

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**IGOR ALVES DE OLIVEIRA**

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL  
SUPERMARTENSÍTICO NOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE ASSIMETRIA E  
ACHATAMENTO**

**BELO HORIZONTE, MINAS GERAIS**

**2020**

IGOR ALVES DE OLIVEIRA

**INFLUÊNCIAS DAS CONDIÇÕES DE TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL  
SUPERMARTENSÍTICO NOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE ASSIMETRIA E  
ACHATAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestrando em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Manufatura e Materiais

Orientador: Marcelo Araújo Câmara

**BELO HORIZONTE, MINAS GERAIS**

**2020**

O48i

Oliveira, Igor Alves de.

Influências das condições de torneamento do aço inoxidável supermartensítico nos parâmetros de rugosidade assimetria e achatamento [recurso eletrônico] / Igor Alves de Oliveira. - 2020.  
1 recurso online (86 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Marcelo Araújo Câmara.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 72-86.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Torneamento - Teses.  
3. Aço inoxidável - Teses. 4. Aspereza de superfície - Teses. I. Câmara, Marcelo Araújo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

*"INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPERMARTENSÍTICO SOBRE OS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE ASSIMETRIA E ACHATAMENTO"*

*IGOR ALVES DE OLIVEIRA*

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Marcelo Araújo Câmara (orientador/Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Alexandre Mendes Abrão (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG) e Dr. Frederico de Castro Magalhães (Departamento de Engenharia Mecânica /UFMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Engenharia de Manufatura e Materiais".

Dissertação aprovada no dia 30 de julho de 2020.

Por:



Documento assinado eletronicamente por Marcelo Araujo Camara, Professor do Magistério Superior, em 03/08/2020, às 10:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Frederico de Castro Magalhaes, Professor do Magistério Superior, em 03/08/2020, às 12:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Alexandre Mendes Abrao, Professor do Magistério Superior, em 03/08/2020, às 18:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador 0200087 e o código CRC 5B3FCE53.

## DEDICATÓRIA

À minha família que me ensinou a nunca desistir de um sonho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus.

Meus sinceros e carinhosos agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para este projeto, em especial a minha família.

Agradeço ao Prof. Marcelo Câmara pela orientação e apoio.

Agradeço a Luciana Ribeiro e Reinaldo Almeida da Vallourec por terem viabilizado a realização dos ensaios.

## RESUMO

A complexidade das operações de extração de petróleo em ambientes corrosivos tem exigido o uso de novos materiais com características especiais, tais como maior resistência mecânica associada à maior resistência à corrosão. Um dos materiais que tem ganhado grande destaque na indústria do óleo e gás são os aços inoxidáveis supermartensíticos, que são aços desenvolvidos a partir de uma melhoria dos aços inoxidáveis martensíticos. Eles se caracterizam como uma opção intermediária entre os aços inoxidáveis martensíticos e os aços inoxidáveis duplex em termos da resistência à corrosão e o custo de fabricação. O objetivo do presente trabalho é investigar a correlação entre as condições de torneamento do aço inoxidável supermartensítico da classe CA6NM e os parâmetros de rugosidade desvio médio aritmético, assimetria e achatamento. Para esta finalidade, foi feito o torneamento de amostras do aço inoxidável supermartensítico utilizando algumas combinações de parâmetros de corte: 120m/min e 200m/min para velocidade de corte e 0,10mm/rot e 0,25mm/rot para o avanço. Com o auxílio do perfilômetro ótico e do rugosímetro de contato, foi possível fazer a medição destes parâmetros de rugosidade. Os testes mostraram que o aumento da velocidade de corte de 120m/min para 200m/min levou a uma diminuição dos parâmetros desvio médio aritmético, assimetria e achatamento das amostras; enquanto que o aumento do avanço de 0,1mm/rot para 0,25mm/rot levou a um aumento nos parâmetros. Esta tendência no comportamento dos parâmetros desvio médio aritmético, assimetria e achatamento foi confirmada em ambas as técnicas de medição de rugosidade.

**Palavras-chave:** Torneamento; aço inoxidável; parâmetros de rugosidade; Assimetria; Achatamento.

## ABSTRACT

The complexity of oil extraction operations in corrosive environments has required the use of new materials with special characteristics, such as higher mechanical strength associated with higher resistance to corrosion. One of the materials that has gained great prominence in the oil and gas industry is supermartensitic stainless steels, which are steels developed from an improvement in martensitic stainless steels. They are characterized as an intermediate option between martensitic stainless steels and duplex stainless steels considering corrosion resistance and manufacturing cost. The aim of the present work is to investigate the correlation between cutting parameters when turning a supermartensitic stainless steel (CA6NM) class and the roughness parameters, arithmetic mean deviation, skewness and kurtosis. For this purpose, samples were turned using some combinations of cutting parameters: 120m / min and 200m / min for cutting speed and 0.10mm / rot and 0.25mm / rot for the feed. With the aid of an optical profilometer and the contact roughness meter, it was possible to measure these roughness parameters. The results showed that the increase in the cutting speed from 120m / min to 200m / min led to a decrease in the parameters arithmetic mean deviation, skewness and kurtosis of the samples; while the increase in feed from 0.1mm / rot to 0.25mm / rot led to an increase in parameters. This trend in the behavior of the arithmetic mean deviation, skewness and kurtosis parameters was confirmed in both roughness measurement techniques.

**Keywords:** Turning; Stainless steel; roughness parameters; skewness; kurtosis.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Desempenho comparativo na usinagem das principais classes de aços inoxidáveis.<br>.....                                | 20 |
| Figura 2 - Principais direções do processo de torneamento. ....   | 22 |
| Figura 3 - Principais áreas de interesse no processo de torneamento.....  | 24 |
| Figura 4 - Classificação dos aços inoxidáveis supermartensíticos .....  | 27 |
| Figura 5 - Classificação da Integridade Superficial .....   | 32 |
| Figura 6 - Desvios estruturais.....   | 33 |
| Figura 7 - Comprimentos para avaliação de Rugosidade .....  | 36 |
| Figura 8 - Princípio de medição da luz espalhada .....  | 37 |
| Figura 9 - Representação da Rugosidade média.....   | 41 |
| Figura 10 – Curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado.....  | 43 |
| Figura 11 - Comparação entre duas superfícies com diferentes valores de Assimetria: (a) Rsk positivo, (b) Rsk negativo.....       | 43 |
| Figura 12 - Representação esquemática da assimetria de perfis de rugosidade .....   | 44 |
| Figura 13 - Achatamento da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado<br>.....                               | 45 |
| Figura 14 - Representação esquemática de perfis com semelhante assimetria e diferentes rugosidades médias.....                    | 46 |
| Figura 15 - Fluxograma de etapas do experimento .....   | 51 |
| Figura 17 – Dimensões dos corpos de prova utilizados no torneamento .....   | 52 |
| Figura 18 – Dimensões dos corpos de prova utilizados no torneamento .....   | 53 |
| Figura 16 - Torno CNC ROMI GL240.....   | 54 |
| Figura 19 - Rugosímetro SJ-210 - Mitutoyo .....   | 55 |
| Figura 20 – Perfilômetro PS50 .....   | 56 |
| Figura 21 –Mapa topológico -assimetria e achatamento .....  | 69 |
| Figura 22 – Mapa topológico adaptado para presente estudo evidenciando os parâmetros de rugosidade assimetria e achatamento ..... | 70 |

## LISTA DE EQUAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Equação 1 – Equação para cálculo da velocidade de avanço ..... | 22 |
| Equação 2 - Equação para cálculo da velocidade de corte .....  | 22 |
| Equação 3 – Equação para cálculo da assimetria .....           | 41 |
| Equação 4 - Equação para cálculo da achatamento .....          | 44 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 1 - Influência do $f$ nos parâmetros de rugosidade $R_{sk}$ , $R_{ku}$ e $R_a$ com $V_c = 120\text{m/min}$<br>.....  | 58 |
| Gráfico 2 - Influência do $f$ nos parâmetros de rugosidade $R_{sk}$ , $R_{ku}$ e $R_a$ com $V_c = 200\text{m/min}$<br>.....  | 59 |
| Gráfico 3 - Influência da $V_c$ nos parâmetros de rugosidade $R_{sk}$ , $R_{ku}$ e $R_a$ com $f = 0,1\text{mm/rot}$<br>.....   | 59 |
| Gráfico 4 - Influência da $V_c$ nos parâmetros de rugosidade $R_{sk}$ , $R_{ku}$ e $R_a$ com $f = 0,25\text{mm/rot}$<br>.....  | 60 |
| Gráfico 5 – Resultados obtidos dos parâmetros de rugosidade $R_{sk}$ , $R_{ku}$ e $R_a$ com a técnica de medição perfilometria .....   | 63 |
| Gráfico 6 – Resultado comparativo dos parâmetros de rugosidade $R_{sk}$ , $R_{ku}$ e $R_a$ das duas técnicas de medição para $V_c = 120\text{m/min}$ e $f = 0,10\text{mm/rot}$ ..... | 64 |
| Gráfico 7 - Resultado comparativo dos parâmetros de rugosidade $R_{sk}$ , $R_{ku}$ e $R_a$ das duas técnicas de medição para $V_c = 120\text{m/min}$ e $f = 0,25\text{mm/rot}$ ..... | 65 |
| Gráfico 8 - Resultado comparativo dos parâmetros de rugosidade $R_{sk}$ , $R_{ku}$ e $R_a$ das duas técnicas de medição para $V_c = 200\text{m/min}$ e $f = 0,10\text{mm/rot}$ ..... | 65 |
| Gráfico 9 - Resultado comparativo dos parâmetros de rugosidade $R_{sk}$ , $R_{ku}$ e $R_a$ das duas técnicas de medição para $V_c = 200\text{m/min}$ e $f = 0,25\text{mm/rot}$ ..... | 66 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Elementos químicos e custo dos aços utilizados para fabricação de tubos petrolíferos ..... | 27 |
| Tabela 2 - Seleção de comprimento usando a rugosidade esperada (superfícies não periódicas) .....     | 35 |
| Tabela 3 - Configuração de variáveis de entrada do ensaio .....                                       | 55 |
| Tabela 4 - Composição química do aço supermartensítico, em porcentagem em massa .....                 | 56 |
| Tabela 5 - Resultados obtidos com o rugosímetro .....   | 57 |
| Tabela 6 – Desvio Padrão e Erro Padrão das medições realizadas com o rugosímetro .....                | 58 |
| Tabela 7 - Media das rugosidades obtidas com o perfilômetro .....                                     | 62 |
| Tabela 8 - Desvio Padrão e Erro Padrão das medições realizadas com o perfilômetro .....               | 62 |
| Tabela 9 - Rugosidades obtidas com as duas técnicas de medição .....                                  | 64 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|          |   |
|----------|---|
| ABNT NBR | Associação Brasileira de Normas Técnicas              |
| AISI     | <i>American Iron and Steel Institute</i>              |
| AISM     | Aço Inoxidável Super Martensítico                     |
| APC      | Aresta Postiça de Corte                               |
| API      | <i>American Petroleum Institute</i>                   |
| ASM      | <i>American Society for Metals</i>                    |
| ASTM     | <i>American Society for Testing and Materials</i>     |
| CNC      | Comando Numérico Computadorizado                      |
| DIN      | <i>Deutsches Institut für Normung</i>                 |
| ISO      | <i>International Organization for Standardization</i> |

## LISTA DE UNIDADES

|                 |                             |                     |
|-----------------|-----------------------------|---------------------|
| $\chi_r$        | Ângulo de Posição Principal | °                   |
| f               | Avanço                      | mm/rot              |
| R <sub>a</sub>  | Desvio Médio Aritimético    | μm                  |
| D               | Diâmetro                    | mm                  |
| HR              | Dureza HV                   | kgf/mm <sup>2</sup> |
| R <sub>ku</sub> | Achatamento                 | (adimensional)      |
| LE              | Limite de Escoamento        | MPa                 |
| a <sub>p</sub>  | Profundidade de usinagem    | mm                  |
| LT              | Resistência à Tração        | Mpa                 |
| N               | Rotação                     | rpm                 |
| R <sub>sk</sub> | Assimetria                  | (adimensional)      |
| v <sub>c</sub>  | Velocidade de Corte         | mm/min              |

## LISTA DE ELEMENTOS QUÍMICOS E COMPOSTOS

|                                |                          |
|--------------------------------|--------------------------|
| Al                             | Alumínio                 |
| SiC                            | Carbeto de Silício       |
| TiC                            | Carboneto de Titânio     |
| C                              | Carbono                  |
| Cu                             | Cobre                    |
| Cr                             | Cromo                    |
| CO <sub>2</sub>                | Dióxido de Carbono       |
| S                              | Enxofre                  |
| Fe                             | Ferro                    |
| P                              | Fósforo                  |
| Cl <sup>-</sup>                | Íons Cloreto             |
| Mn                             | Manganês                 |
| Mo                             | Molibdênio               |
| Nb                             | Nióbio                   |
| Ni                             | Níquel                   |
| PcBN                           | Nitreto Cúbico de Boro   |
| TiN                            | Nitreto de Titânio       |
| AlTiN                          | Nitreto Titânio Alumínio |
| N                              | Nitrogênio               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Óxido de Alumínio        |
| Cr <sub>x</sub> O <sub>y</sub> | Óxido de Cromo           |
| Se                             | Selênio                  |
| Si                             | Silício                  |
| H <sub>2</sub> S               | Sulfeto de Hidrogênio    |
| Te                             | Telúrio                  |
| Ti                             | Titânio                  |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....                       | <b>16</b> |
| 1.1 OBJETIVOS.....                              | 18        |
| 1.1.1 Objetivos.....                            | 18        |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....            | <b>19</b> |
| 2.1 USINAGEM .....                              | 19        |
| 2.1.1 Usinabilidade do Aço Inoxidável.....      | 19        |
| 2.1.2 Torneamento .....                         | 21        |
| 2.2 AÇO INOXIDÁVEL .....                        | 24        |
| 2.2.1 Aço Inoxidável Martensítico .....         | 25        |
| 2.2.2 Propriedades do Aço Inoxidável.....       | 28        |
| 2.3 INTEGRIDADE SUPERFICIAL .....               | 30        |
| 2.3.1 Rugosidade .....                          | 32        |
| 2.3.2 Técnicas de Medição da Rugosidade.....    | 35        |
| 2.3.3 Parâmetros de Rugosidade .....            | 37        |
| 2.3.3.1 Desvio Médio Aritimético.....           | 41        |
| 2.3.3.2 Assimetria.....                         | 42        |
| 2.3.3.3 Achatamento.....                        | 44        |
| <b>3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b> .....     | <b>49</b> |
| 3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....               | 52        |
| 3.1.1 Materiais.....                            | 52        |
| 3.1.2 Máquina Ferramenta .....                  | 53        |
| 3.1.3 Medição de Rugosidade.....                | 54        |
| 3.1.3.1 Rugosímetro .....                       | 54        |
| 3.1.3.2 Perfilômetro Ótico.....                 | 55        |
| 3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....             | 57        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....          | <b>58</b> |
| <b>5. CONCLUSÕES</b> .....                      | <b>72</b> |
| <b>6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS</b> ..... | <b>73</b> |
| <b>7. REFERÊNCIAS</b> .....                     | <b>74</b> |
| <b>8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA</b> .....         | <b>84</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda da indústria do petróleo por materiais que tenham excelente desempenho em ambientes corrosivos exige do mercado atual novas soluções. Estas soluções se justificam devido a complexidade das operações de exploração em alto mar e em grandes profundidades ou até mesmo, pelos riscos associados a estas operações. Em casos onde a corrosão é mais severa em equipamentos submetidos a condições críticas de operações, tais como: temperaturas elevadas, altas pressões, contato com produtos químicos agressivos, sujeitos a presença de tensões associadas à possibilidade de corrosão, uma excelente solução é o emprego de ligas que tenham maior resistência mecânica associada à maior resistência à corrosão.

Os aços inoxidáveis são ligas desenvolvidas basicamente para ter maior resistência à corrosão. Esse aumento da resistência à corrosão, em comparação com outros aços, é atribuído à habilidade do cromo em produzir uma camada de óxido firmemente aderida à superfície dos aços inoxidáveis. Essa camada fina, da ordem de apenas algumas camadas de átomos de espessura, é capaz de proteger de forma efetiva, ou passivar, os aços inoxidáveis em diversos meios corrosivos aumentando tanto a resistência à corrosão generalizada quanto a do tipo localizada, sendo essa última de grande relevância no desempenho dos aços inoxidáveis.

Os aços inoxidáveis são aplicados em estruturas, tubulações e componentes destinados às indústrias petrolífera, química, petroquímica, de produção de energia, de papel e celulose, naval e *offshore* também, em alguns setores da agroindústria, uma vez que apresentam excelente comportamento quando empregados em meios altamente agressivos, comuns nestes setores industriais.

Entre as diferentes famílias de aços inoxidáveis, os aços inoxidáveis ferríticos/austeníticos (duplex) com suas altas concentrações de níquel e cromo não são econômicos. Por outro lado, os aços inoxidáveis martensíticos, mais baratos, tais como AISI 410 ou 420, possuem maior limite de escoamento, mas menor resistência à corrosão, tenacidade e soldabilidade. No entanto, essas propriedades podem ser melhoradas adicionando níquel e molibdênio em quantidades adequadas e reduzindo o teor de carbono (DUARTE, 2017). Essas últimas modificações levaram à introdução dos chamados aços inoxidáveis supermartensíticos.

A maioria dos problemas de corrosão na produção de óleo e gás está associada à tubulação utilizada em *casings* e *tubings*. A razão para isso é o grande volume desses

componentes utilizados por poço de petróleo. Desse modo, o aumento da resistência à corrosão do aço inoxidável supermartensítico para utilização na indústria de óleo e gás tornou-se objeto de estudo de diversas pesquisas desde o desenvolvimento dessa liga.

A usinagem de aços especiais é sempre um desafio, pois estas ligas são desenvolvidas para resistir a condições adversas (por exemplo, alta resistência à corrosão). Em geral, as empresas fabricantes de aços especiais são responsáveis pelo desenvolvimento destes materiais e por consequência, são detentoras das patentes internacionais referentes a estes produtos.

Neste contexto, a avaliação dos parâmetros de rugosidade superficial é de extrema importância no cenário atual, pois estes estão diretamente relacionados com muitos problemas fundamentais como desgaste, deformação de contato, condução de calor e corrente elétrica, entre outros. Atualmente o parâmetro de rugosidade mais utilizado para avaliar a integridade superficial das amostras é o  $R_a$  (desvio médio aritmético), porém sabe-se que a superfície geométrica real é extremamente complexa e, por este motivo, se faz necessária a introdução de outros parâmetros de rugosidade para obter um melhor entendimento de suas características.

Os parâmetros de rugosidade assimetria e achatamento, por sua vez, geralmente são utilizados como parâmetros auxiliares no processo de caracterização de um perfil topográfico. Estes parâmetros, quando analisados em conjunto com demais parâmetros de rugosidade, desempenham um papel primordial no comportamento de componentes mecânicos e trazem diversas informações sobre o processo de fabricação deste componente.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivos

Dentro deste contexto, o objetivo principal do trabalho é avaliar como a variação nos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) influencia nos parâmetros de rugosidade desvio médio aritmético, assimetria e achatamento.

Com o auxílio do rugosímetro de contato e do perfilômetro ótico, fazer a medição dos parâmetros de rugosidade desvio médio aritmético, assimetria e achatamento das amostras torneadas e verificar se existe alguma tendência nos resultados; e verificar se os resultados obtidos pelas duas técnicas possuem alguma correlação entre si.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 USINAGEM

A usinagem pode ser definida como sendo uma operação que ao conferir à peça a forma, as dimensões, o acabamento, ou ainda a combinação qualquer destes itens, produzem cavacos. E por cavaco entende-se que é a porção do material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar uma geometria irregular (FERRARESI, 1977).

A usinagem pode ser classificada em duas grandes frentes: convencional e não convencional; e dentro da primeira o processo mais conhecido e aplicado é o torneamento, que é definido como um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução através de retirada de excesso de material na forma de cavaco com auxílio de ferramentas monocortantes (SHAW, 2005). Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente por uma trajetória coplanar com o referido eixo. A usinagem não convencional são feitas através de processos elétricos, térmicos, químicos, dentre outros.

É um processo complexo e simples ao mesmo tempo onde se produzem peças removendo excesso de material na forma de cavaco. É complexo devido às dificuldades em se determinar as condições ideais de corte. É simples porque, uma vez determinadas as condições ideais de corte, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de ação especial do operador. As condições ideais de corte são capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível (MACHADO *et al*, 2009).

#### 2.1.1 Usinabilidade do Aço Inoxidável

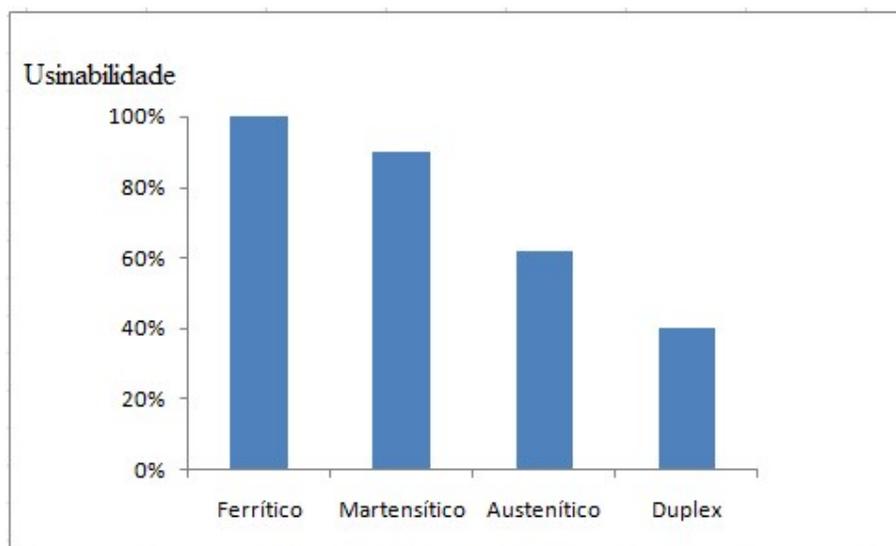
Segundo ASM (1999), os aços inoxidáveis caracterizam-se por um comportamento “pastoso” durante o corte, mostrando uma tendência de formar cavacos longos e flexíveis que aderem à ferramenta ou formam aresta postiça de corte, além de tornarem difícil a remoção dos mesmos; isto pode resultar em redução da vida da ferramenta e acabamento superficial inadequado. Os benefícios da resistência à corrosão devem ser balanceados com o custo de usinagem, pois quando se trata de aço inoxidável a usinabilidade é o principal fator de custo (BOSSERT, 1995 apud MARQUES, 2007).

As características dos aços inoxidáveis que exercem grande influência na usinabilidade incluem (MACHADO *et al*, 2009):

- 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.

As altas taxas de encruamento fazem dos aços inoxidáveis duplex materiais de difícil usinabilidade, requerendo tempos maiores para o seu processamento através da usinagem (IMO, 2014). A figura 1 mostra um comparativo entre a usinabilidade dos aços inoxidáveis.

Figura 1 - Desempenho comparativo na usinagem das principais classes de aços inoxidáveis.



Fonte: MACHADO (2009) - Adaptado

Os aços inoxidáveis ferríticos, que na usinagem se assemelham aos aços de baixa liga em relação à quebra de cavacos e desempenho da ferramenta, têm grau de usinabilidade 100%, o que indica maior facilidade para usiná-lo e maior vida da ferramenta em comparação à usinagem dos outros tipos de inox.

Os aços inoxidáveis austeníticos são considerados como uma das classes com a pior usinabilidade, sendo sua usinagem dificultada pelo seu alto coeficiente de encruamento e baixa condutividade térmica, promovendo desgaste acelerado da ferramenta e elevadas temperaturas

na interface cavaco-ferramenta além da formação de cavacos longos, que contribuem para o pior acabamento superficial da peça usinada (TRENT, WRIGTH, 2000; MACHADO *et al.*, 2009).

Os aços duplex são citados na figura com usinabilidade 40%. Portanto, os mais difíceis de usinar. Os aços super duplex são um tipo de aço inoxidável ainda mais difícil de ser usinado em comparação ao duplex, isto é, tendem a apresentar menor vida da ferramenta e maiores esforços de corte quando comparado aos outros.

Uma alternativa para melhorar a usinabilidade dos aços inoxidáveis é a adição de elementos de liga que formam inclusões frágeis, reduzindo a ductilidade e promovendo a quebra do cavaco. Geralmente o elemento mais empregado é o enxofre (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2014). Adições de telúrio e selênio também melhoram a usinabilidade, porém provocam quedas em outras propriedades, produzindo efeitos secundários indesejáveis (CHIAVERINI, 2002; MACHADO *et al.*, 2009).

Alguns trabalhos relacionados aos aços inoxidáveis mostram a dificuldade na usinagem desses materiais, como forças elevadas, formação de cavacos longos, vibração e conseqüentemente, problemas no acabamento da superfície, avarias excessivas como lascamentos e quebra da ferramenta, geralmente atribuída a uma alta adesão e abrasão na interface cavaco-ferramenta, formação de aresta postiça e maiores áreas de contato (KORKUT *et al.*, 2004).

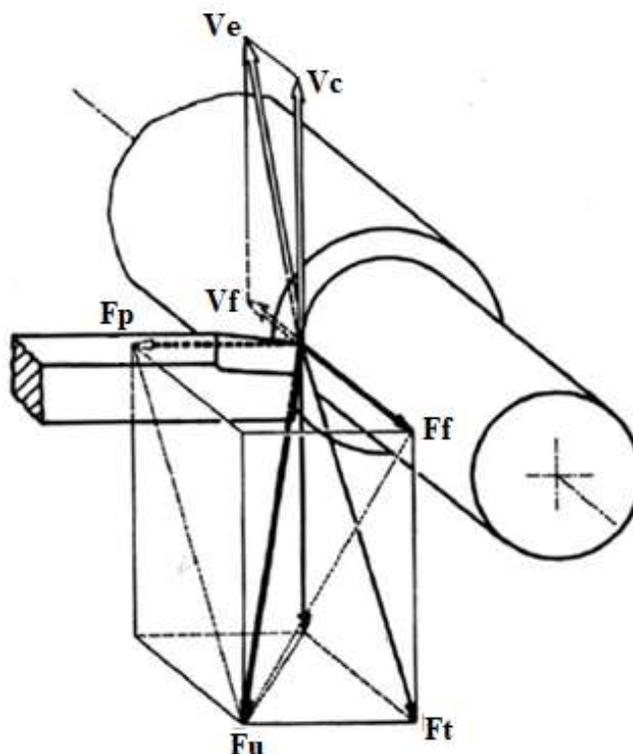
Estes fatores reforçam o efeito das propriedades destes materiais na usinabilidade, de forma que uma baixa condutividade térmica e alta ductilidade em temperaturas elevadas promovem amaciamento do material, que por sua vez, se deforma muito sem se quebrar, fazendo com que cavacos longos sejam produzidos, e conseqüentemente aumentando a área de contato cavaco-ferramenta e a adesão na ferramenta. Já o encruamento contribui para uma maior abrasão, comprometendo o acabamento da superfície e promovendo um desgaste acelerado da ferramenta.

### **2.1.2 Torneamento**

O torneamento é a operação de usinagem mais comumente empregado em trabalhos de corte de metal (TRENT e WRIGHT, 2000). A ferramenta monocortante remove material de uma peça girante, por meio do mecanismo de cisalhamento. O processo é caracterizado

pela presença de grandes deformações, altas taxas de deformação e elevados valores de temperatura e gradientes de temperatura (Shaw, 2005). No processo de torneamento se verifica a presença de três direções principais de movimento apresentadas na figura 2:

Figura 2 - Principais direções do processo de torneamento.



Fonte: Ferraresi, 1977

A direção de corte é dada pelo vetor tangente à velocidade de corte em um ponto escolhido dentro da área contato da ferramenta com a peça. Esta direção é perpendicular tanto ao eixo de rotação da peça quanto à linha radial que parte do centro da peça e acaba no ponto de corte escolhido. Tanto  $v_c$  (velocidade de corte) quanto  $F_c$  (força de corte) estão na direção de corte. A direção de avanço é dada pelo movimento de avanço da ferramenta em relação à peça, sendo esta paralela ao eixo de rotação da peça quando ocorre o torneamento cilíndrico. A  $v_f$  (velocidade de avanço) e  $F_f$  (força de avanço) estão na direção de avanço. A última direção é a de penetração, perpendicular às duas anteriores e no sentido radial da peça (FERRARESI, 1977). A  $F_p$  (força passiva) está na direção de penetração (Machado *et al.*, 2009).

Os parâmetros de corte são variáveis a serem definidas antes do início do ensaio que vão interferir diretamente na integridade superficial da amostra usinada. O avanço ( $f$ ) é a distância que a ferramenta percorre na direção axial a cada revolução da peça. A velocidade de avanço ( $v_f$ ) é a velocidade linear da ferramenta na direção paralela à peça. Este parâmetro pode ser descrito como produto do avanço da ferramenta ( $f$ ) pela rotação da peça ( $n$ ), conforme representado na Eq.1.

$$V_f = f \times n \quad (\text{Eq.1})$$

Já a velocidade de corte ( $v_c$ ) é a velocidade tangencial instantânea resultante da peça no ponto de contato da ferramenta, a uma profundidade de corte definida, onde os movimentos de corte e avanço ocorrem simultaneamente, conforme Eq.2.

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:  $v_c$  é a velocidade de corte [m/min];  $d$  é o diâmetro da peça [mm];  $n$  é a rotação [rpm].

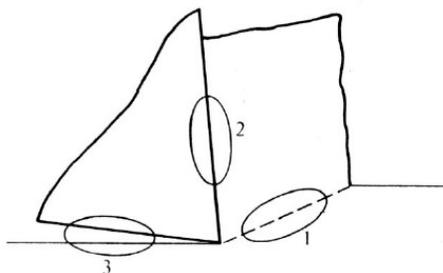
O torneamento pode ser classificado quanto à finalidade da operação em desbaste e acabamento, e quanto à trajetória da ferramenta em retilíneo e curvilíneo. A operação de acabamento confere as dimensões finais especificadas à peça, já o desbaste se refere à operação anterior a de acabamento, visando conferir forma e dimensões próximas às finais.

Em pesquisas científicas, o torneamento é a operação de usinagem mais comumente empregada em trabalhos experimentais sobre a investigação do comportamento tanto do material de trabalho quanto das ferramentas utilizadas no corte de metais segundo critérios de usinabilidade (TRENT; WRIGHT, 2000). Dentre as variantes do processo, o torneamento cilíndrico é o mais utilizado em investigações dos mecanismos fundamentais de formação do cavaco.

No processo de torneamento, a tarefa mais importante é selecionar corretamente os parâmetros de corte para obter o mais alto desempenho de corte. O desempenho do corte está diretamente relacionado com uma boa integridade superficial, alta taxa de remoção de material, baixo desgaste da ferramenta e baixo consumo de energia.

No processo de corte existem três áreas de interesse na região ferramenta-material usinado, que são apresentados na figura 3 (SHAW, 2005).

Figura 3 - Principais áreas de interesse no processo de torneamento



Fonte: Shaw, 2005

A primeira área se estende ao longo do plano de cisalhamento e forma a fronteira entre a região deformada e não deformada do material metálico. A segunda região está entre o cavaco e a face da ferramenta e a terceira está entre a superfície usinada e a ferramenta.

Na primeira área, o interesse está focado nas características (ou mecanismos) de deformação plástica do material. Esses mecanismos são diferentes, dependendo do material analisado. Já na segunda área, tem-se o atrito e o desgaste da ferramenta ou da combinação ferramenta-material da peça. O desgaste da ferramenta pode ocorrer de várias formas (desgaste adesivo, abrasivo, por difusão ou fadiga), ocorrendo interação com o meio (SHAW, 2005).

Na terceira região, o interesse está na qualidade da superfície produzida e, portanto, na rugosidade. A rugosidade é uma das formas de se avaliar a integridade da superfície, sendo mais importante em processos de acabamento, onde muitas vezes faz parte das especificações do produto. A rugosidade é caracterizada pela presença de sulcos formados pela ferramenta durante o corte. A rugosidade pode ser analisada em termos de parâmetros como desvio médio aritmético ( $R_a$ ), altura máxima ( $R_y$ ) e altura total ( $R_t$ ), dentre outros (DINIZ, 2000).

## 2.2 AÇO INOXIDÁVEL

Nos aços inoxidáveis, o cromo é o elemento chave para transmitir a desejada resistência à corrosão. Teores de cromo superiores a 12% (em peso) são requeridos para permitir a característica inoxidável desses aços. O aumento da resistência à corrosão, em comparação com

outros aços, é atribuído à habilidade do cromo de produzir uma camada de óxido firmemente aderida à superfície dos aços inoxidáveis. Essa camada fina, da ordem de apenas algumas camadas de átomos de espessura, é capaz de proteger de forma efetiva, ou passivar, os aços inoxidáveis em diversos meios corrosivos (HEIDERSBACH, 2011).

O fenômeno de passivação consiste na formação de uma camada de óxido de cromo e a estabilização ou dissolução dessa camada no meio corrosivo. A formação, impermeabilidade e a taxa de dissolução dessa camada no meio corrosivo controlam a resistência à corrosão tanto do tipo generalizada quanto do tipo localizada, sendo essa última de grande relevância no desempenho dos aços inoxidáveis (COSTA E SILVA, 2006).

### 2.2.1 Aço Inoxidável Martensítico

Os aços inoxidáveis martensíticos são usados quando resistência à corrosão e resistência à oxidação são necessárias em combinação com alta resistência a baixas temperaturas ou resistência à fluência a temperaturas elevadas. Os aços inoxidáveis martensíticos podem ser de alto ou baixo carbono construídos em torno da composição do ferro, 12% a 17% de cromo, carbono de 0,10% (tipo 410) a 1,2% (tipo 440C).

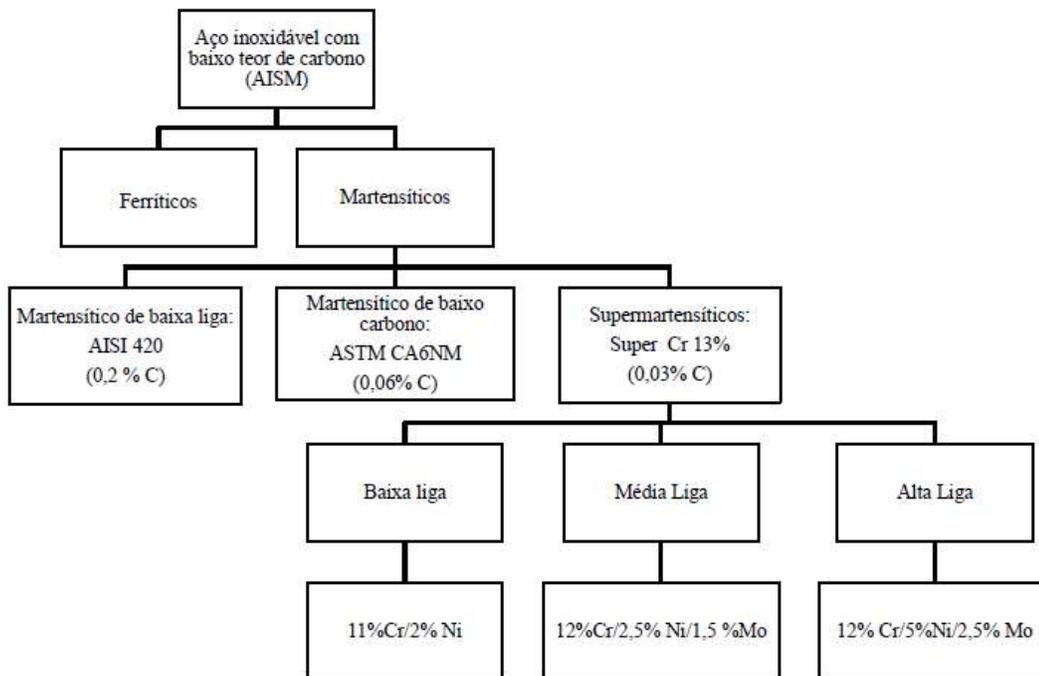
O aço inoxidável martensítico com baixo teor de carbono surgiu em 1992 (SUMITOMO, 2011) e sua primeira utilização ocorreu em 1996 transformando significativamente o uso das ligas resistentes à corrosão (SMITH & CELANT, 2002). O uso deste aço se deve à necessidade de aliar resistência mecânica, resistência à corrosão, soldabilidade e baixo custo (ANSELMO *et al.*, 2006).

Os aços inoxidáveis supermartensíticos, também denominados AISM, foram introduzidos nas indústrias de óleo e gás na década de 1990 com o objetivo de substituir os aços inoxidáveis duplex, mais caros, em aplicações de *tubings on shore* e *offshore*. O desenvolvimento dos aços inoxidáveis supermartensíticos foi incentivado pela indústria de óleo e gás com objetivo obter um produto para aplicações de tubulações onshore e *offshore* capaz de associar resistência à corrosão e baixo custo, com as seguintes características principais (CARROUGE, 2002):

- Resistência à corrosão adequada aos compostos que são extraídos juntamente com o óleo e o gás, tais como CO<sub>2</sub>, Cl<sup>-</sup> e H<sub>2</sub>S, e também temperaturas de até 150°C e pH baixos até o nível de 3;
- Alta resistência mecânica (cerca de 550 MPa) para permitir o uso de tubos mais leves reduzindo peso e custo;
- Boa tenacidade em baixa temperatura;
- Boa soldabilidade permitindo a fácil conexão da tubulação e com rápido ou nenhum tratamento térmico após soldagem.

Silva (2010) e Atehortua (2013) mencionam que novas classes de aços inoxidáveis supermartensíticos foram desenvolvidas com composições químicas diferentes e que podem ser identificadas por sua composição em ser semelhante ao aços das famílias dos ferríticos e de acordo com a Figura 4. Estas novas classes conseguem atender às necessidades de diferentes áreas da indústria, principalmente da indústria petrolífera, em função de suas propriedades mecânicas (maior tenacidade e resistência à corrosão e melhor soldabilidade). A diferenciação do processamento e composição química em relação aos aços duplex com 22,5% de cromo: custo de fabricação mais baixo, podem ser empregados em trabalhos com óleo e gás e apresentam resistência ao CO<sub>2</sub> com baixo teor de H<sub>2</sub>S .

Figura 4 - Classificação dos aços inoxidáveis supermartensíticos



Fonte: Adaptado de ATEHORTUA, 2013; MARSHALL; FARRAR, 2001 e RODRIGUES *et al.*, 2005.

Comparados aos seus antecessores (aços inoxidáveis martensíticos), os aços inoxidáveis supermartensíticos aumentaram a resistência à corrosão geral e localizada e melhoraram a resistência à corrosão.

De acordo com Smith & Celant (2002), a primeira utilização de tubos rígidos fabricados em aço inoxidável martensítico por indústrias petrolíferas ocorreu em 1981 pela empresa Mobil no campo de Arun na Indonésia, onde mais de 28 km de tubos foram instalados em um período de treze anos. Entretanto, a utilização da classe convencional de aços inoxidáveis martensíticos para a fabricação de tubos rígidos apresenta a desvantagem de baixa soldabilidade (KONDO *et al.*, 2002). Com isto, após a soldagem, é necessária a aplicação de tratamentos térmicos que nem sempre são possíveis de serem realizados em campo (HENKE *et al.*, 2013).

Segundo Carrouge (2002), as características do material para a fabricação de tubos rígidos para extração na terra e no mar de óleo e gás são: resistência à corrosão por CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S em temperaturas até 150° C, elevado limite de escoamento (em torno de 550 MPa) com intuito de permitir a fabricação de tubos com menor espessura (diminuindo peso e custos), boa tenacidade ao impacto sob baixas temperaturas e ótima soldabilidade (redução de possíveis tratamentos térmicos após a soldagem).

De acordo com Sumitomo (2011), o AISM 13 Cr possui resistência à corrosão por CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S acima de 180° C. Heuser *et al.* e Toussaint *et al.* citados por Rodrigues *et al.* (2007), afirmam que o AISM possui as seguintes propriedades mecânicas: dureza entre 25 e 32 HRC, limite de escoamento entre 650 e 750 MPa, resistência à tração entre 880 e 950 MPa, alongamento até ruptura de 20% e energia de impacto acima de 100 J. Segundo Vallourec Tubos do Brasil S.A. (2005), estas propriedades são muito dependentes do tipo de tratamento térmico e do balanço entre os elementos químicos.

O AISM tem um custo de 25% menor em relação às outras ligas resistentes à corrosão utilizadas pela indústria petrolífera devido à menor concentração de elementos de liga em relação ao aço duplex, além de ser viável sua fabricação na maioria das linhas de produção de tubos existentes no mundo. Com isto, foram instalados aproximadamente 660 km de tubos fabricados de AISM entre 1996 e 2002 (SMITH & CELANT, 2002). A Tabela 1 compara o preço por tonelada das ligas utilizadas para fabricação de tubos petrolíferos. Embora o aço carbono apresente menor custo por tonelada, a sua utilização para transporte de fluidos corrosivos não é uma boa opção econômica devido à necessidade de proteção contra corrosão, inspeção, manutenção e substituição precoce das peças corroídas (CARROUGE, 2002).

Tabela 1: Elementos químicos e custo dos aços utilizados para fabricação de tubos petrolíferos

| Aço                              | C<br>(%p) | Cr<br>(%p) | Ni<br>(%p) | Mo<br>(%p) | Preço<br>(US\$/ ton) |
|----------------------------------|-----------|------------|------------|------------|----------------------|
| Aço Carbono                      | 0,26      | 0          | 0          | 0          | 1000                 |
| Aço Inoxidável Duplex 2205       | ≤ 0,03    | 22         | 5          | 3          | 4300                 |
| Aço Inoxidável Supermartensítico | ~ 0,01    | 12         | 6          | 2,5        | 3200                 |

Fonte: SMITH & CELANT (2002) – tabela adaptada

Ramirez (2007) afirma que apesar da boa soldabilidade do AISM em relação aos martensíticos convencionais se dá pela possibilidade de se realizar procedimentos especiais de soldagem (por exemplo, soldagem por corrente pulsada) que minimizam os níveis de tensões residuais nas zonas termicamente afetadas pela solda.

### 2.2.2 Propriedades do Aço Inoxidável

Segundo Machado *et al.* (2011), os aços inoxidáveis são caracterizados por baixa condutividade térmica e alta capacidade de endurecimento por deformação, além de serem materiais que aderem à aresta de corte. Devido à baixa condutividade térmica, a maior parte do

calor, geralmente carregada pelo cavaco, deverá ser conduzida através da cunha de corte o que contribui para a deterioração precoce da ferramenta. Klocke (2011) afirma que a alta capacidade de endurecimento por deformação provoca esforços mecânicos adicionais durante a formação do cavaco, especialmente em casos de cortes interrompidos. A adesão do cavaco do aço inoxidável à aresta de corte da ferramenta ocorre devido à alta ductilidade deste material, gerada pela grande tendência à deformação plástica da microestrutura. Com isto, além de ocorrer o fenômeno descrito anteriormente, também são formados os indesejáveis cavacos em fita longa.

A usinabilidade dos aços inoxidáveis pode variar conforme a estrutura cristalina, tratamento térmico e presença de elementos de liga (TRENT & WRIGHT, 2000). A seguir serão apresentados os efeitos sobre a usinabilidade dos principais elementos de liga que compõem do aço inoxidável supermartensítico:

- Ferro (Fe): o ferro puro é excessivamente macio para ser usinado devido ao elevado contato entre peça e ferramenta. A usinabilidade deste elemento pode ser melhorada por trabalho a frio ou refinamento do tamanho de grão antes da usinagem (SHAW, 2005);
- Carbono (C): a usinabilidade dos aços com a concentração de carbono menor que 0,25% é essencialmente caracterizada pela propriedade da estrutura ferrita de formar uma superfície com alta rugosidade após a usinagem. A ferrita tem alta tendência à adesão e formação de aresta postiça de corte em baixas temperaturas (APC) quando o aço é usinado sob baixas velocidades de corte (TRENT & WRIGHT, 2000). Os aços com baixo teor de carbono também possuem uma forte tendência à formação de rebarbas (KLOCKE, 2011);
- Cromo (Cr) e Molibdênio (Mo): estes elementos de liga associados aos carbonetos existentes no aço prejudicam a usinabilidade (KLOCKE, 2011). Os carbonetos de cromo e de molibdênio são partículas duras e abrasivas (SHAW, 2005);
- Níquel (Ni): as ligas contendo níquel tendem a formar aresta postiça de corte e a promover desgaste de entalhe (MACHADO *et al.*, 2011);
- Titânio (Ti) e Vanádio (V): estes elementos químicos são adicionados aos aços com o intuito de refinar o grão, entretanto, isto não é favorável para a usinagem porque aumenta os esforços mecânicos para a formação do cavaco (KLOCKE, 2011). Além disto, os aços com presença de titânio são mais difíceis de se usinar, pois a existência

de Ti(C,N) eleva a abrasividade desses aços. Também podem contribuir para a formação de APC, redução do tempo de vida da ferramenta e risco de combustão durante a usinagem. O vanádio combinado com o cromo aumenta a resistência mecânica e ductilidade, fatores que influenciam negativamente a usinabilidade (MACHADO *et al.*, 2011);

- Manganês (Mn): a concentração de manganês acima de 1,5% facilita a usinabilidade em aços com baixo teor de carbono, pois ajuda na formação do cavaco (KLOCKE, 2011). O manganês tem alta afinidade química com o enxofre, formando o sulfeto de manganês. O aumento da concentração deste composto melhora a usinabilidade dos aços ferríticos, martensíticos e austeníticos (KOSA & NEY, 1989);
- Cobre (Cu): embora não tenha grande influência sobre a formação de cavacos, sua presença pode contribuir para o aumento da ductilidade do aço, ou seja, auxiliando na formação de cavacos mais longos (MACHADO *et al.*, 2011);
- Silício (Si): influencia positivamente na quebra do cavaco, porém negativamente por aumentar o desgaste por abrasão, caso esteja em inclusão (silicatos), nas ligas onde está presente (MACHADO *et al.*, 2011). Este elemento provoca o aumento do desgaste da ferramenta devido ao aumento da força de corte e à existência da ferrita na microestrutura do aço (KLOCKE, 2011);
- Níobio (Nb): por aumentar a resistência mecânica e à corrosão, permite a usinagem apenas sob baixas velocidades de corte (MACHADO *et al.*, 2011);
- Enxofre (S): este elemento associado ao manganês forma o MnS, que influencia positivamente na usinabilidade formando cavacos curtos, melhora a qualidade da superfície usinada e reduz a tendência de formação da APC (KOSA & NEY, 1989);
- Fósforo (P): a presença de fósforo auxilia na formação de cavacos curtos. Em concentrações acima de 0,1% melhora a qualidade da superfície usinada (KLOCKE, 2011).

### 2.3 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

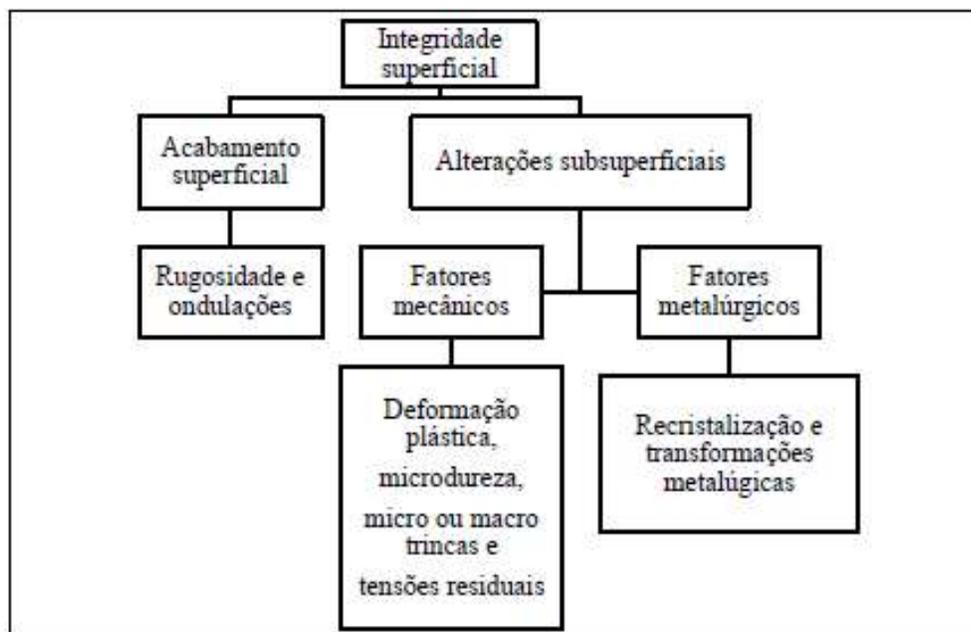
A condição de uma superfície usinada é o resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões

residuais e às vezes reações químicas. Todos esses fatores podem ter efeitos diferentes na nova superfície e, portanto, engloba um grande número de variações na mesma. Desta forma, o conceito de integridade superficial não pode ser definido apenas em uma dimensão e não abrange somente a rugosidade da superfície ou a sua forma geométrica.

Morelo (2014) e Machado *et al.* (2015) apontam que a integridade superficial de um material está relacionada à topologia e às propriedades físicas, químicas, mecânicas e metalúrgicas da superfície. Certamente, a integridade superficial de um componente é um fator importante a ser considerado no processo de usinagem devido à condição da superfície influenciar o desempenho do componente, por exemplo, na resistência à fadiga e à corrosão. O acabamento da superfície usinada é influenciado pelo processo de fabricação, ou seja, depende dos fatores de entrada do sistema de usinagem: processo, operação de corte, parâmetros de corte, ferramenta de corte, suporte, método de refrigeração, tipo de fluido de corte, etc. As alterações superficiais (mecânicas, metalúrgicas e químicas) podem comprometer a qualidade da peça. Neste trabalho serão discutidos apenas o acabamento superficial (rugosidade).

O termo integridade superficial engloba também outras características da superfície e de camadas abaixo desta. São classificadas em alterações na superfície (acabamento superficial) e alterações em camadas internas da peça (alterações subsuperficiais) e descrevem a integridade superficial. A Figura 5 mostra uma classificação de alterações que podem ocorrer numa peça usinada por um processo de usinagem convencional.

Figura 5 - Classificação da Integridade Superficial



Fonte: Adaptado – MACHADO (2009).

Dentre as alterações citadas na figura acima o acabamento superficial é a mais fácil de ser avaliada e, por isso, mais comumente monitorada.

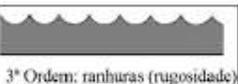
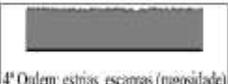
### 2.3.1 Rugosidade

De acordo com a norma ABNT NBR 4287 (2002), a rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros micrométricos derivados do processo de corte, como por exemplo, marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, etc. Geralmente a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar um processo de usinagem, ao passo que ondulações e falhas devem ser evitadas na fabricação de componentes, pois representam erros de fabricação. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos, podendo influenciar a qualidade de deslizamento, a resistência ao desgaste, a possibilidade de ajuste forçado, a resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, a qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras, resistência à corrosão e à fadiga, na vedação e, finalmente, na aparência (KALPAKJIAN e SCHMID, 2001).

O perfil de uma superfície apresenta características complexas que são uma combinação de erros de forma, rugosidade e ondulações. A norma DIN 4760 (1982) apresenta uma definição acerca destas combinações e define seis ordens ou desvios estruturais da superfície que estão representados na Figura 6. A textura pode ser definida como a caracterização geométrica da superfície. Porém, é preciso esclarecer que existem vários níveis de desvios geométricos na superfície de uma peça, sendo que a textura não abrange a todos, limitando-se aos desvios de segunda a quinta ordem, ou seja, ondulação e rugosidade (CALIL, 2001).

Na norma DIN 4761 (1978) são descritos os vários tipos de textura possíveis, determina padrões e define termos para a descrição qualitativa da textura com objetivo de agrupá-las e classificá-las com base na forma de suas marcas, preocupando-se ainda em trazer símbolos para a caracterização destas superfícies.

Figura 6 - Desvios estruturais

| DESVIO DE FORMA   | Exemplo de tipo de desvio                               | DESVIO DE FORMA  | Exemplo de tipo de desvio   |
|---|---|--|---|
| Representação em um perfil<br><br>1ª Ordem: desvios de forma | <b>FORMA</b><br>Paralelismo;<br>cilindricidade;<br>etc. | Representação em um perfil<br><br>2ª Ordem: ondulações | <b>ONDULAÇÃO</b><br>Ranhas ou<br>raias                            |
| <br>3ª Ordem: ranhas (rugosidade)                            | <b>RUGOSIDADE</b><br>Ondas                              | <br>4ª Ordem: estrias, escamas (rugosidade)            | <b>RUGOSIDADE</b><br>Estrias; escamas;<br>protuberâncias;<br>etc. |
| 5ª Ordem: desvios de forma<br>Não mais representável<br>graficamente em forma simples   | <b>RUGOSIDADE</b><br>Microestrutura<br>do material      | 6ª Ordem: desvios de forma<br>Não mais representável<br>graficamente em forma simples  | <b>Reticulado</b><br>cristalino do<br>material                    |
|    | Superposição<br>dos desvios de<br>1ª a 4ª ordem         |  |   |

Fonte: DIN 4760, 1982.

Jesus (2013) avaliou o desvio médio aritmético após o torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32760 usando insertos de metal duro com revestimentos MT-CVD Ti(C,N) + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiN com diferentes ângulos de posição principal  $\chi$ . Os resultados mostraram que o avanço e o ângulo de posição principal apresentaram influência sobre a rugosidade. O avanço possui grande contribuição para maiores valores de rugosidade já que favorece o aumento da distância entre picos. À medida que se aumenta o ângulo de posição, considerando o mesmo avanço, aumenta-se a espessura e diminui-se a largura do cavaco, portanto, a quebra do cavaco é facilitada e a rugosidade tende a diminuir.

A rugosidade da superfície de uma peça torneada depende dos parâmetros do processo e também da geometria da ferramenta. Também depende de vários outros fatores como: combinação da peça de trabalho e do material da ferramenta e suas propriedades mecânicas, qualidade e tipo da máquina-ferramenta utilizada, ferramentas auxiliares, lubrificante usado e vibrações entre a peça de trabalho, a máquina-ferramenta e a ferramenta de corte (SHAW, 1984).

Bordinassi (2006) relata que a velocidade de corte e o avanço influenciaram os valores das rugosidades na operação de acabamento do aço super duplex. O autor observou que o aumento da velocidade de corte favoreceu a diminuição da formação de aresta postiça de corte, que neste material pode ocorrer sob valores mais elevados do que nos aços convencionais. O aumento da velocidade de corte promove a diminuição da área de contato entre a ferramenta e o cavaco, diminuindo as forças de corte e deformações. Por outro lado, a usinagem a seco e a diminuição da velocidade de corte aumentam a rugosidade superficial.

Trent e Wright (2000) afirmam que uma das principais funções dos fluidos de corte é reduzir a rugosidade superficial, sendo mais efetivos sob baixas velocidades de corte e baixos avanços e na presença de APC. De acordo com Bordinassi (2006), a presença do fluido tende a diminuir a adesão entre as camadas de material que formam a APC, reduzindo o tamanho dos fragmentos cisalhados que permanecem na superfície da ferramenta de corte. Esta diminuição é causada pela ação do vapor do fluido de corte no caminho da fratura do material, no qual forma uma nova superfície e reduz a adesão.

Sobiya e Sigalas (2016) avaliaram o acabamento superficial (rugosidade) quando utilizaram insertos de nitreto cúbico de boro (PcBN) durante a usinagem de componentes de aço inoxidável martensítico (AISI 420 B). O ensaio foi realizado em condições de desbaste e acabamento (operações de torneamento e mandrilamento). Os resultados mostraram que a rugosidade encontrada corresponde a N6 e N5 (ISO 1302, 2002), que são aplicáveis para superfícies de mancais produzidas por retificação. A operação de torneamento com PcBN pode ser usada para substituir torneamento seguido da retificação. Por fim, Sobiya e Sigalas (2016) reforçam que tolerâncias apertadas são o resultado da combinação de alta rigidez e precisão da máquina, associadas às propriedades da ferramenta de PcBN (alta resistência à abrasão e ao choque térmico).

Liew e Ding (2008) investigaram o desempenho de insertos de metal duro sem e com revestimento de AlTiN durante o fresamento do aço inoxidável martensítico AISI 420. Notou-se que a alta resistência à fratura exibida pelo inserto revestido pode ter contribuído na

prevenção da formação de trincas. Os resultados experimentais também mostraram que o revestimento aumentou a resistência ao desgaste abrasivo do inserto. Os autores variaram a dureza da superfície da peça (35, 40 e 55 HRC) e notaram que na usinagem de peças com dureza de 55 HRC, o acabamento foi melhor que nas superfícies com 35 e 40 HRC. O pior acabamento para as durezas de 35 e 40 HRC pode ser atribuído ao alto grau de aderência do cavaco à ferramenta de corte, contribuindo desta forma para a formação da APC.

Oliveira (2017) avaliou a rugosidade no torneamento do aço inoxidável supermatensítico (Super Cromo 13%) utilizando condições distintas de lubri-refrigeração (alta pressão, baixa pressão, corte a seco e com ar comprimido) e com duas direções de aplicação da lubri-refrigeração (na superfície de saída e na superfície de folga). Os insertos utilizados nos testes foram de metal duro das classes ISO P 25-45 e M 30-45 conforme fornecidos e com sulcos confeccionados na superfície de saída. A rugosidade após o corte a seco (ferramenta convencional e com sulco) mostrou-se inaceitável, produzindo os piores acabamentos. A aplicação de fluido de corte sob alta pressão na superfície de saída gerou melhor qualidade superficial comparada ao corte a seco e com aplicação de ar comprimido. A aplicação de ar comprimido na superfície de saída propiciou o pior acabamento. Identificou-se que a combinação da aplicação de ar comprimido na superfície de folga simultaneamente ao fluido de corte sob alta pressão na direção da superfície de saída propiciou o melhor resultado.

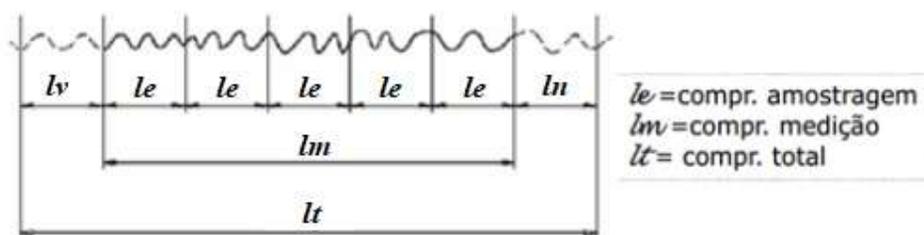
As superfícies, ainda que rigorosamente trabalhadas, apresentam, quando examinadas no microscópio, descontinuidades, imperfeições geométricas, ondulações e asperezas. Estas são denominadas de rugosidade superficial e é função do tipo de acabamento superficial especificado, que por sua vez é função do processo de fabricação e máquina-ferramenta utilizada (FERRARESI, 2013).

### **2.3.2 Técnicas de Medição da Rugosidade**

A rugosidade superficial pode ser medida de duas maneiras: métodos com contato e sem contato. Os métodos de contato envolvem arrastar uma caneta de medição pela superfície; esses instrumentos são chamados rugosímetros. Os métodos sem contato incluem: perfilometria, interferometria, microscopia confocal, variação de foco, luz estruturada, capacitância elétrica, microscopia eletrônica, microscopia de força atômica e fotogrametria (KALPAKJIAN, 2010).

No caso dos métodos de medição com contato, um parâmetro de funcionamento que deve ser levado em conta é o comprimento da amostragem, cut-off. O comprimento de amostragem, não deve ser confundido com a distância total percorrida pelo apalpador sobre a superfície. O comprimento total é dividido em cinco comprimentos de amostragem ( $l_e$ ) e os extremos ( $l_v$ ) e ( $l_n$ ), corresponde a o início e estabilização da velocidade da ponta e à desaceleração do apalpador respectivamente, pelo qual os extremos não são considerados dentro do comprimento de medição (Lima, 2011). A figura 7 ilustra os conceitos citados.

Figura 7 - Comprimentos para avaliação de Rugosidade



Fonte: Oliveira, 2017

Os valores de comprimento de amostragem são escolhidos conforme recomendação da norma ABNT NBR ISO 4288, (2008), em função da distância entre sulcos ou pela rugosidade esperada. Essa seleção considera as variáveis de perfil periódico ou aperiódico os parâmetros de medição  $R_a$  ou  $R_z$ . A partir dessa avaliação se determina o comprimento que será medido no mensurando. Segundo a norma DIN 4768 (1990) e ISO 4288 (2008), devem ser considerados os comprimentos de amostragem apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Seleção de comprimento usando a rugosidade esperada (superfícies não periódicas)

| Rugosidade $R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) | Rugosidade $R_z$ ou $R_{\text{máx}}$ ( $\mu\text{m}$ ) | $l_e$ (mm) | $l_m$ (mm) |
|------------------------------------|--|------------|------------|
| Até 0,1                            | Até 0,5  | 0,25       | 1,25       |
| De 0,1 até 2,0                     | De 0,5 até 10,0  | 0,80       | 4,00       |
| De 2,0 até 10,0                    | De 10,0 até 50   | 2,50       | 12,50      |
| Acima de 10,0                      | Acima de 50,0  | 8,00       | 40,00      |

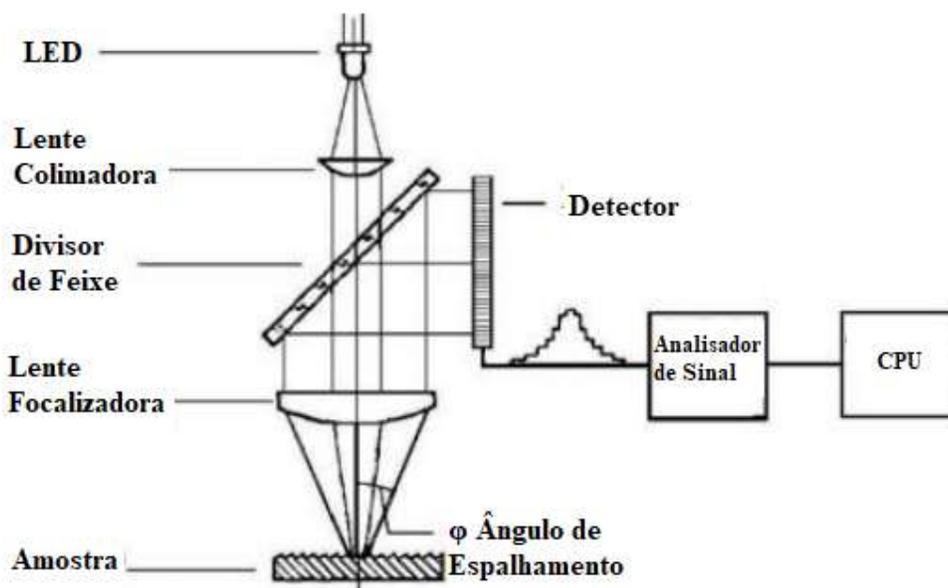
Fonte: ABNT NBR ISO 4288, (2008)

Os métodos sem contato são caracterizados por realizar a medição por meio da incidência de luz sobre a superfície. O tipo de luz pode ser um feixe de luz branca ou um feixe de laser (LIMA, 2011). Quando incide em uma superfície, a luz é refletida, sendo que essa reflexão acontece de maneira difusa e a rugosidade relaciona-se com o espalhamento (MENNET, 2013).

Para estabelecer um valor numérico da rugosidade, utilizando métodos sem contato são empregados sistemas de corte ótico para observar a superfície sob um corte vertical com ajuda da incidência de uma lâmina de luz, obliquamente à superfície, e cuja reflexão é recebida por uma ocular ou mesmo por uma tela de projeção.

Thurn e Brodmann (1986) realizaram medições ópticas de rugosidade utilizando um equipamento que incidia luz em direção normal à superfície. A Figura 8 mostra o princípio de funcionamento baseado na intensidade em cada ângulo (MENNET, 2013).

Figura 8 - Princípio de medição da luz espalhada



Fonte: (Mennet, 2013)

### 2.3.3 Parâmetros de Rugosidade

A rugosidade da superfície é um dos requisitos mais importantes no processo de usinagem, pois é considerado um índice de qualidade do produto. Ele mede as irregularidades mais finas da textura da superfície. Atingir a qualidade desejada da superfície é fundamental

para o comportamento funcional de uma peça. A rugosidade da superfície influencia o desempenho das peças mecânicas e seus custos de produção, pois afeta fatores como atrito, facilidade de retenção de lubrificante, condutividade elétrica e térmica, tolerâncias geométricas e muito mais. A capacidade de uma operação de fabricação de produzir a rugosidade desejada da superfície depende de vários parâmetros. Os fatores que influenciam a rugosidade da superfície são parâmetros de usinagem, propriedades das ferramentas do material da peça (tais como afinidade química, composição, propriedades mecânicas, etc) e condições de corte. Por exemplo, na operação de torneamento, a rugosidade da superfície depende da velocidade de corte, taxa de avanço, profundidade de corte, raio da ponta da ferramenta, lubrificação da ferramenta de corte, vibrações da máquina, desgaste da ferramenta e das propriedades mecânicas e outras do material que está sendo usinado. Mesmo pequenas alterações em qualquer um dos fatores mencionados podem ter um efeito significativo na superfície produzida (BOOTHROYD, 2006).

Portanto, é importante que os pesquisadores modelem e quantifiquem a relação entre a rugosidade e os parâmetros que afetam seu valor. A determinação desse relacionamento continua sendo um campo aberto de pesquisa, principalmente devido aos avanços na tecnologia de usinagem e materiais e às técnicas de modelagem disponíveis. Nas investigações de estudos de usinabilidade, o desenho estatístico de experimentos é usado extensivamente. O desenho estatístico dos experimentos refere-se ao processo de planejamento dos experimentos para que os dados apropriados possam ser analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas (MONTGOMERY, 1997).

Mital e Mehta (1988) realizaram uma pesquisa de modelos de previsão de superfície desenvolvidos e fatores que influenciam a rugosidade da superfície. Eles desenvolveram os modelos de acabamento de superfície para liga de alumínio 390, ferro fundido dúctil, aço com chumbo de carbono médio, aço de liga de carbono médio 4130 e inconel 718 para uma ampla gama de condições de usinagem definidas pela velocidade de corte, avanço e raio da ponta da ferramenta. Eles concluíram que a velocidade de corte, o avanço e o raio de ponta da ferramenta têm um efeito significativo na rugosidade da superfície.

Nos dias de hoje, o parâmetro de rugosidade média ( $R_a$ ) é o mais comumente utilizado pela indústria, porém o mesmo sozinho não é capaz de caracterizar uma superfície por completo. Por este motivo, os parâmetros assimetria e achatamento (entre outros parâmetros) têm sido introduzidos com maior frequência. O parâmetro de assimetria é bastante susceptível

a perturbações externas aleatórias, porém consegue mostrar a distribuição de picos e vales, o que caracteriza uma superfície quanto ao seu perfil dominante. O parâmetro de achatamento, por sua vez, é muito efetivo na caracterização do perfil em função do processo de fabricação que ela foi submetida e para verificar o grau de achatamento do perfil de rugosidade.

A rugosidade da superfície continua sendo o principal indicador da qualidade dos componentes usinados. Uma baixa rugosidade superficial melhora as propriedades tribológicas, resistência à fadiga, resistência à corrosão e apelo estético do produto (GROOVER, 1996).

Em seu estudo sobre o efeito da geometria da ferramenta nos parâmetros de rugosidade no torneamento de liga de alumínio, os autores Horváth, Czifra e Kiss (2015) fizeram diversos experimentos variando a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte para alguns tipos de geometria de ferramenta de corte. Os resultados encontrados por eles sugerem que tanto a assimetria quanto a achatamento sejam fortemente influenciadas pela geometria da ferramenta de corte. Em contrapartida, eles inferem que os parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) não têm efeito significativo nestes parâmetros. Segundo os autores, apenas os parâmetros  $R_a$  e  $R_z$  sofrem influência dos parâmetros de corte no torneamento.

De acordo com Santos e Sales (2007), a rugosidade pode ser influenciada por diversos parâmetros assim tudo dependerá da consistência do processo como um todo, mas pode-se alcançar resultados de rugosidades menores quando:

- Peça e ferramentas estão corretamente centralizadas e posicionadas;
- A aresta cortante não possui desgastes ou quebras;
- A aresta cortante não possui APC (aresta postiça de corte);
- Máquina com guias e eixos alinhados;
- Pequenas vibrações causadas pelas deflexões por esforços de corte;

Para Espanhol (2008), a combinação entre profundidade de corte ( $a_p$ ) e avanço ( $f$ ) podem gerar influências na rugosidade, sendo que as marcas de avanço tendem a aumentar com o aumento do mesmo e a  $a_p$  maior tende a aumentar mais força de corte, gerando deflexões e causando maiores rugosidades.

Segundo Paulo (2008), o sistema de fixação também está relacionado com a rugosidade, sistemas de fixação ajustados e rígidos, assim como, as guias e eixos das máquinas-ferramentas auxiliam para uma rugosidade menor no processo, isso se existir procedimentos adequados no

ato do corte. A rugosidade média ( $R_a$ ) conforme Bezerra (2007) tem uma forte dependência com a velocidade de corte, velocidades de corte mais baixas podem provocar intensa formação de aresta postiça de corte (APC) no processo, aumentando a rugosidade de uma peça, ele também aborda em seu trabalho que o aumento da temperatura de processamento e de deformação do cavaco influencia em uma diminuição da rugosidade de uma peça.

De acordo com Machado e Silva (2011), outros fatores importantes que afetam diretamente os resultados da rugosidade são o material da peça que será usinado, sua composição química, dureza e microestrutura. Assim se deve fazer uma análise de todos esses fatores antes de se selecionar o material que será utilizado no processo, para que não ocorra nenhum problema relacionado ao acabamento superficial da peça.

Os fluidos de corte utilizados no processo de usinagem em certos casos podem influenciar na rugosidade da peça. Eles contribuem para um menor desgaste da aresta cortante, diminuindo assim o atrito entre aresta e peça e cavaco, além de melhorar o acabamento superficial da peça (ESPANHOL, 2008).

Em seu trabalho, Santos (2011) não encontrou grande influência sobre a rugosidade superficial das peças, quando o assunto é velocidade de corte, assim não proporcionando grandes diferenças na rugosidade e a pequena diferença poderia ser explicada pelo sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça.

Neto (2004) explica em seu trabalho que ocorreu algo não esperado em relação a influencias do processo, a diminuição do valor de RMS (Desvio Médio Quadrático) com o aumento de  $R_a$  não era esperado em seus experimentos, e sim era esperado o aumento da  $R_a$  em função do aumento do nível de vibração. Mas para cada rotação a excitação e a resposta do sistema MFDP (Máquina/Ferramenta/Dispositivo de fixação/Peça) eram diferentes no processo.

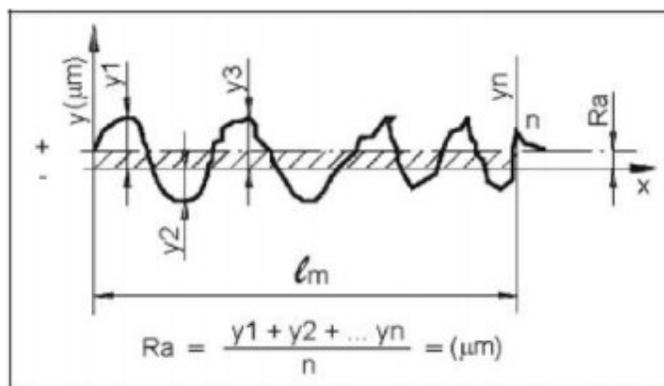
Já para Reis (2001), existem vários parâmetros que influenciam na rugosidade, mas possui três mais influentes no processo, sendo o a velocidade de corte ( $V_c$ ), o avanço ( $f$ ) e a profundidade ( $a_p$ ). A profundidade de corte tende a gerar maiores forças de corte, auxiliando no aumento das vibrações, podendo gerar superfícies mais rugosas. O aumento do avanço pode aumentar a rugosidade, uma vez que as marcas de avanço são proporcionais ao quadrado da altura dos picos e profundidade dos vales. Altas velocidades de corte podem proporcionar menores rugosidade desde que estejam de acordo com as especificações do processo.

De acordo com Silva (2013), a ferramenta de corte também pode influenciar de forma decisiva no acabamento superficial da peça. O desgaste gerado na aresta cortante aumentara a temperatura progressivamente, a força de corte e a potência consumida no processo, podendo assim não favorecer o acabamento superficial devido ao desgaste.

### 2.3.3.1 Desvio Médio Aritimético

Desvio médio aritimético ( $R_a$ ) é conhecida como média aritmética dos resultados de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade das ordenadas, sendo a relação da média entre os picos e os vales, originando uma linha média com seu percurso de medição ( $l_m$ ) (ESPANHOL, 2008). Os resultados da média são expressos em micrometros ( $\mu_m$ ), de acordo com a figura 9.

Figura 9 - Representação da Rugosidade média



Fonte: ESPANHOL, 2008

De acordo com Santos e Sales (2007), a rugosidade média ( $R_a$ ) é um dos parâmetros mais comuns para a indústria metal mecânica, que seria a média gerada pelos picos e vales de uma peça qualquer ao longo de seu comprimento trabalhado.

De acordo com Machado e Silva (2011), dentro dos parâmetros de rugosidade pode ocorrer o  $R_a$  não ser ideal para o processo de fabricação, por se tratar de uma média de profundidades de vales e alturas de picos de um acabamento superficial. Pode ser que a média esteja dentro do solicitado no projeto, porém existe alguma discrepância em algum local da peça que possa influenciar no seu funcionamento como, por exemplo, em peças que necessitam de vedação.

### 2.3.3.2 Assimetria

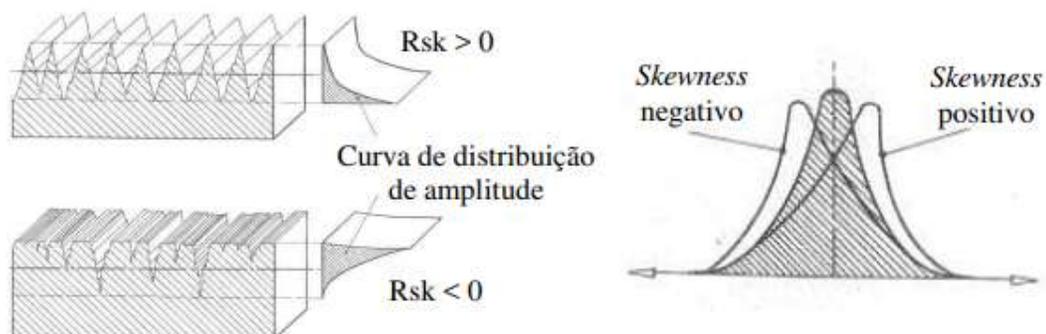
A assimetria da distribuição de alturas da topografia ou assimetria é definida como a assimetria dos desvios da superfície sobre o plano médio. Este parâmetro descreve efetivamente o formato da distribuição das alturas da topografia. Para uma superfície com distribuição gaussiana, que possui simetria de distribuição, o parâmetro  $R_{sk}$  é igual a zero. Para uma distribuição assimétrica das alturas, seu valor pode ser negativo, indicando a existência de mais vales. Para uma distribuição assimétrica, porém com valor positivo, indica a presença de mais picos. Um valor negativo na assimetria da distribuição das alturas da topografia  $R_{sk}$  indica uma melhor condição de retenção de fluidos ou lubrificantes e melhor capacidade de carregamento, portanto melhor desempenho. (MUMMERY, 1992; FARIAS, 2009).

Este parâmetro indica a assimetria da função densidade de probabilidade dos valores das ordenadas  $Z_x$  dos pontos do perfil em relação à linha média, e pode ser calculado através da Eq. 3.

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[ \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^3(x) dx \right] \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde  $l_r$  é o comprimento de amostragem e  $R_q$  o desvio médio quadrático do perfil avaliado. O fator de assimetria indica se as irregularidades da superfície são, na maioria, picos ou vales. A figura 10 ilustra a curva de distribuição de amplitude de assimetria em função do perfil avaliado.

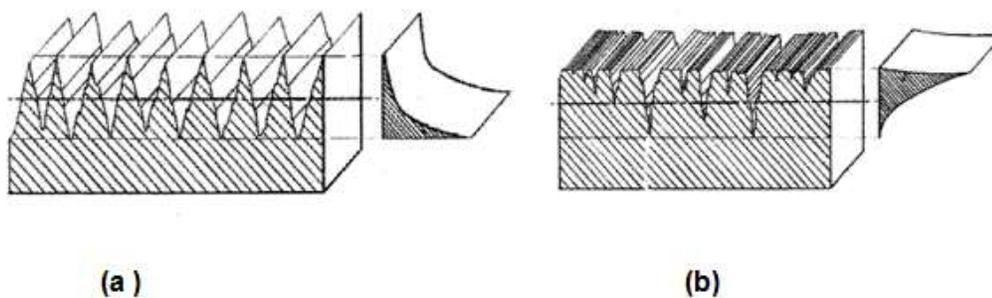
Figura 10 – Curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado.



Fonte: Adaptado SMITH (2002)

A figura 11 ilustra a diferença entre dois perfis distintos com assimetria positivo e outro negativo.

Figura 11 - Comparação entre duas superfícies com diferentes valores de Assimetria: (a)  $R_{sk}$  positivo, (b)  $R_{sk}$  negativo



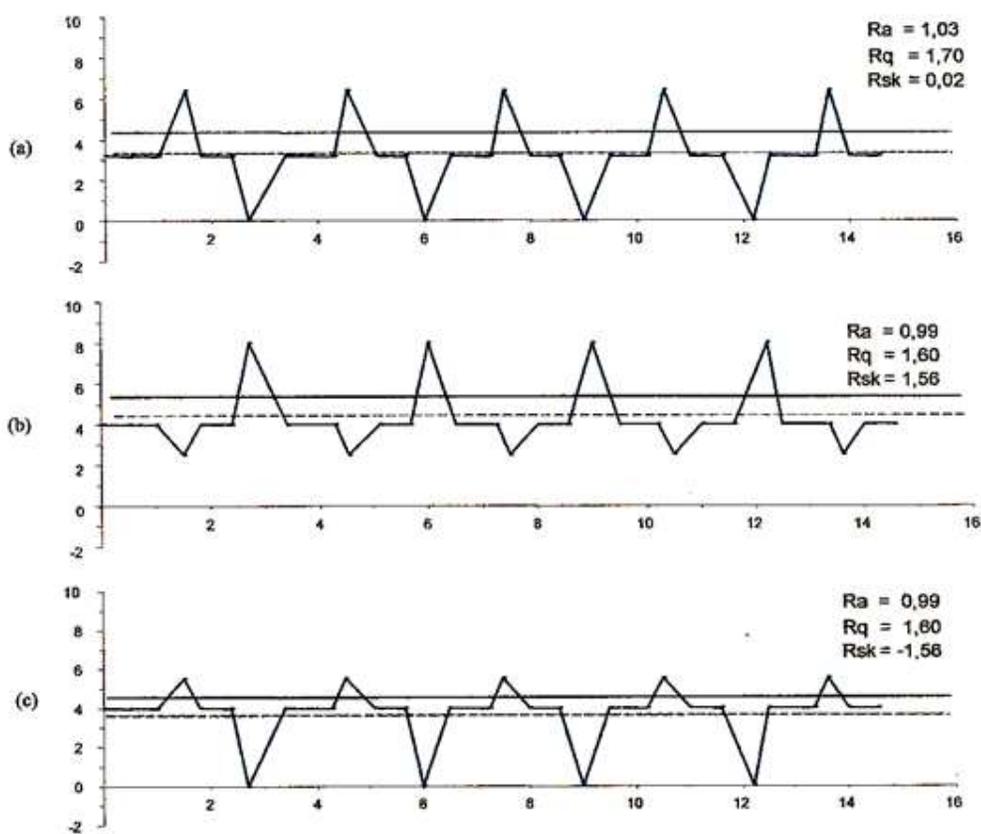
Fonte: SMITH (2002)

Nota-se que o  $R_{sk}$  é um parâmetro adimensional e é diretamente dependente dos valores do desvio médio  $R_q$  e das amplitudes parciais ( $Z_x$ ).

Analisando a figura 12a, pode-se dizer que os valores de  $R_{sk}$  aproximadamente iguais a zero, indicam uma superfície com picos e vales distribuídos semelhantemente ao longo do comprimento de avaliação. Analisando a figura 12b, verifica-se que quando o  $R_{sk}$  for positivo

indicará que o perfil em análise representa uma superfície com picos altos associados à região de baixos vales ou aplainados. Em termos de amplitudes, isso quer dizer que os valores de amplitude de pico serão muito maiores do que os valores de amplitude de vales. Por outro lado, analisando a figura 12c, valores negativos indicam a presença de maiores amplitudes de vale sem relação à amplitude de picos, caracterizando uma superfície predominantemente de platôs.

Figura 12 - Representação esquemática da assimetria de perfis de rugosidade



Fonte: DAGNALL,1986.

### 2.3.3.3 Achatamento

De acordo com Dong, Sullivan e Stout (1994), o parâmetro achatamento é sempre apresentado em conjunto com o parâmetro assimetria para descrever a forma da distribuição topográfica do perfil de rugosidade. Ele mede o grau de achatamento ou de afinamento da distribuição topográfica dos picos do perfil de rugosidade.

Uma superfície com distribuição Gaussiana, caracterizada por sua simetria, o parâmetro achatamento é igual a três, para uma superfície com distribuição de alturas centralizadas seu valor é menor que três e para superfícies com alturas largamente espalhadas na distribuição o valor é maior que três. Valores de achatamento superiores a três indicam superfícies com picos mais finos, portanto mais passíveis ao desgaste prematuro, e valores inferiores a três indicam superfícies com menor tendência ao desgaste prematuro (MUMMERY, 1992; FARIAS, 2009).

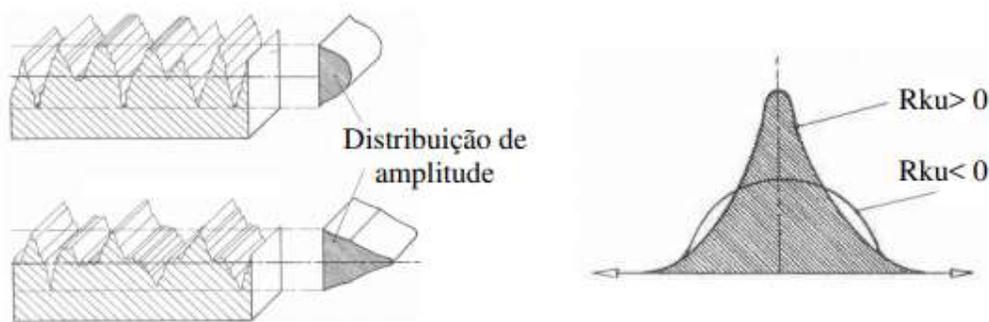
A achatamento pode ser definido como o quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas  $Z_x$  e  $R_q$  à quarta potência, respectivamente, no comprimento de amostragem  $l_r$ , expresso pela Eq. 4.

$$Rku = \frac{1}{R_q^4} \left[ \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^4(x) dx \right] \quad (\text{Eq.4})$$

Nota-se que o  $Rku$  é um parâmetro adimensional e é diretamente dependente dos valores do desvio médio  $Rq$  e das amplitudes parciais ( $Z_x$ ).

O parâmetro  $Rku$  é indicador do achatamento da função densidade de probabilidade dos valores das ordenadas. Este parâmetro mede a forma da curva de distribuição de amplitude, ou seja, seu afinamento ou achatamento, como mostrado na Fig. 13.

Figura 13 - Achatamento da curva de distribuição de amplitude em função do perfil avaliado



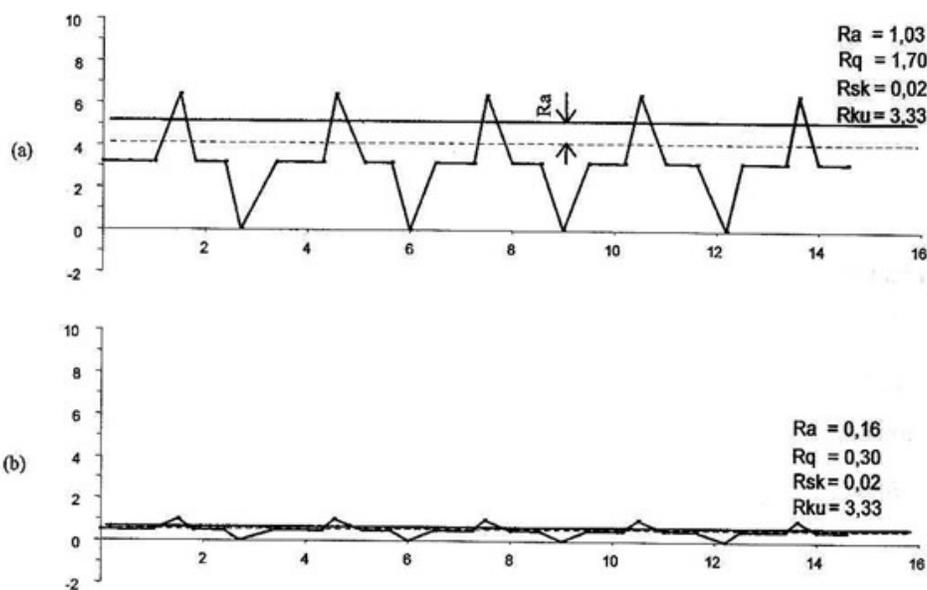
Fonte: DAGNALL (1986)

Em seu estudo sobre o efeito da aresta postiça de corte nas vibrações de corte na usinagem de liga de alumínio, Fang, Srinivasa e Mosquea (2010) identificaram que o aumento

da velocidade de corte leva a uma diminuição no valor da achatamento. No estudo proposto por estes autores, eles identificaram que para valores de velocidade de corte acima de 20m/min, o valor da achatamento permanece praticamente constante. Estes autores associam o fenômeno de o valor da achatamento ser manter praticamente constante a velocidades de corte maiores que 20m/min, ao fato de que o ciclo natural de formação de aresta postiça de corte ser menor.

Apesar da sua característica de parâmetro de forma, o  $R_{ku}$  necessita ser associado a outros parâmetros para uma adequada caracterização do perfil de medição. A figura 14 mostra exemplos de perfis com características de assimetria semelhantes, mas que terão forte influência no resultado final de aplicação dos respectivos produtos. Neste caso, apesar dos perfis serem graficamente diferentes, os parâmetros médios de amplitude, antecipando o parâmetro  $R_{ku}$ , podem ser considerados semelhantes, cabendo aos parâmetros de amplitude (como  $R_a$  e  $R_q$ ) a diferenciação numérica entre si.

Figura 14 - Representação esquemática de perfis com semelhante assimetria e diferentes rugosidades médias



Fonte: Dagnall (1986)

A determinação de parâmetros de amplitude na análise de perfis superficiais, seja por valores de amplitude de picos e vales ou valores médios, apresenta vantagens no que diz respeito ao controle operacional e uma boa caracterização da superfície e forma. Embora estes parâmetros exerçam uma forte influência de valores isolados de amplitude eles não são suficientemente capazes de determinar todas as características de um perfil superficial

impossibilitando a interpretação de outros aspectos importantes, tais como o espaçamento e a inclinação dos elementos presentes no perfil.

### 2.3.4 Função Tribológica – Assimetria e Achatamento

Em seu estudo sobre o efeitos dos parâmetros de assimetria e achatamento de superfícies no comportamento tribológico em ensaio pino sobre disco, Ba, Silva e Câmara (2019) identificaram que os parâmetros assimetria e achatamento apresentam maior influência no comportamento do atrito do que os parâmetros rugosidade média ( $R_a$ ) e rugosidade quadrática ( $R_q$ ). Os autores ainda concluem que superfícies que possuem o mesmo valor de rugosidade média e rugosidade quadrática podem ser diferenciadas pelo parâmetro estatístico de assimetria.

Em seu trabalho sobre análise da influência dos parâmetros de corte na rugosidade do aço microligado DIN 38MnSiVS5, Nunes (2011) fez diversos ensaios variando velocidade de corte, avanço e raio de ponta; e identificou que todos os três afetam de alguma forma os parâmetros de rugosidade; sendo o avanço o que tem maior influência no resultado obtido.

De acordo com Freitas (2006), elevados valores de achatamento ( $R_{ku}>3$ ), indicam que as irregularidades são pontiagudas e mais passíveis ao desgaste da superfície. Já valores de  $R_{ku}<3$  indicam superfícies não pontiagudas, com um perfil mais achatado. Por outro lado, superfícies com  $R_{ku}=3$  indica que a distribuição da amplitude de um perfil possui forma gaussiana balanceada. Conforme Leach (2014) este é um parâmetro útil para prever o desempenho da peça com relação ao desgaste e retenção de lubrificação. De acordo com literaturas, superfícies retificadas teriam um  $R_{ku}$  igual a três, indicando um perfil com uma gaussiana balanceada, ou seja, teria-se uma superfície não áspera com poucos picos (SILVA, 2018).

Grzesik e Wanat (2006) analisando o acabamento superficial no torneamento do aço endurecido AISI 5140 com dureza de 60 HRc, utilizando ferramenta de cerâmica mista, classe CC650, velocidade de corte de 100m/min, avanço de 0,04mm/rev e profundidade de corte de 0,25mm, encontrou o valor de 2,33 para o parâmetro achatamento, caracterizando uma superfície com perfil de rugosidade não pontiagudo. Silva (2018) em seus estudos dos parâmetros de superfície no aço ABNT 4340 endurecido após processo de retificação, utilizando diferentes fluidos de corte, obteve o valor de 3,1 $\mu$ m para o parâmetro achatamento, utilizando velocidade de corte de 0,6mm/rot, volume de material retificado de 1,93x10<sup>3</sup> mm<sup>3</sup> e fluido de corte sintético.

Conforme Leach (2014) os valores negativos de assimetria indicam mais vales que picos, enquanto valores positivos indicam mais presença de picos. Perfis com assimetria negativa têm como característica boa superfície de apoio, indicando poucos pontos que podem desgastar-se rapidamente na fase de amaciamento. Também, o valor negativo para o parâmetro assimetria indica boa propriedade de retenção de óleo, garantindo maior resistência ao desgaste e um bom comportamento funcional das superfícies. O parâmetro assimetria é muito aplicado na fabricação de mancais, pois os sulcos servem como depósito de lubrificante. Para superfícies de mancais, recomenda-se assimetria entre -1,6 e -2,0 (CARPINETTI *et al.*, 2000 apud FREITAS, 2006).

Em seu trabalho sobre avaliação da rugosidade superficial de cerâmicas odontológicas, Pellisari *et al* (2013) fizeram alguns experimentos para comparar a rugosidade superficial antes e depois de realizar um tratamento na superfície das cerâmicas. A rugosidade das amostras foi medida tanto com uma técnica com contato e uma técnica sem contato. Os resultados encontrados pelos autores evidenciaram uma boa correlação entre as técnicas utilizadas, onde ambas apresentaram resultados bem próximos. O presente estudo também apresentou uma boa correlação entre as técnicas de medição de rugosidade com e sem contato.

### 3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo tem por objetivo descrever os materiais, equipamentos e a metodologia utilizados no desenvolvimento do trabalho, que foi subdividida em três etapas, como mostrado no fluxograma da figura 15. O procedimento experimental está fundamentado no estudo do comportamento do aço inoxidável supermartensítico (AISM) durante a operação o torneamento. A primeira etapa está relacionada à caracterização do AISM por meio da análise química e de ensaios mecânicos, ao passo que a segunda etapa consiste de testes de torneamento empregando diferentes velocidades de corte e avanço e, por fim, a terceira etapa consiste na caracterização da superfície através da medição de parâmetros de rugosidade ( $R_a$ ,  $R_{sk}$  e  $R_{ku}$ ) com o auxílio de rugosímetro de contato e da técnica de perfilometria ótica.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio e Análise da Vallourec Tubos do Brasil, situado à Av. Olinto Meireles, 65 em Belo Horizonte/MG.

Figura 15 - Fluxograma de etapas do experimento



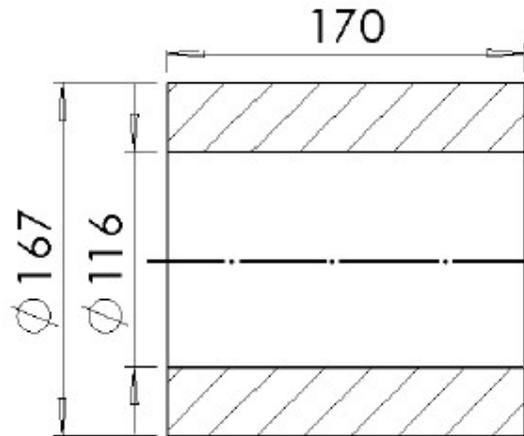
Fonte: O autor

### 3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

#### 3.1.1 Materiais

O material dos corpos de prova é o aço inoxidável supermartensítico (AISM) da classe CA6NM, conforme norma ASTM A743, normalmente encontrado no mercado sob a denominação de Super 13 Cr. A fabricação deste aço é baseada nas normas API 5CRA e ISO 13680 (SUMITOMO, 2011). Foram utilizados tubos com diâmetro externo de 167mm, diâmetro interno de 116mm e comprimento de 170mm, conforme ilustrado na figura 17.

Figura 16 – Dimensões dos corpos de prova utilizados no torneamento



Fonte: o autor

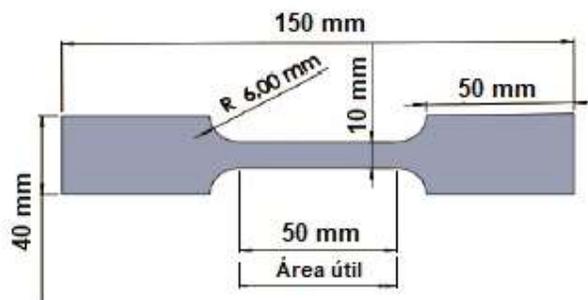
As ferramentas de corte utilizadas nos ensaios de torneamento foram insertos de metal duro. Os ensaios de torneamento foram divididos em duas etapas: desbaste e acabamento.

Para a operação de desbaste foi utilizado o porta ferramentas PDJNL 2020K-15 com ângulo de posição de 93° e pastilha DNMG 15 com raio de 0,8 e ângulo de 55°. A velocidade de corte foi de 100m/min e o avanço de 0,20mm/rot.

Para a operação de acabamento foi utilizado o porta ferramentas SDNCN 2020K-11 com ângulo de posição de 62,5° e pastilha DCMT 11 com raio 0,8 e ângulo de 55°. Para as velocidades de corte ( $V_c$ ) e avanço ( $f$ ) foram utilizados dois níveis para  $v_c$  e dois níveis para  $f$ , os quais serão apresentadas no planejamento experimental.

Os corpos de prova foram usinados para posterior análise no rugosímetro e perfilômetro até atingirem área útil com as dimensões de seção transversal cilíndrica 10mm e comprimento 50mm; e comprimento total da amostra de 150mm conforme ilustrado na figura 18.

Figura 17 – Dimensões dos corpos de prova utilizados no torneamento



Fonte: o autor

Foram usinados 4 corpos de prova para cada uma das 4 configurações de ensaio que serão apresentadas no planejamento experimental.

### 3.1.2 Máquina Ferramenta

Para a execução dos experimentos de torneamento foi utilizado um centro de torneamento de fabricação ROMI, modelo GL 240M, com velocidade de avanço rápido, longitudinal e transversal, de 30 m/min, potência do motor principal 14,7 kW, faixa de rotação de 6 a 6000 rpm e controlador CNC de fabricação Fanuc, modelo Oi-TD. A Figura 16 ilustra o modelo do centro de torneamento utilizado.

Figura 18 - Torno CNC ROMI GL240



Fonte: o autor

### 3.1.3 Medição de Rugosidade

#### 3.1.3.1 Rugosímetro

Para medição da rugosidade superficial nos corpos de prova usinados foi utilizado um rugosímetro, de fabricação Mitutoyo, modelo SurfTest SJ-210. O rugosímetro foi calibrado para um comprimento de amostragem de 0,8mm e percurso de medição de 5mm. Foram realizadas

medições axiais em todos os corpos de prova usinados. A Figura 19 ilustra o equipamento utilizado para a medição.

Figura 19 - Rugosímetro SJ-210 - Mitutoyo



Fonte: o autor

### 3.1.3.2 Perfilômetro Ótico

O equipamento utilizado nesta etapa foi o perfilômetro ótico PS50 da Nanovea que está ilustrado na figura 20.

Figura 2021 – Perfilômetro PS50



Fonte: o autor

O perfilômetro PS50 faz a leitura do perfil de rugosidade da amostra através de um feixe de luz branca que incide na superfície do material e retorna ao cabeçote fornecendo as informações para a análise da integridade superficial da amostra. Para a varredura foi utilizado um sensor ótico que emite um feixe de luz branca e a refração deste feixe irá variar com o comprimento de onda da luz. Dessa forma, cada parte da luz branca que for emitida, será orientada a uma distância diferente da lente. Se a amostra medida estiver dentro da faixa de alcance de alturas do equipamento, um único ponto monocromático irá passar pelo filtro espacial do sistema com uma alta eficiência, e desse modo todos os outros comprimentos de onda estarão fora de foco. Estas informações recebidas pelo sensor são processadas pelo *software* Expert3D e o sinal obtido é convertido em uma imagem tridimensional que traduz o perfil da amostra analisada. Esta técnica de medição é sem contato, ou seja, não há ponto de aderência entre o equipamento e a amostra. O perfilômetro foi configurado para varredura com um avanço de  $0,2\mu\text{m/s}$  tanto no eixo X quanto no eixo Y, em uma área de  $0,2\text{mm}^2$  intensidade de luz de 90% e faixa máxima de altura de 3mm. A título de comparação com a técnica do rugosímetro de contato, foi feita a medição de rugosidade com o perfilômetro ótico em apenas uma amostra de cada uma das configurações de teste, porém, em cada amostra, foram feitas 4 medições dos parâmetros de rugosidade em trechos diferentes com o auxílio do *software* Expert3D.

### 3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados de acordo com um planejamento experimental indicado na tabela 4. As variáveis de entrada do estudo foram: a velocidade de corte ( $V_c$ ) em dois níveis, o avanço ( $f$ ) em dois níveis. Os parâmetros de corte escolhidos estão dentro da faixa recomendada pelo fabricante das pastilhas selecionadas. Como variáveis de saída foram avaliadas as rugosidade desvio médio aritmético, assimetria e achatamento.

Tabela 4 - Configuração de variáveis de entrada do ensaio

|                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| <b>Config 1</b> | $V_c = 120\text{m/min}$ |
|                 | $f = 0,10\text{mm/rot}$ |
| <b>Config 2</b> | $V_c = 120\text{m/min}$ |
|                 | $f = 0,25\text{mm/rot}$ |
| <b>Config 3</b> | $V_c = 200\text{m/min}$ |
|                 | $f = 0,10\text{mm/rot}$ |
| <b>Config 4</b> | $V_c = 200\text{m/min}$ |
|                 | $f = 0,25\text{mm/rot}$ |

Fonte: o autor

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com as duas técnicas de medição de rugosidade superficial das amostras que passaram pelo processo de torneamento e será feita a discussão dos resultados.

### 4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Na tabela 3 encontra-se a composição química do aço supermartensítico que foi fornecida pela Vallourec.

Tabela 3 - Composição química do aço supermartensítico, em porcentagem em massa

| C     | Si   | Mn   | P     | S     | Cr    | Ni   | Mo   | N     | Nb    | Ti     |
|-------|------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|--------|
| 0,020 | 0,42 | 0,51 | 0,016 | 0,004 | 12,59 | 5,01 | 1,90 | 0,013 | ----- | 0,0062 |

Fonte: Vallourec (2019)

### 4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas de tração (tensões de escoamento e de ruptura) do AISM foram obtidas por meio do ensaio de tração realizado em uma máquina universal SHIMADZU modelo AG-IS com capacidade para 100 kN. Os ensaios de dureza foram realizados em um microdurômetro Mitutoyo MVK-H1 equipado com penetrador Vickers conforme a norma ASTM E384:2008. Tanto os ensaios de tração quanto os ensaios de dureza foram feitos em corpos de prova diferentes aos que foram usados para a medição de rugosidade. Os resultados de propriedades mecânicas foram fornecidos pela Vallourec:

- LE: 730 MPa
- RT: 830 MPa
- Dureza Transversal: 275 HV

Os valores dos limites de escoamento, resistência e dureza do aço inoxidável supermartensítico são mais elevados em comparação aos aços inoxidáveis martensíticos, duplex, ferríticos e austeníticos (COSTES *et al.*, 2006). Os valores encontrados também são

próximos dos valores dos AISM obtidos da literatura (RODRIGUES *et al.*, 2005). A elevada dureza e resistência mecânica do aço AISM pode aumentar a dificuldade de usinagem do material, aumentando a resistência para o cisalhamento e deformação do cavaco, conseqüentemente, maiores esforços de corte, temperatura de corte e desgaste de ferramenta.

#### 4.3 RUGOSÍMETRO DE CONTATO

A tabela 5 apresenta o resultado obtido com a medição de rugosidade com o auxílio do rugosímetro de contato.

Tabela 5: Resultados obtidos com o rugosímetro

|                   |                       | <b>Config<br/>1</b> | <b>Config<br/>2</b> | <b>Config<br/>3</b> | <b>Config<br/>4</b> |
|-------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Vc [m/min]</b> |                       | <b>120</b>          | <b>120</b>          | <b>200</b>          | <b>200</b>          |
| <b>f [mm/rot]</b> |                       | <b>0,10</b>         | <b>0,25</b>         | <b>0,10</b>         | <b>0,25</b>         |
| <b>Amostra 1</b>  | <b>R<sub>sk</sub></b> | 0,604               | 0,612               | 0,409               | 0,435               |
|                   | <b>R<sub>ku</sub></b> | 3,091               | 3,117               | 2,324               | 2,447               |
|                   | <b>R<sub>a</sub></b>  | 0,802               | 0,911               | 0,353               | 0,420               |
| <b>Amostra 2</b>  | <b>R<sub>sk</sub></b> | 0,421               | 0,437               | 0,352               | 0,372               |
|                   | <b>R<sub>ku</sub></b> | 3,007               | 3,085               | 2,776               | 2,891               |
|                   | <b>R<sub>a</sub></b>  | 0,877               | 0,879               | 0,402               | 0,411               |
| <b>Amostra 3</b>  | <b>R<sub>sk</sub></b> | 0,491               | 0,517               | 0,392               | 0,420               |
|                   | <b>R<sub>ku</sub></b> | 3,106               | 3,115               | 2,608               | 2,671               |
|                   | <b>R<sub>a</sub></b>  | 0,892               | 0,998               | 0,388               | 0,501               |
| <b>Amostra 4</b>  | <b>R<sub>sk</sub></b> | 0,617               | 0,618               | 0,468               | 0,507               |
|                   | <b>R<sub>ku</sub></b> | 2,871               | 2,996               | 2,678               | 2,817               |
|                   | <b>R<sub>a</sub></b>  | 0,933               | 1,032               | 0,444               | 0,564               |
| <b>Média</b>      | <b>R<sub>sk</sub></b> | 0,533               | 0,546               | 0,405               | 0,434               |
|                   | <b>R<sub>ku</sub></b> | 3,019               | 3,078               | 2,597               | 2,707               |
|                   | <b>R<sub>a</sub></b>  | 0,876               | 0,955               | 0,397               | 0,474               |

Fonte: o autor

Com base na tabela 5, foi construída a tabela 6 com os valores de desvio padrão e erro padrão das medições realizadas com o rugosímetro.

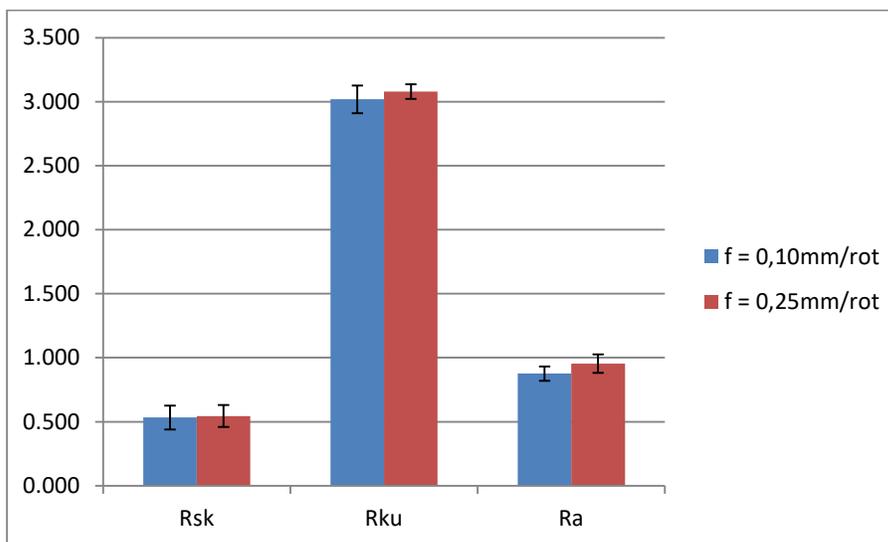
Tabela 6: Desvio Padrão e Erro Padrão das medições realizadas com o rugosímetro

|                 |                | Desvio Padrão |       |       | Erro Padrão |       |       |
|-----------------|----------------|---------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
|                 |                | Rsk           | Rku   | Ra    | Rsk         | Rku   | Ra    |
| <b>Config 1</b> | Vc = 120m/min  | 0,094         | 0,108 | 0,055 | 0,047       | 0,054 | 0,027 |
|                 | f = 0,10mm/rot |               |       |       |             |       |       |
| <b>Config 2</b> | Vc = 120m/min  | 0,086         | 0,057 | 0,072 | 0,043       | 0,028 | 0,036 |
|                 | f = 0,25mm/rot |               |       |       |             |       |       |
| <b>Config 3</b> | Vc = 200m/min  | 0,048         | 0,194 | 0,038 | 0,024       | 0,097 | 0,019 |
|                 | f = 0,10mm/rot |               |       |       |             |       |       |
| <b>Config 4</b> | Vc = 200m/min  | 0,056         | 0,196 | 0,072 | 0,028       | 0,098 | 0,036 |
|                 | f = 0,25mm/rot |               |       |       |             |       |       |

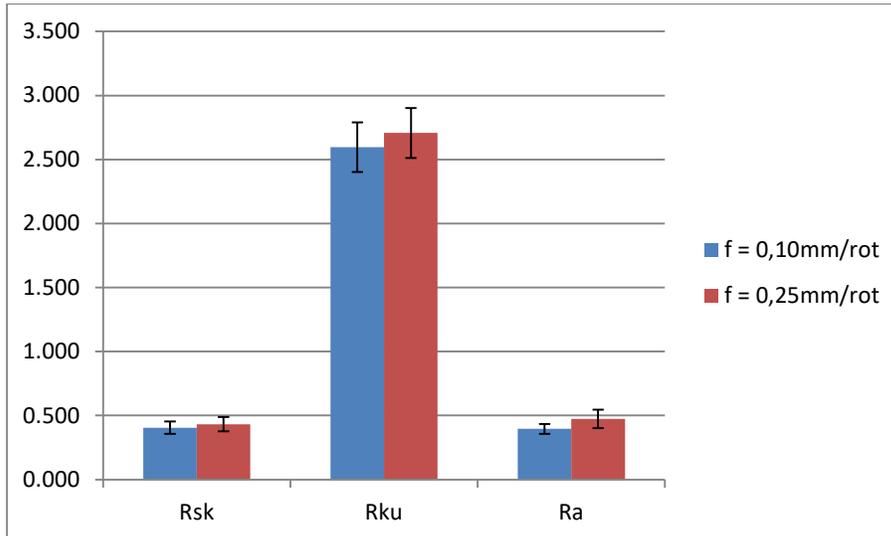
Fonte: O autor

Ainda com base na tabela 5, foram construídos gráficos 1, 2, 3 e 4 com os valores das médias para ilustrar os resultados obtidos com a análise do rugosímetro com seus respectivos desvios padrões.

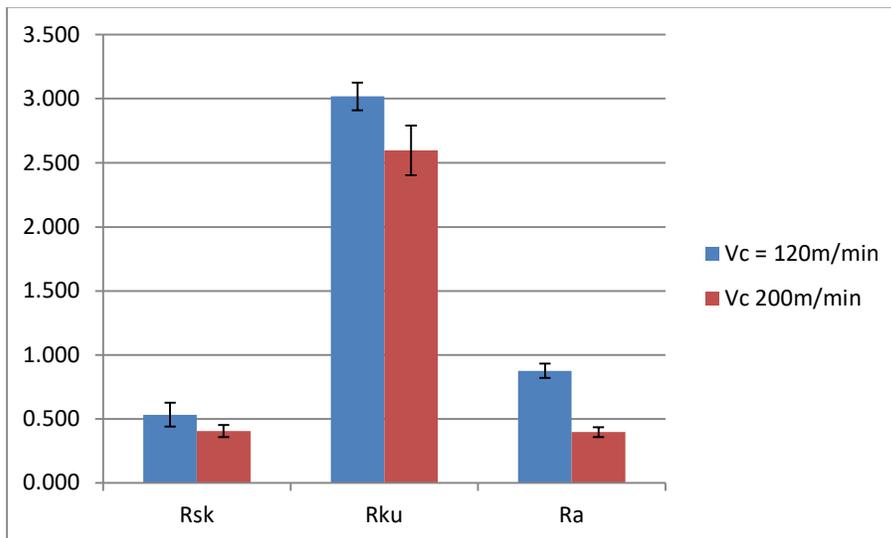
Gráfico 1: Influência do f nos parâmetros de rugosidade Rsk, Rku e Ra com Vc = 120m/min



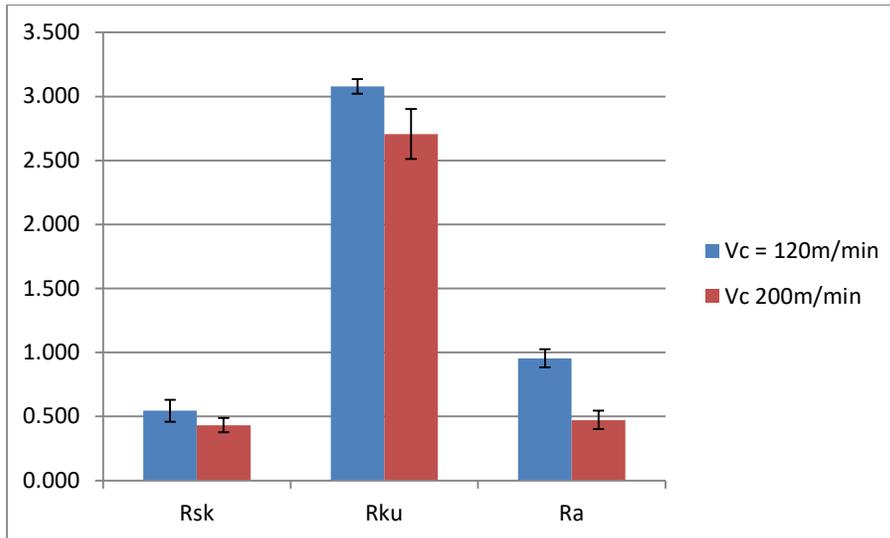
Fonte: O autor

Gráfico 2: Influência do  $f$  nos parâmetros de rugosidade  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$  e  $R_a$  com  $V_c = 200\text{m/min}$ 

Fonte: O autor

Gráfico 3: Influência da  $V_c$  nos parâmetros de rugosidade  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$  e  $R_a$  com  $f = 0,1\text{mm/rot}$ 

Fonte: O autor

Gráfico 4: Influência da  $V_c$  nos parâmetros de rugosidade  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$  e  $R_a$  com  $f = 0,25\text{mm/rot}$ 

Fonte: O autor

Quando se analisa os gráficos 1 e 2, observa-se que, quando mantidas as velocidades de corte constantes em 120m/min e 200m/min, os parâmetros de rugosidade desvio médio aritmético, assimetria e achatamento são estatisticamente semelhantes.

Quando se analisa os gráficos 3 e 4 onde são mantidos constantes o avanço em 0,10mm/rot e 0,25mm/rot, observa-se que os parâmetros de rugosidade assimetria e achatamento são estatisticamente semelhantes, enquanto que o parâmetro desvio médio aritmético tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte.

Os valores obtidos por Veloso (2017) relacionados à rugosidade média ( $R_a$ ) com variação na velocidade de corte ( $V_c$ ) de forma geral, observou-se menor rugosidade média ( $R_a$ ) quando a operação de usinagem é realizada com uma velocidade de corte de 360 m/min assim gerando um acabamento superficial melhor no torneamento de um aço ABNT 1045, do que com a velocidade de 280 m/min. De acordo com a literatura, velocidades de corte maiores tendem a gerar melhores acabamentos e menores chances de aparecimento do fenômeno APC, que também influencia diretamente no acabamento superficial da peça.

Reis (2001) aborda em seu trabalho que utilização de baixas velocidades de corte pode provocar o fenômeno da aresta postiça de corte (APC), assim provocando uma mudança de fluxo do cavaco e dificuldade de corte, gerando influência direta na rugosidade média de peças usinadas.

No presente estudo, foram feitos experimentos com velocidade de corte de 120m/min e 200m/min (que estão dentro da faixa de trabalho sugerida pelo fabricante) tendo em vista que o material usinado é aço inoxidável. Fang, Srinivasa e Mosquea (2010) fizeram um experimento variando a velocidade de corte na usinagem de alumínio e o comportamento observado é diferente ao que foi encontrado no presente estudo: quando se aumenta a velocidade de corte no ensaio, isso leva a uma diminuição na achatamento. No presente estudo, o aumento da velocidade de corte não interfere no valor da achatamento, uma vez que os resultados encontrados são estatisticamente semelhantes. Os autores Fang, Srinivasa e Mosquea (2010) associaram este comportamento ao aumento a vibração do processo de corte, o que afeta diretamente a integridade superficial da peça usinada.

Em seu trabalho, Bonandi (2012) realizou ensaio de torneamento em um aço AISI M4 endurecido e realizou algumas combinações de parâmetros de corte. Três valores para o avanço (0,01mm/rev, 0,03mm/rev e 0,06mm/rev) e três valores para a velocidade de corte (64m/min, 80m/min e 96m/min). Em todos os seus testes, observou-se que o aumento do avanço levou a um aumento na rugosidade média aritmética; enquanto que o aumento da velocidade de corte levou a uma diminuição da rugosidade média aritmética. Estes resultados encontrados pelo autor no quesito velocidade de corte são coerentes e seguem a mesma tendência aos resultados encontrados no presente trabalho.

#### 4.4 PERFILÔMETRO ÓTICO

Como mencionado no planejamento experimental, foi feita a medição da rugosidade com o auxílio do perfilômetro ótico em apenas uma amostra de cada uma das configurações de ensaio. Em cada amostra, foram feitas 4 medições em trechos distintos dos parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_{sk}$  e  $R_{ku}$  com auxílio do *software* Expert3D. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Media das rugosidades obtidas com o perfilômetro

|                                |                       | <b>Config<br/>1</b> | <b>Config<br/>3</b> | <b>Config<br/>2</b> | <b>Config<br/>4</b> |
|--------------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                | <b>f [mm/rot]</b>     | <b>0,10</b>         |                     | <b>0,25</b>         |                     |
|                                | <b>Vc [m/min]</b>     | <b>120</b>          | <b>200</b>          | <b>120</b>          | <b>200</b>          |
| <b>Amostra 1<br/>Medição 1</b> | <b>R<sub>sk</sub></b> | 0,663               | 0,593               | 0,403               | 0,463               |
|                                | <b>R<sub>ku</sub></b> | 3,071               | 3,179               | 2,774               | 2,874               |
|                                | <b>R<sub>a</sub></b>  | 1,223               | 1,576               | 0,668               | 0,916               |
| <b>Amostra 1<br/>Medição 2</b> | <b>R<sub>sk</sub></b> | 0,623               | 0,645               | 0,444               | 0,465               |
|                                | <b>R<sub>ku</sub></b> | 3,171               | 3,213               | 2,668               | 2,899               |
|                                | <b>R<sub>a</sub></b>  | 1,278               | 1,503               | 0,666               | 0,987               |
| <b>Amostra 1<br/>Medição 3</b> | <b>R<sub>sk</sub></b> | 0,635               | 0,633               | 0,438               | 0,457               |
|                                | <b>R<sub>ku</sub></b> | 3,165               | 3,238               | 2,670               | 2,815               |
|                                | <b>R<sub>a</sub></b>  | 1,303               | 1,599               | 0,683               | 0,981               |
| <b>Amostra 1<br/>Medição 4</b> | <b>R<sub>sk</sub></b> | 0,638               | 0,678               | 0,458               | 0,468               |
|                                | <b>R<sub>ku</sub></b> | 3,159               | 3,222               | 2,679               | 2,892               |
|                                | <b>R<sub>a</sub></b>  | 1,288               | 1,604               | 0,679               | 0,943               |
| <b>Média</b>                   | <b>R<sub>sk</sub></b> | 0,637               | 0,639               | 0,441               | 0,464               |
|                                | <b>R<sub>ku</sub></b> | 3,162               | 3,218               | 2,675               | 2,883               |
|                                | <b>R<sub>a</sub></b>  | 1,283               | 1,588               | 0,674               | 0,962               |

Fonte: o autor

Com base na tabela 7, foi construída a tabela 8 com os valores de desvio padrão e erro padrão das medições realizadas com o perfilômetro.

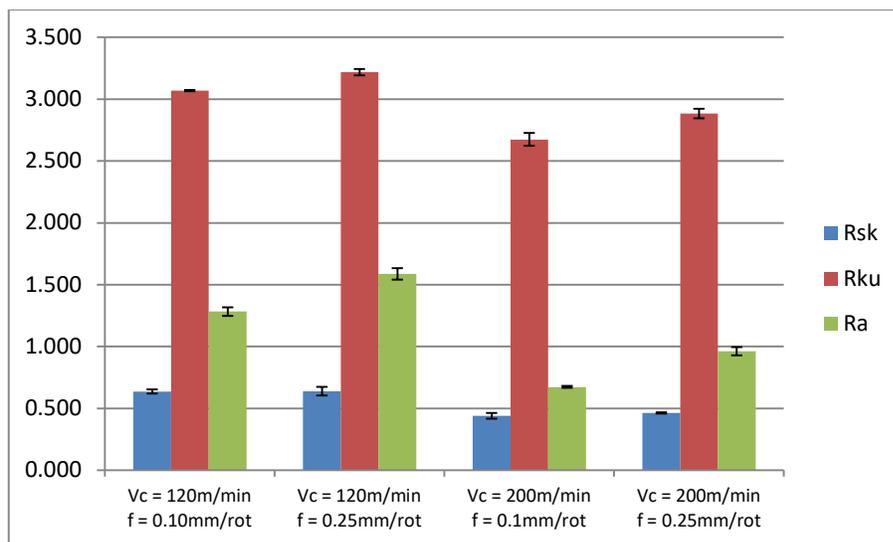
Tabela 8: Desvio Padrão e Erro Padrão das medições realizadas com o perfilômetro

|                 |                | <b>Desvio Padrão</b> |            |           | <b>Erro Padrão</b> |            |           |
|-----------------|----------------|----------------------|------------|-----------|--------------------|------------|-----------|
|                 |                | <b>Rsk</b>           | <b>Rku</b> | <b>Ra</b> | <b>Rsk</b>         | <b>Rku</b> | <b>Ra</b> |
| <b>Config 1</b> | Vc = 120m/min  | 0,017                | 0,006      | 0,035     | 0,008              | 0,003      | 0,017     |
|                 | f = 0,10mm/rot |                      |            |           |                    |            |           |
| <b>Config 2</b> | Vc = 120m/min  | 0,035                | 0,025      | 0,047     | 0,018              | 0,012      | 0,023     |
|                 | f = 0,25mm/rot |                      |            |           |                    |            |           |
| <b>Config 3</b> | Vc = 200m/min  | 0,023                | 0,051      | 0,008     | 0,012              | 0,026      | 0,004     |
|                 | f = 0,10mm/rot |                      |            |           |                    |            |           |
| <b>Config 4</b> | Vc = 200m/min  | 0,005                | 0,038      | 0,033     | 0,002              | 0,019      | 0,017     |
|                 | f = 0,25mm/rot |                      |            |           |                    |            |           |

Fonte: O autor

O gráfico 5 ilustra os resultados obtidos com a média das medições de perfilômetro obtidos na tabela 7 com seus respectivos desvios padrões.

Gráfico 5: Resultados obtidos dos parâmetros de rugosidade  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$  e  $R_a$  com a técnica de medição perfilometria



Fonte: O autor

No gráfico 5, quando se mantém constante o avanço em 0,10mm/rot e 0,25mm/rot, observa-se que os parâmetros de rugosidade assimetria e achatamento não são influenciados pelo aumento da velocidade de corte e são estatisticamente semelhantes; enquanto que o parâmetro desvio médio aritmético tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte. Quando se mantém constante a velocidade de corte em 120m/min e 200m/min, observa-se que os parâmetros de rugosidade desvio médio aritmético, assimetria e achatamento não são influenciados pelo aumento da velocidade de avanço e são estatisticamente semelhantes.

No ensaio de torneamento realizado no presente estudo, observa-se nas tabelas 5 (rugosímetro) e 8 (perfilômetro) que o valor do parâmetro  $R_{ku}$  variou entre 2,3 a 3,3. Os ensaios em que a velocidade de corte foi 200m/min, notamos que os valores de achatamento são menores que 3, os quais caracterizam um perfil de rugosidade não pontiagudo, caracterizando superfícies menos passíveis de desgaste. Já os ensaios com velocidade de corte de 120m/min, os valores de achatamento são maiores que 3, indicando superfícies pontiagudas com maior tendência ao desgaste.

#### 4.5 COMPARATIVO DAS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO

Com a finalidade de criar um comparativo entre as duas técnicas de medição, foi gerada a tabela 9 que agrupa os resultados encontrados com as duas técnicas de medição. Para ambas as técnicas de medição, foram utilizadas a média das 4 medidas que foram obtidas com as medições.

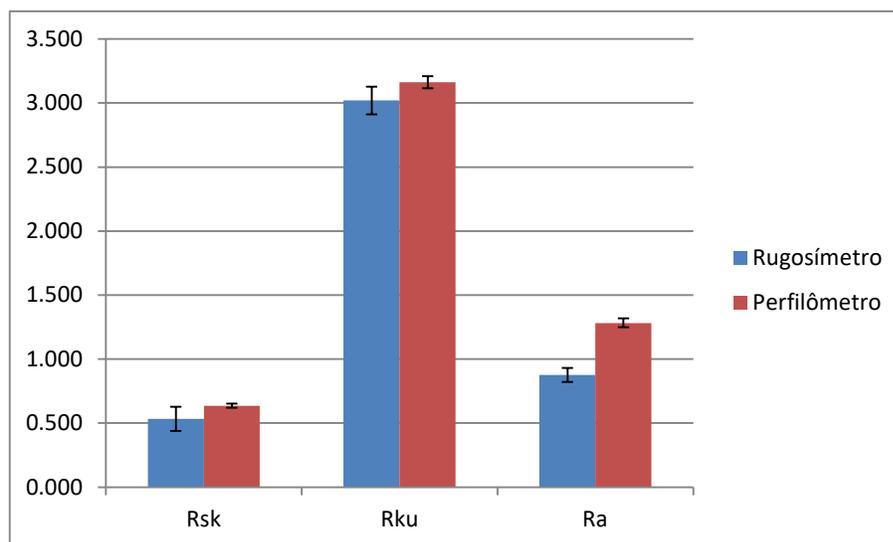
Tabela 9: Rugosidades obtidas com as duas técnicas de medição

|                 |                | Rugosímetro |       |       | Perfilômetro |       |       |
|-----------------|----------------|-------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
|                 |                | Rsk         | Rku   | Ra    | Rsk          | Rku   | Ra    |
| <b>Config 1</b> | Vc = 120m/min  | 0,533       | 3,019 | 0,876 | 0,637        | 3,162 | 1,283 |
|                 | f = 0,10mm/rot |             |       |       |              |       |       |
| <b>Config 2</b> | Vc = 120m/min  | 0,546       | 3,078 | 0,955 | 0,639        | 3,218 | 1,588 |
|                 | f = 0,25mm/rot |             |       |       |              |       |       |
| <b>Config 3</b> | Vc = 200m/min  | 0,405       | 2,597 | 0,397 | 0,441        | 2,675 | 0,674 |
|                 | f = 0,10mm/rot |             |       |       |              |       |       |
| <b>Config 4</b> | Vc = 200m/min  | 0,434       | 2,707 | 0,474 | 0,464        | 2,883 | 0,962 |
|                 | f = 0,25mm/rot |             |       |       |              |       |       |

Fonte: o autor

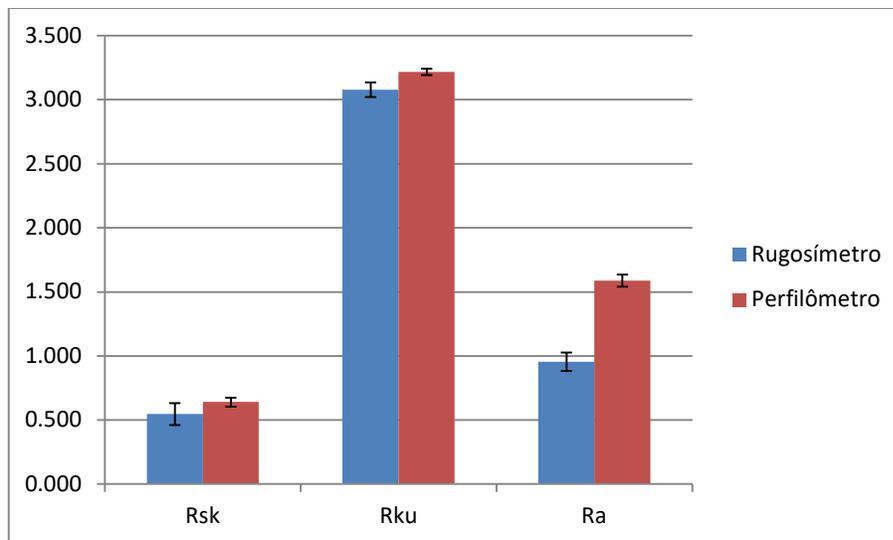
Os gráficos 6, 7, 8 e 9 foram obtidos com os dados da tabela 9.

Gráfico 6: Resultado comparativo dos parâmetros de rugosidade Rsk, Rku e Ra das duas técnicas de medição para Vc = 120m/min e f = 0,10mm/rot



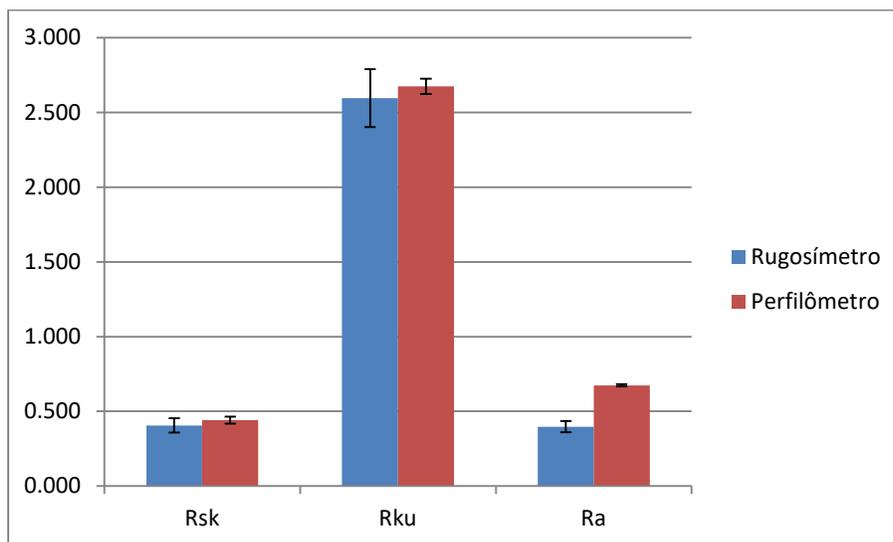
Fonte: O autor

Grafico 7: Resultado comparativo dos parâmetros de rugosidade Rsk, Rku e Ra das duas técnicas de medição para  $V_c = 120\text{m/min}$  e  $f = 0,25\text{mm/rot}$



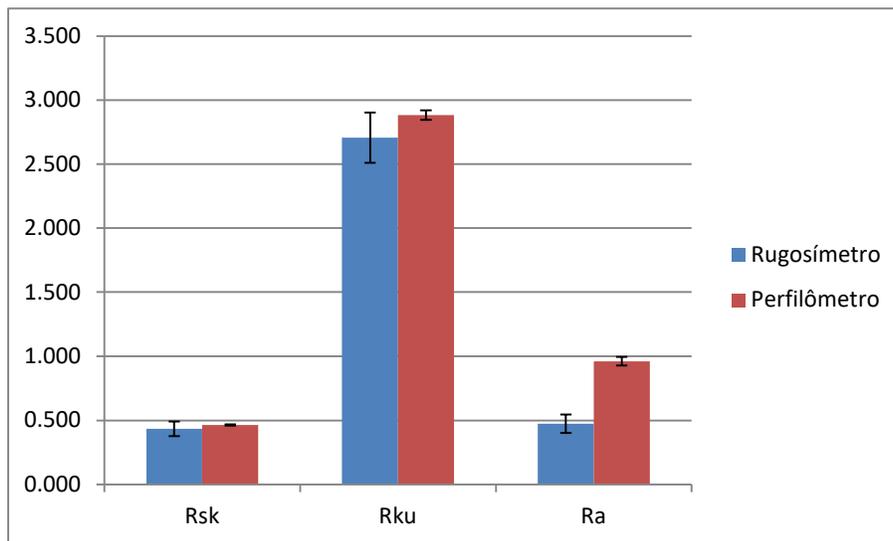
Fonte: O autor

Grafico 8: Resultado comparativo dos parâmetros de rugosidade Rsk, Rku e Ra das duas técnicas de medição para  $V_c = 200\text{m/min}$  e  $f = 0,10\text{mm/rot}$



Fonte: O autor

Grafico 9: Resultado comparativo dos parâmetros de rugosidade  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$  e  $R_a$  das duas técnicas de medição para  $V_c = 200\text{m/min}$  e  $f = 0,25\text{mm/rot}$



Fonte: O autor

Analisando os gráficos 6, 7, 8 e 9 observa-se que, de modo geral, os valores de assimetria e achatamento são estatisticamente semelhantes para ambas as técnicas de medição; enquanto que o parâmetro de rugosidade desvio médio aritmético encontrados com a técnica de perfilometria tenham valores superiores aos resultados encontrados com o rugosímetro.

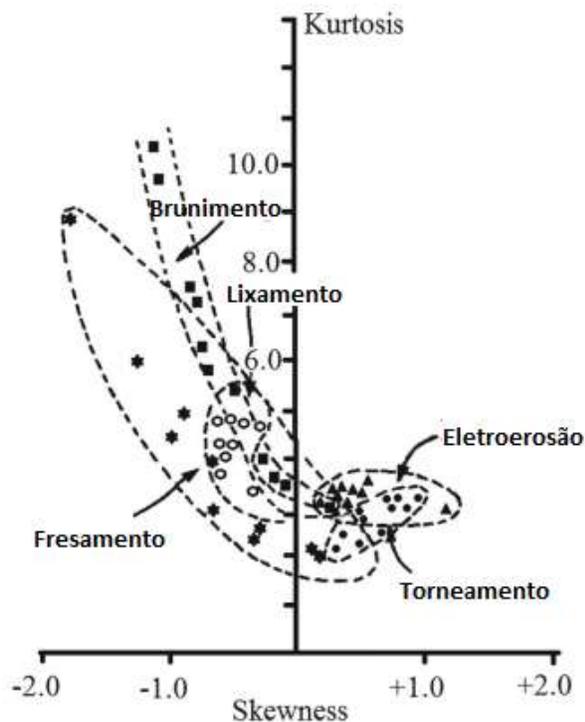
Em seu trabalho sobre a comparação do efeito do método de medição com contato e sem contato, Neto (2017) identificou que o método de medição sem contato forneceu, para todos os parâmetros analisados ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$ ,  $R_t$  e  $R_{ku}$ ), valores médios maiores do que a medição com contato para todas as condições investigadas. Este fato pode ser atribuído à impossibilidade na medição com contato em detectar as irregularidades que sejam menores do que o valor do raio da ponta. As condições de corte, avanço e a profundidade, também influenciam significativamente os resultados os valores de  $R_a$  sendo que o avanço é mais influente. A altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas da ferramenta tendem a aumentar com o aumento do avanço (MACHADO, DA SILVA, 2004).

Pode-se inferir que apenas a velocidade de corte influencia diretamente nas rugosidades desvio médio aritmético, enquanto que os resultados obtidos para os parâmetros assimetria e achatamento são estatisticamente semelhantes. O resultado encontrado no presente estudo está coerente com o que foi encontrado pelos autores Horváth, Czifra e Kiss (2015), que sugerem que apenas os parâmetros  $R_a$  e  $R_z$  (rugosidade média e máxima de perfil, respectivamente)

sofrem influência dos parâmetros de corte no torneamento, enquanto os parâmetros estatísticos (assimetria e achatamento) não teriam influência com as condições de usinagem, mas seriam influenciados apenas pela geometria da ferramenta.

Os autores ainda trazem um gráfico para ilustrar como diferentes operações de usinagem formam diferentes grupos de achatamento e assimetria, que depende diretamente da tecnologia utilizada (torneamento, fresamento, eletroerosão, etc). Este gráfico é chamado pela literatura de mapa topológico. A figura 21 ilustra esse mapa.

Figura 22 –Mapa topológico -assimetria e achatamento

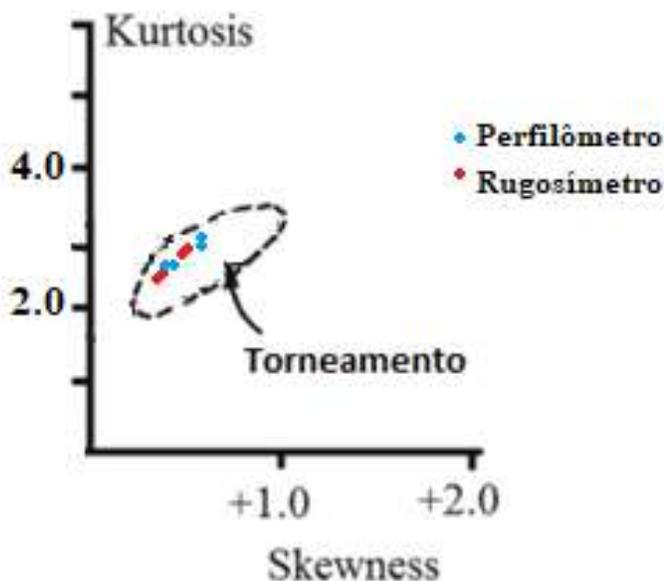


Fonte: Horváth, Czifra e Kiss (2015)

Pode-se inferir que os resultados encontrados neste estudo estão coerentes com o mapa topológico, uma vez que para o caso do torneamento os valores típicos de assimetria estão na faixa de 0 a +1,5 e da achatamento entre +2 e +4.

Com base na figura 21, foi possível construir a figura 22 evidenciando apenas a operação de torneamento e representando os pares de assimetria e achatamento encontrados no presente trabalho.

Figura 23 – Mapa topológico adaptado para presente estudo evidenciando os parâmetros de rugosidade assimetria e achatamento



Fonte: Adaptado - Horváth, Czifra e Kiss (2015)

Observa-se que os pares de assimetria e achatamento encontrados estão dentro da faixa de valores sugeridos por Horváth, Czifra e Kiss (2015).

Couto (2019) encontra valores positivos para o parâmetro  $R_{sk}$  no processo de torneamento do aço ABNT 4340 endurecido quando foram utilizadas as velocidades de corte de 150m/min e 225m/min. Já quando foi utilizada a velocidade de corte de 300m/min foram obtidos valores negativos predominantemente, os quais caracterizam superfícies com picos removidos. Portanto, utilizando velocidades de cortes maiores, a tendência é obtermos superfícies similares a obtidas pelo processo de retificação.

Os resultados encontrados no presente trabalho nos mostram que o parâmetro de rugosidade desvio médio aritmético é influenciada pela variação da velocidade de corte. O estudo proposto por Diovani (2019) corrobora com esta afirmação. Em seu trabalho, Diovani (2019) verificou que o aumento da velocidade de corte diminui o parâmetro  $R_a$ . O parâmetro

de rugosidade média ( $R_a$ ) é o mais comumente utilizado pela indústria, porém o mesmo sozinho não é capaz de caracterizar uma superfície por completo. Por este motivo, os parâmetros assimetria e achatamento (entre outros parâmetros) têm sido introduzidos com maior frequência. O parâmetro de assimetria é bastante susceptível a perturbações externas aleatórias, porém consegue mostrar a distribuição de picos e vales, o que caracteriza uma superfície quanto ao seu perfil dominante. O parâmetro de achatamento, por sua vez, é muito efetivo na caracterização do perfil em função do processo de fabricação que ela foi submetida e para verificar o grau de achatamento do perfil de rugosidade. Como ilustrada pela figura 21, operações que provocam maior achatamento da amostra, possuem achatamento mais elevada como as operações de brunimento e fresamento.

## 5. CONCLUSÕES

O parâmetro de corte velocidade de corte avaliado na pesquisa realizada demonstra exercer influência no parâmetro de rugosidade desvio médio aritmético no torneamento do aço inoxidável supermartensítico.

Conclui-se que, quando mantido constante o avanço, o aumento da velocidade de corte no ensaio tende a diminuir o parâmetro de rugosidade desvio médio aritmético.

Conclui-se que, quando mantida constante a velocidade de corte, o aumento do avanço não tem influência nos parâmetros de rugosidade desvio médio aritmético, assimetria e achatamento, pois eles são estatisticamente semelhantes.

Conclui-se que a técnica de perfilometria ótica apresentou resultado bem próximo ao que foi obtido com a técnica de rugosidade por contato quando comparamos aos parâmetros de rugosidade desvio médio aritmético, assimetria e achatamento de cada amostra; mesmo essas técnicas tendo princípios de funcionamento completamente distintos.

Conclui-se que os resultados encontrados com a técnica de medição perfilometria apresentaram resultados maiores para a rugosidade desvio médio aritmético, enquanto que para os parâmetros assimetria e achatamento os resultados são estatisticamente equivalentes.

Conclui-se que uma superfície pode ser caracterizada pelos seus parâmetros de rugosidade com o auxílio de equipamentos disponíveis na indústria moderna, tais como rugosímetros e perfilômetros; e que a medição de diversos parâmetros de rugosidade é uma boa alternativa para a melhor caracterização da superfície tribológica.

## 6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de ampliar a técnica utilizada neste experimento e ampliar o conhecimento na área, o presente trabalho deixa a sugestão para que se realizem novos ensaios variando os seguintes quesitos:

- Utilizar outros tipos de aço inoxidável para observar se o comportamento encontrado pelo aço inoxidável supermartensítico se repete;
- Utilizar outros tipos de materiais como ligas de alumínio para ampliar o conhecimento na área de materiais;
- Fazer novas combinações de parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) dentro da faixa de trabalho sugerida pelo fabricante da ferramenta para ter maior representatividade dos resultados encontrados neste trabalho;
- Utilizar outras técnicas de avaliação da integridade superficial das amostras como microscopia de força atômica e perfilometria de contato para ampliar a amostragem e ter maior base de dados para futuras análises.

## 7. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** 1 ed. Rio de Janeiro, 2002. 18 p.

ANSELMO, N.; MAY, J. E.; MARIANO, N. A.; NASCENTE, P.A.P.; KURI, S. E., **Corrosion behavior of supermartensitic stainless steel, Material Science and Engineering.** Vol. 428, 2006, 73 – 79 p.

ATEHORTUA, J. D. E. **Transformações de fase associadas ao processamento termomecânico do aço inoxidável supermartensítico 12Cr/6Ni/2Mo/0,1Ti.** 168 f. Dissertação (mestrado), Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

BA, E. C. T., SILVA, D. A., CAMARA, M. A., *et al* **“Efeitos dos Parâmetros de Assimetria e Curtose de Superfícies no Comportamento Tribológico em Ensaio Pino Sobre Disco”.** COBEF. São Paulo. 2019

BEZERRA, D.C, MACHADO, I.F. 2007 **Avaliação do efeito da velocidade de corte nos esforços de usinagem e no acabamento superficial de um aço ABNT 1045.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2007.

BONANDI, M. **“Estudo Das Condições De Corte No Torneamento Do Aço Aisi M4 Endurecido, Utilizando A Metodologia De Projeto De Experimentos.”** Dissertação (mestrado). Universidade Nove de Julho. São Paulo. 2012

BOOTHOROYD, G.; KNIGHT, W.A. **“Fundamentals of Machining and Machine Tools”**, 3ª edição. CRC press, Taylor & Francis Group, 2006.

BOSSERT, M. **“Machining Stainless alloy. Advanced Materials & Processes”**, v. 148, n. 1, p. 43-44, Jul 1995. Apud MARQUES D. C. **“Estudo da influência do teor de níquel na usinabilidade de ligas Fe-Cr-Ni.”** 95p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007

BORDINASSI, E. C. **Contribuição ao estudo da integridade superficial de um aço inoxidável super-duplex após usinagem**. 221 f. Tese (doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CALIL, Luís Fernando Peres. **Estudo de caso para avaliação do tratamento dado à tecnologia de superfície no meio fabril**. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento da Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

CAMARGO, R. **“Rugosidade superficial nas operações de torneamento”**. SENAI, Santa Barbara D’Oeste: SP. 2011.

CARDOSO, F. F. *et al.* **“Projeto e construção de edifícios de aço: Uso do aço na construção”**. São Paulo: EPUSP, 2014.

CARROUGE, D.; BHADSHIA, K. D. H.; WOOLLIN, P., **Effect of  $\delta$ -ferrite on impact properties of supermartensitic stainless steel heat affected zone**, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 9, Nr. 5, 2004, 57 – 63 p.

CHIAVERINI, V. **“Aços e Ferros Fundidos”** – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7º edição, 2010.

COSTA E SILVA, A. L. V., MEI, P. R **“Aços e Ligas Especiais”**. 2ª edição” Editora Edgard. 2009

DAGNALL, H. **“Exploring Surface Texture”**, 2ª edição, Rank Taylor Hobson Limited, England, 1986.

DAL BELO, S. **“As estruturas com perfis e painéis de aço a frio”**. São Paulo, Revista Projeto, 2017.

DAROIT, M, “**Estudo de Aço Microligado ao Vanádio para Produção de Barra Nervurada para Concreto Armado com Característica de Soldabilidade Segundo Norma ABNT NBR 8965:1985**”, Porto Alegre – RS, 2011.

DEMETERCO, P. L. “**Um sistema construtivo industrial de edificações de baixo custo como agente de otimização da infra-estrutura industrial nacional: o sistema-aço**”. SIMPÓSIO SOBRE O USO DO AÇO NA CONSTRUÇÃO. Ouro Preto: UFOP, 2017.

DEONISIO, C. C. C. “**Estudo do fresamento do aço D2 endurecido em altas velocidades de corte**”. 2004. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2004.

DIN 4760. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Form deviations. Concepts. Classification System**. Berlin: Beut, jun., 1982

DIN 4761. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Surface character. Geometrical characteristics of texture. Terms/definitions, Symbols**. DIN 4761. Berlin: Beut, dez., 1978.

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

DUARTE, D. M. “**Avaliação da formação da austenita no revenimento do aço inoxidável supermartensítico e seu efeito nas propriedades mecânicas e resistência à corrosão localizada**”. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2017

DONG, W.P.; SULLIVAN, P.J.; STOUT, K.J. “**Comprehensive study of parameters for characterising three dimensional surface topography: III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties**”. Wear, Birmingham, v. 178. 1994.

ESCALONA, P.M.; CASSIER, Z. “**Influence of critical cutting speed on the surface finish of turned steel wear**”, 218 (1998) 103–109.

ESPANHOL, V. **Análise dos Esforços de Corte e acabamento superficial no Torneamento de Aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra cavaco**. Porto Alegre, 68 f .

Dissertação ( Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

FANG, N.; SRINIVASA, P.; MOSQUEA, S. “**The effect of built-up edge on the cutting vibrations in machining 2024-T351 aluminum alloy**”. 2010

FERRARESI, D.; “**Fundamentos da usinagem dos metais**”. Ed. Edgard Blücher Ltda., 12ª edição, São Paulo, Brasil, 2006.

FERRARESI, D. “**Tecnologia da usinagem dos metais**”. 9ª. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA. 2013.

FREITAS, E. S. R. “**Parâmetros topográficos para avaliação, caracterização e controle tribológicos de superfícies de engenharia**”. 2006. 118 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

GALANIS, N.I.;MANOLAKOS, D.E.“**Surface roughness prediction in turning of femoral head**”, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 51 (2010) 79–86.

GROOVER, M.P. “**Fundamentals of Modern Manufacturing**”. Prentice Hall, New Jersey, 1996.

GRZESIK, W.; WANAT, T., “**Surface finish generated in hard turning of quenched alloy steel parts using conventional and wiper ceramic inserts**”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 46, p. 1988-1995, 2006.

HENKE, S. L.; PAREDES, R. S. C.; CAPRA, A. R., **Desenvolvimento da ferrita delta na solda e ZTA resultante de soldagem plasma pulsada em um aço inoxidável supermartensítico, Soldagem & Inspeção**, São Paulo (Brasil), Vol. 18, nº 01, 2013, 57 – 63 p.

HEIDERSBACH, R. “**Metallurgy and Corrosion Control in Oil and Gas Production**”. Wiley Series in Corrosion, 2011. 296 p.

HORVÁRTH, R., CZIFRA, Á.; KISS, A. D. “**Effect of conventional and non-conventional tool geometries to assimetria and achatamento of surface roughness in case of fine turning of aluminium alloys diamonds tools**”. 2015

IMOIA; “**Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels**”; p.4-5, 2014.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. “**Manufacturing engineering and technology**”. 6edição. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1176p. 2010.

KLOCKE, F., **Manufacturing Processes 1: Cutting**, Tradução de Aaron Kuchle. Aachen (Alemanha): Springer, Original em alemão, 2011, 524 p.

KONDO, K.; OGAWA, K.; AMAYA, H.; UEDA, M.; OHTANI, M., **Development of weldable Super 13Cr martensitic stainless steel for flowline**, International *Offshore* and Polar Conference, Kitakyushu (Japão), 2002, 303 – 309 p.

KORKUT, I.; KASAP, M.; CIFTCI, I.; SEKER, U. “**Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel**”. Materials & Design, v.25, p.303-305, 2004.

KOSA, T.; Ney, R.P., **Tool wear and tool life**, Ohio (Estados Unidos da América): ASM International, 1989, 68 – 707 p.

JESUS, R. E. C. **Avaliações dos esforços, temperatura, integridade superficial em torneamento do aço inoxidável superduplex UNS S32760 quando alterado o ângulo de posição da ferramenta e os parâmetros de corte**. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2013.

LEACH, R. Of “**Surface Texture Using Stylus Instruments**”: Engineering Measurement Division National Physical Laboratory. Hampton: Hmso, 2014. 112 p.

LIEW, W.Y.H. DING, X. **Wear progression of carbide tool in low-speed end milling of stainless steel.** WEAR. A, p. 155-166. 14 Nov. 2008.

MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; **“Teoria da Usinagem dos Materiais”**, 1ª ed. São Paulo; EditoraBlucler, 2009.

MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B. **“Usinagem dos Metais”**. 4ª edição. Uberlândia. Editora Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Apostila. 1999. 224 p.

MITTAL, M. M., **“Surface finish prediction models for fine turning”**, 1988.

MONTGOMERY, D.C. **“Design and Analysis of Experiments”**, 4ª ed. 1997.

MORELO, F. **Análise da influência do mandrilamento na integridade superficial do aço inoxidável super duplex.** 121 f. Dissertação (mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

MOTORCU, A. R.; KUS, A.; DURGUN, I. **“The evaluation of the effects of control factors on surface roughness in the drilling of Waspaloy superalloy,”** Measurement, vol. 58, 2014, pp. 394–408.

MUMMERY, L. **“Surface Texture Analysis – The Handbook”**. Hommelwerke GmbH, Germany, 1992.

NETO, I. M., PEREIRA, J. E. A., ALEXANDRE, R. P., MATSUMOTO, H., PEREIRA, J. A., 2004, **Influencia da Rotação na Rugosidade da peça no torneamento.** São Paulo: Periódico – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2004.

NETO, W. S. M., **“Comparação Efeito do Método de Medição com Contato e Sem Contato na Rugosidade”**. Uberlândia. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

OLIVEIRA, D. A. DE. **Influência da modificação da geometria da ferramenta de corte sobre o torneamento do aço inoxidável supermartensítico**. 2017. 142 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo-horizonte, 2017.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L.C. **“Aços Inoxidáveis Austeníticos: Microestrutura e Propriedades”**.Hemus Editora Limitada, S.P.,1994.

PAULO, R.G.R., 2008. **Avaliação da integridade superficial e usinabilidade de engrenagens forjadas utilizando fresamento com alta velocidade de corte**. São Paulo, 154 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Ilha Solteira, 2008.

PELLISARI, L. P., OLIVIERI, K. A. N., TEIXEIRA, M. L., MIRANDA, M. E. **“Avaliação da Rugosidade Superficial de duas Cerâmicas Odontológicas Submetidas a Diferentes Tratamentos de Superfície”**. Revista Dentalpress de Estética. Volume 10. 2013

PERINI, F. G., **“Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Aços de Alta Resistência e Baixa Liga Soldados”**, Caxias do Sul – RS, 2008.

RAMIREZ, J. E., **Weldability evaluation of supermartensitic stainless steels**, Journal Weld, Estados Unidos da América, Vol. 86, 2007, 125 – 134 p.

RAO, S. R.;PADMANABHAN, G. **“Application of Taguchi methods and ANOVA in optimization of process parameters for metal removal rate in electrochemical machining of Al/5%SiC composites,”** International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 2, 2012.

REIS, A. M., DA SILVA, M. B., 2001. **Análise das superfícies usinadas em presença de aresta postiça de corte**. Uberlândia, Periódico – Universidade Federal de Uberlândia, 2001.

RODRIGUES, C. A. D.; LORENZO, P. L. D.; SOKOLOWSKI, A.; BARBOSA, C. A.; ROLLO, J. M. D. A., **Titanium and molybdenum content in supermartensitic stainless steel**, *Materials Science and Engineering A*, Vols. 460 – 461, 2007, 149 – 152 p.

RODRIGUES, H. L. **Relação desgaste-acabamento superficial em ferramentas de metal duro com revestimento tripulo no torneamento de aços**. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Projetos e Materiais, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

SAHOO, A. K. **“Modeling and optimization of Al/SiC MMC machining using Taguchi approach,”** Measurement, vol. 46, 2013, pp. 3064-3072.

SALES, J. J. **“Estudo do projeto e da construção de edifícios de andares múltiplos com estruturas de aço”**. Tese (Doutorado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2017.

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

SANTOS, R. G. S., 2011. **Estudo da Influência da aplicação do fluido de corte na usinagem da liga de Alumínio AA7075**. Guaratinguetá, 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2011.

SANDVIK. **“Tool Wear: Modern Metal Cutting”**. 1ª edição. Suíça: ToftersTryckery AB, 2001.

SILVA, A.; MEI, R. **“Aços e Ligas Especiais”**. São Paulo, 2010.

SILVA, L. R. *et al.* **“Influência da geometria da aresta na usinagem de superliga à base de níquel”**. 2002.

SILVA, D. A. **“Estudo dos parâmetros de superfície e da tensão residual no aço ABNT 4340 endurecido após retificação utilizando diferentes fluidos de corte”**. 2018, 135 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, Belo Horizonte, 2018.

SILVA, E.L., 2013. **Análise da influência de parâmetros de corte na integridade superficial e esforços na operação de torneamento do ferro fundido nodular austemperado**. São João del-Rei, 86 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Joao Del-Rei, 2013.

SHAW, M.C. “**Metal Cutting Principles**”. Oxford University. Press, Oxford, New York, 1984.

SMITH, W. F. “**Structure and Properties do Engineering Alloys**”. 2ª edição. Singapore. McGrawHill, 1993.

SMITH, L; CELANT, M., **Martensitic stainless steel in context**, Belgian Welding Institute, Brussel (Bélgica), Vol. 62, 2002, 10 p.

SUNDARAM, R.M.;LAMBERT, B.K.“**Mathematical models to predict surface finish in fine turning of steel**”, Part 1, Int. J. Prod. Res. 19 (5) (1981) 547–556.

SOBIYI, K. SIGALAS, I. **High Speed Machining of Martensitic Stainless Steel Using PcBN**. Journal of Superhard Materials. p. 34-39. 27, Mar. 2016.

SURESH, P.V.S.; RAO, P.V.;DESHMUKH, S.G.“**A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model**”, Int. J. Mach. Tools & Manuf. 42 (2002) 675–680.

THÖN, I. L. “**Desenvolvimento de um Sistema de Hidroconformação em Tubos de Aço. Trabalho de Conclusão de Curso**”. 2013.

TOFFOLO, R. “**Estudo Comparativo dos Aços Microligados API-5L-X60 e API 5L-X70, Usados para a Confeção de Tubos, Quanto à Tenacidade à Fratura**”.OuroPreto – MG, 2008.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. “**Metal Cutting**”. 4ª edição, USA. Butterworth-Heinemann, 2000. 446p.

VALLOUREC TUBOS DO BRASIL S.A.. **“13%Cr & Super 13%Cr steel grades for sweet CO2 corrosion service V&M Tubes”**. Catálogo, 2005, 8 p.

VELOSO, T. S. **“Análise da Influência do Contra Ponto na Rugosidade de Peças Torneadas em um Aço ABNT 1045”**. São João Del Rei. Dissertação. 2017

VOLPATO, N. **“Recursos CAD/CAM voltados ao modelamento e à usinagem de cavidades para moldes, com estudo de casos de aplicação”**. 2011

YANG, W.H.;TARNG, Y.S. **“Design optimization of cutting parameters for turning operations based on Taguchi method”**.1998

## 8. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM). “**Especialty handbook, stainless steel**”, 3ª edição. 1999.

BELEJCHACK, P. “**Machining stainless Steel. Advanced Materials and Process**”, n.12, p.23-25, 1997. BlücherLtda, São Paulo, Brasil 2006.

CAIRNS, P.; COX, A. L. “**Research Methods for Human-Computer Interaction**”Cambridge University Press. New York, NY, USA. 1ª edição. 2008.

CANAAN, G.L. “**Influência da adição de vanádio nas propriedades mecânicas de aço médio teor de carbono para beneficiamento**”. 2015.

CHIAVERINI, V. “**Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**”. 6ª edição. São Paulo.

CHILDS, T.H.C.; MAEKAWA, T; OBIKAWA, T; YAMANE, Y.; “**Metal Machining: Theory and Applications**”. 1st ed. London: Arnolds, 408p., 2000.

CHOUDHURY, I.A.;EL-BARADIE, M.A. “**Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments**”.J. Mater. Process. Technol. 67. 1997.

COLAÇO, R.“**Materiais de Construção – Guia de Utilização**”, 2011.

COSTA, A. L. S., “**Avaliação Microestrutural e de Propriedades Mecânicas do Aço SAE 10B22 – Fio Máquina Visando a Otimização do Processo de Fabricação**”. Porto Alegre - RS, 2011.

DABNUM, M.A.;HASHMI, M.S.J.;EL-BARADIE, M.A.“**Surface roughness prediction model by design of experiments for turning machinable glass–ceramic**”, J. Mater. Process. Technol. 164-165 (2005) 1289–1293.

DAVIM, J.P. “**A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments**”, J. Mater. Process. Technol. 116. 2001.

ELGERT, C.C.”**Estudo da Influência da Composição Química e dos Parâmetros de Beneficiamento na Tenacidade e na Resistência Mecânica de Aços para Fixadores com Aplicações em Baixas Temperaturas**”. Porto Alegre - RS, 2011.

FENG, C.X.; WANG, X. “**Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning**”, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 20. 2002

FENG, J. L.; HOCHHEISER, H. “**Research Methods in HumanComputer Interaction**”. Indianapolis. 2010.

FERRARESI, D, “**Fundamentos da usinagem dos metais**”, São Paulo, Edgard Blucher.2011

GRACIOSO, J. F.F.“**Efeito das condições de têmpera na microestrutura e propriedades mecânicas de um aço inoxidável martensítico fundido CA6NM**”. Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.

GONÇALVES, M. “**Processamento termomecânico e evolução microestrutural de ligas de alumínio: aspectos da metalurgia física fundamental**”. II Workshop sobre textura e relações de orientação. 2a. ed., São Paulo, 2011.

GORNI, A. A., “**Estudo Traça Relações Entre Microestrutura E Propriedades Mecânicas Em Aços Estruturais**”, São Paulo – SP, 2009.

GUIMARÃES, J. R. C. “**Conceituação, cinética e morfologia da transformação martensítica em aços**”. RevistaLatinoamericana de Metalurgia y Materiales, 2011.

HONEYCOMBE, R. W. K. “**Aços: microestrutura e propriedades**”. Londres, Edward Arnold Ltd, 2011.

LALWANI, D.I.; MEHTA, N.K.;JAIN, P.K. “**Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel**”.Process. Technol. 206. 2008.

LEE, B.Y.;TARNG, Y.S. **“Surface roughness inspection by computer vision in turning operations”**.Int. J. Mach. Tools & Manuf. 41 (2001) 1251– 1263.

LEITE, S. S. *et al.* **“Ensaio de Tração e Metalografia do Aço SAE 1020”**. Revista Engenharia em Ação UniToledo. Araçatuba, SP, v. 02, n. 01, p. 70-82, jan./ago. 2017.

MARTINS, M. **“Temperabilidadejominy e influência do revenido sobre a dureza um estudo em aços estruturais nacionais”**. 2012.

MEIRELLES, G.S.C. **“Desenvolvimento de sistema de aquisição de dados em operações de usinagem visando o monitoramento de linhas”**.São Carlos, 2011.

MESQUITA, N. G. M. **“Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação”**. Florianópolis, Tese (Doutorado) – POSMEC, UFSC, 1992.

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

TSOURVELOUDIS,N.C.;**“Predictive modeling of the Ti6Al4V alloy surface roughness”**, J. Int. Robot Syst. 60 (2010) 513–530. doi 10.1007/ s10846-010-9427-6.

NOORDIN, M.Y.;VENKATESH, V.C.;SHARIF, S.;ELTING, S.;ADDULLAH, A.**“Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel”**, J. Mater. Process. Technol. 145 (2004) 46–58.

OEHLERT, G. A.**“First Course in Design and Analysis of Experiments”**. New York: Freeman and Company, 2000.

ORDÓÑEZ, R.E.C.**“Soldagem e Caracterização das Propriedades Mecânicas de Dutos de Aço API 5L-X80 com Diferentes Arames Tubulares”**. 2004.

PETROPOULOS, G.;MATA, F.; DAVIM, J.P. **“Statistical study of surface roughness in turning of peek composites”**.2008.

PFEIL, W.**“Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático”**8ª edição.Rio de Janeiro: LTC 2017.

PRETI, I. “**Estudo do efeito das temperaturas de austenitização e de revenido na resistência e tenacidade do aço SAE 15B30**”. 2018.

RASMA, E. T. “**Caracterização estrutural e mecânica do aço AISI/SAE 4140 tratado sob diferentes tratamentos térmicos**”. 2015.

RIOS, P. R; PADILHA, A. F. “**Transformações de Fases**”. São Paulo, Artliber, 2007.

SANDVIK COROMANT, “**Manual Técnico - Tecnologia da Usinagem de Metais - C-2900:7-POR/01**”, AB SandvikCoromant, Sandviken, Sweeden, 2010.

SICILIANO, F.; ONO, A. A. “**Aços microligados para peças forjadas e para cementação**”. Anais da X Conferência Internacional de Forjamento (XXVI Senafor, 2011).

SILVA, E. T. P. “**Análise das propriedades mecânicas e estruturais do aço SAE 4140 submetido a tratamento criogênico**”. 2012.

SILVA, A. C. M. ; JABOUR, L. Z. M. ; SANTOS, E. A. ; MARINS, L. F. B. ; OLIVEIRA, J. C. M. ; FERREIRA, L. F. M. ; SANTOS, C. V. P. “**Estudo da Temperabilidade do Aço SAE 1040**”. In: 15º Encontro Nacional dos Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas / ABM Week, 2015, Rio de Janeiro. Anais do 15º Enemet, 2015.

SILVA, L.C.C. “**Aços ao Boro: Principais Características Metalúrgicas e Aplicações Industriais**”. Boletim da Associação Brasileira de Metais, Brasil, 2011.

SOUZA, A.F.“**Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades**”. 2004

TAVAREZ, C. “**Estudo do proceso de têmpera em aço 15B28 aplicado em lâminas de motoniveladoras**”. 2011.

WAZLAWICK, R. S. “**Metodologia de Pesquisa para Ciência da Computação**”, Rio de Janeiro, Elsevier, 2009.

WHITEHOUSE, D.J. "**ReviewArticle: SurfaceMetrology**", Meas.Sci.Technol., n8, pp 955–972, 1997