

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA – CEFET-RJ**

**Influência da Velocidade de Corte na Integridade  
Superficial em Torneamento de Aço Inoxidável  
Duplex**

Beatriz Leite Braga da Silva

Prof. Orientadora: Tatiane de Campos Chuvas

**Rio de Janeiro  
Junho de 2017**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA – CEFET-RJ**

# **Influência da Velocidade de Corte na Integridade Superficial em Torneamento de Aço Inoxidável Duplex**

Beatriz Leite Braga da Silva

Projeto final apresentado em cumprimento às  
normas do Departamento de Educação Superior  
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientadora: Tatiane de Campos Chuvas

**Rio de Janeiro  
Junho de 2017**

## Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S586 Silva, Beatriz Leite Braga da  
Influência da velocidade de corte na integridade superficial em  
torneamento de aço inoxidável duplex / Beatriz Leite Braga da  
Silva.—2017.  
x, 56f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.  
Bibliografia : f. 54-56  
Orientadora : Tatiane de Campos Chavas

1. Engenharia mecânica. 2. Torneamento. 3. Máquinas-  
ferramenta. 4. Aço inoxidável. 5. Metais – Corte. I. Chavas, Tatiane  
de Campos (Orient.). II. Título.

CDD 621

## **AGRADECIMENTOS**

À professora Tatiane de Campos Chuvras, a quem sou eternamente grata pela atenção, paciência e dedicação que me foi oferecida integralmente durante todas as etapas deste projeto.

Aos meus pais, Lucia Helena Leite e Jocimar Luiz da Silva, pelo amor, paciência e suporte à minha formação acadêmica e profissional.

Aos professores, Matheus Compolina Mendes, Luiz Felipe Guimarães e Luiz Roberto Oliveira da Silva, pelo auxílio e permissão para a realização das etapas experimentais.

Ao técnico, Hiron Akira Yamada Magalhães, pelo auxílio na preparação das amostras utilizadas na elaboração do trabalho.

Aos meus amigos, Caio Ramiro Torres, Marília Alice Piedade, Mariana Leite Corrêa e Lucas Mazolli Veiga, pelo apoio e amor durante a evolução da minha graduação.

Ao engenheiro Reggiano Santos, por todo apoio ao início da minha carreira profissional e pelo suporte ao desenvolvimento deste estudo.

Ao CEFET-RJ / Maracanã, por ser a instituição de ensino que suportou toda a minha formação acadêmica, do ensino médio e técnico à graduação.

## RESUMO

Os aços inoxidáveis duplex são materiais com microestrutura bifásica, constituídos por ferrita e austenita, caracterizados pela combinação de suas propriedades, apresentando boa resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas. No processo de usinagem, os aços inoxidáveis duplex apresentam altas taxas de rugosidade superficial, formação instável de cavaco, alta resistência à fratura, resultando na formação de arestas postiças de corte e alto desgaste da ferramenta. Para otimizar os parâmetros de corte, o estudo de suas variações e influência nos processos de usinagem é de suma importância. O objetivo deste trabalho foi analisar a influência da velocidade de corte ( $V_c$ ), em um processo de torneamento, na integridade da superfície do aço inoxidável duplex UNS S31803, através da caracterização microestrutural do aço como recebido, análise de rugosidade e microdureza. Foram utilizadas seis condições de corte durante o torneamento do material, utilizando parâmetros constantes de profundidade de corte e avanço ( $ap = 0,3$  mm e  $f = 0,094$  mm/rot) e variando a velocidade de corte (valores entre 30 e 150 m/min). Entre as condições empregadas, apenas a sexta condição,  $V_c = 150$  m/min, estava dentro dos parâmetros indicados como ideais pelo fabricante da ferramenta. Para a caracterização do aço, realizou-se a análise da fração volumétrica de austenita e ferrita presentes na microestrutura, resultando em aproximadamente 49,6% de austenita. Na análise de rugosidade, os valores mais baixos de  $R_a$  foram mostrados nas condições de  $V_c$  iguais a 75 e 150 m/min, indicando que, assim como os aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, os aços inoxidáveis duplex possuem uma faixa de velocidade de corte ideal para sua usinagem, onde as faixas intermediárias favorecem a formação de arestas postiças, prejudicando a integridade superficial do material usinado. Na análise de microdureza, não houve variação significativa dos valores de microdureza HV0,2 em função da variação da velocidade de corte. Embora tenha sido observado um aumento significativo nos resultados em comparação com a dureza do material recebido (240 HV), devido ao encruamento esperado da superfície após um processo de torneamento.

Palavras-chaves: torneamento, velocidade de corte, integridade superficial, aço inoxidável duplex.

## ABSTRACT

The duplex stainless steels are materials with a biphasic microstructure, consisting of ferrite and austenite, therefore are characterized by the combination of their properties, presenting a good corrosion resistance and good mechanical properties. In the machining process, the duplex stainless steels have high surface roughness rates, unstable chip formation, high fracture resistance, resulting in the formation of built-up edges and high tool wear. In order to optimize the cutting parameters, the study of their variation and influence in the machining processes are of paramount importance. The objective of this investigation was to analyze the influence of the cutting speed ( $V_c$ ), in a turning process, on the surface integrity of the duplex stainless steel UNS S31803, according to a microstructural characterization of the steel (as received) and a roughness and microhardness analysis. Six cutting conditions were employed during the turning of the material, using constant parameters of depth of cut and feed rate ( $ap = 0.3$  mm and  $f = 0.094$  mm/rot), and varying the cutting speed (values between 30 and 150 m/min). Among the conditions employed, only the sixth condition,  $V_c = 150$  m/min, was within the parameters indicated as ideal by the tool manufacturer. For the characterization of the steel, it was conducted the analysis of the volumetric fraction of austenite and ferrite present in the microstructure, resulting in approximately 49,6% of austenite. In the analysis of the roughness, the lowest values of  $Ra$  were shown in the conditions of  $V_c$  equal to 75 and 150 m/min, indicating that as well as the ferritic and austenitic stainless steels, duplex stainless steels have an optimal cutting speed range for their machining, where intermediate speeds favor the formation of built-up edges, detrimental to the surface integrity of the machined material. In the microhardness analysis, there was no significant variation of the microhardness  $HV_{0,2}$  values as a function of the cutting speed variation. Although it was observed a significant increase on the results compared to the hardness of the material as received (240 HV), due to the expected surface hardening after a turning process.

Keywords: turning, cutting speed, surface integrity, duplex stainless steels

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	2
1.2. Objetivo .....	2
1.3. Metodologia .....	2
2. Revisão Bibliográfica .....	3
2.1. Aços Inoxidáveis .....	3
2.1.1. Aços Inoxidáveis Duplex .....	5
2.1.2. Aço Inoxidável Duplex S31803 .....	10
2.2. Torneamento .....	14
2.2.1. Parâmetros e variáveis do processo de torneamento .....	17
2.2.2. Forças de Corte .....	19
2.2.3. Geração de Cavaco .....	20
2.3. Integridade Superficial .....	21
2.3.1. Rugosidade .....	22
2.3.2. Dureza .....	24
2.3.3. Análise Microestrutural .....	25
3. Materiais e Métodos .....	30
3.1. Aço Inoxidável Duplex UNS 31803 .....	30
3.2. Caracterização Microestrutural do Aço.....	30
3.3. Preparação e Usinagem das Amostras .....	31
3.4. Análise de Rugosidade.....	33
3.5. Análise Microestrutural .....	33
4. Resultados e Discussão .....	34
5. Conclusão .....	42
6. Sugestões para Trabalhos Futuros .....	43
7. Referências Bibliográficas .....	44

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Usinabilidade relativa dos aços inoxidáveis .....	4
<b>Figura 2:</b> Região favorável de velocidade de corte e avanço na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos, adaptado de Machado et al. 2009 .....	5
<b>Figura 3:</b> Microestrutura típica do aço duplex comercial: ferrítica (cinza escuro) e austenítica (cinza claro) .....	6
<b>Figura 4:</b> Microestrutura de um aço inoxidável duplex SAF 2205 após tratamento termomecânico (aumento X400) .....	6
<b>Figura 5:</b> Diagrama de Shaeffler: porcentagem de ferrita e austenita pelos teores de elemento de liga .....	7
<b>Figura 6:</b> Nucleação da fase sigma .....	8
<b>Figura 7:</b> Tubulação de bomba de elevação de água do mar em plataforma de petróleo .....	11
<b>Figura 8:</b> Influência da temperatura de recozimento (a) na resistência mecânica e (b) na variação volumétrica de fases do aço UNS S31803 .....	12
<b>Figura 9:</b> Perfis de microdureza vickers em função da velocidade de sorte (a) ferrita e (b) austenita ( $f = 0,3$ mm/rev, $p = 2$ mm) .....	13
<b>Figura 10:</b> Tipos de cavacos formados na usinagem de metais: (a) cavaco contínuo e (b) cavaco cisalhado .....	15
<b>Figura 11:</b> Classificação de operações de torneamento (a) longitudinal externo (b) longitudinal interno (c) faceamento (d) sangramento (e) helicoidal .....	16
<b>Figura 12:</b> Direção dos movimentos de corte, avanço e efetivo. ....	17
<b>Figura 13:</b> Representação das forças de corte que atuam em uma ferramenta .....	19
<b>Figura 14:</b> Tipos de cavaco, figura adaptada de Besckow (2016) .....	21
<b>Figura 15:</b> Classificação de acabamento na usinagem .....	22
<b>Figura 16:</b> Rugosidade média .....	23
<b>Figura 17:</b> Ensaio de dureza Vickers .....	25
<b>Figura 18:</b> Camadas superficiais dos corpos sólidos submetidos ao processo de corte .....	26
<b>Figura 19:</b> Gráfico de influência dos fatores na força de corte .....	27
<b>Figura 20:</b> Gráfico de influência dos fatores na rugosidade média Ra .....	27
<b>Figura 21:</b> Influência dos parâmetros de corte na temperatura da região de corte ( $^{\circ}\text{C}$ ) .....	28
<b>Figura 22:</b> Efeitos das médias dos parâmetros sobre a rugosidade para operações de acabamento .....	29



<b>Figura 23:</b> Representação das amostras preparadas (unidades em mm) .....	31
<b>Figura 24:</b> Insertos utilizados na usinagem das amostras .....	32
<b>Figura 25:</b> Regiões de amostragem (a) Região 1 (b) Região 4 (c) Região 6 (d) Região 9 capturadas através do microscópio óptico .....	35
<b>Figura 26:</b> Regiões de amostragem (a) Região 1 (b) Região 4 (c) Região 6 (d) Região 9, utilizadas para cálculo da fração austenítica (preto) após processamento no ImageJ .....	36
<b>Figura 27:</b> Gráfico fração volumétrica de austenita x região de Amostragem .....	37
<b>Figura 28:</b> Gráfico Rugosidade Ra x Velocidade de corte .....	38
<b>Figura 29:</b> Ondulações provocadas pela formação de APC na ferramenta (a) amostras na condição 2, velocidade de corte 50 m/min (b) amostras na condição 5, velocidade de corte de 100 m/min .....	39
<b>Figura 30:</b> Tipos de cavaco obtidos (a) condição 1, $V_c = 30$ m/min (b) condição 2, $V_c = 50$ m/min (c) condição 3, $V_c = 60$ m/min (d) condição 4, $V_c = 75$ m/min (e) condição 5, $V_c =$ 100 m/min (f) condição 6, $V_c = 150$ m/min .....	39
<b>Figura 31:</b> Gráfico Dureza x Velocidade de corte .....	41

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Fatores designados e valores de tensão residual e deformação plástica medidas nas direções axial ( $\sigma_A$ e $W_A$ , ao longo do comprimento de amostragem) e tangencial ( $\sigma_T$ e $W_T$ , radialmente) .....	9
<b>Tabela 2:</b> Valores de rugosidade medidos em 3 critérios ( $R_a$ , $R_z$ , $R_{SM}$ em $\mu m$ ) .....	9
<b>Tabela 3:</b> Composição química dos principais aços inoxidáveis duplex utilização em vasos de pressão e aplicações gerais .....	10
<b>Tabela 4:</b> Propriedades físicas do aço inoxidável UNS S31803 .....	10
<b>Tabela 5:</b> Precisão e acabamento superficial obtidos nos processos de torneamento e retificação de uma superfície cilíndrica externa .....	24
<b>Tabela 6:</b> Parâmetros de corte e especificação das ferramentas de corte .....	26
<b>Tabela 7:</b> Valores de rugosidade obtidos nos ensaios de acabamento com altas velocidades de corte .....	29
<b>Tabela 8:</b> Composição química do aço inoxidável duplex UNS S31803 (% de peso) .....	30
<b>Tabela 9:</b> Propriedades mecânicas do aço inoxidável duplex UNS S31803 .....	30
<b>Tabela 10:</b> Parâmetros do inserto .....	32
<b>Tabela 11:</b> Parâmetros de usinagem aplicados .....	33
<b>Tabela 12:</b> Fração Volumétrica da austenita na matriz ferrítica .....	35
<b>Tabela 13:</b> Valores de rugosidade $R_a$ obtidos experimentalmente .....	37
<b>Tabela 14:</b> Microdureza Vickers $HV_{0,2}$ .....	40

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- PRE* – Pitting Resistance Equivalent
- V<sub>c</sub>* – Velocidade de corte [m/min]
- V<sub>e</sub>* – Velocidade de corte efetiva [m/min]
- V<sub>f</sub>* – Velocidade de avanço [mm/min]
- D* – Diâmetro da peça [m]
- N* – Número de rotações por minuto [rpm]
- a<sub>p</sub>* – Profundidade de corte [mm]
- f* – Avanço da ferramenta [mm/min]
- Q* – Taxa de remoção de material
- F<sub>S</sub>* – Força de cisalhamento [N]
- F<sub>c</sub>* – Força de corte [N]
- F<sub>f</sub>* – Força de avanço [N]
- $\phi$  – Ângulo de cisalhamento [°]
- K<sub>S</sub>* – Pressão específica de corte [N/mm<sup>2</sup>]
- A<sub>S</sub>* – Área da Seção de Corte [mm<sup>2</sup>]
- w* – Coeficiente volumétrico de cavaco
- V<sub>cav</sub>* – Volume ocupado pelo cavaco
- V<sub>p</sub>* – Volume ocupado por massa do mesmo material da peça
- R<sub>a</sub>* – Rugosidade média [ $\mu m$ ]
- l<sub>m</sub>* – Posição [mm]
- y<sub>n</sub>* – Ordenada de afastamento em relação à linha média [ $\mu m$ ]
- r<sub>e</sub>* – Raio de ponta da ferramenta [mm]
- t<sub>c</sub>* – Tempo de corte [min]
- L* – Percurso de corte [mm]
- N<sub>p</sub>* – Número de passes
- $\chi_r$  – Ângulo de posição da ferramenta [°]

# CAPÍTULO 1

## Introdução

O estudo dos parâmetros de trabalho e processo dos aços é de suma importância para o desenvolvimento de novas e melhores tecnologias, visando a melhor qualidade dos produtos, a otimização das máquinas-ferramentas e do tempo. Os aços inoxidáveis entram na categoria de aços mais aplicados quando se é necessária alta resistência a corrosão combinado com resistência a altas temperaturas. São muito utilizados nas indústrias de petróleo e gás, energia e química; estas sendo mercados que possuem grande parcela econômica. A grande resistência a corrosão dos aços inoxidáveis está diretamente relacionada ao teor de cromo nessas ligas (acima de 11%). Este fator, inclusive, é o motivo do nome “inoxidável”, já que possuem maior resistência a oxidação quando comparados a outras classes de aço. Os aços inoxidáveis duplex são assim denominados por possuírem duas fases em sua estrutura metalúrgica, a austenita e a ferrita. Combinam assim, as propriedades devidas a cada fase respectivamente; tais como resistência a corrosão, resistência mecânica e usinabilidade. Portanto, satisfazendo necessidades das principais indústrias.

A usinagem é um processo de fabricação altamente utilizado para obtenção de peças com melhor acabamento superficial e de grande complexibilidade. Nos processos de usinagem, o torneamento é o principal processo para obtenção de superfícies de revolução. Durante o processo de usinagem convencional, altas velocidades de corte estão diretamente ligadas ao aumento da temperatura, desta forma, influenciam na integridade superficial da peça usinada. Neste projeto, será estudado, experimentalmente, de que forma a variação do parâmetro de velocidade de corte influencia na integridade superficial. Serão realizadas análise de rugosidade e dureza, além da caracterização microestrutural do aço na condição como recebido.

## **1.1 Motivação**

A integridade superficial após o processo de usinagem de determinado material depende de fatores como o material da peça, do tipo e geometria da ferramenta e dos parâmetros de usinagem, tais como: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. É de grande importância tecnológica o desenvolvimento de estudos sobre como os parâmetros de corte influenciam na integridade superficial após processos como o torneamento.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo deste projeto é entender a influência do parâmetro de velocidade de corte na integridade superficial de um processo de torneamento. O estudo da integridade está relacionado ao parâmetro de rugosidade e a dureza superficial presente na peça trabalhada ao fim do processo de usinagem. A utilização do aço inoxidável dá destaque ao projeto por se tratar de um material altamente aplicado em grandes indústrias que movimentam o setor econômico e ainda não muito explorado no âmbito da usinagem.

## **1.3 Metodologia**

Este projeto foi realizado nas seguintes etapas: revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussão, conclusões e sugestões para trabalhos futuros. Na revisão bibliográfica, foram apresentados conceitos e definições relevantes ao tema de forma a embasar teoricamente a discussão e as conclusões das etapas seguintes. No capítulo de Materiais e Métodos são descritas todas as etapas de trabalho que levaram a obtenção dos dados empíricos. A parte experimental do trabalho resumiu-se em: preparação das amostras a serem usinadas, usinagem das amostras, medição da rugosidade e medição de dureza, além da análise de fração volumétrica do material como recebido. Em Resultados e Discussão é apresentado a análise de dados das etapas, de forma a caracterizar a integridade superficial do material após o processo de torneamento e então, são estabelecidas correlações dos parâmetros de corte com a integridade superficial e a literatura. Finalmente, são apresentadas as conclusões obtidas e sugeridos possíveis pontos de desenvolvimento para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### Revisão Bibliográfica

#### 2.1 – Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são uma classe de aços conhecidos pelo elevado teor de cromo (Cr). Essa adição, fornece a esta classe, resistência a corrosão, oxidação e resistência a trabalho em altas temperaturas, denominando inoxidável justamente por apresentar tais propriedades. Essa classe de aços pode ser dividida em [1]:

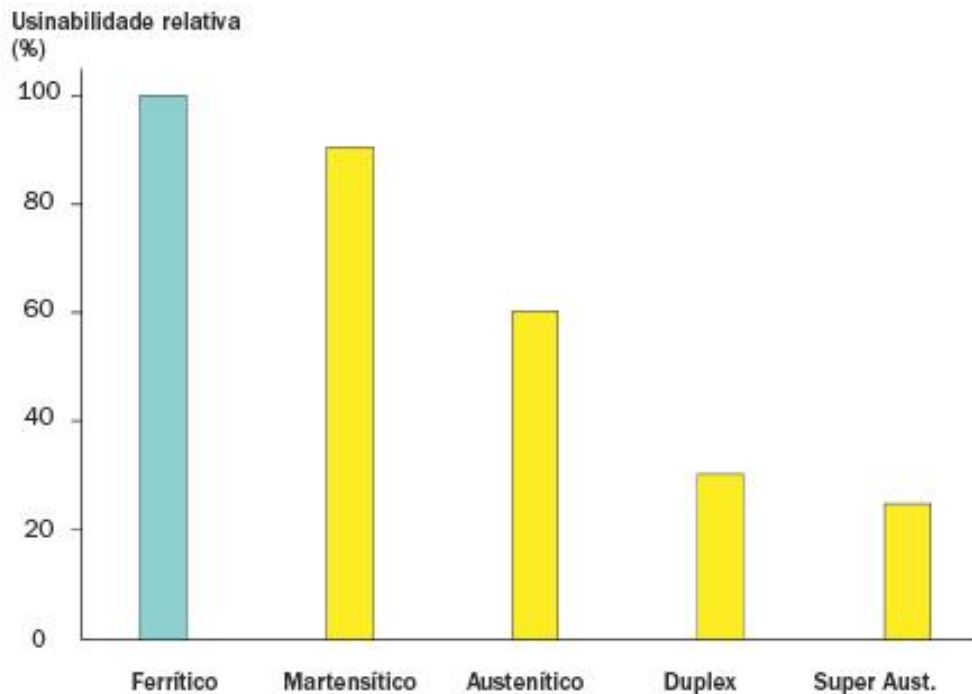
- Martensíticos – Endurecíveis, essencialmente ligas de Fe-Cr;
- Ferríticos – Não endurecíveis, essencialmente ligas de Fe-Cr;
- Austeníticos – Não endurecíveis, essencialmente ligas de Fe-Cr-Ni;

Os aços inoxidáveis ferríticos possuem o cromo como principal elemento de liga, chegando a valores superiores a 25% e baixo teor de carbono, máximo de 0,2%. Sua composição química usualmente também apresenta elementos como molibdênio, silício, manganês, titânio, alumínio e nióbio; a presença desses elementos garante características especiais a cada composição [2]. Esses aços têm como principais propriedades a resistência a corrosão e ao calor. Devido ao baixo teor de carbono, esses aços não são endurecíveis por tratamento térmico de têmpera [3]. São aços inoxidáveis mais baratos do que os austeníticos e possuem grande aplicação nas indústrias automobilística e química.

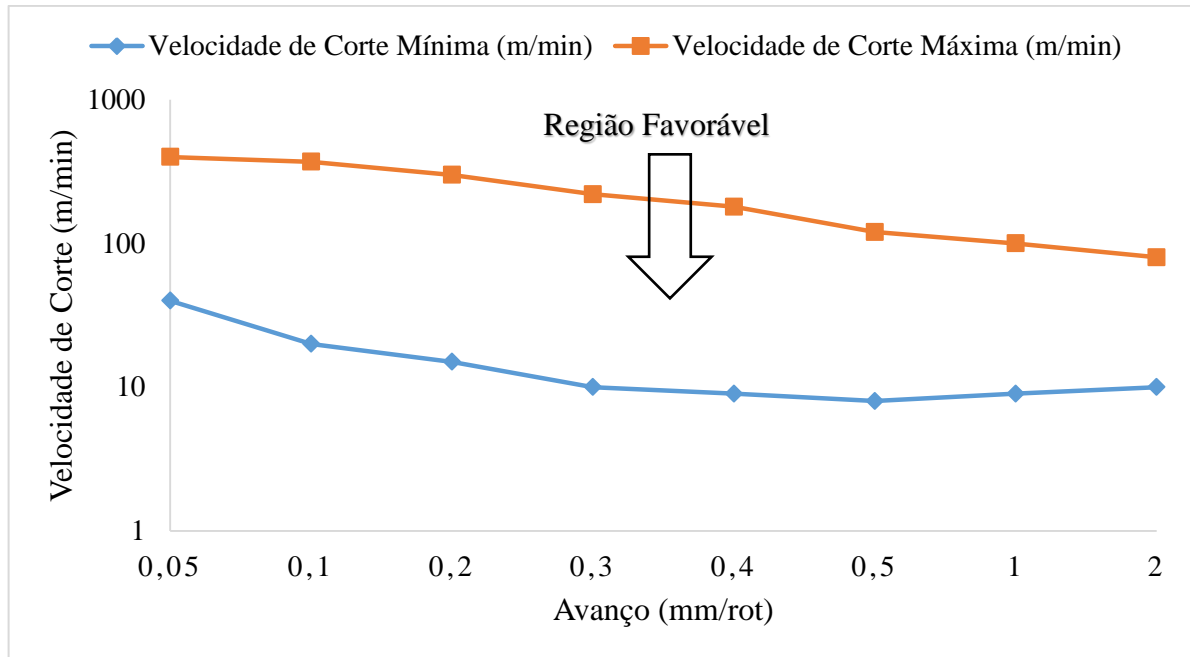
Os aços inoxidáveis austeníticos podem ser divididos em: aços Fe-Cr e aços Fe-Cr-Ni. Possuem estrutura FCC (cúbica de face centrada) e sua austenitização se deve à presença de elementos como níquel, manganês e nitrogênio [4]. Possuem em sua composição química teores mais significativos de manganês, até 15%, cromo, na faixa de 16% a 26% e níquel até 37% [2]. Esses aços têm como principais características não serem endurecíveis por têmpera, não magnéticos e quando encruados, apresentam um aumento na dureza devido à instabilidade da austenita, que se transforma de forma parcial em ferrita com alto teor de carbono, tendo características de dureza parecidas com a martensita, o que pode ocorrer

durante operações de usinagem [5]. Os tratamentos térmicos mais utilizados são: solubilização, para remover os carbonetos e para garantir a estrutura austenítica em temperatura ambiente; o alívio de tensões ocorridas durante a deformação plástica, e a nitretação, para obter dureza superficial.

Na usinagem, segundo Machado *et al.* 2009 [6], os aços inoxidáveis são caracterizados por sua baixa condutividade térmica e por sua alta capacidade de endurecimento por deformação, além de serem materiais que aderem à aresta de corte da ferramenta, formando APC (aresta postiça de corte). Essa formação se deve à que, pela sua baixa condutividade térmica, maior parte do calor, geralmente absorvido pelo cavaco, deverá ser absorvida pela aresta de corte, causando a deterioração prematura da ferramenta. Na Figura 1 é possível observar a variação da usinabilidade entre os diferentes tipos de aços inoxidáveis. Para os aços inoxidáveis ferríticos, é recomendada a usinagem entre duas faixas de velocidade de corte: entre 40 m/min e 90 m/min, e entre 180 m/min e 400 m/min, onde as faixas intermediárias são propícias à formação de APC. Nos aços inoxidáveis austeníticos, as faixas mais favoráveis de velocidade variam de acordo com o avanço utilizado, como Figura 2 [6].



**Figura 1:** Usinabilidade relativa dos aços inoxidáveis [6]



**Figura 2:** Região favorável de velocidade de corte e avanço na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos, adaptado de Machado et al. 2009 [6]

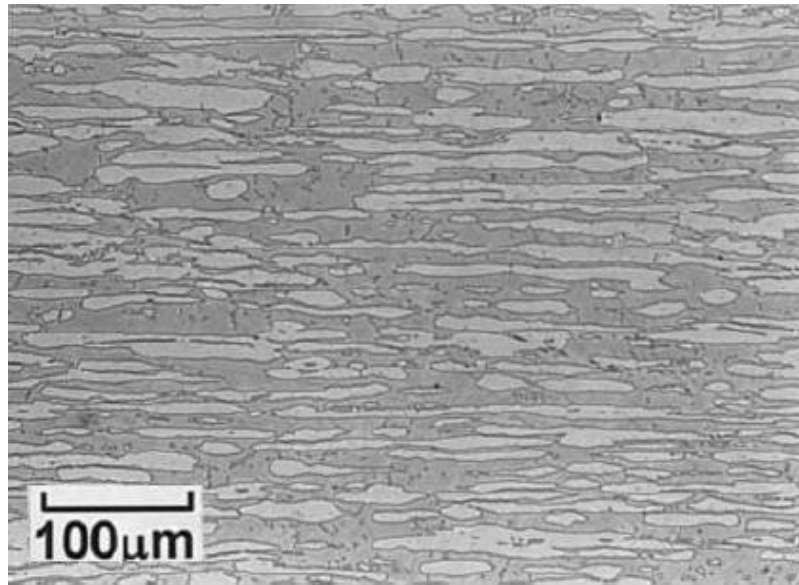
### 2.1.1 Aços Inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis duplex são caracterizados pela estrutura Fe-Cr-Ni, e são chamados dessa forma por apresentarem duas principais estruturas: a austenita ( $\gamma$ ) e a ferrita ( $\alpha$ ). A combinação dessas duas fases promove aos aços inoxidáveis duplex, elevada resistência mecânica, boa soldabilidade, boa tenacidade e resistência a corrosão, como descreve Brandi & Padilha (1990) [7]. A junção do aço inoxidável ferrítico e do aço inoxidável austenítico e por sua vez, criação dos duplex, impulsionada pela necessidade de material que sofresse menos impacto pelo ambiente corrosivo das indústrias, promoveu formação de uma nova classe de materiais e então, o de estudo das suas características para sua crescente otimização e aplicabilidade. Os aços inoxidáveis duplex são aqueles que possuem resistência equivalente a corrosão por pite (PRE) na ordem entre 35 e 40 [2]. De acordo com a norma ASTM 240/240M [8] esse índice por ser calculado levando em consideração os teores de cromo, molibdênio e nitrogênio, como mostra a Equação 1.

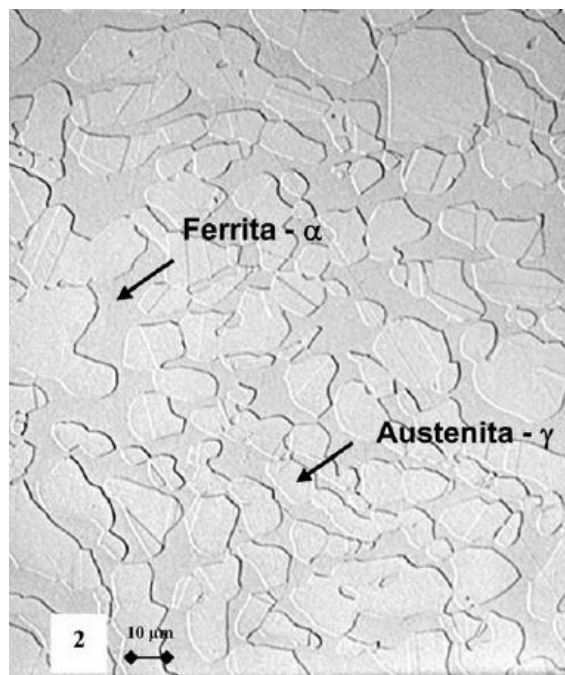
$$PRE = \%Cr + [3,3(\%Mo)] + [16(\%N)] \quad (1)$$



A concentração volumétrica, para se maximizar as propriedades mecânicas, de ferrita e austenita devem ser o mais próximo possível de 50% [5]. Essa concentração volumétrica e a mudança microestrutural irá variar em função da composição química e no tratamento térmico da liga, a Figura 3 apresenta a microestrutura típica do aço duplex comercial e a Figura 4, após tratamento termomecânico.

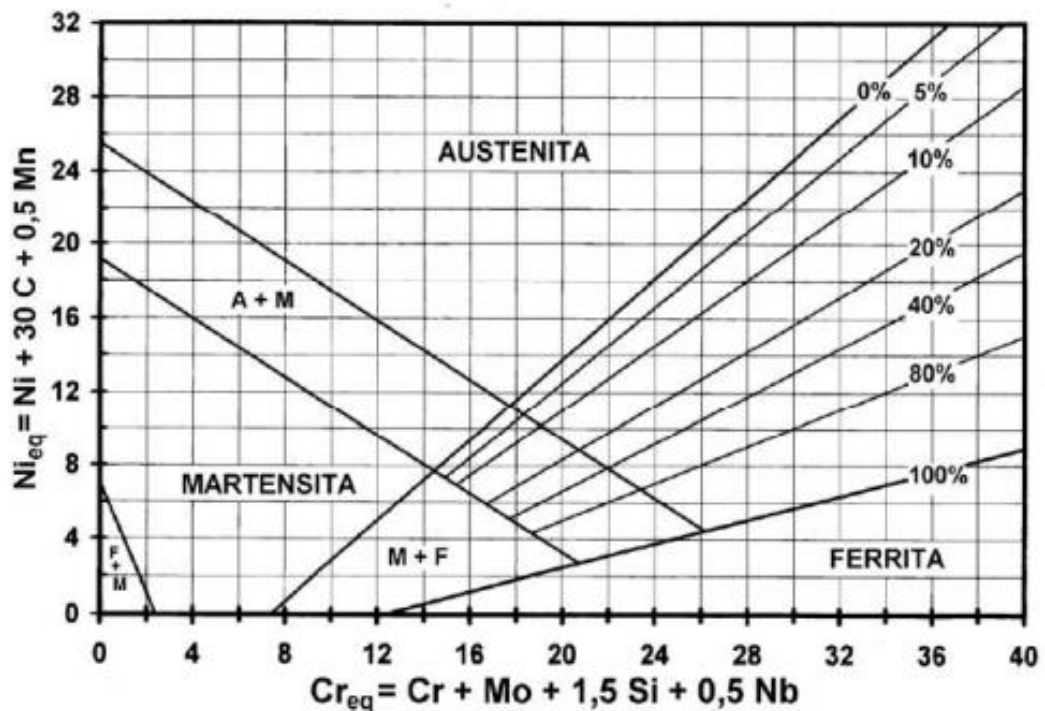


**Figura 3:** Microestrutura típica do aço duplex comercial: ferrítica (cinza escuro) e austenítica (cinza claro) [2]



**Figura 4:** Microestrutura de um aço inoxidável duplex SAF 2205 após tratamento termomecânico (aumento X400) [9]

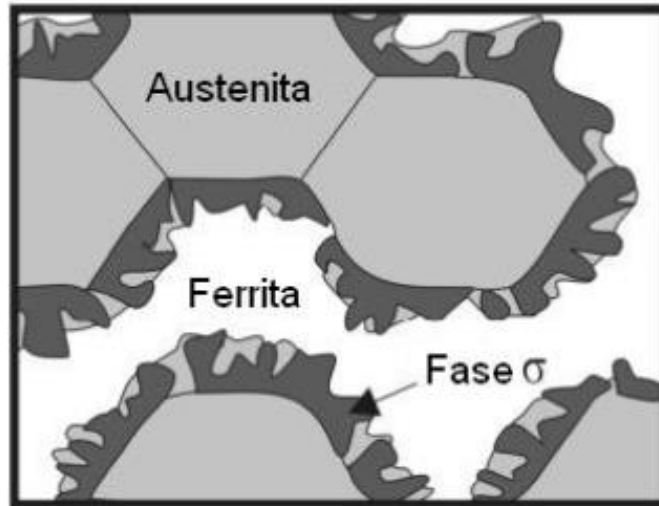
Nos aços duplex, a presença da estrutura ferrítica irá aumentar a resistência a corrosão, e ainda, irá proporcionar a criação da fase sigma ( $\sigma$ ) de fragilização, em torno de 475°C, levando ao aumento da dureza e baixa da ductilidade. Entre os elementos estabilizadores de ferrita estão o molibdênio, cromo e silício. Já os estabilizadores de austenita, são o níquel, carbono e nitrogênio. O teor de ferrita irá variar de acordo com a temperatura e com o percentual de elementos de liga, como é possível ver no diagrama de Shaeffler, na Figura 5 [9]. Quando submetidos a determinadas temperaturas, a estrutura Fe-Cr-Ni se torna instável e apresenta outras fases além na ferrita e da austenita. Essas fases, denominadas intermetálicas, podem mudar as propriedades mecânicas indesejavelmente, com a perda de resistência a corrosão e de tenacidade [4].



**Figura 5:** Diagrama de Shaeffler: porcentagem de ferrita e austenita pelos teores de elemento de liga [3].

A fase sigma é a principal fase intermetálica estudada por ter maior fração volumétrica. Esta fase é não magnética, tem estrutura tetragonal, é dura e frágil, diminui a ductilidade e a resistência a corrosão dos aços inoxidáveis. Ocorre geralmente entre 600°C e 1000°C. Sua formação ocorre preferencialmente nos contornos de fase ferrítica/austenítica, com crescimento na direção ferrítica, como representado na Figura 6. São os principais fatores de formação da fase sigma, a nucleação a partir da ferrita, a decomposição eutetóide da ferrita

gerando austenita empobrecida em Cr e Mo, e o crescimento a partir da austenita após o total consumo da ferrita [2]. Os elementos estabilizadores da ferrita (Mo e Cr) aceleram a formação da fase sigma e os elementos estabilizadores da austenita (Ni) retardam a formação da mesma, considerando que a estrutura CFC é mais compacta do que a CCC. A formação dessa fase pode ser evitada por um resfriamento rápido após o aquecimento a altas temperaturas [7].



**Figura 6:** Nucleação da fase sigma [4].

A usinabilidade dos aços inoxidáveis duplex é considerada baixa, como visto na anteriormente na Figura 1 (em torno de 30%) devido a sua alta resistência à tração e alto módulo de elasticidade. O aumento da fração volumétrica de ferrita para 60% melhora a usinabilidade, assim como a adição de elementos de liga como o enxofre (S). É esperado que, assim como os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos, os aços inoxidáveis duplex possuam faixas intermediárias de velocidade de corte nas quais a probabilidade de formação APC é mais acentuada, tendo assim, faixas de velocidade mais favoráveis que tem como resultado a melhor integridade superficial do material após a usinagem [6].

Experimentalmente, o estudo de Beránek & Kolařík (2013) [10] demonstra o quanto a integridade superficial de um aço inoxidável duplex DIN 1.4470, pode ser influenciada por parâmetros de usinagem tais como velocidade de corte e de avanço. O objetivo do trabalho era observar o comportamento de parâmetros como tensão residual ( $\sigma$ ), rugosidade superficial ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $R_{SM}$ ) e grau de deformação plástica ( $W$ ) sob diferentes velocidades de corte ( $V_c$ ), 45 a 65 m/min, e de avanço ( $f$ ), 0,1, 0,2 e 0,3 mm/rev. Os resultados obtidos, Tabelas 1 e 2, indicam que a velocidade de avanço afeta diretamente a tensão residual e o grau de deformação plástica. Ambos parâmetros, velocidade de corte e avanço, apresentaram

influencia na rugosidade superficial, onde o aumento dos mesmos resultou em um aumento da rugosidade.

**Tabela 1:** Fatores designados e valores de tensão residual e deformação plástica medidas nas direções axial ( $\sigma_A$  e  $W_A$ , ao longo do comprimento de amostragem) e tangencial ( $\sigma_T$  e  $W_T$ , radialmente) [10]

Condição	Fator A $V_c$ (m/min)	Fator B Avanço (mm/rot)	$\sigma_A$ (MPa)	$W_A$ (grau)	$\sigma_T$ (MPa)	$W_T$ (grau)
1	45	0,3	667	3,13	546	3,18
2	45	0,1	222	3,27	481	3,06
3	45	0,1	127	3,09	557	3,08
4	65	0,2	288	3,26	600	3,06
5	65	0,1	-209	3,26	121	3,09
6	45	0,2	352	3,28	599	3,18
7	65	0,2	233	3,31	633	3,22
8	45	0,2	434	3,23	582	3,16
9	65	0,3	561	3,31	558	3,27
10	65	0,1	313	3,03	593	3,02
11	45	0,3	536	3,54	422	3,46
12	65	0,3	423	3,43	709	3,25

**Tabela 2:** Valores de rugosidade medidos em 3 critérios ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{SM}$  em  $\mu m$ ) [10]

Condição	Fator A $V_c$ (m/min)	Fator B Avanço (mm/rot)	Rugosidade $R_a$ ( $\mu m$ )	Rugosidade $R_z$ ( $\mu m$ )	Rugosidade $R_{sm}$ ( $\mu m$ )
1	45	0,3	1,68	6,919	311,798
2	45	0,1	0,485	2,776	140,705
3	45	0,1	0,457	2,571	170,46
4	65	0,2	1,88	7,614	210,752
5	65	0,1	0,747	3,561	112,197
6	45	0,2	1,025	4,062	210,525
7	65	0,2	2,151	7,384	211,083
8	45	0,2	1,007	4,203	215,052
9	65	0,3	2,805	11,206	316,069
10	65	0,1	0,602	2,848	104,472
11	45	0,3	1,69	6,983	316,078
12	65	0,3	2,799	10,984	316,388

### 2.1.2 Aço Inoxidável Duplex S31803

Quanto à composição química dos aços inoxidáveis duplex, cada elemento com teor significativo tem influência sobre as propriedades mecânicas do aço duplex [11]. Na tabela 3 são representadas as composições químicas de alguns aços inoxidáveis duplex segundo a norma ASTM A 240/A 240M (2004) [8].

**Tabela 3:** Composição química dos principais aços inoxidáveis duplex utilização em vasos de pressão e aplicações gerais [8]

UNS	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	N (%)
S 32304	0,03	1,0	2,5	21,5-24,5	3,0-5,5	0,05-0,6	0,05-0,2
S 31803	0,03	1,0	2,0	21,0-23,0	4,5-6,5	2,5-3,5	0,08-0,2
S 32750	0,03	0,8	1,2	24,0-26,0	6,0-7,0	3,0-5,0	0,24-0,32

Como visto anteriormente, devido à microestrutura e à composição química, os aços inoxidáveis duplex são caracterizados com alto limite de escoamento e de resistência mecânica. As propriedades físicas devem ser levadas em consideração ao se determinar sua aplicação, considerando as condições as quais a peça irá operar. As propriedades físicas deste aço segundo o Manual ASM para aços inoxidáveis (1994) [12] são descritas na Tabela 4.

**Tabela 4:** Propriedades físicas do aço inoxidável UNS S31803 [29].

Densidade	7,8 g/cm <sup>3</sup>
Modulo de Elasticidade	200 GPa
Coefficiente de Expansão Térmica	13,7 a 14,8 µm/m°C
Condutividade Térmica a 100°C	16W/mK
Calor Específico	460 J/KgK
Resistividade Elétrica	0,8 µΩm
Temperatura de Fusão	1460°C

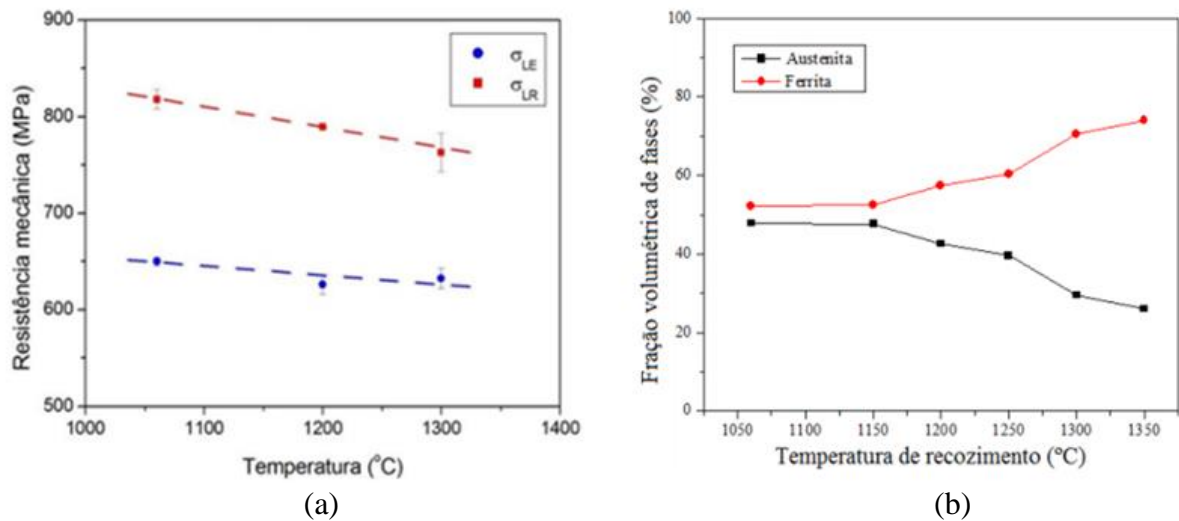
O aço inoxidável duplex UNS S31803 é mais utilizado em áreas que exigem alta resistência a corrosão em comum com alta resistência mecânica e a oxidação. Assim, possui grande aplicação nas áreas de petróleo e gás, já que o mesmo é um ambiente bastante agressivo. Este aço é muito aplicado em tubulações, bombas de levantamento e injeção de

água, válvulas, trocadores de calor, vasos de pressão, tanques, em sistemas de refrigeração e também muito utilizados na produção de evaporadores, aquecedores e equipamentos em contato com cloreto [4]. A Figura 7 apresenta a tubulação de uma bomba centrífuga para elevação de água mar em uma plataforma de petróleo, exemplo de aplicação de aço inoxidável duplex.



**Figura 7:** Tubulação de bomba de elevação de água do mar em plataforma de petróleo [13]

Em análise experimental, Lacerda (2015) [14] estudou o efeito de tratamentos térmicos de recozimento na resistência à tração, dureza, à fadiga e na resistência à corrosão de um aço inoxidável duplex UNS S31803 laminado a frio. É possível observar na Figura 8a a influência microestrutural nas propriedades mecânicas. Neste trabalho foram utilizadas as seguintes temperaturas de recozimento: a 1060°C, 1200°C e 1300°C, a fim de se promover variação na fração volumétrica das fases ferrítica ( $\alpha$ ) e austenítica ( $\gamma$ ) e a possível precipitação de fases indesejáveis. O aço na condição de recozido a 1060°C, que corresponde à condição em que foi recebido, apresenta morfologia típica de um aço inoxidável duplex laminado a frio. Nas demais temperaturas de recozimento há uma gradual alteração na morfologia da microestrutura e na fração volumétrica das fases do aço na medida em que se aumenta a temperatura de recozimento (Figura 8b) [14].



**Figura 8:** Influência da temperatura de recozimento (a) na resistência mecânica e (b) na variação volumétrica de fases do aço UNS S31803 [14].

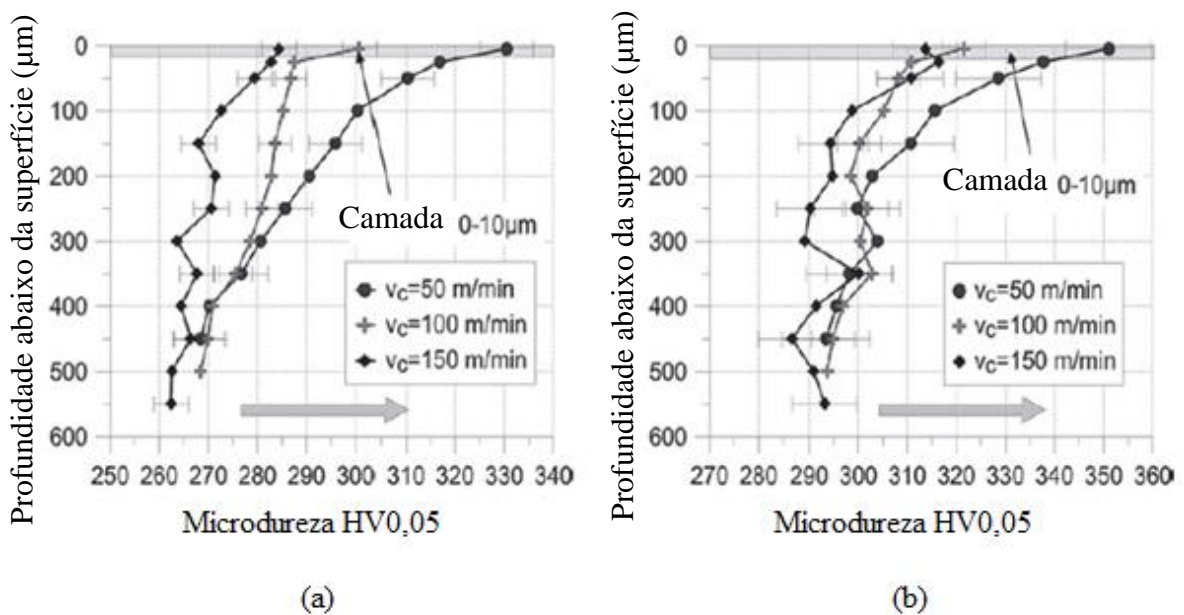
O aumento da temperatura de recozimento causou significativa alteração na microestrutura do aço, como o aumento da fração de volume da ferrita (Figura 8b), mudança na morfologia das fases ferrita e austenita, aumento do tamanho de grão de ambas as fases e precipitação de nitretos de cromo na ferrita. Estas alterações microestruturais resultaram numa diminuição da resistência mecânica à tração (Figura 8a) e na ductilidade do aço, também causaram diminuição da resistência à propagação de trincas por fadiga. A propagação de trincas por fadiga foi facilitada na fase ferrítica com o aumento da temperatura de recozimento, devido ao seu endurecimento pela presença de precipitados, e a diminuição de interfaces ferríticas-austeníticas, com o aumento do tamanho grão de ambas as fases [14].

Os resultados observados indicaram a sensibilidade do aço em relação à temperatura de recozimento, como já esperado, sugerindo cuidados quando da especificação deste aço em aplicações ou processamentos onde há uma grande variação de temperatura. Com aumento da temperatura de recozimento do aço houve diminuição no potencial de corrosão e aumento do potencial de pite na temperatura de ensaio de 25 °C. O aço recozido a 1060°C e 1200°C apresentou maior temperatura crítica de pite em relação ao aço recozido a 1300°C. Como resultado também, o aumento na temperatura de recozimento do aço de 1060°C para 1300°C comprometeu significativamente a sua resistência à corrosão sob tensão [14].

Demonstrando ainda a aplicabilidade e diferentes resultados de propriedades possíveis ao se trabalhar com o aço UNS 31803 (DIN 1.4462) o trabalho de Krolczyk *et al.* (2014) [15]



ênfatisa a influência da velocidade de corte nos valores de microdureza do material. Nesta pesquisa foram comparados os perfis de microdureza após o torneamento sob diferentes valores velocidades de corte. Na Figura 9, é mostrado que a resposta dos grãos ferríticos e austeníticos são diferentes, enfatizando a importância da análise metalográfica, já que a fração microestrutural, assim como uma possível mudança de fase resultante do processo de usinagem, influencia na resposta de desempenho do produto final. A microdureza, independente da velocidade de corte, aumenta visivelmente, o que se deve ao encruamento das superfícies mais externas. Em relação à velocidade de corte, sendo esse um parâmetro determinante na geração de calor durante o processo, é de grande importância nos resultados observados. Com base na Figura 9, nota-se que quanto menor o valor de velocidade de corte, maior é a dureza superficial atingida. Complementarmente pode-se concluir também que, a velocidade de corte influencia na profundidade de endurecimento do material; a profundidade diminui quando a velocidade aumenta. Em ambos os casos, o gradiente térmico gerado na usinagem é um dos principais responsáveis por esta variação.



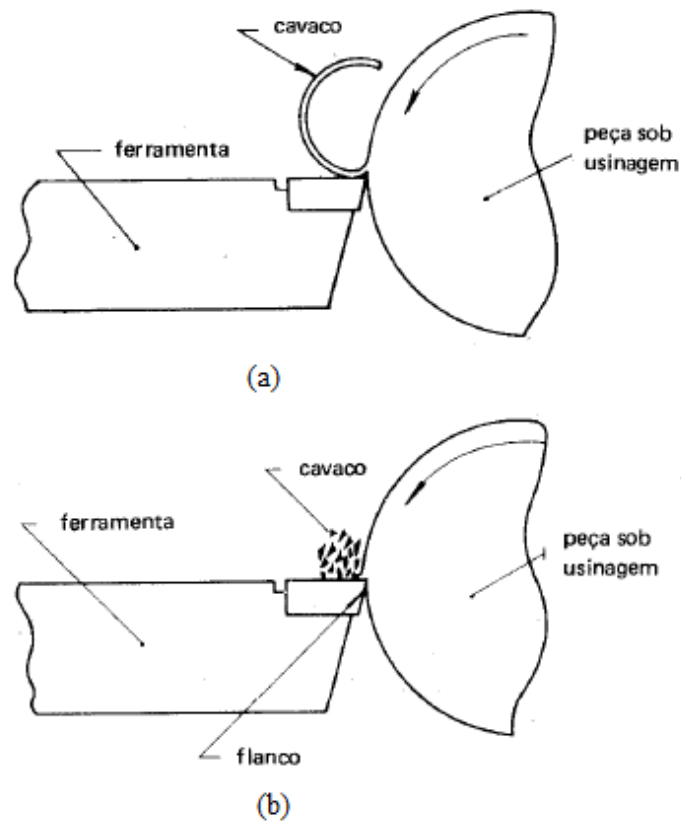
**Figura 9:** Perfis de microdureza Vickers em função da velocidade de sorte (a) ferrita e (b) austenita ( $f = 0,3$  mm/rev,  $p = 2$  mm) [15]



## 2.2 – Torneamento

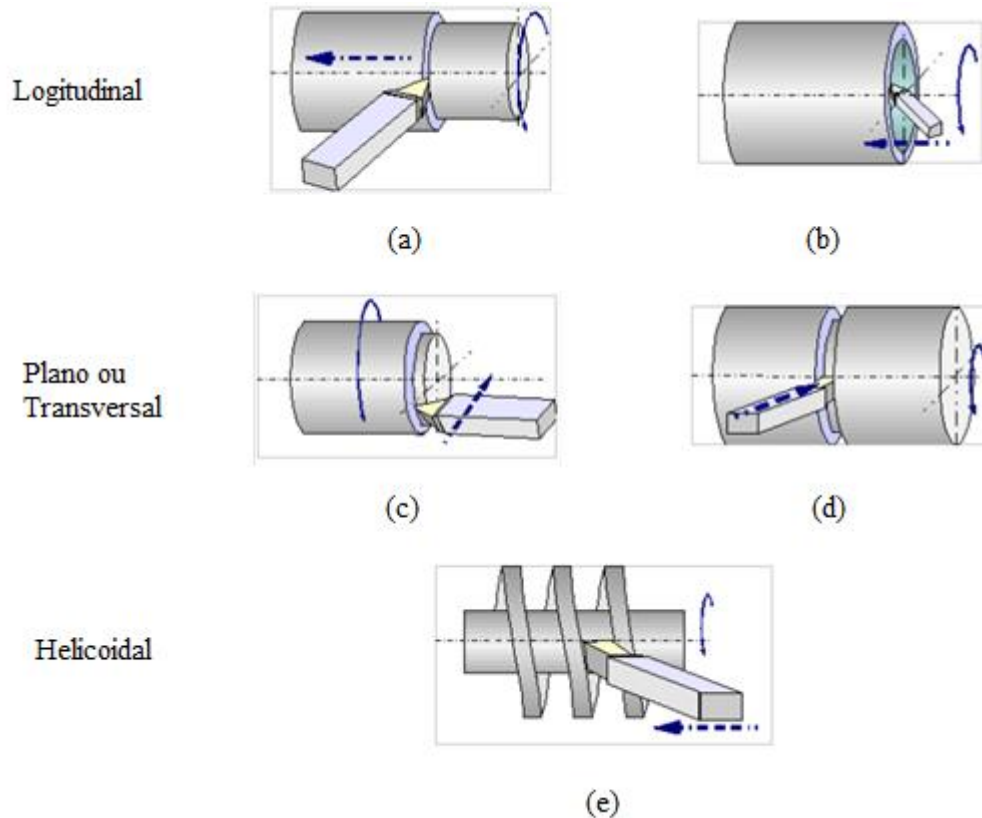
Os processos de fabricação em geral, podem ser classificados dentre os com remoção de cavaco, como a usinagem; e os sem remoção de cavaco, tais como a fundição, laminação, metalurgia do pó e conformação. Entre os processos de fabricação mais utilizados na indústria, há uma tolerância em relação aos acabamentos finais obtidos. Com a crescente necessidade de peças refinadas, com justas tolerâncias, o processo de usinagem, ao possibilitar grande variação de parâmetros de entrada, possibilita a obtenção dos padrões de qualidade exigidos. Nesse contexto, com o avanço tecnológico, a usinagem permite a produção de peças de precisão e complexibilidade [6].

Como definição, Ferrasi (1970) [16] descreve as operações de usinagem como aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco. Esses processos podem ser classificados como convencionais, como torneamento, fresamento, retificação, furação e roscamento; e não convencionais, como por exemplo, ultrassom, plasma, laser, jato d'água, eletroquímica e eletroerosão. As operações também são divididas em operações de desbaste, sendo essa a fase inicial, onde um maior volume de material é retirado, dependendo da potência do maquinário utilizado; e as operações de acabamento, onde é retirado o sobremetal deixado após a operação de desbaste, aplicando o acabamento final desejado na peça [6]. Ao se determinar os parâmetros de corte, a ferramenta de trabalho apropriada à peça a ser usinada, a máquina-ferramenta, se obtém as condições iniciais da operação. Tais condições, irão influenciar na qualidade da peça e, portanto, na formação do cavaco; podendo o mesmo ser de mais de um tipo, como mostra a Figura 10 [17].



**Figura 10:** Tipos de cavacos formados na usinagem de metais: (a) cavaco contínuo e (b) cavaco cisalhado [17]

Em particular, o processo de torneamento foi definido por Chiaverini (1986) [17] como a operação para obtenção de superfícies de revolução, no qual a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo determinadas trajetórias. Considerando que a peça gira em torno do eixo e a ferramenta por se deslocar longitudinalmente e/ou transversalmente, as operações de torneamento podem ser classificadas em: cilíndrica interna e externa, cônica interna e externa, faceamento, sangramento, helicoidal, recartilhamento, perfilhamento. A Figura 11 apresenta algumas operações realizadas no torneamento.

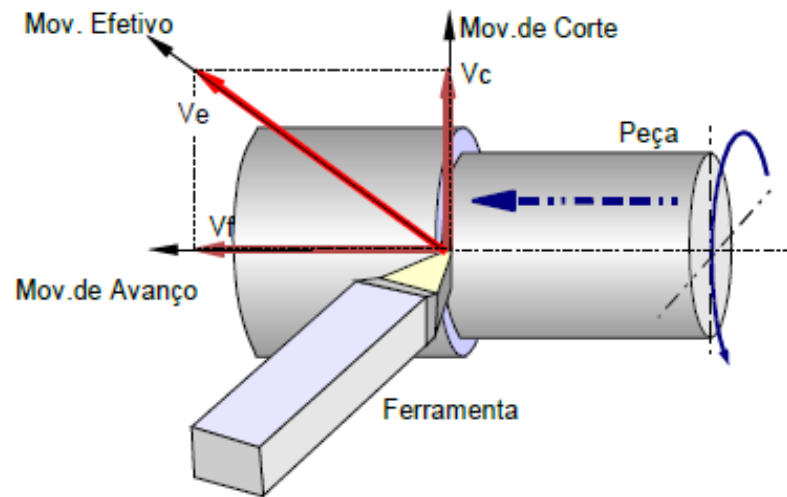


**Figura 11:** Classificação de operações de torneamento (a) longitudinal externo (b) longitudinal interno (c) faceamento (d) sangramento (e) helicoidal [6].

Os movimentos relativos entre o conjunto peça-ferramenta, determina uma das principais variáveis deste processo, a velocidade de corte ( $V_c$ ). Esses movimentos serão classificados de acordo com a remoção, ou não, de material; ativos ou passivos [16]. Como descrito por Diniz (1999) [18], representados na Figura 12, os movimentos ativos são classificados em:

- Movimento de corte – ocorre entre a ferramenta e a peça, que sem a ocorrência concomitante do movimento de avanço, provoca remoção do cavaco durante uma única rotação ou um curso da ferramenta.
- Movimento de avanço – estabelecido entre a ferramenta e a peça, que juntamente com o movimento de corte, possibilita a remoção contínua do cavaco, durante várias rotações ou cursos da ferramenta.
- Movimento efetivo de corte – definido entre a ferramenta e a peça, a partir do qual resulta o processo de usinagem. Quando o movimento de avanço é contínuo, o

movimento efetivo é o resultante da composição dos movimentos de corte e de avanço.



**Figura 12:** Direção dos movimentos de corte, avanço e efetivo. [19]

Movimentos passivos, mesmo sem remoção de material, são igualmente importantes durante o processo. Sendo eles, movimento de ajuste, onde se determina espessura de material que será removida; movimento de correção, que compensará as possíveis variações em decorrência do desgaste da ferramenta, dilatações térmicas, entre outros; movimento de aproximação, para aproximar a ferramenta antes do início da usinagem; movimento de recuo, para afastar a ferramenta após a operação [18].

### 2.2.1 Parâmetros e variáveis do processo de torneamento

Devido as grandes variações possíveis de parâmetros iniciais no torneamento, o estudo dessas grandezas físicas envolvidas no processo é fundamental para se entender e prever o resultado final do processo, seja quanto à qualidade da peça usinada, quanto ao desgaste da ferramenta, ou quanto ao tempo de trabalho [18]. A velocidade de corte ( $V_c$ ) é considerada como um dos principais parâmetros de corte por sua influência tanto na qualidade final da peça quanto na integridade das ferramentas de corte utilizadas. Segundo Ferraresi (1970) [16] a velocidade de corte é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte. Esta varia de acordo com as propriedades da peça trabalhada, o acabamento final desejado e a ferramenta utilizada no processo.

Equacionalmente, a velocidade de corte (em m/min), como mostrado na Equação 2, depende do diâmetro da peça -  $D$  (em mm) e da rotação da mesma ( $n$ ), expressa em rpm.

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (2)$$

A distância entre o fundo do corte e a superfície da peça que não é cortada, é denominada profundidade de corte ( $a_p$ ). Considerando,  $d_1$  o diâmetro da peça antes da usinagem e  $d_2$  o diâmetro após a usinagem, ambos em mm, a Equação 3 expressa a profundidade de corte ( $p$ ) também em mm [17].

$$a_p = \frac{d_1 - d_2}{2} \quad (3)$$

O avanço é o quanto a ferramenta se desloca a cada rotação da peça. Sendo assim, a velocidade de avanço ( $V_f$ ) é o produto entre o avanço ( $f$ ) e o número de rotações ( $n$ ), em rpm [17]. Esta velocidade é representada, em mm/min, pela Equação 4.

$$V_f = f n \quad (4)$$

O tempo de corte ( $t_c$ ) é o necessário para realizar o processo de usinagem da peça em trabalho. Pela equação 5, o tempo de corte, expresso em min, é determinado em função do comprimento usinado  $L$  (mm) pela velocidade avanço  $V_f$  (mm/min) [20]:

$$t_c = \frac{L}{V_f} \quad (5)$$

Como descrito por Amorim (2002) [21], utilizando os três parâmetros citados anteriormente, é possível se determinar a taxa de remoção do material, já que esta é diretamente um produto das três grandezas, velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ), sendo a Equação 6:

$$Q = V_c \cdot f \cdot a_p \quad (\text{cm}^3/\text{min}) \quad (6)$$

## 2.2.2 Forças de Corte

Como representado na Figura 13, as forças aplicadas na ação de corte são vetorialmente decompostas. Considerando que a força  $R$  é exercida pela ferramenta sobre o cavaco, essa terá sua componente normal ( $F_N$ ) e a componente de atrito, que será a força de avanço ( $F_f$ ), o atrito sendo devido à resistência do cavaco. Conseqüentemente, a mesma força  $R$  será exercida sobre a ferramenta; agora sendo decomposta em  $F_C$ , na direção do movimento da ferramenta, e  $F_L$  a componente normal. O cavaco, ficará sujeito a reação  $R'$ , que é decomposta em  $F_N$  no plano normal, e  $F_S$  no plano de cisalhamento.

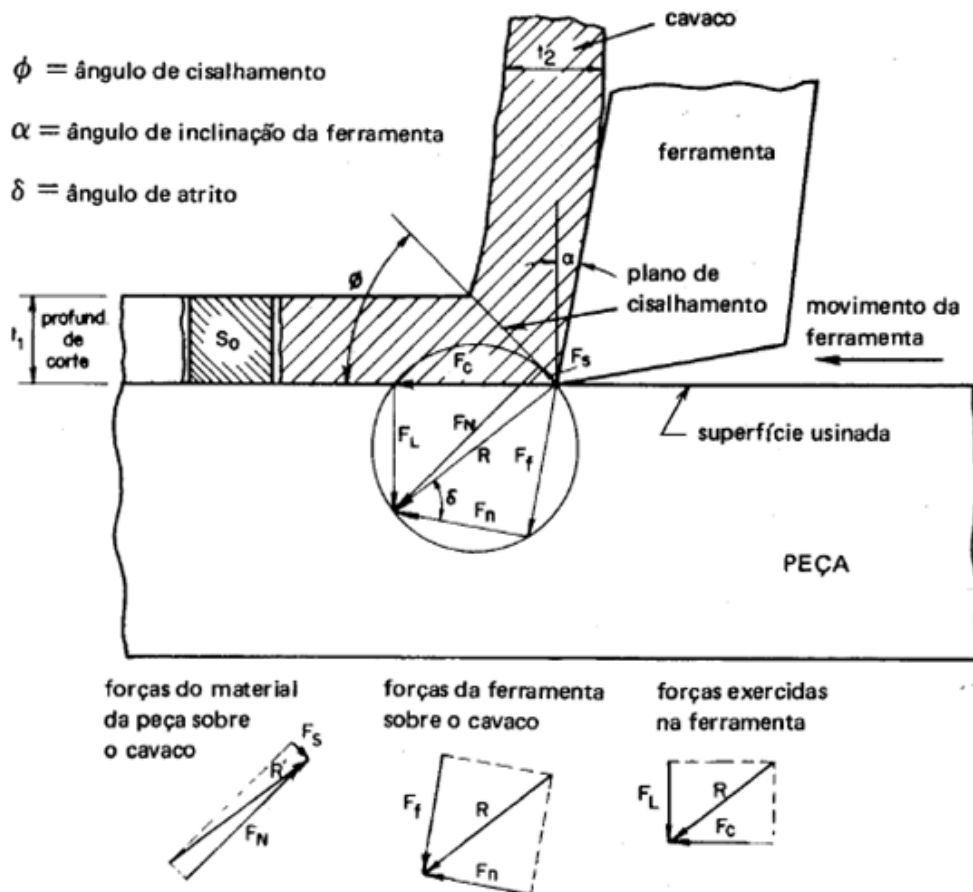


Figura 13: Representação das forças de corte que atuam em uma ferramenta [17]

Segundo Trent & Wright (2004) [22], a força de cisalhamento é dada pela equação 6, onde  $\phi$  é o ângulo de cisalhamento. A pressão específica de corte  $K_S$  [21], pode ser outra maneira de expressar a força de corte, como equação 7. Onde,  $A_S$  é a área da seção de corte.

$$F_S = F_C \cdot \cos \phi - F_f \sin \phi \quad (7)$$

$$F_C = K_S \cdot A_S \quad (8)$$

### 2.2.3 Geração de Cavaco

A formação do cavaco influencia no desgaste da ferramenta, nos esforços de corte, no calor gerado durante a operação e na lubrificação. Como visto anteriormente, o ângulo de cisalhamento se relaciona com a força de cisalhamento, logo, com a força de compressão na ferramenta. Segundo Diniz (1999) [18], quanto maior a deformação do cavaco, menor o ângulo de cisalhamento e maior são os esforços de corte. Dependendo da ferramenta e das condições de usinagem, se houver um aumento da deformação do cavaco durante o processo, pode ocorrer uma mudança de cavaco contínuo para cavaco de cisalhamento. O tipo de cavaco é determinado, principalmente, pelo material da peça usinada. Materiais dúcteis geralmente formam cavaco contínuo e materiais frágeis, cavaco de ruptura [23].

Pela equação 9, o coeficiente volumétrico de cavaco ( $w$ ) pode ser determinado pela razão entre o volume ocupado pelo cavaco ( $V_{cav}$ ) e volume ocupado por essa mesma quantidade de massa do mesmo material ( $V_p$ ) [21].

$$w = \frac{V_{cav}}{V_p} \quad (9)$$

Através desse coeficiente é possível estimar o tipo de cavaco a ser formado: contínuo, de cisalhamento ou de ruptura. O cavaco contínuo, geralmente obtido na usinagem de materiais dúcteis, é formado pela justaposição de lamelas contínuas; pode causar problemas tais como, agarrar na peça, causar problemas de vibração, causar danos nos mancais, entre outros. Para evitar esse tipo de cavaco, pode-se diminuir o ângulo de inclinação da ferramenta, aumentar a profundidade de corte, diminuir a velocidade de corte ou aumentar o avanço. O cavaco de cisalhamento apresenta lamelas justapostas bem distintas, já o cavaco de

ruptura, é constituído de fragmentos arrancados da peça em usinagem, obtido quando o ângulo de saída é reduzido, Trent & Wright (2000) [22]. Os cavacos podem ser classificados também pela sua forma, em fita, helicoidal, espiral, em lascas, cônico e agulha, por exemplo. Tais formas tem influência sobre o acabamento superficial da peça e sobre a vida útil da ferramenta; o cavaco em fita é o que acarreta maiores inconvenientes, devendo ser evitado; o em lascas é preferível quando houver pouco espaço disponível ou quando o cavaco será facilmente removido pelo fluido de corte; o cavaco helicoidal é preferível quando há alta remoção de material [24]. É possível observar na Figura 14 os tipos de cavaco existentes e sua disposição.

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco helicoidal tipo arruela	5- Cavaco helicoidal cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conectado		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

**Figura 14:** Tipos de cavaco, figura adaptada de Besckow (2016) [24].

## 2.3 – Integridade Superficial

A integridade superficial de uma peça que foi submetida ao processo de usinagem está diretamente ligada ao termo acabamento superficial, à ausência de trincas, tensões residuais, alterações microestruturais e danos térmicos. O objetivo da usinagem é ter como resultado uma superfície que apresente textura (fator superficial) e integridade (fator subsuperficial) apropriados, com o intuito de garantir segurança, confiabilidade e qualidade do produto [25]. A textura está ligada as irregularidades presentes na superfície do material usinado, resultado da rugosidade, ondulação e falhas em tal superfície. Já a integridade superficial, é a característica que permite identificar alterações metalúrgicas, que são resultados da usinagem,



tais como mudança de fase, encruamento, diferenciação de tamanho de grão, inclusões e recristalização [26]. As características de desempenho do produto final, resistência à fadiga, corrosão, propriedades magnéticas, dureza, resistência à fadiga e estabilidade dimensional, estão relacionadas à integridade superficial.

O acabamento superficial é um termo frequentemente usado para descrever a qualidade final de uma peça usinada, e embora não esteja especificamente ligado à textura ou característica técnica da superfície, é considerado um bom acabamento aquele que possui baixos valores de rugosidade, principalmente nas operações de acabamento. Assim, para um processo de usinagem obter um acabamento específico, é necessário estudar as características da peça, do material da ferramenta, da máquina de trabalho e do processo em si. Quanto maior as exigências do projeto, maior a importância do estudo do acabamento superficial e maior a necessidade de selecionar adequadamente as variáveis de entrada do processo [26]. Desta forma, estudar tensões residuais geradas no processo, rugosidade superficial e realizar análises metalográficas são formas de observar e entender o comportamento do material usinado sob diferentes variáveis de operação. A Figura 15 apresenta características de integridade superficial de superfícies usinadas de acordo com fatores superficiais e subsuperficiais.



**Figura 15:** Classificação de acabamento na usinagem [26]

### 2.3.1 Rugosidade

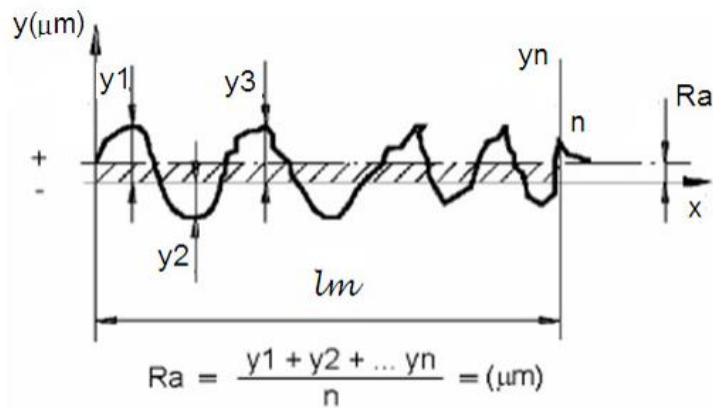
A integridade superficial da peça está diretamente relacionada à rugosidade, definida pelas irregularidades ou erros geométricos gerados pelo processo de corte, sendo esse influenciado por fatores como: marcas de avanço, aresta de corte, desgaste da ferramenta e

geração de rebarba [25]. Para sua medição da rugosidade superficial são utilizados equipamentos de medidas específicos para tal parâmetro, conhecidos como rugosímetros, e os procedimentos são normalizados. Seus valores são expressos em micrômetros [ $\mu\text{m}$ ] [26]. Dentre os parâmetros usados para calcular a rugosidade, neste projeto será utilizado o método da rugosidade média ( $Ra$ ), sendo este, um parâmetro de amplitude. O parâmetro  $Ra$  é definido “média aritmética dos valores absolutos das ordenadas, em relação à linha média no comprimento da amostragem” [1]. Por Amorim (2002) [21],  $Ra$  ( $\mu\text{m}$ ) representado na Figura 16, pode ser calculado pela Equação 10, sendo  $l_m$  o percurso de medição, e  $y$  é a ordenada de afastamento em relação à linha média ( $l_m$ ), ou seja, o pico de rugosidade de cada ponto respectivo:

$$Ra = \frac{l}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (10)$$

$$Ra = 31,2 \frac{f^2}{r_e}$$

(11)



**Figura 16:** Rugosidade média [22]

Para o torneamento, embora não seja considerado neste cálculo o desgaste da ferramenta, quando o avanço ( $f$ ) é menor que o raio de ponta da ferramenta ( $r_e$ ),  $Ra$  pode ser calculada pela Equação 11. Neste projeto, o objetivo será analisar o quanto e de que forma, a velocidade de corte ( $Vc$ ) influenciará na rugosidade, ou seja, no acabamento superficial da peça trabalhada. Cada processo garante um índice de rugosidade sob diferentes condições de usinagem, quanto maior o nível do acabamento exigido, menor será o valor aceitável do

parâmetro de rugosidade [21]. A Tabela 5 apresenta faixas de valores para Ra de acordo com diferentes operações de usinagem.

**Tabela 5:** Precisão e acabamento superficial obtidos nos processos de torneamento e retificação de uma superfície cilíndrica externa [25]

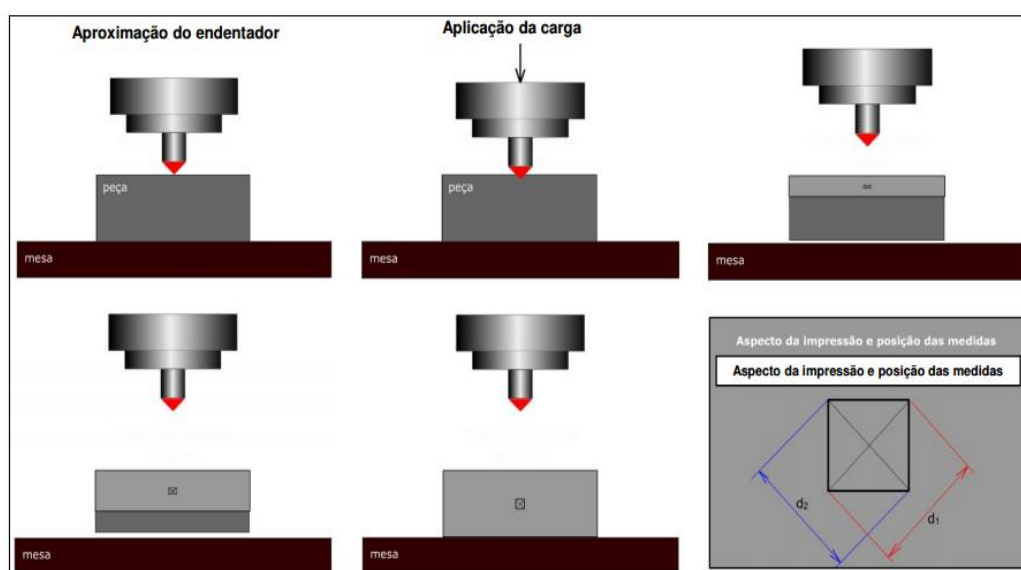
Processo	Operação	Classe de Tolerância (IT)	Rugosidade $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
Torneamento	Desbaste	12 – 13	10 – 80
	Semiacabamento	10 – 11	2,5 – 10
	Acabamento	07 – 09	1,25 – 2,5
	Ultraprecisão	05 – 06	0,80 - 1,25
Retificação	Desbaste	07 – 09	0,63 – 0,80
	Semiacabamento	06 – 07	0,16 – 0,63
	Acabamento	05 – 06	0,08 – 0,16

### 2.3.2 Dureza

A dureza é a propriedade mecânica do material que permite a ele resistir à deformação plástica, usualmente por penetração. Nos materiais usinados, a dureza é sensível ao encruamento superficial ocorrido durante o processo. O encruamento superficial é definido como endurecimento por deformação plástica, ocorre devido ao movimento das discordâncias, que interagem diretamente entre si ou com outras imperfeições, e tais interações levam a uma redução na mobilidade destas discordâncias. Todo e qualquer obstáculo que dificulte esse movimento, dificulta também a deformação plástica, aumentando a resistência mecânica do material e então, eleva a dureza do mesmo. A dureza máxima é a dureza do material, geralmente aparece perto da superfície. O grau de endurecimento depende das condições de usinagem, é particularmente influenciado pelo raio do arredondamento da aresta de corte [27].

Entre os métodos de verificação das propriedades dos materiais, um dos mais usados é a medição de dureza. Este pode ser caracterizado como um ensaio não-destrutivo, ou seja, a pequena marca deixada na peça após o ensaio não compromete, normalmente, a utilização da mesma [15]. Dentre os tipos de ensaio de dureza, existem ensaios de risco (MOHS), ressaltado (Shore) e o mais utilizado atualmente, o ensaio por penetração (Rockwell, Vickers ou Brinell). O ensaio de dureza Vickers, por exemplo, é realizado submetendo o material a uma carga sobre a superfície do corpo de prova através de um penetrador de diamante, na forma de

uma pirâmide reta de base quadrada e um ângulo de  $136^\circ$  entre as faces opostas, utilizando carga de 1 a 100 kgf, a carga é aplicada durante 10 a 15 segundos, como representado na Figura 17. As duas diagonais da indentação deixadas na superfície do material são medidas usando-se um microscópio. Com os valores lidos calcula-se a média aritmética. A seguir calcula-se a área da superfície inclinada da indentação. A dureza Vickers é o quociente obtido dividindo a carga (em kgf) pela área da indentação. A área de deformação superficial formada, ou seja, sua profundidade é aferida e relacionada a um valor numérico que representa a dureza do material [27].

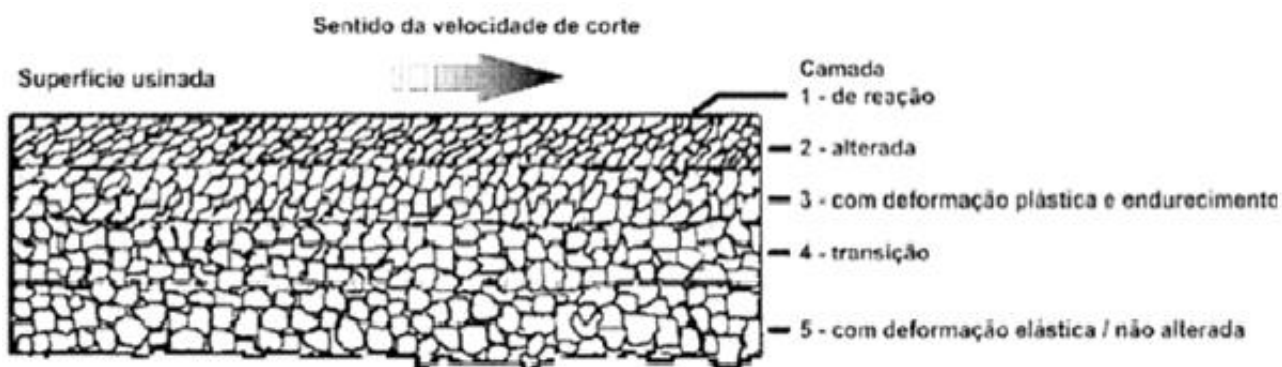


**Figura 17:** Ensaio de dureza Vickers [27]

### 2.3.3 Análise Microestrutural

O controle do estado microestrutural após a operação é tão fundamental quanto o controle dos parâmetros de usinagem. O teor das deformações plásticas e transformações metalúrgicas diminuem consideravelmente à medida que se distancia da superfície usinada até que não seja mais percebida. O processo de torneamento a elevadas velocidades de corte resulta em altas temperaturas de trabalho, influenciando diretamente em transformações microestruturais, portanto, o estudo dessas transformações ajuda a entender e garantir as propriedades do produto obtido ao final do processo, como esquematizado na Figura 18 [26]. Análises microestruturais tem como meta abordar procedimentos experimentais necessários

para a observação e estudo de amostras através da microscopia óptica, permitindo identificar e dimensionar microconstituintes existentes na estrutura do material em estudo.

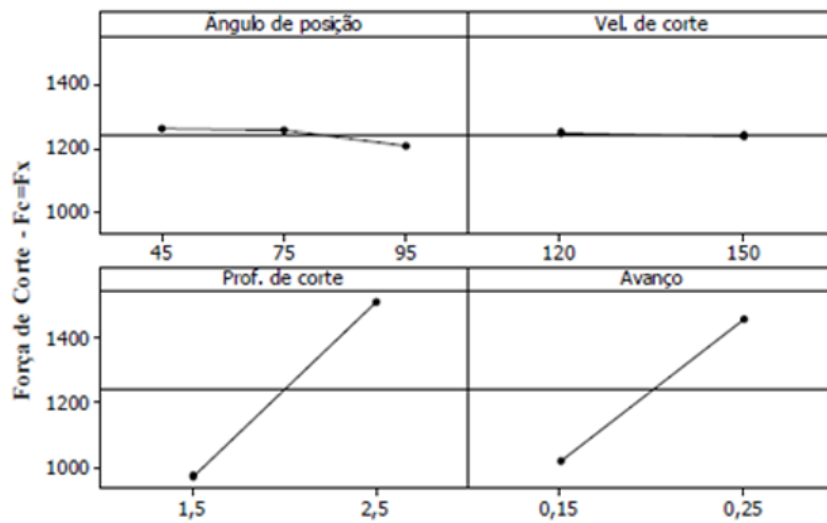


**Figura 18:** Camadas superficiais dos corpos sólidos submetidos ao processo de corte [26].

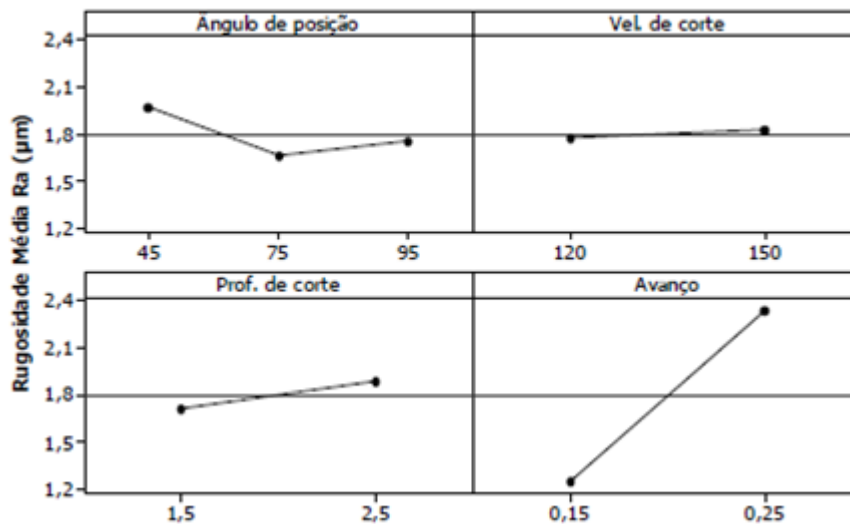
Experimentalmente, a tese de Jesus (2013) [26], analisa os efeitos das altas taxas de encruamento, com indução de modificações mecânicas e comportamento heterogêneo, nas superfícies trabalhadas resultantes do processo de usinagem o aço inoxidável super duplex UNS S32760. Com o objetivo de estudar os efeitos destes fatores no torneamento desse aço, a pesquisa verifica a influência do ângulo de posição da ferramenta ( $\chi_r$ ), da profundidade de corte ( $A_p$ ), do avanço ( $f$ ) e da velocidade de corte ( $V_c$ ) nas forças de usinagem. A execução dos experimentos de torneamento foi realizada em um torno CNC, em três etapas, utilizando os parâmetros descritos na Tabela 6.

**Tabela 6:** Parâmetros de corte e especificação das ferramentas de corte [26].

Variáveis de influência	Unidade	Níveis	Especificações		
Ângulo de posição da ferramenta ( $\chi_r$ )	Grau	3	45°	75°	95°
Avanço ( $f$ )	mm/rot	2	0,15	0,25	
Profundidade de corte ( $a_p$ )	Mm	2	1,5	2,5	
Velocidade de corte ( $v_c$ )	m/min	2	120	150	



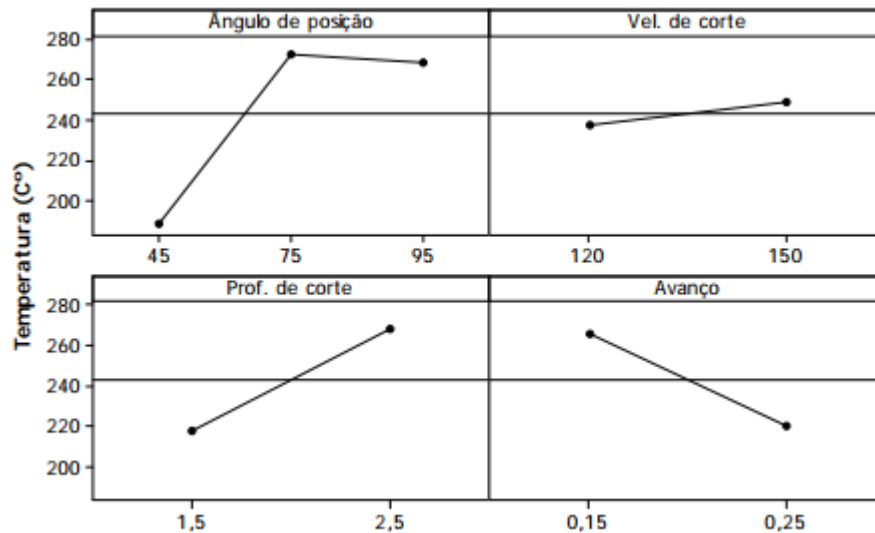
**Figura 19:** Gráfico de influência dos fatores na força de corte [12].



**Figura 20:** Gráfico de influência dos fatores na rugosidade média  $R_a$  [26]

Analisando os resultados de acordo com as Figura 19, observou-se aumento da força de corte quando utilizados menor ângulo de posição da ferramenta ( $\chi_r = 45^\circ$ ), maior profundidade de corte ( $A_p = 2,5\text{mm}$ ) e avanço ( $f = 0,25\text{mm/rot}$ ). As forças de usinagem não apresentaram diferenças significativas para as velocidades utilizadas. Também ocorreu aumento da temperatura na região de corte quando utilizado  $\chi_r$  médio de  $75^\circ$  e avanços menores. A integridade superficial apresentou-se melhor quando utilizado  $\chi_r$  de  $75^\circ$ . A profundidade de corte, para os níveis ensaiados, é o principalmente parâmetro de indução de tensão residual na superfície usinada. A maior vida da ferramenta, para um desgaste máximo de flanco de  $0,3\text{mm}$  e definida pelo comprimento usinado, foi observada na velocidade de

corte de 90 m/min. A profundidade de corte ( $a_p = 5\text{mm}$ ) apresenta maiores valores de dureza quando comparados aos valores da profundidade de corte ( $a_p = 10\text{mm}$ ). Observa-se também que o  $a_p = 5\text{mm}$  tem maior variabilidade nos valores de dureza que  $A_p = 10\text{mm}$ . A variação da dureza do material em função da profundidade de corte pode ser explicada devido à origem de trações residuais trativas após o processo de torneamento. Pela Figura 20, para a rugosidade superficial média ( $R_a$ ), os fatores de maior de influência de acordo com os resultados são: o avanço, ângulo de posição da ferramenta e profundidade de corte. A velocidade de corte não influencia significativamente nas variáveis propostas no estudo. Interpretando os dados obtidos na Figura 21, a quantidade de calor gerado na usinagem aumentou com acréscimos na velocidade de corte, avanço e profundidade de corte interferindo no aumento da temperatura. O acréscimo da temperatura em função da profundidade de corte pode ser explicado pelo aumento da área de contato da aresta de corte da ferramenta com o material da peça o que implica em maior atrito e conseqüentemente maior temperatura nesta região. Em relação a rugosidade média, o ângulo de posição a  $75^\circ$  apresentou o melhor acabamento superficial e a velocidade de corte não interferiu significativamente nos resultados. Na condição experimentada a profundidade de corte induz tensão de tração na superfície usinada.



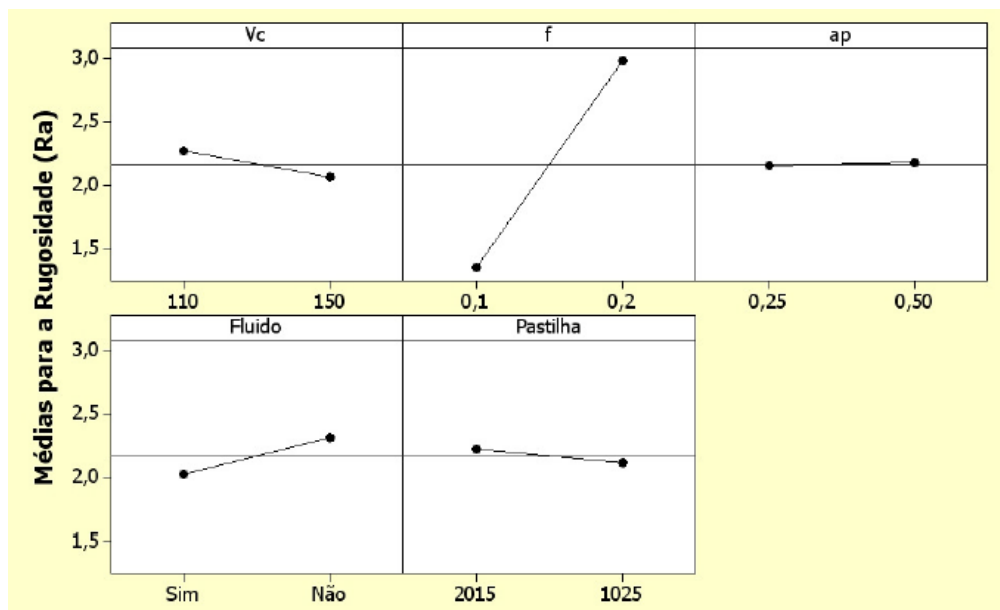
**Figura 21:** Influência dos parâmetros de corte na temperatura da região de corte (°C) [26]

No estudo experimental de Bordinassi (2006) [28], ao se variar os parâmetros de corte no torneamento do aço inoxidável super duplex ASTM A890, principalmente o avanço ( $f$ ) e a profundidade de corte ( $a_p$ ), é percebido influência no resultado do parâmetro rugosidade  $R_a$ .

Além disso, variou-se também a pastilha utilizada e a aplicação ou não de fluido de corte, obtendo as condições de corte apresentadas na Tabela 7. Ao analisar o efeito da variação da média dos fatores na rugosidade Ra, pela Figura 23, conclui-se que o parâmetro mais influenciador foi o avanço e a interação do avanço com a velocidade de corte. A não utilização de fluido de corte também impactou no aumento de rugosidade e um maior valor de velocidade de corte resultou em um menor valor de rugosidade, o que se deve, principalmente, à diminuição da formação de aresta postiça.

**Tabela 7:** Valores de rugosidade obtidos nos ensaios de acabamento com altas velocidades de corte [28]

Teste	Vc [m/min]	f [mm/v]	ap [mm]	Fluido	Pastilha
1	600	0,1	0,25	Sim	2015
2	600	0,2	0,25	Sim	2015
3	600	0,1	0,5	Sim	2015
4	600	0,2	0,5	Sim	2015
5	600	0,1	0,375	Não	2015
6	600	0,2	0,5	Não	2015
7	600	0,1	0,5	Não	2015
8	600	0,2	0,5	Não	2015
9	600	0,1	0,5	Sim	1025
10	600	0,2	0,25	Sim	1025
11	600	0,1	0,25	Sim	1025
12	600	0,2	0,25	Sim	1025
13	600	0,1	0,25	Não	1025
14	600	0,2	0,375	Não	1025
15	600	0,1	0,5	Não	1025
16	600	0,2	0,5	Não	1025



**Figura 22:** Efeitos das médias dos parâmetros sobre a rugosidade para operações de acabamento



## CAPÍTULO 3

### Materiais e Métodos

O trabalho experimental deste projeto transcorreu sequencialmente como descrito nos itens deste capítulo. Resumidamente, análise microestrutural do material na condição como recebido, torneamento das amostras, análises de rugosidade e dureza.

#### 3.1 Aço inoxidável duplex S31803

O material utilizado neste trabalho é o aço inoxidável duplex S31803, em forma de barra arredondada com  $\frac{3}{4}$ " de diâmetro e dureza de 250 HV0,2 (medida experimentalmente). De acordo com a norma A240/A240M [8], a composição química e as propriedades mecânicas do material são apresentadas nas tabelas 8 e 9.

**Tabela 8:** Composição química do aço inoxidável duplex UNS S31803 (% de peso) [8]

C	Mn	Si	Cr		Ni	P	S	Mo	N
0,03	2,0	1,0	21,0 - 23,0		4,5 - 6,5	0,03	0,02	2,5 - 3,5	0,08 - 0,2

**Tabela 9:** Propriedades mecânicas do aço inoxidável duplex UNS S31803 [29]

Limite de Resistência (N/mm <sup>2</sup> )	Limite de Escoamento 0,2% (N/mm <sup>2</sup> )	Alongamento em 80 mm (%)	Dureza HV
840	620	30	240

#### 3.2 – Caracterização microestrutural do aço

Para caracterizar e quantificar as fases presentes no material foi realizada uma análise microestrutural. Para isso foi cortada uma amostra de 5 mm de espessura da barra. Após a remoção de rebarbas, provenientes do corte, com lixamento de granulometria #100, a amostra foi preparada para a análise metalográfica através de embutimento em baquelite a quente,

utilizando prensa hidráulica do Laboratório de Materiais (LAMAT), em qual o processo se deu por 8 minutos para aquecimento do baquelite e 8 minutos para resfriamento.

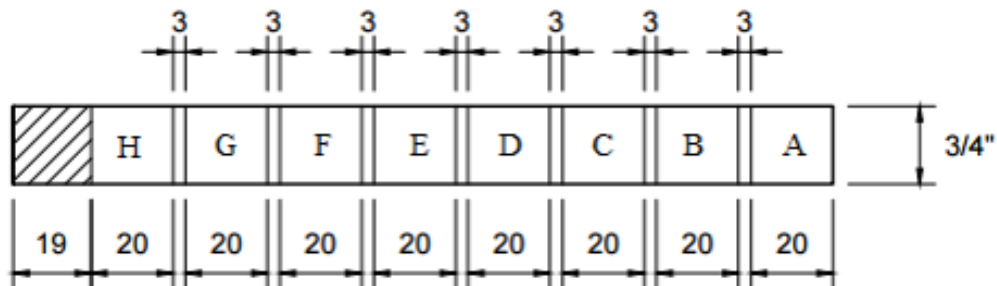
Após embutimento, a preparação seguiu para o lixamento da amostra, na politriz Arotec, utilizando em ordem de granulometria da maior para a menor, lixas de #100, #220, #320, #400, #500 e #600, adotando o procedimento de mudança de direção em 90° a cada troca de lixa. Posteriormente foi realizado o polimento da amostra, utilizando pasta diamantada na ordem seguinte de 6 µm, 3 µm, 1 µm, adotando também o procedimento de mudança de direção.

O ataque químico utilizado foi o Behara, composto de 42,5 ml de água, 7,5 ml de ácido clorídrico (HCl) e 0,5 ml de metabissulfito de potássio ( $K_2S_2O_5$ ), com tempo de imersão de aproximadamente 2 minutos. Após o ataque, foi utilizado microscopia óptica para a caracterização microestrutural, através do Microscópio Ótico Olympus BX60M do LAMAT.

Através do microscópio foram capturadas imagens de 10 regiões, com aumento de 500X, em pontos distintos da superfície da amostra, para realizar a quantificação de fase ferrítica e austenítica do aço. A análise foi realizada adotando o programa ImageJ (Fiji), o qual possibilitou o processamento das imagens, para caracterização e a medição de fração volumétrica (%) de austenita na matriz ferrítica da microestrutura estudada.

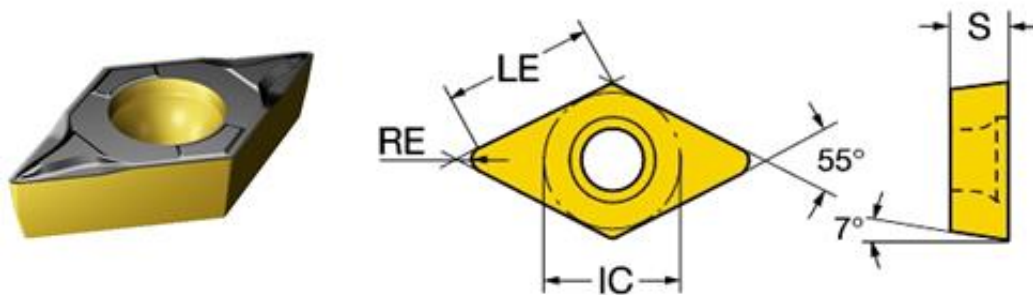
### 3.3 – Preparação e usinagem das amostras

A primeira etapa constituiu na preparação das amostras. A barra foi cortada com 200 mm de comprimento. Após operações de faceamento e furação de centro para fixação no torno, foram confeccionadas 12 amostras com aproximadamente 20 mm de comprimento a partir de operação de sangramento com 3 mm de largura, como mostra a Figura 23.



**Figura 23:** Representação das amostras preparadas (unidades em mm).

Após a preparação, as amostras foram usinadas no torno mecânico convencional Nardini modelo Mascote MS 205 x 1000, do Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ unidade Maracanã). A usinagem foi realizada com porta ferramenta modelo Screw-on SCSP 45°, utilizando pastilhas de metal duro DCMT11T304-LFKC5010 da Kennametal (Figura 24 e Tabela 10).



**Figura 24:** Insetos utilizados na usinagem das amostras [30]

**Tabela 10:** Parâmetros do inserto [30].

Tipo de Operação	Acabamento
Diâmetro do Círculo Inscrito (IC)	9,525 mm
Comprimento Efetivo da Aresta de Corte (LE)	11,228 mm
Raio de Ponta (RE)	0,397 mm
Espessura da Pastilha (S)	3,969 mm
Revestimento	CVD Ti(C,N)+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiN

De acordo com as características do inserto disponível e da classe do material a ser usinado (M3), os parâmetros de usinagem ideais se encontraram as faixas de velocidade de corte de 135 a 225 m/min, tendo como velocidade ótima 185 m/min. Profundidade de corte de 0,16 a 1,6 mm e avanço de 0,05 a 0,2 mm/rot. A partir destas faixas, determinou-se o avanço de 0,094mm/rot e profundidade de corte de 0,3mm para todas as condições de corte. A Tabela 11 apresenta os valores de velocidade de corte aplicados neste trabalho. As amostras foram usinadas intercalando a velocidade de corte a cada duas amostras, de maior para menor, tendo duas amostras usinadas para cada condição de corte. A usinagem foi realizada a seco e para cada condição foi utilizada um gume cortante, a fim de minimizar o efeito do desgaste da ferramenta nos resultados.

**Tabela 11:** Parâmetros de usinagem aplicados

Condição	Velocidade de Corte (m/min)
1	30
2	50
3	60
4	75
5	100
6	150

### 3.4 – Análise da Rugosidade

A rugosidade superficial das amostras foi medida com o rugosímetro do Laboratório de Metrologia do CEFET/RJ, da marca Tesa, Rugosurf 10. As medições foram nas amostras no sentido longitudinal (direção do avanço), sendo realizadas 3 medidas em cada amostra. O parâmetro utilizado foi a rugosidade média ( $R_a$ ), na qual o comprimento de amostragem igual a  $L_a = 0,8\text{mm}$ , com 5 amostragens, raio da ponta do apalpador de  $5\mu\text{m}$ , e resolução de  $0,01\mu\text{m}$ . A rugosidade teórica foi calculada conforme equação 11, a fim de comparar com os valores obtidos experimentalmente.

### 3.5 – Microdureza Vickers

Os ensaios de microdureza foram realizados no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ, utilizando o durômetro Wilson Instruments, modelo 422 MVD. O ensaio aplicado foi o de microdureza Vickers, com uma carga de 2 gf ( $HV0,2$ ), com 15 segundos de indentação.

## CAPÍTULO 4

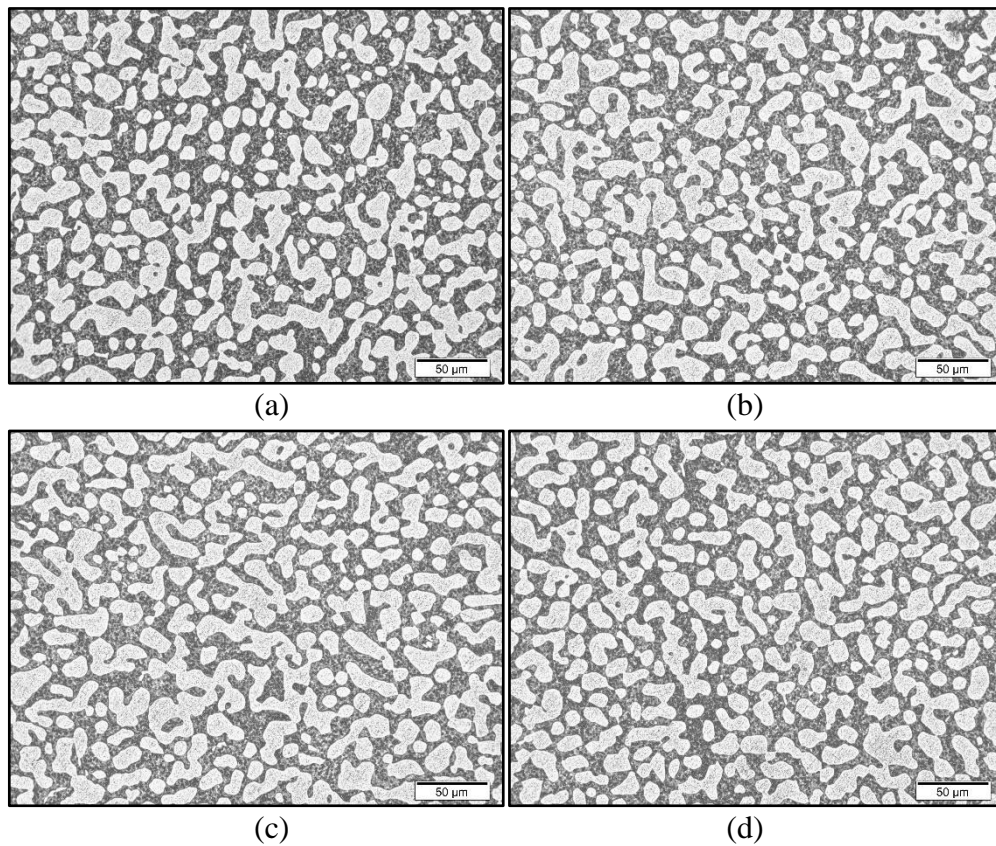
### Resultados e Discussão

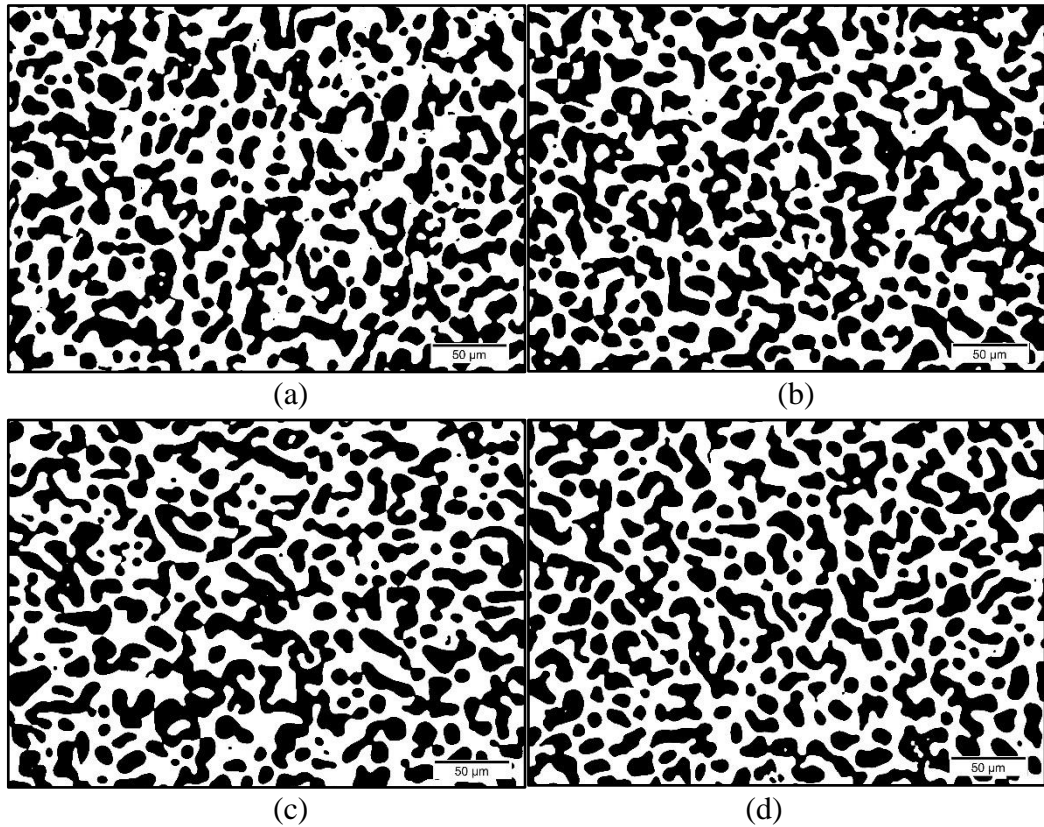
Neste capítulo serão discutidos os resultados experimentais obtidos nas etapas descritas no capítulo anterior. Sendo assim, embasado de acordo com a literatura, serão apresentadas análises de fração volumétrica para caracterização microestrutural, análise do parâmetro de rugosidade Ra e análise dos resultados obtidos nos ensaios de microdureza Vickers (HV0,2).

Na etapa de caracterização microestrutural, as imagens capturadas inicialmente pelo microscópio óptico foram processadas através do programa ImageJ, possibilitando a caracterização da austenita na matriz ferrítica como mostra a Figura 25. Além da caracterização, através do ImageJ, foi possível obter resultados de tamanho médio do grão e fração volumétrica (%) para cada uma das 10 regiões de amostragem capturadas, estes resultados aparecem na tabela 12 e Figura 26. O estudo da fração volumétrica foi realizado devido à sua influência na usinabilidade do material, como mostra a Figura 2 da literatura. Quando há maior porcentagem de ferrita, o material possui maior usinabilidade e resistência à corrosão intergranular, mas perde em tenacidade e ductilidade, característica dos aços inoxidáveis austeníticos. Do ponto de vista da usinabilidade, o aço inoxidável duplex apresenta menor capacidade de usinagem por não apresentar nem o comportamento de aço inoxidável ferrítico, nem do austenítico.

**Tabela 12:** Fração Volumétrica da austenita na matriz ferrítica

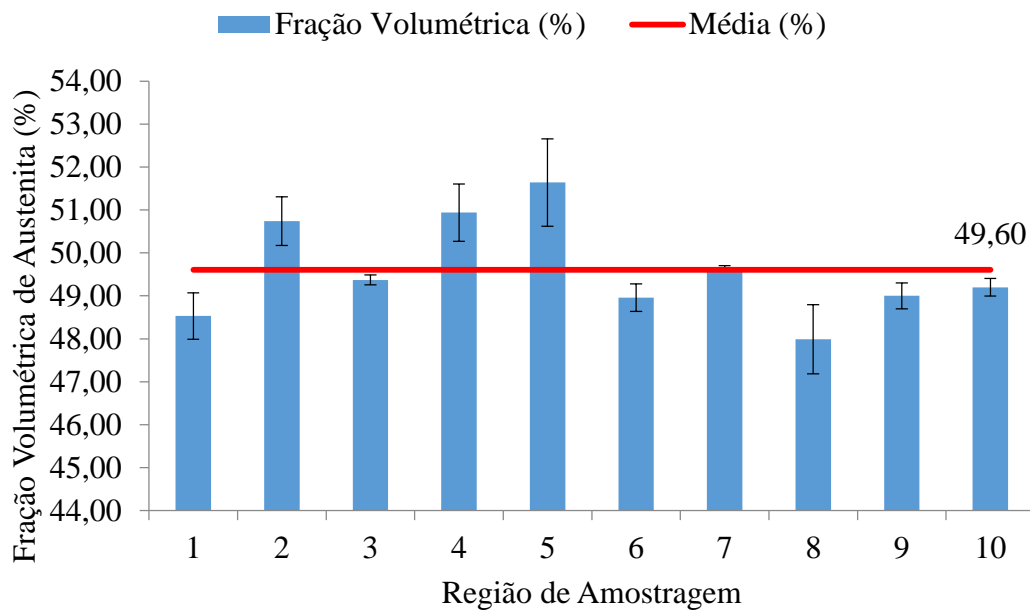
Região de Amostragem	Contagem	Área Total ( $\mu\text{m}^2$ )	Tamanho Médio ( $\mu\text{m}^2$ )	Fração Volumétrica (%)	Desvio Padrão (%)
1	219	42.833.658	195.587	48,53	0,54
2	189	45.586.320	241.197	50,74	0,57
3	201	42.881.586	213.341	49,37	0,12
4	162	44.089.339	272.156	50,94	0,67
5	153	44.049.022	287.902	51,64	1,02
6	153	43.150.779	282.031	48,96	0,32
7	198	45.447.760	229.534	49,67	0,03
8	197	42.391.670	215.186	47,99	0,81
9	197	44.539.439	226.089	49,00	0,30
10	174	44.009.937	252.931	49,20	0,20

**Figura 25:** Regiões de amostragem (a) Região 1 (b) Região 4 (c) Região 6 (d) Região 9 capturadas através do microscópio óptico



**Figura 26:** Regiões de amostragem (a) Região 1 (b) Região 4 (c) Região 6 (d) Região 9, utilizadas para cálculo da fração austenítica (preto) após processamento no ImageJ

Os resultados do cálculo de fração volumétrica da austenita nas diferentes regiões da microestrutura da amostra estão expostos no gráfico da Figura 27. Considerando que o resultado esperado, como visto anteriormente, para o aço inoxidável duplex é de 50/50 em fração volumétrica de ferrita/austenita, como a média encontrada para a fração volumétrica de austenita foi de 49,60%, com desvio padrão máximo de 1,02%, é possível caracterizar o material, como recebido, como um aço inoxidável duplex.



**Figura 27:** Gráfico Fração Volumétrica de Austenita x Região de Amostragem.

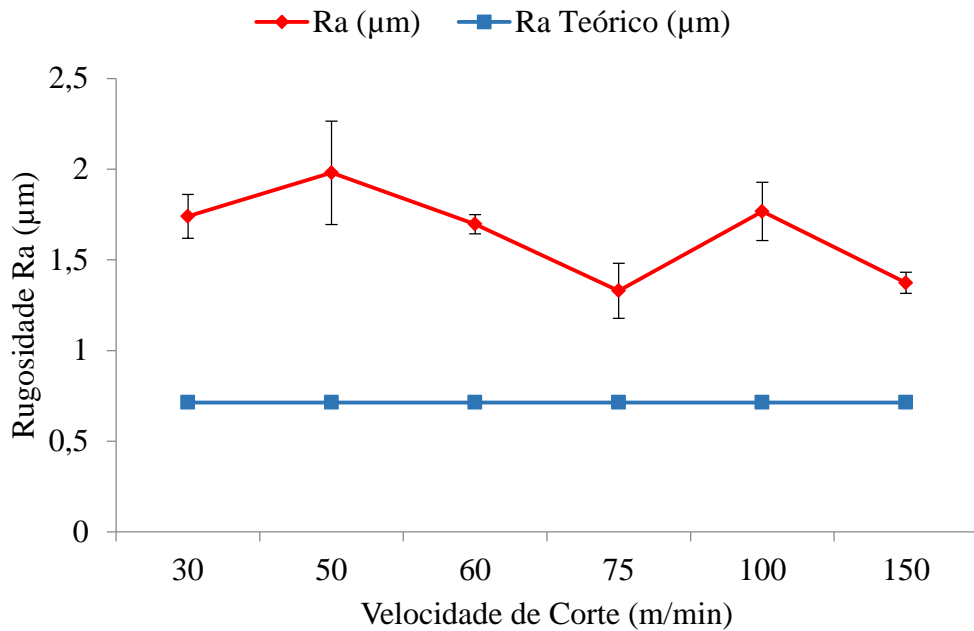
Na análise da integridade superficial, serão analisados os resultados de rugosidade e dureza obtidos. A Tabela 13 mostra os valores de rugosidade Ra obtidos nas amostras, sendo o valor rugosidade Ra teórica (calculado com baseado na Equação 11) de  $0,71 \mu\text{m}$ . Os parâmetros de corte foram escolhidos pela capacidade do torno mecânico, pelo inserto disponível e pela classe do material. De acordo com tais, a condição 6, com velocidade de corte  $150 \text{ m/min}$ , é a condição que está dentro de todas as faixas indicadas como ideias para o torneamento do material, de acordo com o catálogo do fabricante da ferramenta. Desta forma, é esperado que esta condição tenha as melhores respostas em relação à integridade superficial após a usinagem.

**Tabela 13:** Valores de rugosidade Ra obtidos experimentalmente.

Rugosidade			
Condição	Velocidade de Corte (m/min)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Desvio Padrão ( $\mu\text{m}$ )
1	30	1,74	0,12
2	50	1,98	0,29
3	60	1,70	0,05
4	75	1,33	0,15
5	100	1,77	0,16
6	150	1,37	0,06



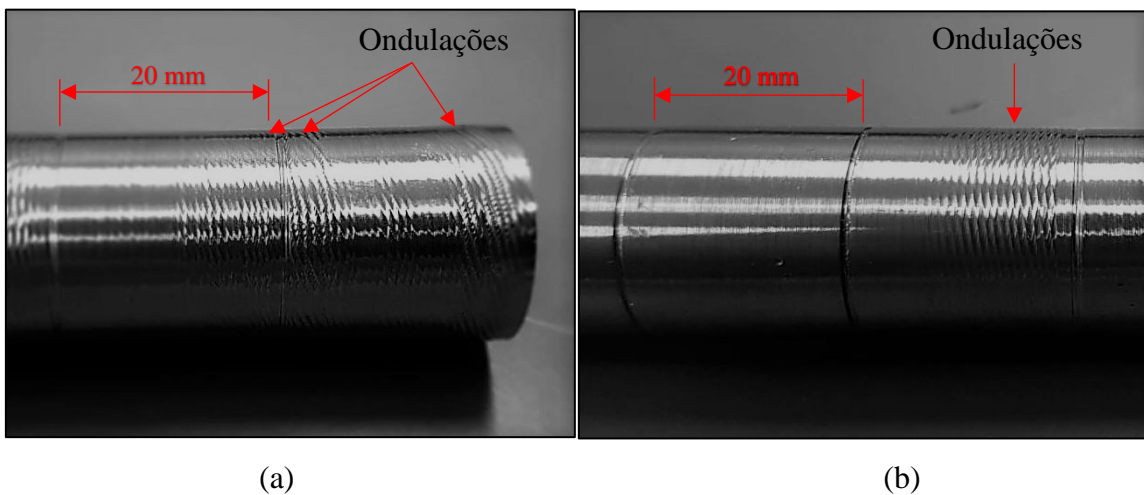
Combinando os resultados obtidos teórico e experimentalmente no gráfico da Figura 28, é possível perceber que as amostras na condição 6, são de fato as que obtiveram melhor integridade superficial, porém esses valores são cerca de duas vezes a rugosidade teórica calculada. É possível perceber uma oscilação entre os valores de Ra de acordo com o aumento da velocidade de corte.



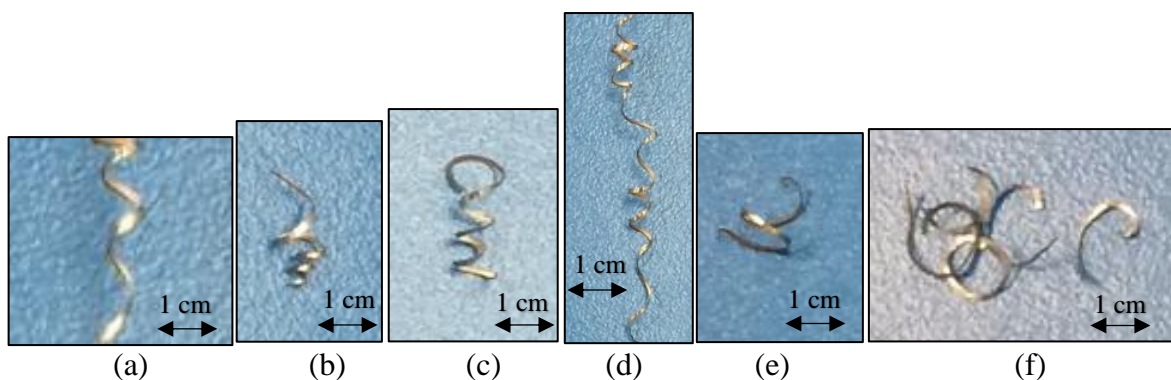
**Figura 28:** Gráfico Rugosidade Ra x Velocidade de Corte

As amostras usinadas nas condições 1, 2 e 5 apresentaram os maiores índices de Ra e nestas foi possível observar a formação de arestas postiças de corte. Na Figura 29 são apresentadas imagens da superfície das peças após a usinagem sob duas dessas condições (condições 2 e 5). Analisando as imagens é possível observar a formação de ondulações grosseiras, características da formação da aresta postiça de corte (APC) durante a usinagem em tais condições. Embora a formação de aresta postiça esteja relacionada a baixas velocidades de corte, onde o tempo de contato peça/ferramenta é mais elevado, aumentado a possibilidade de soldagem do cavaco na peça; no caso estudado, arestas postiças foram observadas na segunda velocidade mais baixa do estudo, 48 m/min e na segunda mais alta, 96 m/min, enfatizado o comportamento singular do aço inoxidável duplex durante operações de usinagem. Ressalta-se ainda que as medidas de rugosidade foram obtidas nas melhores regiões de cada amostra pela limitação do rugosímetro. Assim, não foram feitas medidas na região com deformações grosseiras (ondulações).

A Figura 30 representa a variação do tipo de cavaco, entre contínuo e cisalhado, para as diferentes condições de corte. Observa-se que para a velocidade de corte de 75 m/min (condição 4) o cavaco é do tipo contínuo helicoidal tipo arruela, o que poderia ser prejudicial a vida de ferramenta e a qualidade superficial da peça. Contudo, com base nos dados de rugosidade, essa condição foi a que apresentou menores valores de rugosidade. É importante informar que para este estudo foi utilizado apenas um passe em cada condição, isso é, houve apenas um deslizamento da ferramenta sobre cada amostra. Possivelmente, em passes posteriores, a formação de APC e de cavacos do tipo contínuo poderiam prejudicar muito a qualidade superficial, ou seja, aumentar os valores de rugosidade.



**Figura 29:** Ondulações provocadas pela formação de APC na ferramenta (a) amostras na condição 2, velocidade de corte 50 m/min (b) amostras na condição 5, velocidade de corte de 100 m/min

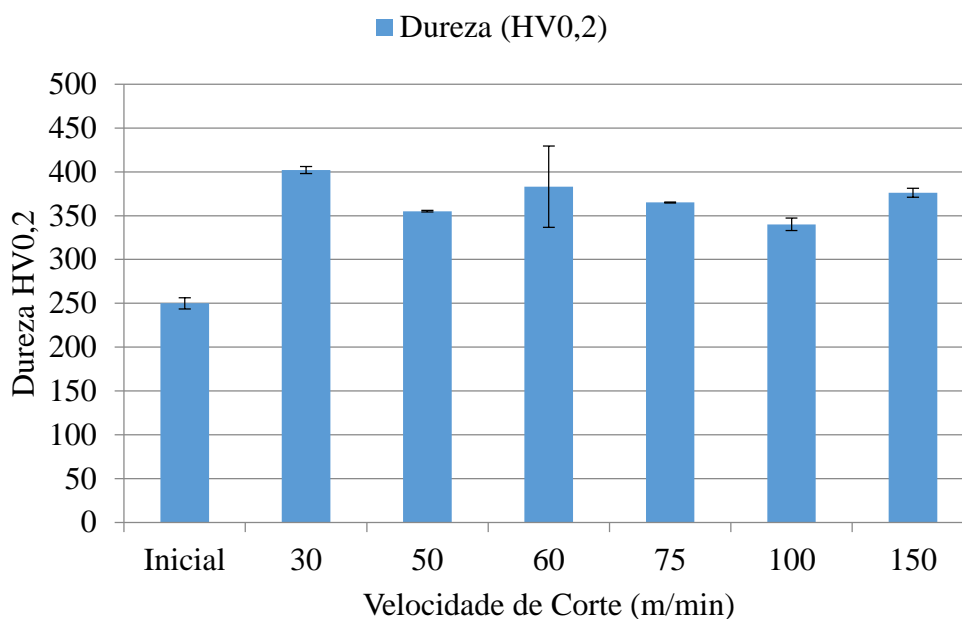


**Figura 30:** Tipos de cavaco obtidos (a) condição 1,  $V_c = 30$  m/min (b) condição 2,  $V_c = 50$  m/min (c) condição 3,  $V_c = 60$  m/min (d) condição 4,  $V_c = 75$  m/min (e) condição 5,  $V_c = 100$  m/min (f) condição 6,  $V_c = 150$  m/min

Quanto à análise de dureza, a variação observada nas análises de rugosidade também foi encontrada nos resultados de microdureza Vickers (HV0,2) realizados, como mostra a Tabela 14. Embora, analisando o gráfico da Figura 31, os maiores valores de dureza encontrados sejam nas amostras da condição 1 (30 m/min), condição 3 (60 m/min) e condição 6 (150 m/min), não há significativa variação dentre os resultados de dureza obtidos. Devido a microestrutura do aço inoxidável duplex apresentar duas fases distintas, a alteração no desvio padrão dentre as medições pode estar relacionada a variação de grãos austeníticos e ferríticos, sendo possível ter uma fração maior de grãos ferríticos em uma região de medição de dureza, porém que se tenha uma maior fração de grãos austeníticos em uma segunda medição desta mesma condição. Tal alteração nos desvios poderia ter sido amenizada pela realização de mais medições em um mesmo ponto de amostragem. Os valores foram comparados a condição como recebido de 250 HV0,2, sendo que o aumento da dureza pode ser resultado do encruamento superficial resultante geração de calor recorrente ao processo de torneamento. Mas, seria necessária uma análise microestrutural na seção transversal de todas as condições de corte para confirmar essa hipótese.

**Tabela 14:** Microdureza Vickers HV0,2.

Condição	Velocidade de Corte (m/min)	Dureza (HV0,2)
Inicial	-	250 ± 6
1	30	402 ± 4
2	50	355 ± 1
3	60	383 ± 46
4	75	365 ± 1
5	100	340 ± 7
6	150	376 ± 5



**Figura 31:** Gráfico Dureza x Velocidade de Corte

Os resultados apresentados indicam que assim como nos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, os aços duplex possuem faixas de velocidades de corte ideais para sua usinagem, onde parâmetros de velocidade fora dessas faixas podem levar a formação de APC. Considerando as faixas de velocidade de corte mais favoráveis para a usinagem de aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, é possível estimar uma faixa de velocidades para a usinagem de aços inoxidáveis duplex. Assim, seguindo a linha dos aços inoxidáveis ferríticos, os quais possuem duas faixas de velocidade ótimas, estima-se que os aços inoxidáveis duplex tenham duas faixas de velocidade mais favoráveis: de 60 a 90 m/min e acima de 150 m/min.

## Capítulo 5

### Conclusão

Analisando os resultados obtidos neste estudo, os parâmetros utilizados na operação de torneamento e, baseando-se no conhecimento transmitido pela literatura, este trabalho pode concluir que:

1. A velocidade de corte é um parâmetro de corte que influencia na integridade superficial após o processo de usinagem por torneamento.
2. A dureza superficial aumentou consideravelmente em relação à dureza inicial do material, como fornecido, possivelmente devido ao encruamento da superfície mais externa, durante o processo de torneamento. Porém, não foram observadas mudanças significativas nos valores de dureza entre as diferentes condições de usinagem, muito embora os mais variados desvios padrões entre as amostras de mesma condição tenham sido encontrados, devido à presença de frações ferríticas e austeníticas na microestrutura do material. Estas variações podem ser amenizadas ao se realizar mais medições em um mesmo ponto de amostragem.
3. Para os aços inoxidáveis duplex, a variação da velocidade de corte está diretamente ligada com a formação de arestas postiças de corte na ferramenta, e sendo assim, estes materiais possuem faixas de velocidades ideais para sua usinagem, bem como os aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos. De forma a evitar que a formação de APC ocorra, estima-se que as faixas de velocidade ideais para os aços inoxidáveis duplex estão em torno de: 60 a 90 m/min e acima de 150 m/min.

## Capítulo 6

### Sugestões para trabalhos futuros

1. Fazer a análise microestrutural em todas as condições de corte e verificar as diferenças entre cada condição.
2. Realizar usinagens com velocidades de corte mais altas, de forma compreender o comportamento da ferramenta de corte para tais faixas de velocidade, e sua influência na integridade superficial.
3. Realizar ensaios de dureza em camadas subsuperficiais, atingidas pelo processo de usinagem, de forma a caracterizar a influência da velocidade de corte na deformação dos grãos.
4. Verificar o desgaste da ferramenta de corte utilizadas neste trabalho.
5. Realizar operação de torneamento este material com fluido de corte para estudar os efeitos térmicos na integridade superficial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHIAVERINI, V; *Aços e Ferros Fundidos*, 1ª ed, São Paulo, Brasil, Editora ABM, 1977.
- [2] LEANDRO, R.M; *Influência do Tempo e da Temperatura de Solubilização no Tamanho de Grão Austenítico e Ferrítico, e na Fração de Ferrita de um Aço Inoxidável Duplex UNS S31803*, FEI, São Bernardo do Campo, Brasil, 2013.
- [3] SENATORE, M; FINZETTO, L; PEREA, E, “Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L”, *Revista Escola de Minas*, vol. 60, pp. 175-181, Mar. 2007.
- [4] LOUREIRO, J.P; *Caracterização do Aço Inoxidável UNS S31803 pela Técnica Não Destrutiva de Correntes Parasitas Pulsadas*, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.
- [5] SANTOS, D.C; *Estudo das Transformações de Fase Isotérmicas do Aço UNS S31803 Envelhecido entre 700°C e 950°C*, Dissertação de Ph.D, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, 2013.
- [6] MACHADO, Á.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO e R.T.; SILVA, M.B. da; *Teoria da Usinagem dos Materiais*, 1ª ed., São Paulo, Brasil, Editora Blücher, 2009.
- [7] BRANDI, S. D; PADILHA, A. F; “Precipitação de fase siga em aços inoxidáveis ferríticos-austeníticos com microestrutura duplex”. In: *II Seminário Brasileiro Inox 90*, ABM, pp.135-152, São Paulo, 1990.
- [8] ASTM A240/A240M, *Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*, Pensilvânia, Estados Unidos da América, 2004.
- [9] GALEASSI, D; GUIMARÃES, G.E; VALDIERO, A.C; *Desenvolvimento de um Dispositivo Semiautomático para preparação metalográfica*, COBENGE, Juiz de Fora, Minas Gerais, 2014.
- [10] BERÁNEK, L.; KOLARIK, K., “Surface integrity analysis of duplex steel by design of experiment approach”. In: *24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, pp. 630-637, 2013.
- [11] OUTOKUMPU: “High Performance Stainless Steel”, In: *Handbook of Stainless Steel*, Finlândia, 2013.
- [12] ASM, *Specialty Handbook: Stainless Steels*, Estados Unidos da América, 1994.

- [13] GATE, **Oil Gas Engineering**, Texas, Estados Unidos da América. Disponível em: <<http://www.gateinc.com/oil-gas-engineering-services/water-injection/>> Acesso em: 13 nov. 2016
- [14] LACERDA, J. C.; *Comportamento em fadiga e corrosão de um aço UNS S31803 com diferentes frações de ferrita-austenita*, Dissertação de Ph.D , Rede Temática de Engenharia de Materiais, Minas Gerais, Brasil, 2015.
- [15] KROLCZYK, G; NIESLONY, P; LEGUTKO, S; SAMARDZIC, I; *Investigation of the Physical Parameters of Duplex Stainless Steel (DSS) Surface Integrity After Turning*, Izvorni Znanstveni Rad, 2014.
- [16] FERRSAI, D.; *Fundamento da Usinagem dos Metais*, São Paulo, Brasil, Editora Edgard Blücher, 1970.
- [17] CHIAVERINI, V.; *Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento*, vol. 2, 2ª ed., São Paulo, Brasil, Editora McGraw-Hill, 1986.
- [18] DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.; *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, São Paulo, Brasil, MM Editora, 1999.
- [19] STOETERAU, R.L.; *Processos de Usinagem: Fabricação por Remoção de Material*, São Paulo: USP, Brasil, 2004.
- [20] TUDELA, F.B; APRILE, M.R, *Processos Mecânicos de Usinagem*, SENAI, São Paulo, Brasil, 1998.
- [21] AMORIM, H.J.; *Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade e de forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro*, Dissertação de M.Sc, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2002.
- [22] TRENT, E.; WRIGHT, P; *Metal Cutting*, 4ª ed., Estados Unidos da América, Editora Butterworth–Heinemann, 2000.
- [23] ASM Handbook, *Properties and Selection: Iron, steel and high performance alloys*, Vol. I, 1990.
- [24] BESCKOW, A.B; **Processos de Usinagem I**, URI, Rio Grande do Sul, Brasil. Disponível em: <[https://plant3d.files.wordpress.com/2011/04/processos\\_de\\_usinagem\\_i\\_-\\_aula\\_04\\_-\\_formac3a7c3a3o\\_de\\_cavacos.pdf](https://plant3d.files.wordpress.com/2011/04/processos_de_usinagem_i_-_aula_04_-_formac3a7c3a3o_de_cavacos.pdf)>. Acesso em: 10 nov. 2016.
- [25] AZAMBUJA, A.S; *Análise Comparativa da Vida das Ferramentas de Corte Alisadora (Wiper) e o Convencional (Standard) no Torneamento de Acabamento do Aço SAE 4140*, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 2012.
- [26] JESUS, R.C; *Avaliação dos Esforços, Temperatura e Integridade Superficial em Torneamento do Aço Inoxidável Super Duplex UNS S32760 Quando Alterado o Ângulo de*



*Posição da Ferramenta e os Parâmetros de Corte*, Dissertação M.Sc, UFSJ, São Del Rei, 2013.

[27] RODRIGUES, L.E.M.J; **Ensaio Mecânico de Materiais: Ensaio de Dureza**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, São Paulo. Disponível em: <<http://www.engbrasil.eng.br/pp/em/aula3.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

[28] BORDINASSI, C. E., *Contribuição ao Estudo da Integridade Superficial de um aço inoxidável superduplex após usinagem*, Dissertação Ph.D, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

[29] ASTM E8/E8M, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, Pensilvânia, Estados Unidos da América, 2011.

[30] Sandvik Coromant,, *Catalogue for general turning tools*, disponível em: <[http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general\\_turning](http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general_turning)> Acesso em: 20 de maio 2017.