

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Matheus Martins de Souza

Usinabilidade dos aços inoxidáveis - Uma Revisão

Juiz de Fora

2020

Matheus Martins de Souza

Usinabilidade dos aços inoxidáveis - Uma Revisão

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia da Universidade
Federal de Juiz de Fora como requisito par-
cial para obtenção de título de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Renato Pagotto

Juiz de Fora

2020

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Souza, Matheus Martins de.

Usinabilidade dos aços inoxidáveis - Uma Revisão / Matheus Martins
de Souza. – 2020.

68 f. : il.

Orientador: Carlos Renato Pagotto

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Juiz de Fora,
Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica. Curso de Graduação
em Engenharia Mecânica, 2020.

1. Usinagem. 2. Aço Inoxidável. 3. Usinabilidade. 4. Ferríticos 5.
Martensíticos 6. Austeníticos 7. Duplex 8. Endurecíveis por Precipitação I.
Pagotto, Carlos Renato, orient. II. Título.

Matheus Martins de Souza

Usinabilidade dos aços inoxidáveis - Uma Revisão

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovada em 27 de novembro de 2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Renato Pagotto - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof^a. Msc. Christyane Oliveira Leão Almeida
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho aos meus pais Carla e Samarone, que todos os dias me deram forças para superar as dificuldades e persistir na caminhada, acreditando no meu potencial. Essa vitória também é de vocês!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus, que fez com que meus objetivos fossem alcançados durante todos os meus anos de estudo e ter permitido que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar.

À minha Mãe Carla, pelo seu amor incondicional, sua força, sua fé, seu apoio, sua alegria, seu incentivo, pelas palavras que sempre me conduziram ao melhor para alcançar essa vitória. Sem dúvida é, e sempre será a definição de perfeição pra mim. Te amo! Obrigado!

Ao meu Pai Samarone, pelo seu amor, pelas palavras de apoio, pelo seu caráter, sua personalidade, pelo seu esforço e confiança investido na minha educação, que me fizeram ser quem eu sou. Agradeço profundamente por tudo. Você é o cara! Te amo!

À minha irmã Millena, pela amizade e atenção dedicada quando sempre precisei, pelas risadas em momentos difíceis, pela paciência e confiança. Te amo!

Aos familiares, mesmo que distantes, pelo amor, carinho, apoio e compreensão durante os anos de estudo. Tenho um carinho especial por cada um de vocês!

Aos amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional, pela cumplicidade e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o tempo. Porque mesmo quando distantes, estavam presentes em minha vida!

Ao meu orientador, Pagotto, que se tornou um grande amigo, pelo apoio, pela confiança, pelo incentivo, direcionamento, conselhos e parceria durante os tempos de graduação.

À Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, juntamente com os professores pela ensino de qualidade oferecido.

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, e sim em ter novos olhos.”

(Marcel Proust)

RESUMO

A usinagem é caracterizada pela grande deformação plástica ocorrida nos materiais e pode ser associada ao processo de deformação, encruamento, aumento da temperatura, entre outro, até ocorrer o cisalhamento do material. É necessário, então, identificar quais tipos de materiais esse processo irá ocorrer. No estudo de materiais, em geral, os aços inoxidáveis são caracterizados como sendo de baixa usinabilidade, em consequência do elevado grau de encruamento e baixa condutividade térmica. Este trabalho objetiva, através de uma revisão bibliográfica, abordar a usinagem sob a ótica do comportamento mecânico do aço inoxidável.

Palavra chave: Usinagem. Comportamento mecânico. Aço Inoxidável.

ABSTRACT

The machining process is characterized by large plastic deformation that occurs in materials and may be associated with the deformation process, hardening, increasing of the temperature, among others. This connection is ceased when the material shears. Thus, it is necessary to identify what types of materials this process will happen. In the study of materials, in general, stainless steels are characterized as being of low machinability, due to the high degree of hardening and low thermal conductivity. This paper aims, through a literature review, to address the machining from the perspective of the mechanical behavior of stainless steel.

Key-words: Machining. Mechanical behavior. Stainless steel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01: Tipos de Processos de Usinagem	31
Figura 02: Torneamento cilíndrico	33
Figura 03: Movimentos da Usinagem	35
Figura 04: Esquema editado dos Métodos de ensaio de dureza (a) Brinel e (b) Rockwell: (1) pré-carga e (2) carga principal	37
Figura 05: Camada passiva formada sobre o aço inoxidável	39
Figura 06: Curvas de Tensão x Deformação	41
Figura 07: Aço inoxidável ABNT 409 recozido por uma hora à 870 °C e resfriado no ar. Ataque: 10ml de HNO ₃ - 10ml de ácido acético - 15ml HCl - 2 gotas de glicerol. (100X)	42
Figura 08: Aço inoxidável martensítico ABNT 440C, austenizado por uma hora à 1010 °C, resfriado no ar e revenido 2h à 230 °C. Ataque: Reativo de Vilella (500X)	44
Figura 09: Aço inoxidável ABNT 316 recozido à 1035 °C e temperado. Ataque: H ₂ O - HCl - HNO ₃ (100X)	46
Figura 10: Microestrutura típica de um aço inoxidável dúplex	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela comparativa entre os aços inoxidáveis 304L e 316L . . .	50
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APC	Aresta postiça de corte
PVD	physical vapor deposition (em inglês) ou deposição física de vapor (em português)
ZTA	Zona termicamente afetada
PRE	Pitting Resistance Equivalent (em inglês)
CCC	Cubico de Corpo Centrado
TCC	Tetragonal de Corpo Centrado
CFC	Cubica de Face Centrada

LISTA DE SÍMBOLOS

Vc	velocidade de corte [m/min]
Vf	velocidade de avanço [mm/min]
ap	profundidade de corte [mm]
n	rotação da peça [rpm]
d	diâmetro da peça a ser usinada [mm]
f	avanço [mm/volta]
Ti	Titânio
C	Carbono
N	Nitrogênio
Cr	Cromo
Fe	Ferro
Ni	Níquel
Mo	Molibdênio
Si	Silício
Mn	Manganês
P	Fósforo
Se	Selênio
S	Enxofre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	OBJETIVO	27
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
3.1	USINAGEM DOS MATERIAIS	29
3.2	USINABILIDADE DOS MATERIAIS	31
3.2.1	Torneamento	33
3.2.2	Cinemática do Movimento	33
3.2.3	Parâmetros de Corte	35
3.3	DUREZA	36
3.3.1	Ensaio de Dureza	36
3.3.2	Dureza Brinell	36
3.3.3	Dureza Rockwell	36
3.4	AÇO INOX (OU INOXIDÁVEL)	37
3.4.1	Efeitos dos Elementos de Liga nos Aços Inoxidáveis	40
3.4.2	Comportamento Mecânico dos aços inoxidáveis	41
3.4.3	Aços Inoxidáveis Ferríticos	42
3.4.4	Aços Inoxidáveis Martensíticos	44
3.4.5	Aços Inoxidáveis Austeníticos	45
3.4.5.1	Aço Inoxidável Austenítico 304L	48
3.4.5.2	Aço Inoxidável Austenítico 316L	49
3.4.5.3	Aços Inoxidáveis Superausteníticos	49
3.4.5.4	Usinagem em Aços Superausteníticos	51
3.4.6	Aços Inoxidáveis Duplex	52
3.4.6.1	Aços Inoxidáveis Superduplex	54
3.4.6.2	Usinabilidade dos aços inoxidáveis Superduplex	56
3.4.7	Aços Inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação	58
4	CONCLUSÃO	61
4.1	Sugestões para trabalhos futuros	61
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Dentre os mais diferentes processos de fabricação utilizados por toda a indústria metal-mecânica a nível global, pode-se destacar os processos de usinagem como um dos mais amplamente utilizados. Conseguir peças com acabamento superficial superior, ou seja, com menor rugosidade, dispensando outros processos, além de reduzir custos de fabricação, pode-se poupar energia e horas de trabalho, garantindo um processo mais eficiente e com maior taxa de fabricação.

Quando tratamos em fatores metalúrgicos, o principal fator que afeta a usinabilidade dos aços é a dureza. Uma maior porcentagem de carbono melhora a usinabilidade devido ao aumento da dureza e diminuição da ductilidade. Um segundo fator metalúrgico importante que afeta a usinabilidade dos aços é a microestrutura.

Os aços inoxidáveis surgiram de estudos realizados em 1912, tanto na Inglaterra como na Alemanha. Devido a falta de resistência à corrosão e oxidação em altas temperaturas dos aços carbono convencionais, a necessidade levou ao desenvolvimento de ligas mais resistentes à ambientes agressivos, resultados esse que gerou, dentre alguns, os aços inoxidáveis. São materiais de suma importância na indústria atualmente e tem grande emprego em equipamentos de processo, devido às suas excelentes propriedades químicas. Em contrapartida são materiais de difícil usinabilidade. Devido a esse fato, é de extremo interesse da indústria conhecer técnicas e estudar melhor suas estruturas para monitorar a usinagem destes materiais, já que os aços de usinabilidade melhorada podem ser uma alternativa.

No momento em que se trata de microestrutura, os aços inoxidáveis podem ser classificados como: ferríticos, martensíticos, austeníticos, duplex e endurecíveis por precipitação.

Devido à variedade de tipos de aços inoxidáveis, o presente trabalho possui como objetivo o estudo da arte e histórico dos mesmo, apresentando suas classificações e empregos, seu comportamento e diferentes composições.

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo a realização de um estudo sobre o histórico da arte dos aços inoxidáveis e sua usinagem.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a composição de cada aço inoxidável;
- Analisar o comportamento dos aços inoxidáveis superaustenítico e superduplex;
- Averiguar as funcionalidades e aplicações dos aços inoxidáveis.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem por finalidade realizar uma abordagem dos conteúdos apresentados na literatura afim de fornecer todo o fundamento teórico do trabalho proposto, de modo a facilitar o entendimento e compreensão do estudo. Assim, aqui abordam-se alguns conceitos importantes no campo da usinagem bem como uma correlação entre o processo de torneamento e a usinabilidade de aços inoxidáveis.

3.1 USINAGEM DOS MATERIAIS

Até meados do século XVIII, a usinagem era baseada em peças de madeira e, alguns pequenos casos, materiais de aço-carbono. A partir da revolução Industrial, com a chegada de novas tecnologias e novos métodos de manusear o material, foi possível utilizar tais métodos para a aplicação em novos tipos de metais, como o aço-liga para ferramenta de corte. Estudos mais aprofundados sobre a usinagem iniciaram-se somente no início do século XIX e em 1900, o americano F. W. Taylor descobriu o aço rápido, determinando um passo marcante no desenvolvimento tecnológico da usinagem. [1]

Nessa mesma época houve o surgimento das máquinas a vapor que facilitaram o trabalho do homem, deixando-o com o trabalho de esforço mínimo quando comparado ao seu passado.

Os materiais a princípio utilizados na fabricação de máquinas a vapor eram o ferro fundido, o latão e o bronze, facilmente usinados com as ferramentas de aço-carbono temperado disponíveis na época. Ainda assim, eram necessários 27,5 dias de trabalho para mandrilar um dos cilindros de uma máquina de grande porte (TRENT, 1985). Já no século XX houve o surgimento de materiais que possuíam maior durabilidade, que, por consequência, eram mais duráveis. Desse modo, na década de 40, os processos não convencionais de usinagem passaram a ganhar importância pela capacidade de produção de peças geometricamente complexas em materiais de difícil usinabilidade, garantindo um acabamento de qualidade e tolerâncias mais justas.

Desse modo, considera-se por usinagem o entendimento do processo de fabricação cujo objetivo consiste em dar forma, tolerância dimensional e geométrica além de qualidade superficial às peças submetidas com a finalidade de garantir todas as condições previstas em projeto. Tal processo se dá por meio da remoção de material excedente, presente na peça bruta (matéria-prima) na forma de cavaco, e para tal execução faz-se meio do uso de máquinas, ferramentas de corte e dispositivos que permitam a fixação da peça e da ferramenta adequados a cada tipo de operação existente (COPPINI, 2015), sendo um dos métodos mais eficazes de fabricação na indústria metalmeccânica, por conta da agilidade nos processos e por ser possível a fabricação com excelente precisão.

Na indústria mecânica e em todos os seus ramos, têm-se algumas formas de fabricar

peças e componentes que chegam ao mercado consumidor e outras indústrias secundárias e terciárias. Para cada especificação, exigência, custo e tempo é determinado um processo de fabricação ideal para tal condição, cabendo aos engenheiros, analistas e outros profissionais avaliarem os processos um a um para determinação de um método que se enquadre melhor. O engenheiro responsável deve ter, portanto, amplos conhecimentos dos processos e dos materiais envolvidos. É evidente que a fabricação de um produto, seja ele um clipe, uma lâmpada, uma calculadora ou um automóvel, além de conhecimentos de projeto, materiais e processos, requer também grande interação entre os diversos departamentos da empresa. Quanto mais complexo o produto, maior a necessidade de comunicação entre eles.

Atrelando a isso está a necessidade do engenheiro projetista ter um bom conhecimento quanto às formas de fabricação para se adaptar e otimizar seu projeto já a um modelo específico ou, ao menos, não tornar a projetar uma peça impossível de ser feita pelas formas usuais e aplicáveis à indústria comum. Há ainda a possibilidade de se combinar duas ou mais formas de fabricação em peças mais complexas ou que exigem alguma forma de acabamento posterior ou ganho de resistência.

A usinagem tem ainda a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático e que envolve um elevado número de variáveis. Shaw (1984) afirma que é praticamente impossível prever o desempenho no corte dos metais. Entretanto, isso não significa que estudos detalhados dos processos de usinagem não têm valor. Cada ponto fundamental que é detalhadamente estudado e interpretado de maneira adequada contribui para o entendimento do processo, o procedimento mais próximo da capacidade de prever seu comportamento.

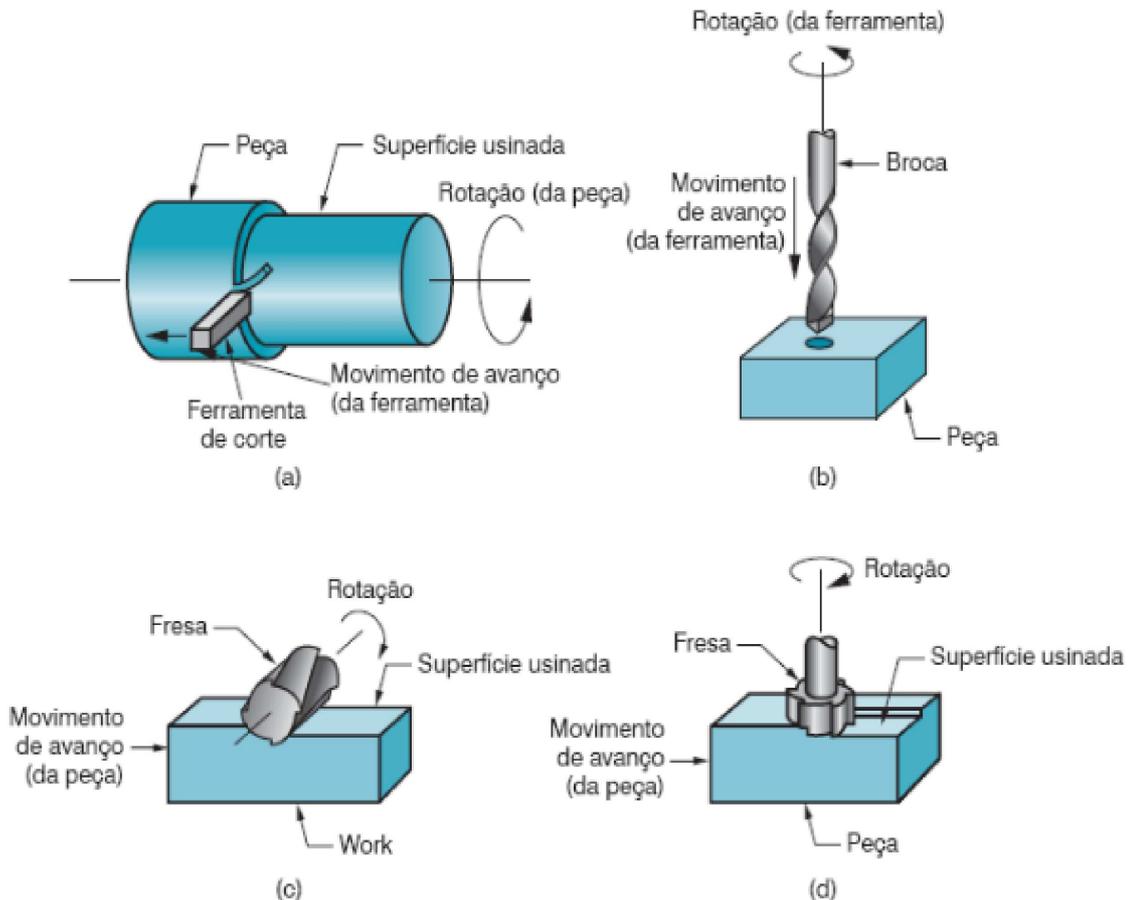
De acordo com Black (1995), a imprevisibilidade da usinagem se deve ao fato de esse ser o único processo de deformação plástica cuja única restrição é oferecida pela ferramenta de corte. Além disso, a usinagem envolve altas deformações combinadas com altas taxas de deformação.

As peças metálicas fabricadas pelos processos metalúrgicos convencionais, como fundição, forjamentos entre outros, geralmente apresentam superfícies mais ou menos grosseiras e que, portanto, exigem um determinado acabamento, sendo assim, o processo de usinagem possibilita atingir objetivos pelos quais processos iniciais como citados acima não chegam a obter peculiaridades necessárias, como furação, reentrâncias, saliências etc.

A Usinagem compreende o processo de desbaste mecânico de um material para dar um novo aspecto e formato a uma peça, como:

- Acabamento de superfícies de peças fundidas ou conformadas mecanicamente, para obtenção de melhores aspectos superficiais e dimensões mais precisas para determinado exigência da peça;
- Obtenção de peculiaridades, impossíveis através de processos convencionais;

- Fabricação seriada de peças, a um custo mais baixo;
- Fabricação de uma ou poucas peças, praticamente de qualquer forma, a partir de um bloco de material metálico.



– Figura 01: Tipos de Processos de Usinagem

Os três tipos mais comuns de processos de usinagem: (a) torneamento, (b) furação e duas formas de fresamento: (c) fresamento tangencial, e (d) fresamento frontal.

Fonte: Fundamentals of Modern Manufacturing, 4a Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reproduzido com permissão de John Wiley e Sons, Inc.

3.2 USINABILIDADE DOS MATERIAIS

A usinabilidade pode ser considerada, de modo geral, como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de valores numéricos comparativos, conjuntos de propriedades de usinagem de um material em relação a outro como padrão. Em outras palavras, a usinabilidade é a facilidade que um material possui para ser cortado, torneado, fresado, furado ou aplainado sem perder suas características mecânicas, podendo ser considerado como um indicador da capacidade do material para ser usinado. O conhecimento acerca

desses dados sobre o material é de fundamental importância para possuir entendimento e discernimento ao qual o mesmo suporta ou não mantendo suas propriedades mecânicas básicas.

A usinabilidade depende do estado metalúrgico da peça, das propriedades mecânicas, composição química, processamento do material, e do encruamento. É comum pensar que a usinabilidade é uma propriedade intrinsecamente ligada à dureza do material da peça e à sua resistência mecânica, porém esse pensamento é equivocado. Embora a dureza e a resistência mecânica sejam fatores importantes de influência na usinabilidade do material, outros fatores também são bastantes importantes, como a quantidade de inclusões e de aditivos para melhorar a usinabilidade, a quantidade de partículas duras, a microestrutura, a tendência ao empastamento do cavaco do material na superfície de saída da ferramenta, etc.

A seguir será descrito como algumas das propriedades dos materiais podem influenciar na usinabilidade.

- Dureza e Resistência Mecânica – Valores baixos de dureza e resistência mecânica normalmente favorecem a usinabilidade.
- Ductilidade – Baixos valores de ductilidade são geralmente benéficos à usinabilidade.
- Condutividade Térmica – Propriedade de um material conduzir calor.
- Taxa de Encruamento – Quando o material possui alta taxa de encruamento, ele requer muita energia para a formação do cavaco, e a formação da aresta postiça de corte fica facilitada.

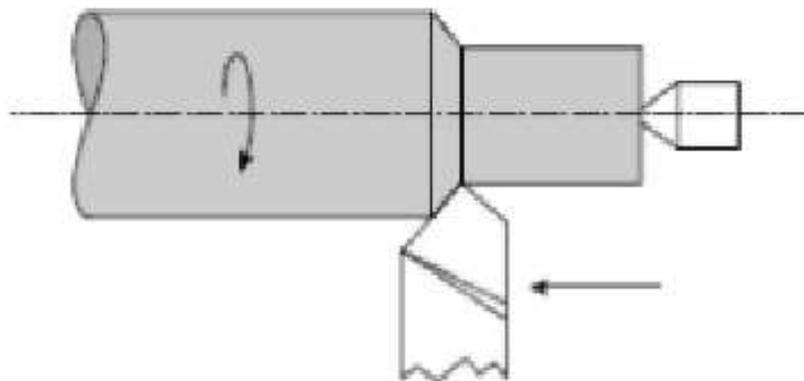
Quando tratamos em fatores metalúrgicos, o principal fator que afeta a usinabilidade dos aços é a dureza. Uma maior porcentagem de carbono melhora a usinabilidade devido ao aumento da dureza e diminuição da ductilidade. A medida que se diminui a dureza, a tendência à formação da aresta postiça de corte aumenta. Quando se aumenta a dureza acima desse valor, o desgaste da ferramenta via abrasão e difusão passa a ser um fator que afeta negativamente a usinabilidade do material. Para promover uma melhora desse fator uma medida é realizar seu encruamento via trabalho frio.

Um segundo fator metalúrgico que afeta a usinabilidade dos aços é a microestrutura. Aços com estruturas abrasivas somente podem ser usinados com eficiência via processos abrasivos ou utilizando-se de materiais para ferramentas ultra resistentes, como cerâmica e o nitreto cúbico de boro. Isto acontece devido ao fato de que, quando se diminui o teor de perlita, diminui-se também o teor de cementita que é uma fase extremamente abrasiva, pois é cheia de carbonetos, que são partículas extremamente duras.

3.2.1 Torneamento

O torneamento é um processo que vem sendo cada vez mais utilizado na indústria metal-mecânica, sendo considerado como o processo de usinagem mais básico dentre aqueles relacionados ao uso de máquinas-ferramenta e sua solicitação em usinagem cresce por sua alta demanda na produção fabril e redução dos custos de fabricação. Essa operação é realizada por intermédio de um sólido indefinido afixada em uma placa giratória com mordentes feito para girar ao redor do eixo principal da máquina operatriz (torno mecânico) que executa o trabalho de usinagem, ao mesmo tempo que uma ferramenta de corte lhe retira material de modo a transformá-lo numa peça bem definida tanto em relação à sua forma quanto às dimensões. A principal característica do torno é o movimento rotativo contínuo realizado pelo eixo-árvore, conjugado com o movimento de avanço da ferramenta de corte [6].

Assim a velocidade de corte (v_c) expressa a taxa na qual a superfície sem cortes passa pela aresta de corte, assim como a velocidade de avanço (v_f) corresponde a distância percorrida pela ferramenta em uma direção axial a cada revolução de trabalho. Por fim, a profundidade de corte (a_p), representa a espessura de material removido da peça bruta radialmente, de forma que a conjuntura dessas três variáveis é capaz de fornecer a taxa de material removido e frequentemente, esse aspecto é utilizado na eficiência de uma operação de corte por torneamento.[6]



– Figura 02: Torneamento cilíndrico

Fonte: Adaptado de Ferraresi, 1977

3.2.2 Cinemática do Movimento

Os processos de torneamento necessitam de um movimento relativo entre a peça e a ferramenta de corte. Os movimentos entre ambos durante a usinagem são aqueles

que permitem a ocorrência deste processo. Por convenção, os movimentos sempre estarão ocorrendo supondo-se a peça parada e, portanto, todo movimento sendo realizado pela ferramenta. Esses movimentos podem ser classificados em ativos e passivos.

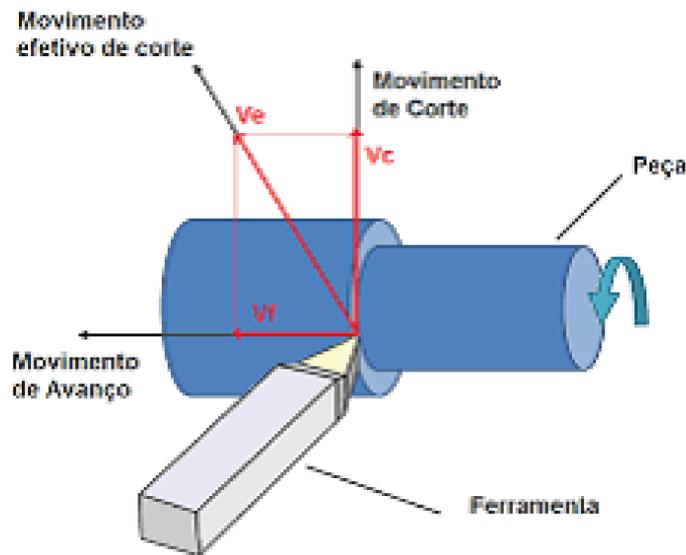
Os movimentos ativos são aqueles que promovem a remoção do material ao ocorrerem. São eles:

- Movimento de Corte: é o movimento entre a ferramenta e a peça sem o movimento de avanço da ferramenta. O corte ocorre no movimento de uma única rotação.
- Movimento de avanço: é o movimento na qual ocorre corte continuamente a medida que a ferramenta avança.
- Movimento efetivo de corte: é o movimento resultante da combinação do movimento de corte e movimento de avanço, o que resulta no processo de usinagem.

Os movimentos passivos são aqueles que não promovem a remoção do material ao ocorrerem. São eles:

- Movimento de ajuste: é o movimento entre a ferramenta e a peça no qual é pré-determinada a espessura da camada de material a ser removida. Em alguns processos este movimento não ocorre, pois, a espessura do material a ser removido é definido pela própria geometria da ferramenta.
- Movimento de correção: é o movimento entre a ferramenta e a peça, empregado para compensar alterações de posicionamento devidas, por exemplo, ao desgaste da ferramenta, variações térmicas, deformações plásticas, entre outras, que normalmente incidem durante a ocorrência do processo.
- Movimento de aproximação: é o movimento entre a ferramenta e a peça com o qual a ferramenta, antes do início da usinagem, é aproximada da peça.
- Movimento de recuo: é o movimento entre a ferramenta e a peça, com o qual, a ferramenta, após a usinagem, é afastada da peça.

Tantos os movimentos ativos como os passivos são importantes, pois a eles estão associados tempos que, somados, resultam no tempo total de fabricação (produção).[8]



– Figura 03: Movimentos da Usinagem

Fonte: Apostila de Fundamentos da Usinagem, Prof. Dr. Rodrigo Lima Stoeterau

3.2.3 Parâmetros de Corte

A todos os movimentos, estão associadas direções, sentidos e velocidades. Esses parâmetros são importantes para realização dos estudos em questão, como Velocidade de corte e avanço.

Velocidade de corte Vc: é a velocidade tangencial instantânea com que a ferramenta percorre a peça a ser trabalhada.[8] Esse parâmetro pode variar de acordo com alguns fatores como: Material a torner e o diâmetro do mesmo; material da ferramenta; operação a ser executada e condições de usinagem, como refrigeração. A velocidade de corte para o torneamento pode ser calculada por:

$$V_c = \frac{n \cdot \pi \cdot d}{1000}$$

Onde:

Vc = Velocidade de corte [m/min]

d = diâmetro inicial da peça [mm]

n = Rotação da peça [rpm]

Velocidade de avanço Vf : é a velocidade instantânea da ferramenta no sentido de avanço.[7] No caso do torneamento, é a velocidade de deslocamento da ferramenta seguindo uma trajetória paralela ao eixo da peça trabalhada. Pode ser calculada por:

$$V_f = f \cdot n$$

Onde:

f = avanço [mm/volta]

V_f = velocidade de avanço [mm/min]

3.3 DUREZA

Segundo sua definição, dureza é a capacidade que um material possui de ser resistente a deformações plásticas permanentemente. Diz-se um material com boa dureza quando o mesmo possui uma boa resistência ao riscamento e ao desgaste. Para a engenharia, essa característica é de fundamental importância, principalmente quando se trata de materiais para ferramenta de corte ou de materiais que necessitam de alta aplicação.

Ao ser submetidos à aplicação de força, dependendo da intensidade, o material pode apresentar 3 respostas, sendo elas, a elasticidade, maleabilidade e ruptura.

3.3.1 Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza são comumente usados para avaliar as propriedades de um material, já que sua utilização é de fácil manuseio e resultado rápido. Entretanto, existe uma variedade de métodos de ensaio de dureza devido à diferença de valores encontrados em diferentes materiais. Os ensaios de dureza mais conhecidos são os de Brinell e Rockwell.

3.3.2 Dureza Brinell

A escala de dureza Brinell é medida através da penetração de uma esfera de carbeto de tungstênio de diversas medidas na superfície dos materiais a serem testados. Foi a primeira escala de dureza utilizada amplamente no mercado siderúrgico sendo amplamente utilizado para ensaiar metais e não metais de baixa ou média dureza. Recebe esse nome em homenagem ao engenheiro sueco que o desenvolveu por volta de 1900. No ensaio, uma esfera de aço endurecida (ou de metal duro) de 10 mm de diâmetro é pressionada contra a superfície de um corpo de prova utilizando uma carga de 500, 1500 ou 3000 kg.

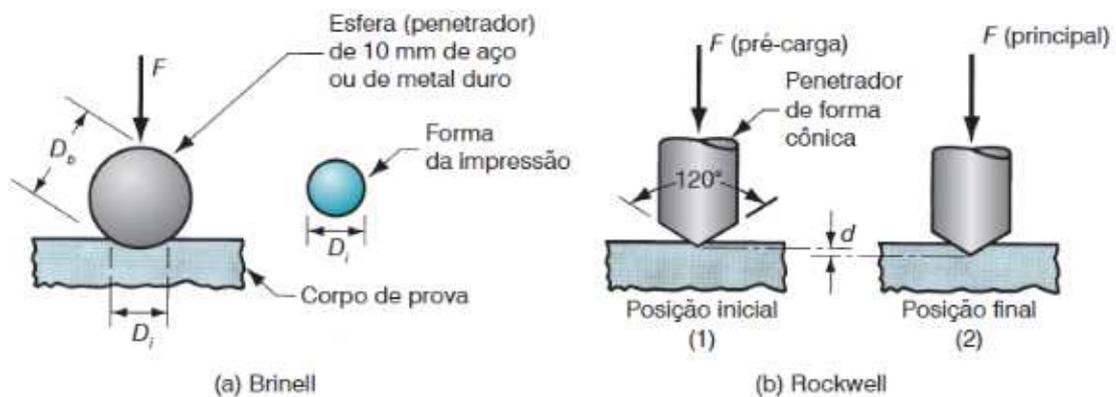
3.3.3 Dureza Rockwell

A escala de dureza utilizada na medição de esferas de aço é a Escala Rockwell que recebe esse nome em homenagem ao metalúrgico que o desenvolveu em 1920. Essa escala é baseada no nível de penetração de uma ponta de diamante no material.

Segundo Groover (2014), no Ensaio de Dureza Rockwell, um penetrador de formato cônico ou uma esfera de pequeno diâmetro, com diâmetro = 1,6 ou 3,2 mm (1/16 ou 1/8 in) é pressionado contra o corpo de prova utilizando uma pré-carga de 10 kg, assentando assim o penetrador no material. Em seguida, uma carga principal de 150 kg (ou outro valor) é aplicada, fazendo com que o penetrador penetre no corpo de prova de uma determinada

distância além da sua posição inicial. Esta distância de penetração adicional d é convertida em uma leitura de dureza Rockwell pela máquina de ensaio. A escala Rockwell possui 7 variações denominadas por letras: Rockwell A, B, C, D, E, F, G. Para medir a dureza de esferas de aço que possuem tratamento térmico, a escala mais utilizada é a a Rockwell C. Já a dureza de esferas de carbeto de tungstênio é medida através da escala Rockwell A.

Na figura a seguir, podemos observar um esquema do uso na força para a penetração no material para o cálculo de dureza do mesmo.



– Figura 04: Esquema editado dos Métodos de ensaio de dureza (a) Brinell e (b) Rockwell: (1) pré-carga e (2) carga principal

Fonte: Fundamentals of Modern Manufacturing, 4a Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão da John Wiley e Sons, Inc.

3.4 AÇO INOX (OU INOXIDÁVEL)

Os aços inoxidáveis foram descobertos por Harry Brearley, em Sheffield, Inglaterra. Este fato ocorreu em 1912, quando Brearley foi solicitado para desenvolver uma liga metálica que apresentasse uma maior resistência ao desgaste que ocorria no interior dos canos de armas de fogo. Durante o processo de caracterização microestrutural ao se utilizar o ataque químico com ácido nítrico com o intuito de revelar a microestrutura, Brearley observou que o aço não sofreu nenhum dano, descobrindo assim os aços inoxidáveis. (Agarelli e Lebrão, 2017).

Altobelli (2006) diz que o aço inoxidável, a cada dia, conquista espaço de destaque no mercado de materiais, principalmente na fabricação de peças críticas de modernas usinas e indústrias químicas. É um material utilizado há décadas na área médica e odontológica para fixação de fraturas, por sua biocompatibilidade no uso em humanos.

Padilha (2002) apud Pickering (1976) afirmam que, em especial, são, largamente, utilizados em aplicações de engenharia devido a suas excelentes propriedades de resistência à corrosão, soldabilidade e propriedades mecânicas.

E Silva (2007) comenta que o aço inox é uma liga metálica constituída basicamente de uma mistura de ferro com no mínimo 10,5% de cromo, o que o torna superior ao aço comum em quesitos como resistência ao impacto, ao calor e à corrosão. São materiais que apresentam em geral baixa usinabilidade devido principalmente à alta taxa de encruamento durante a usinagem e produção de cavacos longos que levam a um desgaste acelerado da ferramenta. Na medida em que elementos como o silício, o carbono e o níquel, entre outros, são adicionados à liga básica do Aço Inox, ela ganha mais propriedades e aplicações. Esta diversificação possibilita criar vários os tipos de aço inox.

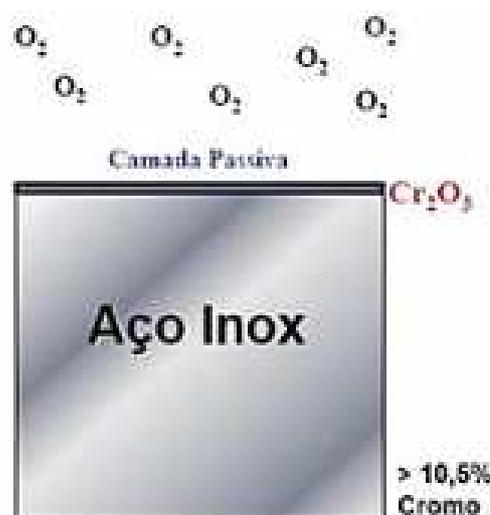
Os aços inoxidáveis são caracterizados pela sua baixa condutividade térmica e pela alta capacidade de endurecimento por deformação, além de serem materiais que aderem à aresta de corte. Quando se realiza a usinagem nessas ligas após passarem por algum tipo de trabalho a frio, deve-se procurar usar uma profundidade de usinagem que ultrapasse a camada encruada, evitando assim uma alta taxa de desgaste de flanco, mas com o risco de ocorrer desgaste de entalhe. Aços com a presença de Titânio são mais difíceis de usar pela possibilidade de formação de $Ti(CN)$, aumentando dessa forma a abrasividade, devido à sua baixa condutividade térmica, a maior parte do calor, geralmente carregada pelo cavaco, deverá ser absorvida pela aresta de corte, contribuindo mais rapidamente para a sua deterioração.

Portanto, arestas de corte mais afiadas devem ser preferidas, com substratos ou coberturas de maior condutividade térmica. No que se refere às forças de corte, os aços inoxidáveis apresentam maiores valores, se comparados com os aços-carbono. Os cavacos, de maneira geral, são lamelares e ainda contínuos na maioria dessas ligas. Para a usinagem de aços inoxidáveis recomenda-se:

- Deve-se preferir o trabalho em duas faixas distintas de velocidade dos aços inoxidáveis ferríticos/martensíticos: entre 40 rot/min e 90 m/min, e entre 180 rev/min e 400 m/min. Valores intermediários podem produzir APC. Geralmente, quanto maior porcentagem de elementos de liga, maiores serão as dificuldades de usinagem e, conseqüentemente, os custos de usinagem.
- As principais características encontradas na usinagem de aços inoxidáveis são alta tendência para endurecimento por deformação, altas forças de corte (comparados a aços-carbono com equivalente porcentagem de carbono), necessidade de aresta com quebra-cavacos e formação de aresta postiga de corte (APC).
- Para melhor desempenho, selecionam-se menores valores de raio de ponta, arestas afiadas, classes com maior dureza e coberturas PVD, as quais, em geral, produzem arestas mais afiadas.
- Para operações de desbaste, é preferível usar altos valores de avanço e de profundidade de usinagem combinados com baixas velocidades.

- Para fresamento, o corte concordante deve ser, preferencialmente, usado, bem como um baixo ângulo de entrada do cortador na peça.

Lippoldi e Kotecki (2005) declaram que o cromo presente nessas ligas entra em contato com o meio externo oxidante, formando uma fina camada passiva constituída principalmente de Cr_2O_3 , que possui estabilidade nas condições atmosféricas. A efetividade desta camada está vinculada ao teor mínimo de cromo igual a 10,5 %. Desta forma, denomina-se aço inoxidável as ligas Fe-Cr, Fe-Cr-C e Fe-Cr-Ni com teor de pelo menos 10 % a 12 % de cromo, que permite a formação da camada passiva.



– Figura 05: Camada passiva formada sobre o aço inoxidável

Fonte: Instituto do Inox. Disponível em:

<https://www.institutodoinox.com.br/inox.html>. Acesso em: 02 nov. 2020.

A classificação mais utilizada para os aços inoxidáveis está baseada na microestrutura que o aço apresenta em temperatura ambiente, após trabalho a quente, que dependerá basicamente do balanço da capacidade de seus elementos em estabilizar a austenita ou a ferrita (PECNER; BERNSTEIN, 1977; MODENESI, 2001). Nesse contexto, podem ser considerados cinco grupos principais de aços inoxidáveis:

- Ferríticos
- Martensíticos (Aços série 400)
- Austeníticos (Aços da série 300)
- Duplex
- Endurecíveis por precipitações

Os ferríticos contêm principalmente cromo como elemento de liga e sua estrutura e propriedades lembram ferro puro. Os martensíticos contêm níquel em quantidade suficiente para formar estrutura similar à austenita e permitem endurecimento por tratamentos térmicos similares aos empregados no aço. Outros elementos, como Molibdênio, Silício, Manganês, Titânio, Tungstênio, Cobalto e Nióbio, também têm efeito similar, além de melhorar a resistência dos aços inoxidáveis ao ataque de ácidos.

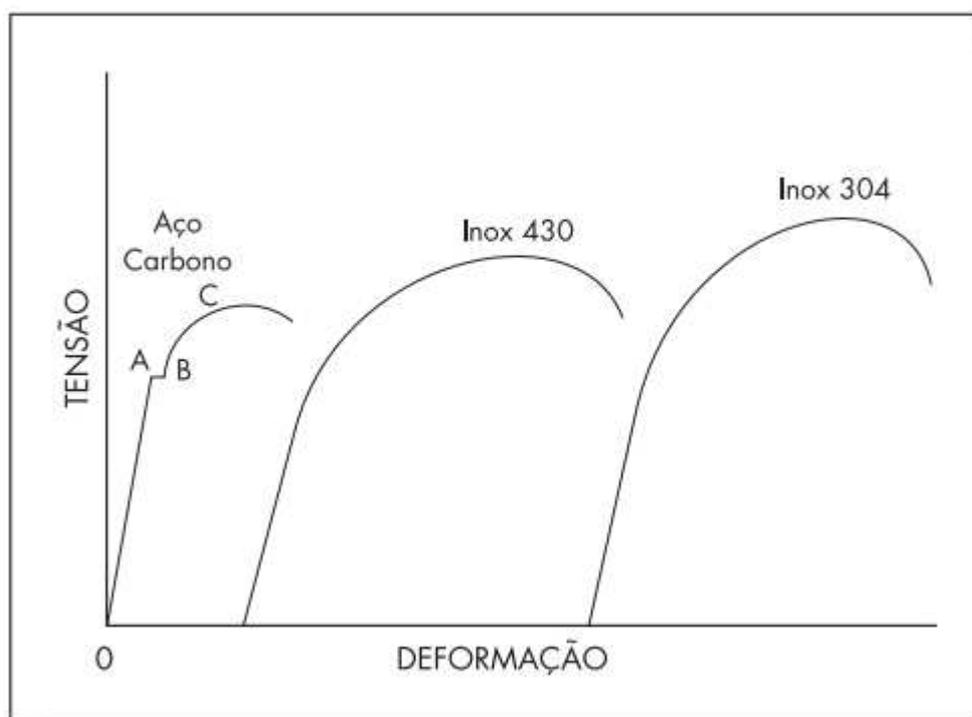
3.4.1 Efeitos dos Elementos de Liga nos Aços Inoxidáveis

Segundo Bordinassi (2006) cada elemento pode influenciar o aço em algum aspecto, ou em alguma característica. Segue abaixo uma breve explicação sobre os efeitos de cada elemento de liga nos aços inoxidáveis:

- Cromo (Cr) - A resistência à corrosão de um aço inoxidável está intimamente ligada ao teor de Cromo no material, o cromo livre combina-se com o oxigênio, formando uma película passiva de óxido de cromo.
- Níquel (Ni) – É um elemento estabilizador de austenita, aumenta a ductilidade da liga. Aumenta a proteção contra corrosão somente junto com o cromo. Torna o aço não magnético.
- Molibdênio (Mo) – Estabiliza o filme de passivação sob presença de cloretos quando ligado ao cromo. É um elemento importantíssimo na proteção contra corrosão por pitting
- Carbono (C) – Aumenta a resistência mecânica da liga, com aumento de dureza e da fragilidade. Atua como elemento gamageno, assim como o níquel.
- Titânio (Ti) e Nióbio (Nb) – Formam carbonetos preferenciais relação ao Cromo, evitando a sensitização em aços inoxidáveis austeníticos.
- Tungstênio (W) – Melhora a resistência à corrosão por pitting da liga. Quando adicionado em teores de 1 a 3 %, melhora o comportamento do aço inoxidável quanto ao surgimento da fase s.
- Nitrogênio (N) – Junto com o cromo e o molibdênio, propicia grande proteção contra corrosão. Teores de 0,1 a 0,3 % deste elemento aumenta significativamente a proteção contra corrosão por pitting.
- Enxofre (S) e Selênio (Se) - Embora sejam considerados indesejados por diminuir propriedades mecânicas do aço inoxidável, estes elementos passaram a ser bastante utilizados por melhorarem a usinabilidade, possuindo um baixo coeficiente de expansão térmica e uma boa resistência à corrosão e oxidação, inclusive em temperatura elevadas.

3.4.2 Comportamento Mecânico dos aços inoxidáveis

Segundo Mesquita e Rugani (1977), os processos de conformação dos diversos metais são realizados a partir de suas respectivas características mecânicas. Particularidades relativas ao comportamento estrutural de cada liga metálica definem os esforços mínimos necessários para o dimensionamento dos equipamentos e ferramentas a serem utilizados. Com o aço inox não é diferente: os processos de sua conformação mecânica são semelhantes aos dos aços carbono, cuja tecnologia é de domínio geral. As diferenças de comportamento mecânico existentes entre as duas ligas, aço carbono e aço inox, definem diferentes parâmetros de utilização de equipamentos em cada caso. O comportamento estrutural dos aços inoxidáveis, a exemplo dos aços carbono, é definido pela curva tensão-deformação. Um corpo de prova do material com dimensões padronizadas é submetido a um esforço de tração crescente até a sua ruptura.



– Figura 06: Curvas de Tensão x Deformação

Fonte: Adaptado de MESQUITA e RUGANI (1997)

A curva tensão-deformação é típica para cada aço. O limite de escoamento dos aços carbono são ligeiramente mais elevados do que os aços inox (tipos 430 e 304) para a condição de aços recozidos. Porém, o limite de resistência dos aços inoxidáveis são superiores aos dos aços carbono. Aí reside uma diferença básica que vai influir em todos os processos de conformação onde ocorrem deformações permanentes: o ramo plástico B-C para os aços inoxidáveis é muito maior em comparação com os aços carbono. Isto significa

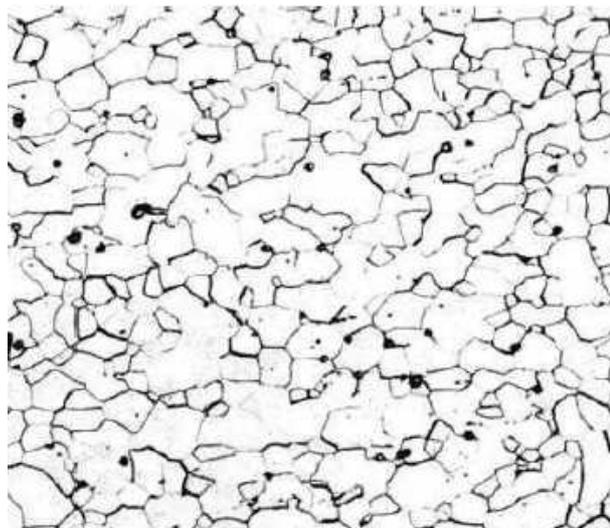
que eles suportam deformações maiores sem ocorrer falha do componente. Dentre os aços inoxidáveis, os aços austeníticos (por exemplo o 304) apresentam deformação plástica maior do que os aços ferríticos (por exemplo o 430) sendo especificados para conformações profundas.

Ao observarmos a figura 6, conclui-se que o aço Inox 430 possui uma ductilidade maior comparada com o aço inox 304, porém este último, apresenta uma resistência maior, o que justifica a utilização desses aços em aplicações diferentes.

Eduardo e Rugani (1197) ainda afirmam que em grande parte dos casos, o maior grau de encruamento dos aços inoxidáveis pode ser compensado pela sua excelente resistência à corrosão atmosférica, viabilizando o emprego de espessuras menores do que aquelas especificadas para os aços carbono. E, com espessuras reduzidas, os componentes e peças de aços inox ficam mais leves e os esforços de conformação podem se aproximar daqueles exigidos para a conformação dos aços carbono.

3.4.3 Aços Inoxidáveis Ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas que contém entre 11 e 30% de Cromo com teores de Níquel, Carbono e Nitrogênio, que são elementos austenitizantes. Mas, no geral, dependem basicamente do teor de Cr. São estruturalmente simples, constituindo-se, em temperatura ambiente, de uma solução sólida de cromo e ferro, e possuem uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). A liga tem pouquíssimo carbono dissolvido, e sua maioria presente se apresenta na forma de precipitados finos de carbonetos de cromo [19].



– Figura 07: Aço inoxidável ABNT 409 recozido por uma hora à 870 °C e resfriado no ar. Ataque: 10ml de HNO₃ - 10ml de ácido acético - 15ml HCl - 2 gotas de glicerol. (100X)

O primeiro aço inoxidável ferrítico a ser criado foi o UNS S43000, entretanto por conta de diversos mecanismos de fragilização (precipitação de carbonetos de cromo e crescimento de grão), foram desenvolvidos outros tipos, modificando-se a composição química e adicionando-se elementos de liga.

Segundo Labiapari (2017), os aços com baixos teores de Cromo, 11%, tem grande aplicação em sistemas de exaustão de automóveis de baixa motorização. Com teores entre 16 e 18% de Cromo, são usados em ornamentos automotivos e utensílios de cozinha. Em teores acima de 19%, até 30% de Cromo, são utilizados para aplicações que exigem alta resistência à corrosão e oxidação. Neste último caso, geralmente contém Alumínio ou Molibdênio, baixo teor de Carbono além de elementos estabilizantes como Titânio e Nióbio, para prevenir a sensitização.

Vilela, Faria, Alcantara, Oliveira e Cota (2019) afirmam que o consumo, o investimento nas pesquisas e o avanço tecnológico da produção dos aços inoxidáveis ferríticos têm aumentado devido ao aumento do preço do níquel no mercado mundial, tornando-os uma alternativa economicamente viável aos aços inoxidáveis austeníticos em muitas aplicações. Os aços inoxidáveis ferríticos com baixo teor de carbono e sem a presença de microligantes têm sido utilizados no setor de transportes, em usinas de açúcar e álcool, em prédios, mobiliários urbanos, vigas para pontes, entre outros.

Os aços ferríticos são amplamente utilizados devido à sua boa resistência mecânica e ductilidade e elevada resistência à corrosão em ambientes cáusticos e, quando comparados com os austeníticos, na presença de cloreto. A partir do início da década de 1980, as aplicações deste aço expandiram de forma acentuada e, atualmente, eles são usados, por exemplo, em sistemas de exaustão de automóveis, câmaras de combustão, peças de forno, recipientes para alimentos e em indústrias químicas, sendo para a fabricação desses componentes e instalações, a soldagem, o processo de união mais comumente adotado. [14] [22].

Gonçalves, Modenesi e Esteves (2019), afirmam que um problema de corrosão desses aços comumente encontrado após a sua soldagem está relacionado com a dissolução de carbonetos e nitretos de cromo em regiões expostas a temperaturas superiores a 900 – 1000 °C. Esses compostos voltam a precipitar em um resfriamento posterior preferencialmente ao longo dos contornos de grão. Durante a formação e crescimentos dos precipitados, o cromo é retirado de uma fina camada da matriz metálica adjacente aos precipitados. Essa perda local de cromo da matriz metálica, torna o material sensitizado ou sensível à corrosão localizada ao longo de seus contornos de grão.

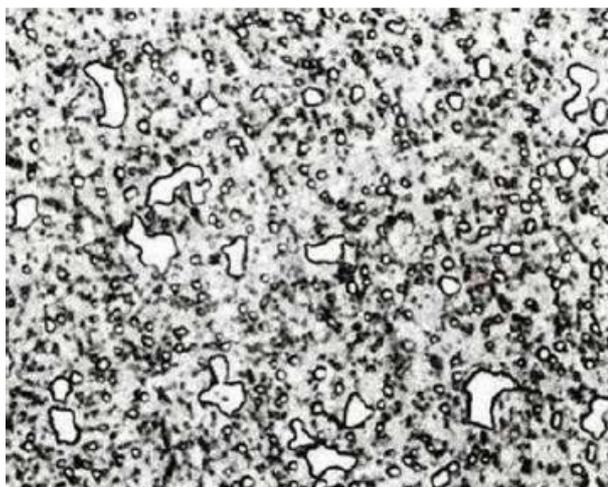
A perda de resistência à corrosão por esse mecanismo é comumente reduzida através da adição de elementos estabilizantes, isto é, capazes de formar carbonetos e nitretos com uma maior estabilidade termodinâmica do que os de Cromo. Assim, esses carbonetos e nitretos apresentam menor tendência de solubilizar durante a soldagem e diminuem a

perda localizada de cromo da matriz metálica, reduzindo a sua tendência à sensitização. Algumas propriedades mecânicas como dureza e limite de elasticidade também podem ser melhoradas por essa técnica[24][25].

3.4.4 Aços Inoxidáveis Martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos são essencialmente ligas Fe-Cr-C, com teores de cromo nominalmente na faixa de 10,5 a 18%, e de carbono até 1,2%, com capacidade em transformar austenita em martensita dentro de quase todas velocidades de resfriamento de acordo com ASM Handbook, Stainless Steels (1996).

A martensita é uma fase rica em carbono, frágil e muito dura. Os teores de cromo e carbono são balanceados para garantir uma estrutura martensítica após o encruamento. Excesso de carbonetos podem estar presente para aumentar a resistência ao desgaste. Elementos como nióbio, silício, tungstênio e vanádio podem ser adicionados para modificar a resposta à têmpera após encruamento[27]. Pode ser utilizados enxofre ou selênio para a melhoria da usinabilidade de algumas classes destes tipos de aço.



– Figura 08: Aço inoxidável martensítico ABNT 440C, austenizado por uma hora à 1010 °C, resfriado no ar e revenido 2h à 230 °C. Ataque: Reativo de Vilella (500X)

Fonte: Callister Jr., 2001

Os aços inoxidáveis martensíticos apresentam microestrutura ferrítica no estado recozido e após resfriamento rápido em ar ou em líquido passam para a forma martensítica e seu uso em geral é feito em estado temperado e revenido. São particularmente adequados para aplicações que requerem elevada resistência mecânica, dureza e resistência à abrasão em ambientes secos ou úmidos como por exemplo, em componentes de turbinas a gás ou vapor, mancais e peças de cutelaria [28].

Segundo Silva (2007), na condição recozida, apresentam limite de escoamento com cerca de 275 MPa e são usinados, conformados ou trabalhados a frio nessa condição. Quando se aumenta o teor de carbono, conseqüentemente se aumenta o potencial da resistência e dureza, mas diminui-se a ductilidade e tenacidade. Os aços com teores de carbono mais elevados são capazes de serem tratados na dureza de 60 HRC.

Nos dias atuais com importantes ligas de aplicação na engenharia, possui uma ampla faixa de utilização em diversos ambientes. Os aços martensíticos convencionais são especificados para aplicações onde se requer boa resistência à tração, à fluência e fadiga, em combinação com moderada resistência à corrosão e ao calor até aproximadamente 600 °C. São largamente utilizados pela indústria cuteleira, especialmente para produtos que tem contato com alimento. Nesta aplicação algumas propriedades são importantes, como resistência à corrosão, tenacidade e retenção do fio – esta última fortemente influenciada pela limpeza do aço. No entanto, aços com tais propriedades tendem a ser caros e possuem baixa soldabilidade.

Por ser um material com alta taxa de cromo o aço martensítico, quando aquecido a temperatura acima de sua zona crítica, ou seja 815 a 900 °C sofre austenitização parcial, gerando como produto ferrita e martensita, endurecendo mesmo sendo resfriado ao ar, sendo assim, um aço que gera dificuldade quando submetido ao processo de soldagem.

Assim, o aço inoxidável martensítico tem que sofrer a operação da têmpera, que transforma a ferrita em austenita e esta última em martensita durante o resfriamento. Com o temperamento, o carbono forma parte da fase martensítica e não está disponível para ser precipitado como carboneto de cromo. Somente depois de temperados, estes materiais passam a ser resistentes à corrosão. A alta dureza do material temperado (estrutura martensítica) faz com que estes materiais sejam muito utilizados na fabricação de facas. A resistência ao desgaste é muito forte.

3.4.5 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos foram desenvolvidos inicialmente na Alemanha, onde também tiveram o domínio da tecnologia de sua produção muito desenvolvido[30]. A classe dos austeníticos é a classe de aços de maior utilização dentre todos os aços inoxidáveis, exaustivamente utilizados em indústrias de transporte, de construção civil, como filtros ou próteses expansíveis na indústria médica, ou ainda na forma de contentores de substâncias químicas e radioativas, pois sua resistência à corrosão interessa muito a esses segmentos industriais, entre outros.

Os aços Austeníticos podem ser considerados os que apresentam maior dificuldade para serem usinados. Algumas características que dificultam essa usinagem são:

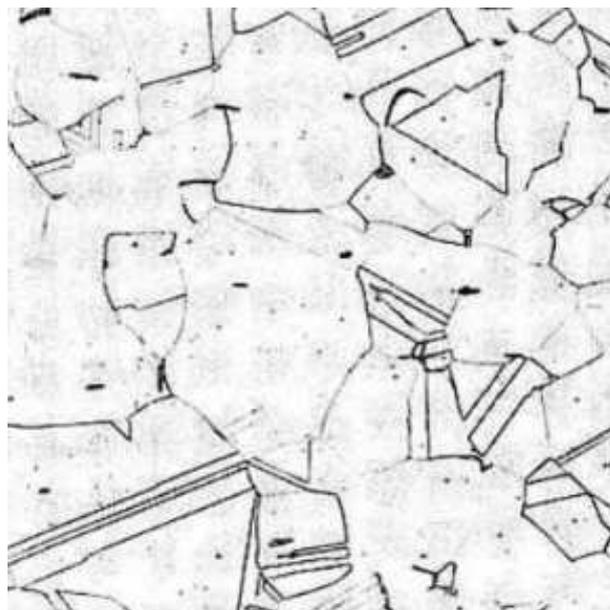
- Alto coeficiente de atrito, que tem como consequência, o aumento do esforço e do

calor gerado;

- Baixa condutividade térmica que dificulta a extração do calor da região de corte, o que facilita o desgaste da ferramenta;
- Alto coeficiente de dilatação térmica, o que torna difícil a manutenção de tolerâncias apertadas.

Colombier e Hochmann (1965) declaram que nos aços inoxidáveis austeníticos deformados a baixas temperaturas ocorre considerável aumento da resistência, sem, contudo, diminuir a ductilidade. Esse efeito tem grandes implicações nos processos de conformação, usinagem e em aplicações criogênicas e está associado à ocorrência de transformações de fase. Quanto mais baixa a temperatura de deformação e menor o teor de ligas do aço, menor a estabilidade da austenita, propiciando a formação de martensita.

Lartelli (2015) diz que a série de aços austeníticos mais utilizada é a 300, baseada no sistema 18Cr-8Ni, contendo elementos adicionais com a finalidade de promover propriedades adequadas. A liga 304 (UNS 30400) é considerada a raiz desta série de aços, e juntamente com o 304L (UNS 30403), representam os aços inox austeníticos mais utilizados. Esses aços são caracterizados por apresentarem excelente resistência à corrosão e uma ótima conformabilidade. Recozidos, eles possuem uma máxima resistência à corrosão e ductilidade. A figura abaixo demonstra a microestrutura de um aço inoxidável austenítico ABNT 316.



– Figura 09: Aço inoxidável ABNT 316 recozido à 1035 °C e temperado.
Ataque: H₂O – HCl – HNO₃ (100X)

O Molibdênio é adicionado em alguns dos aços austeníticos para aumentar sua resistência aos mecanismos de corrosão localizados tais como corrosão galvânica e alveolar.

Segundo Antunes e Antunes (2007), as características mecânicas dos aços inoxidáveis austeníticos são afetadas pelas transformações martensíticas induzidas pela deformação, que podem ocorrer de duas formas: reação martensítica induzida por tensão e reação induzida pela deformação plástica. Uma caracterização simples dessas reações resulta do modo como acontece o escoamento do material. Na primeira situação, o escoamento seria devido à transformação, ocorrendo, ainda, no regime elástico e no segundo caso, o escoamento seria por deslizamento das discordâncias e, as transformações surgiriam, posteriormente, no regime plástico. Desse modo, os autores efetuaram ensaios de tração em corpos-de-prova de aço inoxidável austenítico, em várias temperaturas, e os resultados, na forma de curvas tensão-deformação verdadeiras, foram ajustados à relação potencial, de forma que os elementos criogênicos utilizados fossem o nitrogênio líquido, gelo seco com acetona e gelo com água, obtendo-se, respectivamente, as temperaturas de 77K, 193K e 273K, e mais os ensaios a 300K.

Antunes e Antunes (2007) ainda completam afirmando que dependendo da temperatura de ensaio, os aços inoxidáveis austeníticos do tipo 304 podem apresentar até três estágios de encruamento marcadamente distintos (um estágio a 300 K, dois estágios a 273 K e três estágios a 193 K e 77 K). Demonstra-se que os estágios de encruamento estão, preponderantemente, associados aos seguintes micromecanismos de deformação plástica:

- Estágio I - movimentação e multiplicação de discordâncias na matriz austenítica.
- Estágio II - transformação martensítica em taxa crescente.
- Estágio III - transformação martensítica em taxa decrescente, tendendo à saturação.

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam excelente resistência à corrosão e à oxidação devido à formação de uma fina camada superficial de óxido, porém, suas características de desgaste e de dureza são relativamente baixas. A nitretação gasosa realizada em temperaturas relativamente altas aumenta a dureza da superfície e a resistência ao desgaste desses aços, porém diminui a resistência à corrosão [34]. Contudo, muitos trabalhos têm demonstrado que a nitretação e nitrocarbonetação por plasma, em temperaturas relativamente baixas (abaixo de 723 K) resultam na obtenção de uma camada superficial, responsável pelo aumento da dureza e resistência ao desgaste sem diminuição da resistência à corrosão. Essa camada é denominada fase "S" ou austenita expandida, sendo uma fase termodinamicamente metaestável, com uma supersaturação de nitrogênio, que permanece em solução sólida, resultando numa estrutura cúbica de face centrada distorcida [35].

Os resultados do estudo de Gontijo, Machado, Casteletti Nascente e Kuri (2007), demonstram comparativamente que a nitretação a plasma nos aços inoxidáveis AISI 304L

e AISI 316L apresentam comportamentos distintos com relação à formação das camadas de fase S e em relação à camada passiva formada sobre essas camadas modificadas. O aço 304L apresenta camadas com espessuras que variam de 2,6 a 36,4 μm , nas temperaturas e no tempo de tratamento considerados, e as espessuras do aço 316L variam de 1,6 a 26,1 μm , indicando um diferencial no coeficiente de difusão do nitrogênio nesses dois aços. Há uma maior solubilidade do nitrogênio no aço AISI 316L devido ao maior teor de molibdênio.

Tschiptschin e Pinedo (2010) dizem que a nitretação, sob plasma do aço inoxidável austenítico AISI 316L GRAU F138, na temperatura de 400 °C, promove a formação de uma camada constituída, predominantemente, de austenita expandida pelo nitrogênio, com a precipitação minoritária de nitretos de ferro e cromo. Para uma mistura gasosa 3N₂:1H₂, predominam os nitretos de ferro. Uma menor fração de nitrogênio, na mistura gasosa, 1N₂:3H₂, promove a precipitação de nitreto de cromo Cr₂N e uma precipitação minoritária de nitretos de ferro. O elevado teor de nitrogênio dissolvido (cerca de 45% atômico) conduz a uma expansão marcante da célula unitária.

3.4.5.1 Aço Inoxidável Austenítico 304L

O Aço Inoxidável AISI 304L é uma liga metálica composta por Ferro, Carbono, Silício, Manganês, Fósforo, Enxofre, Cromo e Níquel. Ele é o mais conhecido entre os aços da família dos Austeníticos, possuindo entre as suas principais qualidades, a alta resistência a corrosão a uma temperatura de até 920 °C, alta resistência mecânica a altas temperaturas, facilidade para soldagem (sendo seu melhor resultado obtidos com a utilização do vácuo, uma vez que esta é a que melhor preenche os requisitos de limpeza e proteção contra oxidação), anti magnetismo e o fato de não serem temperáveis por tratamento térmico, propriedade esta que faz com que este material seja especialmente indicado para a aplicação criogênica.

Por conta destas características, o Aço Inoxidável 304L é indicado para a fabricação de:

- Peças para trens e ônibus;
- Tanques para transporte de líquidos e produtos diversos;
- Tubulações, reatores e tanques de mistura para diferentes indústrias;
- Sistemas de exaustão;
- Painéis e revestimentos para residências, edifícios e estádios;
- Corrimãos e apoiadores para interiores e exteriores;
- Utensílios como talheres e panelas;

- Itens como pias e cubas;
- Estruturas para móveis como mesas e cadeiras;
- Aparelhos como cafeteiras, lavadoras e fogões;
- Revestimento de elevadores.

Sendo assim, este tipo de Aço Austenítico tem aplicações nas indústrias aeronáuticas, náuticas, ferroviárias, petroquímicas, açucareiras, alimentícias e têxteis, entre outras.

3.4.5.2 Aço Inoxidável Austenítico 316L

A liga metálica denominada como Aço Inoxidável AISI 316L possui composição química composto de carbono, manganês, fósforo, enxofre e silício, além de níquel, cromo e molibdênio, o que lhe confere características como: resistência contra oxidação se exposta até a temperatura de 875 °C; resistência contra corrosão intercrystalina até a temperatura de 300°C; Resistência contra corrosão em ambientes clorados; resistência criogênica (baixas temperaturas); conformabilidade excelente e soldabilidade ótima. Além disso, o aço inoxidável 316L recebe cerca de 2% de adição de molibdênio, tornando-o um material mais resistente à corrosão por pites e frestas, sendo mais indicado em ambientes que contenham até 800 ppm de cloreto [38].

Este tipo de aço é ligeiramente mais adequado do que o Aço 304L para a fabricação de acessórios, estruturas e equipamentos para a chamada indústria hospitalar que, por sua vez, engloba os hospitais, clínicas, farmácias, centros veterinários e outras instituições de saúde. Como todo aço inoxidável, sofre ação corrosiva do ânion cloreto.

A diferença do Aço 304L para o 316L é que o segundo conta com cerca de 2,50 % de molibdênio em sua composição. Essa liga garante a essa classe de Aço Inox uma qualidade superior para as mesmas aplicações do Aço 304L.

3.4.5.3 Aços Inoxidáveis Superausteníticos

Segundo Curtis (2002), os aços inoxidáveis superausteníticos, considerados também como aços austeníticos de alto desempenho, são ligas que exibem maior resistência à corrosão por pite, por frestas e sob tensão quando comparados aos aços inoxidáveis austeníticos típicos da série 300, além de terem um menor custo que as ligas tradicionais de níquel, da ordem de 50 %. O alto teor de níquel, associado ao cromo, proporciona uma boa resistência à corrosão e o molibdênio vem a ser mais eficaz como um agente atuando na resistência à corrosão clorídrica por pite. O teor de nitrogênio serve para aumentar a resistência à corrosão por pite e também proporcionar ao aço superaustenítico uma maior resistência mecânica quando comparado com os aços austeníticos convencionais da série 300.

Tabela 1 – Tabela comparativa entre os aços inoxidáveis 304L e 316L

AISI/SAE	Composição Química (%)								Recozimento (°C)	Dureza (HB)
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S		
304L	0,03 máx	0,75 máx	2,00 máx	19,00	-	10,00	0,045 máx	0,030 máx	1050/1070	Máx 180
316L	0,03 máx	0,75 máx	2,00 máx	17,00	2,50	12,00	0,045 máx	0,030 máx	1050/1070	Máx 180

Fonte: Adaptada - Disponível em:

<https://favorit.com.br/sites/default/files/tabelas/acos-inoxidaveis.html>. Acesso em: 11 nov. 2020.

OUTUKUMPU (2005) ainda complementa dizendo que esses aços são assim denominados, pois, além de apresentarem boa resistência à corrosão por pite, reúnem, também, excelentes propriedades mecânicas, o que os torna uma das opções para a fabricação de componentes utilizados pela indústria petrolífera. Entretanto, o encruamento superficial, durante os processos de usinagem, pode alterar essas propriedades.

Os equipamentos quando expostos em água do mar sofrem, principalmente, de corrosão por pite e por frestas. Um teste comparativo realizado no campo [41], em uma planta de dessalinização, mostrou que o aço superaustenítico oferece maior resistência à corrosão por pites e por frestas.

A rugosidade superficial é um conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam o acabamento superficial [42]. Esses acabamentos, tendem a diminuir, quando bem realizados, a formação de pites.

A usinagem é um dos mais importantes processos que está envolvido na fabricação dos componentes de bombas e por isso torna-se importante conhecer os efeitos deste processo na resistência à corrosão por pite, já que durante a usinagem, a seleção dos parâmetros de corte apropriados é muito importante para seu controle.

O torneamento é um dos processos de usinagem básico e mais largamente utilizado dentro dos processos de usinagem que as indústrias utilizam [43] e, também, um dos processos mais comuns em pesquisas experimentais em cortes de metal [6]. No torneamento, o avanço e o raio de ponta têm uma contribuição geométrica à rugosidade superficial [8].

Gravalos (2008) realizou um estudo que teve por objetivo investigar a relação entre

a resistência à corrosão por pite e a rugosidade em superfícies usinadas do aço inoxidável superaustenítico ASTM A744 grau CN3MN, onde as amostras fundidas sofreram um torneamento cilíndrico com diferentes combinações das condições de corte, resultando, assim, em diferentes padrões de rugosidade superficial. As superfícies das amostras, então usinadas, foram caracterizadas quanto à rugosidade e ao endurecimento. Após submetidas a um teste por imersão, que acelerava a corrosão, essas superfícies foram examinadas num estereoscópio, tendo sido, também, determinada a perda de peso devido à corrosão. Observou-se que as amostras exibiram diferentes comportamentos com relação à resistência à corrosão, de acordo com as condições de usinagem aplicadas. Uma correlação entre a resistência à corrosão e a rugosidade superficial ficou evidente, assim como à perda de peso devido à formação de pites. A usinagem provocou o encruamento do aço, elevando sua dureza superficial de 200 para 350 HV. A região encruada atingiu uma profundidade de até $350\mu m$, a partir da superfície usinada.

Rose (1999) explica que o aumento da temperatura e a baixa condutividade térmica, uma das características dos aços inoxidáveis austenítico, favorecem o aquecimento da superfície do material da peça para a formação do encruamento superficial. Esse encruamento superficial significa um aumento considerável na dureza superficial, quando a estrutura do material é deformada durante o processo de usinagem [46]. O nitrogênio facilita o encruamento da fase austenítico e, analisando-se a composição química de um aço superaustenítico, observa-se que a quantidade desse elemento é, aproximadamente, 4 vezes maior que num aço austenítico convencional.

3.4.5.4 Usinagem em Aços Superausteníticos

Mesmo com as características especiais, os superausteníticos podem ser usinados com sucesso pelos métodos normais utilizados para se usinar os aços inoxidáveis austeníticos série 300 e ligas de níquel. Comparado com a classe austenítica série 300, os superausteníticos apresentam:

- Maior resistência em temperatura ambiente e em temperaturas elevadas;
- Maiores taxas de encruamento;
- Semelhantes características de atrito;
- Conteúdo de enxofre extremamente baixo.

O enxofre nos aços inoxidáveis austeníticos formam inclusões frágeis que reduzem a ductilidade e melhora a usinabilidade porque diminui a zona plástica e a taxa de encruamento. Porém, o uso do enxofre é restrito porque reduz a resistência à corrosão.

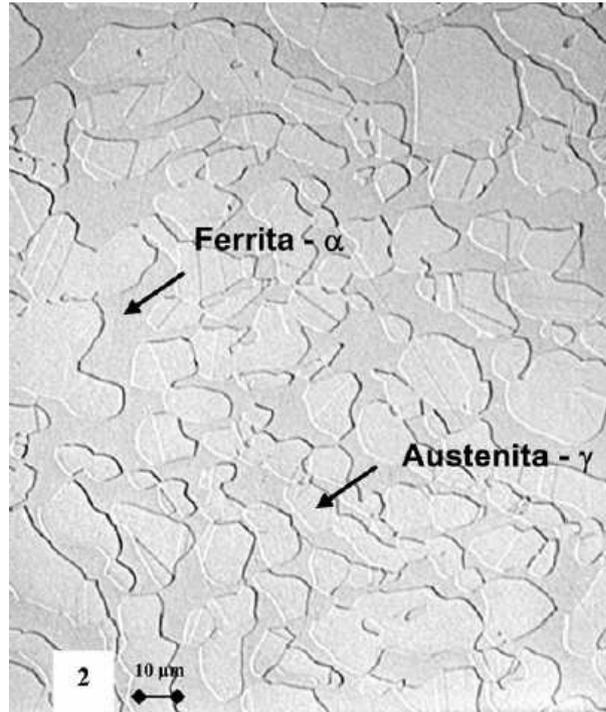
A usinabilidade dos aços inoxidáveis superausteníticos é, portanto, mais difícil comparados aos aços austeníticos da série 300. Os princípios básicos de usinagem que se

aplicam para as classes de aços inoxidáveis austeníticos e de ligas de níquel é um bom ponto inicial para usinagem dos mesmos. Isso inclui ferramentas com corte bem agudo, fixações rígidas, profundidades de corte acima da camada encruada e 27 geometrias de corte positivas. A baixa condutividade térmica desta liga faz com que seja importante ter o fluido de corte alimentado continuamente à ferramenta e a peça. Fluidos de corte solúvel em água são refrigerantes principais e os mais utilizados para operação de alta velocidade com insertos de metal duro. O avanço e profundidade de corte são muito importantes se houver uma operação de acabamento subsequente, pois o efeito do encruamento superficial prévio deverá ser removido o mais que possível antes dos passes de acabamento. Os passes de acabamento deverão ter a profundidade suficiente para cortar abaixo da camada superficial encruada. As ferramentas de corte altamente resistentes são úteis devido à alta resistência do aço inoxidável [39] [47].

3.4.6 Aços Inoxidáveis Duplex

A primeira referência sobre o aço inoxidável duplex surgiu em 1927, quando Bain e Griffith relataram seus resultados em um sistema Fe-Cr-Ni e mencionaram a existência de um campo compreendendo duas fases: austenita e ferrita. Anos mais tarde, as primeiras toneladas de aço duplex foram produzidas e estudadas.

Os aços inoxidáveis duplex têm uma estrutura mista de 50 % de austenita e 50 % de ferrita, e como resultado tem características desses tipos básicos. Uma composição química típica tem 22 % de cromo, 5 % de níquel e 3 % de molibdênio [48] com pequena adição de nitrogênio.



– Figura 10: Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex

Fonte: Nilsson, J, (1992).

Os aços duplex são endurecíveis por tratamento térmico, mas são mais duros que os aços ferrítico e austenítico na condição recozida e tem limite de escoamento médio em torno de 450 MPa. Como os aços ferríticos, são ferromagnéticos, mas tem boa conformabilidade e soldabilidade dos aços austeníticos. Entretanto, são necessários maiores esforços na conformação devido a sua maior resistência. Sua grande vantagem é sua maior resistência à corrosão sob tensão.

Totten (2007) e Armas (2008) afirmam que a elasticidade desses aços é superior a duas vezes a elasticidade em aços de única fase, como aços ferríticos ou austeníticos. Eles possuem também alta tenacidade e ductilidade se comparados com aços ferríticos e martensíticos, e alta resistência a corrosão sob tensão e corrosão intergranular, se comparados a aços austeníticos. Possuem, também, limite de escoamento duas vezes maior que para o aço inoxidável austenítico e a vantagem de ter menos teor de níquel, dando ao aço duplex resistência à corrosão similar a dos aços inoxidáveis austeníticos. A combinação de alta resistência e baixo teor de níquel torna o aço duplex uma alternativa bastante atraente em contraste com os tipos austeníticos, especialmente quando o custo do níquel for alto.

Estes aços são usados em componentes de equipamentos expostos a água do mar, trocadores de calor, bombas e tubos, em indústrias química, petroquímica, de papel e celulose [16]. Também sendo usados frequentemente em soluções contendo cloretos, como

substituição aos aços austeníticos que estão sujeitos a corrosão sob tensão e a corrosão por pites.

Segundo Jana (1992), existem muitas aplicações para aços duplex que necessitam do processo de soldagem. Para mitigar as alterações que ocorrem devido a este processo nas propriedades mecânicas e na resistência à corrosão dos aços inoxidáveis duplex são necessários alguns cuidados durante o processo. Os processos de soldagem a arco convencional, praticamente todos, podem ser utilizados para a soldagem de aços inoxidáveis duplex. Já os processos de soldagem com uma fonte de energia de alta densidade, como o feixe de elétrons ou o laser, possuem utilização limitada. Nestes casos as altas velocidades de resfriamento da junta impossibilitam a precipitação da austenita.

Gnanasundaram (2014) diz que na soldagem de aços duplex um parâmetro fundamental de controle é o aporte térmico, uma vez que quanto maior, menor a taxa de resfriamento.

Pereira (2009) complementa afirmando que quando é utilizado um aporte térmico elevado a velocidade de resfriamento da junta soldada é menor. O resultado é o favorecimento da precipitação de austenita, de fases intermetálicas e o crescimento do grão. Um aporte térmico baixo resulta em uma velocidade de resfriamento elevada e, conseqüentemente, a precipitação de austenita é dificultada e uma fração elevada de ferrita poderá ser formada. Neste caso, pode favorecer a precipitação de nitretos de cromo na ferrita. Tal fato se justifica, uma vez que o nitrogênio não tem tempo suficiente para se difundir para a austenita que é formada em pequena quantidade. Com isso, a ferrita fica supersaturada de nitrogênio, fazendo com que ocorra a precipitação de nitretos de cromo nos grãos de ferrita ou em seus contornos de grão.

Segundo Zamprogno (2010) em seu trabalho foi realizada a análise da quantidade de ferrita na zona termicamente afetada (ZTA) do AID UNS S32304 e verificou-se que quanto maior o aporte térmico menor o teor de ferrita na ZTA, justificado pela redução da taxa de resfriamento e, conseqüentemente, aumento da quantidade de austenita.

De acordo com Morales (2007), um maior aporte térmico resulta em maior molhabilidade do cordão de solda, uma maior penetração e menor velocidade de soldagem.

3.4.6.1 Aços Inoxidáveis Superduplex

O aço superduplex é um produto metálico, muito utilizado na indústria de petróleo e gás, que alia características de um aço inoxidável ferrítico e um austenítico, possuindo assim, alta resistência mecânica e à corrosão em relação aos aços inoxidáveis austeníticos convencionais. A diferença dos aços inoxidáveis duplex e super duplex consiste principalmente nas concentrações de cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio que essas ligas apresentam, sendo que alguns desses elementos interferem diretamente na resistência à corrosão por pite, que é uma forma de ataque químico em ambientes contendo íons halogê-

nios, dentre eles destaca-se o íon cloreto (Cl⁻). Uma maneira de quantificar empiricamente essa propriedade química é através da resistência equivalente à corrosão por pite, ou PRE (Pitting Resistance Equivalent). De acordo com a norma ASTM A890/A890M, essa grandeza pode ser calculada de acordo com a expressão:

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

Assim, os aços inoxidáveis bifásicos (ferrítico/austenítico) cujos valores do PRE forem da ordem de 35 a 40, constituem a família dos aços inoxidáveis duplex e aqueles cujos PRE forem superiores a 40, constituem a família dos aços inoxidáveis superduplex [72].

Nery, Vogel e Araujo (2013) afirmam que na indústria de petróleo e gás o aço superduplex tem apresentado problemas na obtenção de peças com tolerâncias dimensionais e de forma macro e microgeométricas, principalmente na indústria de bombas para a área de petróleo (principal usuária dos aços superduplex) onde o processo de torneamento é o mais utilizado. Assim, o aço superduplex está sendo substituído, quando há possibilidade, pelo inconel, que são ligas com alta resistentes à corrosão e oxidação, adequados para serviços em ambientes extremos sujeitos a pressão e calor, o que traz um aumento de custo em matéria prima. Além do custo da matéria prima, outro fator importante que influencia no custo de fabricação é a propriedade usinabilidade. Os modelos de previsão e determinação da usinabilidade e os valores ideais dos parâmetros de processo na fabricação também têm sido áreas de interesse para pesquisadores e engenheiros de fabricação. Além disso, os modelos de usinabilidade têm restrições muito críticas para a seleção de parâmetros no processo de planejamento de sistemas de usinagem.

Bolfarini (2005) declara que os aços superduplex têm propriedades mais nobres em relação aos duplex e apresentam maior resistência mecânica e uma superior resistência equivalente à corrosão por pite. Outra grande vantagem associada ao emprego dos aços inoxidáveis superduplex é o custo, devido o material ser uma alternativa mais econômica em relação a algumas ligas de níquel e até mesmo a outros aços inoxidáveis. São caracterizados pela composição química similar à dos aços inoxidáveis duplex, com maiores teores de Cr, Ni, Mo e N.

Uma distinção deve ser feita entre os tipos mais antigos de aços austenítico-ferríticos e os duplex desenvolvidos mais recentemente. As propriedades de alguns deles foram melhoradas por intermédio de um balanceamento cuidadoso da composição química. Os aços duplex geralmente apresentam resistência ao impacto mais baixa que os austeníticos e as ligas mais novas oferecem boa tenacidade em temperaturas moderadamente baixas, além de boa soldabilidade. O nitrogênio cumpre um papel importante para aumentar a soldabilidade. Esse é um resultado do balanceamento da composição química [75].

O estudo dos aços superduplex faz parte de uma categoria de materiais ainda em expansão. É possível observar três linhas de pesquisa voltadas ao estudo destes aços. O primeiro grupo, trata do comportamento do material em meio agressivo e a influência de tratamento térmico na resistência à corrosão [76] [77] [78]. O segundo grupo investiga, a influência das condições de usinagem na qualidade das peças fabricadas [73]. Por último, o terceiro grupo, investiga a micro usinagem dos aços inoxidáveis, duplex e superduplex [79].

Bordinassi (2006) declara que existe uma limitação com relação à aplicação dos aços duplex e superduplex com relação à temperatura. É sugerido que as temperaturas de operação em componentes destes aços não superem 315°C , pois a fase ferrítica presente sofre fragilização dos 475°C . Existem estudos que aconselham que não se ultrapasse a temperatura de 280°C , já outros citam que a temperatura limite de trabalho é de 250°C . Para o trabalho em baixas temperaturas, recomenda-se que não se ultrapasse -40°C , devido ao comportamento de transição dúctil-frágil da ferrita. Além disso, se não respeitado o limite superior de temperatura, pode ocorrer a formação de fases secundárias, que são deletérias, tanto às propriedades mecânicas, quanto a de resistência à corrosão do material.

3.4.6.2 Usinabilidade dos aços inoxidáveis Superduplex

A usinabilidade de um material é definida basicamente em termos de quatro fatores, são eles:

- Acabamento e integridade da superfície usinada
- Vida da ferramenta
- Força e potência requeridas para a operação
- Nível de dificuldade no controle do cavaco

Com isso, um material de boa usinabilidade tende a produzir superfícies íntegras e bem-acabadas, com uma longa vida da ferramenta, gerar pequenas forças de usinagem na ferramenta com conseqüente pequena potência consumida para a realização da operação e fornecer um bom nível de controle do cavaco [80].

Uma alta usinabilidade é um requisito que os fabricantes buscam em seus materiais, pois esta implica diretamente em sua produtividade [70]. As dificuldades de se usinar um aço superduplex são maiores ainda, visto que a usinabilidade de um material é frequentemente comparada com seu PRE. Devido à grande quantidade de austenita, nitrogênio e outros elementos de liga, faz com que a usinabilidade deste material piore rapidamente. Outro fator para a baixa usinabilidade e a estrutura bifásica aleatoriamente distribuídas, onde cada uma contribui de maneira diferente para a formação do cavaco [71].

Gamarra (2017) declara que as principais características dos aços inoxidáveis super duplex em usinagem são:

- Formação de cavacos resistentes e abrasivos para a ferramenta;
- Altas forças de corte;
- Possível lascamento da ferramenta por impacto de cavacos;
- Alto desgaste da ferramenta;
- Baixa usinabilidade devido ao alto PRE;
- Estrutura bifásica que induz vibrações;
- Cavacos longos.

Gamarra (2017) ainda afirma que os aços inoxidáveis superduplex são produzidos com o mínimo teor de enxofre possível, com isto, este material não recebe tanto auxílio deste elemento como quebra-cavacos. Em outros aços inoxidáveis, o enxofre se combina com o manganês formando um composto denominado sulfeto de manganês, diminuindo o coeficiente de atrito e aumentando a usinabilidade das ligas. Sem este composto, a fricção pode ser excessiva, gerando elevada quantidade de calor no processo, o que causa deformações plásticas e craterizações severas. As pressões específicas de corte também são maiores no superduplex, pois eles possuem maior tensão de escoamento e maior tensão de ruptura, exigindo máquinas e maior potência e maior rigidez na fixação de ferramentas à peça para diminuir a tendência a vibrações. As combinações destes efeitos indesejados na usinagem desse tipo de aço, geram diferentes mecanismos de desgaste, como aderência, difusão e abrasão, que ao longo do tempo se traduzem em desgaste de cratera, desgaste de entalhe, desgaste flanco e aresta postiça de corte

Gravalos (2008) alega que na usinagem de aços austeníticos e duplex, incluindo os superduplex, o atrito entre a ferramenta e a peça produz elevadas forças de corte, que elevam a temperatura. Este fato combinado com a baixa condutividade térmica do material, contribuem para o aquecimento da superfície de usinagem, aumentando a dureza por deformação plástica. A presença de nitrogênio facilita o encruamento da fase austenítica, devido ao alto percentual deste elemento nos materiais descritos, é sugerido utilizar ferramentas com ângulo de saída positivo, preferencialmente com cobertura de nitreto de titânio (TiN), para minimizar o atrito ferramenta-peça na operação.

Num determinado estudo Jesus (2013) analisou as durezas superficiais através ensaios de microdureza pós usinagem de aço inoxidável austenítico e duplex. Foi verificado através da taxa de severidade, que relaciona a variação da dureza com a dureza inicial

na escala Vickers, que os austeníticos encruaram mais que os duplex. Os duplex demonstraram menor encruamento devido à presença de fase ferrítica, porém também sofreram encruamento devido à fase austenítica. A taxa de severidade para os aços austeníticos foi de 0,8 e para os duplex de 0,6.

Gravalos (2007), após o torneamento de um aço inoxidável super austenítico foram medidas as microdurezas desde a superfície até 2 mm de profundidade no substrato do corpo de prova. Nesta análise, verificou-se que na superfície a peça sofreu um alto grau de encruamento, com picos severidade de até 0,8. No entanto, realizando-se a média destas aferições, obteve-se uma severidade de 0,45.

Fernandes (2018) concluiu que, os aços super duplex possuem comportamento não-linear em usinagem devido ao fato de possuírem estrutura bifásica heterogênea austeno-ferrítica, que promove comportamentos dissimilares e por vezes imprevisíveis em usinagem, com isso, alta dispersão dos valores de forças de usinagem adquiridas dinamicamente que pode ser explicada pela mudança de comportamento mecânico induzida por deformação plástica e pela heterogeneidade intrínseca da microestrutura do aço inoxidável super duplex.

3.4.7 Aços Inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação

Os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação são endurecíveis por tratamento de envelhecimento e assim tem algumas similaridades com os aços martensíticos, entretanto o processo metalúrgico para endurecimento é diferente. Estes aços são capazes de atingir a resistência a tração até 1700 MPa [48]. Normalmente tem estrutura martensítica e, desta forma são ferromagnéticos.

Os aços endurecíveis por precipitação tem boa ductilidade e tenacidade, dependendo do tratamento térmico. Sua resistência à corrosão é comparável ao aço austenítico 304. Podem ser soldados mais facilmente que os aços martensíticos comuns.

Os tratamentos térmicos consistem de três passos básicos em alguns tipos desses aços (austeníticos e semi-austeníticos): condicionamento da austenita, transformação para martensita e posterior precipitação ou envelhecimento. No caso dos martensíticos, não é necessário o tratamento de condicionamento [56].

Os aços endurecíveis por precipitação são, particularmente, adequados a tratamentos de nitretação, devido à existência de seus picos de endurecimento, que permitem o tratamento sem quedas acentuadas nas durezas dos substratos, fator este fundamental para manter a integridade da camada produzida. As altas durezas superficiais conferidas pelas camadas nitretadas aumentam as resistências à fadiga e ao desgaste das peças, ampliando suas vidas úteis e a faixa de utilização. A nitretação iônica, devido à sua flexibilidade, em termos de temperaturas de tratamento, constituísse na alternativa mais indicada nesse caso de tratamento [57] [58]. A principal vantagem da nitretação a plasma de

aços endurecíveis por precipitação é atribuída à possibilidade de emprego de temperaturas inferiores à de envelhecimento do aço [59].

Casteletti, et al (2010), propuseram avaliar e comparar a resistência ao desgaste por abrasão de dois aços endurecíveis por precipitação, o PH13-8Mo e outro com adição de Nb, nitretados por plasma em corrente contínua e pulsada. Os autores apresentaram que a nitretação com plasma pulsado produziu um aumento acentuado na resistência ao desgaste do aço PH13-8Mo, porém, no caso do aço com Nb, esse efeito foi extremo. O tratamento com corrente contínua produziu uma camada que apresentou a melhor resistência ao desgaste abrasivo, devido, provavelmente, à menor fragilidade da camada formada.

Esse tipo de aço é desenvolvido e usado de forma ampla, tanto nos Estados Unidos como no Reino Unido, nas aplicações aeroespaciais.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentado uma revisão bibliográfica sobre os aços inoxidáveis, assim como suas particularidades, apresentando um pouco mais sobre o aço inoxidável, suas ligas, propriedades e aplicações. Desse modo podemos concluir que:

- Os aços inoxidáveis foram criados para acabar com o problema da corrosão dos aços comuns, como o aço carbono, criando assim, maior resistência contra ele. Essa solução deu início a partir da adição de elementos que deram ao aço inoxidável características particulares;
- O aço inox é bem aceito por todas as suas vantagens: não “enferruja”, suporta altas temperaturas, é higiênico por ter uma superfície lisa e pouco porosa, possui boa aparência, e também, por não descascar devido à sua estrutura química;
- Atualmente, o aço inox é largamente utilizado em nossas vidas, seja na nossa casa (móveis, cadeiras, eletroeletrônicos) ou em volta de nós (fechadas prediais, automóveis etc);
- A maior deformação do aço inoxidável austenítico, está relacionada com sua estrutura CFC, que apresenta mais planos de deslizamentos que uma estrutura bifásica, como no caso dos aços duplex e do martensítico com uma estrutura TCC;
- Um acabamento superficial liso, ou seja, uma baixa rugosidade, obtida através da seleção dos parâmetros de usinagem apropriados, contribuem no controle de formação dos pites em superfícies usinadas;
- O desenvolvimento dos aços inoxidáveis dúplex vem contribuindo para a solução de problemas de corrosão verificados na indústria. O aumento da utilização dos aços inoxidáveis duplex em ambientes de condições extremas, como altas pressões e atmosferas oxidantes, é devido às suas excelentes propriedades de resistência mecânica e à corrosão nestes ambientes. Alta resistência mecânica e a dilatação térmica próxima à dos aços carbono colocam os aços dúplex em posição privilegiada do ponto de vista de projeto, pois permitem a utilização de equipamentos mais leves, mais seguros, isento de manutenções, além de propiciar aumento da vida útil.

4.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Investigar a relação entre as forças de corte e a morfologia do cavaco em aços inoxidáveis;
- Investigar os parâmetros de corte do superaustenítico quando comparado ao superduplex;

- Analisar a relação entre a temperatura da ferramenta e seu desgaste durante o torneamento de aços inoxidáveis;
- Realizar o estudo experimental da degradação da ferramenta no corte, aplicado aos aços inox, com foco em superaustenítico e superduplex;
- Comparação entre forças de corte em torneamento de aço inoxidável superduplex utilizando velocidades de corte ideais para o aço inoxidável ferrítico e para o austenítico;
- Análise microestrutural e de microdureza pré e pós usinagem de aço inoxidável superduplex;
- Avaliar o efeito da refrigeração de alta pressão no torneamento em desbaste do aço inoxidável.

REFERÊNCIAS

- [1] NEHRING, José Eduardo. **Usinagem completa**. Trabalho intitulado traduzido em português.
- [2] COPPINI, Nivaldo Lemos. **Usinagem enxuta: Gestão do processo**. São Paulo – Brasil. Editora: Artiliber LTDA, 2015. 1a Edição.
- [3] TRENT, E. M. **Metal cutting**. 2. ed. Londres: Butterworths e Co., 1985.
- [4] BLACK, J. T. "**Introduction to machining processes**". **Metals handbook. machining**. 9. ed. Nova York: ASM International, 1995.
- [5] SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. Londres: Oxford University Press, 1984.
- [6] TRENT, Edward M. WRIGHT, Paul K. **Metal cutting**. Woburn - USA: Butterworth-Heinemann, 2000. 4th Edition.
- [7] FERRARESI, Dino, - **Usinagem dos metais**. São Paulo, Edgard Bkucher, p. 540 - 609, 1977
- [8] DINIZ, Anselmo E, -**Tecnologia de usinagem dos materiais**. mm editora, p. 17 - 27, 2003.
- [9] AGARELLI G., LEBRÃO S. M. G. **Análise da sensitização de juntas soldadas em aço inoxidável AISI 409 para uso em sistema de exaustão veicular**. XXV Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva. Instituto Mauá de Tecnologia. Mauá. 2017
- [10] ALTOBELLI A., R. **Caracterização do comportamento frente à corrosão de um aço inoxidável austenítico para aplicações biomédicas com revestimentos PVD de TiN, TiCN e DLC**- São Paulo. Instituto de Energias Elétricas e Nucleares, 2006.
- [11] PADILHA, A.F., RIOS, P.R., "**Decomposition of austenite in austenitic stainless steels**", ISIJ International, v. 42, n. 4, pp. 325-327, 2002.
- [12] PICKERING, F.B., "**Physical Metallurgical Development of Stainless Steels**", International Metals Reviews, pp. 227-268, 1976.
- [13] SILVA, F. C. S. **Diagnóstico do Processo de Torneamento do Aço Inoxidável ABNT 304 a partir do Estudo da Formação do Cavaco**. 89 fls. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- [14] LIPPOLD, J.C; KOTECKI, D.J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**, New Jersey, John Wiley and Sons, p 141-198, 2005.
- [15] PACKNER, D.; BERNSTEIN, I.M. **Handbook of stainless steels**. New York: McGraw-Hill, 1977. 800p.
- [16] MODENESI, P.J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. São Paulo: SENAI, 2001. 100p.

- [17] MESQUITA, Eduardo Luiz Alvares, RUGANI, Léo Lucas. **Estampagem dos aços inoxidáveis**. Acesita S.A. Associada à Usinor, 1997.
- [18] GROOVER, Mikell P. **Introdução aos Processos de Fabricação**. tradução Anna Carla Araujo ; tradução e revisão técnica André Ribeiro de Oliveira ... [et al.] - 1. ed. - Rio de Janeiro : LTC, 2014. il. ; 28 cm.
- [19] SANTOS, Ellen Rodrigues dos. **Estudo da viabilidade de formação de nitreto de Boro em aços inoxidáveis ferríticos**. Universidade de São Carlos, São Carlos, 2020.
- [20] LABIAPARI, W. S. et al. **Micro abrasion-corrosion of ferritic stainless steels**. *Wear*, v. 376– 377, p. 1298–1306, 2017.
- [21] VILELA, Larissa de Barros Machado; FARIA, Geraldo Lúcio de; ALCANTARA, Cláudio Moreira de; OLIVEIRA, Tarcísio Reis de; COTA, André Barros. **Efeito da taxa de resfriamento sobre a formação de martensita em um aço inoxidável ferrítico com 11 %Cr e baixos teores de intersticiais**. *Revista Materia*, v.24, n.01,2019.
- [22] MALLAIAH G.; KUMAR, A.; REDDY, P.R.; REDDY G.M. **Influence of grain refining elements on mechanical properties of AISI 430 ferritic stainless steel weldments – Taguchi approach**. *Materials and Design*. 2012.
- [23] GONÇALVES, Caroline Nazaré. MODENESI, Paulo José. ESTEVES, Luiza. CAMPOS, Wagner Reis da Costa. **Avaliação da Adição de Ti, Nb e (Ti+Nb) na Microestrutura e Susceptibilidade à Sensitização de Aços Inoxidáveis ferríticos Submetidos à Soldagem TIG**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- [24] AMUDA, M.O.H.; MRIDHA, S. **Microstructural features of AISI 430 ferritic stainless steel (FSS) weld produced under varying process parameters**. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2009;4(2):160-166.
- [25] GORDON, W.; BENNEKOM, A.V. **Review of stabilization of ferritic stainless steels**. *Materials Science and Technology*. 1996;12(2):126-131.
- [26] ASM Specialty Handbook, Stainless Steels, U. S. A: ASM, vol. 4, 1996.
- [27] PACKNER, D.; BERNSTEIN, I. M. **Handbook of stainless steels**. New York: McGraw-Hil,1997. 800p.
- [28] LULA, R. A. **Stainless Steel**. USA: American Society for Metals, 1986. 173p.
- [29] CALLISTER JR, W. D. **Fundamentals of Materials Science and Engineering**. John Wiley and Sons, Inc., 5th ed.,2001.
- [30] OUTOKUMPU STAINLESS, A. **Handbook of Stainless Steel**. Avesta: Outokumpu Stainless AB, 2013.
- [31] COLOMBIER, L., HOCHMANN, J. **Aciers inoxydables aciers réfractaires**. Dunod, 1965.

- [32] LARTELLI, Alexandre. **Avaliação de defeitos tipo “gouge” em tubos de aço inox 304L utilizados na fabricação de agulhas hipodérmicas**, Rio de Janeiro, 2015.
- [33] ANTUNES, Augusto Eduardo Baptista. ANTUNES, Lidia Mikiko Doi. **Comportamento plástico do aço inoxidável austenítico em baixa temperatura**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 60(1): 141-147, jan. mar. 2007.
- [34] TADAKA, J.; OHIZUMI, Y.; MIYAMURA, H.; KUWAHARA, H.; KIKUCHI, S.; TAMURA, I., **Journal of Materials Science** **21** (1986) 2463.
- [35] FEWELL, M.P.; MITCHELL, D.R.G., PRIEST, J.M.; SHORT, K.T.; COLLINS, G.A. **Surface and Coatings Technology** 131 (2000) 300.
- [36] GONTIJO, L.C.; MACHADO, R.; CASTELETTI, L.C.; KURI, S.E.; NASCENTE, P.A.P. **Comparação entre os comportamentos dos aços inoxidáveis AISI 304L e AISI 316L nitretados a plasma**. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 26, n. 3, 145-150, 2007.
- [37] TSCHIPTSCHIN, André Paulo; PINEDO, Carlos Eduardo. **Estrutura e propriedades do aço inoxidável austenítico AISI 316L Grau ASTM F138 nitretado sob plasma à baixa temperatura**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 63(1): 137-141, jan. mar. 2010.
- [38] SOARES, R. B.. **Avaliação da resistência à corrosão de aços carbono baixa liga usando a espectroscopia de impedância eletroquímica e ensaios de campo**. 2013.
- [39] CURTIS, J. F.; KOVACH, W., **High Performance Stainless Steels**. Nickel Development Institute, 95 p., U.S.A., 2002.
- [40] OUTUKUMPU, **Steel Stainless Properties-Work-Hardening**, p.5763, 2005.
- [41] OLSSON, J., WASIELEWSKA, W., **Application and experience with a superaustenitic 7Mo stainless steel in hostile environments**. Avesta Sheffield AB, Research and Development, Sweden, p. 2- 7, 1998.
- [42] SHAPA TECHNICAL BULLETIN, **The Surface Finish of Stainless Steel on Fabricated Itens**, n. 1, p.10, 2000.
- [43] SHAW, M.C., **Metal cutting principles**. (2.ed.). New York: Oxford University Press, 2005. 432 p.
- [44] GRAVALOS, Márcio Tadeu, **Efeitos da usinagem na integridade superficial de um aço inoxidável superaustenítico**. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 122 p. Dissertação (Mestrado).
- [45] ROSE, S. **Work hardening-a material kind of problem**. Tooling and Production Magazine, Ohio, 1999.
- [46] NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE. **Machining Nickel Alloys**, 1998
- [47] **Steel Casting Handbook-Supplement 8, High Alloy Data Sheets-Corrosion Series**, Steel Founders' Society of America, p.71-73, 2004.

- [48] METALS HANDBOOK. **Atlas of Microstructures of Industrial Allot.** Ohio American Society for Metals, 8th ed., vol.7, 1972.
- [49] TOTTEN, G.E. **Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies.** s.l.: Taylor e Francis Ltd., 2007.
- [50] ALVARES-ARMAS, I. **Duplex Stainless Steels: Brief history and some recent alloys.** Recent Patents on Mechanical Engineering, Vol.1, pp. 51-57. 2008.
- [51] JANA, S. “**Effect of heat input on HAZ properties of two duplex stainless steels**”. Journal of Materials Processing Technology, v. 33, pp. 247-261, 1992.
- [52] GNANASUNDARAM, B.R., NATARAJAN, M. “**Influences of the heat input on a 2205 duplex stainless steel weld**”. Materials and Technology, v.48, n.5, pp. 761-763, 2014.
- [53] PEREIRA, P.A.S. **Efeito da energia de soldagem na microestrutura de um aço inoxidável duplex e super duplex.** Tese de D. Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- [54] ZAMPROGNO, E.B., et al. “**Influência da variação da energia de soldagem na formação da microestrutura do aço UNS S32304**”. In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 10-1289, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 18-21 Agosto 2010.
- [55] MORALES, R.F., RESENDE, A.A., et al., **Influência da adição de hélio no gás de proteção sobre a geometria do cordão de solda MIG/MAG de aço ao carbono.** Tese de D. Sc., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- [56] FINE, M.E. **Precipitation Hardening.** The Strengthening of Materials, Reinhold P. Corp. (Chapman), New York, 1964. 250p.
- [57] CELIK, A. et al. **Improvement on the fatigue strength of AISI 4140 steel by an ion nitriding process.** Surface and Coatings Technology, v.72, p. 169-173, 1995.
- [58] COHEN, A. **The influence of ion nitriding parameters on the hardness layer of 15-5PH stainless steel.** Thin Solid Films, v.141, 1986.
- [59] DONG, A., ESFANDIARI, M., LI, X.Y. **On the microstructure and phase identification of plasma nitrided 17-4PH precipitation hardening stainless steel.** Surface and Coatings Technology, v. 202, p. 2969-2975, 2008.
- [60] CASTELETTI, Luiz Carlos; FERNANDES, Frederico Augusto Pires; SILVA, Eder Bernardes Da Silva; PICON, Carlos Alberto; FILHO, Germano Tremiliosi. **Avaliação da resistência ao desgaste de aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação nitretados.** REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 63(1): 123-127, jan. mar. 2010
- [61] CAMARGO, Paulo Roberto Camilo de. Dissertação de mestrado, **Estudo comparativo entre os processos de brasagem e difusão com interface líquida para a realização de junções entre titânio puro e aço inox 304L.** Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1990.

- [62] CHILDS, T..H.C.; MAEKAWA, T.; OBIKAWA, T.; YAMANE, Y. **Metal Machining: Theory and Applications**. 1^a ed. London: Arnolds, 2000. 408p.
- [63] ARINOX. Aço Inoxidável 304. Disponível em: <http://www.arinox.com.br/blog/aco-inox-304/>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- [64] ARINOX. Aço Inoxidável 316. Disponível em: <http://www.arinox.com.br/blog/aco-inox-316/>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- [65] ABREU, Demian. **Tribocorrosão em aços inoxidáveis ferríticos: Uma abordagem metodológica**. Dissertação de mestrado, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2019.
- [66] CARVALHO, Vicente da Rocha e MACHADO, Ivan Guerra. **Brasagem de Aços Inoxidáveis Martensíticos utilizando pasta à base de níquel em forno a vácuo**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.
- [67] GALEAZZI, Daniel. **Análise de propriedades mecânicas de uma junta soldada de aço inoxidável martensítico AISI410**. Universidade Regional do Noroeste do estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2016.
- [68] CUNAT, P.-J. **Stainless steel properties for structural automotive applications**. Paper presented on: Metal Bulletin International Automotive Materials Conference, Cologne, 21st to 23rd June, 2000.p.
- [69] JUNIOR, Jamil Martins Guimarães. **Transformação Martensítica induzida por deformação em aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI316 deformados por diferentes processos**. Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2016.
- [70] NILSSON, J.-O. **Super duplex stainless steels**. Materials Science and Technology, v. 8, p.685-700, Agosto 1992.
- [71] BORDINASSI, E. C., **Contribuição ao Estudo da Integridade Superficial de um Aço Inoxidável Super Duplex Após Usinagem**. Dissertação de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [72] Martins, M. e Casteletti, L. C., 2007, “**Obtenção e Caracterização dos Aços Inoxidáveis Duplex e Superduplex**” Revista Fundição e Serviços, Vol. 17, pp. 108-119.
- [73] VOGEL, José Paulo; NERY, Washington Souza; ARAUJO, Anna Carla. **Estudo do efeito do avanço nas forças e no acabamento de um torneamento de aço superduplex**. 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO 15 a 19 de abril de 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ - Brasil.
- [74] SANTOS, R. J., BOLFARINI, C. **Controle da evolução durante a solidificação de fundidos de aços inoxidáveis superduplex**. 12º CONAF – microestrutural Congresso de Fundição, São Paulo, 2005.
- [75] SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY “**DuplexStainlees Steels - Sandvik SAF 2507**”, Sandvik Materials Technology, Sandviken, Sweeden, 2016.

- [76] PARDAL J, TAVARES S, FONSECA MC. **Influence of the grain size on deleterious phase precipitation in superduplex stainless steel UNS S32750.** *Materials Characterization*. 2009; 60(3):165-172.
- [77] TAVARES S, SILVA V, PARDAL J. **Investigation of stress corrosion cracks in a UNS S32750 superduplex stainless steel.** *Engineering Failure Analysis*. 2013; 35(0): 88–94.
- [78] BASTOS IN, TAVARES SS, DALARD F. **Effect of microstructure on corrosion behavior of superduplex stainless steel at critical environment conditions.** *Scripta Materialia*. 2007; 57(10):913–916.
- [79] Mouro, AL, Campos FO, Araujo AC. **Size Effect in Micromilling of Superduplex Stainless Steel.** *International Conference on MicroManufacturing*, 2015. Milão, Itália.
- [80] KALPAKJIAN, S.; SCHMID S.R., **Manufacturing Engineering and Technology**, Nova York: Addison-Wesley Publishing Co., 2010.
- [81] GAMARRA, J. R., **Estratégias de Usinagem no Torneamento de Aço Inoxidável Super Duplex (UNS S32750)**, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- [82] JESUS, R. E. C. de, **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, São João Del Rei, 2013.
- [83] GRAVALOS, M. T.; MARTINS, M.; DINIZ, A. E.; MEI, P.R.; **Efeito da Usinagem na Estrutura e Propriedades Mecânicas do Aço Superaustenítico ASTM A351CN3MN**, *Revista Escola de Minas* vol. 60 n 1, Ouro Preto, p. 83-88, 2007.
- [84] FERNANDES, Paulo Fernando dos Santos. **Análise Experimental das Forças de Usinagem em Torneamento de Aço Inoxidável Super Duplex.** Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2018.