



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

Jorge Dayvison Celestino Duarte

**ESTUDO SOBRE O TORNEAMENTO DE AÇOS INOXIDÁVEIS**

Belo Horizonte

2021

Jorge Dayvison Celestino Duarte

## **ESTUDO SOBRE O TORNEAMENTO DE AÇOS INOXIDÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção de título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de manufatura e materiais

Orientador: Prof. Alexandre Mendes Abrão

Belo Horizonte

2021

D812e

Duarte, Jorge Dayvison Celestino.

Estudo sobre o torneamento de aços inoxidáveis [recurso eletrônico] /  
Jorge Dayvison Celestino Duarte. - 2021.

1 recurso online (x, 99 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Alexandre Mendes Abrão.

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

Bibliografia: f. 89-99.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Aço inoxidável - Teses.  
3. Torneamento - Teses. 4. Usinagem - Teses. I. Abrão, Alexandre  
Mendes. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.  
III. Título.

CDU: 621(043)

Ficha catalográfica elaborada pelo bibliotecário Reginaldo César Vital dos Santos CRB/6 2165  
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



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

FOLHA DE APROVAÇÃO

**ESTUDO SOBRE O TORNEAMENTO DE AÇOS INOXIDÁVEIS**

**JORGE DAYVISON CELESTINO DUARTE**

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. Alexandre Mendes Abrão (Orientador-Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Marcelo Araújo Câmara (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG) e Dr. Márcio Bacci da Silva (Universidade de Uberlândia/UFU), 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 09 de julho de 2021.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Mendes Abrão, Professor do Magistério Superior**, em 09/08/2021, às 09:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Bacci da Silva, Usuário Externo**, em 11/08/2021, às 15:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Araujo Camara, Professor do Magistério Superior**, em 16/08/2021, às 12:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



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 **0874892** e o código CRC **7C7811F5**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela bênção da oportunidade de concluir esta etapa.

Ao meu orientador, Professor Alexandre Mendes Abrão, por todo auxílio e orientação durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais, em especial à minha mãe, por toda dedicação, incentivo e paciência no decorrer desta caminhada.

A Del Rey Minerals, em especial aos meus amigos de trabalho, Gustavo e Yara, pelo apoio, colaboração e prestatividade.

Aos colegas de curso, por todo o companheirismo, amizade e boas conversas, em especial aos amigos Bárbara, Bruna, Etiene, Marcela, Maria, Rodrigo, Thiago e Vinícius.

Ao professor Marcelo Câmara, por todos os conselhos que antecederam o meu ingresso no programa de mestrado.

Aos técnicos administrativos, em especial a Marina, por todo suporte.

## RESUMO

Os aços inoxidáveis são amplamente utilizados no cotidiano em itens domésticos e industriais e são considerados materiais de difícil usinabilidade devido a características tais como: elevada ductilidade, baixa condutividade térmica, formação de cavacos longos e tendência à formação de APC. Neste trabalho é apresentado o estado da arte sobre a influência da composição química e das propriedades físicas e mecânicas dos aços inoxidáveis sobre a sua usinabilidade, especificamente na operação de torneamento. Pretende-se identificar as condições de usinagem mais adequadas em termos de usinabilidade (considerando-se vida e desgaste da ferramenta de corte, acabamento, força de usinagem, temperatura de corte e alterações subsuperficiais). Também são avaliados resultados obtidos com a utilização de ferramentas com diferentes geometrias, substratos e revestimentos e a influência desses aspectos sobre a usinabilidade durante o torneamento dos aços inoxidáveis. Os resultados apontam para uma maior dificuldade no torneamento dos aços austeníticos devido à sua baixa condutividade térmica, tendência ao encruamento em condições severas e formação de cavacos longos. Os mecanismos de desgaste mais frequentes na usinagem dos aços inoxidáveis foram aderência e arrastamento, abrasão e difusão. No caso particular dos aços martensíticos, o mecanismo de desgaste por deformação sob tensão de compressão apresentou maior relevância devido à elevada dureza desta classe. Para os aços duplex e austeníticos, a presença de APC foi observada em uma extensa faixa de velocidades de corte. O torneamento dos aços martensíticos apresentou elevadas forças de usinagem, associada à alta dureza dessa classe. Os aços inoxidáveis duplex, que possuem maiores teores de Ni e Cr, além de elevados valores de tensão de ruptura, dureza, também apresentaram elevada força de usinagem. O emprego de fluido de corte auxiliou na redução da temperatura de usinagem e o método criogênico mostrou melhor eficiência que os demais em razão do modo de aplicação de N<sub>2</sub> diretamente na zona de corte. Quanto à integridade superficial, o aumento do avanço resultou em uma maior rugosidade para todas as classes investigadas. As mudanças microestruturais observadas durante o torneamento dos aços inoxidáveis estão associadas às altas temperaturas e à elevada deformação. O aumento do avanço e da profundidade de usinagem provocou o encruamento e a elevação da microdureza dos aços austeníticos, enquanto o aumento da temperatura e da deformação do material contribuiu para o surgimento de tensões residuais trativas que, por suas vezes, afetam de forma negativa a resistência à fadiga mecânica.

**Palavras-chave:** Aços inoxidáveis. Usinabilidade. Torneamento.

## ABSTRACT

Stainless steels are widely used in daily life in domestic and industrial items and are considered difficult to machine materials due to characteristics such as: high ductility, low thermal conductivity, formation of long chips and a tendency to form built-up edge. This work presents the state of the art on the influence of chemical composition and both physical and mechanical properties of stainless steels on their machinability, specifically in the turning operation. It is intended to identify the most suitable machining conditions in terms of machinability (considering tool life and wear, surface finish, process forces, cutting temperature and subsurface alterations). Results obtained with the use of tools with different geometries, substrates and coatings are also evaluated. The results point to a greater difficulty in turning austenitic stainless steels due to their low thermal conductivity, strong tendency to hardening and formation of long chips. The most frequently observed wear mechanisms were attrition, abrasion and diffusion. Due to the high hardness of martensitic stainless steels, deformation under compression was the most relevant wear mechanism. For duplex and austenitic steels, the presence of built-up edge was observed in a wide range of cutting speeds. Turning of martensitic stainless steels promoted high process forces, associated with the high hardness of this grade. Duplex stainless steels that have higher Ni and Cr amounts and elevated values of tensile strength and hardness also presented high process forces. The use of cutting fluid helped to reduce machining temperature and the cryogenic method showed best efficiency due to the direct application of N<sub>2</sub> in the cutting zone. With regard to surface integrity, the increase in feed resulted in higher surface roughness for all grades. Microstructural changes in stainless steels are associated with high temperatures and high deformation during turning. The increase in feed and depth of cut in austenitic steels caused work hardening and the increase of microhardness, while the increase in temperature and material deformation contributed to the induction of tensile residual stresses, which negatively affect the fatigue life.

**Keywords:** Stainless steel. Machinability. Turning.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Diagrama de fases de aços Cr-Ni com dados de constituintes metalográficos após têmpera. ....	6
Figura 3.2: Consumo aparente de aço inoxidável planos e não planos no Brasil (tonelada x 1000).....	7
Figura 3.3: Consumo aparente de aços planos especiais/ligados no Brasil 2019.....	7
Figura 3.4: Microestrutura do aço inoxidável ferrítico AISI 409 A laminado a frio. ....	8
Figura 3.5: Microestrutura do aço inoxidável martensítico AISI 410.....	11
Figura 3.6: Microestrutura do aço inoxidável austenítico AISI 304. ....	15
Figura 3.7: Microestrutura do aço inoxidável duplex UNS S32205. ....	16
Figura 3.8: Microestrutura típica do aço inoxidável Cr12Mn5Ni4Mo3Al endurecido por precipitação.....	19
Figura 3.9: Variação do limite de resistência entre as classes inoxidáveis. ....	21
Figura 3.10: Variação do limite de escoamento entre as classes inoxidáveis. ....	22
Figura 3.11: Variação percentual do alongamento entre as classes inoxidáveis. ....	22
Figura 4.1: Fatores que influenciam a resistência ao desgaste do metal duro.....	24
Figura 4.2: Cobertura PVD em inserto de metal duro.....	28
Figura 4.3: Cobertura CVD em inserto de metal duro. ....	29
Figura 4.4: Operações de usinagem segundo a geometria do inserto.....	32
Figura 4.5: Geometria para ferramenta de torneamento da classe M.....	34
Figura 5.1: Distribuição dos estudos de torneamento utilizados no presente trabalho.....	37
Figura 5.2: Formas de desgaste em ferramentas de corte.....	38
Figura 5.3: Mecanismos de desgaste em ferramentas de corte: (a) cisalhamento plástico, (b) deformação sob tensão, (c) abrasão, (d) entalhe, (e) adesão, (f) aderência e arrastamento.....	40
Figura 5.4: Parâmetros de quantificação para o desgaste de ferramentas. ....	41
Figura 5.5: Forças de usinagem e suas componentes na operação de torneamento. ....	47
Figura 5.6: Pressão específica de corte em função do avanço.....	49
Figura 5.7: Forças de usinagem no torneamento a seco dos aços inoxidáveis duplex 1.4462 e 1.4410. ....	51
Figura 5.8: Representação das regiões de geração de calor. ....	54
Figura 5.9: Variação da temperatura em função da velocidade de corte e do método de aplicação do fluido de corte.....	59



Figura 6.1 Classificação da integridade superficial.....	62
Figura 6.2: Influência do avanço e do raio de ponta no acabamento. ....	63
Figura 6.3: Comparação de rugosidade entre ferramentas: (a) alisadora e (b) convencional. .	65
Figura 6.4: Rugosidade do aço AISI 420 em função de diferentes velocidades de corte e avanços. ....	67
Figura 6.5: Rugosidade média aritmética em função do avanço.....	70
Figura 6.6: Indentadores Knoop e Vickers.....	73
Figura 6.7: Perfil de microdureza com $v_c = 60$ m/min, $f = 0,2$ mm/rev, $a_p = 0,4$ mm e $\gamma_o = 10^\circ$ . .....	77
Figura 6.8: Resultados de tensões residuais. ....	81
Figura 6.9: Influência dos parâmetros de usinagem nas tensões residuais.....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Classificação e composição (%) para aços inoxidáveis ferríticos .....	9
Tabela 3.2 Propriedades mecânicas de aços inoxidáveis ferríticos forjados .....	10
Tabela 3.3 Classificação e composição (%) para aços inoxidáveis martensíticos .....	12
Tabela 3.4 Propriedades mecânicas de aços inoxidáveis martensíticos .....	12
Tabela 3.5 Classificação e composição (%) para aços inoxidáveis austeníticos.....	13
Tabela 3.6 Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos forjados.....	14
Tabela 3.7 Classificação e composição (%) para aços inoxidáveis duplex.....	17
Tabela 3.8 Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex.....	18
Tabela 3.9 Classificação e composição (%) para aços inoxidáveis endurecidos por precipitação.....	20
Tabela 3.10 Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis endurecidos por precipitação .....	21
Tabela 4.1 Aplicação e classificação dos metais duros segundo a norma ISO 513 (2004) .....	25
Tabela 4.2 Composição química e características físicas do metal duro classe M .....	26
Tabela 4.3 Principais materiais e propriedades dos recobrimentos depositados por PVD e CVD.....	31
Tabela 5.1 Composição química e características físicas do metal duro classe M .....	36
Tabela 5.2 Revestimentos indicados para o torneamento de aços inoxidáveis .....	41
Tabela 5.3 Principais mecanismos de desgaste para as diferentes classes de aços inoxidáveis .....	46
Tabela 6.1: Influência das condições de usinagem na microdureza dos aços inoxidáveis.....	78
Tabela 6.2: Influência das condições de usinagem nas tensões residuais trativas. ....	82

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	Instituto Americano do Ferro e Aço ( <i>American Iron and Steel Institute</i> )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio
APC	Aresta Postiça de Corte
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais ( <i>American Society for Testing and Materials</i> )
CDV	Deposição Química a Vapor ( <i>Chemical Vapour Deposition</i> )
DIN	Instituto Alemão de Normalização ( <i>Deutsches Institut für Normung</i> )
DSS	Aço Inoxidável Duplex ( <i>Duplex Stainless Steel</i> )
HB	Dureza Brinell ( <i>Hardness Brinell</i> )
HRA	Dureza Rockwell A ( <i>Hardness Rockwell A</i> )
HTCCVD	Deposição Química à Vapor em Alta Temperatura ( <i>High Temperature Chemical Vapor Deposition</i> )
ISO	Organização Internacional de Normalização ( <i>International Organization for Standardization</i> )
JIS	Associação de normalização Japonesa ( <i>Japanese Industrial Standards</i> )
MTCVD	Deposição Química à Vapor em Temperatura Média ( <i>Medium Temperature Chemical Vapor Deposition</i> )
NbC	Carboneto de Nióbio
PACVD	Deposição Química à Vapor Assistida por Plasma ( <i>Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition</i> )
PRE	Resistência Equivalente ao Pite ( <i>Pitting Resistance Equivalent</i> )
PVD	Deposição Física a Vapor ( <i>Physical Vapour Deposition</i> )
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos ( <i>Society of Automotive Engineers</i> )
TaC	Carboneto de Tântalo
TiAlN	Nitreto de Titânio Alumínio
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
UNS	Sistema de Numeração Unificado ( <i>Unified Numbering System</i> )
WC	Carboneto de Tungstênio

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$a_p$	Profundidade ou largura de usinagem
$f$	Avanço
$F_c$	Força de corte
$F_f$	Força de avanço
$F_p$	Força passiva
$F_u$	Força de usinagem
$r_\epsilon$	Raio de ponta
$VB_B$	Desgaste de flanco médio
$v_c$	Velocidade de corte
$\alpha_o$	Ângulo de folga
$\beta_o$	Ângulo de cunha
$\chi_r$	Ângulo de posição
$\gamma_o$	Ângulo de saída
$\lambda_s$	Ângulo de inclinação

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
<b>3 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.....</b>	<b>4</b>
3.1 AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS .....	8
3.2 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS .....	10
3.3 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS .....	13
3.4 AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX.....	16
3.5 AÇOS INOXIDÁVEIS ENDURECIDOS POR PRECIPITAÇÃO .....	18
<b>4 FERRAMENTAS DE CORTE PARA O TORNEAMENTO DE AÇOS INOXIDÁVEIS .....</b>	<b>23</b>
4.1 FERRAMENTAS DE METAL DURO REVESTIDO.....	26
4.2 GEOMETRIA DE FERRAMENTAS DE METAL DURO REVESTIDO.....	31
<b>5 USINABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS .....</b>	<b>35</b>
5.1 VIDA E DESGASTE DE FERRAMENTA.....	37
5.2 FORÇA DE USINAGEM .....	46
5.3 TEMPERATURA DE USINAGEM E FLUIDOS DE CORTE .....	53
<b>6 INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE AÇOS INOXIDÁVEIS.....</b>	<b>61</b>
6.1 ACABAMENTO .....	62
6.2 ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS.....	70
6.3 VARIAÇÃO DE DUREZA.....	72
6.4 TENSÕES RESIDUAIS .....	79
6.5 RESISTÊNCIA À FADIGA .....	83
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>86</b>
<b>8 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis possuem grande espectro de aplicações e, dentre outras características variáveis conforme a classificação, sua larga utilização se deve à resistência à corrosão. De acordo com Chiaverini (1988), a perda de peças metálicas por ação da corrosão sempre preocupou engenheiros, que, constantemente, procuram não só aperfeiçoar e desenvolver novos métodos de proteção, como também desenvolver novas ligas que apresentem resistência à corrosão superior. Em razão das características dos aços inoxidáveis, é possível a obtenção de diversos itens de uso diário, como eletrodomésticos e utensílios, além das aplicações em setores da construção civil e nas indústrias petroquímica, aeronáutica, ferroviária e naval.

Com ampla aplicação em diversos setores da economia, a rota de manufatura do aço inoxidável torna-se de extrema relevância para a obtenção do produto final. Segundo Machado *et al.* (2015), a manufatura pode ser entendida como o processo de transformação de matérias-primas em produtos acabados, seguindo planos bem organizados em todos os aspectos. Dessa forma, os mais diversos bens de consumo são produzidos, desde um simples parafuso ou um automóvel (de cerca de quinze mil peças), até uma aeronave comercial de grande porte (de aproximadamente seis milhões de peças).

Para se obter um produto final com forma, geometria e acabamento definidos, operações de usinagem podem ser utilizadas, sendo o torneamento uma das mais conhecidas. Segundo Ferraresi (1977), o torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução, com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina enquanto a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar em relação ao referido eixo.

Embora sejam amplamente utilizados no cotidiano industrial, os aços inoxidáveis apresentam usinagem complexa em razão da baixa condutividade térmica, do alto endurecimento por deformação e das temperaturas elevadas durante o corte. Essas características podem resultar em uma operação de usinagem problemática e que proporciona o surgimento de cavacos longos, formação de aresta postiça de corte e desgaste prematuro da ferramenta.

De acordo com Diniz *et al.* (2013), entendem-se como propriedades de usinagem de um material aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo, tais como a vida da ferramenta, acabamento superficial da peça, esforços e

temperatura de corte, produtividade e características do cavaco. Assim, a compreensão das características e técnicas de usinagem para o torneamento de aços inoxidáveis é de grande relevância nos contextos industrial e acadêmico devido à complexidade da usinagem dessa classe de materiais e de seu amplo emprego na indústria e nos itens de utilização diária.

Um maior entendimento sobre os parâmetros de usinagem pode representar progresso em todo o processo, de modo a possibilitar a redução do custo e do consumo de energia na usinagem e viabilizar melhorias no aproveitamento da matéria-prima e no desempenho do componente usinado. Pode, ainda, atenuar possíveis avarias nas ferramentas devido à utilização de condições de corte inadequadas ou ferramentas inapropriadas e diminuir a ocorrência de danos à integridade superficial da peça produzida.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é apresentar o estado da arte sobre o torneamento das principais classes de aços inoxidáveis e desenvolver uma análise crítica sobre as principais características de usinagem e parâmetros de corte para cada categoria.

Mais especificamente, serão estudadas as características e propriedades do material relevantes para o processo, bem como a usinabilidade das diferentes ligas e classes de aços inoxidáveis, avaliada em termos de classes de ferramentas de corte recomendadas, vida e desgaste de ferramentas, forças de usinagem registradas durante o torneamento, influência da temperatura de usinagem e do uso fluidos de corte e integridade superficial do componente usinado (acabamento, alterações microestruturais, variação de dureza, tensões residuais e resistência à fadiga).



### 3 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Aços inoxidáveis são materiais altamente resistentes à corrosão (oxidação superficial) em uma variedade de meios, especialmente na atmosfera ambiente, CALLISTER (2000). Esses materiais são descritos como ligas de ferro e cromo que possuem um mínimo de 10% de Cr, sendo este o elemento mais importante devido à sua alta resistência à corrosão. O níquel também possui grande importância na composição dessas ligas, uma vez que contribui para a melhoria das propriedades mecânicas desses materiais, assim como na elevação da resistência à corrosão pelo ataque de soluções neutras de cloreto, CHIAVERINI (1988).

Outros elementos que podem estar presentes na composição dos aços inoxidáveis são: o carbono, que na forma de carbonetos, principalmente nos contornos de grãos, prejudica a resistência à corrosão; o molibdênio, que melhora a resistência à corrosão na presença dos ácidos sulfúrico e sulfuroso em altas temperaturas, soluções neutras de cloreto e na água do mar; o cobre, que melhora a resistência à corrosão em reagentes como o ácido sulfúrico; o tântalo, o nióbio e o titânio, que evitam o fenômeno de corrosão intergranular dos aços inoxidáveis Cr-Ni; e o silício, que melhora a resistência à oxidação sob temperaturas elevadas, CHIAVERINI (1986).

A seleção de aços inoxidáveis pode ser baseada na resistência à corrosão, características de fabricação, disponibilidade, propriedades mecânicas em faixas de temperatura específicas e custo do produto. No entanto, a resistência à corrosão e as propriedades mecânicas são geralmente os fatores mais importantes na seleção de uma classe para uma determinada aplicação, ASM HANDBOOK (2005).

Esses materiais foram inicialmente concebidos na metade do século XIX, quando iniciou-se a fabricação das ligas de Fe-Cr. Porém, o estudo acerca desses materiais foi abandonado em razão da incapacidade das aciarias da época em conseguir reduzir o teor de carbono e da concepção de que o material seria resistente à corrosão somente se apresentasse resistência ao ácido sulfúrico. Os estudos foram retomados na Inglaterra e na Alemanha em 1912, sendo o estudo inglês realizado em uma liga Fe-Cr (semelhante ao aço AISI 420) e o estudo alemão em uma liga de Fe-Cr-Ni, similar ao aço AISI 302, CARBÓ (2008).

A resistência à corrosão das ligas a base de Fe-Cr está associada ao fenômeno de passivação, ou seja, à formação de uma camada de óxidos mistos (ferro, cromo e outros elementos de liga) e à dissolução desta camada no meio corrosivo. Portanto, a formação ou não desta camada, sua impermeabilidade e sua taxa de dissolução no meio corrosivo controlarão a resistência à corrosão do material no meio em questão (SILVA; MEI, 1988).

A forma mais usual de se classificar os aços inoxidáveis baseia-se na sua microestrutura à temperatura ambiente, resultante do balanço de elementos de liga e dos tratamentos térmicos e mecânicos aplicados:

- Aços inoxidáveis ferríticos
- Aços inoxidáveis martensíticos
- Aços inoxidáveis austeníticos
- Aços inoxidáveis duplex
- Aços inoxidáveis endurecidos por precipitação

Na Figura 3.1, que apresenta o diagrama de fases dos aços inoxidáveis, observa-se que a estrutura do aço é relacionada aos teores de cromo e níquel presentes em sua composição. O ponto 1 corresponde ao aço austenítico X5CrNi18-10 com 18% de cromo, 10% de níquel e 72% de ferro. O ponto 2, por sua vez, refere-se ao aço ao cromo ferrítico X6Cr17 (equivalente ao aço inoxidável ferrítico AISI 430), ressaltando-se que, geralmente, essa classe possui teor de cromo entre 12,5 a 18% e um teor de C abaixo de 0,1%. Por derradeiro, o ponto 3 corresponde ao aço martensítico X39Cr13, de forma que esta classe comumente possui teor de cromo entre 12 a 18% e concentração de carbono variando de 0,1 a 1,2%, KLOCKE (2011). A elevação do teor de níquel nos aços inoxidáveis favorece o surgimento da fase austenítica. Ressalta-se que esta classe de aços inoxidáveis apresenta as concentrações mais altas deste elemento. Os aços inoxidáveis ferríticos possuem baixa concentração de níquel, entretanto, apresentam a maior concentração de cromo entre os aços inoxidáveis, a qual pode chegar a 30%. Os aços inoxidáveis martensíticos possuem as concentrações mais elevadas de ferro e apresentam valores moderados de cromo em sua composição.

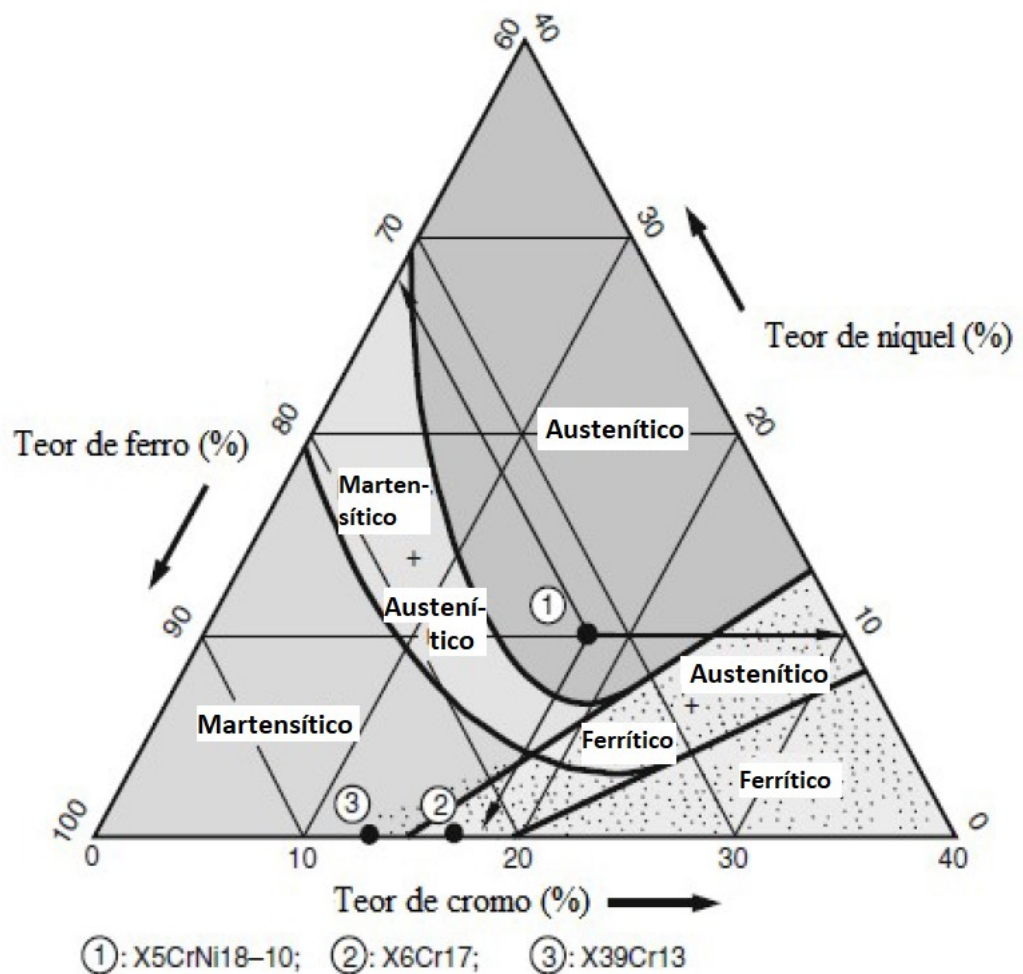


Figura 3.1: Diagrama de fases de aços Cr-Ni com dados de constituintes metalográficos após têmpera. Fonte: adaptado de KLOCKE (2011).

A Figura 3.2 apresenta o consumo aparente (produção industrial doméstica destinada ao mercado interno acrescida das importações) dos aços inoxidáveis no Brasil. Nota-se que, após forte queda no ano de 2014, sua utilização aumentou e os resultados de 2019 (355 mil toneladas) apresentaram estabilidade no consumo dos referidos materiais quando comparados ao ano de 2018. A diferença entre esses dois últimos anos representa queda inferior a 1%, o que não afeta significativamente o mercado.

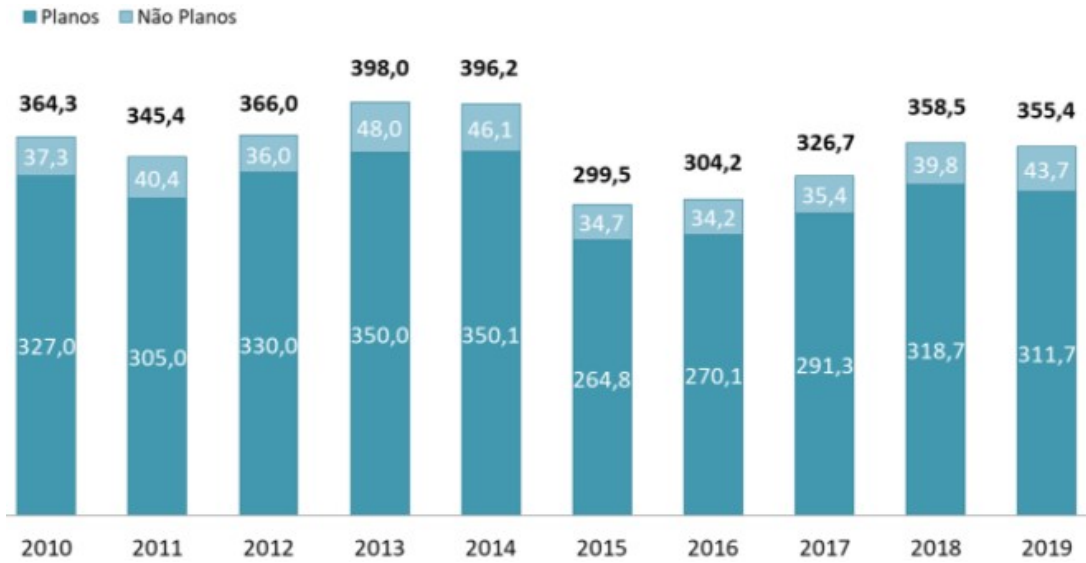


Figura 3.2: Consumo aparente de aço inoxidável planos e não planos no Brasil (tonelada x 1000)  
Fonte: ABINOX (2020).

A Figura 3.3 compara o consumo aparente de aços planos especiais/ligados no mercado nacional, sendo possível observar-se que o aço inoxidável apresenta consumo equivalente a 50% em 2019, o que reforça a sua importância (embora o presente trabalho seja focado em produtos não planos). As chapas e bobinas siliciosas fabricadas apresentam aproximadamente 29%, enquanto os produtos obtidos de outros aços ligados compõem a menor parcela do mercado.

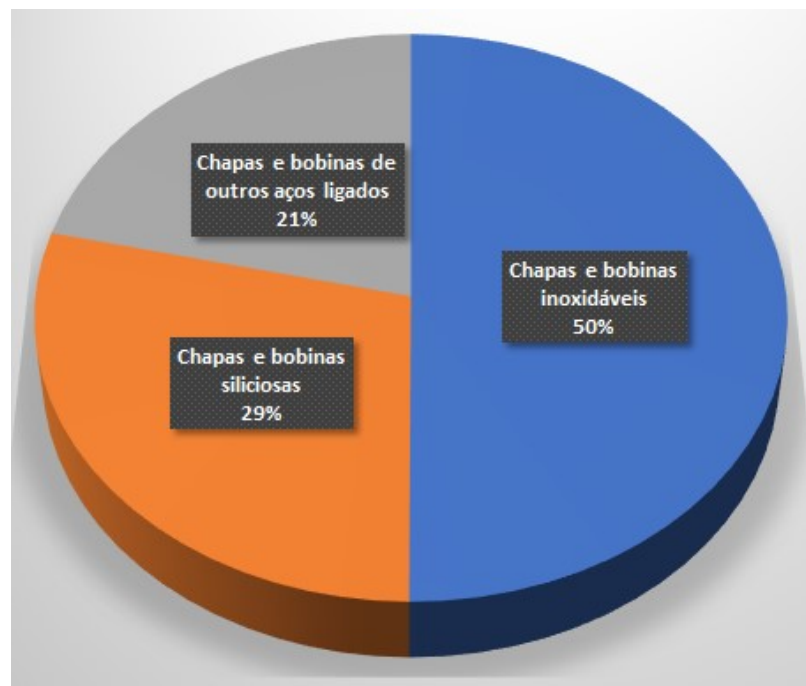


Figura 3.3: Consumo aparente de aços planos especiais/ligados no Brasil 2019.  
Fonte: adaptado de Aço Brasil (2020).

### 3.1 Aços Inoxidáveis Ferríticos

Os aços inoxidáveis que possuem principalmente Cr como elemento de liga têm propriedades semelhantes ao ferro puro e são chamados de ferríticos. Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas Fe-Cr com teor de cromo, em geral, entre 11 e 30% e teor de carbono relativamente baixo, em geral inferior a 0,12%. O tipo mais utilizado deste aço é o AISI 430. Estes aços não são temperáveis e sua granulação só pode ser refinada por uma combinação adequada de trabalho mecânico e recozimento. Se expostos por tempos prolongados a temperaturas em torno de 500 °C, estes aços podem ser fragilizados pela precipitação de intermetálicos.

No estado recozido, sua ductilidade e tenacidade em temperatura ambiente são geralmente satisfatórias e possuem boa resistência à corrosão e à oxidação, inclusive sob alta temperatura. São usados em aplicações envolvendo o ácido nítrico, na fabricação de eletrodomésticos, cubas, utensílios para cozinha e laboratórios, em altas temperaturas, etc. Apresentam uma estrutura predominantemente ferrítica em qualquer temperatura até a sua fusão, MODENESI (2011).

A Figura 3.4 apresenta a microestrutura do aço inoxidável ferrítico AISI 409, onde é possível identificar através da marcação circular azul, pequenos pontos pretos na microestrutura que podem ser principalmente precipitados de Cr, C, Mo.

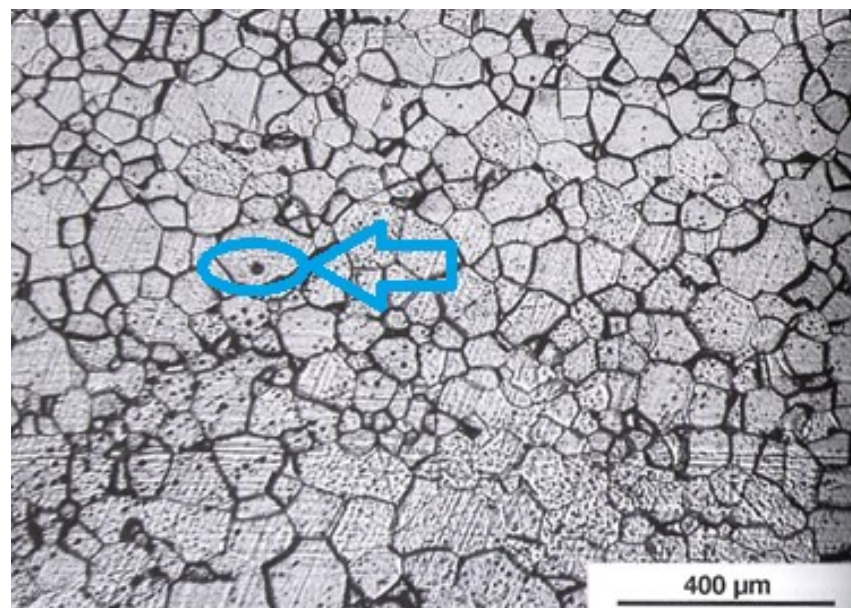


Figura 3.4: Microestrutura do aço inoxidável ferrítico AISI 409 A laminado a frio.  
Fonte: COLPAERT (2008).

Sua grande resistência à ação de ácidos, sobretudo o nítrico e orgânicos, e à ação da água do mar, torna o aço AISI 430 o mais utilizado desta classe. O tratamento térmico aplicado nesse tipo (e em toda a classe desses materiais) é o recozimento para alívio de tensões e obtenção de máxima ductilidade. Para uma maior usinabilidade, a adição de S, P ou Se (dando origem ao tipo 430F) é recomendada, o que permite sua utilização em peças de máquinas operatrizes automáticas, tais como parafusos, porcas e ferragens, CHIAVERINI (1986).

A Tabela 3.1 apresenta os principais tipos de aços inoxidáveis ferríticos, sua composição e diferentes classificações de acordo com as normas internacionais. Nota-se que as principais diferenças residem nas concentrações de P, S e Cr.

Tabela 3.1 Classificação e composição (%) para aços inoxidáveis ferríticos

ABNT/ AISI/ SAE	W.Nr	DIN	UNS	JIS	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti
409	1.4512	X2CrTi12	S40900	SUS409	≤0,08	≤1,00	≤1,00	≤0,045	≤0,045	10,50 - 11,75	-		≤0,75 max
430	1.4016	X6Cr17	S43000	SUS430	≤0,12	≤1,00	≤1,00	≤0,04	≤0,03	16,00 - 18,00	-		
430F	1.4104	X6CrMos17	S43020	SUS430F	≤0,12	≤1,00	≤1,25	0,15 min	0,28 - 0,30	16,00 - 18,00	-	≤0,6 max	

Fonte: adaptado de APERAM (1988).

As propriedades mecânicas de diversos tipos de aços pertencentes a esta classe são apresentadas na Tabela 3.2, na qual é possível verificar que tal classe de aços inoxidáveis apresenta menor dureza e limite de resistência à tração se comparada aos aços inoxidáveis martensíticos, resultando na redução dos esforços de corte durante a usinagem. Geralmente, seu limite de escoamento não apresenta valores distantes do limite de resistência, ou seja, não exige deformação plástica elevada até o rompimento do cavaco. Em alguns tipos, entretanto, como AISI 405 e AISI 430, os valores supracitados são distantes, o que ocasiona uma usinagem problemática, assemelhada à da classe austenítica, devido à dificuldade de produzir o cavaco.

Tabela 3.2 Propriedades mecânicas de aços inoxidáveis ferríticos forjados

Tipo	UNS No.	Limite resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento mínimo em 50 mm (%)	Dureza máxima Brinell
405	S40500	415	170	20,00	179
409	S40900	380	170	20,00	179
430	S43000	450	205	22,00	183
434	S43400	450	240	22,00	-
436	S43600	450	240	22,00	-
439	S43035	415	205	22,00	183
442	S44200	450	275	20,00	217
444	S44400	415	275	22,00	217
446	S44600	450	275	20,00	217
468	S46800	415	205	22,00	-
XM-27	S44627	450	275	22,00	187
25-4-4	S44635	620	515	20,00	269
29-4	S44700	550	415	20,00	223
29-4 C	S44735	550	415	18,00	255
29-4-2	S44800	550	415	20,00	223

Fonte: adaptado de LIPPOLD, (2005).

As principais limitações desta classe estão na baixa resistência ao impacto e em sua soldabilidade. A formação parcial da martensita (mesmo com o baixo teor de C), a precipitação de carbonitretos de Cr e o crescimento excessivo do tamanho do grão nas regiões soldadas são as principais causas que acarretam o mau desempenho deste material na soldagem, CARBÓ (2008).

Outras ligas pertencentes a essa classificação são as do tipo AISI 405 e AISI 409, que apresentam os menores teores de cromo entre os ferríticos. Em contrapartida, o tipo AISI 446 é o que possui a concentração mais elevada de cromo e maior resistência à corrosão e à oxidação em altas temperaturas.

### 3.2 Aços Inoxidáveis Martensíticos

Aços inoxidáveis martensíticos são essencialmente ligas Fe-C-Cr contendo cromo entre 11,5% e 18%, eventualmente com pequenas quantidades de níquel em alguns tipos. Eles tornam-se martensíticos e endurecem por têmpera, sendo que, entre suas características mais importantes se destaca a boa resistência à corrosão quando expostos ao tempo, ação da água e de certas substâncias químicas. Estes aços são ferromagnéticos e podem ser facilmente trabalhados tanto a quente quanto a frio, sobretudo quando o teor de carbono for baixo, CHIAVERINI (1986).

Devido à sua elevada temperabilidade, estas ligas podem apresentar uma estrutura completamente martensítica mesmo após o resfriamento ao ar calmo. São, portanto, ligas endurecíveis por tratamento térmico, sendo usadas, em geral, no estado temperado e revenido. Sua resistência à corrosão é inferior à dos outros tipos, sendo, contudo, satisfatória para meios mais fracamente corrosivos. São particularmente adequados para aplicações que requerem elevada resistência mecânica, dureza e resistência à abrasão ou erosão em ambiente seco ou úmido como, por exemplo, em componentes de turbinas a gás ou vapor, mancais e em peças de cutelaria, MODENESI (2011). A Figura 3.5 apresenta a microestrutura do aço inoxidável martensítico AISI 410. As regiões mais claras, indicadas pelo círculo azul, tratam-se de austenita retida, enquanto as áreas com formato de agulhas e ripas circuladas na cor vermelha correspondem à estrutura martensítica. Entre essas fases podem ser encontrados precipitados, bainita e ferrita oriundos do revenimento e da têmpera incompleta.

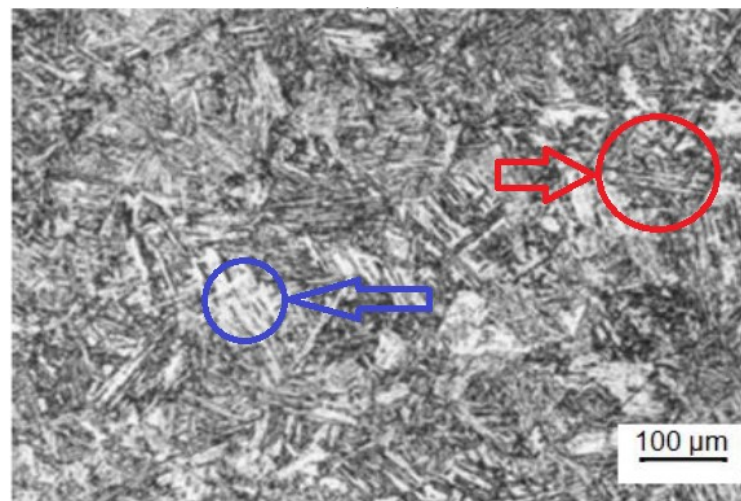


Figura 3.5: Microestrutura do aço inoxidável martensítico AISI 410.  
Fonte: adaptado de SANTOS (2019).

O teor de cromo e carbono é equilibrado para garantir uma estrutura martensítica após o endurecimento. O excesso de carbonetos pode ser desejável para aumentar a resistência ao desgaste ou para manter as arestas de corte afiadas, como no caso de lâminas de facas. Elementos como Ni, Si, W e V podem ser adicionados para modificar a resposta da têmpera após o endurecimento. Pequenas quantidades de Ni podem ser acrescentadas para melhorar a resistência à corrosão em alguns meios e melhorar a tenacidade. Adiciona-se ainda S ou Se a alguns tipos de aços martensíticos para melhorar a usinabilidade, ASM HANDBOOK (2005).

Os principais tipos de aços inoxidáveis martensíticos com sua composição e diferentes classificações de acordo com as normas internacionais são apresentados na Tabela 3.3. O



elevado teor de carbono do AISI 420C em relação aos demais aços inoxidáveis da mesma classe permite seu tratamento térmico, aliando características como dureza, resistência mecânica, desgaste e uma boa proteção contra a corrosão, ROSA (2017).

Tabela 3.3 Classificação e composição (%) para aços inoxidáveis martensíticos

ABNT/ AISI/ SAE	W.Nr	DIN	UNS	JIS	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
410	1.4006	X12Cr13	S41000	SUS410	0,15 Max	1,00	0,04	0,03	0,50	11,50-13,00	0,75	-
416	1.4005	X12CrS13	S41600	SUS416	0,15 Max	1,25	0,06	0,15 min	1,00	12,00-14,00	-	0,60 max
420	1.4021	X20Cr13	S42000	SUS420J1	0,15 Max	1,00	0,04	0,03	1,00	12,00-14,00	-	-
420C	1.4028	X30Cr13	-	SUS420J3	0,30-0,40	1,00	0,04	0,03	1,00	12,00-14,00	-	-

Fonte: adaptado de Villares Metals (2020).

Entre os aços inoxidáveis martensíticos, o mais conhecido é o tipo AISI 420, com pouco mais de 12% de Cr, CARBÓ (2008). Essa liga possui alta resistência mecânica e boa usinabilidade, sendo ideal para a fabricação de peças de alta precisão, tais como instrumentos cirúrgicos e odontológicos, fusos, peças para bombas e válvulas, moldes para injeção de plásticos e indústria de vidro, NASSIF *et al.* (2013).

As propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis martensíticos após tratamento térmico são apresentadas na Tabela 3.4. É possível verificar que o elevado limite de resistência do material está associado à sua dureza, o que exige maior esforço de corte pela presença de partículas duras e abrasivas de carbonetos de cromo. Os valores de limite de escoamento próximos aos de limite de resistência indicam que o material rompe logo após a deformação plástica e, conseqüentemente, o cavaco apresentado na usinagem deste tipo de material possuirá predominantemente a forma de arcos (NOORDIN, VENKATESH, SHARIF; 2007).

Tabela 3.4 Propriedades mecânicas de aços inoxidáveis martensíticos

Tipo AISI	Têmpera			Revenido		Propriedades mecânicas médias			
	Temperatura (K)	Tempo (s)	Meio de Resfriamento	Temperatura (K)	Tempo (s)	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell
403	1198,15 - 1273,15	900 - 1800	óleo	498,15 - 648,15	3600 - 10800	1280	960	15,00	360 - 380
410	1198,15 - 1273,15	900 - 1800	óleo	498,15 - 648,15	3600 - 10800	1280	960	15,00	360 - 380
414	1248,15 - 1323,15	900 - 1800	óleo ou ar	498,15 - 673,15	3600 - 10800	1340	1000	15,00	370 - 400
416	1198,15 - 1273,15	900 - 1800	óleo	498,15 - 648,15	3600 - 10800	1280	960	12,00	360 - 380
431	1248,15 - 1348,15	900 - 1800	ar, óleo ou água	498,15 - 673,15	3600 - 10800	1340	1000	17,00	370 - 400
420	1248,15 - 1323,15	900 - 1800	ar, óleo quente	423,15 - 648,15	3600 - 7200	1720	1550	8,00	470 - 530
440 A	1273,15 - 1348,15	900 - 1800	ar, óleo quente	423,15 - 648,15	3600 - 7200	1850	1790	5,00	500 - 560
440 B	1273,15 - 1348,15	900 - 1800	ar, óleo quente	423,15 - 648,15	3600 - 7200	1920	1850	3,00	520 - 590
440 C	1273,15 - 1348,15	900 - 1800	ar, óleo quente	423,15 - 648,15	3600 - 7200	1960	1890	2,00	540 - 620

Fonte: adaptado de Chiaverini (1988).

### 3.3 Aços Inoxidáveis Austeníticos

A classe de aços inoxidáveis austeníticos inclui, principalmente, ligas Fe-Cr-Ni e formam o grupo mais usado e numeroso de aços inoxidáveis. Apresentam estrutura predominantemente austenítica em temperatura ambiente, não sendo endurecíveis por tratamento térmico. Contêm entre cerca de 16 e 30% de Cr, 6 e 26% de Ni e menos de 0,3% de C, sendo o tipo mais comum o aço AISI 304. Apresentam baixo limite de escoamento à temperatura ambiente, porém limite de resistência e ductilidade elevados. Entre os aços inoxidáveis, são os materiais de melhor soldabilidade e resistência geral à corrosão. Encontram aplicações na indústria química, alimentícia, de refino de petróleo entre outras, MODENESI (2011).

De acordo com Chiaverini (1986), os aços inoxidáveis austeníticos podem ser classificados em dois grupos – Cr-Ni e Cr-Mn-Ni –, sendo que a maior parte dos aços comumente utilizados pertencem à primeira classificação e possuem cerca de 18% de cromo e 8% de níquel. Geralmente, o teor de carbono é mantido baixo (0,08% de concentração máxima), podendo em alguns casos admitir-se teores máximos de 0,25% desde que o cromo seja aumentado para teores entre 22 a 26% e o níquel para teores que variam entre 12 a 22%.

A Tabela 3.5 apresenta os principais tipos, a composição e as diferentes classificações dos aços inoxidáveis austeníticos, conforme as normas internacionais. A introdução do níquel possui relevância destacada, tendo em vista que este elemento possui resistência à corrosão e à oxidação em elevadas temperaturas, além de auxiliar na formação de uma camada protetora de óxido. Por sua vez, o cromo contribui para a formação de um filme passivo, fino e aderente, que protege o material contra a corrosão, CARBÓ (2008). Em geral, o teor de carbono influencia a resistência à oxidação dos aços inoxidáveis na forma de carbonetos livres presentes nos contornos de grãos, o que ocasiona graves avarias na estrutura do aço.

Tabela 3.5 Classificação e composição (%) para aços inoxidáveis austeníticos

ABNT/ AISI/SAE	W.Nr	DIN	UNS	JIS	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
302	1.4301	X5CrNi18-10	S30200	SUS302	0,15 max	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,03	17,00-19,00	8,00-10,00	-
303	1.4305	X8CrNiS18-9	S30300	SUS303	0,15 max	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,15	≤ 0,03	17,00-19,00	8,00-10,00	≤ 0,60
304	1.4301	X5CrNi18-10	S30400	SUS304	0,08 max	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,03	18,00-20,00	8,00-10,50	-
304L	1.4306	X2CrNi19-11	S30403	SUS304L	0,03 max	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,03	18,00-20,00	8,00-12,00	-
310	1.4841	X15CrNiSi25-20	S31000	SUH310	0,25 max	≤ 1,50	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,03	24,00-26,00	19,00-22,00	-
316	1.4401	X5CrNiMo17-12-2	S31600	SUS316	0,06 max	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,03	16,00-18,50	10,5-14,00	2,00-3,00
316L	1.4404	X2CrNiMo17-12-2	S31603	SUS316L	0,03 max	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,03	16,00-18,50	11,00-14,50	2,00-3,00

Fonte: adaptado de Piratini (2020).

As propriedades mecânicas dos principais tipos de aços inoxidáveis austeníticos são apresentados na Tabela 3.6, na qual é possível visualizar a diferença entre o limite de escoamento e o limite de resistência à tração dessa classe de aço inoxidável. O cavaco deste material passa pelos processos de deformação elástica e plástica e apresenta dificuldade para chegar ao rompimento. O alongamento está associado à ductibilidade e apresenta maiores valores se comparados as outras classes, tendendo a aderir à ferramenta e prejudicando a usinagem. Segundo Klocke (2011), em razão da alta deformabilidade desta classe, os aços austeníticos tendem a formar cavacos longos e emaranhados que prejudicam a operação de usinagem e colocam em risco a integridade do operador.

Tabela 3.6 Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos forjados

Tipo AISI	Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
302	515	205	40,00
304	515	205	40,00
304 L	480	170	40,00
308	515	205	40,00
309	515	205	40,00
310	515	205	40,00
316	515	205	40,00
316 L	480	170	40,00
317	515	205	40,00
321	515	205	40,00
330	480	205	30,00
347	515	205	40,00

Fonte: adaptado de LIPPOLD, (2005).

A Figura 3.6 apresenta a microestrutura do aço inoxidável austenítico AISI 304 sem evidência de marcas de processamento, composta por grãos de austenita equiaxial e maclas indicadas pela região contornada em azul. Os pontos pretos circulos de cor vermelha indicam carbonetos que precipitaram no contorno de grão devido à sensitização. Esse fenômeno ocorre quando os materiais dessa classe são submetidos a elevadas temperaturas, de modo que o carbono, aliado ao cromo, precipita-se em forma de carbonetos nos contornos de grãos.

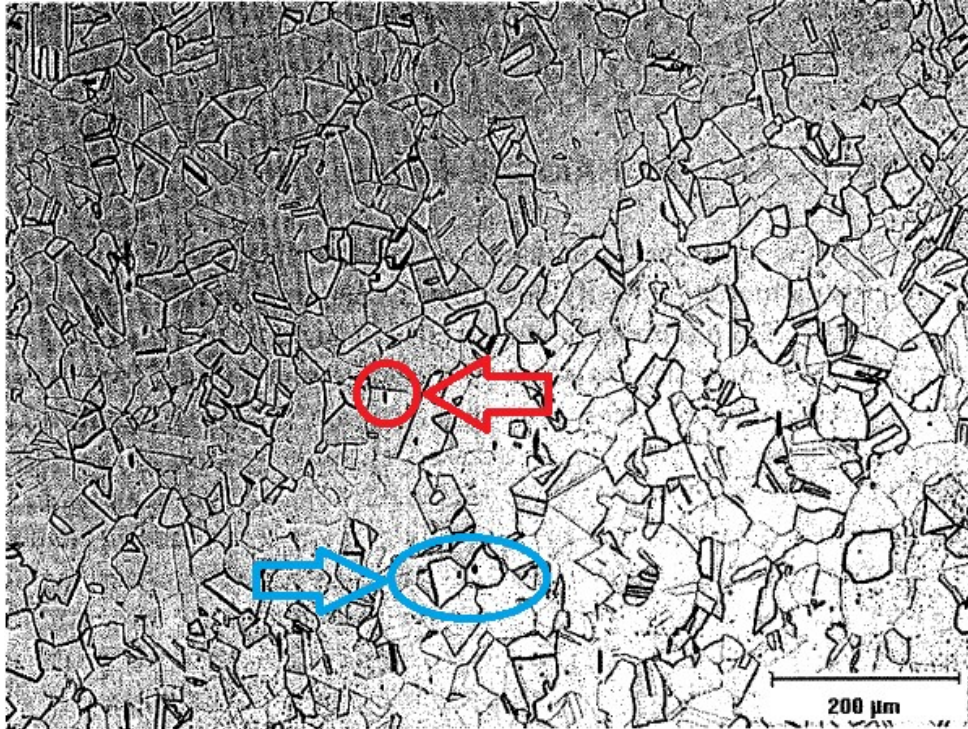


Figura 3.6: Microestrutura do aço inoxidável austenítico AISI 304.  
Fonte: LIPPOLD (2005).

De acordo com Camargo (2008), as principais características dos aços inoxidáveis austeníticos são: não magnéticos; não endurecíveis; e quando encruados, o aumento de dureza é bem superior ao encontrado em outros aços. Este aumento além do usual pode ser atribuído à instabilidade da austenita que, sob o efeito das tensões do encruamento, transforma-se parcial e paulatinamente em ferrita. Esta ferrita supersaturada de carbono, nas mesmas condições que a martensita, contribui para o endurecimento excepcional do aço.

Dentre os tipos de aços inoxidáveis austeníticos estão o AISI 301, 302, 304, 304L, 308, 310, 316, 316L, 321 e 347. Os materiais pertencentes a esta família não endurecem por tratamento térmico de têmpera. Por possuírem alta resistência mecânica e alta resistência à corrosão e oxidação, os aços inoxidáveis austeníticos são amplamente utilizados em equipamentos de cutelaria, pias, tubos, laticínios, alimentos e produtos farmacêuticos, bem como, em molas, porcas, cavilhas e parafusos. Ademais, o aço inoxidável AISI 304 encontra sua aplicação em acessórios para aeronaves, componentes aeroespaciais, como buchas, eixos, válvulas, parafusos especiais, vasos criogênicos, e em componentes para ambientes químicos severos, MAHDAVINEJAD (2011).

### 3.4 Aços Inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis duplex são ligas Fe-Cr-Ni-Mo contendo até 0,30% de nitrogênio em peso. Apresentam microestrutura bifásica composta por uma matriz ferrítica e pela fase austenítica, sendo que a concentração de ferrita representa algo em torno de 50% ( $\pm 5\%$ ) em volume para um material corretamente balanceado. Além de seu custo relativamente baixo, os aços inoxidáveis duplex combinam os melhores atributos de ambos os aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, pois possuem alta resistência mecânica e ductilidade combinadas com boa resistência à corrosão, inclusive sob tensão, GAMARRA (2017).

A Figura 3.7 apresenta a microestrutura típica dos aços inoxidáveis duplex (UNS S32205). As propriedades mecânicas superiores do aço inoxidável duplex se originam de uma matriz 1:1 das fases austenita ( $\gamma$ ) e ferrita ( $\alpha$ ), onde a fase mais clara indicada pela cor azul é a austenita e a fase mais escura indicada na cor vermelha é a ferrita. A fase  $\gamma$  é responsável pela ductilidade e resistência à corrosão uniforme, enquanto a fase  $\alpha$  é responsável pela alta resistência à corrosão.

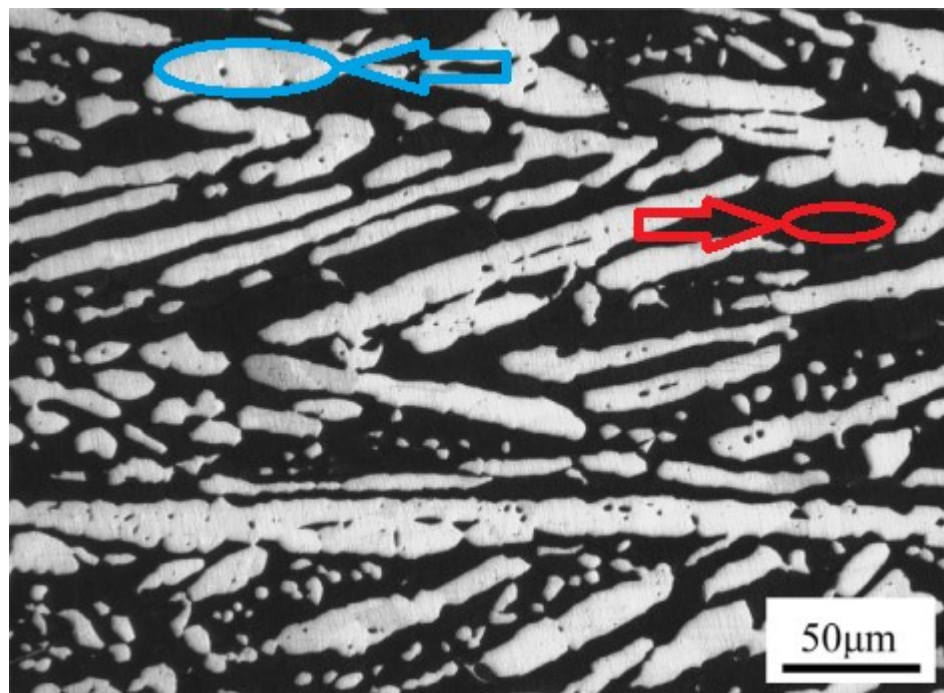


Figura 3.7: Microestrutura do aço inoxidável duplex UNS S32205.  
Fonte: adaptado de NOMANI (2013).

Segundo Senatore *et al.* (2007), as diferentes classes de aços inoxidáveis duplex são usualmente separadas em três grupos com relação à composição química. Aços inoxidáveis duplex de baixa liga que, devido ao menor teor de elementos de liga, são materiais

econômicos, não possuem molibdênio na composição química e podem substituir aços inoxidáveis austeníticos como TP304L/316L. Um tipo utilizado para tal finalidade é o UNS S32304 (SAF 2304). Aços inoxidáveis duplex de média liga, no qual se enquadram os duplex mais utilizados, sendo o mais comum o UNS S31803 (SAF 2205). Apresentam resistência à corrosão intermediária entre os austeníticos comuns TP304L/316L e aços inoxidáveis superausteníticos com 5 e 6% de molibdênio. Por fim, aços inoxidáveis duplex de alta liga, comumente designados por superduplex, como o UNS S32750 (SAF 2507) que apresenta elevada resistência à corrosão (comparável aos superausteníticos) e que possuem entre 5 e 6% de molibdênio.

A Tabela 3.7 apresenta os principais tipos de aços inoxidáveis duplex, sua composição e diferentes classificações de acordo com as normas internacionais. A concentração de níquel nessa classe possui acentuada relevância devido ao aumento da resistência mecânica e à corrosão em temperaturas elevadas, além da estabilização da estrutura austenítica. O cobre, por sua vez, eleva a resistência à corrosão em determinados meios, como em soluções de ácido sulfúrico, e favorece o endurecimento por envelhecimento (PADILHA; GUEDES, 1994).

Tabela 3.7 Classificação e composição (%) para aços inoxidáveis duplex

ABNT/ AISI/SAE	W.Nr	DIN	UNS	JIS	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N
2205	1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	S31803	QS2205	≤0,03	≤1,00	≤2,00	≤0,035	≤0,015	21,00-23,00	4,50-6,50	2,5-3,5	≤0,10
2507	1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	S32750	-	≤0,03	≤0,80	≤1,20	≤0,035	≤0,020	24,00-26,00	6,00-8,00	3,0-5,0	-
2550	1.4507	X2CrNiMoCuN25-6-3	S32550	QSA2505	≤0,03	≤0,70	≤2,00	≤0,035	≤0,015	24,00-26,00	5,50-7,50	2,7-4,0	-
329	1.4460	X3CrNiMoNbN	S32900	SUS 329 J1	≤0,05	≤1,00	≤2,00	≤0,035	≤0,030	25,00-28,00	4,50-6,50	1,3-2,0	0,25-0,50
F 55	1.4501	X2CrNiMoCuWN25-7-4	S32760	-	≤0,03	≤1,00	≤1,00	≤0,030	≤0,010	24,00-26,00	6,00-8,00	3,0-4,0	-

Fonte: adaptado de WEISZ (2020).

As ligas superduplex possuem resistência equivalente ao pite (PRE – *Pitting Resistance Equivalent*) superior a 40. Este índice é normalmente utilizado para comparar a resistência à corrosão por pite de diferentes materiais. Aquele que apresentar maior valor de PRE certamente possuirá maior resistência a este tipo de corrosão, EUTETIC (2020). O PRE é calculado conforme a Equação 1:

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

De acordo com Aguiar (2012), graças à sua elevada resistência mecânica, os aços inoxidáveis superduplex podem ser utilizados em menores espessuras. Sua desvantagem é que não podem ser utilizados em temperaturas acima de 300 °C, sob risco de perderem algumas de suas características mecânicas, sobretudo a tenacidade. São bastante utilizados nas indústrias de gás, petróleo, petroquímica, celulose e papel, principalmente na presença de meios aquosos contendo cloretos.

As propriedades mecânicas dos principais tipos de aços inoxidáveis duplex são apresentadas na Tabela 3.8. Esta classe apresenta alongamento e ductibilidade inferiores aos aços austeníticos, entretanto, devido à sua alta resistência e alto limite de escoamento (aproximadamente duas vezes o limite de escoamento dos aços inoxidáveis austeníticos), alta taxa de endurecimento, baixa condutividade térmica, alta tenacidade à fratura e forte tendência para formação de APC, os modernos aços inoxidáveis duplex são considerados materiais de baixa usinabilidade, KOYEE *et al.* (2014).

Tabela 3.8 Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex

Tipo AISI	UNS No.	Limite resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
-	S32201	620	450	25,00
2304	S32304	600	400	25,00
2205	S31803	620	450	25,00
2205	S32205	620	450	25,00
329	S32900	620	485	15,00
-	S32950	690	485	15,00
2506	S31260	690	485	20,00
-	S32520	770	550	25,00
2550	S32550	760	550	15,00
2507	S32750	795	550	15,00
F55	S32760	750	550	25,00

Fonte: LIPPOLD, (2005).

### 3.5 Aços Inoxidáveis Endurecidos por Precipitação

Os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação são ligas caracterizadas pelo baixo teor de carbono 0,04-0,10%, manganês 0,40-0,75%, silício 0,35-0,50 e cromo 15-17%. Em alguns tipos de aços contidos nessa classificação podem ser encontrados elementos de liga como titânio e alumínio ou nióbio e cobre, sendo que o molibdênio também pode ser encontrado em algumas situações, CHIAVERINI (1986).

Os aços pertencentes a esta classe são endurecíveis por tratamento de envelhecimento e possui similaridades com a classe dos martensíticos, embora o processo de endurecimento seja diferente, ASM HANDBOOK (2005). Os aços inoxidáveis endurecíveis possuem elementos para elevação da dureza por precipitação como cobre, alumínio ou titânio, podendo ser austeníticos ou martensíticos na condição de recozido, de maneira que estes últimos são frequentemente transformáveis em martensíticos através de tratamentos térmicos. Na maioria dos casos, esses aços inoxidáveis atingem alta resistência pelo endurecimento por precipitação da estrutura martensítica (ASM HANDBOOK, 2005; SILVA, 2003).

A Figura 3.8 apresenta a microestrutura típica do aço inoxidável semiaustenítico Cr12Mn5Ni4Mo3Al endurecido por precipitação. Na imagem à esquerda é possível identificar a estrutura austenítica na tonalidade mais clara, enquanto a mais escura indica a estrutura martensítica precipitada do material. A figura à direita apresenta a região contornada em ampliação, na qual pode-se notar, com mais clareza na região mais escura, áreas com formato de ripas e agulhas típicas da estrutura martensítica.

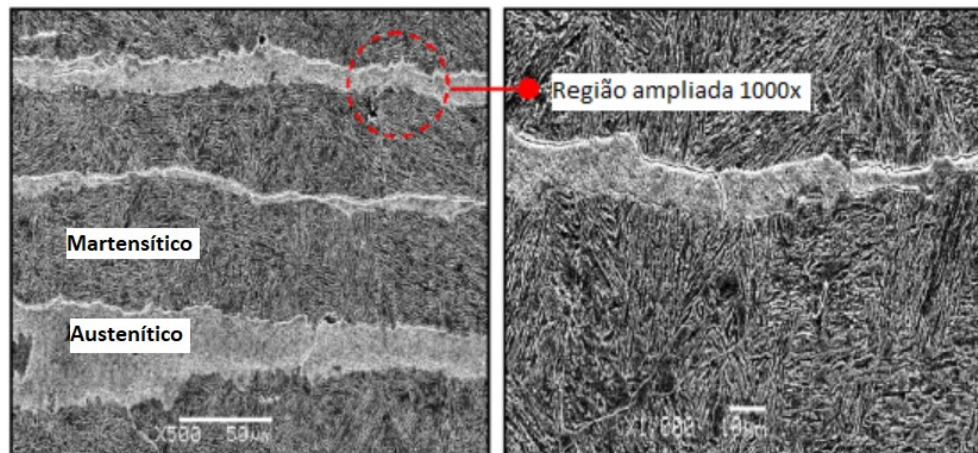


Figura 3.8: Microestrutura típica do aço inoxidável Cr12Mn5Ni4Mo3Al endurecido por precipitação.

Fonte: JIANXIN (2011).

Segundo Casteletti *et al.* (2010), devido à demanda das indústrias aeronáutica e espacial por aços inoxidáveis com resistências mecânica e à corrosão em temperaturas mais elevadas associadas a uma ductilidade apropriada às operações de conformação, foram desenvolvidos os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação, cuja martensita é do tipo substitucional, endurecida posteriormente por precipitados intermetálicos a base de cobre, alumínio ou molibdênio, que endurecem a liga pelas suas influências nos movimentos das discordâncias. Aplicações em lâminas para turbinas, ferramentas, rolamentos e equipamentos



médicos e odontológicos são realizadas considerando sua alta resistência ao desgaste e à oxidação (FRANDSEN, CHRISTIANSEN, SOMERS, 2006).

Conforme o estudo realizado por Fortulan *et al.* (2020), o aço inoxidável endurecido por precipitação do tipo 17-4PH apresentou uma menor aderência bacteriana de biofilme, indicando a potencialidade antibactericida deste material se comparado ao material de controle (aço austenítico AISI 304). Pela sua aplicação em diversos segmentos, inúmeros tipos de aços inoxidáveis endurecidos por precipitação foram desenvolvidos. A Tabela 3.9 apresenta sua composição e diferentes classificações de acordo com as normas internacionais.

Tabela 3.9 Classificação e composição (%) para aços inoxidáveis endurecidos por precipitação

AISI	UNS	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
XM-13	S13800	0,05	0,10	0,02	0,01	0,01	12,25-13,25	7,50-8,50
XM-12	S15500	0,07	1,00	1,00	0,04	0,03	14,00-15,50	3,50-5,50
630	S17400	0,07	1,00	1,00	0,04	0,03	15,50-17,50	3,00-5,00
631	S17700	0,09	1,00	1,00	0,04	0,04	16,00-18,00	6,50-7,75
XM-25	S45000	0,05	1,00	1,00	0,03	0,03	14,00-16,00	5,00-7,00
-	S46500	0,02	0,25	0,35	0,02	0,01	11,00-12,50	10,75-11,25

Fonte: adaptado de BERALDO (2013).

Os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação são considerados de difícil usinabilidade no estado recozido ou depois de tratado por solubilização. Nas suas condições de envelhecimento completo eles são ainda mais duros e resistentes à abrasão e por isso é mais econômico usiná-los no estado solubilizado, deixando para realizar o envelhecimento completo após a usinagem, ZANUTO (2012).

As propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis endurecidos por precipitação são apresentadas na Tabela 3.10. Seus limites de resistência e de escoamento são elevados como na classe martensítica, exigindo maior esforço de corte na usinagem. A proximidade desses valores indica que o material rompe logo após a deformação plástica. A temperatura e o tempo de tratamento têm influência nas propriedades mecânicas, fazendo que um mesmo material apresente variações para estes resultados.

Tabela 3.10 Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis endurecidos por precipitação

Tipo AISI	Tratamento de precipitação Temperatura (K) / Tempo (s)	Limite resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
XM-13	783,15 / 14400	1515	1410	10,00
XM-13	811,15 / 14400	1380	1310	10,00
XM-12	755,15 / 360	1310	1170	8,00
630	769,15 / 14400	1170	1070	8,00
630	825,15 / 14400	1070	1000	8,00
630	852,15 / 14400	1000	860	9,00
630	866,15 / 14400	965	790	10,00
630	894,15 / 14400	930	725	10,00
635	783,15 / 180	1310	1170	8,00
635	813,15 / 180	1240	1105	8,00
635	838,15 / 180	1170	1035	8,00
XM-25	755,15 / 14400	1240	1170	5,00
XM-25	811,15 / 14400	1105	1035	7,00
XM-25	894,15 / 14400	860	515	10,00
XM-16	783,15 / 14400	1525	1410	3,00

Fonte: adaptado de LIPPOLD, (2005).

A comparação de algumas propriedades mecânicas (limite de resistência, limite de escoamento e alongamento) entre as diferentes classes de aços inoxidáveis é apresentada nas Figuras 3.9 a 3.11. Observa-se na Figura 3.9 que as maiores variações de limite de resistência são apresentadas para os aços inoxidáveis martensíticos e endurecidos por precipitação. O mesmo se aplica ao limite de escoamento (Figura 3.10). Em relação ao alongamento (Figura 3.11), pode-se observar que a maior variação está nos aços inoxidáveis martensíticos.

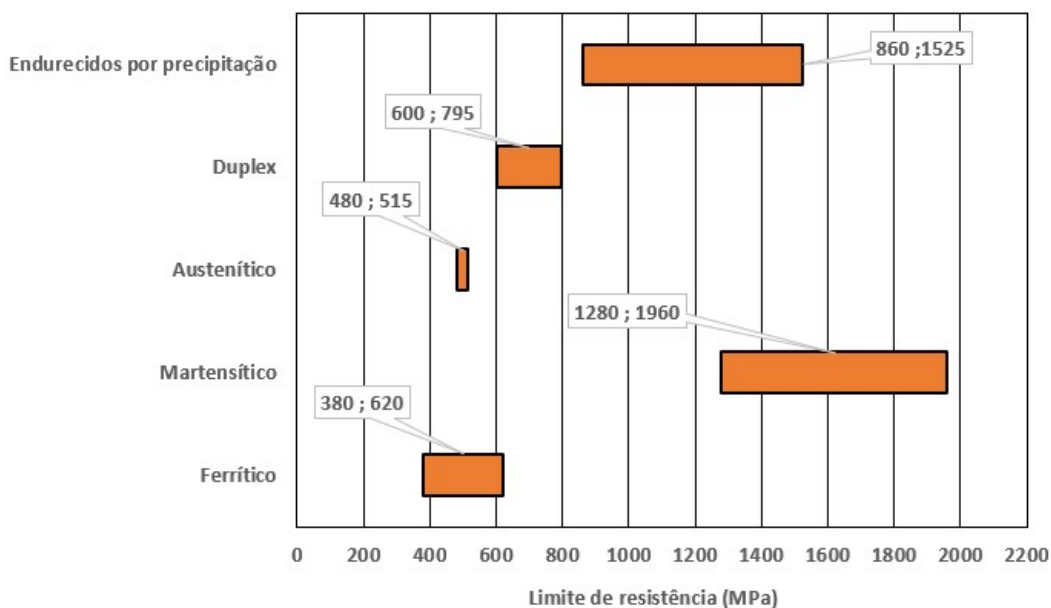


Figura 3.9: Variação do limite de resistência entre as classes inoxidáveis.

Fonte: autor (2020).

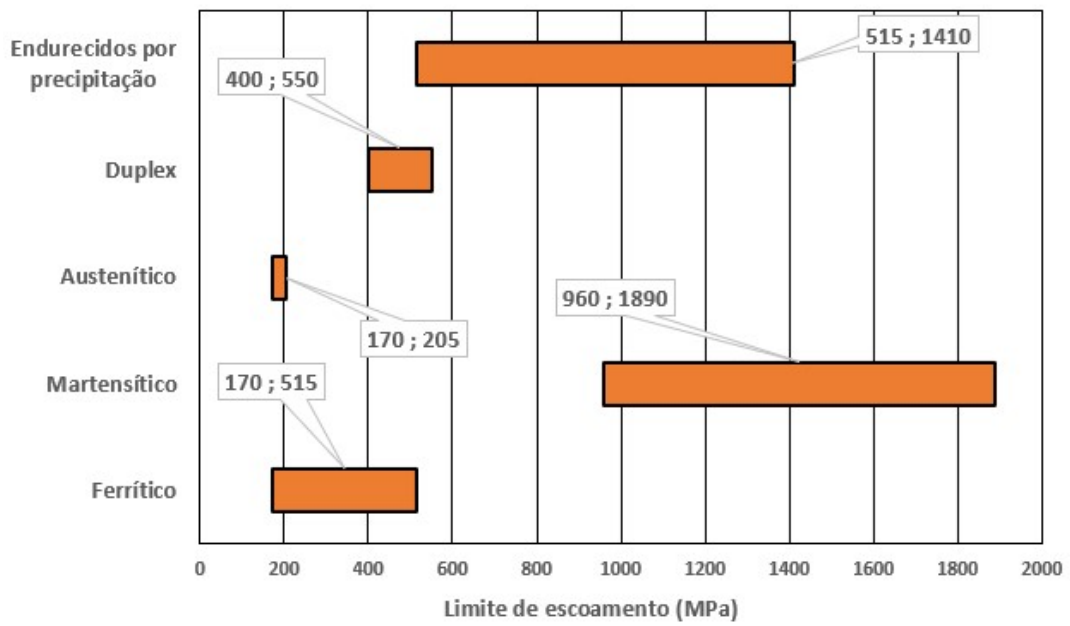


Figura 3.10: Variação do limite de escoamento entre as classes inoxidáveis.  
Fonte: autor (2020).

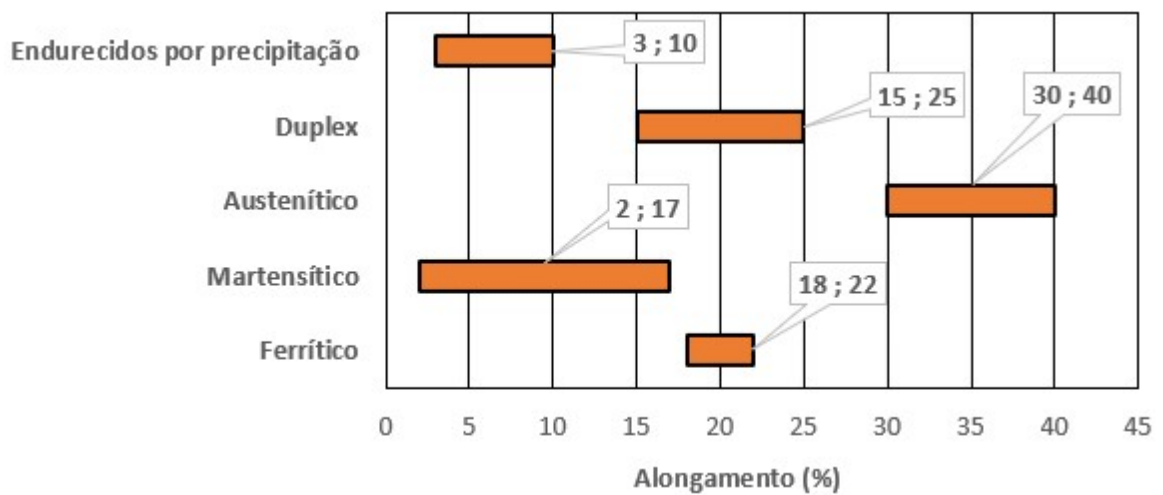


Figura 3.11: Variação percentual do alongamento entre as classes inoxidáveis.  
Fonte: autor (2020).

#### 4 FERRAMENTAS DE CORTE PARA O TORNEAMENTO DE AÇOS INOXIDÁVEIS

Para a seleção correta do material de ferramenta, uma série de fatores devem ser ponderados, dentre os quais podem ser mencionados a operação de usinagem, condição da máquina operatriz, forma e dimensões da própria ferramenta e o material a ser usinado, DINIZ (2013).

Dentre os materiais para ferramenta de corte utilizados no torneamento dos aços inoxidáveis, destaca-se o metal duro, que possui ampla utilização na usinagem desses materiais tendo em vista a excelente combinação de dureza a temperatura ambiente e a quente, resistência ao desgaste e tenacidade. Essas características são alcançadas em decorrência da obtenção do metal duro por meio da combinação de diferentes materiais, o que permite diversas composições e tamanhos de grãos de carbonetos, resultando em diferentes propriedades e inúmeras aplicações, CHRISTOFFEL (2001).

O metal duro é obtido por meio da metalurgia do pó e é constituído de partículas duras de carbonetos de metais refratários finamente distribuídas, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto), formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão. As partículas duras são geralmente carbonetos de tungstênio, usualmente em combinação com outros carbonetos, como de titânio, tântalo e nióbio, DINIZ *et al.* (2013). De acordo com Edwards (2008), a quantidade de ligante está relacionada com as propriedades do metal duro, ou seja, uma maior concentração de ligante acarretará em uma redução da dureza do metal duro e uma maior resistência à fratura.

A Figura 4.1 apresenta as propriedades do metal duro que influenciam sua resistência ao desgaste, impacto, compressão e dureza. A coluna da esquerda exhibe os efeitos do cobalto nas características da ferramenta, verificando-se que o aumento da concentração do elemento causa redução da dureza e da resistência ao desgaste e aumento da resistência ao impacto. A coluna intermediária revela que o aumento do tamanho de grão de WC causa redução da resistência ao desgaste, bem como resistência da compressão e da dureza, de modo que, a partir de uma certa concentração, o aumento do tamanho de grão auxilia a resistência ao impacto. Por último, conforme se observa na coluna da direita, o aumento da concentração de carbonetos TiC e TaC eleva a resistência ao desgaste, porém reduz a resistência à compressão e a ductilidade da ferramenta.

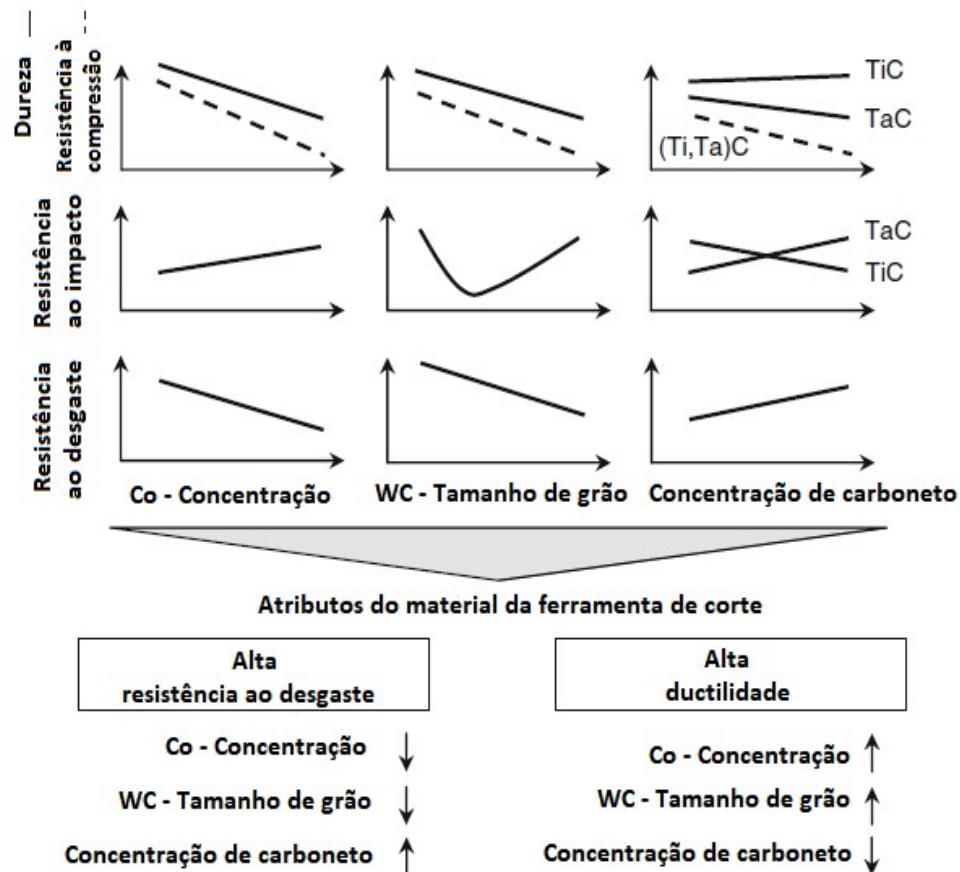


Figura 4.1: Fatores que influenciam a resistência ao desgaste do metal duro.  
Fonte: KLOCKE (2017).

Ao reduzir o tamanho de grão para valores abaixo de 1  $\mu\text{m}$ , a dureza e a resistência ao impacto podem ser elevadas com a mesma concentração de elemento ligante, KLOCKE (2008). Segundo Machado *et al.* (2015), o cobalto é utilizado como aglutinante nas ferramentas de metal duro, o que se deve ao alto nível de solubidade do WC naquele elemento. Assim, uma maior concentração de cobalto resulta em uma menor dureza, maior resistência ao impacto e menor rigidez. Além do WC-Co utilizados na composição das ferramentas da classe M, são adicionados TiC, TaC e/ou NbC.







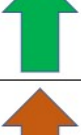
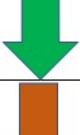
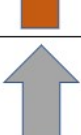
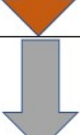

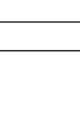
Em geral, o metal duro que possui boa tenacidade apresenta baixa dureza e resistência à compressão. Isto ocorre, pois, a tendência é que a tenacidade aumente frente a elevação do teor de cobalto e do aumento do tamanho do grão, enquanto a dureza e a resistência à compressão diminuem.

Segundo Machado *et al.* (2015), o metal duro foi originalmente desenvolvido na Alemanha continha somente WC+Co e apresentava eficiência satisfatória na usinagem de ferros fundidos, porém com baixa resistência ao desgaste na superfície de saída durante a usinagem de aços. Para superar essa deficiência adicionou-se TiC, TaC e/ou NbC, o que

resultou em uma significativa redução no problema de craterização durante a usinagem de aços.

Inicialmente a norma ISO 513 classificava os diversos tipos de metal duro em três classes, designadas pelas letras P, M e K, porém essa classificação foi expandida para seis classes em 2004, incorporando outros materiais para ferramenta de corte (Tabela 4.1). Nesta tabela, as letras representam a classe do metal duro e os algarismos representam a tenacidade e a resistência ao desgaste, isto é, quanto maior o algarismo, menor a resistência ao desgaste e maior a tenacidade.

Tabela 4.1 Aplicação e classificação dos metais duros segundo a norma ISO 513 (2004)

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

Fonte: adaptado de Machado *et al.* (2015).

Com base nesta classificação, a classe M é destinada à usinagem de aços inoxidáveis, podendo também ser utilizada na usinagem de aço fundido e ao manganês, STEMMER (1993). De acordo com Machado *et al.* (2015), a classe M é uma classe intermediária de WC + Co com adições de TiC, TaC e/ou NbC em menores quantidades se comparada à classe P.

A composição química e algumas características correspondentes a classe M são apresentadas na Tabela 4.2. Observa-se que a designação M40 apresenta maior concentração

de Co, o que resulta em uma menor resistência ao desgaste e uma maior resistência à ruptura transversal; o oposto ocorre com a ferramenta de designação M10, que apresenta menor concentração de Co. Ressalta-se que com o aumento da concentração de TiC e TaC, a resistência ao desgaste da ferramenta é ampliada, o que se deve à dureza a quente desses constituintes (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Tabela 4.2 Composição química e características físicas do metal duro classe M

Designação ISO	% WC	% TiC + TaC	% Co	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Dureza (HV)	Resistência à ruptura transv. (kgf/mm <sup>2</sup> )
M10	84	10	6	13,1	1650	140
M20	82	10	8	13,4	1550	160
M30	81	10	9	14,4	1450	180
M40	78	7	11	13,5	1300	200

Fonte: adaptado de FERRARESI (1970).

#### 4.1 Ferramentas de Metal Duro Revestido

O revestimento das ferramentas de metal duro possui grande importância, pois é uma forma eficaz de garantir desempenho superior à ferramenta sem revestimento e prolongar a vida da ferramenta de corte (MACHADO *et al*, 2015; ENDRINO *et al*, 2006). A camada de cobertura em ferramentas tem como objetivo prolongar a vida útil da ferramenta, diminuir o desgaste por aumentar a dureza superficial e reduzir o aquecimento com o cavaco.

Neste processo, aplica-se sobre o substrato de metal duro uma ou mais camadas de materiais que apresentem desempenho superior ao metal duro em relação a alguma propriedade. Portanto, pode-se reunir em uma mesma ferramenta de corte características que de outra maneira seriam inconciliáveis, como elevada dureza, tenacidade e inércia química, XAVIER (2003). O aumento da produtividade também é uma característica relevante dos insertos revestidos. Segundo Diniz *et al*. (2013), a aplicação de coberturas nas ferramentas de usinagem é traduzida em um maior volume de cavaco removido devido ao aumento da velocidade de corte durante a operação.

A cobertura realizada nas ferramentas de corte pode ser obtida por meio dos processos de Deposição Física de Vapor (PVD - *Physical Vapour Deposition*) e Deposição Química de Vapor (CVD - *Chemical Vapour Deposition*), sendo que cada processo possui algumas variantes.

No processo PVD a deposição ocorre por meio de vapores gerados no interior de fornos a baixa pressão. A baixa pressão permite que, por meio de aquecimento, os materiais

sólidos que participarão da formação dos revestimentos passem para o estado gasoso sem passar pelo estado líquido. Os vapores que formam o material do revestimento são obtidos a partir de gases reativos ou de materiais sólidos sublimados no interior do forno por meio de descarga elétrica (SANTOS; SALES, 2007). A principal característica do processo PVD é a faixa de temperatura em torno de 500 °C, que traz benefícios como a possibilidade de revestir substratos de aço rápido, a obtenção de revestimentos com granulometria mais fina, a possibilidade de revestir cantos vivos e a prevenção da formação da fase “eta”. Essa fase consiste em uma camada externa preta de revestimento que se torna áspera e mais espessa, podendo ser gerados carbeto muito quebradiços que são precipitados ( $W_6Co_6C$ ,  $W_3Co_3C$ ), resultando no surgimento de microlascas e podendo ainda acarretar o lascamento da ferramenta, COSTA (2016).

A técnica de revestimento PVD pode ser dividida em três grupos: PVD por evaporação; PVD por pulverização catódica (*sputtering*) e evaporação a vácuo (assistida por plasma ou por galvanização iônica - *ion plating*). O método mais comum é a evaporação com arco elétrico catódico, no qual um arco elétrico com alta densidade de corrente se move sobre a superfície de um eletrodo sólido (cátodo) causando aquecimento local e vaporização, MATTOX (1998).

De acordo com Machado *et al.* (2015), o fato de a temperatura para a realização do processo PVD ser de aproximadamente 500 °C não afeta a tenacidade do substrato, permite a realização de revestimentos em aresta de corte com quina viva e podem ser efetuados com espessuras de até 4 µm. Segundo Oerlikon Balzer (2016), neste processo, podem ser aplicados diferentes revestimentos entre os quais ressaltam-se o AlCrN, DLC, NCr, TiN, TiCN e TiAl (este último ilustrado na Figura 4.2) e suas principais aplicações são em ferramentas para fresamento, roscamento e furação.



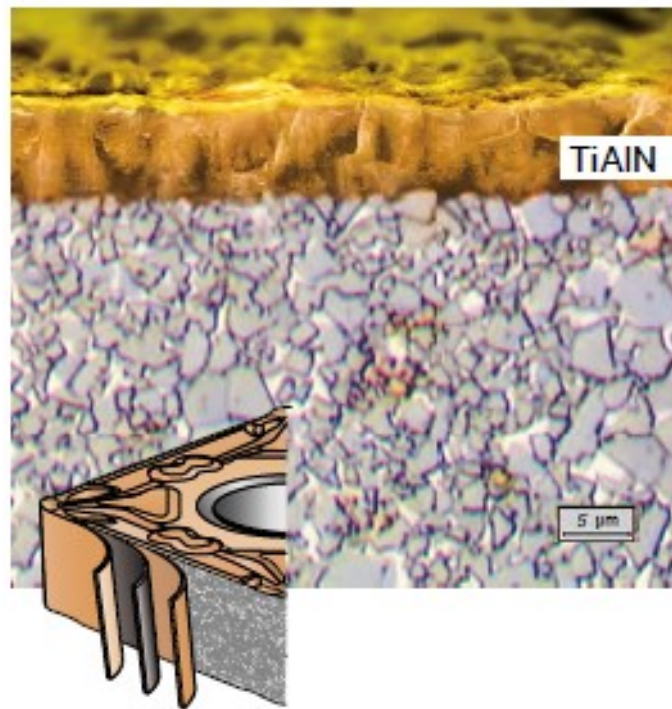


Figura 4.2: Cobertura PVD em inserto de metal duro.  
Fonte: COROMANT (2017).

O processo CVD é caracterizado pela formação do revestimento por meio de uma reação química do elemento a ser depositado no substrato. O material do revestimento pode vir de um gás, de uma mistura de gases ou pelo contato com sólidos. Para revestimentos em metal duro o CVD apresenta três variantes mais comuns: o CVD a altas temperaturas (HTCVD - *High Temperature Chemical Vapor Deposition*); o CVD a médias temperaturas (MTCVD - *Medium Temperature Chemical Vapor Deposition*); e a deposição CVD assistida por plasma (PACVD - *Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition*), COSTA (2016).

Segundo Mattox (1998), o processo CVD pode ser definido como a deposição de átomos ou moléculas pela redução ou decomposição a alta temperatura de uma espécie química precursora de vapor que contém o material a ser depositado. A redução é normalmente realizada por hidrogênio em uma temperatura elevada. Já a decomposição é realizada por ativação térmica. O material depositado pode reagir com outras espécies gasosas no sistema para formar compostos, como por exemplo, óxidos e nitretos.

Uma ampla gama de sistemas de revestimento de material duro pode ser sintetizada com métodos CVD. Os materiais de revestimento mais comuns são baseados em materiais duros com ligações principalmente metálicas, como TiC, Ti (C, N), TiN, ligações heteropolares (iônicas) como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, mas também ligações covalentes, como diamante, KLOCKE (2011).

No processo CVD, o revestimento é realizado em temperaturas mais elevadas se comparadas ao processo PVD. Esta elevação de temperatura reduz a tenacidade do substrato, originando problemas durante o corte interrompido. Assim como o processo PVD, o CVD permite o revestimento multicamadas, conforme é apresentado na Figura 4.3, e pode conter até doze camadas de diferentes materiais, SANTOS E SALLES (2005).

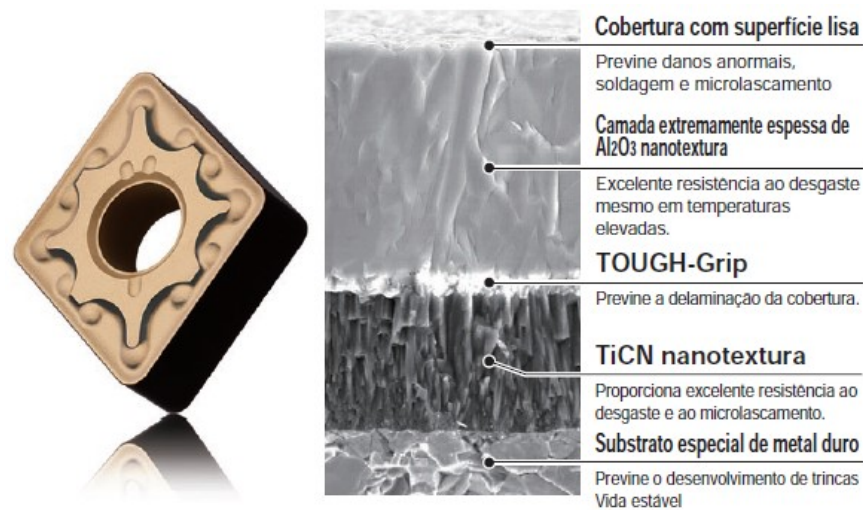


Figura 4.3: Cobertura CVD em inserto de metal duro.  
Fonte: MITSUBISHI (2020).

Os principais tipos de revestimento e suas principais propriedades são apresentados abaixo:

- a) Nitreto de titânio (TiN): apresenta boa relação custo-benefício como principal aspecto positivo e é indicado em casos em que peças de diferentes materiais são usinadas pela mesma ferramenta, SANTOS (2005). Este revestimento possui como características boa estabilidade química (menor tendência à difusão) e apresenta baixa capacidade de aderência no metal de base, STEMMER (1993).
- b) Carboneto de titânio (TiC): possui menor coeficiente de atrito que os metais duros tradicionais WC/TiC/Co e têm como características alta dureza e baixa condutividade térmica, favorecendo temperaturas mais baixas na aresta de corte e, conseqüentemente, reduzindo a difusão entre os materiais de ferramenta e peça. (STEMMER, 1993; KLOCKE 2005).
- c) Carbonitreto de titânio (TiCN): é o revestimento mais requisitado como primeira camada, justamente por garantir maior aderência do revestimento ao substrato e de

novos revestimentos sobre ele. Para induzir uma tensão residual de compressão, é comum aplicar uma operação de jateamento para remoção da última camada revestida na superfície de saída das ferramentas. Isso garante maior resistência à propagação de trincas, MACHADO *et al.* (2015).

- d) Óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ): tem como principais características elevadas inércia química e dureza e, conseqüentemente, resistência ao desgaste. Outra importante característica é a redução de sua condutividade térmica com o gradiente de temperatura, o que garante uma barreira térmica para a superfície da ferramenta, MACHADO *et al.* (2015).
- e) Nitreto de titânio alumínio ( $\text{TiAlN}$ ): foi desenvolvido como uma alternativa ao  $\text{TiN}$  devido à sua maior resistência à oxidação, maior dureza e maior resistência à corrosão. Além disso, a baixa condutividade térmica do  $\text{TiAlN}$  permite velocidades de corte mais altas, DENG *et al.* (2012). Este revestimento tem se mostrado excelente para a usinagem de ferros fundidos, tanto em insertos intercambiáveis como em brocas de metal duro. Tal revestimento também pode ser aplicado à usinagem das superligas de níquel.

A Tabela 4.3 apresenta as principais características e propriedades dos revestimentos produzidos por meio dos processos PVD e CVD. O revestimento em  $\text{TiAlN}$  apresenta bons resultados para todas as propriedades, elevada dureza e resistência à corrosão, assim como boa resistência à abrasão.

Tabela 4.3 Principais materiais e propriedades dos recobrimentos depositados por PVD e CVD.








	TiN	TiCN	TiC	TiAlN	CrN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Processo de produção</b>	PVD/CVD	PVD/CVD	PVD	PVD	PVD	CVD/PVD
<b>Espessura do recobrimento (µm)</b>	1 a 5	1 a 5	1 a 5	1 a 5	1 a 10	1 a 5
<b>Microdureza (HV 0,05)</b>	2300	3000	3100	3000	1900	2100 HV 0.1
<b>Temperatura de oxidação (°C)</b>	> 450	> 350	> 350	> 700	> 600	-
<b>Barreira de efeito térmico</b>	+++	++	+	++++	+	+++++
<b>Resistência a abrasão</b>	++	+++	+++	+++	++	++
<b>Resistência a desgaste por adesão (em relação ao aço)</b>	++	++	+	++	++	+++
<b>Resistência ao desgaste por difusão (em relação ao aço)</b>	++	+	+	+++	++	+++
<b>Proteção do substrato à corrosão</b>	+	+	+	+	++	+

Fonte: adaptado de Klocke (2011).

## 4.2 Geometria de Ferramentas de Metal Duro Revestido

De acordo com Coromant (2017), o formato da ferramenta empregada na operação de torneamento deve ser escolhido em função de diversos aspectos, a começar pela acessibilidade do ângulo de posição da ferramenta. Além disso, o maior ângulo de ponta possível deve ser aplicado para propiciar maior resistência e confiabilidade ao inserto e possibilitar o emprego de avanços mais elevados e suportar forças de corte mais altas. Entretanto, essa escolha pode resultar no aumento das vibrações durante a operação.

A Figura 4.4 apresenta diferentes geometrias de insertos segundo a operação de torneamento a ser executada. Os insertos com ângulos de ponta mais elevados, como o redondo e o quadrado, são recomendados para o torneamento intermitente, situação que exige maior robustez da aresta de corte, e na usinagem de materiais duros. Para o torneamento de acabamento, ou situações com menor acessibilidade ou com tendência à vibração, ferramentas com ângulo de ponta menor, como a rômbica (35° e 55°), são recomendadas.

Formato da pastilha							
Robustez	++	++	++	+	+		
Desbaste leve/semi-acabamento		+	++	+	++	++	
Acabamento			+	+	++	++	++
Torneamento longitudinal			++	+	+	++	+
Perfilamento	+				+	++	++
Faceamento	+	++	++	+	+	+	
Versatilidade operacional	+		++	+	+	++	+
Potência limitada da máquina			+	+	++	++	++
Tendências à vibração				+	++	++	++
Materiais duros	++	++					
Usinagem intermitente	++	++	+	+	+		

++ = Mais adequado

+ = Adequado

Figura 4.4: Operações de usinagem segundo a geometria do inserto.  
Fonte: adaptado de Coromant (2017).

A geometria das ferramentas utilizadas em operações de usinagem tem influência decisiva no desempenho da ferramenta de corte. Tal relação foi comprovada por estudos realizados, principalmente, em torneamento, fresamento e furação acerca da geometria das ferramentas e insertos utilizados nestes processos com o objetivo de se atingir um melhor desempenho (NASCIMENTO; ABRÃO, 2000).

Para atender às exigências de aplicação, pode-se variar os ângulos das ferramentas de corte a fim de adequar a aresta de corte ao material da peça e aos parâmetros de usinagem. Cada um dos ângulos possuem uma função a desempenhar, sendo assim, mudanças no ângulo de saída, no ângulo de folga, no ângulo de posição, no ângulo de inclinação dentre outros, devem ser cuidadosamente determinados, MACHADO *et al.* (2015).

De acordo com Rodrigues (2005), pequenas alterações dimensionais e angulares causam diferentes respostas quanto ao comportamento do material da peça. Sendo assim, diversos elementos constituintes da geometria da ferramenta de corte podem ser modificados como: raio de ponta; ângulo de folga; ângulo de inclinação; ângulo de posição; quebra-cavaco; chanfro da aresta de corte, entre outros. De acordo com Machado *et al.* (2008), as principais características dos insertos, seus ângulos e funções são:

- a) Ângulo de posição ( $\chi_r$ ): geralmente varia entre  $45^\circ$  a  $95^\circ$  e possui as funções de distribuir as tensões de corte e influenciar na direção de saída do cavaco;
- b) Ângulo de folga ( $\alpha_o$ ): normalmente varia entre  $5^\circ$  a  $20^\circ$  e sua principal função é evitar o atrito entre peça e ferramenta;
- c) Ângulo de saída ( $\gamma_o$ ): em geral varia entre  $-8^\circ$  a  $20^\circ$  e influencia decisivamente na força e potência necessária de corte, uma vez que quanto maior o ângulo de saída menor será o trabalho de dobramento e encruamento do cavaco;
- d) Ângulo de inclinação ( $\lambda_s$ ): normalmente varia entre  $-11^\circ$  a  $11^\circ$  e possui as funções de controlar a saída do cavaco, proteger a aresta de corte contra impactos e quando positivo atenuar vibrações;
- e) Ângulo de cunha ( $\beta_o$ ): localizado entre as superfícies de folga e de saída;
- f) Raio de ponta ( $r_e$ ): determina com o ângulo de ponta a resistência mecânica da ponta da ferramenta de corte, tendo influência sobre a rugosidade da peça. Geralmente varia entre 0,2 a 2,4 mm;
- g) Quebra-cavacos: alteração na geometria da ferramenta cuja principal finalidade é provocar a fratura periódica do cavaco.

A Figura 4.5 apresenta as diferentes micro e macrogeometrias de uma ferramenta dedicada ao torneamento de aços inoxidáveis, adaptadas para as diferentes solicitações durante a operação de torneamento. Segundo Coromant (2017), a geometria ideal para a operação de acabamento com o inserto da classe M deve assegurar um ângulo de saída equivalente a  $15^\circ$ . Para o torneamento intermediário, onde se necessita de uma maior robustez em relação à ferramenta descrita anteriormente, a aresta de corte deve possuir reforço de 0,29 mm com  $12^\circ$  e o ângulo de saída para essa operação deve ser  $22^\circ$ . Para o torneamento de desbaste, a ferramenta deve possuir aresta de corte com reforço modificado para 0,32 mm e  $8^\circ$ , porém o ângulo de saída permanece inalterado em relação à ferramenta para torneamento intermediário.

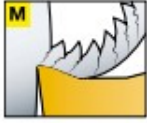

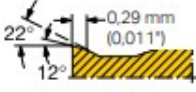
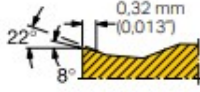
Material da peça	Acabamento	Médio	Desbaste
			

Figura 4.5: Geometria para ferramenta de torneamento da classe M.  
 Fonte: adaptado de Coromant (2017).

## 5 USINABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

A usinabilidade de um material pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico, seja absoluto ou percentual, o comparativo de um conjunto de propriedades de usinagem em relação a outro considerado como padrão, FERRARESI (1970). Variáveis como vida da ferramenta, força de usinagem, acabamento superficial, temperatura de corte, produtividade e a forma do cavaco são características consideradas quando se avalia a usinabilidade de um material. Nesse sentido, Trent e Wright (2000) sugerem que usinabilidade não é apenas uma propriedade, mas o modo como o material se comporta durante a usinagem.

Os resultados de usinabilidade podem ser afetados por variáveis do processo, dentre os quais se ressaltam a rigidez da ferramenta e sua fixação; material e geometria da peça, e operação de usinagem a ser executada. As características de usinabilidade dos aços inoxidáveis são distintas, pois dependem das classes e tipos de materiais que se pretende usinar, de maneira que podem variar entre muito alta e muito baixa. Quando comparada aos aços carbonos, a usinagem desses materiais exige maior potência específica de corte, velocidades de corte mais baixas, ângulos de saídas maiores, necessidade de quebra-cavacos e cuidados especiais com refrigeração e lubrificação (SANTOS; SALES, 2007).

Em relação às características de usinabilidade entre as classes de aços inoxidáveis, os aços martensíticos apresentam usinagem difícil devido à elevada dureza, exigindo maior esforço de corte por causa da presença de partículas duras e abrasivas de carboneto de cromo (DINIZ *et al*, 2013; CORRÊA, 2014). Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam controle de cavacos razoável (COROMANT, 2017) e para melhorar sua usinabilidade podem ser adicionados enxofre, manganês e cobre. Tais elementos reduzem a capacidade de endurecimento a frio e o atrito entre ferramenta e peça, mas, em geral, não possuem o mesmo desempenho de operações similares em aços ao carbono com os mesmos aditivos (SANTOS, SALES, 2007; MACHADO *et al*, 2015).

Os maiores desafios na usinagem dos aços inoxidáveis estão concentrados na classe austenítica; os aços pertencentes a esta classe possuem difícil usinabilidade em razão de sua alta ductilidade e forte tendência ao encruamento em condições de usinagem severas. Quando comparada aos ferríticos e martensíticos, esta classe apresenta taxa de endurecimento mais elevada e uma diferença acentuada entre o limite de escoamento e o limite de resistência (SANTOS; SALES, 2007). De acordo com Diniz *et al*. (2013), os aços inoxidáveis austeníticos são os que apresentam maior dificuldade em serem usinados. Sua baixa



condutividade térmica dificulta a dissipação do calor da região de corte, o alto coeficiente de atrito aumenta a temperatura e o esforço gerado durante a usinagem e o alto coeficiente de dilatação térmica torna o controle dimensional da peça mais complexo.

Segundo Santos e Sales (2007), existem problemas específicos na usinagem dos aços inoxidáveis, dentre os quais pode-se destacar:

- a) o cavaco aderido à ferramenta pode levar fragmentos da ferramenta ao ser fraturado;
- b) as forças de usinagem não apresentam grandes diferenças se comparadas aos aços ao carbono, desde que as ferramentas tenham ângulos de saída relativamente elevados;
- c) os aços inoxidáveis austeníticos possuem tendência de endurecimento sob temperaturas elevadas devido à presença de Ni e Cr. Além disso, existe forte tendência de ocorrência de desgaste de cratera;
- d) tendência ao endurecimento por precipitação, que causa o endurecimento da camada previamente usinada.

A Tabela 5.1 apresenta as principais características de usinagem para cada classe de aço inoxidável.

Tabela 5.1 Composição química e características físicas do metal duro classe M

Classes	Características de usinagem
Ferríticos	Apresentam melhor usinabilidade se comparados aos materiais das demais classes. Possuem controle de cavaco razoável e elevada capacidade de endurecimento a frio, o qual pode ser mitigado com adições de S, Mn e Cu.
Martensíticos	Aços com elevada dureza que resultam em um maior esforço de corte. Esse mesmo fator pode ocasionar a deformação plástica do inserto. Desgaste acentuado da ferramenta em razão da presença de partículas duras e abrasivas.
Austeníticos	Aços com baixa condutividade térmica, elevado coeficiente de atrito e de dilatação térmica, forte tendência ao encruamento em condições severas e surgimento de cavacos longos propensos ao empastamento.
Duplex	Características de usinagem semelhantes à dos aços da classe austenítica devido ao maior limite de resistência à tração. Exigem maior esforço de corte.
Endurecidos por precipitação	Usinabilidade varia para cada tipo de aço e para cada dureza alcançada pelo tratamento de endurecimento. Geralmente possuem elevada dureza, o que exige maior esforço de corte.

Fonte: adaptado de (Machado et al., 2015; Diniz, Marcondes, Coppini, 2013; Krabbe, 2006).

A Figura 5.1 apresenta o percentual de estudos que abordam o torneamento das diferentes classes de aços inoxidáveis utilizados no presente trabalho. Percebe-se que os

estudos estão concentrados nas classes dos aços inoxidáveis austeníticos, martensíticos e duplex.

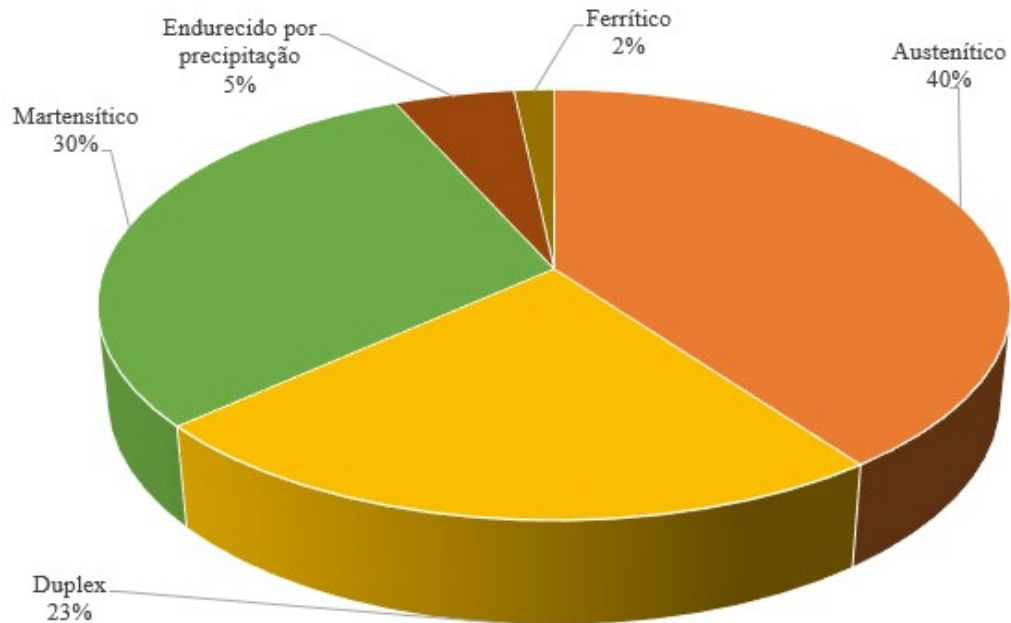


Figura 5.1: Distribuição dos estudos de torneamento utilizados no presente trabalho.  
Fonte: autor (2020).

## 5.1 Vida e Desgaste de Ferramenta

Durante a usinagem dos aços inoxidáveis ocorrem diferentes mecanismos de desgaste no inserto. Segundo Machado *et al.* (2015), por melhor que seja a usinabilidade do material da peça ou por mais duro e resistente que seja o material da ferramenta de corte, o desgaste ocorrerá e eventualmente será necessária a substituição da ferramenta de corte.

Embora o desgaste da ferramenta seja o fenômeno mais frequente durante o torneamento, fenômenos classificados como avarias, quebras e lascamento podem ocorrer de forma inesperada. A Figura 5.2 ilustra as formas de desgaste mais frequentes na ferramenta de corte e que resultam em uma perda gradativa de material, sendo eles: desgaste de cratera (região A); desgaste de flanco (região B); e desgaste de entalhe (regiões C e D), (SANTOS; SALES, 2005).

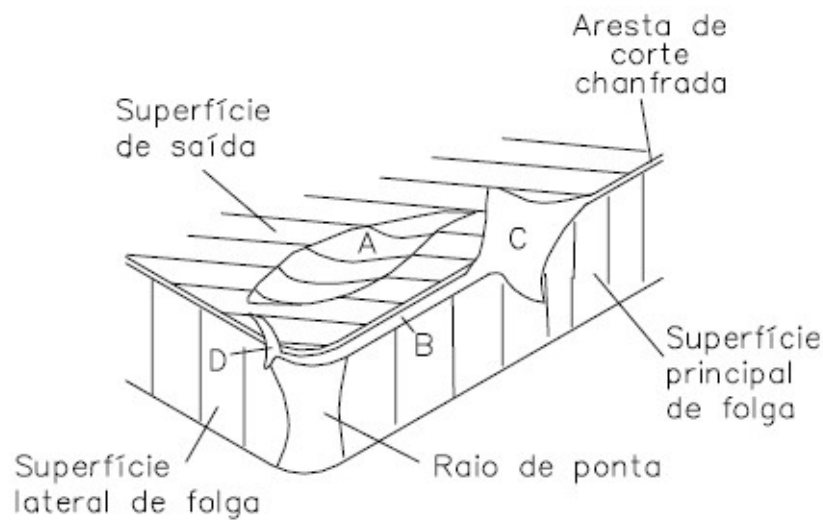


Figura 5.2: Formas de desgaste em ferramentas de corte.  
 Fonte: Dearnley; Trent (apud Santos; Sales, 2005).

De acordo com Coromant (2017), estas formas de desgaste são definidas da seguinte maneira:

- a) Desgaste de flanco: desgaste de origem abrasiva que ocorre na superfície de folga principal da ferramenta devido ao contato ferramenta peça. Geralmente ocorre na aresta de corte e gradualmente se propaga para superfície de folga, sendo este o padrão de desgaste preferencial;
- b) Desgaste de cratera: desgaste de origem química que ocorre na superfície de saída da ferramenta devido ao contato do cavaco com a ferramenta. A utilização de revestimento e a redução da velocidade de corte podem reduzir ou até mesmo impedir o surgimento desse tipo de desgaste;
- c) Desgaste de entalhe: é caracterizado por dano excessivo localizado na parte da aresta correspondente ao final da largura de corte, mas também pode ocorrer na aresta secundária. É mais frequente em ligas resistentes ao calor ou com percentual elevado de níquel, podendo acarretar na formação de trincas térmicas.

De acordo com Trent e Wright (2000), existem seis principais mecanismos de desgaste de ferramentas, sendo que esses variam de acordo com o material da peça, a operação e os parâmetros de usinagem, a geometria da ferramenta e a utilização de fluidos de corte. Estes mecanismos são apresentados na Figura 5.3 e são definidos por Machado *et al*, 2015; Santos, Salles, 2015; Diniz *et. al*; 2013 da seguinte maneira:

- a) Cisalhamento plástico em altas temperaturas (Figura 5.3a): mecanismo presente na usinagem de materiais com elevado ponto de fusão. As tensões cisalhantes na interface cavaco/ferramenta e a temperatura são elevadas, e a resistência ao escoamento da ferramenta nesta área é reduzida. Conseqüentemente, o material da ferramenta é removido pelo cavaco e forma uma cratera na superfície de saída.
- b) Deformação sob tensão de compressão (Figura 5.3b): mecanismo presente na usinagem de materiais com elevada dureza. Altas tensões de compressão aliadas a elevadas temperaturas podem ocasionar a deformação do inserto de corte. Outros fatores que favorecem o surgimento desse mecanismo são altas velocidades de corte e avanço elevado.
- c) Abrasão (Figura 5.3c): mecanismo que envolve a perda de material por microsulcamento ou microcortes devido à presença de partículas duras existentes em duas superfícies ou soltas entre as mesmas. A abrasão pode ser classificada em dois ou três corpos: aqueles são ocasionados por precipitados presos à peça ou ao cavaco; nestes, partículas soltas pelo mecanismo de aderência e arrastamento podem estar presentes entre as superfícies.
- d) Desgaste de entalhe (Figura 5.3d): definido geralmente como uma forma de desgaste e não como um mecanismo. O referido fenômeno foi abordado anteriormente.
- e) Difusão (Figura 5.3e): mecanismo que envolve transferência de material em nível atômico. Altas temperaturas, elevadas tensões de compressão e afinidade química do material da peça com o material da ferramenta são fatores que influenciam na transferência de material do cavaco para a ferramenta de corte.
- f) Aderência e arrastamento (Figura 5.3f): mecanismo geralmente presente em baixas velocidades de cortes, de modo que o fluxo de material na superfície de saída da ferramenta torna-se irregular. Em razão de sua presença, fragmentos microscópicos da ferramenta são removidos da ferramenta juntamente ao cavaco.



Figura 5. 3: Mecanismos de desgaste em ferramentas de corte: (a) cisalhamento plástico, (b) deformação sob tensão, (c) abrasão, (d) entalhe, (e) adesão, (f) aderência e arrastamento. Fonte: adaptado de Coromant (2017).

Fenômeno importante durante o torneamento dos aços inoxidáveis, a aresta postiça de corte (APC) possui relevância na usinagem desses materiais por sua frequente presença durante a operação de torneamento. Este fenômeno se caracteriza pela formação de uma camada de material da peça que se une à ferramenta por meio de ligações atômicas e tende a crescer gradualmente até se romper. O surgimento da APC tende a modificar certas características do processo, comprometendo o acabamento da peça e reduzindo as forças de usinagem, pois a APC tende a aumentar o ângulo de saída efetivo da ferramenta.

A norma ISO 3685 estabelece parâmetros que indicam o momento no qual a substituição da ferramenta se faz necessária. A Figura 5.4 apresenta os critérios segundo a norma, e as referências quantitativas do desgaste seguem abaixo:

- a) desgaste de flanco médio  $VB_B = 0,3\text{mm}$ ;
- b) desgaste de flanco máximo  $VB_{\text{max}} = 0,6\text{mm}$ ;
- c) profundidade de cratera,  $KT = 0,06 + 0,3 \times f$ ;
- d) distância frontal entre cratera e flanco  $KF = 0,02\text{mm}$ ;
- e) falha catastrófica.

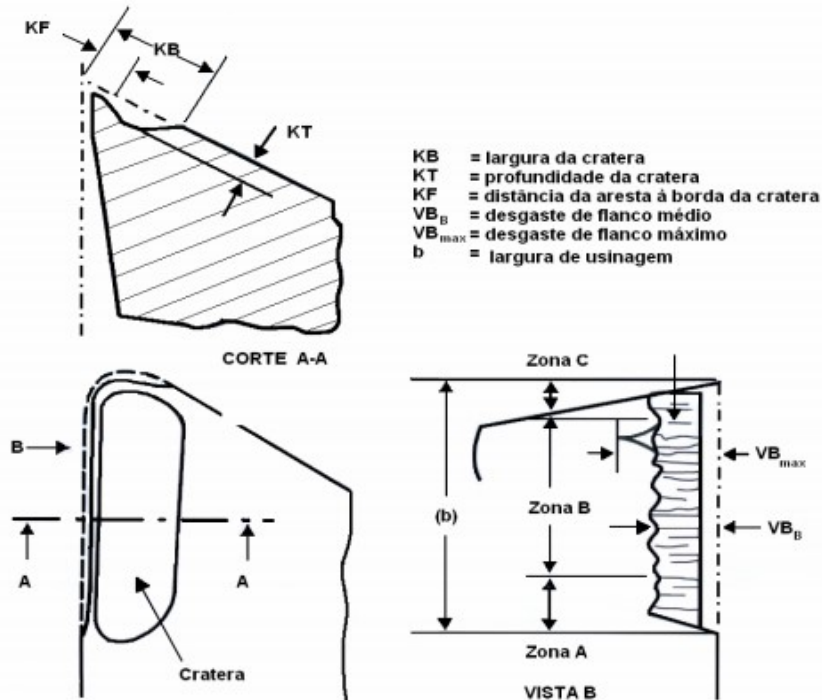


Figura 5.4: Parâmetros de quantificação para o desgaste de ferramentas.  
 Fonte: ISO 3585 (apud Almeida, 2010).

Para garantir maior desempenho e reduzir o desgaste do inserto de corte, são aplicados ao substrato diferentes revestimentos. A tabela 5.2 apresenta os revestimentos utilizados pelos principais fabricantes de ferramentas. Observa-se que o processo CVD possui maior aplicação no torneamento de aços inoxidáveis.

Tabela 5.2 Revestimentos indicados para o torneamento de aços inoxidáveis

Fabricante	Processo	Revestimento
Mitsubishi	CVD	TiCN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiN
	PVD	TiAlN
Sandvik	CVD	MT-TiCN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiN
	PVD	TiAlN
		TiCrAlN
Iscar	CVD	MT-TiCN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiN
	PVD	TiAlN - TiN
		TiAlN
Kennametal	CVD	MT-TiCN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
		MT-TiCN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiOCN
	PVD	TiAlN
Seco	CVD	TiCN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
		TiCN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiN
	PVD	TiAlN - TiN

Fonte: autor (2020).

Marques (2007) avaliou a influência do teor de níquel (0, 10, 20, 40 e 60% em peso) em aços austeníticos e ferríticos sobre a vida da ferramenta de corte durante a operação de torneamento. Os resultados indicaram uma redução da vida da ferramenta com o aumento da concentração de Ni no material da peça. Verifica-se assim, que a elevada concentração de níquel dificulta a usinagem devido ao alto índice de encruamento e ponto de fusão deste elemento. Ressalta-se que a adesão, mecanismo de desgaste presente, promoveu o arrancamento de partículas da ferramenta e reduziu sua vida.

No torneamento a seco do aço inoxidável austenítico AISI 304 com inserto de metal duro P10, Tekiner e Yeşilyurt (2004) avaliaram o desgaste de flanco para cinco diferentes velocidades de corte (120, 135, 150, 165 e 180 m/min) e três diferentes avanços (0,2; 0,25 e 0,3 mm/rev). Foi constatado que com o aumento da velocidade de corte, o desgaste de flanco foi reduzido, resultado que diverge de vários estudos que relacionam o aumento da velocidade de corte com a elevação da temperatura e do desgaste de flanco. Ademais verificou-se que o surgimento de APC foi reduzido com a elevação da velocidade de corte, destacando-se que o surgimento da APC geralmente ocorre em baixas velocidades de corte, de maneira que a parte inferior do cavaco em contato com o inserto sob a pressão de corte na zona de aderência mantém este contato sem movimento relativo em um espaço de tempo suficiente para promover a adesão do material da peça sobre a ferramenta. Em relação ao avanço, o menor desgaste de flanco foi observado com 0,25 mm/rev para todas as velocidades de corte, exceto 120 m/min que apresentou melhores resultados para o avanço de 0,3 mm/rev. Sugere-se que a elevação do avanço afeta o gradiente de temperatura e o desgaste da ferramenta de forma mais branda se comparado ao aumento da velocidade de corte.

No estudo conduzido por Marques *et al.* (2013), foi realizado o torneamento externo a seco do aço inoxidável austenítico AISI 304 e do aço inoxidável martensítico AISI 420 com os seguintes parâmetros de corte:  $v_c = 200$  m/min,  $f = 0,1$  mm/rev e  $a_p = 0,5$  mm. Os valores de desgaste de flanco máximo ( $VB_{max}$ ), foram maiores para o aço AISI 304, que foi considerado de usinabilidade inferior ao AISI 420. Os valores superiores para desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) do aço AISI 304 podem ser explicados pela tendência do cavaco ao empastamento aliada à elevada velocidade de corte, fatores que aumentam a temperatura de usinagem e influencia a dureza a quente da ferramenta e o aumento do desgaste.

O torneamento do aço inoxidável supermartensítico ASTM CA6NM, encontrado comercialmente também como SM 13CRS, 13CrSS ou Super Cromo 13, foi realizado com insertos de metal duro das classes ISO P25-45 e M30-45 revestidos com TiN (OLIVEIRA, 2017). Foram utilizados insertos comerciais e modificados com sulcos próximos à aresta de

corte para facilitar o acesso do fluido de corte. Os resultados obtidos mostraram que houve maior adesão de material da peça sobre a superfície de saída na ferramenta convencional. Este fenômeno foi atribuído à elevada quantidade de calor gerado e à alta temperatura, que contribuíram para a formação de uma região de contato mais extensa. Os sulcos realizados na superfície de saída reduziram a área de dissipação de calor e resultaram em uma maior concentração de calor próximo à aresta de corte, ocasionando um desgaste acelerado da ferramenta de corte. Ressalta-se ainda que os sulcos realizados na superfície de saída reduziram o contato na interface cavaco-ferramenta.

Durante o torneamento do aço inoxidável supermartensítico ASTM CA6NM conduzido por Santos e Abrão (2020), foram utilizados insertos de corte de metal duro das classes ISO M10 e ISO M10-20, ambos com revestimento de TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN depositado por CVD. Também foram utilizados insertos da classe ISO M30-40 com revestimento de (Ti,Al)N com alto teor de Al depositado por PVD. Pôde-se observar que, com o aumento da velocidade de corte, ocorreu a elevação do desgaste de flanco na ferramenta em decorrência das temperaturas de usinagem mais elevadas, as quais propiciaram oxidação e deformação plástica dos insertos, levando-os a taxas mais elevadas de desgaste. Quanto à influência dos revestimentos no desgaste das ferramentas, o desgaste acelerado do inserto M30-40 foi atribuído à sua cobertura monocamada, de forma que uma possível falha prematura do revestimento (Ti,Al)N levaria à maior exposição do substrato e, conseqüentemente, a um desgaste mais severo. Além disso, este revestimento tem a capacidade de transformar-se em um novo composto (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), que possui afinidade química com a camada passivadora de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, promovendo adesão e contribuindo para o desgaste do inserto.

No torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 420C endurecido foi utilizado um inserto com grãos ultrafinos revestido com TiAlN pelo processo PVD e os seguintes parâmetros de corte:  $v_c = 50, 60$  e  $70$  m/min,  $f = 0,08, 0,10$  e  $0,12$  mm/rev e  $a_p = 0,4$ mm. O aumento da velocidade de corte e do avanço resultaram na redução do tempo de vida da ferramenta para todos os casos. O resultado era esperado, já que a progressão do desgaste é influenciada pelo gradiente de calor gerado pelo aumento da velocidade de corte. O incremento do avanço também favorece o aumento da temperatura, além de aumentar a área da ferramenta que recebe esse calor; ROSA (2017).

Para o torneamento do aço inoxidável duplex UNS 1.4462, equivalente ao AISI 2205, Krolczyk, Nieslony, Legutko (2015) utilizaram os seguintes parâmetros de corte: velocidades de corte de 50 a 150 m/min; avanços de 0,2 a 0,4 mm/rev e profundidades de usinagem de 1 a 3 mm. Concluiu-se que no processo de atrito entre ferramenta e peça, algumas partículas do



material da peça foram transferidas para a superfície de saída da ferramenta, originando assim a APC. Este fenômeno foi documentado no torneamento com os seguintes parâmetros:  $v_c = 100$  m/min,  $f = 0,3$  mm/rev,  $a_p = 2$  mm no corte a seco e com fluido de corte. O mesmo fenômeno ocorreu no torneamento a seco com os seguintes parâmetros:  $v_c = 150$  m/min,  $f = 0,3$  mm/rev,  $a_p = 2$  mm, sendo que para esta velocidade de corte foi observada uma pequena deformação plástica na superfície de saída. Tal evento pode ser atribuído à deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas, visto que a elevação da velocidade de corte é fundamental para a elevação da temperatura, reduzindo a resistência ao escoamento do material da ferramenta próximo a interface. A redução da velocidade de corte para 50 m/min no corte a seco resultou no desgaste de cratera. Esta ocorrência pode ser explicada pelo mecanismo de aderência e arrastamento que propicia o surgimento de APC em baixas velocidades de corte e que pode acarretar na remoção de material da superfície da ferramenta com o cavaco. Para o torneamento a seco com  $v_c = 100$  m/min,  $f = 0,3$  mm/rev,  $a_p = 2$  mm, ocorreu o desgaste de cratera, enquanto para o corte com fluido de corte, com os mesmos parâmetros, o desgaste predominante na ferramenta foi de origem abrasiva.

Na avaliação do desgaste da ferramenta de corte durante o torneamento a seco do aço inoxidável duplex 1.4462 (DIN EN 10088-1), Królczyk; Legutko; Raos (2013) utilizaram insertos de corte da classe ISO M25 revestidos com TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN depositado por CVD. Os parâmetros de usinagem aplicados foram  $v_c = 50$  e 150 m/min,  $f = 0,3$  mm/rev e  $a_p = 2$  mm. Os resultados de desgaste identificados, para velocidade de usinagem de 150 m/min, são similares ao estudo anterior, ou seja, durante o torneamento algumas partículas do material da peça foram transferidas para a superfície de saída da ferramenta, originando a APC e causando deformação plástica na superfície de saída da ferramenta. O aumento do desgaste de flanco está associado à elevação da velocidade de corte e, conseqüentemente, da temperatura, uma vez que, com o gradiente de  $v_c$ , a ferramenta apresentou maiores avarias. O mecanismo de adesão esteve presente em ambas as condições de corte: para a velocidade de corte de 50 m/min, a superfície de saída apresentou crateras, enquanto para 150 m/min, ocorreu o surgimento de aresta postiça de corte. Os resultados, contudo, divergem da literatura, visto que o mecanismo de deformação plástica por cisalhamento está diretamente ligado à temperatura e, conseqüentemente, ao aumento da velocidade de corte, enquanto a APC é um fenômeno recorrente na usinagem em baixas velocidades de corte.

Na verificação dos esforços de usinagem durante o torneamento do aço inoxidável superduplex UNS S32760, Lima (2019) utilizou os seguintes parâmetros de usinagem: velocidade de corte de 50 m/min, avanço de 0,10 mm/rev e profundidade de usinagem de

0,05; 0,2 e 0,5 mm. Observou-se que com o aumento da profundidade de usinagem ocorreu uma elevada variação de corrente associada ao esforço de usinagem. Os inserts aplicados no torneamento com maior  $a_p$  sofreram maior tensão mecânica, atribuída à superfície muito irregular do material usinado e à maior força de usinagem, que contribuiu para a fadiga mecânica do inserto de corte utilizado no experimento descrito. De acordo com Clocke (2015), o corte interrompido está associado à elevada tensão mecânica alternada que possibilita a falha por fadiga, podendo originar trincas paralelas na ferramenta de corte.

No estudo do torneamento do aço inoxidável superduplex UNS S32507 com fluido de corte, Aguiar e Hassui (2015) utilizaram duas ferramentas de corte classe M, uma com revestimento multicamada TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN depositado pelo processo MTCVD e a outra com revestimento monocamada TiAlN depositado pelo processo PVD. Os parâmetros de usinagem utilizados foram  $v_c = 80$  e  $110$  m/min,  $f = 0,25$  e  $0,4$  mm/rev,  $a_p = 1$  mm. A principal forma de desgaste observada foi o entalhe, gerado pelo martelamento da rebarba na largura de corte. A rebarba provocou choques mecânicos na ferramenta que propiciaram a extrusão do material aderido e promoveram o mecanismo de desgaste por adesão que levou ao arrancamento do material junto com partículas da ferramenta. Uma das prováveis causas para o surgimento do desgaste de entalhe é o aparecimento de rebarbas na superfície usinada.

Ainda no mesmo estudo, o desgaste das ferramentas com  $v_c = 110$  m/min foi similar para os dois tipos de revestimentos, entretanto, com a redução da velocidade de corte para  $80$  m/min, a ferramenta com revestimento de TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN apresentou vida mais longa em relação ao inserto revestido com TiAlN. A superioridade da ferramenta com camada tripla foi atribuída ao menor coeficiente de atrito desse revestimento.

Durante o torneamento com resfriamento criogênico do aço inoxidável endurecido por precipitação 17-4 PH foram utilizados os seguintes parâmetros: velocidades de corte de  $25$ ,  $85$  e  $132$  m/min; avanços de  $0,048$ ;  $0,143$  e  $0,238$  mm/rev e profundidades de usinagem de  $0,2$ ;  $0,6$  e  $1$  mm. Foi constatado que o aumento da velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem resultaram em maior desgaste de flanco. Estes resultados estão de acordo com a literatura, na qual se verifica que a elevação dos valores de parâmetros de usinagem resulta em um maior desgaste de flanco devido ao aumento da temperatura de usinagem (SIVAIAH; CHAKRADHAR, 2018).

A Tabela 5.3 apresenta os principais mecanismos de desgaste para as principais classes de aços inoxidáveis. Observa-se que os mecanismos de desgaste com maior presença entre todas as classes são aderência e arrastamento, difusão e abrasão.

Tabela 5.3 Principais mecanismos de desgaste para as diferentes classes de aços inoxidáveis

Classes	Principais mecanismos de desgaste
Austenítico	Difusão / Aderência e arrastamento
Ferrítico	Aderência e arrastamento
Martensítico	Difusão / Entalhe / Abrasão / Deformação sob tensão de compressão
Duplex	Aderência e arrastamento / Abrasão
Endurecidos por precipitação	Difusão / Abrasão

Fonte: autor (2020).

Os resultados obtidos nos estudos analisados indicam uma grande influência da velocidade de corte sobre o desgaste de flanco para todas as classes de aços inoxidáveis. A elevação desse parâmetro contribuiu, de forma geral, para a elevação da temperatura de corte e, conseqüentemente, para o aumento do desgaste, tendo em vista a influência na dureza a quente da ferramenta de corte. Por sua vez, a elevação do avanço contribuiu para o aumento do desgaste de maneira mais branda em comparação à velocidade de corte. No torneamento dos aços inoxidáveis martensíticos, o aumento da temperatura associado às elevadas tensões em função da alta desta dureza da classe contribuiu para o surgimento do mecanismo de deformação sob tensão de compressão, tendo ocorrido, em alguns casos, o deslocamento do material do inserto de corte. Os mesmos fatores também contribuíram para que o mecanismo de desgaste por difusão fosse presente em alguns estudos, visto que ocorreu transferência em nível atômico do cavaco para a superfície de saída do inserto de metal duro.

Nos estudos que abordaram o torneamento dos aços austenítico e duplex, o surgimento da aresta postiça de corte foi presente em uma ampla faixa de velocidades de corte, incluindo as mais altas, nas quais esse fenômeno não é recorrente. A ocorrência da APC pode estar associada à ductilidade do aço inoxidável e sua tendência ao empastamento e à elevada tensão de corte na zona de aderência. Em baixas velocidades de corte, o mecanismo de desgaste predominante na usinagem dos aços inoxidáveis é o de aderência e arrastamento, sendo constante o surgimento de APC e a presença de crateras na superfície de saída em razão da remoção e arrastamento de material da ferramenta.

## 5.2 Força de Usinagem

O conhecimento da força de usinagem que atua sobre a cunha de corte e o estudo de suas componentes são relevantes para estimar a potência necessária de corte e as forças que agem nos elementos da máquina-ferramenta, além de manter relação com o desgaste das

ferramentas de corte, influenciando a viabilidade econômica do processo, MACHADO *et al.* (2015).

A força de usinagem ( $F_u$ ) é definida como a resultante da soma vetorial de suas componentes que atuam sobre a cunha cortante. Em operações de torneamento, é conveniente considerar as forças como um sistema de três componentes, tangencial, axial e radial, conforme apresenta a Figura 5.5:

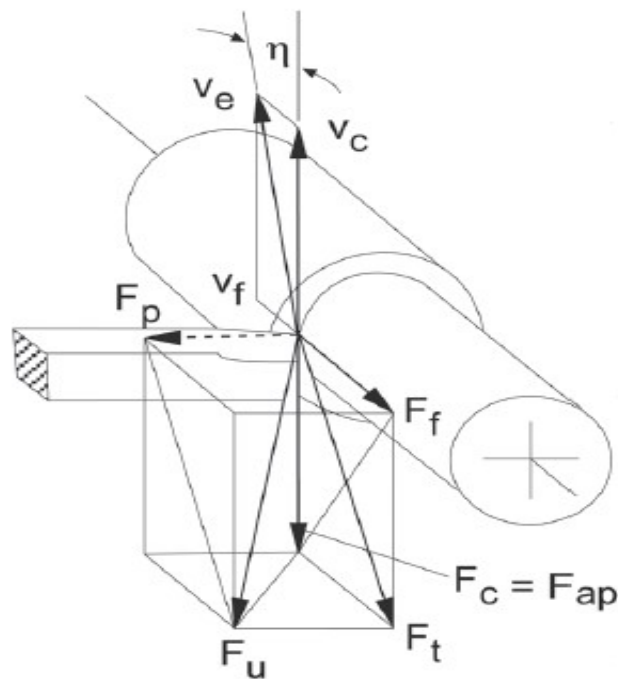


Figura 5.5: Forças de usinagem e suas componentes na operação de torneamento.  
Fonte: DINIZ, MARCONDES, COPPINI (2013).

As três componentes básicas da força de usinagem são descritas por Machado *et al.* (2015) da seguinte forma:

- Força de corte ou força principal de corte ( $F_c$ ): É a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte, isto é, representa a componente tangencial de  $F_u$ .
- Força de avanço ( $F_f$ ): É a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço (componente axial de  $F_u$ ).
- Força passiva ou força de profundidade ( $F_p$ ): É a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho (componente radial de  $F_u$ ).

A pressão específica de corte ( $K_s$ ) pode ser definida como a razão entre a força principal de corte ( $F_c$ ) e a área da seção de corte ( $A$ ). Segundo Santos e Sales (2005), todos os

fatores que facilitam o escoamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta colaboram com a redução das forças de usinagem. Portanto, fatores como o material da ferramenta e da peça a ser usinada, velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem, geometria e afiação da ferramenta e o uso de fluido de corte possuem influência direta nas forças de usinagem.

Nos aços inoxidáveis, a presença de MnS diminui sensivelmente o valor da pressão específica de corte ( $K_s$ ). Em geral, quando a dureza da peça aumenta,  $K_s$  também é elevado, mas isso não pode ser tomado como regra (Machado *et al.*, 2015). As componentes das forças de usinagem no corte de metais fornecem uma riqueza de informações sobre o processo de remoção de metal. Mudanças nessas forças indicam mudanças nos parâmetros de usinagem, como profundidade de usinagem, avanço, velocidade de corte e condição da ferramenta. Isso significa que a exatidão das operações de usinagem pode ser melhorada por meio do estudo dos resultados da força de usinagem (SIKDAR; CHEN, 2002).

De acordo com Klocke (2011), a redução da força de corte com o aumento da  $v_c$  é ocasionada pela redução da resistência ao cisalhamento do material em temperaturas mais altas; as forças de corte tendem a aumentar com o aumento do avanço e da profundidade de corte devido ao aumento da área da seção de corte. No entanto, isso só é válido se a profundidade de corte for maior que o raio de ponta da ferramenta. Os ângulos de saída e de inclinação provocam a diminuição da pressão específica de corte ( $K_s$ ) à medida que seus valores aumentam, pois, a deformação do cavaco diminui. A Figura 5.6 apresenta a pressão específica de corte em função do avanço para os trabalhos apresentados no presente tópico, nota-se que valores baixos de avanço resultam em uma elevada pressão específica de corte, isso ocorre devido a ação do raio de ponta da ferramenta que atua como uma ferramenta com ângulo de saída negativo.

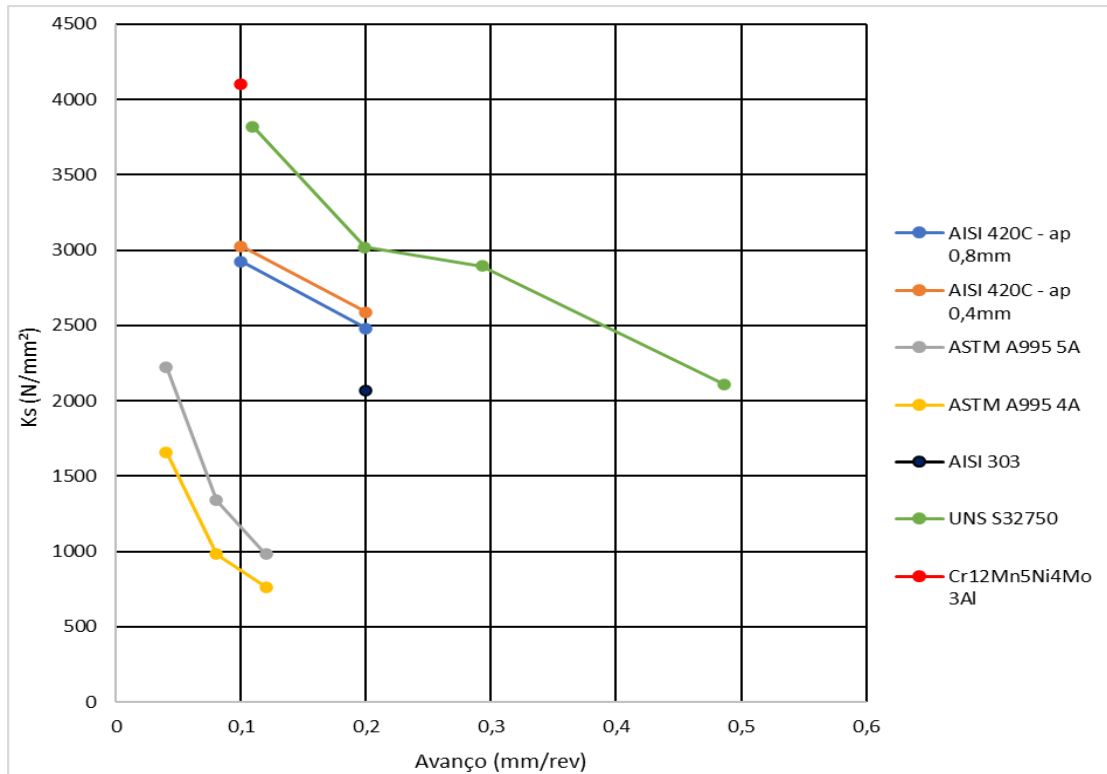


Figura 5.6: Pressão específica de corte em função do avanço  
Fonte: autor (2020).

Embora os experimentos tenham sido realizados com insertos novos, os valores de pressão específica de corte podem ser elevados com o aumento gradual do desgaste da ferramenta durante a usinagem, esta deterioração culmina com o aumento da força de usinagem, visto que o desgaste eleva o atrito entre peça e ferramenta, de modo que os valores de  $k_s$  cresçam. Dessa forma, a força de usinagem é geralmente considerada um dos indicadores mais significativos de desgaste da ferramenta de corte, sendo utilizada para estabelecer a relação com o desgaste da ferramenta, AMBHORE *et al.* (2015).

Em seu estudo sobre o torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 420C com amostras de dureza distintas (220 e 275 HB), Rosa e Souza (2014) utilizaram velocidade de corte constante de 180 m/min, avanços de 0,1 e 0,2 mm/rev e profundidades de usinagem de 0,4 e 0,8 mm. Todos os parâmetros foram testados a seco e com fluido de corte. As ferramentas utilizadas apresentavam o mesmo raio de ponta de 0,4 mm, embora o modelo de ambas fosse diferente (aresta convencional e alisadora). As ferramentas com arestas alisadoras (*wiper*) possuem geometria com raio de ponta modificado, o qual é composto, geralmente, de três ou mais raios, além de suas fases planas. Para a ferramenta convencional, a elevação do avanço e da profundidade de usinagem provocou a elevação de todas as componentes da força de usinagem, principalmente da força de corte, o que pode estar

relacionado ao aumento da área de seção de corte, pois estes valores estão associados a esta variável. A elevação da dureza causou um pequeno acréscimo nos valores das componentes da força de usinagem, pois em geral a elevação da dureza acarreta o aumento dos valores de  $K_s$ . A utilização de fluido de corte não causou mudanças significativas nos resultados. Os resultados obtidos para a ferramenta com aresta alisadora apresentaram uma redução significativa da força de corte, atribuída aos diversos raios da ferramenta alisadora, que possibilitaram uma melhor distribuição das forças na superfície da ferramenta.

Fernandez-Abia *et al.* (2011) estudaram o torneamento a seco do aço inoxidável austenítico AISI 303 e utilizaram nove diferentes velocidades de corte (37, 75, 150, 300, 450, 600, 750, 845 e 870 m/min), enquanto o avanço e a profundidade de usinagem foram mantidos constantes. Observou-se que a força de corte apresentou valores duas vezes maiores do que a força de avanço e a força passiva. Para velocidades de corte de até 450 m/min, os valores de força de corte reduziram devido ao amaciamento térmico e da diminuição da deformação e da dureza do cavaco. Entretanto, para velocidades de corte acima de 450 m/min, os valores de força de corte apresentam pequena elevação, ao passo que os valores das forças de avanço e passiva aumentaram consideravelmente a partir de 450 m/min, o que pode ser explicado pelo endurecimento por deformação que começa a ser fator predominante sobre o amolecimento térmico.

No estudo conduzido por Freitas *et al.* (2017), foi realizado o torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304L com sistemas de refrigeração distintos (MQL e ar refrigerado). Foram utilizados os seguintes parâmetros de corte:  $v_c = 215$  e  $290$  m/min,  $f = 0,15$  e  $0,30$  mm/rev e profundidade de usinagem constante em todos os testes. Foi observado que a variação da velocidade de corte e da refrigeração não apresentaram mudanças nos resultados das forças de usinagem. O aumento do avanço resultou na elevação de todas as componentes da força de usinagem, sendo que a força de corte aumentou 43,7%, força passiva 31,17% e força de avanço 29,86%. O comportamento das componentes de  $F_u$  foi atribuído ao aumento da seção de corte devido à elevação considerável do avanço, pois tal parâmetro teve seu valor duplicado se comparado ao primeiro teste.

No estudo de otimização do torneamento dos aços inoxidáveis duplex 1.4462 e 1.4410 realizado por Koyee *et al.* (2014), foram realizados ensaios de faceamento com velocidade de corte entre 75 a 200 m/min, avanço de 0,1 a 0,25 mm/rev, profundidade de usinagem entre 0,5 a 1,5 mm, comprimento de corte de 3 a 12 mm e condição de corte a seco e com fluido lubri-refrigerante. Conforme é exibido na Figura 5.7 para o corte a seco, quando velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem foram mantidos em valores constantes, esperava-se

que a força de usinagem aumentasse segundo o aumento do comprimento de corte, o que de fato aconteceu devido ao desgaste da ferramenta de corte. Além disso, os valores de força de usinagem apresentaram aumento significativo devido à elevação da velocidade de corte. Este resultado está associado ao crescimento da taxa de desgaste da ferramenta durante o torneamento. Logo, quando os materiais são usinados a seco, é preferível reduzir a velocidade de corte e o avanço a fim de minimizar  $F_u$ . Para a usinagem com utilização de fluido de corte, os valores de força de usinagem foram reduzidos se comparados ao corte a seco. Esse comportamento pode ser atribuído à redução do atrito entre cavaco e ferramenta devido ao efeito lubrificante do fluido sintético a uma concentração de 5%. Entre os materiais, os valores de força de usinagem para o aço 1.4410 foram maiores do que para o aço 1.4462, o que pode ser explicado maior resistência mecânica e menor concentração de elementos de corte fácil, como enxofre e fósforo.

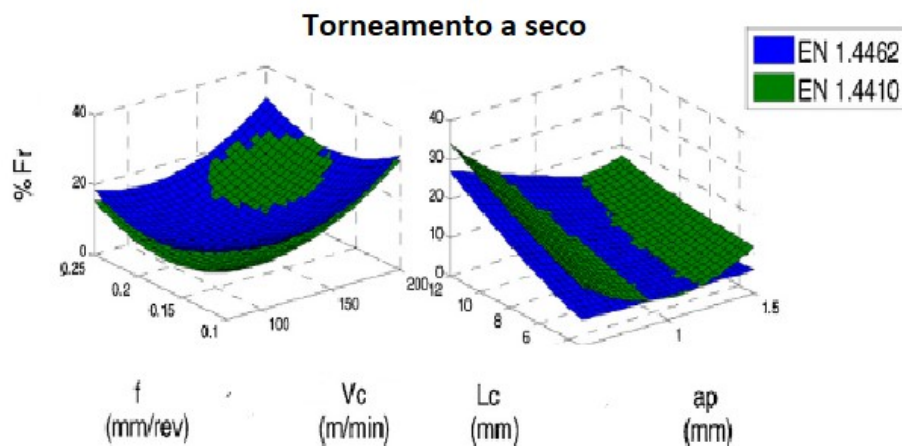


Figura 5.7: Forças de usinagem no torneamento a seco dos aços inoxidáveis duplex 1.4462 e 1.4410. Fonte: adaptado Koyee et al. (2014).

No torneamento a seco de dois tipos de aços inoxidáveis duplex com liga de nitrogênio (ASTM A995 tipos 4A e 5A), os experimentos foram conduzidos sob três velocidades de corte (80, 100 e 120 m/min) e três avanços (0,04, 0,08 e 0,12 mm/rev), mas com profundidade de usinagem constante (0,5 mm). Os resultados apontaram uma redução da força de usinagem com o aumento de  $v_c$  e redução de  $f$ . Nesses casos, o aumento na velocidade de corte contribuiu para o aumento de temperatura, que torna o material menos resistente ao cisalhamento e favorece a remoção do material com forças de corte mais baixas. O aumento do avanço afeta diretamente os valores da força de usinagem por acarretar a elevação da área da seção de corte. Em razão do maior volume de material a ser deformado e removido, a força de usinagem é elevada. O aumento da velocidade de corte associado ao menor avanço resulta na redução da força de usinagem, ou seja, utilizando-se avanço de 0,04 mm/rev e velocidade de



corte de 120 m/min foram obtidos os menores resultados para força de usinagem em ambos os materiais (SELVARAJ; CHANDRAMOHAN; MOHANRAJ, 2014).

No torneamento a seco do aço inoxidável superduplex UNS S32750, Vogel, Nery e Araujo (2013) utilizaram quatro avanços diferentes (0,109; 0,199; 0,293 e 0,496 mm/rev), porém mantiveram velocidade de corte e profundidade de usinagem constantes. Pôde-se concluir que com o aumento do avanço ocorreu a elevação das componentes da força de usinagem devido ao aumento da área da seção de corte. Entre as componentes da força de usinagem, a força de corte apresentou valores superiores às demais, reforçando que a componente ligada à velocidade de corte possui maior influência.

No torneamento a seco do aço inoxidável semiaustenítico Cr12Mn5Ni4Mo3Al endurecido por precipitação, Jianxin *et al.* (2011) utilizaram ferramentas com substrato de WC/Co e WC/TiC/Co, velocidade de corte entre 100 a 160 m/min e avanço e profundidade de usinagem constantes. Todas as componentes da força de usinagem foram menores quando empregada a ferramenta a base de WC/TiC/Co, fator atribuído à maior resistência ao desgaste do TiC, pois à medida que o desgaste da ferramenta aumenta, a pressão específica de corte também aumenta. O gradiente de temperatura devido à elevação da velocidade de corte não teve influência na redução das componentes da força de usinagem.

Diante dos resultados apresentados nesta seção, constata-se que, para todas as classes de aços inoxidáveis, a força de usinagem reduz com o aumento da velocidade de corte. A redução é ocasionada pela redução da resistência ao cisalhamento na zona de corte, que provoca a redução da dureza e da deformação do cavaco. A elevação dos valores de avanço e profundidade de usinagem ocasionam o aumento de todas as componentes da força de usinagem, elevação que pode ser explicada pelo aumento da área da seção de corte.

O torneamento dos aços inoxidáveis martensíticos resultou em força de usinagem mais elevada, o que pode estar relacionado à maior dureza dos materiais dessa classe que, geralmente, representa a elevação de  $K_s$ . Na comparação das forças de usinagem entre diferentes aços inoxidáveis duplex, constatou-se que materiais que apresentaram valores superiores de tensão de ruptura, dureza e concentração de Ni e Cr possuíram maiores valores de força de usinagem.

A utilização de fluido de corte promoveu resultados satisfatórios na redução da força de usinagem. O efeito lubrificante do fluido de corte modifica as condições de atrito entre cavaco/ferramenta e, conseqüentemente, reduz a pressão específica de corte. Todavia, em altas velocidades de corte, a redução das forças de usinagem pode ser atribuída, possivelmente, ao efeito refrigerante do fluido de corte que promoveu a redução das

temperaturas no processo e, conseqüentemente, reduziu o desgaste da ferramenta, de modo a preservar sua geometria e afiação.

### 5.3 Temperatura de Usinagem e Fluidos de Corte

Durante a usinagem dos metais, quase toda a energia consumida é transformada em energia térmica. Segundo Santos e Salles (2005), o calor gerado nas zonas de cisalhamento é conduzido para a ferramenta e para o cavaco. De acordo com Bagetti (2009), as elevadas temperaturas do processo de usinagem possuem influência na formação do cavaco, na integridade superficial da peça e no desgaste da ferramenta.

Segundo Ferraresi (1970), grande parte do calor é transmitida para o cavaco, distribuindo as menores parcelas para a peça e para a ferramenta. A quantidade de calor proveniente do processo de usinagem aumenta com a elevação da velocidade de corte e do principal componente da força de corte. Portanto, a quantidade de calor (Q) gerada pode ser determinada por meio da Equação 2:

$$Q = (F_c \times v_c) / 60 \quad (2)$$

Segundo Machado *et al.* (2015), as temperaturas resultantes do processo de usinagem aceleram os mecanismos de desgaste termicamente ativados, reduzindo o limite de escoamento das ferramentas, o que torna esse fator controlador da taxa de remoção. A Figura 5.8 apresenta as regiões de geração de calor durante o processo de usinagem. Nota-se que, na zona primária de cisalhamento, o calor provém do trabalho interno de cisalhamento do material da peça usinada, diferentemente das zonas secundárias e terciárias de cisalhamento, nas quais o calor tem origem do atrito e do cisalhamento interno provocado pela aderência entre as superfícies.

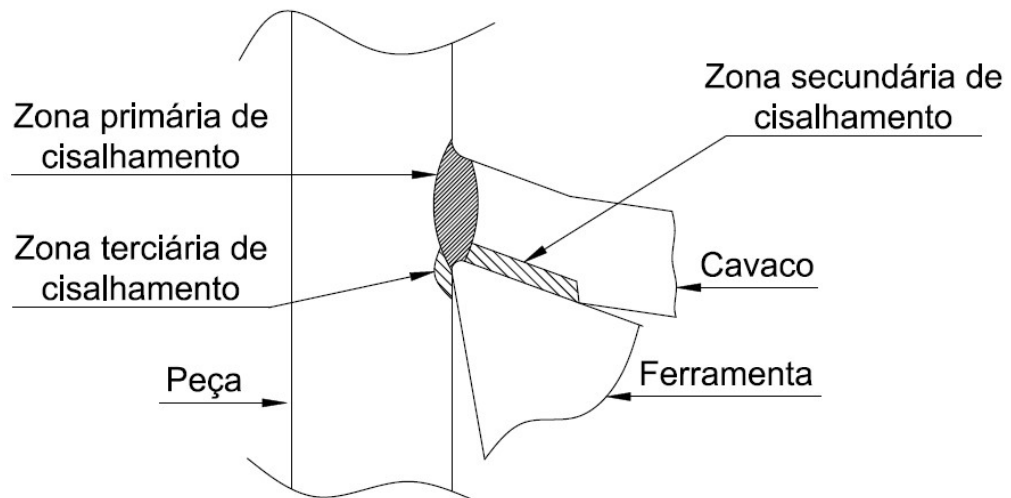


Figura 5.8: Representação das regiões de geração de calor.  
 Fonte: adaptado de Santos e Salles. (2005).

De acordo com Santos e Salles (2005), alguns parâmetros metalúrgicos influenciam a temperatura de usinagem. Os elementos de liga aumentam a resistência ao corte do material e elevam a temperatura na interface cavaco ferramenta e o elevado ponto de fusão do principal elemento químico da peça aumenta a temperatura na interface cavaco ferramenta. Por derradeiro, a presença de MnS e grafita facilita o corte do material, o que, por consequência, reduz a temperatura de usinagem.

A aplicação de fluidos de corte na usinagem dos materiais foi iniciada em 1894 por F. W. Taylor que observou que aplicando uma grande quantidade de água na região de corte, era possível elevar os valores de velocidade de corte em até 33% sem causar danos na ferramenta de corte. A aplicação teve como objetivo minimizar o efeito da temperatura sobre a vida da ferramenta, FERRARESI (1970).

Os fluidos de corte são amplamente utilizados para refrigerar e lubrificar a região de usinagem. Por meio da remoção do calor entre ferramenta e peça e da redução do atrito por meio da lubrificação, os fluidos de corte elevam a produtividade de vários processos de fabricação e a vida da ferramenta. O transporte dos cavacos e a redução da dilatação térmica da peça são outras importantes funções exercidas por essa técnica, KLOCKE (2013).

De acordo com Shaw (2005), as principais funções dos fluidos de corte são a lubrificação em baixas velocidades de corte, como nas operações onde são utilizados machos e cossinetes, e de refrigeração em velocidades de corte elevadas, como no fresamento, torneamento e retificação. Os fluidos de corte que atuam como lubrificantes reduzem a área de contato entre o cavaco e a ferramenta, enquanto os refrigerantes diminuem a extensão da

área afetada pelo calor durante o processo de usinagem, de modo que dissipam e reduzem a geração de calor, ALMEIDA *et al.* (2006).

Segundo Oliveira Junior (2013), a função do fluido de corte é promover uma melhoria no processo de usinagem, o que afeta seu caráter funcional e econômico. As melhorias funcionais auxiliam a usinagem e permitem um desempenho melhor no processo. Entre essas melhorias estão:

- a) redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco;
- b) remoção do cavaco da região de corte;
- c) refrigeração da ferramenta;
- d) refrigeração da peça em usinagem;
- e) melhoria do acabamento da peça;
- f) refrigeração da máquina-ferramenta.

De acordo com Ezugwu e Bonney (2004), no corte de materiais de difícil usinabilidade em que se utiliza refrigeração convencional, o efeito refrigerante dos fluidos de corte pode ser prejudicado, dado que as elevadas temperaturas de corte e a conseqüente evaporação dos fluidos de corte a base de água dificultam a sua chegada à interface ferramenta/peça. Entretanto, o efeito lubrificante forma um filme que reduz significativamente o atrito e influencia diretamente a redução da temperatura na região de corte.

A ação lubrificante dos fluidos de corte auxilia na redução do coeficiente de atrito na zona de cisalhamento secundário e na região de contato da peça com a superfície de folga. Na zona de cisalhamento primário, a redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco implica um ângulo de cisalhamento maior, que resulta em uma menor deformação do cavaco e, conseqüentemente, em uma menor temperatura de usinagem, BONFÁ (2013).

Diferentes direções de aplicação do fluido de corte podem ser empregadas. A aplicação sobre o cavaco (na superfície de saída da ferramenta) é a mais tradicional. Sua aplicação não é recomendada no torneamento quando cavacos emaranhados são produzidos. O fluido de corte também pode ser aplicado na interface cavaco/ferramenta no sentido contrário a saída do cavaco, direção indicada apenas para fluidos de corte sob alta pressão. Por derradeiro, o fluido de corte pode ser aplicado diretamente na interface cavaco/ferramenta (superfície de folga da ferramenta), de modo a reduzir desgaste de flanco e melhorar a qualidade da superfície produzida, MACHADO *et al.* (2015).

Segundo Micaroni (2006), não existe uma padronização para a classificação dos fluidos de corte, todavia, uma categorização com grande aceitação é descrita a seguir:

- a) fluidos gasosos: ar comprimido, nitrogênio e dióxido de carbono;
- b) fluidos aquosos: emulsões e soluções;
- c) fluidos integrais: óleos minerais e vegetais puros.

Os fluidos de corte gasosos empregados no processo de usinagem são o ar comprimido, CO<sub>2</sub> e o N<sub>2</sub>. Embora os dois últimos contribuam para o aumento da vida útil da ferramenta de corte em razão das baixas temperaturas em que são aplicados, não são utilizados com frequência devido ao elevado custo. O ar comprimido é o fluido gasoso mais empregado no processo de usinagem, entretanto, sua utilização se restringe à remoção de cavacos da zona de corte, tendo em vista que em temperatura ambiente não possui características de lubrificação e refrigeração relevantes.

Os fluidos emulsionáveis são compostos de óleos minerais adicionados a emulsificadores ou água. As emulsões combinam propriedades anticorrosivas e de lubrificação do óleo com a excelente característica refrigerante da água. Em razão dessas características, as emulsões são utilizadas em praticamente todas as operações de corte leves, moderados e na maioria das operações de retificação, TEIXEIRA FILHO (2006).

As soluções, também conhecidas como fluidos sintéticos, são sais orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água, que não contêm óleo. Entre suas principais propriedades, ressalta-se a boa característica refrigerante, anticorrosiva e detergente, além de permitir a visibilidade da região de corte em razão do seu aspecto transparente, GONÇALVES NETO (2013).

A utilização de óleos minerais como fluido de corte está diminuindo em virtude do seu alto custo, baixo ponto de fulgor, baixo poder refrigerante em altas velocidades de corte e nocividade em relação à saúde do operador. Tendo em vista essas características, os óleos estão sendo substituídos por fluidos emulsionáveis, também conhecidos, erroneamente, como óleos solúveis. Quando empregados na usinagem, aos óleos são acrescentados aditivos de extrema pressão (EP) em sua composição, BERTONCINI (2007).

Existem basicamente três métodos de aplicação do fluido de corte: jorro a baixa pressão, sistema a alta pressão e atomização ou mínima quantidade de lubrificante (MQL). O primeiro é o mais utilizado devido à simplicidade e ao baixo custo, ao passo que o segundo requer bomba, reservatório e encapsulamento da máquina ferramenta. De acordo com Oliveira (2011), a técnica MQL é definida como uma pequena quantidade de óleo misturada com ar comprimido e direcionada entre a peça e a ferramenta de corte. A função de lubrificação é realizada pelo óleo, e a de refrigeração, pelo ar comprimido, no qual uma pequena quantidade

de óleo é capaz de diminuir o atrito durante a usinagem, reduzir a temperatura desse processo e influenciar positivamente os aspectos ambientais e de saúde do operador, SILVA (2016).

Durante o torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304, Bachmann, Oliveira e Brandão (2018) realizaram o corte a seco e com aplicação de fluido de forma abundante. Adotaram-se dois procedimentos de usinagem, quais sejam: desbaste e acabamento. Naquele, os parâmetros foram: velocidade de corte 220 m/min, avanço 0,15 mm/rev e profundidade de usinagem 1,5 mm e neste: velocidade de corte de 140 m/min, avanço de 0,05 mm/rev e profundidade de usinagem 1,0 mm. Em ambos os casos, as temperaturas foram medidas por meio de termopar do tipo J instalados nas faces inferior e superior da ferramenta. Constatou-se que com a utilização do fluido de corte, a temperatura da ferramenta foi reduzida em até 73% se comparada ao corte a seco. O fluido de corte aplicado em abundância apresentou boa propriedade de refrigeração, dissipando consideravelmente o calor gerado no processo. Observou-se ainda uma maior estabilidade da temperatura entre os experimentos realizados com fluido de corte, considerando medições com o mesmo termopar. Entretanto, uma maior variação entre as temperaturas obtidas entre os termopares superior e inferior pôde ser observada, o que se explica pela aplicação do fluido de corte ter sido realizada na face superior da ferramenta, ou seja, diretamente no termopar superior.

No estudo do torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 422 a seco e com fluido de corte, Galanis, Manolakos e Vaxevanidis (2008) realizaram a usinagem com diferentes parâmetros de corte, sendo  $v_c = 252; 273; \text{ e } 306$  m/min,  $f = 0,2$  e  $0,5$  mm/rev e  $a_p = 0,5$  e  $1,0$  mm. As medições de temperatura foram realizadas por meio de um pirômetro posicionado de forma que a temperatura encontrada representasse 20% da temperatura na aresta de corte. Observou-se que o aumento da velocidade de corte provocou o aumento da temperatura, porém, em comparação às condições a seco e com fluido de corte, constatou-se uma redução na temperatura de corte em 75% no segundo caso. Os resultados obtidos para o teste a seco variaram entre 650 a 900 °C, enquanto para o fluido de corte apresentaram temperatura máxima de 150 °C. A temperatura durante o torneamento foi reduzida de modo satisfatório pelo fluido de corte, que extinguiu o processo de difusão entre ferramenta e peça.

No estudo comparativo do torneamento do aço inoxidável endurecido por precipitação 17-4 PH, foram utilizados como refrigeração o método criogênico com aplicação de nitrogênio líquido (LN<sub>2</sub>) e jorro com fluido emulsionável na concentração de 5%. Os parâmetros de usinagem aplicados foram:  $v_c = 33,75; 51,03; 78,5; 120,89$  e  $188,4$  m/min com avanço e profundidade de usinagem constantes para todos os testes. Para medição da temperatura, utilizou-se o método de radiação infravermelha, observando-se que com o

aumento da velocidade de corte, houve a elevação da temperatura para ambos os métodos de refrigeração. Ressalta-se, todavia, a redução na temperatura de usinagem entre 63,5 a 73,4% quando da utilização do método criogênico. A redução pode ser relacionada às baixas temperaturas do LN<sub>2</sub>, que é aplicado diretamente na superfície de saída ferramenta e que acarretou redução de temperatura em toda a extensão do inserto e absorveu o calor da zona de corte (SIVAIAH; CHAKRADHAR, 2018).

Durante o estudo do desempenho de um nanofluido à base de óleo de coco como lubrificante para o torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304, Sodavadia e Makwana (2014) realizaram testes com diferentes concentrações (0,25; 0,5 e 1,0% em peso) de partículas de lubrificantes sólidos de ácido bórico. Para a realização do experimento, adotaram-se os seguintes parâmetros: velocidade de corte de 40, 60 e 100 m/min, avanço de 0,20; 0,25 e 0,28 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,5; 1,0 e 1,2 mm. A temperatura foi medida por meio de termopar do tipo K instalado na face inferior da ferramenta. Constatou-se que com a concentração de 0,5% de ácido bórico ocorreu a maior redução da temperatura de usinagem, resultado esse mantido para todas as variações de velocidade de corte e avanço empregadas no experimento. Ressalta-se que tal concentração apresentou melhor desempenho em comparação ao óleo base e outros nanofluidos em termos de temperaturas de corte. Os resultados para as concentrações de 0,25 e 1,0% foram similares, entretanto, a concentração de 1,0% apresentou ligeira redução na temperatura de usinagem se comparada a concentração de 0,25%.

Na avaliação do desempenho de ferramentas texturizadas com aplicação de MQL durante o torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304, Sivaiah (2019) utilizou os seguintes parâmetros de usinagem: velocidades de corte de 44, 66, 88, 110 e 132 m/min, avanço de 0,12 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,3 mm. A névoa de MQL foi produzida por meio de fluido emulsionável com concentração de 5%. As ferramentas utilizadas no experimento possuíam diferentes texturas na superfície de saída: pequenas depressões circulares (ferramenta T1) ou as mesmas depressões circulares e sulcos em formato de oblongos (ferramenta T2). Diante dessas modificações na superfície de saída, uma redução significativa na temperatura da zona de corte foi encontrada na ferramenta T2 quando comparada à ferramenta T1. O armazenamento e a passagem contínua do refrigerante MQL para a zona de corte foram considerados os responsáveis pela lubrificação mais eficiente da ferramenta T2, o que resultou em temperaturas mais baixas na zona de corte. À medida que a velocidade de corte foi elevada, o efeito refrigerante do fluido de corte diminuiu, o que comprovou que a ação do fluido de corte diminuiu com a elevação de  $v_c$ .

Durante o torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304, Dhananchezian, Kumar e Sornakumar (2011) utilizaram diferentes métodos de refrigeração. A comparação entre a aplicação de fluido emulsionável com concentração de 5% e refrigeração criogênica foi realizada utilizando-se os seguintes parâmetros de usinagem: velocidades de corte de 61, 94 e 145 m/min, avanço de 0,159 mm/rev e profundidade de usinagem de 1 mm. A temperatura foi medida por meio de pirômetro infravermelho. O inserto utilizado no experimento com resfriamento criogênico possuía um furo na superfície de saída que se conectava a outros furos realizados na superfície de folga, modificação que foi implementada para a aplicação do fluido criogênico. Enquanto para o torneamento com fluido emulsionável utilizou-se o inserto convencional. Conforme mostra a Figura 5.9, constata-se uma redução da temperatura de usinagem em até 51% com a utilização do método criogênico. Tal resultado é atribuído ao modo como o nitrogênio líquido foi aplicado, de forma que esse pudesse ser inserido diretamente nas superfícies de folga e saída da ferramenta, o que resultou na redução da temperatura na zona de corte. Para ambos os métodos de aplicação de fluido de corte, o aumento da  $v_c$  proporcionou um significativo aumento da temperatura de usinagem, a elevação da temperatura mitigou o efeito refrigerante dos fluidos utilizados.

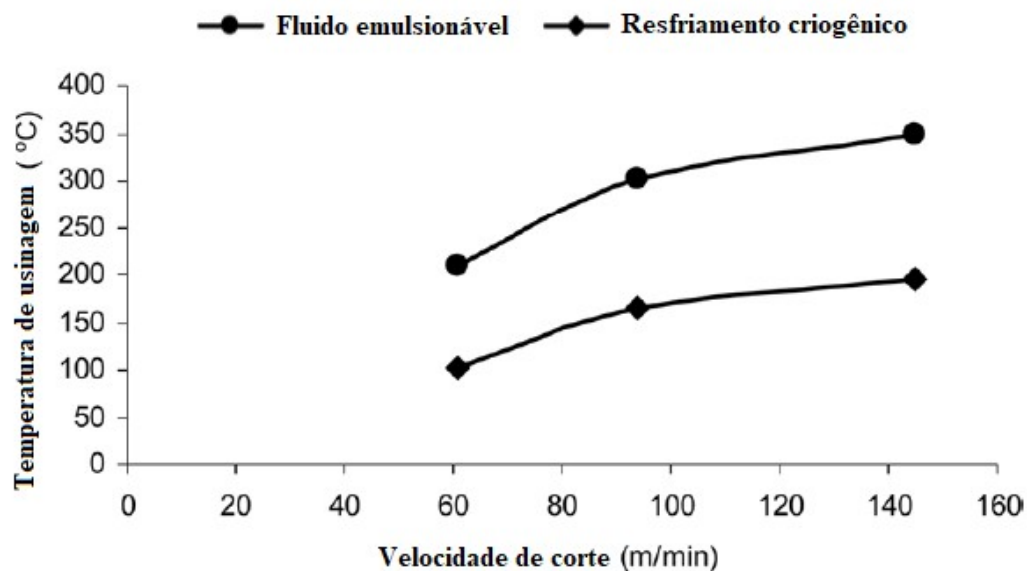


Figura 5.9: Variação da temperatura em função da velocidade de corte e do método de aplicação do fluido de corte.

Fonte: adaptado de Dhananchezian *et al.* (2011).

Conclui-se que, apesar de não ser claro como o fluido chega à interface, sua aplicação no torneamento de aços inoxidáveis é amplamente realizada devido à capacidade de reduzir o atrito e a temperatura na região. Embora nem todos os estudos relacionem a utilização de



fluidos de corte à temperatura de usinagem, sua aplicação é amplamente realizada, seja para proteger a máquina operatriz, remover cavacos da região de corte ou para as principais funções de lubrificar e refrigerar.

O fornecimento de jorro a baixa pressão disponível em tornos é o método de aplicação mais empregado devido à disponibilidade imediata. Conquanto o sistema MQL tenha sido amplamente estudado, ainda apresenta baixa aplicabilidade em processos industriais. Quanto às classificações, diversos estudos sobre torneamento utilizaram emulsões e soluções, em razão de suas boas características de refrigeração, antioxidantes e até mesmo por sua capacidade lubrificante, apesar da alta velocidade de corte empregada.

Para todos os estudos analisados, os resultados obtidos para o torneamento utilizando-se fluido de corte apresentaram redução da temperatura em até 75% se comparado ao torneamento a seco. Essa redução pode ser vinculada à excelente propriedade refrigerante dos fluidos de corte e à capacidade de acessar a interface cavaco ferramenta, seja por meio das laterais, seja pela capilaridade. Essa redução interfere na vida da ferramenta e nos mecanismos de desgaste, uma vez que mitiga o efeito difusivo, principalmente.

Em geral, o método criogênico apresentou desempenho melhor se comparado aos fluidos de corte aplicado na forma de jorro. Isso se deve não somente à forma de aplicação do fluido, mas também às alterações realizadas no inserto de corte, alterações essas que permitiram a aplicação do N<sub>2</sub> diretamente na região de corte, ressaltando-se a excelente propriedade refrigerante do fluido. Modificações semelhantes foram realizadas nos insertos de corte utilizados no método MQL, as quais promoveram melhorias similares ao método criogênico. Todos os fluidos e métodos de aplicação tiveram seus efeitos reduzidos com a elevação da velocidade de corte e, conseqüentemente, da temperatura, comprovando-se, pois, que sua eficácia é reduzida nessas condições.

## 6 INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE AÇOS INOXIDÁVEIS

A integridade superficial de uma componente pode ser descrita como a qualidade de uma superfície gerada por meio do processo de usinagem. Fatores importantes como deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibrações, tensões residuais e até mesmo reações químicas possuem relevância no resultado final da superfície usinada, MACHADO *et al.* (2015).

De acordo com Cangussu (2020), a integridade superficial de uma peça possui importância destacada em componentes submetidos a cargas térmicas e mecânicas. Essa relevância é atribuída ao fato de a superfície do material usinado possuir influência considerável em sua vida, pois ela determina as principais propriedades, como atrito, corrosão, resistência ao desgaste, fadiga e capacidade de suportar cargas.

A Figura 6.1 apresenta a classificação da integridade superficial. De acordo com Morelo (2014), o acabamento de uma superfície pode ser dividido em ondulações, falhas e rugosidade. Segundo Machado *et al.* (2015), as falhas são definidas como interrupções na topografia de uma superfície; as ondulações, erros irregularidades ou erros geométricos, que podem ser causados por vibrações, movimentação da ferramenta durante o corte, fixação inadequada da peça, entre outros; a rugosidade, erros microgeométricos inerentes do processo de usinagem devido à ação dos parâmetros de corte como avanço, velocidade de corte e desgaste da ferramenta.

Os efeitos mecânicos e térmicos promovem alterações nas camadas subsuperficiais da peça, como recristalização, transformações metalúrgicas, alteração de microdureza, trincas, entre outras alterações. A análise da integridade superficial permite identificar as alterações metalúrgicas que ocorreram durante o processo de usinagem. Entre essas modificações ressaltam-se transformação de fase, encruamento, alteração do tamanho de grão, recristalização e inclusões no material, JESUS (2013).

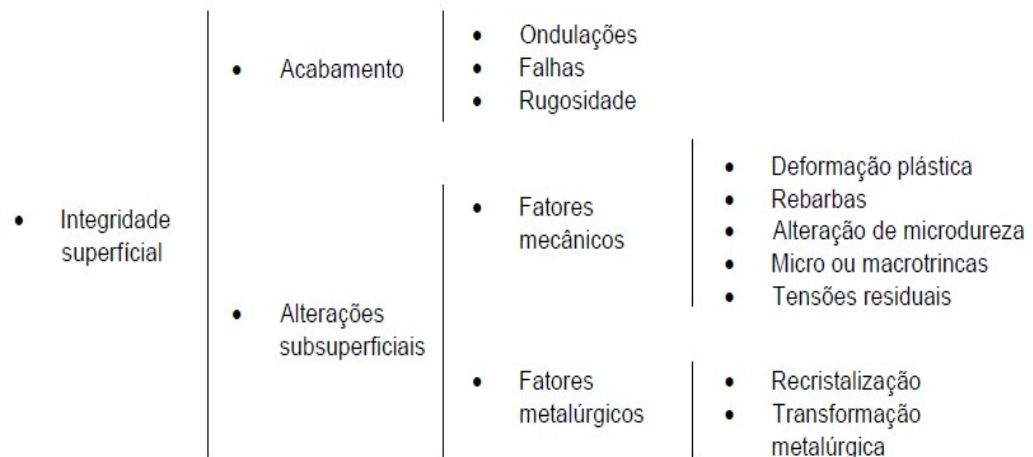


Figura 6.1 Classificação da integridade superficial.  
Fonte: autor (2020).

Para Griffiths (2001), os parâmetros de usinagem interferem diretamente na integridade superficial do componente usinado. O uso de condições severas gera calor e elevadas taxas de deformação na superfície usinada. Entre esses fatores ressaltam-se:

- utilização de elevadas velocidades de corte, avanços e profundidade de usinagem;
- uso de ferramentas com desgaste acentuado;
- lubri-refrigeração inadequada ou inexistente;
- maquinário antigo ou instável.

De acordo com Ferraresi (1970), a integridade superficial de uma peça é constituída pelo acabamento e por propriedades físicas e mecânicas da camada superficial. Portanto, fatores como atrito entre ferramenta e peça, temperatura de usinagem e tensão entre ferramenta e peça podem resultar em mudanças geométricas e na estrutura cristalográfica da camada superficial. Geralmente, a análise da integridade superficial de uma peça se faz necessária quando o equipamento possui elevado valor ou quando a falha desse componente pode causar risco à integridade física dos usuários (SANTOS; SALES, 2007).

## 6.1 Acabamento

A rugosidade superficial de uma peça é composta de irregularidades finas ou erros microgeométricos resultantes da ação de usinagem, parâmetros de corte como avanço, raio de ponta da ferramenta, APC e desgaste de ferramenta, que influenciam diretamente no resultado final da superfície usinada, MACHADO *et al.* (2015). De acordo com Santos e Salles (2007),

o acabamento de uma superfície pode ser classificado em diferentes níveis, quais sejam erros de forma/falhas, ondulação e rugosidade.

De acordo com Branco (2013), a rugosidade de uma peça pode afetar o desempenho e modificar características como aparência, vedação, qualidade de aderência a camadas protetoras e à resistência à corrosão, fadiga e desgaste. Por mais que uma peça possua sua superfície cuidadosamente trabalhada, na análise de seu acabamento são encontradas diversas discontinuidades, imperfeições geométricas, ondulações, asperezas e rugosidade, sendo a última utilizada para avaliação da superfície usinada, JESUS (2013).

Segundo Klocke (2011), a rugosidade é produzida pelo movimento relativo entre a peça e a ferramenta. Durante o torneamento, esse parâmetro é influenciado principalmente pelo raio de ponta e pelo avanço. Entretanto, para garantir a formação de cavacos, uma profundidade de usinagem mínima deve ser alcançada, caso contrário, o material é apenas deformado elasticamente pela aresta de corte.

Considerando a influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade de uma superfície, nota-se pela Figura 6.2 que o avanço e o raio de ponta da ferramenta apresentam maior importância que os demais fatores, sendo que a rugosidade aumenta com o quadrado do avanço e é inversamente proporcional ao raio de ponta, Machado *et al.* (2015).

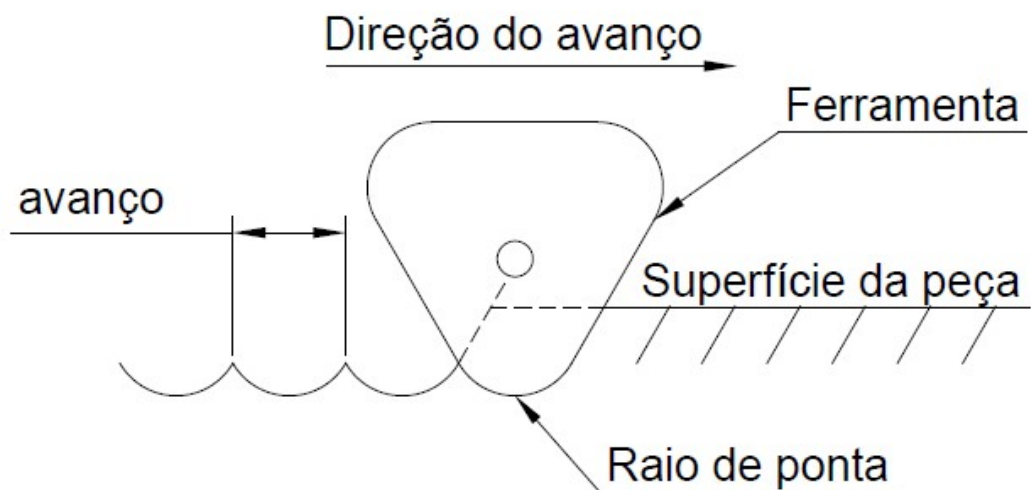


Figura 6.2: Influência do avanço e do raio de ponta no acabamento.  
Fonte: autor (2020)

Entretanto, outros parâmetros podem influenciar no acabamento de uma peça. Segundo Stemmer (1993), a elevação da velocidade de corte até uma determinada velocidade crítica resulta na melhoria do acabamento. A seção de corte possui efeito considerável sobre esse parâmetro, de modo que um acabamento grosseiro pode derivar de uma usinagem severa.

O aumento do ângulo de saída melhora o acabamento da peça, pois dificulta a formação da APC.

Para realizar a medição da rugosidade, são utilizados instrumentos óticos ou de contato, sendo que o mais empregado nessa avaliação é o rugosímetro. De acordo com Hutchings (1992), para avaliar a textura da superfície usinada, são comumente utilizados os seguintes parâmetros:

- a) desvio aritmético médio ( $R_a$ ): definido como a média da distância entre os pontos da superfície e a linha de centro ao longo do comprimento de usinagem;
- b) desvio médio quadrático ( $R_q$ ): raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
- c) altura total do perfil ( $R_t$ ): soma da altura do maior pico e da maior profundidade de vale no comprimento de avaliação.

O uso de ferramentas com geometrias modificadas está ampliando com o intuito de reduzir o efeito do raio de ponta no acabamento superficial de uma peça usinada. Segundo Coromant (2017), a utilização de ferramentas com aresta alisadora (*wiper*) resulta no ganho de produtividade devido às melhores condições para aumento do avanço, o qual pode ser até duas vezes maior, garantindo o mesmo acabamento superficial que uma ferramenta convencional. Essa melhoria é atribuída à sua geometria especial com raio de ponta modificado, o qual é composto, geralmente, de três ou mais raios, além de suas fases planas, promovendo maior contato entre ferramenta e peça, bem como superfície com melhor acabamento. A comparação entre os dois modelos de ferramentas é apresentada na Figura 6.3, sendo o acabamento típico de cada inserto demonstrado por meio de sua geometria e raio de ponta.

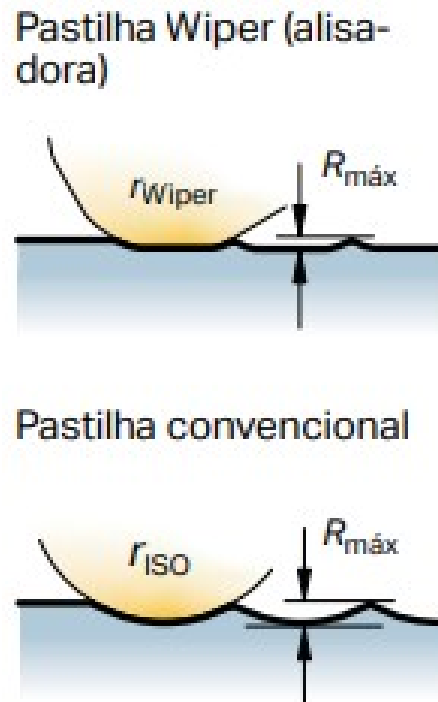


Figura 6.3: Comparação de rugosidade entre ferramentas: (a) alisadora e (b) convencional.  
Fonte: Coromant (2017).

As ferramentas com aresta alisadora e convencional, ambas com raio de ponta de 0,4 mm, foram testadas por Izquierdo *et al.* (2013) na usinagem de acabamento a seco do aço inoxidável martensítico AISI 420. Os experimentos foram conduzidos sob velocidade de corte constante de 290 m/min, avanços de 0,1; 0,15 e 0,20 mm/rev e profundidades de usinagem de 0,4; 1,0 e 1,5 mm. Constatou-se que com a utilização da ferramenta alisadora, os valores de  $R_a$  e  $R_t$  foram reduzidos para todas as combinações, exceto para avanço de 0,1 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,4 mm. Essa combinação apresentou valores de  $R_a$  e  $R_t$  muito elevados, que podem estar associados a vibrações durante o processo de usinagem em razão de fixação inapropriada da ferramenta. No que tange aos valores de avanço, seu aumento reduziu os valores de rugosidade, resultado que diverge da literatura que define o aumento do avanço como um dos principais fatores na elevação da rugosidade de uma superfície.

Ainda no mesmo estudo, para a ferramenta convencional, o aumento da profundidade de usinagem apresentou pequeno impacto sobre os valores de rugosidade. A elevação do avanço apresentou aumento significativo para os parâmetros de  $R_a$  e  $R_t$ . Se comparados os valores de 0,1 e 0,2 mm/rev, os resultados obtidos quase que dobram para essa variação.

No torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 420C, foram utilizados por Souza (2019) os seguintes parâmetros de corte: velocidades de corte 200 e 300 m/min, avanço de 0,15 mm/rev e profundidade de usinagem de 1,0 mm. Os métodos lubri-refrigerantes

adotados no experimento foram o corte a seco, fluido em abundância, MQL e MQCL. Os valores obtidos de  $R_a$  e  $R_t$  não apresentaram variação significativa para justificar a utilização de fluidos de corte. Portanto, para as condições estudadas, o torneamento a seco foi a melhor alternativa. A velocidade de corte, assim como os fluidos, não apresentou variação significativa para  $R_a$  e  $R_t$ . Todos os resultados apresentaram estabilidade, excetuando-se de  $R_t$  para  $v_c=300$  m/min, o qual foi o experimento mais próximo ao contraponto do torno, o que possibilitou a ocorrência de vibração durante o torneamento.

No torneamento a seco de acabamento do aço inoxidável martensítico AISI 420, Nassif *et al.* (2013) usaram insertos de metal duro com raio de ponta de 0,4 mm e geometrias alisadora e convencional. Os parâmetros de corte utilizados foram: velocidade de corte constante de 290 m/min, avanços de 0,1 e 0,20 mm/rev e profundidades de usinagem de 0,5 e 1,0 mm, tendo ainda sido analisados no estudo os parâmetros de rugosidade  $R_a$  e  $R_z$ . Na avaliação do parâmetro  $R_a$ , quando se mantém  $a_p$  constante é possível notar que com o aumento do avanço o valor da rugosidade se eleva drasticamente para a ferramenta convencional, uma vez que para o avanço de 0,1 mm/rev os resultados de  $R_a$  mais que triplicam. De acordo com o obtido, o menor valor  $R_a$  com a ferramenta convencional é maior que o mais elevado valor para a ferramenta alisadora, resultado que se relaciona ao comportamento desta de proporcionar uma baixa altura de perfil da aresta de corte na superfície gerada. As superfícies geradas no torneamento com a pastilha alisadora têm qualidade superior às geradas pelo inserto convencional, o que se deve à interação entre as forças de corte e a superfície gerada, tendo em vista que, quanto maior o esforço sobre a ferramenta, menor a qualidade da superfície de acabamento.

No torneamento de acabamento do aço inoxidável martensítico AISI 420C realizado por Rosa e Souza (2014), foram utilizados dois corpos de prova com durezas distintas (220 e 275 HB). As ferramentas empregadas possuíam geometria convencional e alisadora, ambas apresentavam raio de ponta de 0,4 mm. Para ambas as ferramentas a amostra com maior dureza apresenta  $R_t$  mais elevada, fato que se deve ao aumento das forças de usinagem. Na comparação de desempenho entre as ferramentas, o que se sobressai quanto à aresta alisadora é a sua capacidade de propiciar uma melhor interação entre ferramenta-peça, de forma que seus raios inibam a formação de vales e picos provenientes do aumento do avanço.

Ainda no mesmo estudo, a utilização do fluido de corte no torneamento com a ferramenta alisadora resultou em uma redução de até 31% de  $R_t$ . Essa diminuição pode estar associada à redução do atrito e, conseqüentemente, da temperatura de usinagem, de modo que

ambos os fatores influenciam na integridade da ferramenta e impactam diretamente no acabamento superficial.

No torneamento refrigerado do aço inoxidável martensítico AISI 420 realizado por Elmunafi, Yusof e Kurniawan (2015), foram utilizados os seguintes parâmetros de usinagem: velocidades de corte de 100, 135 e 170 m/min, avanços de 0,16; 0,20 e 0,24 mm/rev e profundidade de usinagem constante de 0,2 mm. A névoa de MQL foi produzida por meio de óleo de mamona e empregada em todos os experimentos. Na Figura 6.4, o pode ser visto que o aumento da velocidade de corte influi na redução da rugosidade da peça, ao passo que a elevação do avanço resulta em seu acréscimo. O aumento da temperatura na região de corte diminui os esforços durante o torneamento, sendo que essa redução da força de usinagem inibe os efeitos adversos como vibrações e o movimento indesejado da ferramenta. Por sua vez, o aumento do avanço influi na distância entre os picos e vales e produz uma superfície mais rugosa.

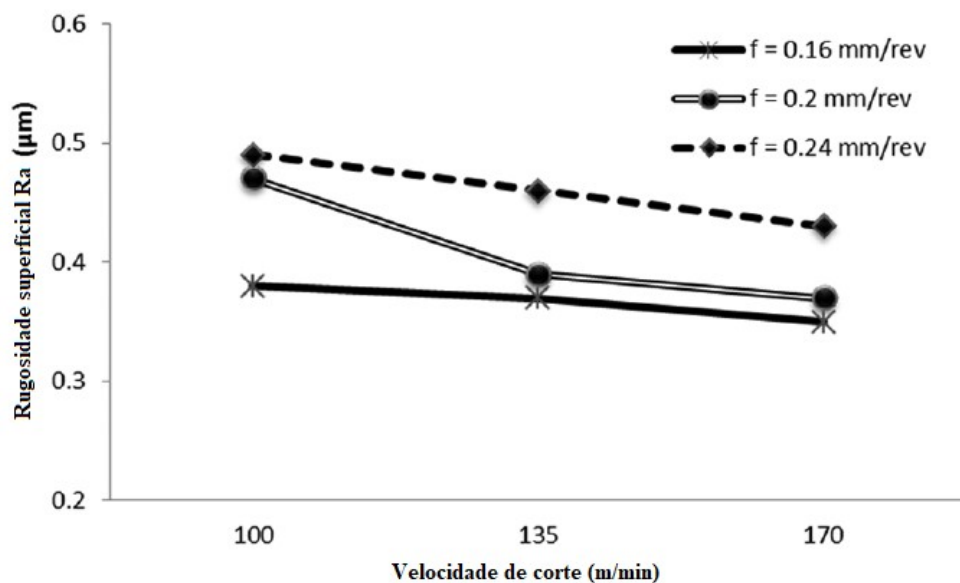


Figura 6.4: Rugosidade do aço AISI 420 em função de diferentes velocidades de corte e avanços. Fonte: adaptado de Elmunafi, Yusof e Kurniawan (2017).

Durante o torneamento de acabamento a seco do aço inoxidável martensítico AISI 420C realizado por Rosa *et al.* (2014), foram utilizadas ferramentas com geometria convencional e alisadora, sendo que ambas apresentavam raio de ponta de 0,4 mm. Durante a usinagem, foram aplicados os seguintes parâmetros: velocidade de corte constante de 290 m/min, avanços de 0,05; 0,1; 0,15; 0,20; 0,25 e 0,30 mm/rev e profundidades de usinagem de 1,0; 2,0 e 3,0 mm. Os parâmetros utilizados para mensurar a rugosidade da superfície usinada



foram  $R_a$  e  $R_t$ . Os valores obtidos durante o experimento com a ferramenta alisadora apresentam uma menor variação de  $R_a$  diante da elevação do avanço, o que se deve à sua geometria e raio de ponta modificado. Os menores valores de  $R_a$  com a utilização dessa ferramenta são encontrados para avanço de 0,1 mm/rev e profundidade de usinagem de 1,0 mm. Considerando-se a ferramenta convencional, o aumento de  $f$  afeta de forma significativa os resultados de  $R_a$  e  $R_t$ , sendo que para ambos os parâmetros de rugosidade os valores aumentaram consideravelmente com a elevação do avanço. Ainda para a ferramenta convencional, os melhores resultados obtidos foram com avanço mínimo e profundidade de usinagem de 2 mm. Os resultados confirmam a maior influência do avanço em relação às demais variáveis de usinagem quando se trata da rugosidade de uma superfície.

Para se verificar a influência do avanço na resistência à corrosão do aço inoxidável AISI 304, foram utilizados os seguintes parâmetros de corte: velocidade de corte e profundidade de usinagem constantes de 65 m/min e 1,0 mm, respectivamente, e avanços de 0,1 e 0,30 mm/rev. As amostras foram inseridas em meio constituído de cloreto de sódio (NaCl) a 3,5% em peso em água destilada. Como esperado, o aumento do avanço produziu uma superfície com maiores irregularidades, visto que os demais parâmetros permaneceram constantes. Uma superfície com maiores irregularidades, ou seja, maiores quantidades de picos e vales, resulta em uma maior área de contato da superfície com o meio, contribui para um maior acúmulo de impurezas e acelera o processo de corrosão. O aumento da taxa de corrosão nos corpos de prova usinados com avanço de 0,3 mm/rev é devido ao aço inoxidável perder suas características de resistência à corrosão à medida que sofre deformação plástica, pois sua estrutura cristalina passa de austenítica para martensítica, MICHELON *et al.* (2019).

Durante o torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304, Dias *et al.* (2011) utilizaram os seguintes parâmetros de usinagem: velocidades de corte de 160 e 175 m/min, avanços de 0,1 e 0,15 mm/rev e profundidade de usinagem constante de 2 mm. Como se esperava, o aumento do avanço provoca o aumento da rugosidade, pois a distância entre picos e vales produzidos na superfície da peça também se eleva. Ademais, o aumento do avanço resulta na elevação das forças de usinagem, que podem acarretar vibração durante o corte. Ao se manter o avanço constante e elevar a velocidade de corte, há redução da rugosidade superficial, a qual é atribuída à redução das vibrações durante o corte e a uma melhor acomodação da ferramenta durante a usinagem.

No torneamento do aço inoxidável austenítico ABNT 304 realizado por Ávila *et al.* (2004), foram utilizados os seguintes parâmetros de usinagem: velocidades de corte de 200, 250 e 300 m/min, avanços de 0,15; 0,21 e 0,30 mm/rev e profundidades de usinagem de 0,5;

0,75 e 1 mm. O experimento foi realizado em condições diferentes de lubri-refrigeração: a seco, fluido sintético com aditivo de cloro, fluido sintético com aditivo de enxofre e fluido sintético com aditivo de cloro e base lubrificante de cadeia longa. Quando se emprega avanço e profundidade de usinagem constante de 0,15mm/rev e 1,0 mm, respectivamente, a elevação da velocidade de corte não influencia o acabamento superficial da peça e, em geral, o fluido sintético com aditivo de cloro apresenta valores mais baixos de  $R_a$ . Ao se manter a velocidade de corte constante em 250 m/min e a profundidade de usinagem em 1,0 mm, o aumento do avanço afeta de modo acentuado a rugosidade para todas as condições de lubri-refrigeração. Para essa configuração, o fluido de corte que proporcionou valores mais baixos de rugosidade foi o fluido sintético com aditivo de cloro e base lubrificante de cadeia longa.

Ainda no mesmo estudo, ao se manter a velocidade de corte constante em 250 m/min e o avanço em 0,15 mm/rev, a variação da profundidade de usinagem não apresenta variações representativas em nenhuma das condições de usinagem. A utilização do fluido de corte para todas as condições de corte contribui para a redução das forças de usinagem, que pode estar relacionada à redução das vibrações durante o torneamento. Os fluidos que apresentaram melhores resultados foram os que possuem cloro em sua composição, mostrando-se mais promissores na usinagem dessa classe de material.

Nascimento *et al.* (2019) empregaram os seguintes parâmetros de usinagem durante o torneamento do aço inoxidável superduplex UNS S32750: velocidades de corte de 160 e 180 m/min, avanços de 0,1 e 0,20 mm/rev e profundidades de usinagem de 0,4 e 1,0 mm. De acordo com os resultados, o avanço é o parâmetro com maior influência sobre  $R_a$ , seguido pela interação entre velocidade de corte e avanço, ao passo que a velocidade de corte se fixa como o terceiro fator mais importante para a rugosidade. O aumento da velocidade de corte reduz a vibração no sistema ferramenta-peça e influencia a geração de calor, o que contribui para o amolecimento térmico do material, diminuindo os esforços de corte. Por sua vez, a elevação do avanço influi negativamente sobre a rugosidade do material, uma vez que amplia as marcas de usinagem deixadas na peça devido ao aumento da distância entre picos e vales. Portanto, os melhores resultados obtidos foram com velocidade de corte de 180 m/min, avanço de 0,1 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,4 mm.

Por meio dos estudos abordados e da Figura 6.5, conclui-se que o fator mais importante para o acabamento superficial durante o torneamento de aços inoxidáveis é o avanço. O aumento desse parâmetro resultou em uma maior distância entre vales e picos para todos os experimentos avaliados e apresentou interferência na rugosidade da superfície obtida. A elevação da velocidade de corte influi positivamente sobre a rugosidade da superfície

torneada. O aumento de  $v_c$  eleva a temperatura de corte e promove o amolecimento térmico, fenômeno que reduz o esforço de corte.

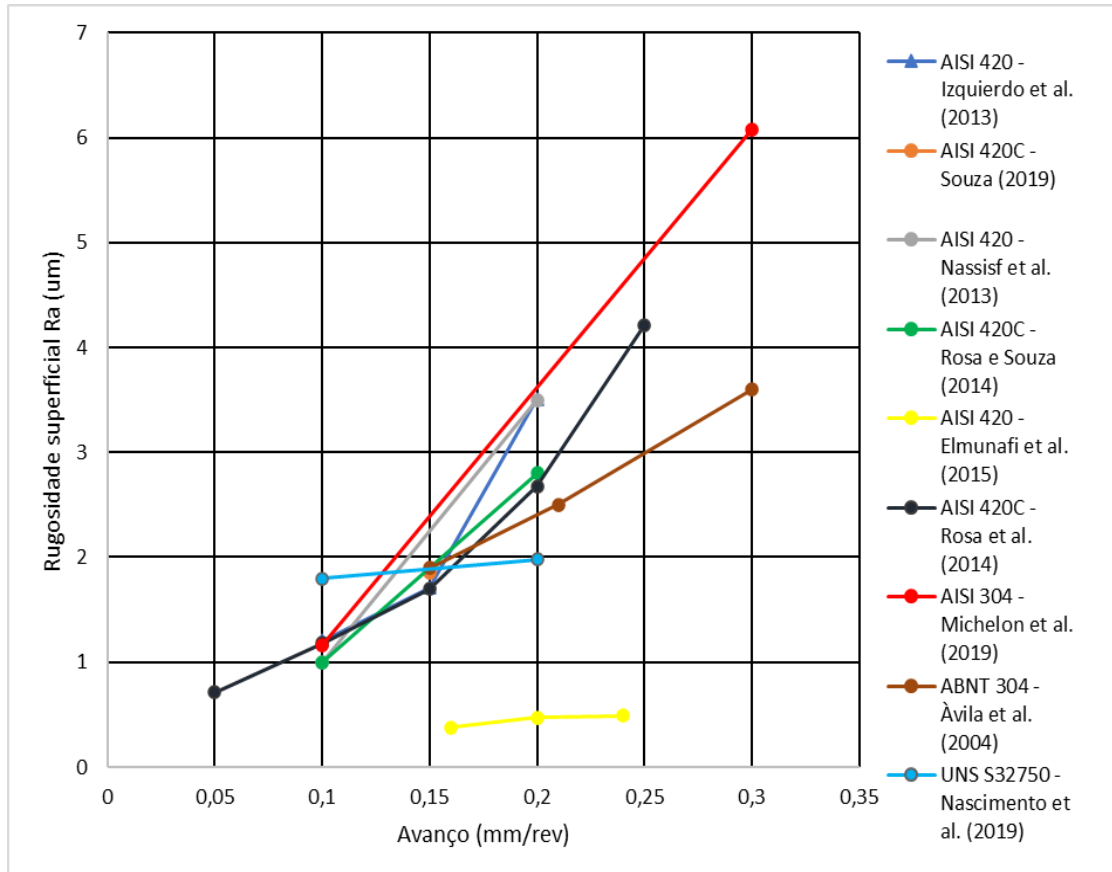


Figura 6.5: Rugosidade média aritmética em função do avanço  
Fonte: autor (2020).

A profundidade de usinagem apresentou menor influência sobre a rugosidade das peças torneadas se comparadas aos parâmetros anteriores, visto que o aumento de  $a_p$  não influenciou em uma acentuada elevação da rugosidade. Os fluidos de corte apresentaram melhora ínfima para a rugosidade e, devido aos resultados pouco expressivos, conclui-se ser mais viável economicamente a utilização do corte a seco, o qual ainda não apresenta riscos ao ambiente e ao operador.

## 6.2 Alterações Microestruturais

A microestrutura de um material possui grande relevância em suas propriedades mecânicas e em suas aplicações dentro do campo da engenharia. Ademais, está intimamente relacionada às transformações de fases pelo componente em análise, ANDRADE (2015). De acordo com Santos e Salles (2008), as transformações metalúrgicas são provenientes das altas

temperaturas e da elevada força de usinagem às quais os componentes são submetidos durante o corte. Dentre essas alterações, ressaltam-se as deformações plásticas, microtrincas, transformações de fases, fragmentos de arestas postiças, tensões residuais e ataque intergranular.

Conforme Machado *et al.* (2015), alterações microestruturais podem ocorrer devido às altas temperaturas durante o corte, principalmente dos aços que passam por têmpera e revenimento. Se a temperatura de austenitização é alcançada, seguida de resfriamento lento, é produzida uma camada conhecida como martensita revenida, que tem como característica a redução da dureza e da resistência ao desgaste. Contudo, se a temperatura de austenitização do aço é alcançada, combinada com o resfriamento rápido, as camadas afetadas se transformam em martensita não revenida, também chamada de camada branca, possuindo como características dureza e fragilidade elevadas.

Segundo Rosa (2017), a camada branca é assim conhecida devido à sua característica de não reagir com as substâncias utilizadas em ataques para revelação da microestrutura. O surgimento da camada branca é oriundo dos processos de remoção de material e está relacionado a deformação, aquecimento, resfriamento e processo de usinagem empregado. Ressalta-se que os aços inoxidáveis austeníticos possuem elevada tendência a sofrerem alterações nas camadas subsuperficiais devido à deformação plástica proveniente do processo de usinagem. Embora os aços inoxidáveis austeníticos não sejam endurecíveis via tratamento térmico, esta classe possui elevada tendência ao endurecimento por transformação martensítica sob deformação em baixas temperaturas. Segundo Andrade (2015), o comportamento mecânico do aço inoxidável AISI 304 é influenciado pela instabilidade da austenita mediante deformação, favorecendo o endurecimento a temperaturas críticas abaixo da de fim da transformação martensítica.

No estudo sobre o torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 420C com durezas de 48 e 53 HRC desenvolvido por Rosa (2017), a verificação da camada alterada foi realizada por meio de microscopia óptica após embutimento, polimento e ataque químico. Os ensaios com o material de menor dureza foram realizados com velocidades de corte de 60 e 80 m/min, avanços de 0,1 e 0,2 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,5 mm. Já os experimentos com o material de maior dureza foram realizados com velocidades de corte de 50, 60 e 70 m/min, avanços de 0,08; 0,1 e 0,12 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,4 mm. A elevação da dureza do material associada ao aumento da velocidade corte para 70 m/min e do desgaste da ferramenta para  $V_{BB}=0,2$  mm foram os fatores responsáveis pela alteração microestrutural. Tal alteração aconteceu para todos os valores de avanço com a

combinação descrita anteriormente. As mudanças nas camadas subsuperficiais foram sutis, entre 1 e 3  $\mu\text{m}$ , e estão associadas às altas temperaturas geradas no corte, que foram suficientemente altas para modificarem a microestrutura do material.

Durante o torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304 realizado por Barbosa (2014), os cavacos utilizados para verificar as mudanças microestruturais foram obtidos com os seguintes parâmetros de corte: velocidade de corte de 89,37 m/min, avanço de 0,205 mm/rev e profundidade de usinagem de 2 mm. Evidenciou-se transformação martensítica nas amostras deformadas no ensaio com barra de Hopkinson em uma taxa de deformação de  $1,487 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ , sendo que os resultados são explicados pelas diferentes taxas de deformação que estão relacionadas à temperatura atingida durante o processo de deformação, isto é, quanto menores a temperatura e a taxa de deformação, maior a quantidade de martensita induzida por deformação no material. Sendo assim, os resultados sugerem que a formação do cavaco dos aços inoxidáveis austeníticos não é governada por transformações de fases induzidas por deformação. Este resultado diverge da literatura que associa a transformação de fases a elevada deformação oriunda do processo de usinagem. A deformação em baixas temperaturas do aço AISI 304 favorece o endurecimento por transformação martensítica.

### **6.3 Variação de Dureza**

A dureza de um material pode ser compreendida como a resistência à deformação plástica ou como a capacidade de resistir à penetração de um indentador sob carga. A avaliação dessa propriedade do material pode ser utilizada para a verificação dos efeitos de um tratamento térmico ou até mesmo de um processo mecânico e de usinagem pelo qual o material passou. Segundo Cangussu (2020), a dureza pode estar relacionada à resistência à flexão, risco, abrasão ou corte, sendo que uma maior dureza superficial pode favorecer o aumento da resistência ao desgaste de um material.

Entre os ensaios de dureza realizados, o método de medição Brinell tornou-se um dos mais aplicados industrialmente devido à sua robustez e consiste em comprimir uma esfera de aço temperado contra uma camada plana e polida de um aço qualquer. Segundo Stemmer (1993), o aumento da dureza de um material acarreta maior força e potência de usinagem, e o trabalho a frio de um material provoca seu encruamento e eleva sua dureza.

Segundo Krabbe (2006), o endurecimento por deformação de um aço inoxidável pode acarretar mudanças na estrutura do material e aumentar consideravelmente a dureza superficial, fenômeno característico em aços inoxidáveis austeníticos e superausteníticos. Em

decorrência dessa maior dureza, é possível que haja o desgaste acentuado das ferramentas de corte, embora a seleção de uma profundidade de corte que garanta a aresta de corte esteja abaixo da camada endurecida, podendo mitigar os efeitos indesejáveis do endurecimento superficial da peça sobre a vida do inserto de corte.

De acordo com Silva (2016), o ensaio de microdureza é utilizado para definir o perfil de variações de dureza ao longo da seção da amostra. De posse dessas medições, é possível traçar suas propriedades mecânicas e definir a profundidade de têmpera ou de outros tratamentos térmicos e da dureza de microconstituintes individuais de uma microestrutura.

Segundo a norma ASTM E384-17, os testes de microdureza podem ser realizados com indentadores Knoop e Vickers sob forças de  $9,8 \times 10^{-3}$  a 9,8 N, ou seja, de 1 a 1000 gf. A Figura 6.6 apresenta as geometrias dos indentadores e suas particularidades, como a diferença de ângulos entre os dois modelos.

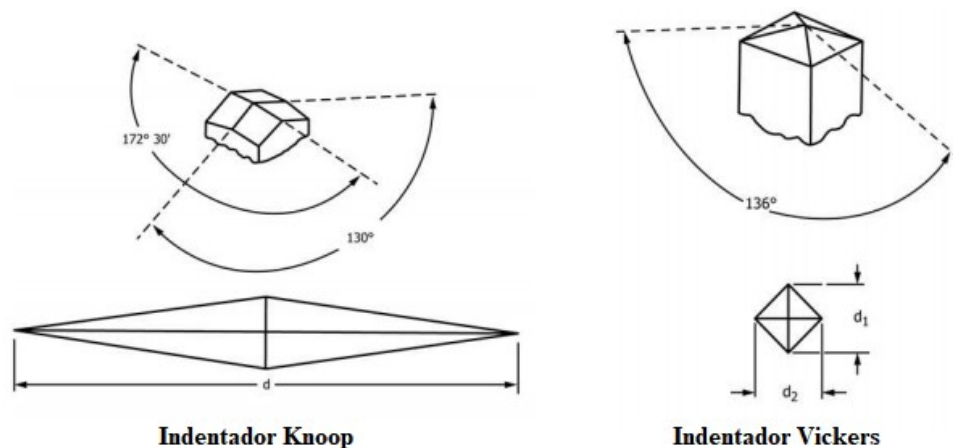


Figura 6.6: Indentadores Knoop e Vickers.  
Fonte: adaptado de ASTM E384 (2017).

Após o torneamento do aço inoxidável supermartensítico ASTM CA6NM sob lubri-refrigeração, Santos (2019) avaliou a variação de dureza nos cavacos obtidos. Foi empregada uma carga de 30 kgf durante 15 segundos e percebeu-se que os resultados de dureza para este material apresentaram variação na faixa de 283 a 290 HV. Os parâmetros de corte foram mantidos constantes, exceto meio lubri-refrigerante e a velocidade de corte que variou entre 150 e 250 m/min. A microdureza dos cavacos apresentou elevação devido ao aumento da velocidade de corte, resultado já esperado, pois uma condição mais severa de usinagem resulta em maiores alterações mecânicas (deformações plásticas, trincas, tensões superficiais e microdureza), portanto, a microdureza pode ser facilmente modificada através do processo de usinagem. O emprego de fluido de corte apresentou pouca interferência nos resultados para

velocidade de corte de 150 e 200 m/min, entretanto para  $v_c=250$  m/min o emprego de lubri-refrigeração resultou em uma redução de microdureza. Este resultado pode estar relacionado à preservação da ferramenta de corte, e conseqüentemente, em menores valores de forças de usinagem. O aumento da microdureza com o aumento da velocidade de corte é relacionado ao encruamento da superfície do material, que pode ter contribuído para elevação das forças de usinagem. O emprego da maior velocidade de corte sem o uso de fluido de corte resultou em uma dureza do cavaco superior a 450 HV.

Ao estudar a influência da microestrutura na usinabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos AISI 630 com e sem adição de cálcio, AISI 630 e AISI 630UF, Matsumoto, Minatogawa e Gallego (2005) utilizaram amostras com dureza aproximada de 327 HV e parâmetros de usinagem constantes: velocidade de corte de 250 m/min, avanço de 0,25 mm/rev e profundidade de usinagem de 1 mm. Foram realizadas medidas de microdureza Vickers com carga de 0,2 N no corpo de prova e no cavaco, visto que os corpos de prova não apresentaram variação de dureza. Ocorreram variações de microdureza no cavaco independentemente do aço ensaiado, comprovando a ocorrência do encruamento na região deformada. Também constatou-se que não houve alterações significativas na propriedade mecânica que pudessem ser atribuídas à adição de cálcio. Entretanto, a presença de cálcio e enxofre no aço AISI 630UF favoreceu a formação de um número maior de inclusões em comparação ao aço inoxidável convencional.

Marques *et al.* (2016) avaliaram a influência do torneamento a seco sobre a integridade superficial do aço inoxidável austenítico ASTM F138 e AISI 316L em termos de variação de dureza. Os parâmetros de usinagem aplicados foram velocidade de corte constante de 190 m/min, avanços 0,1 e 0,3 mm/rev e profundidades de usinagem de 0,5 e 3,0 mm. Notou-se que os valores de microdureza variaram de acordo com a modificação dos parâmetros de corte. Por exemplo, durante o experimento com avanço constante de 0,1 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,5 mm, foram obtidos resultados de dureza acima de 400 HV até a profundidade de 0,12 mm. Os valores de dureza para o aço AISI 316L apresentaram elevação mínima, entretanto, o aço ASTM F138 apresentou dureza superficial de aproximadamente 500 HV. Mantendo-se o avanço constante e elevando os valores de profundidade de usinagem para 3,0 mm, o aumento da dureza atingiu aproximadamente 0,14 mm de profundidade. Ressalta-se que os valores máximos de dureza possuíram expressiva alta em comparação ao experimento anterior, constatando-se que o AISI 316L apresentou elevado endurecimento ao saltar para aproximadamente 600 HV. Entretanto o aço ASTM F138 não apresentou elevação de dureza superficial se comparado ao teste anterior.

Ainda no mesmo estudo, elevando-se o avanço para 0,3 mm/rev e com profundidade de usinagem de 0,5 mm, os valores de dureza próximos à superfície (0,02 mm) variaram entre 550 a 600 HV, resultados que cruzam a faixa de 400 HV em valores de profundidade em relação à camada superficial do corpo de prova a partir de 0,16 mm. Utilizando-se a combinação máxima de avanço e profundidade de usinagem, 0,3 mm/rev e 0,3 mm, respectivamente, observou-se que a variação de dureza aconteceu a partir de 0,2 mm de profundidade e os valores de dureza próximos à camada superficial (0,02 mm) para o AISI 316L chegaram a 650 HV. Além disso, para todos os experimentos, a elevação dos parâmetros de usinagem ocasionou o aumento da microdureza do material analisado. Portanto, a combinação máxima dos parâmetros resultou em maior dureza próxima à superfície e maior espessura modificada. Ressalta-se que para o aço ASTM F138, os valores de dureza na superfície variam entre 500 e 550 HV, ao passo que para o aço 316L foram obtidos valores compreendidos entre 430 e 685 HV.

Krolczyk *et al.* (2014) adotaram os seguintes parâmetros durante o torneamento do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541: velocidades de corte de 50, 100 e 150 m/min, avanços de 0,20; 0,30 e 0,40 mm/rev e profundidade de usinagem constante de 1,0 mm. Ressalta-se que o valor inicial de microdureza sob a superfície usinada está na faixa de 270 a 290 HV. Ao variar o avanço (com velocidade de corte constante de 50 m/min), constatou-se que os maiores valores de microdureza (entre 250 a 270 HV) foram obtidos para avanços de 0,3 e 0,4 mm/rev, com valores máximos de profundidade de endurecimento de 140  $\mu\text{m}$ . Elevando-se a velocidade de corte para 100 m/min e 150 m/min, os resultados de microdureza não ultrapassaram o valor de 290 HV para nenhum dos avanços utilizados. Os valores de profundidade de endurecimento para os dois experimentos foram semelhantes e apresentaram endurecimento de até 220  $\mu\text{m}$ .

Ainda no mesmo estudo, foi investigada a influência da velocidade de corte na microdureza do material. Notou-se que para todas as combinações a microdureza não ultrapassou o valor de 290 HV, entretanto, o valor de profundidade de endurecimento é elevado segundo o aumento da velocidade de corte. Para velocidade de corte de 150 m/min e avanço de 0,04 mm/rev, foi encontrada a maior profundidade de endurecimento, qual seja, aproximadamente 220  $\mu\text{m}$ . Diante dos resultados, conclui-se que o avanço não foi determinante para o aumento da microdureza do material e que o aumento na velocidade de corte aumenta a profundidade de endurecimento em um valor médio de 83%.

Naves (2013) utilizou parâmetros de corte constantes no torneamento do aço inoxidável austenítico ABNT 316UF, concentração de fluido de corte de 5 e 10%, além do



corte a seco e com fluido de corte pressurizado. A dureza superficial do material antes da usinagem variou entre 161 a 173,5 HB. A medição da microdureza foi realizada nos cavacos obtidos durante o torneamento, a uma distância de 25  $\mu\text{m}$  da parte inferior do cavaco. Em geral, os resultados indicaram que a concentração do fluido de corte não influenciou os resultados de microdureza. Além disso, a utilização de fluido de corte em todas as formas de aplicação provocou a redução da microdureza se comparada ao experimento a seco, que apresentou os maiores valores de microdureza (resultado atribuído à alta tendência de encruamento que os aços inoxidáveis apresentam durante a usinagem sob temperaturas elevadas). A utilização de fluido de corte com pressão de 15 e 20 MPa com concentração de 5% proporcionou os menores valores de microdureza.

No torneamento a seco do aço inoxidável austenítico ABNT 304, Dias *et al.* (2017) utilizaram os seguintes parâmetros de usinagem: velocidades de corte de 160 e 175 m/min, avanços de 0,10 e 0,15 mm/rev e profundidade de usinagem constante de 2 mm. Observou-se que quando associados o avanço mais elevado e a velocidade de corte mais baixa, maiores valores foram registrados. Entretanto, esse valor está muito próximo de outros dois experimentos com as seguintes configurações: velocidade de corte de 175 m/min e valores de avanço de 0,10 e 0,15 mm/rev. Estes resultados evidenciam a influência do avanço sobre a microdureza para a velocidade de corte mais baixa, embora com o aumento da velocidade de corte o avanço apresente pouca relevância no resultado superficial. Portanto, nota-se que a elevação do avanço combinado com velocidade de corte de 160 m/min, contribui para o aumento do contato entre peça-ferramenta e da espessura do cavaco, que induzem a maiores valores de forças de usinagem e microdureza.

Para o torneamento de acabamento do aço inoxidável superaustenítico ASTM A744 realizado por Gravalos *et al.* (2010), foram utilizados os seguintes parâmetros de usinagem: velocidade de corte constante de 60 m/min, avanços de 0,10 e 0,20 mm/rev, profundidade de usinagem de 0,2 e 0,4 mm e ângulo de saída da ferramenta de 0 e 10°. As amostras possuíam  $212 \pm 11$  HV de dureza superficial antes da usinagem e foi utilizado um fluido de corte emulsionável com concentração de 6%. Observou-se que todas as combinações de parâmetros resultaram em uma camada superficial endurecida. A dureza máxima encontrada após o torneamento de acabamento foi de  $403 \pm 29$  HV com uma espessura média de  $173 \pm 58$   $\mu\text{m}$ . O perfil de variação de dureza é apresentado na Figura 6.7, onde nota-se uma camada endurecida próxima à superfície. Portanto, a formação de uma camada superficial endurecida por encruamento ficou evidente sob todos os parâmetros de usinagem. Além disso, houve maior endurecimento para as amostras que torneadas com avanço mais baixo, resultado que

diverge da literatura que vincula o aumento do avanço com o aumento da espessura da camada encruada e da microdureza. A camada endurecida pelo processo prévio foi totalmente eliminada na operação de acabamento.

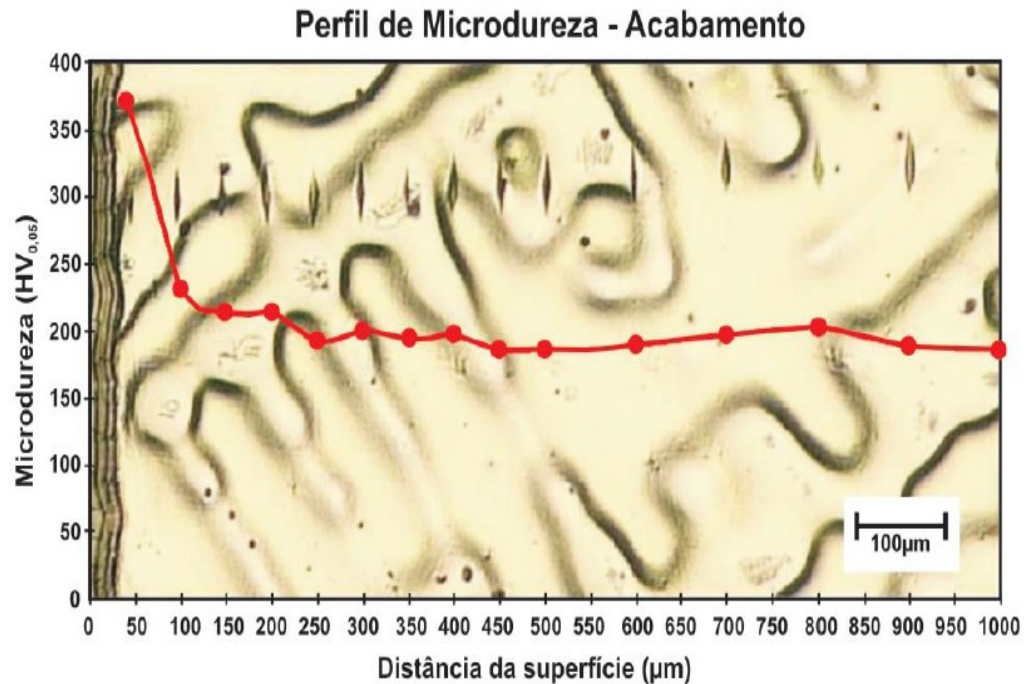






Figura 6.7: Perfil de microdureza com  $v_c = 60$  m/min,  $f = 0,2$  mm/rev,  $a_p = 0,4$  mm e  $\gamma_o = 10^\circ$ .  
Fonte: Gravalos *et al.* (2010).

Fernandes (2018) realizou testes de torneamento do aço inoxidável superduplex UNS S32750 com os seguintes parâmetros de usinagem: velocidade de corte de 100 m/min, avanços de 0,116; 0,223; 0,297 e 0,490 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,25 mm. Todas as superfícies apresentaram aumento de dureza superficial após o processo de torneamento. A superfície do material não usinado apresentou dureza média de 48,4 HRA, enquanto os materiais usinados apresentaram média de dureza mais elevada, chegando a 68,6 HRA. Devido a essa variação dos resultados, percebeu-se que o processo de usinagem, assim como o aumento do avanço, promoveu o endurecimento da superfície, embora os resultados apresentem elevação até o avanço de 0,297 mm/rev. É possível relacionar o aumento da dureza ao maior esforço de corte, de modo que quanto maior a força de usinagem, maiores serão o encruamento e a quantidade de discordâncias no material. Portanto, infere-se que a camada encruada prejudica a usinabilidade do material devido ao aumento da dureza superficial.

A Tabela 6.1 apresenta a influência das condições de usinagem nos resultados de microdureza dos materiais usinados. Observa-se que o aumento dos valores de avanço e profundidade de usinagem induz a elevação da microdureza, ao passo que o aumento de  $v_c$  e o emprego de fluido de corte colaboram para a redução dos valores obtidos.

Tabela 6.1: Influência das condições de usinagem na microdureza dos aços inoxidáveis.

Parâmetro de corte	Efeito sobre a microdureza
Aumento da velocidade de corte	
Aumento do avanço	
Aumento da profundidade de usinagem	
Uso de fluido de corte	

Fonte: autor (2020).

Por meio dos estudos analisados, conclui-se que o aumento do avanço e da profundidade de usinagem possuem influência sobre a variação de dureza dos aços inoxidáveis. A elevação destes parâmetros contribui para o aumento das forças de usinagem, conseqüentemente, o encruamento durante a usinagem é maior devido a elevada deformação plástica.

O aumento da velocidade de corte em certas faixas, reduz a força de usinagem devido ao amaciamento térmico do material, fenômeno que facilita a usinagem proporcionando menores esforços de corte e maior facilidade na formação do cavaco, entretanto, para elevados valores de velocidade de corte o aumento da temperatura pode representar uma condição mais severa de usinagem, resultando no desgaste acentuado da ferramenta e no aumento da microdureza.

A utilização de fluido de corte contribuiu de forma efetiva para a obtenção de menores valores de microdureza se comparados ao corte a seco. A aplicação de fluidos preserva a aresta de corte e proporciona condições de usinagem mais favoráveis devido às menores forças de usinagem. A utilização dos métodos de lubri-refrigeração permite o corte com temperaturas mais baixas, ao contrário do corte a seco, que promove elevadas temperaturas

durante o torneamento e que associadas à elevada tendência de encruamento dos aços inoxidáveis resultam em uma maior variação de dureza do material.

#### 6.4 Tensões Residuais

Tensões residuais se originam por meio da interação entre tempo, temperatura, deformação e microestrutura ASM (2002). Configuram uma tensão existente em um corpo depois de removidas as cargas externas e podem ser de origem mecânica ou térmica. De acordo com Withers e Bhadeshia (2001), as tensões residuais podem ter origem de processos térmicos ou mecânicos, como soldagem, deformação plástica e usinagem. As tensões residuais são indicadas como a principal causa de falhas em componentes, influenciando a resistência à corrosão e ao desgaste e a vida em fadiga.

Quando submetidos a operações de usinagem, o estudo das tensões residuais e a análise do comportamento das propriedades mecânicas dos materiais torna-se relevante para a determinação da vida do componente. Segundo Barbosa e Souza (2016), a presença de tensões residuais compressivas na superfície do componente aumenta a vida em fadiga, pois reduz a probabilidade de propagação de trincas. Em contrapartida, tensões trativas podem se somar às tensões de trabalho induzindo a ruptura prematura do componente.

De acordo com Bordinassi (2006), durante o torneamento de um aço, os parâmetros de usinagem que apresentam maior relevância na tensão residual de um material são a velocidade de corte e o ângulo de saída da ferramenta, pois afetam a temperatura de usinagem e a deformação do material. Segundo Capello (2005), os parâmetros de usinagem que afetaram de forma mais incisiva as tensões residuais durante o torneamento são o avanço e o raio de ponta da ferramenta.

Para Machado *et al.* (2015), as tensões residuais de tração são mais frequentes durante o processo de torneamento. Parâmetros de usinagem como altas velocidades de corte, que provocam a elevação da temperatura de usinagem, podem contribuir para o surgimento de tensões residuais de tração na superfície devido ao efeito térmico exceder a influência da ação mecânica. Segundo Norcino (2013), durante os processos de fresamento, torneamento e retificação, o efeito mecânico é predominante quando se utilizam baixas velocidades de corte. Em contrapartida, na usinagem com altas  $v_c$ , o efeito térmico é prevalente.

Ao analisar as tensões residuais geradas no torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304L, Cruz *et al.* (2013) realizaram operações de desbaste e acabamento com diferentes parâmetros. Para a usinagem de desbaste foi utilizada velocidade de corte constante de 165

m/min, avanço de 0,3 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,6 e 0,8 mm. Observa-se que para todas as amostras ocorreu um aumento significativo das tensões residuais longitudinais tratativas, passando de uma média de 200 MPa para 600 MPa. Na comparação entre os experimentos com profundidade de usinagem variável, todas as amostras apresentaram tensões residuais longitudinais tratativas de aproximadamente 600 MPa, revelando pouca relevância. Tratando-se dos experimentos do torneamento de acabamento, foram utilizadas velocidade de corte constante de 265 m/min, avanço de 0,1 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,2 e 0,4 mm, tendo as tensões residuais longitudinais permanecido em torno de 200 MPa, valor próximo ao obtido antes da usinagem das amostras. Para a operação de acabamento, a variação de profundidade de usinagem apresentou diferença nos resultados de tensões residuais longitudinais. A profundidade de corte de 0,2 mm resultou em valores mais elevados, de média de 230 MPa, se comparados a  $a_p$  de 0,4 mm, que apresentou resultados de 130 MPa.

Ainda no mesmo estudo, analisaram-se as tensões residuais circunferenciais das amostras. De acordo com os resultados obtidos, constatou-se que aquelas atingiram magnitudes superiores, alcançando médias acima de 1200 MPa para a operação de desbaste. Os resultados obtidos podem estar associados às bruscas mudanças microestruturais próximas à superfície das amostras devido às elevadas taxas de encruamento. Esse aumento das tensões residuais pode causar a redução significativa na vida em fadiga do componente usinado e de sua resistência à corrosão.

Silva (2013) avaliou a influência dos parâmetros de usinagem sobre as tensões residuais durante o torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 420C. As amostras utilizadas no experimento apresentaram durezas médias de 218 HB sem tratamento térmico e 273,5 HB com tratamento térmico. Os parâmetros de usinagem aplicados foram: velocidade de corte de 180 m/min, avanços de 0,1 e 0,2 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,4 e 0,8 mm. A usinagem foi realizada a seco e com fluido de corte. Por meio dos resultados, observou-se que as tensões residuais encontradas nas amostras foram tratativas e que a variação do avanço, dureza e profundidade de usinagem provocaram a elevação dos valores de tensão residual devido ao aumento das forças de usinagem. De acordo com a Figura 6.8, a utilização de fluido lubrificante refrigerante acarretou em uma menor diferença de tensões residuais quando comparados desbaste e acabamento. Entretanto, o emprego de fluido de corte na operação de acabamento resultou no aumento das tensões residuais. Esse fenômeno pode ser explicado pela elevada capacidade de endurecimento do AISI 420C, quando este é resfriado rapidamente a partir de temperaturas elevadas em uma pequena área de seção de corte. Esse

aumento não ocorreu na operação de desbaste, no qual a área de seção de corte é maior, e o resfriamento é mais lento se comparado ao experimento anterior.

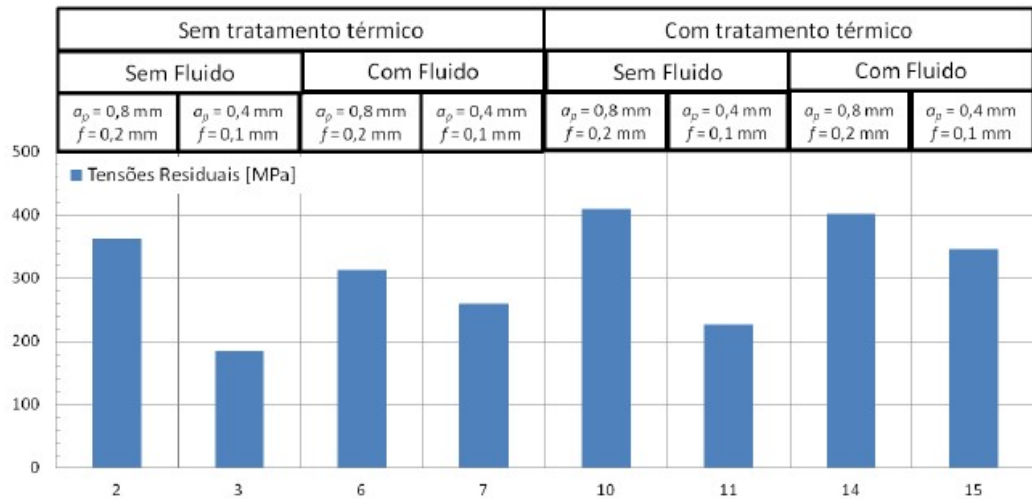


Figura 6.8: Resultados de tensões residuais.  
Fonte: Silva (2013).





No estudo das tensões residuais geradas durante o torneamento de acabamento do aço inoxidável martensítico AISI 420, Izquierdo *et al.* (2013) utilizaram parâmetros de usinagem constantes: velocidades de corte de 290 m/min, avanço de 0,15 mm/rev e profundidade de usinagem de 1,0 mm. A comparação do estudo foi realizada entre as ferramentas com aresta alisadora e convencional, ambas com raio de ponto de 0,4 mm. Os resultados apresentaram tensões compressivas nos dois experimentos, o que pode ser atribuído ao maior efeito mecânico quando comparado ao efeito térmico, embora a utilização de elevadas velocidades de corte contribuíssem para o aumento dos efeitos térmicos e, conseqüentemente, para o surgimento de tensões residuais de tração. A ferramenta convencional apresentou melhores resultados se comparada à ferramenta com aresta alisadora, uma vez que as tensões residuais compressivas foram menores nesta. Atribui-se esse resultado à microgeometria diferenciada da ferramenta, a qual pode ter contribuído para o aumento da força de usinagem, microdureza e temperatura usinagem.

No torneamento do aço inoxidável superduplex UNS J93380 com dureza de 290 HB, Bordinassi (2006) utilizou os seguintes parâmetros de usinagem: velocidades de corte de 110 e 150 m/min, avanços de 0,1; 0,2 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,25 e 0,50 mm. A usinagem foi realizada a seco e com aplicação de fluido refrigerante. Os insertos empregados são pertencentes a classe M e possuíam classificações VNMG-160404-MF-GC1025 e VNMG-160404-MF-GC2015. Notou-se que com o aumento da velocidade de corte foram

obtidos menores valores de tensão residual. Inversamente, o aumento do avanço contribuiu para a elevação das tensões residuais. A profundidade de usinagem apresentou pouca relevância nos valores médios analisados, entretanto a elevação desse parâmetro acarretou um pequeno aumento dos resultados. O inserto de designação GC-1025 com cobertura PVD TiAlN apresentou resultados de tensões residuais inferiores ao inserto GC-2015 com cobertura CVD TiCN – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TiN. Por meio dos resultados, observou-se que o aumento da velocidade de corte contribuiu para o amaciamento térmico e reduziu as forças de usinagem. O aumento do avanço elevou as taxas de encruamento, o que acarretou em tensões residuais trativas superiores. Quanto ao inserto empregado, a cobertura apresentou elevada influência nos resultados devido às mudanças no atrito entre peça e ferramenta, que colaboraram para a geração de tensões. O aumento do atrito está associado aos fenômenos térmicos e aos esforços de corte, que também são responsáveis pela geração de tensões residuais.

A Tabela 6.2 apresenta a influência das condições de usinagem no surgimento de tensões residuais trativas. Observa-se que a elevação de todos os parâmetros de usinagem, assim como a utilização de fluido de corte, acarreta no surgimento e na elevação das tensões residuais trativas.

Tabela 6.2: Influência das condições de usinagem nas tensões residuais trativas.

<b>Parâmetro de corte</b>	<b>Efeito sobre a microdureza</b>
Aumento da velocidade de corte	
Aumento do avanço	
Aumento da profundidade de usinagem	
Uso de fluido de corte	

Fonte: autor (2020).

De acordo com os estudos analisados, conclui-se que elevados valores de velocidade de corte e, conseqüentemente, de temperatura tendem a gerar tensões residuais de tração na superfície. A utilização de baixos valores de  $v_c$  no processo de torneamento não contribuiu

para o surgimento de tensões residuais de origem compressiva na superfície. Portanto, os efeitos térmicos para os estudos abordados são prevaletes sobre os efeitos mecânicos.

A elevação do avanço contribuiu para o aumento dos esforços de corte e das tensões residuais para todos os estudos. Maiores valores de  $f$  contribuem para o aumento do encruamento superficial e para a elevação das forças de usinagem, fatores esses que promovem o endurecimento superficial e mudanças de microestrutura. O aumento da profundidade de usinagem não possui relevância similar ao avanço, entretanto valores mais elevados promoveram variações nos resultados de tensões residuais.

A utilização de fluido de corte auxiliou na elevação das tensões residuais, pois promoveu, de modo súbito, o resfriamento da peça e contribuiu para a elevação da microdureza. O revestimento da ferramenta de corte promoveu mudanças no comportamento tribológico entre ferramenta e peça, ao passo que a cobertura TiAlN apresentou menores resultados de forças de usinagem e desgaste de ferramenta, mitigando os fenômenos térmicos associados à geração de tensões residuais.

## 6.5 Resistência à Fadiga

A fadiga mecânica de uma peça pode ser explicada como um dano localizado e progressivo que ocorre em elementos que estão expostos a cargas cíclicas repetidas. Em determinadas circunstâncias, essas cargas podem ter resultados inferiores à tensão de escoamento do material, MARTINS (2019). De acordo com Leal *et al.* (2019), a fratura por fadiga geralmente se inicia com uma trinca microscópica em um determinado local onde se concentra uma elevada tensão, na qual frequentemente existe um concentrador de tensão geométrico.

Além disso, segundo Klocke (2015), durante a operação de torneamento interrompido ou fresamento, o material do inserto de corte está sujeito à elevada tensão mecânica alternada, de modo que essa variação da pressão dinâmica possibilita a falha por fadiga. Nas operações de usinagem descritas anteriormente, as mudanças consecutivas dos esforços de corte levam ao surgimento de trincas paralelas no inserto de metal duro.

De acordo com Machado *et al.* (2015), o processo de ruptura de um componente possui quatro etapas, que podem ser descritas da seguinte maneira: formação da trinca, crescimento da trinca em banda de deslizamento, crescimento da trinca nos planos de alta tensão e ruptura final estática. A resistência à fadiga é apontada como uma importante propriedade dinâmica, a qual é influenciada pela textura e integridade superficial do elemento,



podendo ambos fatores serem decisivos para a vida de peças usinadas (SANTOS; SALES, 2007).

Conforme Aguiar (2012), as tensões residuais possuem importante influência na resistência à fadiga de um material. As tensões de compressão são favoráveis às propriedades mecânicas de um componente, pois aumentam a resistência à fadiga. Por outro lado, as tensões residuais de tração possuem efeitos danosos, uma vez que possibilitam a formação de trincas.

No estudo sobre o perfil de tensões residuais e resistência à fadiga induzidas durante no torneamento de acabamento do aço inoxidável superduplex UNS S32507, Aguiar (2012) utilizou os seguintes parâmetros de usinagem: velocidades de corte de 80 m/min, profundidade de usinagem de 1,0 mm e avanço de 0,25 e 0,4 mm/rev. As ferramentas empregadas no estudo possuíam as seguintes coberturas: TiN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN, ambas realizadas pelo processo CVD e TiAlN e pelo processo PVD. Observou-se que com o aumento do avanço, a tensão residual de tração aumentou para todos os experimentos. Durante o torneamento com avanço de 0,4 mm/rev, a ferramenta com revestimento de TiAlN promoveu os maiores valores de tensão residual próximo à superfície do material (entre 0 e 20 µm). Os resultados de tensão residual nas subcamadas próximas à superfície são importantes, tendo em vista que elevados valores podem implicar resistência à fadiga do material durante sua aplicação e reduzir sua vida útil, concluindo-se, pois, que a elevação do avanço apresenta influência na resistência à fadiga. A utilização de ferramentas com revestimentos CVD apresentou melhores resultados, os quais podem ser atribuídos ao arredondamento da aresta devido ao processo de deposição.

Rosa (2017) analisou as tensões residuais circunferenciais e sua influência na resistência à fadiga durante o torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 420C. Os parâmetros de usinagem utilizados durante o experimento foram: velocidade de corte de 50, 60 e 70 m/min, avanços de 0,08; 0,10 e 0,12 mm/rev e desgaste de flanco de 0,0 0,1 e 0,2 mm. Por meio da Figura 6.9, observa-se que com o aumento do desgaste de flanco as tensões residuais tenderam a realizar a transição de compressivas para trativas devido à transição de efeitos mecânicos para efeitos térmicos. Para o corte com ferramenta nova, a elevação do avanço aumentou as tensões residuais e a velocidade de corte de 60 m/min apresentou resultados muito superiores às demais. A elevação do desgaste aumentou drasticamente os valores de tensão residual para a maioria dos experimentos realizados. Portanto, o desgaste de flanco é o principal parâmetro de influência no torneamento desse material, realçando a importância da substituição do inserto antes que a qualidade superficial seja comprometida,

principalmente em peças nas quais se exige elevada resistência à fadiga, ou seja, nas quais uma maior tensão residual compressiva é desejada. Sendo assim, o torneamento com ferramenta nova se faz necessário, pois essa condição está associada à redução das tensões residuais trativas e a uma maior resistência à fadiga.

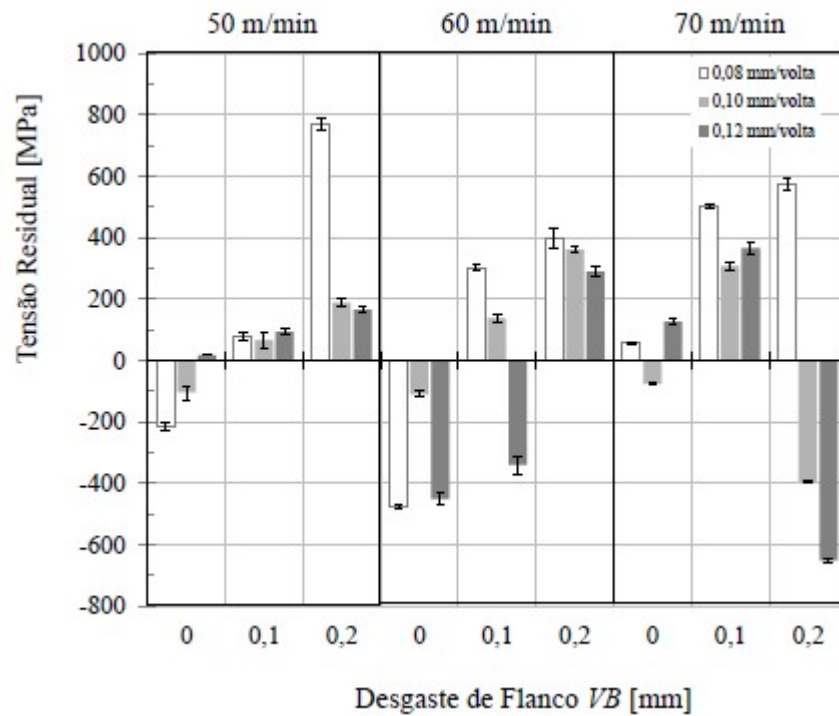


Figura 6.9: Influência dos parâmetros de usinagem nas tensões residuais.  
Fonte: Rosa (2017).

De acordo com os estudos analisados, conclui-se que as tensões residuais trativas são determinantes para a redução da resistência à fadiga do material. O aumento do avanço e da profundidade de usinagem são influentes no surgimento de tensões residuais trativas e impactam de forma negativa na resistência à fadiga do material. O desgaste da ferramenta apresentou maior impacto na resistência à fadiga, pois o aumento do desgaste de flanco resultou em elevados valores de tensões residuais trativas, que são correlacionadas à redução da resistência à fadiga dos aços inoxidáveis.

## 7 CONCLUSÃO

Diante das análises realizadas neste trabalho, cujo objetivo principal foi apresentar o estado da arte sobre o torneamento de aços inoxidáveis, apresentam-se as seguintes conclusões:

- No que se refere às propriedades dos aços inoxidáveis, as maiores dificuldades no torneamento destes materiais estão presentes nas classes austeníticas e duplex em razão da sua elevada ductibilidade, maior tendência ao encruamento e diferença acentuada entre o limite de escoamento e o limite de resistência.
- O desgaste em forma de flanco foi o mais investigado nos estudos analisados. A elevação da velocidade de corte e do avanço contribuíram para a elevação da temperatura de corte e, como efeito, aceleraram a degradação da ferramenta de corte. Durante o torneamento dos aços inoxidáveis da classe martensítica, ocorreu deformação sob tensão de compressão devido às elevadas tensões em função da alta dureza. Durante o torneamento dos aços austenítico e duplex, o surgimento da aresta postiça de corte foi observado em uma ampla faixa de velocidades de corte, incluindo as mais altas, nas quais esse fenômeno não é recorrente. A ocorrência da APC pode estar associada à ductilidade do aço inoxidável e sua tendência ao empastamento e à elevada tensão de corte na zona de aderência.
- A força de usinagem diminuiu com a elevação da velocidade de corte. A elevação da  $v_c$  contribuiu para a redução da resistência ao cisalhamento na zona de corte, que provocou a redução da dureza e da deformação do cavaco. A elevação dos demais parâmetros de usinagem, como avanço e profundidade de usinagem, ocasionaram o aumento da força de usinagem devido ao aumento da área da seção de corte. O torneamento dos aços inoxidáveis martensíticos resultou em força de usinagem mais elevada, o que pode estar relacionado à maior dureza dos materiais dessa classe que, geralmente, representam a elevação da pressão específica de corte.
- A utilização de fluido de corte reduziu a temperatura e o atrito durante o torneamento. A redução da temperatura mediante a aplicação do fluido de corte pode ser associada à excelente propriedade refrigerante dos fluidos de corte e à capacidade de acessar a interface cavaco-ferramenta, seja por meio das laterais, seja por capilaridade. O método criogênico apresentou desempenho melhor se comparado aos demais fluidos de corte, o que se deve não somente à forma de aplicação do fluido, mas também às

modificações implantadas na ferramenta que permitiram a aplicação do N<sub>2</sub> diretamente na região de corte.

- O parâmetro de usinagem mais influente sobre o acabamento superficial de um componente torneado é o avanço. O aumento desse parâmetro eleva a distância entre picos e vales, aumentando a rugosidade. Por sua vez, o aumento da velocidade de corte eleva a temperatura de corte, que, conseqüentemente, promove o amaciamento térmico. Esse fenômeno reduz o esforço de corte e a possibilidade de vibração.
- Alterações microestruturais ocorrem devido às altas temperaturas durante o corte e à elevada deformação mecânica resultante do processo de torneamento. O aumento da velocidade de corte, associado ao desgaste da ferramenta, resultou em temperaturas suficientemente elevadas para modificarem a microestrutura do material.
- A variação de dureza se relaciona ao aumento do avanço e da profundidade de usinagem. A elevação desses parâmetros provocou o aumento do encruamento e da microdureza. O aumento da velocidade de corte em certas faixas reduz a força de usinagem, proporciona menores esforços de corte e maior facilidade na formação do cavaco.
- O aumento do avanço e, principalmente, da velocidade corte resultou no aumento da temperatura de corte e colaborou para a indução de tensões residuais de tração na superfície. As tensões trativas tendem a reduzir a resistência à fadiga do componente usinado, pois elevados valores podem resultar no aparecimento de trincas, abreviando a vida do componente torneado.

## **8 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Produção de trabalhos que abordem de forma principal a resistência à fadiga. Os estudos analisam de forma secundária a vida em fadiga do material por meio das tensões residuais obtidas nos experimentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABINOX, **Estatísticas anuais de aços inoxidáveis**. <https://www.abinox.org.br/site/aco-inox-estatisticas-brasil-acos-inoxidaveis.php>, Acesso em 20/10/2020.
- AÇOBRAZIL, **Anuário estatístico 2020**. [https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2020/06/Anuario\\_Completo\\_2020.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2020/06/Anuario_Completo_2020.pdf), Acesso em 20/10/2020.
- AGUIAR, H. C. G. **Contribuição ao estudo do torneamento do aço inoxidável superduplex empregando ferramentas de metal duro com revestimentos**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2012.
- AGUIAR, H. C. G.; HASSUI, A.; CORREA, F. S.; **Estudo do desgaste das ferramentas de metal duro no torneamento do aço inoxidável superduplex**. COBEF–CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2015.
- ALMEIDA, C. M. **Avaliação Do Desgaste Da Ferramenta De Metal Duro Revestida Com TiN No Fresamento Do Aço ABNT 4140 Laminado a Quente e Temperado/Revenido**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2010.
- ALMEIDA, D. O., NAVES, V. T. G., MACHADO, A. R., SILVA, M. B. **Influência da direção de aplicação do fluido de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta**. COBEF–CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2006.
- AMBHORE, N.; KAMBLE, D.; CHINCHANIKAR, S.; & WAYAL, V. **Tool condition monitoring system: A review**. Materials Today: Proceedings, 2(4-5), 3419-3428. (2015).
- ANDRADE, E. P. **Estudo do efeito das condições de processamento mecânico na transformação de fases do aço inoxidável AISI 304**. Trabalho de conclusão de curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. (2015).
- APERAM, **Aço inoxidável: a solução perfeita para o desenvolvimento sustentável**, Belo Horizonte, 2020.
- ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: Properties and selection: iron, steels, and high performance alloys**. 10 ed., v.1, 2005. 1618p
- ASTM E384-17. **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**, p. 1-40. 2017.
- ÁVILA, R. F.; BAPTISTA B. S.; BARBOSA, C. A.; ABRÃO, A. M. **Influência do fluido de corte sobre a força de usinagem e o acabamento do aço inoxidável austenítico ABNT 304**. VII Seminário brasileiro do aço inoxidável. 2004.
- BACHMANN, A. E.; OLIVEIRA, W. L.; BRANDÃO S. M. **Análise comparativa no torneamento do aço inox AISI 304 utilizando diferentes métodos de aplicação de fluido**. Congresso Internacional de Pesquisa, Ensino e extensão, 2018.

- BAGETTI, J. H. **Análise da Usinabilidade, Deformação e Temperatura no Fresamento dos Ferros fundidos vermicular e cinzento**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- BARBOSA, P. A. **Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2014.
- BARBOSA, M. P. S.; SOUZA, R. R. **Análise das Tensões Residuais Geradas no Torneamento em Altas Velocidades de um Aço SAE 4140**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica. 2016.
- BERALDO, C. H. **Efeito da temperatura de envelhecimento sobre as propriedades mecânicas e resistência à corrosão por pite do aço inoxidável martensítico endurecido por precipitação UNS S46500**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2013.
- BERTONCINI, A. R. A. **Efeito das diferentes direções de aplicação de jato de fluido de corte no torneamento de um aço de difícil usinagem**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2007.
- BOING, D. **Análise da influência da classe da ferramenta de metal-duro no torneamento do aço AISI 4340 endurecido**. Revista da UNIFEBE, v. 1, n. 16, p. 5-19, 2016.
- BONFÁ, M. M. **Torneamento do aço endurecido AISI D6 utilizando mínima quantidade de fluido de corte**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2013.
- BORDINASSI, E. C. **Contribuição ao estudo da integridade superficial de um aço inoxidável super-duplex após usinagem**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2006.
- BRANCO, F. K. **Análise da integridade superficial no torneamento endurecido do aço AISI 4317 cementado**. Dissertação de mestrado, Centro Universitário da FEI, 2013.
- CALLISTER JR, W. D. **Ciência E Engenharia de materiais: uma introdução**. Grupo Gen-LTC, 2000.
- CAMARGO, R. **Verificação da usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos através do processo de furação**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- CANGUSSU, V. M. **Modelagem e análise numéricas da operação de roleteamento do aço ABNT 4140**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.
- CAPELLO, E. **Residual stresses in turning: Part I: Influence of process parameters**. Journal of materials processing technology, v. 160, n. 2, p. 221-228, 2005.
- CARBÓ, H. M. **Aços inoxidáveis: aplicações e especificações**. Belo Horizonte: ArcelorMittal Inox, 2008.
- CASTELETTI, L. C.; FERNANDES, F. A. P.; LOMBARDI, A. N.; PICON, C. A.; TREMILIOSI, G. F. **Avaliação da resistência à corrosão de aços inoxidáveis com Nb endurecíveis por precipitação**. Rem: Revista Escola de Minas, 63(1), 91-95. (2010)

CASTELETTI, L. Carlos et al. **Avaliação da resistência à corrosão de aços Inoxidáveis com Nb endurecíveis por precipitação**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 63, n. 1, p. 91-95, 2010.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 6.ed. rev. e ampl. São Paulo: ABM, 1988. 576 p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica. Processos de Fabricação e Tratamento**. 2ª edição. Volume II. São Paulo, 1986.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 672 p. Edição revista e atualizada por André Luiz V. da Costa e Silva, 2008.

COROMANT. **Manual técnico de usinagem**. São Paulo: Sandvik Coromant, 2017.

CORRÊA, J. G. **Usinabilidade de aços inoxidáveis martensíticos aplicados na indústria de petróleo**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

COSTA, A. F. **Análise comparativa de ferramentas revestidas por PVD e CVD no torneamento do aço ABNT 8620**, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2016.

CHRISTOFFEL, K. **High-speed Machining from a Tool Manufacturer's Perspective**. Seminário Internacional de Alta Tecnologia e Manufatura Avançada, Piracicaba-SP. Anais UNIMEP, p. 121-151, 2001.

CRUZ, M. A.; SILVEIRA, J. L. L.; CHUVAS, T. C.; FONSECA, M. C; **Análise das tensões residuais geradas na usinagem por torneamento de aço inoxidável AISI 304L**. COBEF-Congresso Brasileiro de Engenharia de fabricação. 2013.

DEARNLEY, P. A.; TRENT, E. M. **Wear mechanisms of coated carbides tools**. Metals Technology, vol. 9, p. 60-75, 1982.

DENG, J.; WU, F.; LIAN, Y.; XING, Y.; LI, S. **Erosion wear of CrN, TiN, CrAlN, and TiAlN PVD nitride coatings**. International Journal of Refractory. Metals and Hard Materials, 35, 10-16, 2012.

DHANANCHEZIAN, M.; KUMAR, M. P.; SORNAKUMAR, T. **Cryogenic turning of AISI 304 stainless steel with modified tungsten carbide tool inserts**. Materials and Manufacturing Processes, 26(5), 781-785, 2011.

DIAS, A. P.; ÁLVARES, J. F.; ROSA, H. A.; SOUZA, M. P.; RAYMUNDO, E. A.; RIBEIRO, R. B. **Análise dos parâmetros de usinagem do aço inox austenítico ABNT 304 como recebido via microscopia eletrônica de varredura**. COBEF-Congresso Brasileiro de Engenharia de fabricação. 2011.

DIAS, A. P.; ÁLVARES, J. F.; MELO, P. S.; DOMINGUES, B. S. M.; RAYMUNDO, E. A.; RIBEIRO, R. B. **Análise de parâmetros de usinagem do aço inox austenítico ABNT 304**. Cadernos UniFOA, 7(1 (Esp.)), 29-36. 2017.



DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 270 p. ISBN 8587296019, 2013.

EDWARDS, E. R. **Estudo da formação de interface de boreto para a deposição de diamante CVD sobre carboneto de tungstênio**. Tese de Doutorado, INPE, São José dos Campos, 2008.

ELMUNAFI, M. H. S.; YUSOF, N. M.; KURNIAWAN, D. **Effect of cutting speed and feed in turning hardened stainless steel using coated carbide cutting tool under minimum quantity lubrication using castor oil**. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(8), 1687814015600666. 2005.

ENDRINO, J. L.; FOX-RABINOVICH, G. S.; GEY, C. **Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel**. *Surface and Coatings Technology*, v. 200, n. 24, p. 6840-6845, 2006.

EUTETIC, **Linha Mundial Eutetic Castolin para soldagem de aços inoxidáveis**, <http://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo-inox.pdf>, Acesso em 19/07/2020.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J. **Effect of high-pressure coolant supply when machining nickelbase, Inconel 718, alloy with coated carbide tools**. *Journal of Materials Processing Technology*, v.153-154, p. 145 – 1050, 2004.

FERNANDES, P. F S. **Análise experimental das forças de usinagem em torneamento de aço inoxidável super duplex**. Trabalho de conclusão de curso. Centro Federal de Educação Tecnológica, 2018.

FERNÁNDEZ-ABIA, A. I.; BARREIRO, J.; DE LACALLE, L. L.; MARTINEZ, S. **Effect of very high cutting speeds on shearing, cutting forces and roughness in dry turning of austenitic stainless steels**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57(1-4), 61-71, 2011.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais Vol1**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1970.

FORTULAN, C. A.; CAMARGO, I. L.; LOVO, J. F. P.; ROLLO, J. M. D.A.; ERBERELI, R. **Potencialidade bactericida do aço inoxidável martensítico 17-4 PH**. *Ciências Tecnológicas, exatas e da terra e seu alto Grau de aplicabilidade*, Editora Atena, 1-388–416, 2020

FRANDSEN, R. B.; CHRISTIANSEN, T.; SOMERS, M. A. J. **Simultaneous surface engineering and bulk hardening of precipitation hardening stainless steel**. *Surface and Coatings Technology*, v. 200, n. 16-17, p. 5160-5169, 2006.

FREITAS, S. A.; FREITAS, T. C.; COELHO, W. A.; TEIXEIRA; L. M.; & BRANDÃO, L. C. **Análise da rugosidade e esforços no corte ortogonal do aço 304L com diferentes sistemas de lubrificação**. COBEF-Congresso Brasileiro de Engenharia de fabricação, Joinville, 2017.

GALANIS, N. I.; MANOLAKOS, D. E.; VAXEVANIDIS; N. M. **Comparison between dry and wet machining of stainless steel**. In Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN) (Vol. 3, pp. 91-8). 2008.

GAMARRA, J. R. **Estratégias de usinagem no torneamento de aço inoxidável super duplex (UNS S32750)**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2017.

GOMES, J. O. **Características da usinabilidade de aços inoxidáveis austeníticos SAE 304 e SAE 316 com a variação dos parâmetros metalúrgicos**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

GONÇALVES NETO, L. M. **Aplicação de fluido de corte em quantidades reduzidas para usinagem do aço SAE 52100 no processo de retificação centerless de passagem**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, 2013.

GRAVALOS, M. T.; MARTINS, M.; DINIZ, A. E.; MEI, P. R. **Influência da rugosidade na resistência à corrosão por pite em peças torneadas de aço inoxidável superaustenítico**. Rem: Revista Escola de Minas, 63(1), 77-82. 2010.

GRIFFITHS, B. **Manufacturing surface technology: surface integrity and functional performance**. Penton Press, 2001.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. Great Britain, 1992.

ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). **ISO 513:2004 - Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges: designation of the main groups and groups of application**. Geneva: ISO, 2004.

IZQUIERDO, R. C.; ROSA, G. C.; COLPES, K. M.; SOUZA, A. J.; PASA, G. S.; HUBLER, R.; VARGAS, A. L. M. **Análise comparativa das ferramentas alisadora e convencional no torneamento de acabamento a seco do aço inoxidável martensítico AISI 420**. VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), 2013.

JESUS, R. C. **Avaliação dos esforços, temperatura e integridade superficial em torneamento do aço inoxidável super duplex uns s32760 quando alterado o ângulo de posição da ferramenta e os parâmetros de corte**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João Del-Rei, 2013.

JIANXIN, D.; JIANTOU, Z.; HUI, Z.; PEI, Y. **Wear mechanisms of cemented carbide tools in dry cutting of precipitation hardening semi-austenitic stainless steels**. Wear, 270(7-8), 520-527, 2011.

KLOCKE, F. **Manufacturing process 1: cutting**. RWTH ed, 2011.

KOYEE, R. D.; HEISEL, U.; EISSELER, R.; SCHMAUDER, S. **Modeling and optimization of turning duplex stainless steels**. Journal of Manufacturing Processes, 16(4), 451-467, 2014.

KRABBE, D. F. M. **Otimização do fresamento do aço inoxidável aeronáutico 15-5 PH.** Dissertação de mestrado, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2006.

KROLCZYK, G.; LEGUTKO, S.; NIESLONY, P.; GAJEK, M. **Study of the surface integrity microhardness of austenitic stainless steel after turning.** Tehnički vjesnik, 21(6), 1307-1311. 2014.

KRÓLCZYK, G.; LEGUTKO, S.; RAOS, P. **Cutting Wedge Wear Examination During Turning of Duplex Stainless Steel.** Tehnički Vjesnik-Technical Gazette, v. 20, n. 3, p. 413-418, 2013.

KRÓLCZYK, G. M.; NIESLONY, P.; LEGUTKO, S. **Determination of tool life and research wear during duplex stainless steel turning.** Archives of Civil and Mechanical Engineering, v. 15, n. 2, p. 347-354, 2015.

LEAL, C. A. A.; ABRÃO, A. M.; DENKENA, B.; BREIDENSTEIN, B.; MEYER, K. **Efeito do roleteamento sobre a vida em fadiga do aço ABNT 4140 endurecido.** 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), 2019.

LIMA, B. H. O. D. **Estudo dos efeitos das condições de usinagem na microestrutura da superfície de um aço inoxidável super duplex.** Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Ceará, 2019.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels.** 2005.

MACHADO, Á. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais.** Editora Blucher, 2015.

MAHDAVINEJAD, R. A.; SAEEDY, S. **Investigation of the influential parameters of machining of AISI 304 stainless steel.** Sadhana, v. 36, n. 6, p. 963-970, 2011.

MAIA, L.H.A. **Avaliação de desempenho de recobrimentos em ferramentas de metal duro no torneamento do aço ABNT 4340 temperado por meio de sinais de emissão acústica.** Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

MARQUES, D. C. **Estudo da influência do teor de níquel na usinabilidade de ligas Fe-Cr-Ni.** Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

MARQUES, D. C.; DECARLI, C. C. M.; BUBANI, F.; BARBOSA, C. A.; MEI, P. R.; DINIZ, A. E. **Efeitos da adição de níquel em ligas ferro-cromo. Parte II: tempo de vida da ferramenta em processo de torneamento.** Rem: Revista Escola de Minas, 60(1), 71-74, 2007.

MARQUES, F. M.; ROCHA, A. S.; COSTA, R. C.; BERNARDINO, F. W.; HOFFMANN, P. R.; BONFANTE, M. M. **Influência do processo de usinagem na integridade superficial e propriedades da liga de aço inox austenítico F138 e AISI 316L.** 13º Congresso da Sociedade Latino Americana de Biomateriais, Órgãos Artificiais e Engenharia de Tecidos – SLABO. 2016.

MARQUES F. M.; UGIONI F. M.; CAVALER L. C.; ROCHA A. S.; CURTI E. I. **Análise da usinabilidade dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 420 durante o processo de torneamento externo cilíndrico.** 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais; 2014.

MARTINS, A. M.; SOUZA, P. S.; SANTOS, A. J. D.; ABRÃO, A. M.; DENKENA, B.; MEYER, K. **Estudo sobre a integridade superficial do aço ABNT 4140 após a operação de torneamento.** Matéria (Rio de Janeiro), 25(2). 2020.

MATSUMOTO, H.; MINATOGAWA, J.; GALLEGOS, J. **Influência da Microestrutura na Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis AISI 630 com e sem Adição de Cálcio.** Revista Matéria, v. 10, n. 2, p. 213-221, 2005.

MATTOX, Donald. **Handbook of physical vapor deposition (pvd) processing: Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control.** Noyes Publication. Albuquerque, New Mexico, 1998.

MICHELON, A. O.; MARQUES, F. M.; DAMIN, K. V. S.; HILGERT, M. A.; ROPELATO, G.; BERGAMO, R. L.; WALTER, A.; BENELLI, C. **Influência da velocidade de avanço na resistência à corrosão dos aços inoxidáveis AISI 304.** 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), 2019.

MICARONI, R. (2006). Influência do fluido de corte sob pressão no torneamento do aço ABNT 1045. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2006.

MITSUBISHI MATERIALS. Catálogo Ferramentas de corte 2020-2021. [http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/5915/8277/8714/catalog\\_c009z\\_full.pdf](http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/5915/8277/8714/catalog_c009z_full.pdf), Acesso em 17/08/2020.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas.** Belo Horizonte: UFMG– Universidade Federal de Minas Gerais, v. 26, 2011.

MORELO, F. **Análise da influência do mandrilamento na integridade superficial do aço inoxidável super duplex.** Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

NASCIMENTO, G.; ABRÃO, A. M. **Influência da Geometria da Ferramenta de Corte na Usinabilidade do Aço ABNT 1045.** In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 2000.

NASCIMENTO, C. F.; DE OLIVEIRA, C. H.; VIEIRA, F. F. S.; FREDERICO, P.; DE BRITO, T. G.; DE PAIVA, E. J. **Análise da rugosidade Ra no torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 utilizando planejamento de experimentos.** 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), 2019.

NASSIF, F. B.; ROSA, G. C.; SOUZA, A. J., **Analysis of the resulting machining forces by using standard and wiper tools in dry finish turning of AISI 420,** 22nd international Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), 3- 7 Nov., Ribeirão Preto, SP, Brasil, 10 p, 2013.

NAVES, V. T. G. **Usinagem do aço inoxidável austenítico ABNT 316 UF com aplicação de fluido de corte a alta pressão.** Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

NAYAK, S. K.; PATRO, J. K.; DEWANGAN, S.; GANGOPADHYAY, S. **Multi-objective optimization of machining parameters during dry turning of AISI 304 austenitic stainless steel using grey relational analysis.** Procedia Materials Science, 6, 701-708, 2014.

NOMANI, J., PRAMANIK, A., HILDITCH, T., LITTLEFAIR, G. **Machinability study of first generation duplex (2205), second generation duplex (2507) and austenite stainless steel during drilling process.** Wear, 304(1-2), 20-28, 2013.

NOORDIN, M. Y., VENKATESH, V. C., SHARIF, S. **Dry turning of tempered martensitic stainless tool steel using coated cermet and coated carbide tools.** Journal of materials processing technology, 185(1-3), 83-90, 2007.

NORCINO, A. B. **Uma contribuição ao estudo das tensões residuais no fresamento.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista-UNESP, Ilha Solteira. 2013.

OERLIKON BALZERS. **Catálogo do fabricante.** Disponível em: <[www.oerlikonbalzerscoating.com](http://www.oerlikonbalzerscoating.com)>. Acesso em: 30 de dezembro 2020.

OLIVEIRA, D. A. **Influência da modificação da geometria da ferramenta de corte sobre o torneamento do aço inoxidável supermartensítico,** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

OLIVEIRA, D. J. **Aprimoramento da técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos.** Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2011.

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

PADILHA, A. F., GUEDES, L.C., **Aços Inoxidáveis Austeníticos.** São Paulo: Hemus Editora Limitada, 171p, 1994.

PIRATINI, Gerdau–Aços Finos. **Manual de Aços.** Porto Alegre–RS.  
[https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo\\_acos\\_gerdau.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf), Acesso em 11/08/2020.

RODRIGUES, A. R. **Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2005.

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

ROSA, G. C.; SOUZA, A. J.; FU, K.; WRITZL, D. **Análise das variáveis de entrada nos parâmetros de rugosidade em um processo de torneamento de acabamento a seco do aço AISI 420C.** In VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica de Uberlândia, 2014.

ROSA, G. C.; SOUZA, A. J. **Estudo comparativo das ferramentas alisadora e convencional através das forças e rugosidades resultantes do processo de torneamento de acabamento do aço inoxidável AISI 420C.** In: 8º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2014). 2014. p. 10-15.

SANTOS, A. G. **Microfresamento de aço inoxidável duplex UNS S32205 com ferramentas de metal duro revestidas com nitreto de titânio,** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais.** São Paulo: Artliber Editora, v. 246, 2007.

SANTOS, D. V. **Torneamento do aço inoxidável supermartensítica sob lubri-refrigeração com baixa e alta pressões.** Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

SANTOS, D. V.; ABRÃO, A. M.; SANTOS, A. J. **Avaliação da usinabilidade do aço inoxidável supermartensítico na operação de torneamento.** *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 25, n. 2, 2020.

SELVARAJ, D. P.; CHANDRAMOHAN, P.; MOHANRAJ, M. **Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method.** *Measurement*, v. 49, p. 205-215, 2014.

SENATORE, M.; FINZETTO, L.; PEREA, E. **Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L.** *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 60, n. 1, p. 175-181, 2007.

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

SIKDAR, S.K; CHEN, M. **Relationship between tool flank wear area and component forces in single point turning.** *Journal of materials Processing Technology*. P210-215, 2002.

SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais.** 2 ed. Sumaré: ELETROMETAL S.A, 527p. (p.305-307), 1988.

SILVA, M. J. G. **Estudo da temperatura de solubilização de aços inoxidáveis austeníticos ASTM A312 TP321 para operação em indústria petroquímica,** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2001.

SILVA, O. S. **Avaliação da usinabilidade da liga ti-6al-4v no torneamento com alta velocidade de corte com diferentes métodos de lubri-refrigeração.** Dissertação de mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016.

- SILVA, G. C. **Estudo da influência dos parâmetros de usinagem nas tensões residuais geradas na peça torneada de aço inoxidável AISI 420C**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2013.
- SIVAIAH, P. **Evaluation of hybrid textured tool performance under minimum quantity lubrication while turning of AISI 304 steel**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 41, n. 12, p. 571, 2019.
- SIVAIAH, P.; CHAKRADHAR, D. **Comparative evaluations of machining performance during turning of 17-4 PH stainless steel under cryogenic and wet machining conditions**. Machining Science and Technology, v. 22, n. 1, p. 147-162, 2018.
- SIVAIAH, P.; CHAKRADHAR, D. **Effect of cryogenic coolant on turning performance characteristics during machining of 17-4 PH stainless steel: A comparison with MQL, wet, dry machining**. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 21, p. 86-96, 2018.
- SODAVADIA, K. P.; MAKWANA, A. H. **Experimental investigation on the performance of coconut oil based nano fluid as lubricants during turning of AISI 304 austenitic stainless steel**. International Journal of Advanced Mechanical Engineering, 4(1), 55-60. 2014.
- SOUZA, R. T. D. **Análise da influência dos métodos de aplicação do fluido de corte na rugosidade e na força geradas no torneamento do aço inoxidável AISI 420C**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2019.
- SOUZA, A. J.; RODRIGUES, R. I.; ROSA, G. C. **Verificação das forças geradas no torneamento a seco, com fluido em abundância e em quantidade reduzida do aço AISI 420C utilizando ferramenta wiper**. CONEM-Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza. 2016.
- SOUSA, J. A. G; SOUSA, M. N. **Análise da temperatura de usinagem no corte ortogonal de alumínio**. Simpósio do programa de pós-graduação em engenharia mecânica universidade federal de Uberlândia. 2012.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 249 p. Ed. Da UFSC, Florianópolis, Brasil, 1993.
- TEIXEIRA FILHO, F. **A utilização de fluido de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5PH**. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2006.
- TEKINER, Z.; YEŞILYURT, S. **Investigation of the cutting parameters depending on process sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel**. Materials & Design, v. 25, n. 6, p. 507-513, 2004.
- TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. Butterworth-Heinemann, 2000.
- VILLARES METALS, **Catálogo de aços inoxidáveis**. SÃO PAULO, 2014.
- VOGEL, J. P.; NERY, W. S.; ARAUJO, A. C. **Estudo do efeito do avanço nas forças e no acabamento de um torneamento de aço superduplex**. COBEF-Congresso Brasileiro de Engenharia de fabricação, Itatiaia, 2013.

**WEISZ, Tabla de equivalencia de distintas normas en grados de acero,**  
[https://www.weisz.com/wp-content/uploads/Steel\\_grades\\_equivalence\\_table.pdf](https://www.weisz.com/wp-content/uploads/Steel_grades_equivalence_table.pdf), Acesso em 11/08/2020.

WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. D. H. Residual stress – Nature and origins. *Materials Science and Technology*. Vol. 17 p. 366–375. 2001.

**XAVIER, F. A. Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

**ZANUTO, R. D. S. Avaliação de diferentes estratégias de entrada no fresamento do aço inoxidável 15-5 PH.** Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2012.