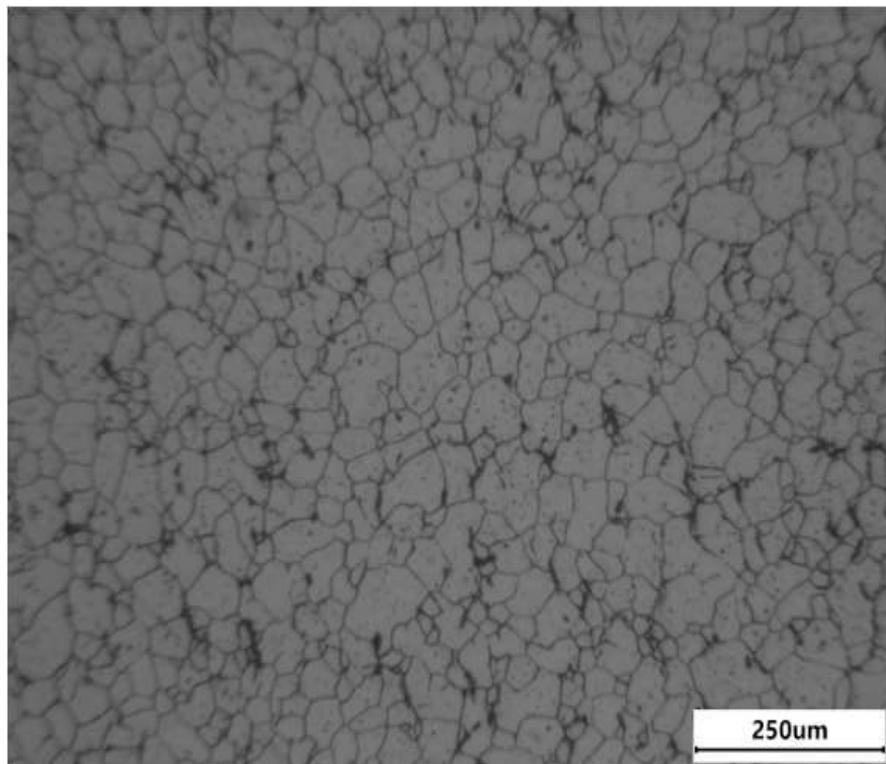
AISI 316 L	Cr	Ni	Mo	C	Mn	P	S	Si	Fe
Norma	16,00 - 18,00	10,00 - 14,00	2,00 - 3,00	máx. 0,03	máx. 2,00	máx. 0,045	máx. 0,030	máx. 0,75	Balanço
Amostra	16,97	10,66	2,19	0,017	1,46	0,03	0,026	0,34	68,307

Fonte: Autoria própria

3.3.1.2 – Análise Metalográfica

A microestrutura do material foi verificada através de análise metalográfica utilizando microscopia óptica. Na Figura 17 é apresentada a microestrutura do material que foi analisada no sentido transversal a direção de laminação, de acordo com a qual, realizando procedimento de contagem de grãos, verifica-se que o tamanho de grão do material utilizado é TG 7, confirmando estar dentro dos padrões estabelecidos em norma (1323, 1990).

Figura 17 - Análise metalográfica preliminar do material



Fonte: Autoria própria

3.3.1.3 – Propriedades Mecânicas

As principais propriedades mecânicas do material foram obtidas experimentalmente através de ensaios de tração e dureza Vickers, apresentando valores compatíveis com os constantes em normas, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 316L

Tensão Limite de Resistência (MPa)	Tensão Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HV)
607	263	54	188

Fonte: Autoria própria

3.3.2 – Segunda etapa: teste de torneamento

Neste trabalho decidiu-se estudar o efeito de alguns parâmetros de usinagem no torneamento cilíndrico externo. Os parâmetros escolhidos para estudo foram a velocidade de corte (v_c), o avanço da ferramenta (f_n) e o raio de ponta da ferramenta (r_ϵ). Sendo assim foi definida uma matriz experimental fatorial completa, composta de 3 fatores e 2 níveis de variação (2^3), resultando em 8 diferentes condições. Cada uma destas condições foi replicada duas vezes, gerando assim três amostras para cada condição. A Tabela 6 resume as variáveis e o intervalo de aplicação utilizado neste trabalho.

Tabela 6 – Valores de cada parâmetro utilizados no trabalho

Variáveis	Unidade	Símbolo	Valores empregados
Velocidade de Corte	m/min	V_c	145 e 195
Avanço da Ferramenta	mm/rotação	f_n	0,15 e 0,30
Raio de Ponta da Ferramenta	mm	r_ϵ	0,4 e 0,8

Fonte: Autoria própria

Estes parâmetros de corte estão dentro da faixa de valores recomendados pelo fabricante das ferramentas para o torneamento da liga utilizada neste trabalho, conforme já apresentado na Tabela 3. Os parâmetros de velocidade de corte e avanço utilizados são os mínimos e máximos recomendados para a ferramenta de raio 0,4 mm, já que estes valores estão dentro da faixa de valores recomendados para a ferramenta de raio 0,8 mm. Os valores mínimos e máximos recomendados para a ferramenta de raio 0,8 mm não atendem os valores recomendados para a ferramenta de raio 0,4 mm.

O processo de torneamento foi realizado com a profundidade de corte (a_p) sendo mantida constante em todas as combinações, já que este parâmetro não era objetivo de estudo neste trabalho, ou seja, todos os testes foram feitos com profundidade de corte de 1,0 mm para produzir a superfície a ser analisada. A escolha por esta profundidade foi feita em função de ser uma profundidade de corte recomendada para operações de acabamento, sendo que o objetivo do trabalho é analisar a integridade superficial após a última operação de um produto manufaturado.

As arestas de corte utilizadas nestes ensaios eram novas, isto é, não apresentavam desgastes prévios, sendo que cada uma das oito condições de corte diferentes foi usinada com a utilização de uma nova aresta de corte. Como as três amostras de cada condição foram usinadas com aproximadamente 50 mm de comprimento, não houve a constatação de nenhum tipo de dano aos inserts após a realização da operação. Da mesma forma que se optou por realizar a usinagem sem a utilização de fluido de corte.

A variação dos parâmetros de corte e raio de ponta da ferramenta gerou oito condições de corte distintas utilizadas na parte experimental, conforme já citado anteriormente, as quais são apresentadas na Tabela 7. A denominação adotada para especificar as condições de corte foi feita tomando como base os dados dos parâmetros de corte empregados em cada uma destas condições, onde os três primeiros dígitos se referem ao valor da velocidade de corte (145 ou 195), os dois dígitos que aparecem na sequência se referem ao valor do avanço de corte utilizado (0,15 ou 0,30) enquanto que o último algarismo da sequência diz respeito ao raio de ponta da ferramenta empregado na respectiva condição (0,4 ou 0,8).

Para realizar o processo de usinagem fixou-se as barras na placa de castanhas do torno de forma a deixar no mínimo 160 mm da barra disponível para usinagem, sendo possível assim usinar três amostras de cada condição com 50 mm de comprimento. Após a usinagem de cada amostra de 50 mm era efetuada a troca da ponta da ferramenta, com a finalidade de utilizar-se ferramenta nova em cada uma das amostras usinadas, mantendo os demais parâmetros constantes conforme especificado para a condição.

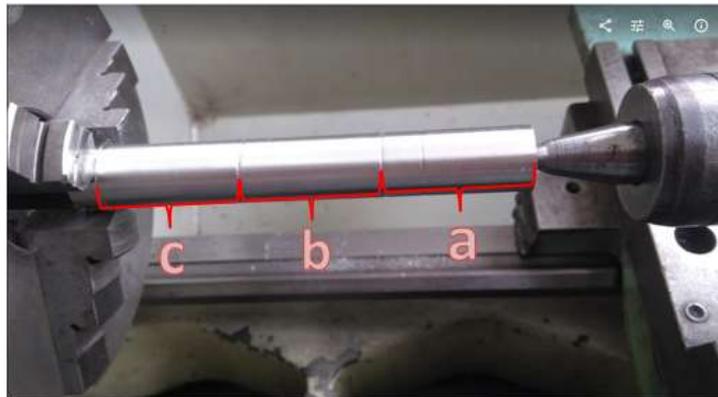
Tabela 7 - Condições de usinagem empregadas

Condição	v_c [m/min]	f_n [mm/rot]	r_ϵ [mm]
145.15.4	145	0,15	0,4
145.30.4	145	0,30	0,4
195.15.4	195	0,15	0,4
195.30.4	195	0,30	0,4
145.15.8	145	0,15	0,8
145.30.8	145	0,30	0,8
195.15.8	195	0,15	0,8
195.30.8	195	0,30	0,8

Fonte: Autoria própria

Com a finalidade de diferenciar as três amostras (regiões) obtidas em cada corpo de prova usinado com as diferentes condições, foram utilizadas as letras “a, b e c”, sendo que a letra “a” identifica a primeira amostra usinada, próximo ao contraponto, a letra “b” a amostra do meio do corpo de prova e a letra “c” indica a amostra próxima a placa do torno, conforme ilustra a Figura 18.

Figura 18 - Usinagem das três amostras do corpo de prova



Fonte: Autoria própria

Os testes de torneamento foram realizados em um torno CNC da marca Romi, modelo GL 240, equipado com comando numérico computadorizado FANUC (CNC), eixo árvore com potência de 15 kW e 4500 rpm de rotação máxima, pertencente ao Laboratório de Usinagem do IFSC campus Chapecó/SC, Figura 19.

Figura 19 - Torno CNC utilizado nos testes



Fonte: Autoria própria

Com a finalidade de obter os valores dos parâmetros de rugosidade das amostras dos corpos de prova já usinados, os mesmos foram fixados em uma base prismática, na qual cada uma das três amostras obtidas em cada corpo de prova com as diferentes condições de usinagem foi submetida a medições em três planos defasados a 120° entre si.

O rugosímetro foi ajustado para trabalhar com um comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,8 mm e comprimento de medição $L = 4$ mm ($L = 0,8 \times 5$). Os dois parâmetros de amplitude utilizados para avaliar a rugosidade foi a rugosidade média (R_a) e o parâmetro da rugosidade média das máximas parciais (R_z).

O equipamento utilizado para fazer a medição da rugosidade da superfície usinada foi um rugosímetro digital portátil da marca Time modelo TR-210, uma base magnética que serviu de suporte para o mesmo e uma base prismática com formato em “V” para servir de apoio aos corpos de prova durante a leitura da rugosidade. O rugosímetro é ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Rugosímetro utilizado nas medições de rugosidade



Fonte: Autoria própria

Após a medição da rugosidade, as três amostras obtidas em cada corpo de prova foram separadas, dado início a produção das amostras que seriam utilizadas nas análises metalográficas e nos ensaios de dureza, as quais foram produzidas a partir do corte na seção transversal há 20 mm da extremidade das amostras terminadas em “b” de cada corpo de prova usinado.

Tais amostras foram submetidas ao processo de embutimento, lixamento, polimento e ataque eletroquímico, conforme já foi descrito capítulo 3.3.1, caracterização do aço AISI. Estes procedimentos foram realizados com a utilização de materiais novos para evitar contaminações nas amostras.

Para realizar a medição das durezas utilizou-se um microdurômetro modelo FM-800 da marca Future Tech (Figura 21) do Laboratório de Materiais do IFSC campus Araranguá usando os seguintes parâmetros:

Carga de Penetração: 10 gf

Tempo de aplicação da carga: 10 s

Todas as medições foram feitas obedecendo aos critérios e recomendações da norma (ASTM E384-11EL, 2013).

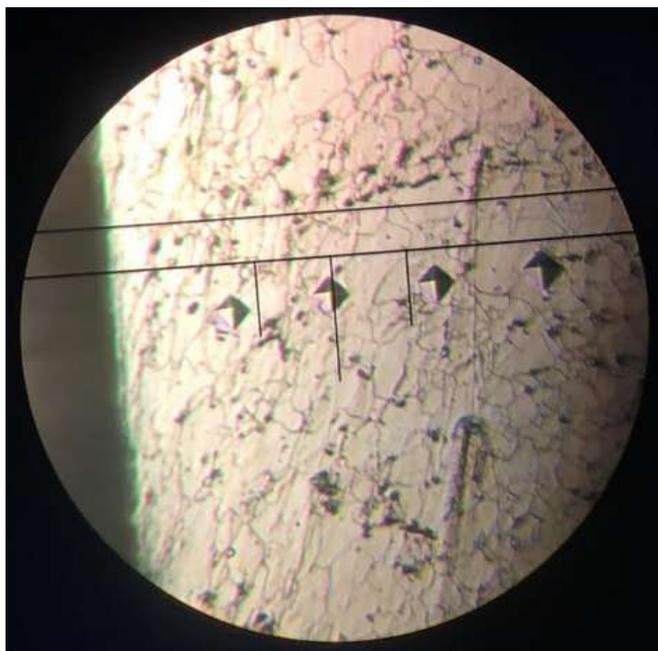
Figura 21 - Microdurômetro utilizado nos ensaios de dureza



Fonte: Autoria própria

A análise do perfil de dureza das amostras constituiu-se de 20 medições na secção transversal de cada amostra com espaçamento de 20 μm , iniciando com a primeira indentação a uma distância de 20 μm da borda da superfície usinada, até atingir a profundidade total de 400 μm (0,4 mm). Na Figura 22 podem ser verificadas as indentações deixadas na superfície analisada.

Figura 22 - Indentações na amostra submetida ao ensaio de dureza



Fonte: Autoria própria

No que diz respeito as amostras utilizadas na análise de tensões residuais, estas foram produzidas com 30 mm de comprimento, obtidas das amostras usinadas terminadas em “b”, as quais não precisaram de nenhum tipo de preparação adicional, sendo apenas acondicionadas de forma a proteger a superfície a ser analisada.

Os perfis de tensões residuais foram medidos pela técnica de difração de raios-X. A difração de raios-X é regida pela Lei de Bragg, que correlaciona o ângulo do feixe incidente (θ) com o espaçamento atômico interplanar, através do ângulo de feixe difratado (2θ). Os resultados da detecção são relacionados a intensidade detectada ao longo dos valores angulares difratados.

Nesta técnica, o princípio de funcionamento é a ocorrência de interferência construtiva para determinados ângulos de incidência de um feixe de raios-X sobre uma superfície. Isso se deve ao fato de que a estrutura cristalina atua como uma grade de difração tridimensional.

A análise das tensões residuais foi efetuada no laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS, em um difratômetro da marca GE Seifert Charon XRD M Research Edition®, equipado por tubo de raios-X de radiação cromo, um colimador de 2 mm para medições com a geometria Bragg-Brentano e um detector tipo Meteor 1 D de 6 acumulações. Este equipamento é apresentado na Figura 23.

As medições da radiação Cr- α foram produzidas por ânodo rotativo com voltagem de 30 kV e corrente de 50 mA e comprimento de onda de α igual a 2,2897 Å. A avaliação foi feita no sentido longitudinal (direção do avanço) e transversal (direção da velocidade de corte)

das amostras tendo os ângulos 2θ analisados compreendendo um intervalo de 119 a 138° , com espaçamento de $0,05^\circ$ e tempo de escaneamento tangencial e longitudinal de 20 s em cada passo.

Figura 23 - Equipamento de difração de raios-X utilizado nas análises das amostras



Fonte: Autoria própria

As medidas das deformações residuais foram realizadas em 11 ângulos ψ no intervalo $-60^\circ < \psi < +60^\circ$. As tensões residuais foram calculadas a partir das deformações do reticulado, usando o método do $\text{sen}^2\psi$, para o cálculo das tensões residuais em um determinado ponto da amostra e em cada uma das direções foi utilizando o programa *Analyze Rayflex*, versão 2.503 da *GE sensing & inspection technologies*®, para intermediar o tratamento dos dados da análise e auxiliar no cálculo das tensões residuais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos na realização desta pesquisa. O trabalho foi dividido em etapas, de acordo com a necessidade de analisar o comportamento da superfície do ponto de vista de diversos aspectos qualitativos e quantitativos. Desta forma, são apresentados a seguir os resultados obtidos para acabamento superficial, microdureza e tensões residuais superficiais.

4.1 Rugosidade da Superfície Usinada

Nesta seção serão discutidos os resultados referentes aos parâmetros de rugosidade média (Ra e Rz) gerados durante os testes, avaliando os efeitos das variações nos parâmetros de usinagem, tais como velocidade de corte (145 m/min e 195 m/min), avanço da ferramenta (0,15 mm/volta e 0,30 mm/volta) e para dois raios de ponta da ferramenta (0,4 mm e 0,8 mm).

Para cada um dos parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) da superfície dos corpos de prova usinados foram feitas três medições em diferentes pontos da superfície, defasados a 120° entre si. Estas três medições foram realizadas em cada uma das três amostras (a, b e c) geradas em cada um dos corpos de prova torneado com as diferentes condições de usinagem.

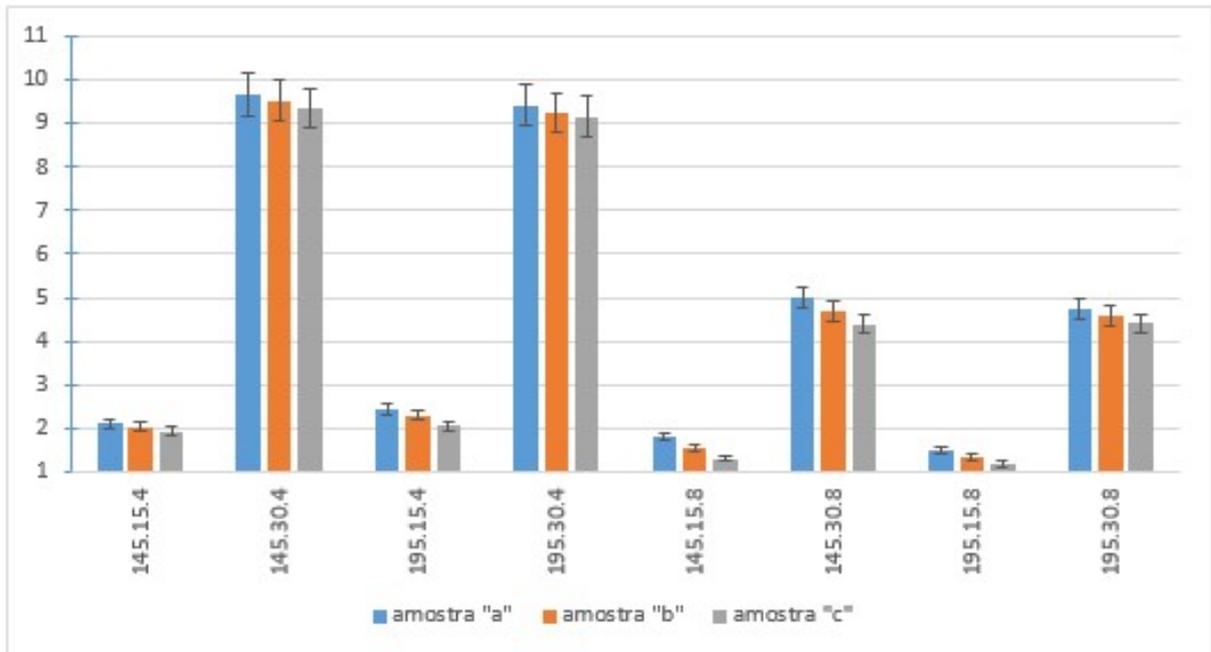
4.1.1 Variação da Rugosidade nas Três Amostras Obtidas em cada Condição

Foi analisado também a variação nos parâmetros de rugosidade nas três diferentes amostras usinadas em cada corpo de prova com as diferentes condições de usinagem. Estas variações são apresentadas nos gráficos das Figura 24 e Figura 25, que representam os parâmetros da rugosidade média Ra e Rz respectivamente.

Podemos observar nos gráficos das Figura 24 e Figura 25 ilustradas a seguir, que houve uma pequena variação nos dois parâmetros de rugosidade analisados nas três diferentes amostras obtidas em cada condição de usinagem. Esta variação se mostrou a mesma tendência em todas as condições de usinagem analisadas, sendo que as amostras identificadas pela letra “a”, as quais se localizam na extremidade do corpo de provas próximo ao contra ponto do torno, apresentaram o valor mais elevado para os parâmetros de rugosidade Ra e Rz. As amostras “b”, as quais se localizavam no centro do corpo de provas, apresentaram valores de rugosidade levemente inferior as amostras (a) da extremidade, enquanto que as amostras “c”, localizadas

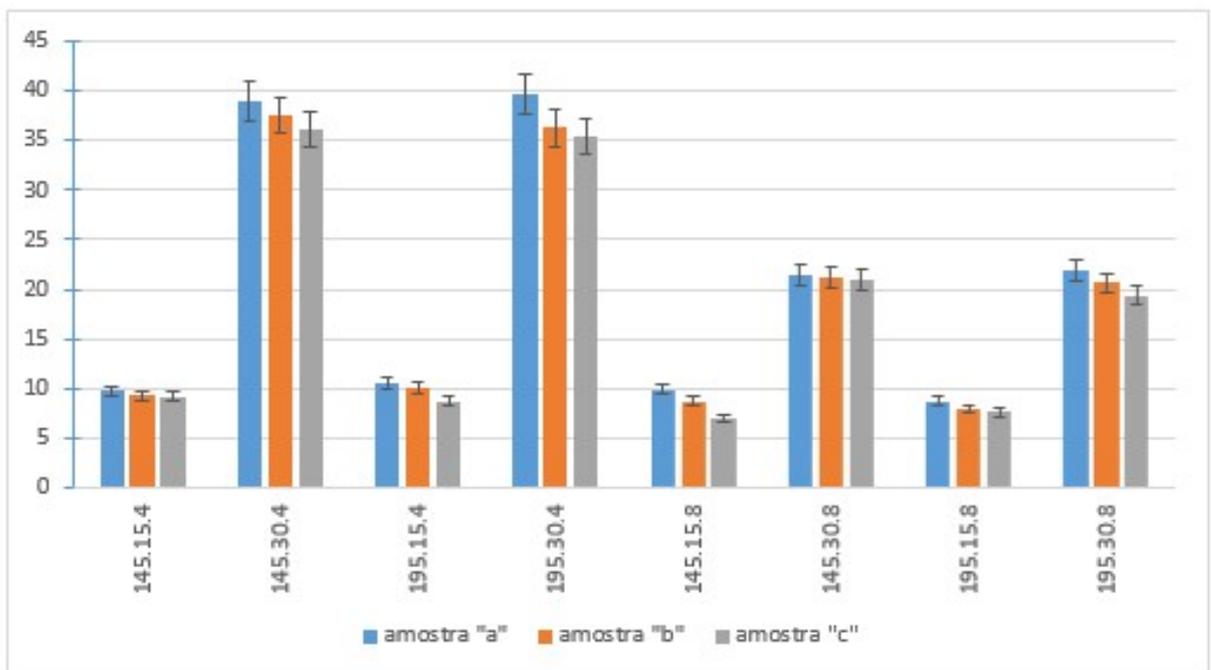
próximo a placa de fixação do torno, se revelaram ser as amostras com os menores valores de rugosidade média Ra e Rz.

Figura 24 - Variação da rugosidade média “Ra” nas diferentes amostras de cada condição



Fonte: Autoria própria

Figura 25 - Variação da rugosidade média “Rz” nas diferentes amostras de cada condição



Fonte: Autoria própria

Através destes resultados atesta-se que os valores de rugosidade tiveram uma leve variação em razão da vibração gerada durante o processo de usinagem, sendo que sua intensidade aumenta conforme vai aumentando o comprimento da peça e conseqüentemente a distância para a placa de fixação.

4.1.2 Análise da Variação da Rugosidade Média (Ra)

Os valores teóricos encontrados para a rugosidade média Ra através da Equação (1) nas condições analisadas, juntamente com os valores reais encontrados nas amostras usinadas com as diferentes condições de velocidade de corte, avanço e raio de ponta da ferramenta são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores da rugosidade média Ra teórico e real em cada condição

Condição	v_c [m/min]	f_n [mm/volta]	r_ϵ [mm]	R _a teórico [μm]	R _a real [μm]
145.15.4	145	0,15	0,4	2,34	2,02
145.30.4	145	0,30	0,4	9,37	9,51
195.15.4	195	0,15	0,4	2,34	2,27
195.30.4	195	0,30	0,4	9,37	9,27
145.15.8	145	0,15	0,8	1,17	1,56
145.30.8	145	0,30	0,8	4,68	4,69
195.15.8	195	0,15	0,8	1,17	1,33
195.30.8	195	0,30	0,8	4,68	4,58

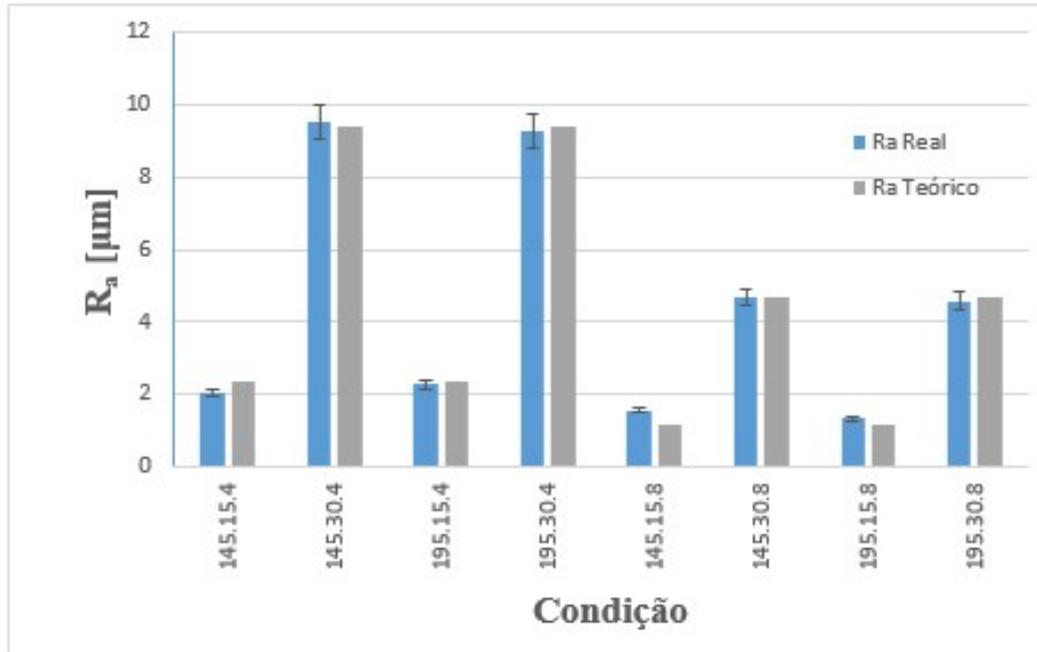
Fonte: Autoria própria

Podemos verificar através dos dados demonstrados na Tabela 8, que o valor teórico obtido através da Equação 01 pode servir como base para estabelecer parâmetros de usinagem com a finalidade de obter uma determinada rugosidade média Ra, pois os valores obtidos são muito semelhantes aos encontrados nas amostras usinadas, sendo que na metade das situações analisadas, estes ficaram ligeiramente abaixo dos valores teóricos calculados.

No gráfico apresentado na Figura 26 são exibidos os valores teóricos e reais do parâmetro de rugosidade média Ra determinados através do cálculo da média aritmética das três medições realizadas em cada uma das três amostras usinadas em cada corpo de prova. As

barras de erros correspondem a incerteza em função do desvio padrão das nove medições realizadas.

Figura 26 - Gráfico da rugosidade média "Ra" em função das condições de usinagem



Fonte: Autoria própria

Pode-se observar que mesmo utilizando uma ferramenta com raio de ponta pequeno ($r_e = 0,4$ mm) com avanço relativamente baixo ($f_n = 0,15$ mm/volta), os valores da rugosidade média Ra ficaram em torno de $2,0$ μm (condições 145.15.4 e 195.15.4). No entanto, quando se utiliza este mesmo raio de ponta da ferramenta, combinado a um valor de avanço duas vezes maior ($f_n = 0,30$ mm/volta), se obtém valores de rugosidade média Ra próximo de 10 μm (condições 145.30.4 e 195.30.4), o que significa um aumento de praticamente 500% em relação ao avanço menor.

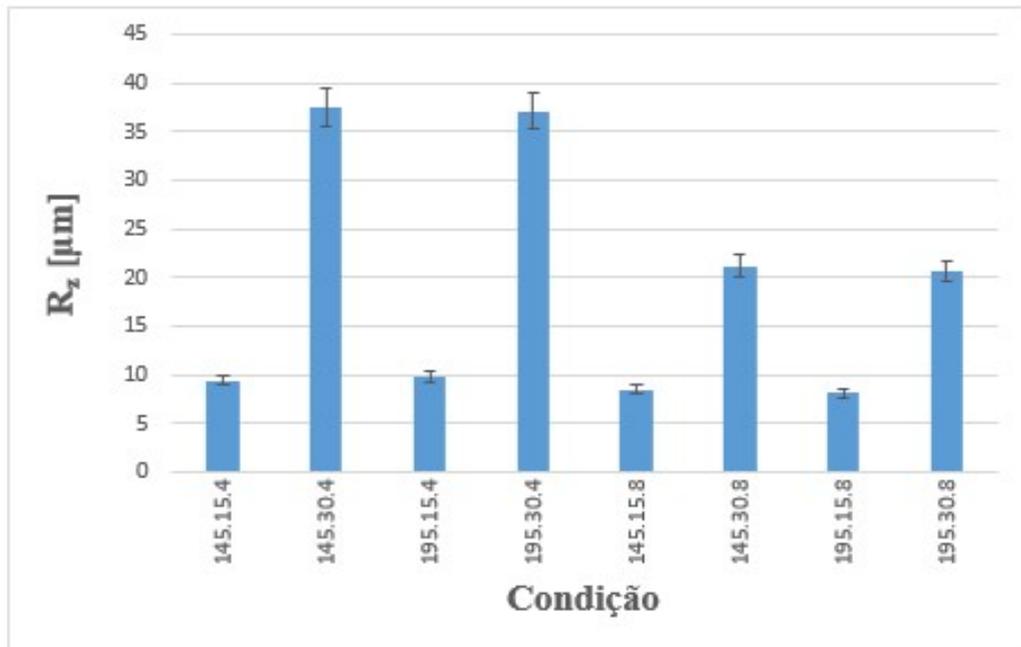
Também é possível visualizar que quando se utiliza uma ferramenta com raio de ponta maior ($r_e = 0,8$ mm) combinado com avanço baixo ($f_n = 0,15$ mm/volta), os valores de rugosidade média Ra tiveram uma leve redução (condições 145.15.8 e 195.15.8) se comparadas com as condições 145.15.4 e 195.15.4, apresentando valores de Ra próximos de $1,5$ μm e $1,3$ μm respectivamente. Entretanto, quando se utiliza um avanço mais elevado ($f_n = 0,30$ mm/volta), com pastilha de raio $0,8$ mm, obteve-se rugosidades médias na faixa de $4,5$ μm , o que representa praticamente a metade da rugosidade média das condições 145.30.4 e 195.30.4, usinadas com os mesmos valores de avanço, porém com pastilha de raio $0,4$ mm. Pode-se

verificar que o aumento do raio de ponta da ferramenta tem uma maior influência na redução da rugosidade em situações que se utiliza maiores avanços, sendo menos significativo em situações em que o avanço utilizado é menor.

4.1.3 Análise da Variação da Rugosidade Média (Rz)

O gráfico da Figura 27 exibe os valores do parâmetro da rugosidade média Rz também determinados através do cálculo da média aritmética das três medições realizadas em cada uma das três amostras usinadas com os mesmos parâmetros. As barras de erros correspondem a incerteza em função do desvio padrão das nove medições realizadas em cada corpo de prova.

Figura 27 - Gráfico da rugosidade média "Rz" em função das condições de usinagem



Fonte: Autoria própria

Constata-se que para a ferramenta com raio de ponta $r_e = 0,4$ mm combinada com pequeno avanço ($f_n = 0,15$ mm/volta), os valores da rugosidade Rz ficaram abaixo de $10 \mu\text{m}$ (condições 145.15.4 e 195.15.4). No entanto, pode-se observar maiores amplitudes e maiores dispersões dos valores obtidos para o parâmetro de rugosidade Rz, quando se utiliza um avanço maior ($f_n = 0,30$ mm/volta), combinado com pequeno raio de ponta da ferramenta ($r_e = 0,4$ mm), isso ocorreu com as condições 145.30.4 e 195.30.4, nas quais o valor de Rz ultrapassou os $37 \mu\text{m}$.

Verifica-se também neste gráfico que a utilização de ferramenta com raio de ponta maior ($r_\epsilon = 0,8$ mm) combinado com avanço baixo ($f_n = 0,15$ mm/volta) não revela grandes mudanças na rugosidade média Rz (condições 145.15.8 e 195.15.8) quando comparadas as condições 145.15.4 e 195.15.4 obtidas com a ferramenta com raio de ponta ($r_\epsilon = 0,4$ mm). Nestas condições a rugosidade média Rz também ficou ligeiramente abaixo dos 10 μm . Entretanto, uma maior diferença pode ser observada quando se utiliza a ferramenta de ($r_\epsilon = 0,8$ mm) combinado com um maior avanço ($f_n = 0,30$ mm/volta), situação na qual se obtém uma rugosidade média Rz em torno de 20 μm (condições 145.30.8 e 195.30.8).

Assim como acontece com a rugosidade média Ra, os resultados mais insatisfatórios da rugosidade média Rz (condições 145.30.4 e 195.30.4) também foram encontrados quando se utiliza a ferramenta com o menor raio de ponta ($r_\epsilon = 0,4$ mm) e o maior avanço ($f_n = 0,30$ mm/volta), sendo que estas mesmas amostras, também apresentam as maiores dispersões.

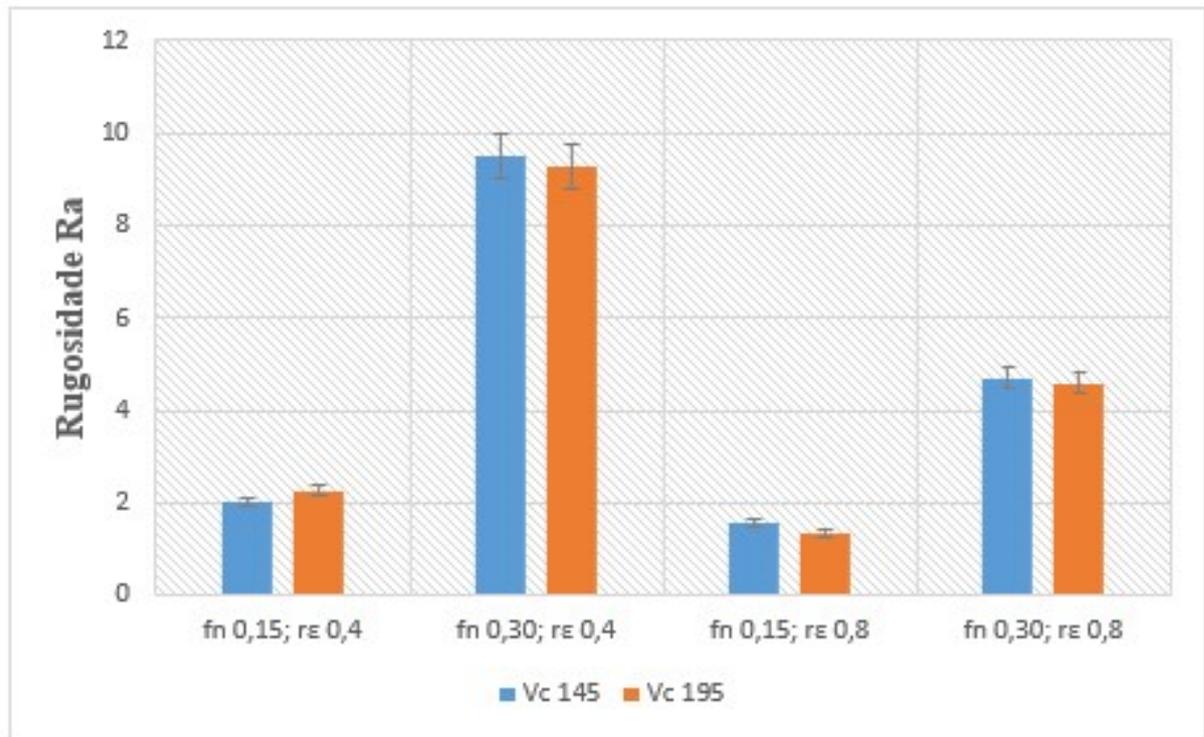
4.1.4 Influência da Velocidade de Corte na Rugosidade

Nos gráficos apresentados nas Figura 28 e Figura 29, podemos analisar a variação nos parâmetros da rugosidade em função da alteração da velocidade de corte. Os gráficos foram construídos com as condições de usinagem utilizando os mesmos parâmetros de avanço e raio de ponta da ferramenta, adotando como variável apenas a velocidade de corte.

Podemos observar que quando se aumenta a velocidade de corte, em geral, a rugosidade diminui, o que pode ser comprovado em três das quatro condições de usinagem analisadas, nas quais houve uma mínima redução nos parâmetros de rugosidade com o aumento da velocidade de corte. No entanto, esta influência não foi a mesma em todos os casos, pois nas condições em que foram empregados ($f_n = 0,15$ mm/volta e $r_\epsilon = 0,4$ mm) houve um pequeno aumento nos dois parâmetros de rugosidade, mesmo com o aumento da velocidade de corte.

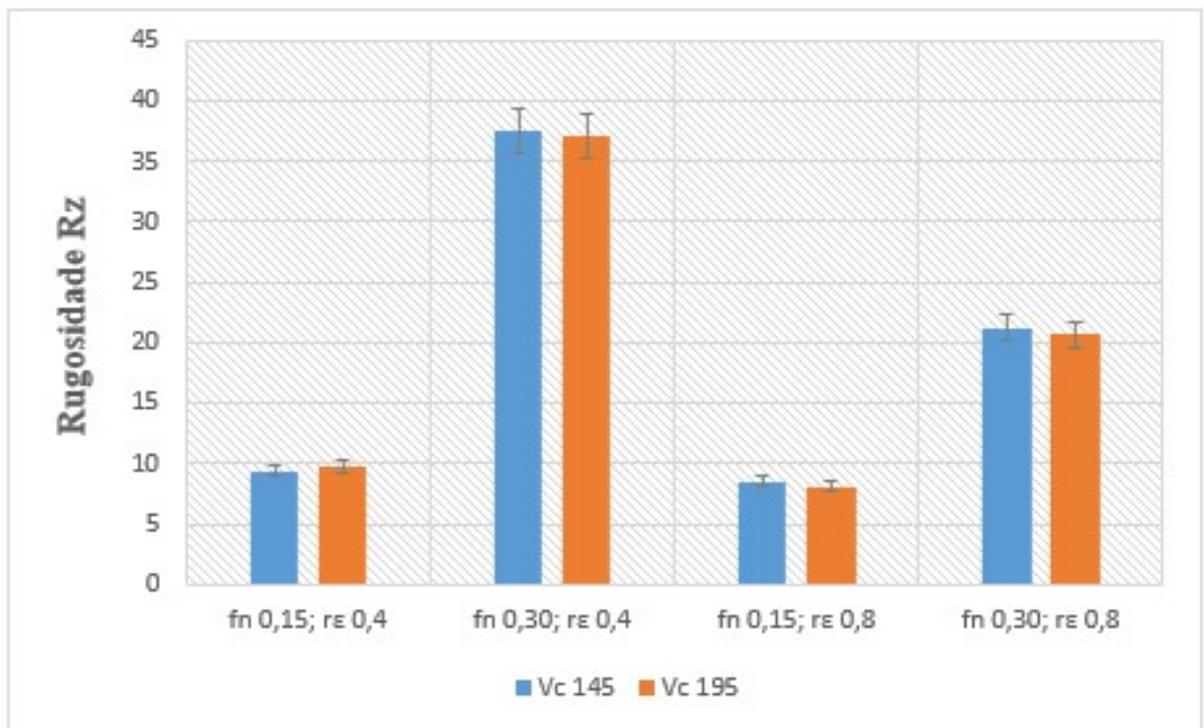
Uma possível explicação para este aumento da rugosidade nestas condições pode ser a vibração gerada na ação de corte, em função de estar utilizando a velocidade de corte (195 m/min) no limite máximo recomendado pelo fabricante e o avanço no limite mínimo, situação esta que favorece a geração de atrito entre a ferramenta e a peça, contribuindo para o aumento da vibração.

Figura 28 - Influência da velocidade de corte na rugosidade média Ra



Fonte: Autoria própria

Figura 29 - Influência da velocidade de corte na rugosidade média Rz



Fonte: Autoria própria

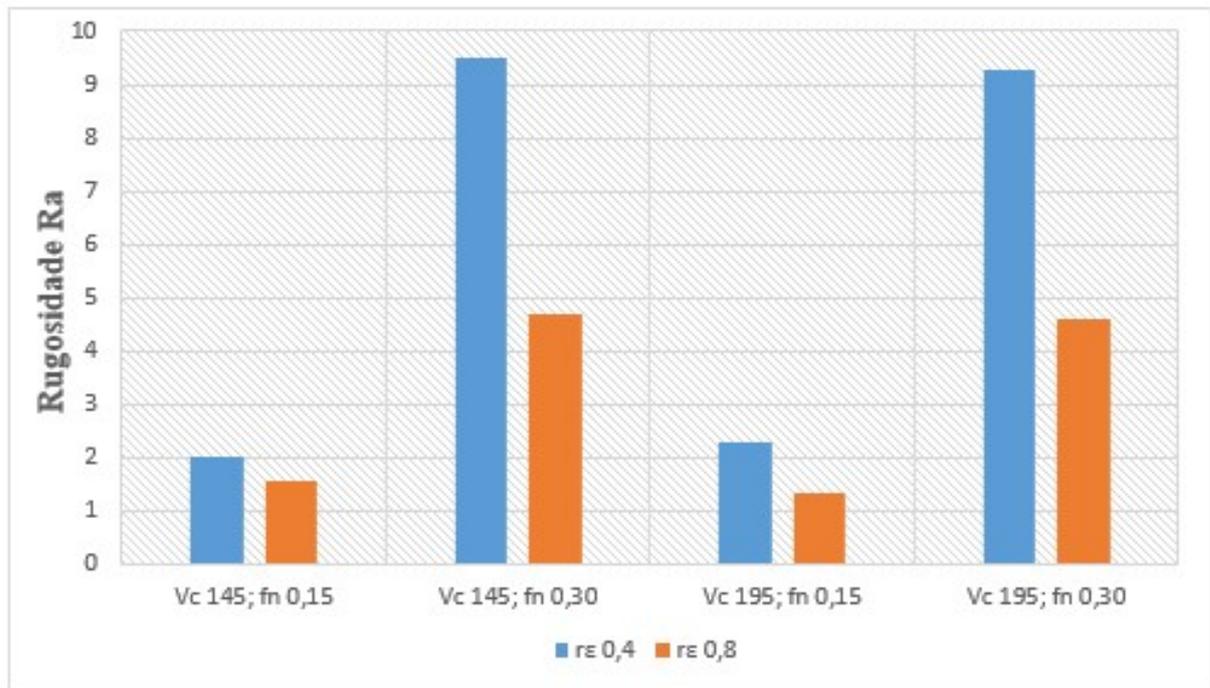
De modo geral, estas variações na rugosidade média geradas pelos diferentes valores de velocidade de corte utilizadas são muito pequenas (BARBOSA, 2019), ficando dentro do intervalo do desvio padrão indicado pelas barras de erros das Figura 28 e Figura 29, indicando que sua influência sobre os parâmetros de rugosidade não é estatisticamente relevante neste estudo.

4.1.5 Influência do Raio de Ponta da Ferramenta na Rugosidade

Podemos observar nos gráficos apresentados nas Figura 30 e Figura 31, que o raio de ponta da ferramenta (r_ϵ) é o segundo fator que mais influenciou no acabamento superficial, quando comparado aos demais fatores analisados neste trabalho. Pode-se notar, que ao variar o raio de ponta da ferramenta, a variação da rugosidade é menos impactante quando o avanço utilizado é menor ($f_n = 0,15$ mm/volta).

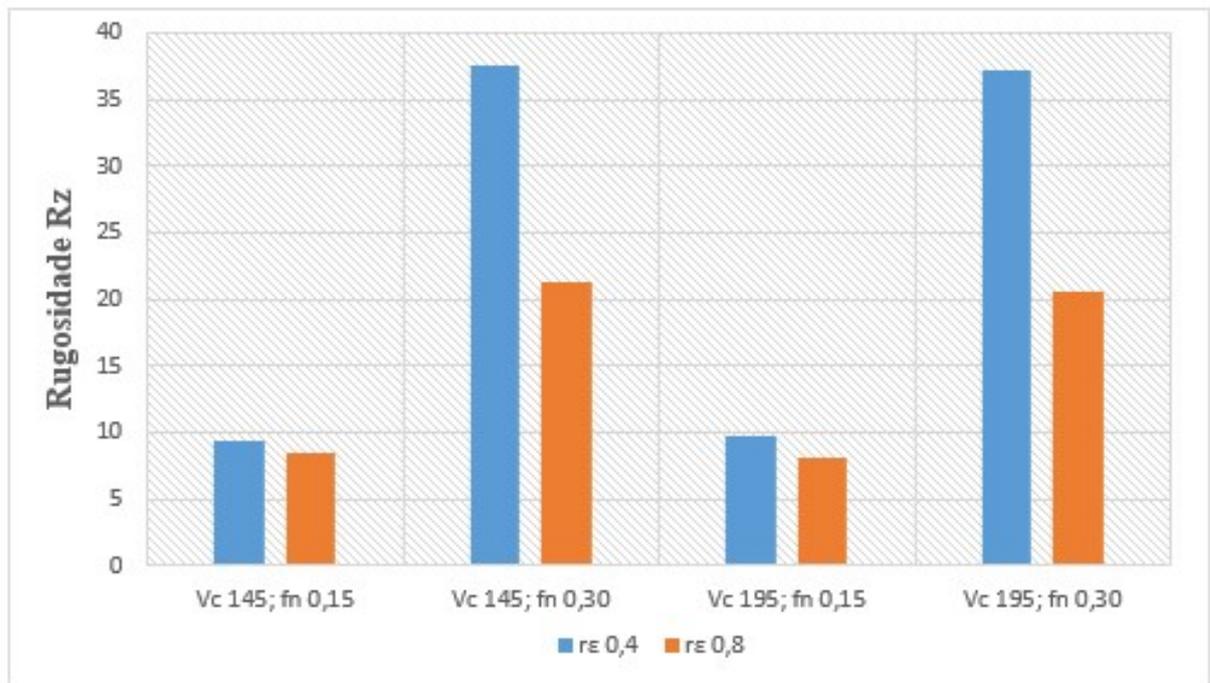
Observa-se que ocorreu uma maior variação da rugosidade ao variar o raio de ponta da ferramenta nas amostras usinadas utilizando o maior avanço ($f_n = 0,30$ mm/volta). Nestas condições, pode-se observar uma diminuição de 50% na rugosidade média Ra quando se utiliza uma ferramenta com raio de ponta de $r_\epsilon = 0,8$ mm se comparado a ferramenta com raio de ponta de $r_\epsilon = 0,4$ mm, e uma variação de até 44% para o valor da rugosidade média Rz nas mesmas condições.

Figura 30 - Influência do raio de ponta da ferramenta na rugosidade média Ra



Fonte: Autoria própria

Figura 31 - Influência do raio de ponta da ferramenta na rugosidade média R_z



Fonte: Autoria própria

Enquanto que as amostras usinadas com o menor avanço ($f_n = 0,15$ mm/volta), apresentaram uma menor variação nos valores de rugosidade ao utilizar uma ferramenta com raio de ponta maior. A rugosidade média R_a nestas situações apresentou uma diminuição de

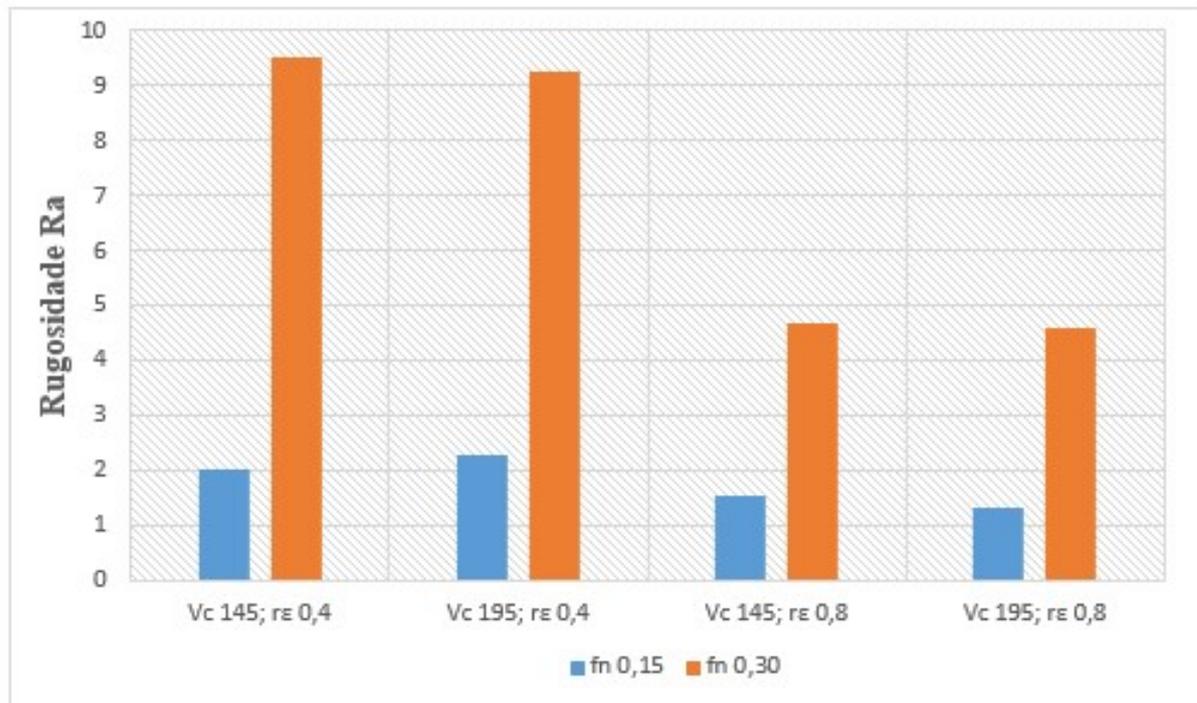
22% nas amostras usinadas com velocidade de corte de 145 m/min e uma diminuição de 40% nas amostras usinadas com velocidade de corte de 195 m/min. Com relação a rugosidade média Rz, o aumento do raio de ponta da ferramenta contribuiu para uma redução de 9% e 17%, para as velocidades de corte de 145 m/min e 195 m/min respectivamente.

Desta forma, pode-se dizer que as alterações no raio de ponta da ferramenta (r_ϵ) serão mais perceptíveis no acabamento superficial quando os avanços são maiores, sendo que quanto menor o avanço utilizado, menores serão os efeitos da variação do raio de ponta da ferramenta.

4.1.6 Influência do Avanço da Ferramenta na Rugosidade

Nas Figura 32 e Figura 33 são apresentados os gráficos que ilustram a variação dos parâmetros de rugosidade Ra e Rz em função da modificação do avanço da ferramenta (f_n). Verifica-se que ao aumentar o avanço ocorre um aumento significativo nos valores das rugosidades, tanto para o parâmetro de Ra quanto para Rz, sendo este, entre os fatores analisados, que possui maior influência no acabamento superficial. Pode-se reparar nos gráficos, que o aumento do avanço ($f_n = 0,15$ mm/volta para $f_n = 0,30$ mm/volta) ocasionou um aumento de 350% na rugosidade média Ra quando se utilizou pastilha com raio de ponta ($r_\epsilon = 0,4$ mm) e um aumento de 275% para o parâmetro Rz.

Figura 32 - Influência do avanço da ferramenta na rugosidade média Ra

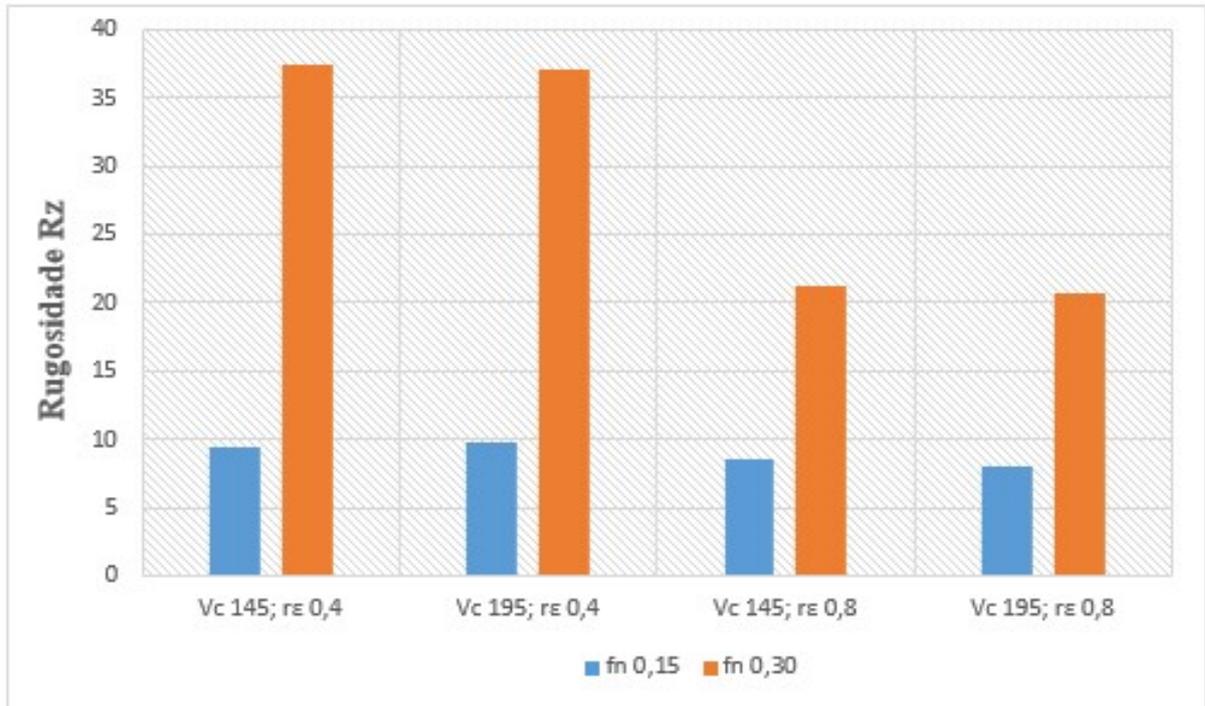


Fonte: Autoria própria

Quando aumentamos o avanço (f_n) utilizando uma ferramenta com raio de ponta ($r_\epsilon = 0,8$ mm), a diferença nos parâmetros de rugosidade Ra e Rz teve uma intensidade menor que para a ferramenta com raio de ponta ($r_\epsilon = 0,4$ mm). O parâmetro de Ra teve um aumento de 200% ao dobrar o valor do avanço, enquanto o parâmetro de Rz teve um aumento de 150% em comparação ao menor avanço analisado.

Ao analisar os dados apresentados nos gráficos das Figura 32 e Figura 33, podemos constatar que os resultados são coerentes com a teoria, pois a influência do avanço da ferramenta já foi demonstrada por outros autores como (MARQUES et al., 2016; RIBEIRO FILHO et al., 2016; BARBOSA, 2019; RAJAGURU; ARUNACHALAM, 2018; MARQUES et al., 2021; MICHELON et al., 2022).

Figura 33 - Influência do avanço da ferramenta na rugosidade média Rz



Fonte: Autoria própria

MACHADO et al., 2015 afirmam que a rugosidade média Ra é diretamente proporcional ao quadrado do avanço, para valores de avanço maiores que $\frac{1}{2}$ do raio de arredondamento da ferramenta. O que explica o considerável aumento nos valores dos parâmetros de rugosidade nas amostras que foram usinadas com a ferramenta de raio de ponta ($r_e = 0,4$ mm), utilizando o avanço de 0,30 mm/volta (maior que $\frac{1}{2}$ do raio de arredondamento da ferramenta).

4.1.7 Utilização de Planejamento Experimental (DoE) na análise da influência dos fatores nas rugosidades médias

A construção do primeiro planejamento experimental (DoE) e análise fatorial foi realizada com três fatores de entrada e duas saídas, (R_a e R_z) baseando-se nos dados consolidados na Tabela 9.

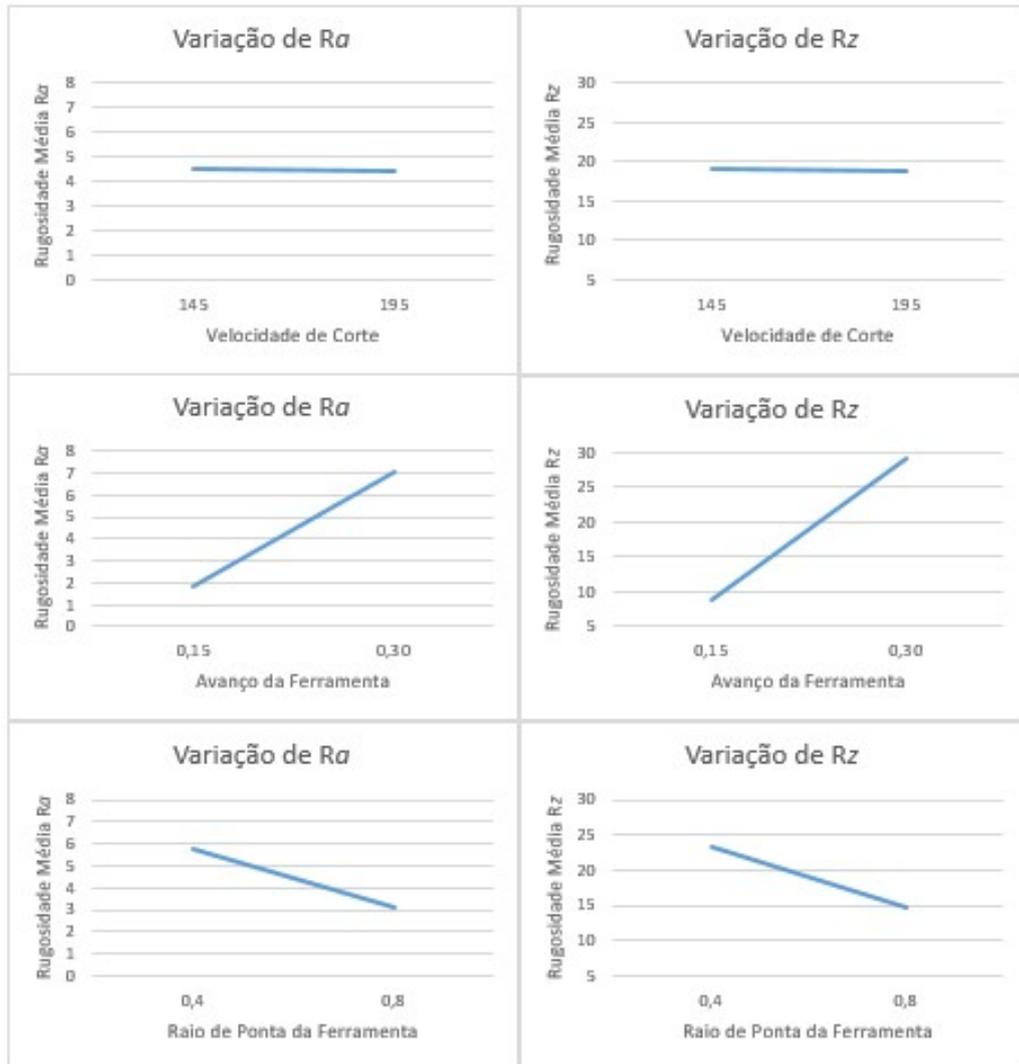
Tabela 9 - Matriz dos dados do DoE com três fatores de entrada e como saída a rugosidade média R_a e R_z .

AMOSTRAS			Rugosidade R_a	Rugosidade R_z
Velocidade de Corte	Avanço	Raio de Ponta		
145	0,15	0,4	2,02	9,39
145	0,3	0,4	9,51	37,5
195	0,15	0,4	2,27	9,79
195	0,3	0,4	9,27	37,1
145	0,15	0,8	1,56	8,54
145	0,3	0,8	4,96	21,21
195	0,15	0,8	1,33	8,09
195	0,3	0,8	4,58	20,63

Fonte: Autoria própria

Ao analisar os gráficos obtidos através do planejamento experimental com os três fatores que foram utilizados no estudo (Figura 34), apenas confirmamos aquilo que já foi relatado anteriormente. Dentre os fatores analisados, a variação do avanço é o que causa uma maior interferência nas rugosidades médias R_a e R_z , não apresentando diferença entre os dois critérios de rugosidade analisada. A variação do raio de quina da ferramenta e o segundo fator que mais interferiu nos valores de rugosidade média verificados, sendo que a influência deste fator é contrária ao do avanço, ou seja, quando se aumenta o raio de quina a rugosidade média diminui. Desta mesma forma, podemos observar através dos gráficos que a variação da velocidade de corte não tem influência significativa nos valores de rugosidade média obtidas neste estudo.

Figura 34 - Gráficos dos principais efeitos dos três fatores sobre a rugosidade Ra e Rz.



Fonte: Autoria própria

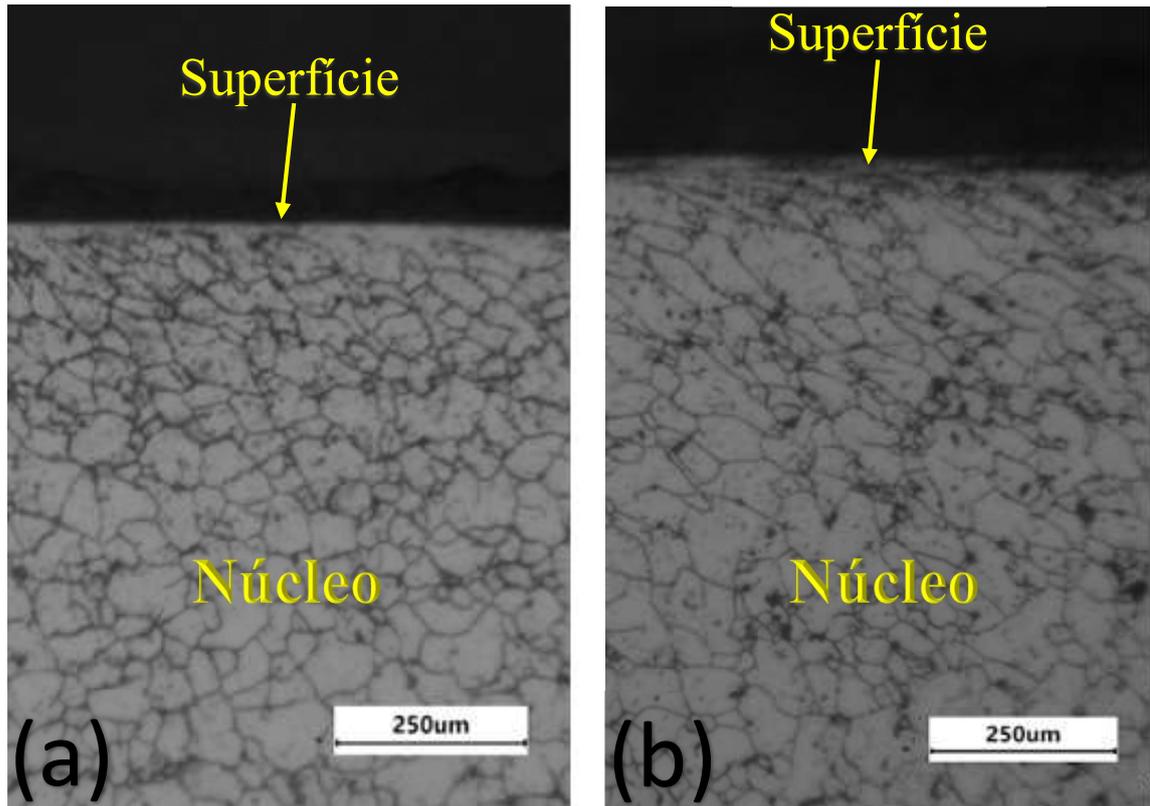
4.2 Caracterização Microestrutural

Através da microscopia óptica da superfície das amostras das peças após o embutimento, polimento e ataque eletroquímico em solução contendo 60% HNO₃ e 40% H₂O, foram captadas imagens de todas as condições de usinagem que foram estudadas nesta pesquisa.

Com a análise das microestruturas, ilustradas através das Figura 35 e Figura 38, percebe-se que ocorreram diferenças significativas na superfície, sobretudo quando são utilizados valores maiores de avanço da ferramenta, o que pode ser comprovado comparando as condições de usinagem 145.15.4 e 145.30.4 (Figura 35 “A” e “B”) onde a única variação de parâmetro foi o avanço.

Entretanto, quando ocorre a variação da velocidade de corte, os resultados de deformação de grãos encontrados, indicam que a maior deformação ocorre com a menor velocidade de corte (condição 145.30.8) Figura 37”B”, quando comparada a Figura 38”B” (condição 195.30.8).

Figura 35 - Microestruturas das amostras usinadas das condições: a) 145.15.4 e b) 145.30.4

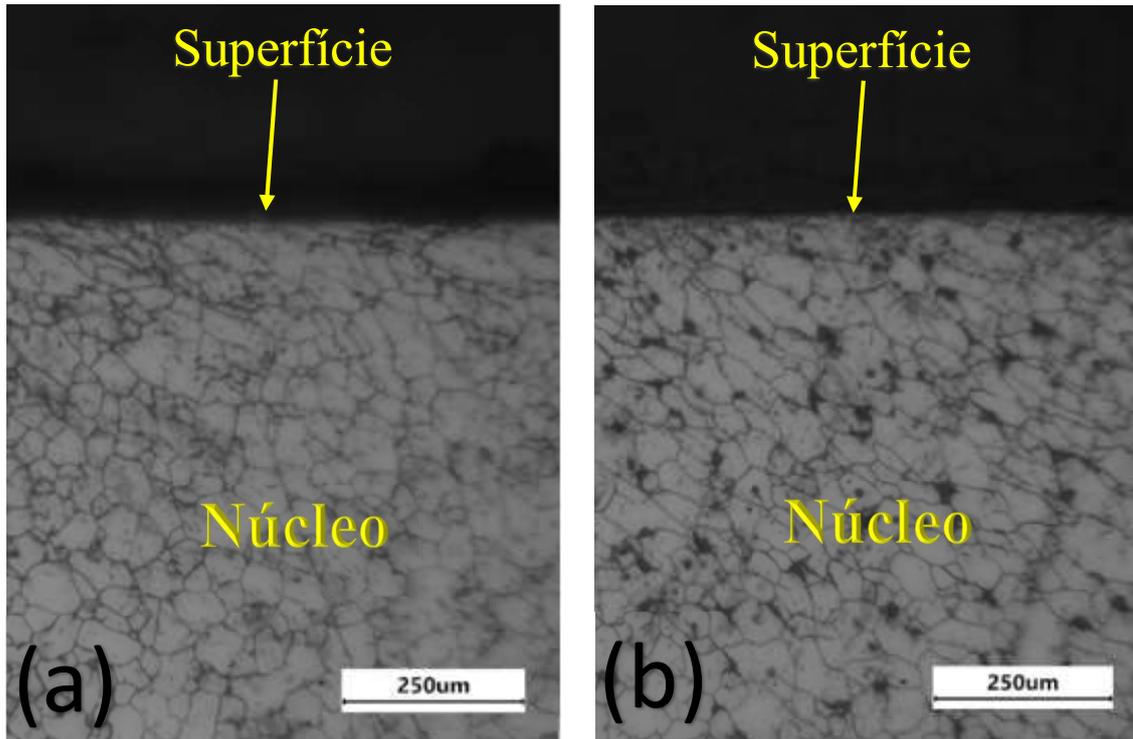


Fonte: Autoria própria

Em sua tese de doutorado, ROSA, 2017, após a execução de ensaios dirigidos ao processo de torneamento de aços inoxidáveis austeníticos AISI 420, concluiu que o aumento dos esforços mecânicos oriundos do aumento do avanço de ferramenta tem significativa influência na deformação da superfície usinada, sendo que as condições de maiores avanço ainda ocasionam um aumento das tensões residuais.

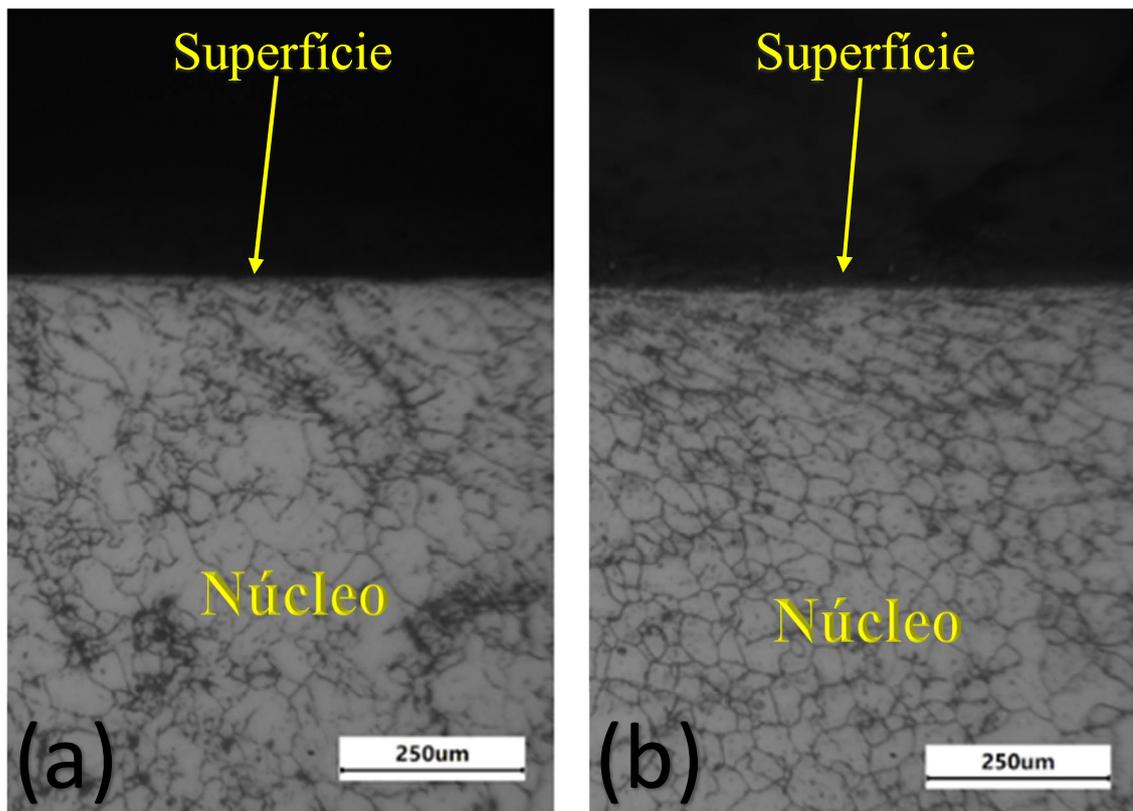
Em decorrência dos experimentos realizados neste trabalho e ilustrado nas Figura 35 e Figura 38, é possível constatar que o parâmetro que apresenta maior deformação de grãos é o avanço da ferramenta, análise podendo ser percebida pela comparação entre as imagens “A” e “B” de cada uma das quatro figuras mencionadas.

Figura 36 - Microestruturas das amostras usinadas das condições: a) 195.15.4 e b) 195.30.4



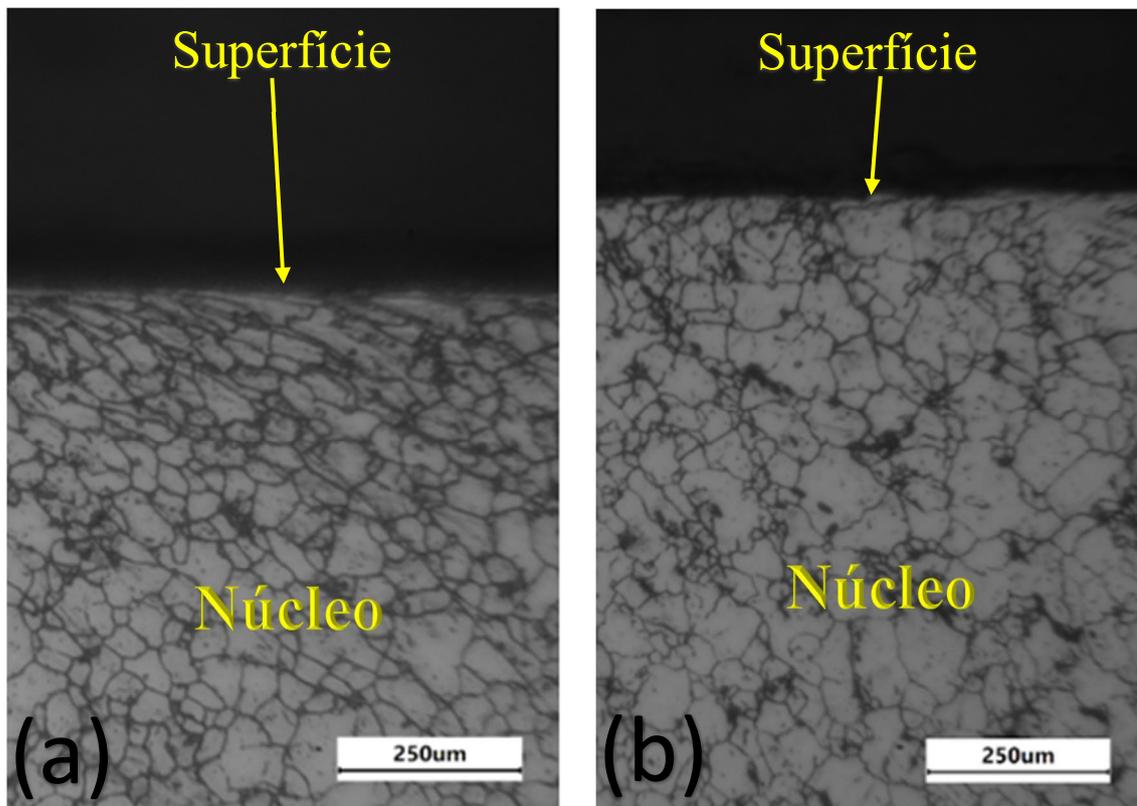
Fonte: Autoria própria

Figura 37 - Microestruturas das amostras usinadas das condições: a) 145.15.8 e b) 145.30.8



Fonte: Autoria própria

Figura 38 - Microestruturas das amostras usinadas das condições: a) 195.15.8 e b) 195.30.8



Fonte: Autoria própria

4.3 Perfil de Dureza Obtido nas Condições Analisadas

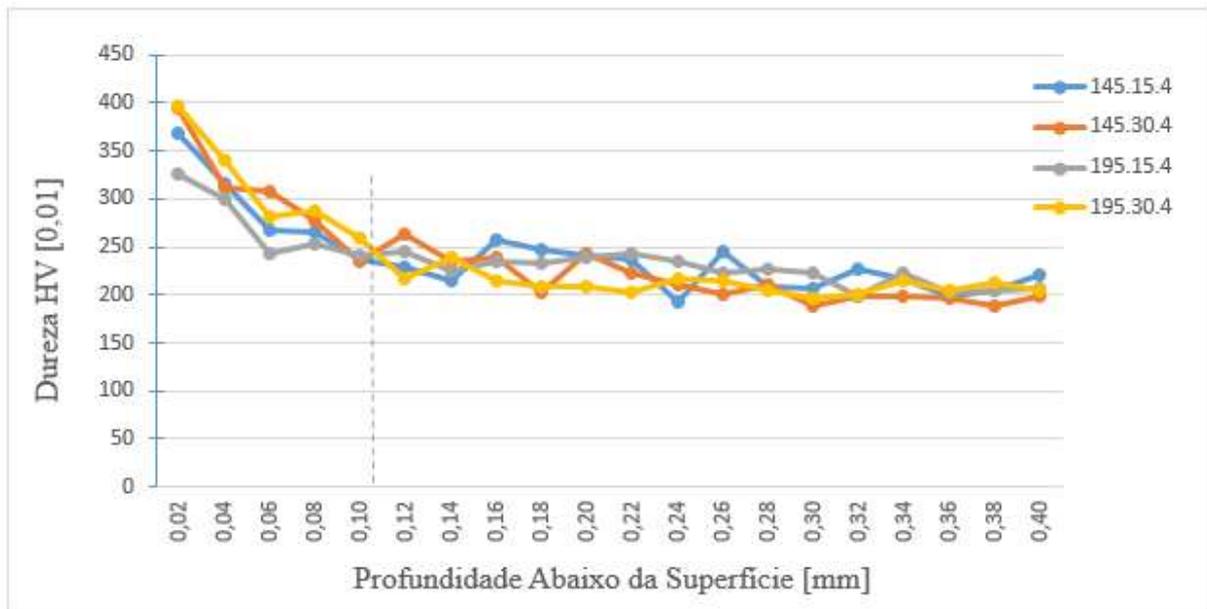
A medição de microdureza foi realizada através de corte transversal dos corpos de prova, o ensaio consistiu na obtenção de vinte pontos na superfície seccionada. Os valores de microdureza na escala Vickers foram verificados a 0,02 mm afastados da superfície, que é a menor distância possível para evitar o efeito de borda, até 0,4 mm para dentro do material. A avaliação foi realizada da superfície para o centro do corpo de prova, a fim de verificar a variação da microdureza no sentido transversal do diâmetro dos corpos de prova após a usinagem.

Os gráficos das Figura 39 e Figura 40 exibidos a seguir apresentam os perfis de microdureza obtidos com a aplicação da carga de 10gf (0,01 N) nos corpos de prova usinados de acordo com as condições de corte estabelecidas para a realização deste trabalho.

Conforme o gráfico apresentado na Figura 39, pode-se observar que os valores de dureza encontrados próximo a superfície se mantiveram acima de 250 HV até a profundidade de 0,1 mm, sendo que após este ponto ocorreu a atenuação da queda de dureza e os resultados obtidos

começam a igualar a dureza da liga antes da usinagem, para as amostras usinadas com ferramenta de raio de ponta $r_\epsilon = 0,4$ mm, com exceção da amostra 195.15.4, que atingiu o valor de 250 HV de dureza a uma profundidade de 0,06 mm, apresentando também o menor valor de dureza próximo a superfície. Esta exceção pode ser explicada em função de ter sido utilizada nesta condição uma maior velocidade de corte e o menor avanço por volta, gerando assim uma menor taxa de encruamento nas camadas subsuperficiais desta amostra.

Figura 39 - Perfil de microdureza variando os parâmetros de vc e fn e ferramenta com r_ϵ de 0,4 mm



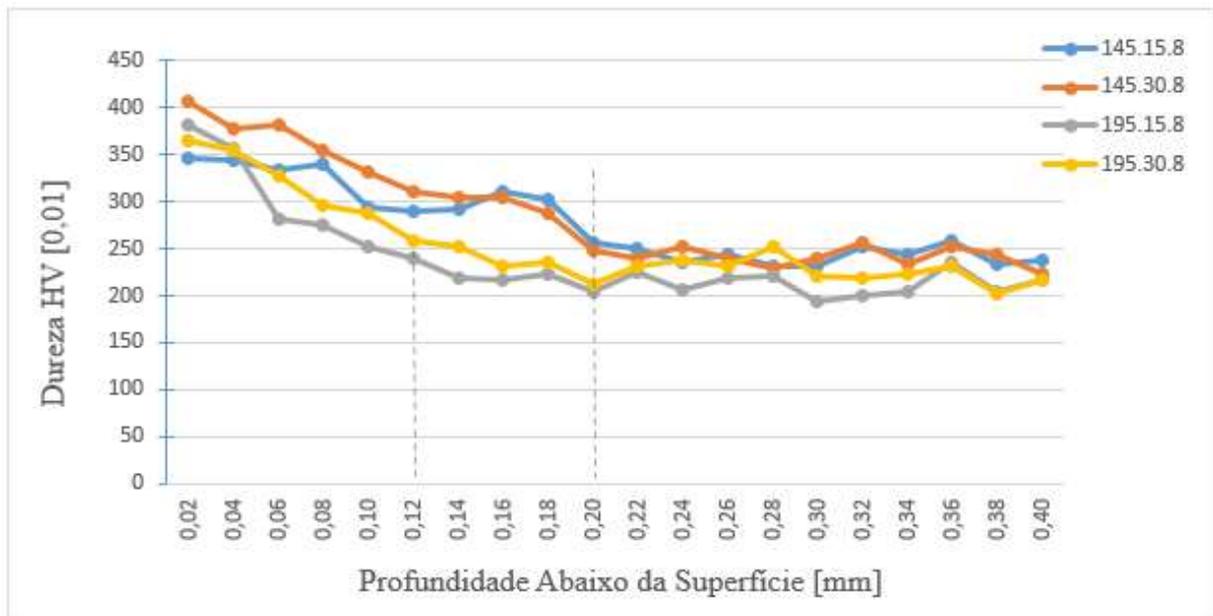
Fonte: Autoria própria

Ainda em relação as amostras obtidas das condições de usinagem 145.15.4 e 195.15.4, utilizando velocidade de corte de 145 e 195 m/min respectivamente, e mantendo os demais fatores de usinagem constantes, nota-se que o aumento da velocidade de corte teve uma pequena contribuição na dureza superficial, reduzindo-a na ordem de 50 pontos na escala Vickers. Este resultado já era esperado, pois segundo (TRENT; WRIGHT, 2000), para a maioria dos metais e ligas, habitualmente, à medida que a velocidade de corte aumenta, os cavacos se tornam mais finos e as forças de corte e de avanço diminuem.

Podemos observar também que as duas amostras obtidas com as condições 145.30.4 e 195.30.4, que foram usinados com maior avanço da ferramenta ($f_n = 0,30$ mm/volta), apresentaram valores de dureza mais elevados próximo à superfície (0,02 mm), atingindo aproximadamente 400 HV, valores levemente superiores às amostras usinadas com menor avanço ($f_n = 0,15$ mm/volta).

Ao ser efetuada a mudança no raio de ponta da ferramenta, aumentando o mesmo de $r_e = 0,4$ mm para $r_e = 0,8$ mm, obtivemos os perfis de dureza apresentados no gráfico da Figura 40, no qual os valores de dureza próximo a superfície (0,02 mm) também ficaram numa faixa acima de 350 HV, indicando que o raio de ponta da ferramenta não influenciou nos valores desta variável, no entanto, apresentou aumento significativo em relação a profundidade afetada pelo encruamento, tendência essa que já foi observada por (HOFFMANN et al., 2020a).

Figura 40 - Perfil de microdureza variando os parâmetros de v_c e f_n e ferramenta com r_e de 0,8 mm



Fonte: Autoria própria

Através do gráfico apresentado na Figura 40 podemos observar que as duas amostras obtidas das condições 195.15.8 e 195.30.8, as quais foram usinadas com maior velocidade de corte ($v_c=195$) se aproximam da faixa de dureza de 250 HV a uma profundidade de 120 μ m. No entanto, as amostras usinadas com menor velocidade de corte ($v_c=145$), condições 145.15.8 e 145.30.8, mantém os valores de dureza acima de 250 HV até a profundidade de 200 μ m, indicando que a combinação de baixa velocidade de corte em conjunto com maior raio de ponta da ferramenta ($r_e = 0,8$ mm) ocasiona o encruamento do material até camadas mais profundas.

Ainda em relação as amostras das condições 145.15.8 e 145.30.8, obtidas com diferente valor de avanço da ferramenta de corte, 0,15 e 0,30 mm/volta respectivamente, mantendo os demais fatores de usinagem constantes, pode-se constatar que o aumento do avanço contribuiu para um aumento da dureza próximo a superfície de aproximadamente 50 pontos na escala de

dureza Vickers. O aumento da dureza superficial provém do aumento dos esforços de corte proporcionados pelo aumento dos parâmetros utilizados durante o processo de torneamento, conforme já foi mencionado anteriormente em estudos semelhantes utilizando aço inoxidável AISI 316L (AGRAWAL; SINGH, 2018; MARQUES, 2021; MAUROTTO et al., 2017)

O maior valor de dureza foi obtido com a amostra da condição 145.30.8, ficando ligeiramente acima dos 400 HV próximo a superfície, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 40. Esta amostra foi usinada com a combinação da menor velocidade de corte (145 m/min.), maior avanço (0,30 mm/volta) e maior raio de ponta da ferramenta (0,8 mm), conforme já foi comprovado por (HOFFMANN et al., 2020b). Em contra partida, a amostra obtida com os fatores de usinagem empregados na condição 195.15.4, maior velocidade de corte (195 m/min.), menor avanço (0,15 mm/volta) e menor raio de ponta da ferramenta (0,4 mm), apresentou, entre todas as condições avaliadas, a menor dureza próxima a superfície, aproximadamente 325 HV, conforme ilustrado no gráfico da Figura 39.

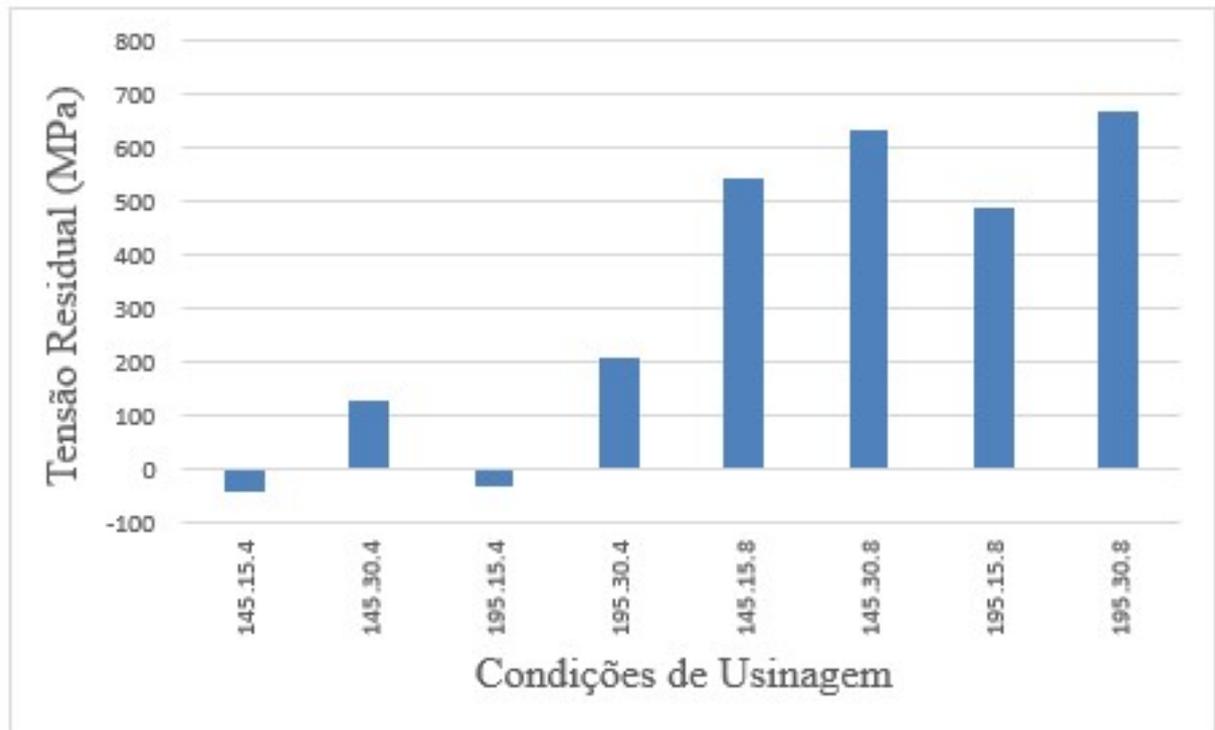
4.4 Tensões Residuais

Tensões residuais são aquelas que permanecem na peça mesmo quando todos os esforços externos são removidos. Todos os processos de fabricação “imprimem” nos componentes fabricados tensões residuais ao longo da cadeia produtiva. Essas tensões podem ser tanto de tração como de compressão e, conseqüentemente, serem benéficas ou malélicas às aplicações que a peça será submetida.

Os ensaios de tensões residuais foram realizados em todos os corpos de prova obtidos com as diferentes condições de usinagem utilizadas neste experimento, sendo que estas análises foram realizadas em duas direções, tanto na direção longitudinal (sentido do avanço) quanto na direção transversal (sentido da velocidade de corte), as quais apresentaram comportamentos distintos. Estes resultados são respectivamente apresentados através dos gráficos das Figura 41 e Figura 42, onde pode-se notar que a maioria dos campos de tensão residual presentes no torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 316L é de tração. Sendo difícil separar a influência de um efeito mecânico da influência de um efeito térmico.

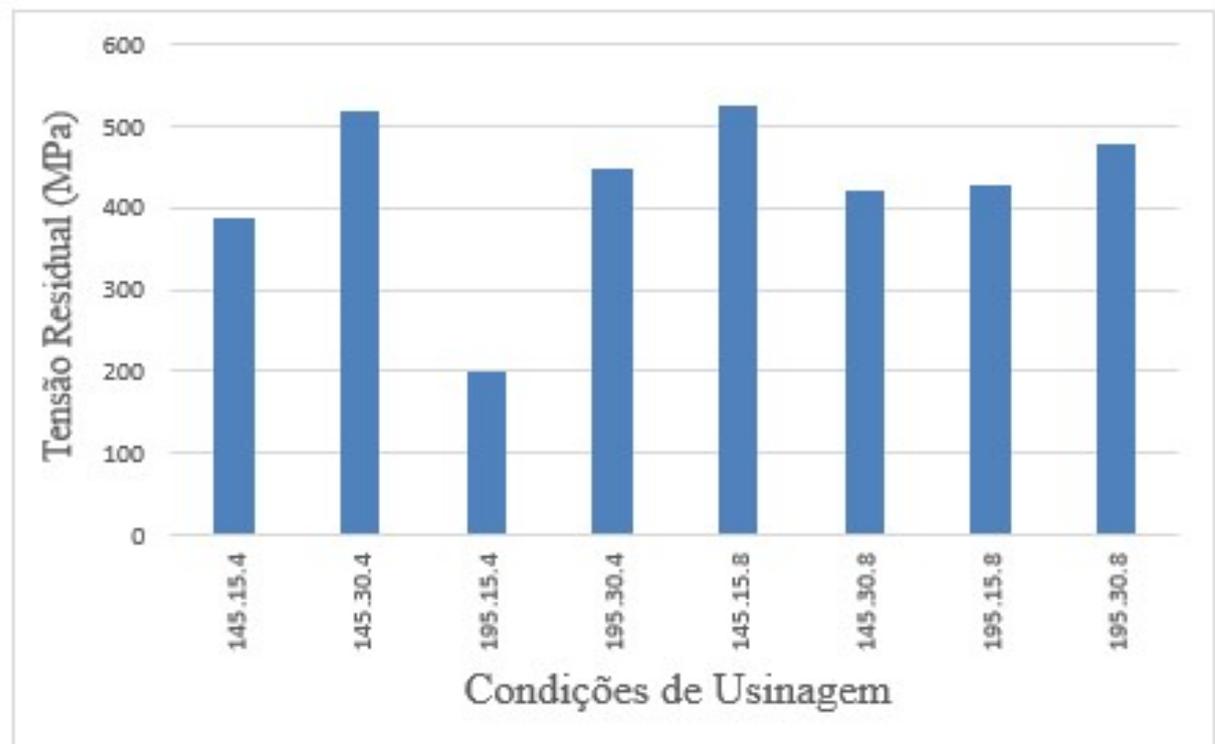
Nota-se grande variação nos resultados das tensões residuais no sentido longitudinal, apresentadas na Figura 41, sendo que foram encontrados valores de tensão residual de tração e de compressão, enquanto que os resultados das tensões residuais no sentido transversal se mostraram mais homogêneas, sendo todas elas de natureza trativas, conforme apresentado na Figura 42.

Figura 41 - Tensões residuais na direção longitudinal das condições analisadas



Fonte: Autoria própria

Figura 42 - Tensões residuais na direção transversal das condições analisadas



Fonte: Autoria própria

As tensões residuais superficiais presentes nos materiais submetidos ao processo de torneamento estão estritamente associados ao grau de deformação ao qual a superfície usinada esteve submetida. Assim sendo, o resultado dos fatores que contribuem com o cisalhamento do material, contrariamente à deformação, tende a produzir tensões residuais menores.

O incremento no raio de ponta da ferramenta e no avanço ocasiona aumento da porção de material a ser removido a cada rotação da peça. Visto que o aço inoxidável austenítico AISI 316L pode ser considerado um material dúctil, maior será a deformação à qual a porção de material estará sujeita, gerando aumento na tensão residual. Já o incremento da velocidade de corte ocasiona um efeito inverso, uma vez que a deformação diminui com o incremento da mesma.

4.4.1 Influência do Raio de Ponta nas Tensões Residuais

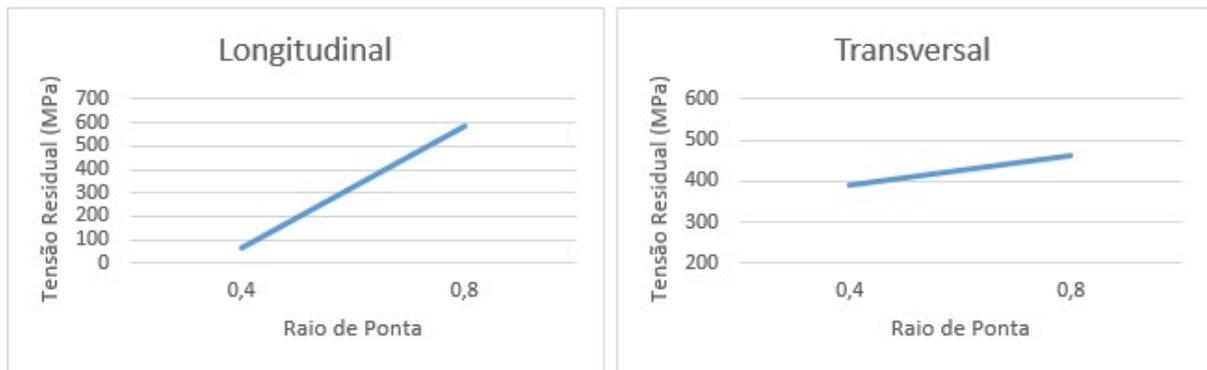
A análise da Figura 41 indica que as condições de usinagem 145.15.4 e 195.15.4 que utilizaram ferramenta com raio de ponta 0,4 mm e avanço de 0,15 mm/volta, variando apenas a velocidade de corte nas duas situações, é benéfica ao material, pois apresentaram tensões residuais longitudinais de natureza compressiva, o que pode inclusive aumentar a vida em fadiga. Quando o valor do avanço é aumentado para 0,30 mm/volta, mantendo-se o mesmo raio de ponta da ferramenta e as mesmas velocidades de corte (145.30.4 e 195.30.4), são encontrados valores de tensão residual trativa na superfície, o que é deletério à resistência à fadiga e à corrosão sobtensão.

A intensidade das tensões residuais trativas e compressivas nestas quatro condições onde o corte ocorreu com ferramenta de raio de ponta de 0,4 mm é pequena, no entanto, esta intensidade aumenta significativamente nas condições que são obtidas com ferramenta de raio de ponta de 0,8 mm. Com a utilização deste raio de ponta, todas as tensões residuais encontradas foram de tração (acima de 500 MPa), apresentando uma leve variação em função do avanço empregado, indicando tensões maiores nas amostras que foram obtidas com o maior avanço (acima de 600 MPa).

Essa significativa influência do raio de ponta da ferramenta sobre as tensões residuais superficiais na direção do avanço da ferramenta já foi reportado por (NASCIMENTO, 2016). Resultados estes que diferem um pouco dos encontrados por (BIASIBETTI, 2018), o qual constatou que o raio de quina da ferramenta não se mostrou tão significante quanto o efeito do avanço e da velocidade de corte.

Nos gráficos apresentados na Figura 43, pode-se verificar isoladamente a influência do raio de ponta da ferramenta nas tensões residuais em ambos os sentidos, indicando que a sua mudança causa mais efeito na tensão longitudinal em comparação com a transversal.

Figura 43 - Gráficos do efeito do raio de ponta nas tensões residuais



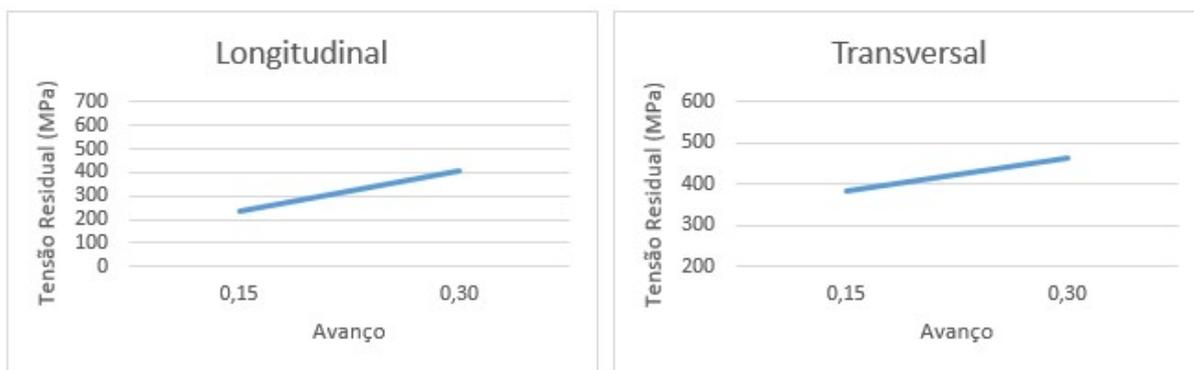
Fonte: Autoria própria

Uma possível explicação para este aumento na intensidade das tensões residuais é que o maior raio de ponta da ferramenta promove maior contato com a peça, contribuindo para o aumento do atrito e da temperatura nas zonas de cisalhamento primária e secundária. A elevação da temperatura de corte provoca a dilatação da camada superficial da peça, a qual traciona as camadas inferiores que não sofrem o mesmo aumento de temperatura e se deformam plasticamente. Com o resfriamento da superfície, ocorre a contração da camada externa que retorna a dimensão inicial, no entanto, esta encontra resistência nas camadas inferiores deformadas plasticamente, resultando em alta tensão residual de tração na superfície.

4.4.2 Influência do Avanço nas Tensões Residuais

Com relação a influência do avanço nas tensões residuais longitudinais e transversais, os resultados mostram que ele influencia diretamente a amplitude dos valores das tensões em ambas as direções, no entanto, com intensidades diferentes. Nas condições de usinagem obtidas com o menor avanço (0,15 mm/volta) os valores das tensões residuais transversais apresentados foram levemente inferiores aos valores obtidos com o maior avanço (0,30 mm/volta), enquanto que a diferença nas tensões residuais longitudinais foi mais expressiva, conforme pode ser observado na análise estatística apresentada na Figura 44.

Figura 44 - Gráficos do efeito do avanço nas tensões residuais



Fonte: Autoria própria

É possível verificar o efeito do avanço de forma isolada através da comparação entre as tensões residuais das amostras 195.15.8 e 195.30.8, Figura 41 e Figura 42. Na direção do avanço verifica-se um aumento da tensão residual na superfície de 486,4 MPa (amostra 195.15.8, $f=0,15$ mm/rot) para 665,5 MPa (amostra 195.30.8, $f=0,30$ mm/rot). Foi observado também na direção da velocidade de corte está menor tensão residual na superfície da amostra 195.15.8 (428,3 MPa) em relação a 195.30.8 (477,1 MPa). Isto é evidente, pois as condições que possuem o corte mais moderado, resultando na utilização de menores taxas de remoção de cavacos (baixo avanço), demonstram que, como poderia se supor, geram tensões residuais menores. Outra possível explicação para o aumento das tensões residuais com o incremento do avanço pode ser a elevação da temperatura de corte, gerada pelo aumento da espessura do cavaco, que aumenta as deformações plásticas, conforme já relatado por (PINTO; CARVALHO FILHO; MEDEIROS, 2018).

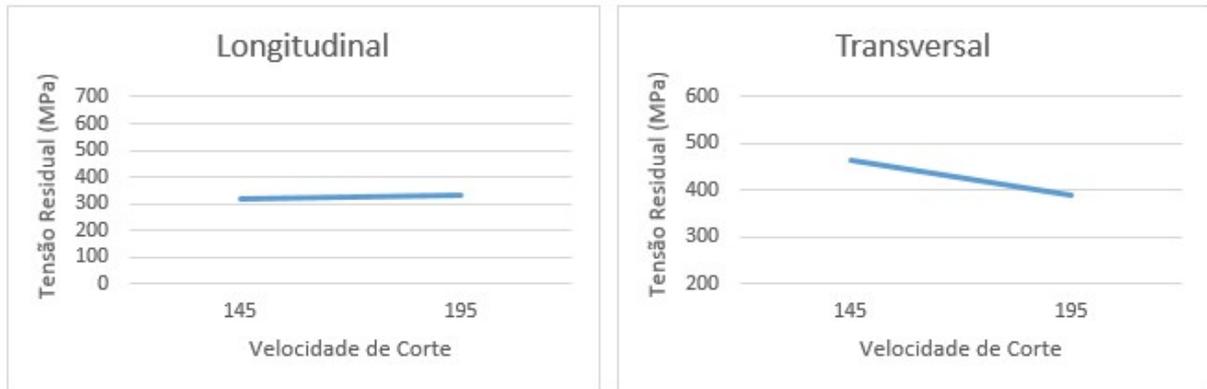
A manipulação do avanço no torneamento resulta em tensões trativas de maior intensidade na superfície na direção do avanço e um aumento discreto das tensões na direção da velocidade de corte, resultados estes que já foram observados por (BIASIBETTI, 2018; CABRERA; MOLINER; SILVEIRA, 2015; GUNNBERG; ESCURSELL; JACOBSON, 2006; NASCIMENTO, 2016).

4.4.3 Influência da Velocidade de Corte nas Tensões Residuais

A variação da velocidade de corte teve uma influência mais expressiva na tensão residual no sentido transversal se comparado a tensão longitudinal, conforme apresentado na Figura 45, o que já era esperado, uma vez que a tensão residual no sentido transversal é aquela obtida no sentido da velocidade de corte. Essa forte influência da velocidade de corte sobre as tensões residuais na direção da velocidade de corte e uma influência praticamente nula na

direção do avanço foi reportado por (GUNNBERG; ESCURSELL; JACOBSON, 2006) e (CABRERA; MOLINER; SILVEIRA, 2015).

Figura 45 - Gráficos do efeito da velocidade de corte nas tensões residuais



Fonte: Autoria própria

Conforme já reportado por (BEN MOUSSA; SIDHOM; BRAHAM, 2012) e (CABRERA; MOLINER; SILVEIRA, 2015), em elevados valores de velocidade de corte deve ser observado uma redução das tensões residuais na superfície. Através da Figura 42, observa-se que a tensão residual transversal diminui em praticamente todas as condições em que ocorre o aumento da velocidade de corte (V_c) de 145 para 195 m/min, com os demais fatores de torneamento não sofrendo alteração em cada uma das comparações efetuadas. Isso fica evidente ao comparar a coluna da condição 145.15.4 em relação a 195.15.4, ou da condição 145.30.4 em relação a 195.30.4 ou ainda da condição 145.15.8 em relação a 195.15.8.

Uma possível explicação para isso é que com maiores taxas de remoção de material mais calor é gerado na zona de corte, mas ao mesmo tempo uma maior quantidade de calor pode ser dissipada pelo cavaco. Assim, o aumento na taxa de remoção de material pode resultar em um efeito térmico de menor intensidade, o que provavelmente ocorreu no presente trabalho, conforme já descrito por (PINTO; CARVALHO FILHO; MEDEIROS, 2018), (SALMAN et al., 2019) e (QUINTAS, 2021).

Segundo os autores (SARNOBAT; RAVAL, 2019), com a menor velocidade de corte o tempo de contato entre a ferramenta de corte e a peça é prolongado o suficiente para que mais calor se propague pela superfície da peça. Em contra partida, com a maior velocidade de corte, maior é a taxa de remoção de material e menor é o tempo de contato entre cavaco removido e a ferramenta, resultando em uma maior taxa de calor sendo evacuado pelo cavaco e menos calor sendo gerado devido ao atrito entre a ferramenta e o cavaco.

A exceção ficou por conta da comparação efetuada entre a condição 145.30.8 em relação a 195.30.8, na qual esta última apresentou maior tensão residual, mesmo sendo obtida com velocidade de corte mais elevada, destoando da maioria dos resultados obtidos.

4.5 Quadro Comparativo Qualitativo das Respostas Obtidas

Na Tabela 10 é apresentado um quadro comparativo entre os dados analisados neste trabalho, onde é possível verificar os efeitos das diferentes combinações dos parâmetros de entrada e suas respostas em cada um dos critérios verificados. De acordo com a tabela apresentada podemos verificar que as diferentes condições de corte apresentam resultados diferentes em cada um dos critérios de saída analisados.

Tabela 10 – Resposta de cada critério analisado conforme condição utilizada

Condição	Rugosidade	Camada Endurecida	Tensão Residual
145.15.4	Baixa	Pequena	Compressiva
145.30.4	Alta	Média	Trativa Baixa
195.15.4	Baixa	Pequena	Compressiva
195.30.4	Alta	Média	Trativa Baixa
145.15.8	Baixa	Alta	Trativa Alta
145.30.8	Média	Alta	Trativa Alta
195.15.8	Baixa	Média	Trativa Alta
195.30.8	Média	Média	Trativa Alta

Fonte: Autoria própria

Dentre as combinações de parâmetros de corte que foram utilizados neste experimento, temos quatro condições de corte que geram rugosidades baixas, um dos principais objetivos na grande maioria dos processos de usinagem. De acordo com estes resultados, podemos verificar que é possível obter baixos valores para a rugosidade superficial em condições que empregaram a menor velocidade de corte e também a maior velocidade de corte, assim como também com os dois raios de ponta da ferramenta empregados no estudo. No entanto, estes valores de rugosidade só se mantiveram baixos em condições em que o menor avanço de corte da ferramenta foi empregado, aumentando significativamente quando esta variável é aumentada.

Se analisarmos os resultados obtidos em função da camada endurecida, podemos dizer que as melhores combinações de dados de corte estão nas condições que utilizaram o menor

avanço de corte da ferramenta e o menor raio de ponta de ferramenta, condições estas responsáveis por produzir a menor camada endurecida entre todas as condições analisadas, tanto com a menor quanto com a maior velocidade de corte. Isso quer dizer que quando se utiliza uma ferramenta com um pequeno raio de ponta combinado com um pequeno avanço de corte, a velocidade de corte não tem influência significativa na camada endurecida. Em contrapartida, as condições em que se utilizou a menor velocidade de corte, combinada com o maior raio de ponta da ferramenta, resultaram em amostras com uma maior camada endurecida.

Quando verificamos a coluna da tensão residual, podemos ver que obtivemos tensões de baixa e alta intensidade, sendo que estes resultados são diretamente proporcionais ao raio de ponta utilizado pela ferramenta, uma vez que as quatro condições que utilizaram o menor raio de ponta apresentaram baixos valores de tensão residual, tanto trativa quanto compressiva. Em contrapartida, as condições que utilizaram a ferramenta com o maior raio de ponta, apresentaram superfícies com altos valores de tensão residual.

Baseando-se na tabela apresentada para analisar a integridade superficial das peças obtidas no processo de torneamento com as oito diferentes condições de corte, podemos dizer que os parâmetros de corte que menos danos geram a superfície do material estão nas condições 145.15.4 e 195.15.4. Ambas as condições apresentaram um baixo valor de rugosidade média, a menor camada endurecida juntamente da menor tensão residual compressiva, indicando serem as condições que apresentam as variáveis de corte que menos agridem a integridade superficial dos componentes.

As condições 145.30.4 e 195.30.4 também apresentaram baixos valores de tensão residual, de natureza trativa, indicando se tratar de condições que também resultam em superfícies com uma boa integridade superficial, no entanto, estas duas condições apresentaram altos valores de rugosidade média e uma profundidade maior da camada endurecida. Esta combinação resulta em uma superfície que teve sua integridade agredida de forma razoável.

Todas as condições de corte que foram analisadas utilizando ferramentas com raio de ponta 0,8, apresentaram superfícies com valores de tensão residual elevado, o que é prejudicial para a integridade do material, além disso, estas condições também apresentaram camadas endurecidas em profundidades maiores, se mostrando não serem as melhores opções quando o assunto é a integridade superficial do componente manufaturado.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi analisada a integridade superficial de um aço inoxidável austenítico AISI 316L submetido a processo de torneamento, que foi realizado com a combinação de diferentes parâmetros de corte. O objetivo foi estudar os resultados destas variações na integridade superficial do material após processo de torneamento cilíndrico externo. Seguem abaixo, as conclusões obtidas:

- O avanço é o maior influenciador nos valores dos parâmetros de rugosidade medidos, sendo os menores valores de rugosidade nos parâmetros de R_a e R_z proporcionados pelos menores valores de avanço.
- O raio de ponta da ferramenta foi o segundo fator mais significativo nos parâmetros de rugosidade R_a e R_z , sendo que estes reduzem à medida que o raio de ponta aumenta.
- A velocidade de corte mostrou ser um fator de pouca influência sobre a rugosidade, quando comparado com os demais fatores, tanto para os parâmetros de R_a quanto R_z .
- A utilização de um maior raio de ponta da ferramenta gera menores valores de rugosidade, no entanto, esta situação apresenta um encruamento e elevação nos valores de dureza em maiores profundidades.
- A variação da velocidade de corte mostrou variações no perfil de dureza, sendo que maiores velocidades causam alteração de dureza em menores profundidades.
- Considerando as condições ensaiadas, as tensões residuais longitudinais induzidas na peça pela operação de corte, tendem a se tornar menos trativas ou compressivas com a diminuição do avanço de corte.
- Uma menor intensidade da tensão residual trativa da superfície gera menor dureza da subsuperfície.
- A velocidade de corte mostrou ser, entre os parâmetros analisados, o de menor influência nas tensões residuais.
- Os parâmetros de usinagem que possuem maior impacto no perfil das tensões residuais são o avanço e o raio de ponta da ferramenta, sendo que sua influência só foi perceptível nas tensões longitudinais.
- Quanto maior o raio de ponta da ferramenta, maiores serão os valores das tensões residuais introduzidas na superfície.
- Os melhores parâmetros de corte identificados neste estudo utilizam o menor avanço e o menor raio de ponta da ferramenta, combinado com qualquer valor de velocidade de corte.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar novos parâmetros de usinagem, como variação da profundidade de corte e da geometria da ferramenta, e verificar suas influências na integridade superficial no torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 316L.
- Verificar a influência da utilização do fluido de corte em diferentes vazões na integridade superficial de um aço inoxidável austenítico AISI 316L submetido ao processo de torneamento.
- Realizar testes de longa duração para avaliar o desgaste, mecanismos de desgaste e o tempo de vida da ferramenta com as diferentes condições de usinagem utilizadas neste trabalho.
- Analisar a influência do desgaste da ferramenta na integridade superficial do aço inoxidável austenítico AISI 316L nas diferentes condições de usinagem.
- Medir as forças de corte durante o processo de torneamento para verificar a influência da variação dos esforços na integridade superficial do material.
- Analisar os perfis da tensão residual em camadas subsuperficiais através de diferentes métodos, como a própria difração de raios-X e furo cego, para comparação de resultados.
- Estudar o efeito da rugosidade e da tensão residual superficial para a vida em fadiga do aço inoxidável austenítico AISI 316L.
- Ensaio de corrosão nas amostras obtidas com as diferentes condições de usinagem e sua relação com a integridade superficial do aço inoxidável austenítico AISI 316L.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1323, A. N. **Determinação do tamanho de grão em materiais metálicos**. 1990.

ABNT NBR 5601. **Aços Inoxidáveis**. Classificação por Composição Química. **Anais...**2011.

ABNT NBR ISO 4287. **Termos, Definições e Parâmetros de Rugosidade**. Especificações Geométricas do Produto (GPS) - Rugosidade - Método do Perfil. **Anais...**2002.

AGRAWAL, A. K.; SINGH, APARNA. Limitations on the hardness increase in 316L stainless steel under dynamic plastic deformation. **Materials Science & Engineering A**, v. 687, p. 306–312, 2018.

ASM, A. S. F. M. **Handbook, Machining of Stainless Steel**. ASM International, 1989.

ASM, A. S. F. M. **ASM Handbook - Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys**. 10ª ed. ASM International, 1990.

ASM, (AMERICAN SOCIETY OF METALS). **Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels**. ASM International, 1995.

ASME. **ASME B46.1 - 2009: Surface texture (surface roughness, waviness, and lay)**. Disponível em: <<https://asme.org/products/codes-standards/b461-2009-surface-texture-surface-roughness>>.

ASTM A312/A312OM-17. **Standard Specification for Seamless, Welded, and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipes**. ASTM International, 2017.

ASTM E384-11EL. **Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.

ATLAS. Technical Handbook of Stainless Steel. Em: **Atlas Steel**. p. 49.

AYDOGDU, G. H.; AYDINOL, M. K. Determination of susceptibility to intergranular corrosion and electrochemical reactivation behaviour of AISI 316L type stainless steel. **Corrosion Science**, v. 48, p. 3565–3583, 2006.

BARBOSA, L. W. G. **Influência dos parâmetros de usinagem na integridade superficial da liga biomédica de CoCr ASTM F75**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2019.

BARBOSA, P. A. **Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

BEN MOUSSA, N.; SIDHOM, H.; BRAHAM, C. Numerical and experimental analysis of residual stress and plastic strain distributions in machined stainless steel. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 64, p. 82–93, 2012.

BHATTACHARJEE, A.; AMARNATH, L.; DUTTA, KRISHNA. Ratcheting Behaviour of a Sensitized Non-Conventional Austenitic. **Procedia Engineering**, v. 184, p. 756–764, 2017.

BIASIBETTI, G. R. D. SANTOS. **Integridade da Superfície Usinada no Torneamento de Barras de Aço ABNT 1045**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

BONIARDI, M.; CASAROLI, A. **Stainless steels**. Milão: Grupo Lucefin, 2014.

CABRERA, J. M.; MOLINER, R. T.; SILVEIRA, J. L. L. The influence of cutting speed and feed rate in surface integrity of AISI 1045. **Ingeniería Mecánica**, v. 18, n. 3, p. 203–210, 2015.

CAMPOS, V. H. G. DE. **Caracterização e monitoramento da martensita induzida por deformação no aço AISI 304L através do ruído magnético de Barkhausen**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2019.

CARBÓ, H. M. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. ArcelorMittal Inox Brasil, 2008.

CARVALHO FILHO, E. T. DE. **Estudo da Evolução das Tensões Residuais Através da Difratometria de Raios X em Aço Rolamento Submetido a Esforços Cíclicos**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 4ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1979.

DAVIM, J. P. **Surface Integrity in Machining**. 1ª ed. Londres: Springer-Verlag, 2010.

DAVIS, J. **Alloy digest sourcebook: Stainless steel**. 1ª ed. ASM International, 2000.

DAVIS, J. R. **ASM Specialty Handbook: Stainless Steels**. 1ª ed. Ohio: ASM International, 1994.

DAVIS, J. R. **Handbook of Materials for Medical Device**. 1ª ed. Materials Park: ASM International, 2003.

DAVISON, R. M.; REDMOND, J. D. Practical guide to using duplex stainless steels. **Materials performance**, v. 29, n. 1, p. 57–62, 1990.

DIN8580. **Manufacturing Processes - Terms and Definitions, Division**. Deutches Institut für Normung, 2003.

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

DOERR, C. et al. Evaluation of sensitization in stainless steel 304 and 304L using nonlinear Rayleigh waves. **NDT & E International**, v. 88, p. 17–23, 2017.

DOSSETT, J. L.; BOYER, H. E. **Practical Heat Treating**. 2ª ed. ASM International, 2006.

FENG, Y. et al. Keyhole gas tungsten arc welding of AISI 316L stainless steel. **Materials and Design**, v. 85, p. 24–31, 2015.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2003.

GALDEMAWLA, E. S. et al. Roughness Parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 123, n. 1, p. 133–145, 2002.

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

GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1996.

GUNN, R. N. **Duplex Stainless Steels: Microstruture, properties and Applications**. Woodhead Publishing Ltd, 1997.

GUNNBERG, F.; ESCURSELL, M.; JACOBSON, M. The influence of cutting parameters on residual stresses and surface topography during hard turning of 18MnCr5 case carburised steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 174, p. 82–90, 2006.

HOFFMANN, P. R. et al. Influência dos Parâmetros de Usinagem na Rugosidade Superficial e no Perfil de Dureza do Aço AISI 316 L Submetido a Processo de Torneamento. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, v. 12, n. 4, p. 257–268, 2020a.

HOFFMANN, P. R. et al. Influência dos Parâmetros de Usinagem na Rugosidade Superficial e no Perfil de Dureza do Aço AISI 316 L Submetido a Processo de Torneamento. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologias**, v. 15, n. 15, p. 38–45, 2020b.

HUTCHINGS, M. T. et al. **Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction**. 1ª ed. CRC Press, 2005.

IMOA, I. M. A. **Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stailess Steel**. 1. ed. Londres: IMOA, 2009.

JORGE, A. M.; REIS, G. S.; BALANCIN, O. Influence of the microstruture on the plastic behavior of duplex stainless steels. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, n. 6, p. 2259–2264, 2011.

KLOCKE, F. Machining and Machinability. **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**, p. 4683–4688, 2001.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. 1ª ed. Londres: Editora Springer, 2011.

KUMAR, D. H.; REDDY, A. S. Study of mechanical behavior in austenitic stainless steel 316 LN welded joints. **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research**, v. 2, n. 1, p. 37–56, 2013.

LABIAPARI, W. S. et al. Micro abrasion-corrosion of ferritic stainless steels. **Wear**, v. 376–377, p. 1298–1306, 2017.

LARA, A. P. DE; FAVRETTO, B. B.; POLLI, M. L. Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Torneamento do Latão. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM)**, v. 21-25 Ago, Fortaleza-Ceará, 2016.

LISCHKA, F. T. **Efeito do cobre e da deformação no efeito TRIP de um aço inoxidável austenítico AISI 304, avaliado por diversos metodos de análise**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

LU, J. **Handbook of Measurements of Residual Stress**. ASM International, 1996.

LU, J. Prestress Engineering of Structural Material: A Global Design Approach to the Residual Stress Problem. Em: **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. Ohio: ASM International, 2002. p. 11.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2015.

MACHADO, C. DE S. C. **Perfis de Tensão Residual do Aço Duplex UNS S32304 Submetido a Diferentes Processos de Soldagem Tig e Condições de Tratamento Térmico**. Dissertação de Mestrado, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, 2015.

MARQUES, F. M. **Avaliação do Desempenho de Brocas Helicoidais de Aço Rápido Revestidas na Usinagem de Ferro Fundido Nodular GGG50**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

MARQUES, F. M. et al. Influência do processo de usinagem na integridade superficial e propriedades da liga de aço inox austenítico F138 e AISI 316L. **9º Congresso Latino-Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais (9º Colaob)**, v. 24-27 ago, n. Foz do Iguaçu, Paraná, 2016.

MARQUES, F. M. et al. The Influence of Surface Condition on the Electrochemical Properties of ASTM F138 Steel for Biomedical Applications. **MATERIALS RESEARCH**, v. 24, p. 1–11, 2021.

MARQUES, F. M. **INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE USINAGEM NA INTEGRIDADE SUPERFICIAL E PROPRIEDADES DA LIGA DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO ASTM F138 APLICADO EM PRÓTESES**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

MAUROTTO, A. et al. Effects of machining abuse on the surface properties of AISI 316L stainless steel. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 151, p. 35–44, 2017.

MCGUIRE, M. **Stainless Steels for Design Engineers**. 1ª ed. Ohio: ASM International, 2008.

MICHELON, A. O. et al. Influência da velocidade de avanço da ferramenta de usinagem na resistência à corrosão de dois aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316. **REVISTA IBEROAMERICANA DE INGENIERÍA MECÁNICA**, v. 26, p. 03–09, 2022.

MITU, L. G. **Methods and techniques for bio-systems materials**. Tese de Doutorado, Universitatea Transilvania din Braşov, 2013.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. São Paulo: SENAI, 2001.

NASCIMENTO, M. R. **Avaliação da Integridade Superficial da Liga AL2011F**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2016.

OLIVEIRA JUNIOR, C. A. **Torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 e influência na resistência à corrosão**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2013.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. **Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades**. 1ª ed. Curitiba: Hemus, 1994.

PANDA, A.; DAS, S. R.; DHUPAL, D. Surface roughness analysis for economical feasibility study of coated ceramic tool in hard turning operation. **Process Integration and Optimization for Sustainability**, v. 4, p. 237–249, 2017.

PINTO, V. C.; CARVALHO FILHO, E. T. DE; MEDEIROS, J. T. N. DE. Effects of Cutting Parameters on the Residual Stresses of SAE 1045 Steel after Turning. **Materials Research Proceedings**, v. 6, p. 151–156, 2018.

POLLY, M. DOS S. **Análise Comparativa de Ferramentas de Metal-duro Classe S e Cerâmica Mista no Torneamento a Seco e com MQL do Aço SAE 4340 Endurecido**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

POURBAIX, M. **Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions**. Texas: National Association of Corrosion Engineers, 1974.

QUINTAS, T. S. **Influência dos parâmetros e geometrias de corte nas tensões residuais geradas na usinagem de aço supermartensítico**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, 2021.

RAJAGURU, J.; ARUNACHALAM, N. Investigation on machining induced surface and subsurface modifications on the stress corrosion crack growth behaviour of super duplex stainless steel. **Corrosion Science**, v. 141, p. 230–242, 2018.

REVEL, P. et al. High precision hard turning of AISI 52100 bearing steel. **Precision Engineering**, v. 43, p. 24–33, 2016.

RIBEIRO FILHO, S. L. M. et al. Influence cutting parameters on the surface quality and corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy in synthetic body environment (SBF) using Response Surface Method. **Measurement**, v. 88, p. 223–237, 2016.

ROSA, G. C. DA. **Estudo da Usinabilidade no Torneamento a Seco do Aço Inoxidável Martensítico AISI 420 C Endurecido com Ferramenta de Metal-duro**. Tese de doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

SALMAN, K. H. et al. Effect of cutting parameters on surface residual stresses in dry turning of AISI 1035 alloy. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, n. 8, 2019.

SANDVIK COROMANT. **Materiais da Peça**. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>>. Acesso em: 9 out. 2020.

SANTOS, D. V. DOS. **Torneamento do Aço Inoxidável Supermartensítico sob Lubri-refrigeração com Baixa e Alta Pressões**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Artliber, 2007.

SARNOBAT, S. S.; RAVAL, H. K. Experimental investigation and analysis of the influence of tool edge geometry and work piece hardness on surface residual stresses, surface roughness and work-

hardening in hard turning of AISI D2 steel. **Journal of the International Measurement Confederation**, v. 131, p. 235–260, 2019.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. 2ª ed. New York: Oxford University Press, 2005.

SILVA, A. L. V. DA C. E.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 3ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2010.

SILVERSTEIN, R.; ELIEZER, D.; GLAM, B. Hydrogen Effect on Duplex Stainless Steels at very High Strain Rates. **Energy Procedia**, v. 1, n. 107, 2017.

SÓRIA, B. S. **Estudo do Comportamento das Vibrações em Fresamento Frontal do Aço Inoxidável AISI 316 Utilizando Transformada de Wavelet**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

SOUZA, A. J. DE. **Apostila de Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

SOUZA, M. F. DE. **Estudo das Propriedades Mecânicas e Tensões Residuais de Juntas Soldadas de Aço AISI 316L**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, 2017.

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

TISHLER, D. N. **Introduction to Surface Integrity**. Cincinnati, Ohio General Electric, 1970.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4ª ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.