



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RÔMULO DA SILVA BARBOSA

**CONSIDERAÇÕES SOBRE OS CUSTOS NO TORNEAMENTO DO AÇO
INOXIDÁVEL FERRÍTICO**

São Luís

2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RÔMULO DA SILVA BARBOSA

**CONSIDERAÇÕES SOBRE OS CUSTOS NO TORNEAMENTO DO AÇO
INOXIDÁVEL FERRÍTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues

São Luís

2015

Barbosa, Rômulo da Silva

Considerações sobre os custos no torneamento do aço inoxidável ferrítico /Rômulo da Silva Barbosa– São Luis, 2015.

73 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual do Maranhão, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues

1. Aço inoxidável ferrítico. 2. Torneamento. 3. Custos. 4. Velocidade corte. I.Título

CDU:621.9.025.1

Ao SENHOR Deus Eterno, Poderoso, Soberano, que tem regido a minha vida, que tem me guardado, e que tem me auxiliado nessa jornada. E a todos os meus amigos e familiares por me apoiarem e acreditarem na minha capacidade.

Agradecimentos

Agradeço ao meu Criador, meu Professor, meu Senhor, o meu Deus, que mesmo eu sendo falho, nunca desistiu de mim e tem me amado incondicionalmente. Ele que tem me dado força, coragem e perseverança em meio às dificuldades que tenho enfrentado no cotidiano.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jean Robert, que tem se disposto, com dedicação, a me ajudar tanto no momento que me ensinou em sala de aula, como agora, na composição desse trabalho.

Aos meus familiares que sempre me incentivaram nessa caminhada, me ajudando psicologicamente, emocionalmente e economicamente. Nunca me esquecerei do que fizeram por mim.

Aos meus amigos, sempre me dando auxílio, momentos prazerosos, e sempre acreditando no meu potencial. Também serei eternamente grato.

Meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração desse trabalho.

“Tudo posso naquele que me fortalece”

Filipenses 4:13

RESUMO

Este trabalho consiste na demonstração dos parâmetros econômicos no Torneamento do Aço Inoxidável Ferrítico. Como a busca pela eficiência da produção é um dos principais alvos de qualquer negócio, faz-se necessário uma análise bem mais clara e explicativa dos mecanismos que determinam essa situação ideal. Uma análise geral também é feita nas características do Aço Inoxidável Ferrítico, mais especialmente o ACE P439A; mostrando propriedades específicas, formas de tratamento, principais aplicações, além das vantagens econômicas em relação aos demais aços. Para a observação das condições econômicas, diversas variáveis da Usinagem são utilizadas, sendo algumas delas totalmente empíricas, e outras específicas dos materiais usinados. No entanto, a incógnita mais importante é a Velocidade de Corte; no qual todas as outras se relacionam, assim como está presente na maioria das equações. Dessa forma, esse trabalho evidencia todas essas relações dos parâmetros econômicos com a Velocidade de Corte. O torneamento, por ser um processo de Usinagem mais didático e mais utilizado, serve como ‘plano-de-fundo’ para as relações empregadas.

Palavras-chave: Aço Inoxidável Ferrítico, Torneamento, Custos, Velocidade de Corte.

ABSTRACT

This work is to demonstrate the economic parameters in Ferritic stainless steel turning. As the search for production efficiency is a prime target of any business, it is necessary a much clearer explanation and analysis of the mechanisms that determine this ideal situation. A general analysis is also made to the ferritic stainless steel features, most notably the ACE P439A; showing specific properties, forms of treatment, main applications, in addition to economic advantages compared to other steels. To observe the economic conditions, several variables of machining are used, some of them totally empirical, and other specific of machined materials. However, the most important unknown is the speed of Court; in which all relate other, and are present in most equations. Thus, this work shows all these relations of the economic parameters with the Cutting Speed. The turning, for being a more didactic and more machining process used, serves as 'background' for the maids relations.

Keywords: Stainless Steel Ferritic, Turning, Cost, Cut speed.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Efeito do teor crescente de Cr na resistência à corrosão atmosférica de ligas Fe-Cr.	23
Figura 2.2 – Comportamento ativo de um metal em soluções ácidas oxidantes.	23
Figura 2.3 – Comportamento passivo de um metal em soluções ácidas oxidantes.	24
Figura 2.4 – Fluxograma de produção do Aço inoxidável da Acesita.	28
Figura 2.5 – Aço Inoxidável Ferrítico ABNT 409 – Microestrutura típica.	29
Figura 2.6 – Aplicações do Aço ACE P439A.	35
Figura 2.7 – Representações dos movimentos no processo de Torneamento.	36
Figura 2.8 – Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no Torneamento, mostrando os ângulos de avanço (ϕ), de direção efetiva (η) e o plano de trabalho da ferramenta (Pfe).	38
Figura 2.9 – Desgaste em função do Tempo.	39
Figura 2.10 – Vida de Ferramenta em função da Velocidade de Corte.	40
Figura 2.11 – (Esquerda) Componentes ortogonais da Força de Usinagem; (Direita) forças após 30 segundos de usinagem com ferramenta nova de metal- duro ($V_c = 350$ m/min, $f = 0,3$ mm/volta, $a_p = 1,5$ mm).	45
Figura 2.12 – Representação aritmética da variação da pressão específica de corte com a espessura de corte.	47
Figura 2.13 – Tempo de produção por peça em função da Velocidade de Corte.	54
Figura 2.14 – Custo de Produção por peça em função da Velocidade de Corte.	56
Figura 2.15 – Intervalo de Máxima Eficiência.	57
Figura 4.1 – Velocidade de Máxima Produção.	61

Figura 4.2 – Velocidade Econômica de Corte. 62

Figura 4.3 – Intervalo de Máxima Eficiência. 63

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Perda de peso por corrosão generalizada.	25
Tabela 2.2 – Escolha do aço mais adequado para cada tipo de meio ambiente.	25
Tabela 2.3 – Escolha do aço mais adequado para cada tipo de meio ambiente.	26
Tabela 2.4 – Composição química dos Aços Inoxidáveis Ferrítico.	31
Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas dos Aços Inoxidáveis Ferrítico.	31
Tabela 2.6 – Composição química do ACE P439A.	32
Tabela 2.7 – Propriedades mecânicas típicas dos Aços Inoxidáveis da ArceloxMittal Inox Brasil.	33
Tabela 2.8 – Propriedades físicas dos Aços Inoxidáveis recozidos.	33
Tabela 2.9 – Valores dos expoentes x e y .	43
Tabela 2.10 – Valores típicos de V_c para as ferramentas de aço-rápido e metal-duro.	43
Tabela 2.11 – Valores dos expoentes i , g e y para as ferramentas de aço-rápido e metal-duro.	44
Tabela 2.12 – Valores dos parâmetros $1-z$ e K_{s1} para diferentes materiais.	48

Lista de Abreviaturas e Siglas

C_1	Custo independente da Velocidade de corte [R\$/peça]
C_2	Despesas de mão-de-obra com a das máquinas [R\$/peça]
C_3	Custo relativo à ferramenta [R\$/peça]
C_f	Custo da ferramenta por vida do gume [R\$/gume]
C_t	Constante de material
C_v	Velocidade de corte que dá à ferramenta uma vida de 60 minutos de usinagem em uma seção de 1 mm ² com índice de esbeltez de 5.
F_c	Força de corte [N]
F_f	Força de avanço [N]
F_N	Força normal [N]
F_p	Força passiva [N]
K_{ft}	Custo da ferramenta por vida [R\$/gume]
K_p	Custo de produção [R\$/peça]
K_{p1}	Custo do processo de usinagem [R\$/peça]
K_{p2}	Custo com a troca da ferramenta [R\$/peça]
K_s	Pressão específica [N/mm ²]
K_{s1}	Constante de material
P_c	Potência de corte [cv]
P_f	Potência de avanço [cv]
P_m	Potência do motor [cv]
R_a	Rugosidade média [μm]
S_h	Despesa com a mão-de-obra [R\$/hora]
S_m	Despesa com a máquina [R\$/hora]

V_c	Velocidade de corte [m/min]
V_{co}	Velocidade econômica de corte [m/min]
V_{cxmp}	Velocidade de máxima produção [m/min]
V_f	Velocidade de avanço [m/min]
a_p	Profundidade de corte [mm]
L_f	Comprimento de avanço [mm]
n_t	Número de trocas ou afiações da ferramenta
r_ε	Raio de ponta da ferramenta [mm]
t_1	Tempo improdutivo [min/peça]
t_2	Tempo de troca e afiação da ferramenta [min]
t_a	Tempo de aproximação e afastamento da ferramenta [min/peça]
t_c	Tempo de corte [min]
t_{fa}	Tempo de afiação da ferramenta [min/peça]
t_{ft}	Tempo de troca da ferramenta [min/peça]
t_p	Tempo de preparo da máquina [min]
t_s	Tempo secundário de usinagem [min/peça]
t_t	Tempo total de fabricação da peça [min]
σ_r	Tensão de ruptura [MPa]
\emptyset	Diâmetro [mm]
A	Área da secção transversal [mm ²]
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
Al	Alumínio
AR	Aço-rápido

ASTM -	American Society for Testing and Materials
<i>b</i> -	Base [mm]
C -	Carbono
CCC -	Cúbica de Corpo Centrado
CNC -	Comando Numérico Computadorizado
Cr -	Cromo
Cu -	Cobre
<i>d</i> -	Diâmetro da peça [mm]
<i>e</i> -	Alongamento (%)
EM -	Norma Européia
ERW -	Electric Resistance Welding
<i>f</i> -	Avanço [mm]
<i>F</i> -	Força de usinagem [N]
Fe -	Ferro
<i>G</i> -	Índice de esbeltez do cavaco
<i>g</i> -	Expoente do índice de esbeltez do cavaco
<i>h</i> -	Altura / Espessura de corte [mm]
HB -	Dureza Brinell
HRB -	Dureza Rockwell
<i>i</i> -	Expoente da área da seção de corte
<i>K</i> -	Constante na Equação de Taylor
MD -	Metal-duro
Mn -	Manganês
Mo -	Molibdênio

MQL -	Mínima Quantidade de Lubrificante
N -	Nitrogênio
n -	Número de rotações
Nb -	Nióbio
Ni -	Níquel
P -	Fósforo
Pfe -	Plano de trabalho da ferramenta
S -	Enxofre
Si -	Silício
T -	Vida da ferramenta [min/peça]
Ta -	Tântalo
Ti -	Titânio
UNS -	Unified Numbering System
x -	Constante de material
y -	Índice de sensibilidade da ferramenta a Velocidade de corte
z -	Constante de material
Z -	Número de peças fabricadas
Zr -	Zircônio
γ -	Ângulo de saída
η -	Direção efetiva / Rendimento (%)
π -	Pi
φ -	Ângulos de avanço (°)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1.Objetivo Geral	20
1.2.Objetivos Específicos	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1.Aço Inoxidável	21
2.1.1. <u>Histórico</u>	21
2.1.2. <u>Corrosão</u>	22
2.1.3. <u>O Papel do Cromo e a Passividade</u>	22
2.1.4. <u>Influência de outros Elementos no Aço Inoxidável</u>	27
2.1.5. <u>Produção e Classificação</u>	28
2.1.6. <u>Aço Inoxidável Ferrítico</u>	28
2.1.7. <u>Aço ACE P439A</u>	32
2.2.Torneamento	36
2.2.1. <u>Grandezas Físicas do Torneamento</u>	37
2.2.2. <u>Vida da ferramenta</u>	39
2.2.3. <u>Força de Usinagem</u>	45
2.2.4. <u>Potência de Usinagem</u>	49
2.3.Considerações sobre os Custos	51
2.3.1. <u>Velocidade de Corte para Máxima Produção</u>	51
2.3.2. <u>Velocidade Econômica de Corte</u>	54
2.3.3. <u>Intervalo de Máxima Eficiência</u>	57
3. MATERIAIS E MÉTODOS	59
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61

5. CONCLUSÕES	65
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXO 01	70

1. INTRODUÇÃO

O Mercado é altamente competitivo para as empresas do ramo da Usinagem, obrigando-as a adotarem o preço de venda de seus produtos ou serviços por aquele estabelecidos por esse mesmo Mercado. Dessa forma, tais empresas buscam sua sobrevivência otimizando seus processos, estruturando sua política de custos e reduzindo a margem de lucro, sem esquecer-se do padrão de qualidade exigido pelo Mercado [21].

Um dos processos de produção de componentes mecânicos mais importante é a Usinagem. Estima-se que aproximadamente 10% do PIB dos EUA estejam relacionados aos processos de Usinagem, com base nos gastos relacionados com mão-de-obra, ferramenta e com os investimentos [17].

O processo de Usinagem Torneamento, também chamado Corte Semi-ortogonal consiste em um processo mecânico com geração de cavaco onde um sólido de revolução bruto é transformado retirando material de sua periferia. A retirada desse material utilizando uma ferramenta monocortante gera formas cilíndricas ou cônicas, dimensões e acabamentos superficiais [20].

Na história, as pesquisas procuraram, primeiramente, as melhores geometrias para a operação de corte. Em seguida, foram em busca de materiais com melhores características de resistência e durabilidade. Posteriormente, passou-se a combinar materiais em novos modelos construtivos paralelo às necessidades de desempenho, custo e redução dos tempos de paradas no processo produtivo. O torneamento é o processo mais utilizado em trabalhos experimentais de corte de materiais com geração de cavaco [20].

Nos últimos anos, a produção de Aço Inoxidável no mundo vem crescendo significativamente. Setores como o alimentício, de mineração, automobilístico e arquitetura estão utilizando os Aços Inoxidáveis em numerosas aplicações. O interesse mais específico no Aço Inoxidável Ferrítico se dá pela ausência do Níquel em sua composição. Desse modo, os preços apresentados pelos mesmos são bem mais competitivos do que os demais Aços Inoxidáveis. Dessa forma, os Aços Inoxidáveis Ferríticos são uma alternativa economicamente viável aos Austeníticos, reduzindo o custo do produto final [17].

No Mercado, ainda existem diversas empresas que ainda não se preocupam com o aspecto de otimização de seus processos; geralmente essas empresas são de médio e pequeno

porte. A maioria delas têm dificuldades de determinar as condições ideais de produção, por falta de conhecimento ou pela dificuldade de determinação dos parâmetros fundamentais. As explicações encontradas na literatura são deveras superficiais em quase sua totalidade; geralmente por não ser o foco do estudo.

Em relação ao material, o Aço Inoxidável ACE P439A é um material recém-desenvolvido. É interessante fazer relações com os aspectos da Usinagem, bem como os aspectos econômicos, para o aumento de informações sobre esse material.

1.1.Objetivo Geral

Simplificar a análise do aspecto econômico no Torneamento do Aço Inoxidável Ferrítico ACE P439A.

1.2.Objetivos Específicos

- Fazer relações do Aço ACE P439A com os aspectos econômicos da Usinagem;
- Simplificar a análise desses aspectos econômicos;
- Correlacionar as variáveis do Torneamento com as condições de produção;
- Determinar a Condições de Máxima Eficiência.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Aço Inoxidável

2.1.1. Histórico

Segundo a história, o responsável pelo desenvolvimento do Aço Inoxidável é o inglês Harry Brealy, em 1912. Ele observou algumas características metalográficas após realizar experimentos com uma liga ferro-cromo, e percebeu que a liga resistia mais aos reagentes usados, comumente, na metalografia. Denominou a liga de “Stainless Steel”, ”Aço sem mancha”; pois o aço não era ‘manchado’ quando submetidos a ataques metalográficos [11][12].

Na Alemanha, nesse mesmo ano, Eduard Maurer afirmava que uma liga, também de ferro-cromo, desenvolvida por Brenno Straus, era resistente a vapores agressivos; vapores esses de seu laboratório [11][12].

Brealy e Straus descobriram, basicamente, os Aços ABNT 420 e ABNT 302. Esses Aços, na época, passaram por tratamentos térmicos para obter melhor ductilidade (ABNT 302) e dureza (ABNT 420) [11].

Com essa nova característica, o Aço começou a ser mais empregado na indústria química e em aplicações com altas temperaturas. A produção mundial, em 1934, era de 56.000 toneladas; e em 1953, ultrapassou um milhão de toneladas [13].

Era difícil de entender, na época, que aquecendo duas ligas e depois as resfriando rapidamente, se produzia duas novas ligas, uma com alta ductilidade e a outra com alta dureza. Assim os Aços Inoxidáveis foram evoluindo, principalmente devido às indústrias petrolíferas e aeronáuticas, e até mesmo depois das grandes guerras mundiais [13].

Essa evolução dos Aços Inoxidáveis permitiu o desenvolvimento de novos tipos com diversas composições químicas, microestruturas, e propriedades físicas e químicas mais específicas. A adição de outros elementos no Aço Inoxidável foi o que mais contribuiu nessa diversidade, tais quais: Ni, N, Mo, Ti, Nb, Al e Cu [6].

2.1.2. Corrosão

A Corrosão consiste na deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, com ou sem a ação de esforços mecânicos. Por serem processos eletroquímicos, apresentam mecanismos semelhantes em seus vários tipos. Isto é, são constituídos por áreas anódicas e catódicas, nas quais circulam uma corrente de elétrons e uma de íons, ocasionando a perda de massa. E a Corrosão pode ser uniforme ou localizada [12].

A Corrosão uniforme é um ataque em toda a área da superfície metálica que está em contato com o meio agressivo, no qual há redução da espessura. Ocorre, geralmente, devido à existência de micropilhas de ação local. É o processo mais comum de Corrosão e ocorre principalmente em estruturas expostas à atmosfera. É de fácil verificação, pois só basta observar a espessura da superfície em questão, que é a mesma em toda a sua extensão [12].

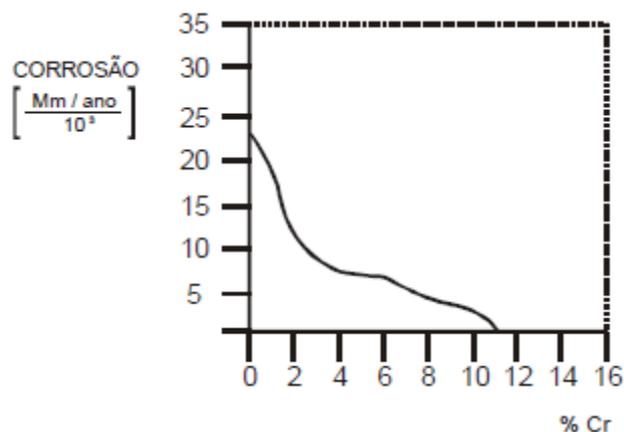
Já a Corrosão localizada é mais difícil de controlar ou prever, porque existem vários tipos; como a Corrosão por Pite, Corrosão Galvânica, Fissuração induzida por Hidrogênio, Corrosão por Fadiga, Corrosão Intergranular e Corrosão sob Tensão. Ela ocorre em regiões determinadas e, em certas vezes, em locais de difícil detecção, o que pode resultar em fissuras [12].

2.1.3. O Papel do Cromo e a Passividade

Quando se fala em Aço Inoxidável, logo vem em mente a ideia de um aço que não sofre corrosão ou qualquer abuso mais violento. Mas na verdade, existe um limite para essa proteção. Esse tipo de aço, de fato, apresenta uma resistência maior em relação à corrosão em meio agressivo, e a oxidação em meio a altas temperaturas. Isso se dá pela presença de certa quantidade de Cromo no metal, que forma uma fina película de óxido de Cromo sobre a superfície do Aço, que é impermeável e insolúvel nos usuais meios corrosivos [3][10][15][24].

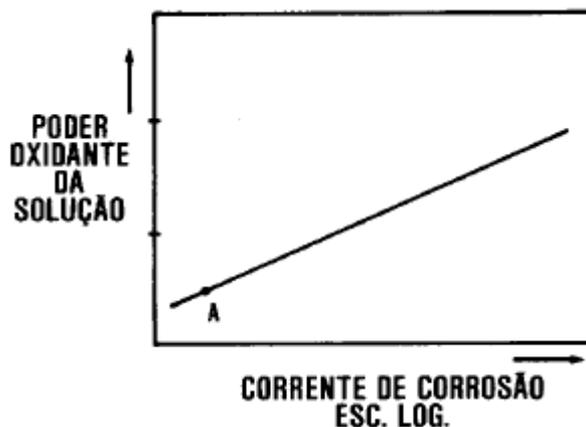
Define-se como Aço Inoxidável um grupo de ligas ferrosas, com no mínimo 12% de Cromo, resistente à oxidação [24]. Apesar de existir outros metais como elementos de liga, apenas o Cromo tem elevada importância para conferir a resistência à corrosão desejada [11]. A Figura 2.1 mostra a relação entre a Corrosão com a quantidade de Cromo na liga [24].

Figura 2.1 – Efeito do teor crescente de Cr na resistência à corrosão atmosférica de ligas Fe-Cr [24].



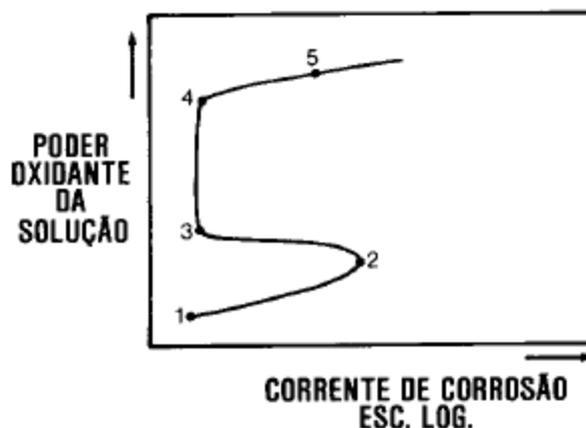
Em comparação com outros metais e ligas, o Aço Inoxidável tem um comportamento diferente quando as condições do meio são variadas. A Figura 2.2 é o gráfico de um metal comum num determinado meio agressivo. Se aumentarmos o poder de oxidação do meio, as correntes de Corrosão no metal são aumentadas proporcionalmente [11][24].

Figura 2.2 – Comportamento ativo de um metal em soluções ácidas oxidantes [24].



Já a Figura 2.3 mostra o comportamento de um Aço Inoxidável. De início ele é semelhante a qualquer aço (região 1 – 2), mas ao atingir um determinado poder oxidante da solução, apresenta uma diminuição drástica na taxa de corrosão (região 2 – 3) [11][24].

Figura 2.3 – Comportamento passivo de um metal em soluções ácidas oxidantes [24].



Entre o ponto 3 e 4, a variação do poder oxidante não influencia na Corrosão; sendo essa uma área de passividade, principal característica dos Aços Inoxidáveis. A partir do ponto 4, o meio já está bastante agressivo, e ultrapassa o poder de passividade da liga. Dessa forma, volta a apresentar Corrosão no metal; sendo esse momento chamado de Transpassividade [11][24].

Os Aços Inoxidáveis têm a resistência à corrosão dependendo, basicamente, da composição química e da microestrutura; dessa forma pode-se afirmar que os Aços Martensíticos são menos resistentes e os Austeníticos os mais resistentes [24].

A presença da película é relacionada à natureza do meio ambiente e ela condiciona o comportamento mais ou menos nobre do Aço. Quando há a película, o Aço se assemelha a um metal nobre, caso contrário, se assemelha a um metal comum. A destruição dessa película conduz, rapidamente, a corrosão de qualquer um dos tipos conhecidos: por pites, por frestas, intergranular e sob tensão [24].

No âmbito dos Aços Inoxidáveis, a experiência e os ensaios evidenciam a existência de diversos graus de solicitações de ambientes com relação à resistência à corrosão generalizada ou localizada. A Tabela 2.1 apresenta a perda de peso por corrosão generalizada em amostras expostas em Milão (Zona Urbano-Industrial), Savona (Zona Litorânea) e Castel Romano (Zona Rural), após 3 anos de exposição [11].

Tabela 2.1 – Perda de peso por corrosão generalizada [11].

Materiais	Perda de Peso (mg/dm ² /ano)		
	Urbano-Industrial	Marinha	Rural
ABNT 304I	5,4	14,7	0,9
ABNT 316I	1,2	13,5	0,7
ABNT 430I	6,4	13,5	1,3
Cobre ASTM 152I	92,0	229,0	ND

Percebe-se que o poder corrosivo do meio ambiente sobre uma superfície metálica varia de um lugar para outro. Entretanto, outro fator observado, é a qualidade de acabamento da superfície. Superfícies polidas apresentam maior resistência à corrosão devido ao baixo nível de rugosidade. À medida que a rugosidade aumenta, mais facilmente é a retenção de impurezas e, conseqüentemente, maior chance de corrosão [11].

Na Tabela 2.2 já é a recomendação atribuída a cada tipo de meio ambiente, ainda baseado na experiência anterior [11].

Tabela 2.2 – Escolha do aço mais adequado para cada tipo de meio ambiente [11].

Tipos	<i>Nível de Poluição Ambiente</i>											
	Rural/Suburbano			Urbano			Industrial			Marinho		
	Baixa	Típica	Alta	Baixa	Típica	Alta	Baixa	Típica	Alta	Baixa	Típica	Alta
316	3	3	3	3	3	2	2	2	(2)	2	2	(2)
304	3	3	2	2	2	(2)	(2)	1	1	(2)	1	1
430	2	2	(2)	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Sendo:

1 – Aço inadequado;

2 – Aço mais adequado;

3 – Aço superdimensionado;

(2) – Aço indicado com cuidados especiais com relação à superfície, possibilidade de lavagem frequente, ou usado em ambientes internos.

Uma tabela mais completa é a Tabela 2.3; no entanto, ela serve somente para exemplificação da corrosão nesses Aços Inoxidáveis e para a pré-seleção dos mesmos. Tabelas mais complexas e detalhadas sobre a velocidade de corrosão em diversos meios são facilmente encontradas, inclusive existindo pequenos livros dessas tabelas [24].

Tabela 2.3 – Escolha do aço mais adequado para cada tipo de meio ambiente [24].

ABNT TIPO	Atmosfera branda e água fresca	Atmosfera industrial	Atmosfera marinha	Água salina	Química branda	Química oxidante	Química redutora
301	X	X	X		X	X	
302	X	X	X		X	X	
302B	X	X	X		X	X	
303	X	X	X		X		
304	X	X	X		X	X	
304L	X	X	X		X	X	
305	X	X	X		X	X	
308	X	X	X		X	X	
309	X	X	X		X	X	
310	X	X	X		X	X	
314	X	X	X		X	X	
316	X	X	X	X	X	X	X
316L	X	X	X	X	X	X	X
317	X	X	X	X	X	X	X
321	X	X	X		X	X	
347	X	X	X		X	X	
403	X				X		
405	X				X		
409	X				X		
410	X				X		
416	X						
420	X						
430	X	X			X	X	
440A	X				X		
440B	X						
440C	X				X	X	
442	X	X			X	X	
446	X	X	X		X	X	

2.1.4. Influência de outros Elementos no Aço Inoxidável

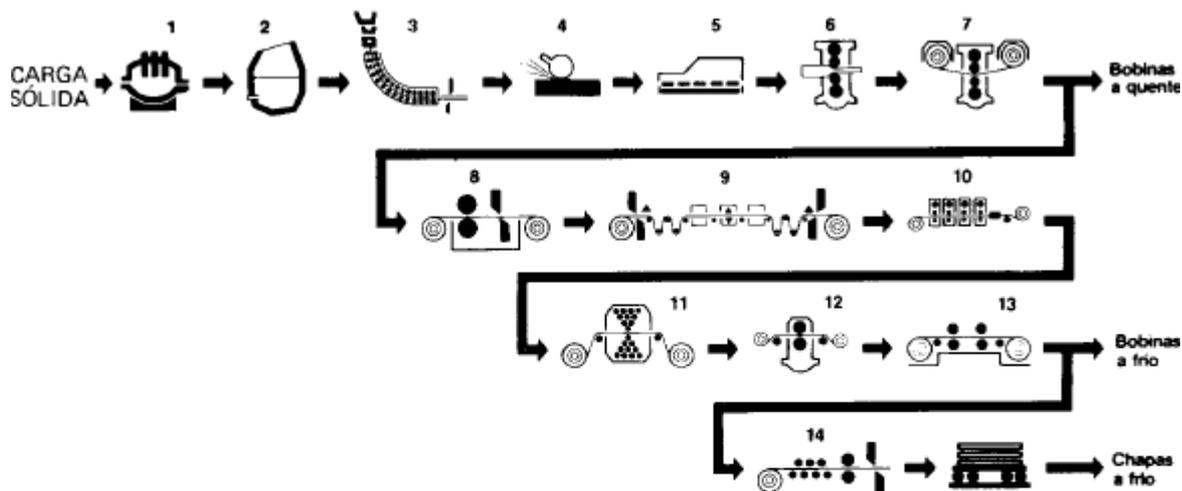
Sabe-se da principal composição do Aço Inoxidável e da sua principal particularidade. No entanto, adicionando outros elementos a essa liga, se adiciona características mais específicas ao mesmo. Elementos como o Níquel, Molibdênio, Nióbio e Titânio. Não se irá aprofundar muito nesse assunto, mas uma breve descrição será feita [15][24].

- *Níquel*: modifica a estrutura do material, que apresenta melhor ductilidade, resistência mecânica e quente, e soldabilidade; O Cromo e Níquel são os elementos primordiais dos Aços Inoxidáveis;
- *Molibdênio e Cobre*: aumenta a resistência à corrosão por via úmida;
- *Silício e Alumínio*: melhoram a resistência à oxidação a altas temperaturas;
- *Titânio e Nióbio*: elementos estabilizadores dos Aços Austenísticos, impedindo o empobrecimento de Cromo via precipitação em forma de carbonetos em tratamentos térmicos;
- *Outros*: para modificar características mais específicas do Aço Inoxidável, utilizam-se elementos como o Manganês, Nitrogênio, Cobalto, Boro e Terras Raras.

2.1.5. Produção e Classificação

A Figura 2.4 apresenta o fluxograma de produção do Aço Inoxidável da Acesita [24].

Figura 2.4 – Fluxograma de produção do Aço inoxidável da Acesita [24].



- | | |
|-----------------------------|--|
| 1. Forno Elétrico | 8. Linha de Preparação de Bobinas |
| 2. Convertedor AOD | 9. Linha de Recozimento e Decapagem |
| 3. Lingotamento Contínuo | 10. Linha de Esmerilhamento de Bobinas |
| 4. Esmerilhadeira de Placas | 11. Laminador a Frio Sendzimir |
| 5. Forno de Placas | 12. Laminador de Encruamento |
| 6. Laminador de Desbaste | 13. Linha de Tesoura Longitudinal |
| 7. Laminador Steckel | 14. Linha de Tesoura Transversal |

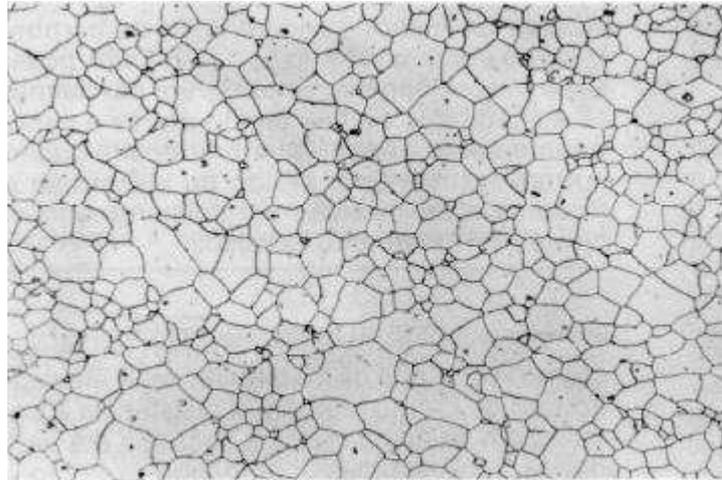
A divisão dos Aços Inoxidáveis se dá em três classes, de acordo com a fase predominante em sua microestrutura – Austenítico, Ferrítico e Martensítico. Existem classes intermediárias que são fusões dessas três. No entanto, pela didática, é recomendado fazer a distinção desses Aços [3][24]. Nesse trabalho, a ênfase será no Aço Inoxidável Ferrítico, mais precisamente o ACE P439A.

2.1.6. Aço Inoxidável Ferrítico

No Aço Inoxidável Ferrítico, a fase com maior predominância é a Ferrita. Após tratamentos térmicos normais, sua estrutura mantém-se totalmente ferrítica; com configuração CCC do tipo ferro α . A Ferrita é pouco dura e pouco resistente, comparada com outros

constituintes; além de ser dúctil e fortemente atraída pelo imã [3][15]. A Figura 2.5 mostra a microestrutura do Aço Inoxidável Ferrítico.

Figura 2.5 – Aço Inoxidável Ferrítico ABNT 409 – Microestrutura típica [24].



Esse tipo de Aço contém normalmente entre 15 a 30% de Cromo com teores de Carbono até 0,2%. Até a temperatura de fusão, sua estrutura permanece estável, e não é possível endurecê-lo por resfriamento. Trabalhar a frio reduz a ductibilidade, o qual necessita de cuidados térmicos no recozimento, que evita também o crescimento dos grãos e subsequente a grafitização [5].

Os tratamentos térmicos, para acabamento de peças, utilizados no Aço Inoxidável Ferrítico, mas abrangente em Aços para baixas temperaturas (ASTM-352), são a Normatização, Têmpera e Revenido. A Normatização acontece entre 880 e 930°C, com uma hora por polegada e resfriamento ao ar. Têmpera entre 880 e 930°C, com uma hora por polegada e resfriamento à água. E Revenido entre 640 e 700°C, com uma hora por polegada e resfriamento ao ar [3][15].

Esse tipo de liga é mais resistente à Corrosão quando se aumenta o teor de Cromo com a aplicação do Recozimento para Solubilização. Adicionando-se Cromo e Molibdênio, a manifestação da Corrosão por Pites e por Frestas é minimizada, seguindo a seguinte composição: 23% Cr e 2% Mo [3][15].

Temperatura de sensibilização a corrosão intergranular fica entre 600 a 650° C. Esse dano é prevenido adicionando estabilizadores como Titânio e Nióbio, ou reduzindo teores de

Carbono (abaixo de 0,02%) e Nitrogênio, ou fazendo recozimento em torno de 700° C [3][15].

Com no mínimo 20% de Cr e 1% de Mo, a Resistência à Corrosão sob Tensão é obtida; em ambiente de íons de Cloro. Entretanto, o que mais eleva a resistência é a dureza do metal [3][15].

Já em relação à Corrosão pela formação de Par Galvânico, depende-se muito da condição de passividade; e o Aço Inoxidável Ferrítico tem maior dificuldade de se apassarivar do que o Austenítico [3][15].

Em relação ao grupo de Aços Martensítico, os Aços Ferríticos são geralmente mais resistentes à corrosão, e podem ser usados em meios como ácido sulfúrico, ácidos orgânicos (Fórmico, Cítrico, Láctico, Oxálico, etc.) e ambientes com água do mar [5].

Condutividade Térmica equivale aproximadamente 50% dos Aços de Baixo Carbono. E são fortemente magnéticos até sua temperatura de Curie (cerca de 760°C). O coeficiente de expansão é similar ao dos Aços de Baixo Carbono [5].

Características [24]:

- Contém de 15 a 30% de Cromo;
- Estrutura macia, tenaz e homogênea (Ferrítica) devido ao resfriamento rápido de altas temperaturas;
- Usados nas condições de recozido;
- Melhor para se trabalhar e com maior resistência à corrosão do que os Aços Martensíticos;
- Boas propriedades físicas e mecânicas, efetiva resistência à corrosão atmosférica e a soluções oxidantes;
- Ferromagnetismo;
- As principais aplicações exigem boa resistência à corrosão, aparência superficial e requisitos mecânicos;
- Tendência ao crescimento dos grãos na soldagem.

As Tabelas 2.4 e 2.5 contêm a composição química e as propriedades mecânicas, respectivamente, dos principais Aços Inoxidáveis Ferrítico [24].

Tabela 2.4 – Composição química dos Aços Inoxidáveis Ferrítico [24].

Tipo de aço ABNT	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Outros
409	0.08	1.00	1.00	0.045	0.045	10.50 11.75		Ti \geq 6xC Ti 0.75 máx
429	0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	14.00 16.00		
430	0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	16.00 18.00		
430F	0.12	1.25	1.00	0.060	0.15 min	16.00 18.00	0.60 (A)	
430FSe	0.12	1.25	1.00	0.060	0.060	16.00 18.00		Se 0.15 min
434	0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	16.00 18.00		
436	0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	16.00 18.00	0.75 1.25	Nb+Ta \geq 5xC 0.70 máx
442	0.20	1.00	1.00	0.040	0.030	13.00 23.00	0.75 1.25	
446	0.20	1.50	1.00	0.040	0.030	23.00 27.00		N 0.25

(A) Opcional

Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas dos Aços Inoxidáveis Ferrítico [24].

Tipos de Aço ABNT	Estado	Resistência à Tração N/mm ²	Limite de Escoamento à 0,2% N/mm ²	Alongamento em 50,8 mm percentual			Dureza Rock Well	Dobramento livre Ângulo* Fator ⁽¹⁾	Limite de resistência à fadiga N/mm ²
				e \leq 0,38 mm	0,38 < e < 0,76 mm	e \geq 0,76 mm			
430	Recozido	525,0	350,0	25	-	-	B 85	180	-
446	Recozido	560,0	350,0	20	-	-	B 83	-	-
502	Recozido	490,0	-	30	-	-	B 75	180	-

Notas:

- 1) Fator é o número que se deve multiplicar a espessura nominal da chapa para se obter o diâmetro do cutelo a ser empregado no ensaio de dobramento;
- 2) Os valores sem asterisco (*) são médios;
- 3) As propriedades podem variar em função da composição química, dimensão, estado do aço e métodos de tratamento térmicos e mecânicos;

- 4) As propriedades mecânicas dos produtos planos variam em função da relação entre a direção testada e a direção de laminação.

Aplicações [24]:

- 403: Lâminas de turbinas sujeitas à corrosão e desgaste por abrasão e corrosão úmida, seções altamente tensionadas em turbinas a gás e anéis de jato;
- 405: Caixas de recozimento;
- 409: Tanques de combustíveis, exaustão de veículos e banco de capacitares;
- 430: Máquinas de lavar, revestimento de câmara de combustão de motores a diesel, adorno de automóveis, calhas, fixadores, equipamentos para a fabricação de ácido nítrico, aquecedores, moedas, pias e cubas, porta para cofres, utensílios domésticos, baixelas, revestimentos de elevadores, etc.

2.1.7. Aço ACE P439A

Tem resistência à corrosão superior ao Aço Ferrítico AISI 430. Além de ter todas as outras características dos Aços Inoxidáveis Ferríticos estabilizados, como excelente soldabilidade e estampagem, total imunidade à corrosão sob tensão e ausência de Níquel. Dessa forma, esse Aço se torna uma das melhores escolhas num projeto [1].

O ACE P439A é estabilizado em Ti e Nb, segundo a norma ASTM A240; com a nomenclatura UNS S43932. Já a designação europeia é EN 14110, e mostra a estabilização com Ti, mas também permitindo com Nb e Zr. Veja a Tabela 2.6, que contém a composição química desse aço [1].

Tabela 2.6 – Composição química do ACE P439A [1].

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Outros
≤ 0,03	≤ 1	≤ 0,04	≤ 0,03	≤ 1	17 ~ 19	≤ 0,5	N ≤ 0,03 (0,2 + 4 (C + N) ≤ Ti + Nb ≤ 0,75)

Essa estabilização permite que o ACE P439A possa ser soldado sem a fragilização. E como o teor de Cromo é maior do que o AISI 430 e há a presença de Ti, a resistência à

corrosão por pite é melhorada. Com a ausência de Níquel, reduz-se o custo de obtenção desse material [1].

A Tabela 2.7 contém as propriedades típicas do Aço ACE P439A em comparação ao ACE P430A e ao ACE P304A [1].

Tabela 2.7 – Propriedades mecânicas típicas dos Aços Inoxidáveis da ArceloxMittal Inox Brasil [1].

Aço	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento 0,2% (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HRB)
ACE P430A	509	352	28	79
ACE P439A	481	331	30	77
ACE P304A	710	312	56	81

O ACE P439A mostra um Alongamento bastante alto no ensaio de Tração, característica essa dos Aços Ferríticos. Tem excelente desempenho nos processos de conformação mecânica, dobragem e estampagem. Diante dessas propriedades, ele pode ser utilizado em diversas aplicações [1].

Já em relação às Propriedades Físicas, a Tabela 2.8 apresenta algumas delas. Em comparação, se adiciona os Aços Ferríticos AISI 430 e AISI 444, e o Aço Austenítico AISI 304 [1].

Tabela 2.8 – Propriedades físicas dos Aços Inoxidáveis recozidos [1].

Aço	Coeficiente de dilatação térmica médio de 0°C a			Condutividade térmica	
	100°C (µm/m.°C)	315°C (µm/m.°C)	538°C (µm/m.°C)	a 100°C (W/m.K)	a 500°C (W/m.K)
AISI 304	17,2	17,8	18,4	16,2	21,5
AISI 439	10,5	10,7	11,2	24,0	-
AISI 444	10,0	10,6	11,4	26,8	-
AISI 430	11,7	11,9	12,3	24,0	-
Aço	Densidade	Módulo de elasticidade (GPa)	Calor específico (J/kg.K)	Resistividade elétrica (nW.m)	Permeabilidade magnética (aproximada)
AISI 304	8,0	193	500	720	1,02
AISI 439	7,7	215	793	617	-
AISI 444	7,8	200	420	620	-
AISI 430	7,7	193	620	620	-

Comparado com o AISI 304, o AISI 439 possui elevada condutividade térmica; e associado ao baixo coeficiente de dilatação, permite a realização de soldagem sem grandes distorções em sua forma [1].

Devido à elevada condutividade térmica, os tubos feitos desse Aço tem excelente desempenho em evaporadores e trocadores de calor. No entanto, a análise de corrosão do meio deve ser levada em consideração na escolha para essas finalidades [1].

Uma vantagem adicional é a baixa dilatação térmica, principalmente em projetos que utilizam em conjunto o Aço Carbono com Aço Inoxidável. Por exemplo, revestir a superfície de uma peça de Aço Carbono com lâminas de ACE P439A [1].

O ACE P439A, assim como outros Aços Ferríticos estabilizados, têm ótimo comportamento na conformação de tubos soldados pelo processo ERW e na estampagem de peças complexas. Para estampagens mais profundas recomenda-se trocar por um Aço Austenítico [1].

Em relação à Rugosidade, no ACE P439A varia entre 0,1 a 0,28 μm R_a . Esse valor se refere a um acabamento 2D de uma lâmina a frio; acabamento mais utilizado para esse Aço, que pode também usar o acabamento 2B. Neste último tipo, a rugosidade varia de acordo com a espessura da lâmina; quanto mais fina, menor a rugosidade [1].

Para o ACE P439A é recomendado meios pouco agressivos. Em ambientes industriais, cidades próximas ao mar ou em regiões urbanas agressivas, a exposição prolongada provoca manchas superficiais no material, oxidação e corrosão por pite eventualmente. Em ambientes externos, como em edifícios de grandes cidades, a utilização desse material exige constante limpeza na manutenção [1].

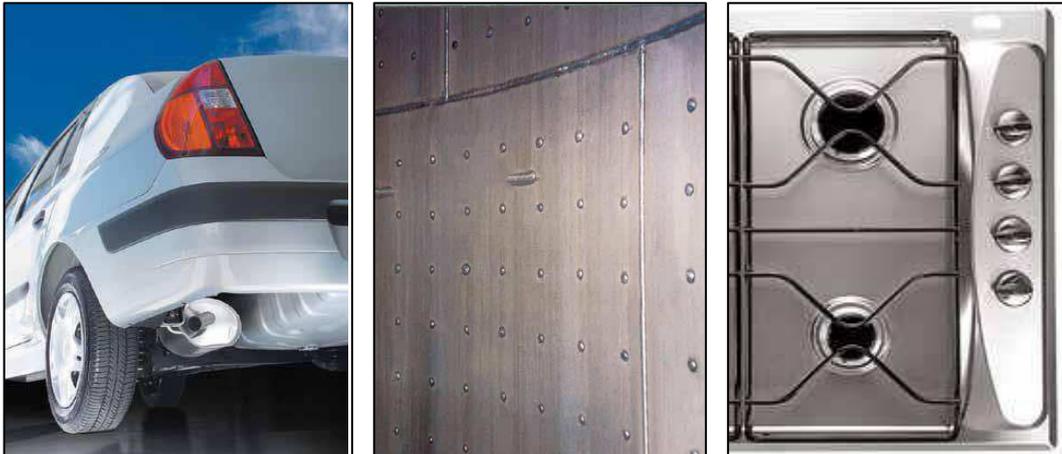
Na soldagem, o ACE P439A pode ser utilizado em vários processos. Se for necessário metal de adição, deve ser o 308L e o 309L. Para proteção, o gás utilizado é o Argônio ou Argônio e Hélio. Com a adição de 1 a 2% de Oxigênio melhoram-se as condições da região soldada. Jamais se devem usar os gases Nitrogênio, Hidrogênio e Dióxido de Carbono. Uma observação: na soldagem dos Aços Inoxidáveis Ferríticos é importante não adicionar muita energia, dessa forma evita-se o crescimento dos grãos e posteriormente a fragilização do material. Não há formação de Martensita, nem precipitação de carboneto de Cromo, devido à presença de estabilizadores no Aço ACE P439A [1].

Abaixo, algumas aplicações desse aço [1]:

- Tubos e chapas para escapamento da indústria automobilística;
- Tubos e chapas para usinas de açúcar: tanques, evaporadores, cozedores, cristalizadores, secadores e trocadores de calor;
- Tubos para transferência de fluidos;
- Tubos para corrimão (ambientes internos);
- Cozinhas residenciais;
- Tubos para móveis;
- Revestimentos internos de equipamentos fabricados com aço-carbono;
- Painéis para a construção civil (ambientes internos);
- Revestimentos de elevadores;
- Castos de máquinas de lavar roupa e refrigeradores;
- Microondas e fornos elétricos; etc.

A Figura 2.6 apresenta algumas imagens dessas aplicações.

Figura 2.6 – Aplicações do Aço ACE P439A [1].



2.2.Torneamento

Dentro dos processos de usinagem que grande parte das indústrias utiliza, o Torneamento é a operação mais básica e mais disseminada [16]. E conseqüentemente, é a mais estudada em pesquisas de corte de metais [25].

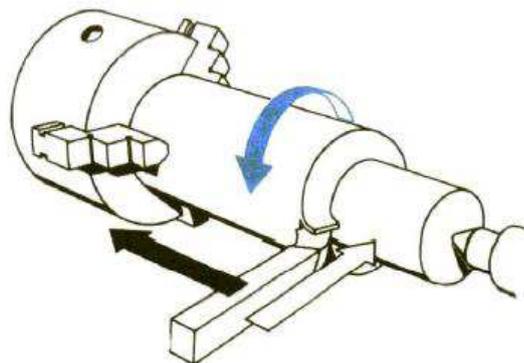
O Torneamento consiste em transformar a matéria-prima (tarugo) ou uma peça bruta, em um sólido de revolução – cilindros, cones, ou qualquer outra forma de revolução – e/ou com acabamento preciso. Para que isso aconteça são necessários dois movimentos: o movimento de rotação da peça em torno do seu eixo e o movimento de translação da ferramenta no mesmo plano desse eixo [9].

Quando o movimento de avanço da ferramenta é feita ao longo da peça, o diâmetro da mesma é reduzido. Alternativamente, quando a ferramenta avança em direção ao centro, significa que a peça será faceada. No entanto, é mais comum que esses dois movimentos sejam combinados, originando superfícies cônicas ou curvas. Os tornos CNC atuais lidam com essas medidas, devido a muitas possibilidades de programas [20].

Essa operação, apesar de ser com aresta monocortante, depende de diversos fatores, como formato e material da peça, tipo de operação, custo, etc., que definem características de corte na ferramenta. Essas que passaram por décadas de aperfeiçoamento em pesquisas e experimentos [20].

A Figura 2.7 representa os movimentos que acontecem no Torneamento. A seta azul representa o movimento de corte; a seta preta, o movimento de avanço; e a seta branca, o movimento de profundidade [20].

Figura 2.7 – Representações dos movimentos no processo de Torneamento [9][11][20].



2.2.1. Grandezas Físicas do Torneamento

Os movimentos entre a ferramenta e a peça, no momento da usinagem, são os que permitem o fenômeno do corte. São considerados no momento do projeto e da fabricação das máquinas-ferramentas que os realizarão. Podem ser classificados como ativos e passivos. Os ativos são aqueles que promovem a remoção do material diretamente. Os passivos, apesar de serem fundamentais, não promovem a remoção do material diretamente. Todos esses movimentos são importantes, pois é através deles que os tempos de produção são associados [20].

Se deve conhecer as grandezas físicas, que estão relacionadas diretamente com a produtividade, para se avaliar os resultados. Essas grandezas compreendem as de corte, de velocidade, e outras complementares. São elas [9]:

Avanço (Translação Longitudinal da Ferramenta)

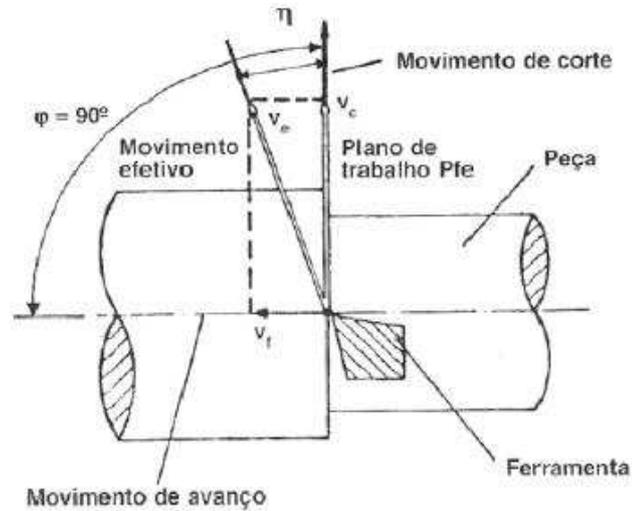
Consiste no movimento entre a peça e a ferramenta, com o auxílio do movimento de corte, que produz uma remoção contínua de cavaco ao longo de várias rotações [20].

Profundidade de Corte (Translação Transversal da Ferramenta)

A Profundidade de Corte é o movimento entre a peça e a ferramenta, definida de antemão, que determina a espessura do material a ser tirado [20].

A direção dos movimentos de corte, avanço e efetivo descritos, aparecem na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no Torneamento, mostrando os ângulos de avanço (φ), de direção efetiva (η) e o plano de trabalho da ferramenta (Pfe) [20].



Velocidade de Corte

É a velocidade instantânea tangencial proveniente da rotação da peça no contato da ferramenta, com o corte e avanço ocorrendo simultaneamente [20].

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

Onde, V_c é a Velocidade de Corte; d o Diâmetro da peça e n o número de Rotações.

Velocidade de Avanço

É o produto do avanço pela rotação da peça [20].

$$V_f = f \cdot n \quad (2.2)$$

Onde V_f é a Velocidade de Avanço; f o avanço e n o número de rotações.

Percurso de Avanço

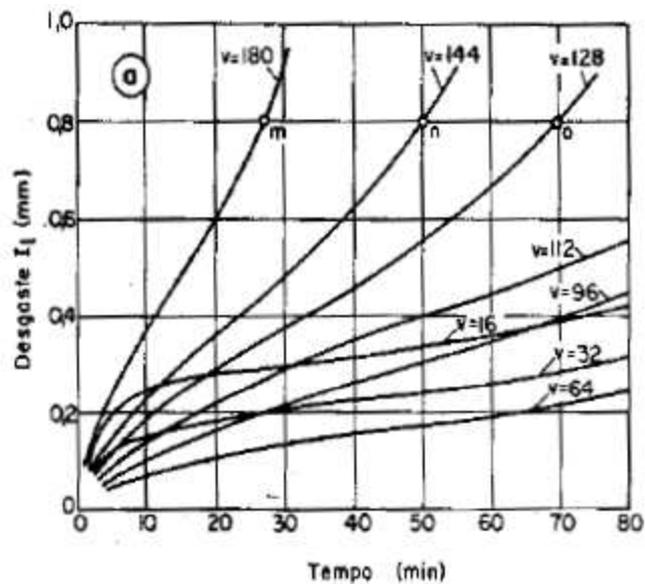
É o espaço que a ferramenta percorre na direção do avanço [9].

2.2.2. Vida de Ferramenta

O aumento de qualquer variável do processo reduz a vida da ferramenta. Mas segundo Stemmer, a aumento da velocidade de corte é a mais significativa dessas variáveis. Sendo superior tanto ao avanço por aresta, quanto à profundidade de corte [22]. A velocidade de corte influencia diretamente no desgaste da ferramenta, devido ao aumento da temperatura gerada pelo processo [8][23].

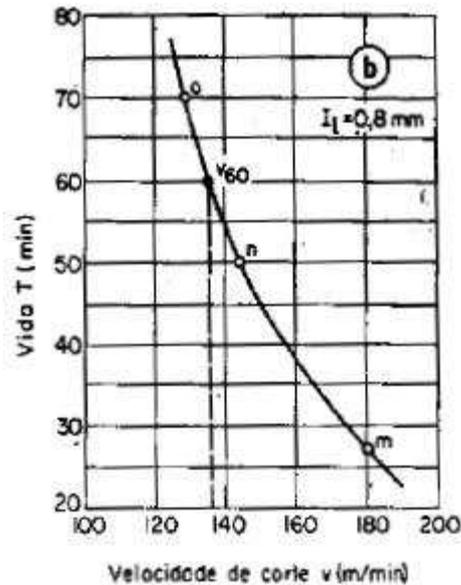
Para compor a curva de Desgaste em função da Velocidade, precisa-se antes mostrar a curva do Desgaste x Tempo com diferentes velocidades. A Figura 2.9 abaixo demonstra o desgaste de até 0,8 mm para diferentes velocidades [9].

Figura 2.9 – Desgaste em função do Tempo [9].



A partir desse pode-se compor o em relação à Velocidade, como mostra a Figura 2.10 [9].

Figura 2.10 – Vida de Ferramenta em função da Velocidade de Corte [9].



Segundo Taylor, a Vida da Ferramenta expressa em função da Velocidade de Corte é escrita, empiricamente, dessa forma [9][20]:

$$T = \left(\frac{C_t}{V_c} \right)^x \quad (2.3)$$

Onde:

x e C_t são em função do material. Os valores de x , empiricamente, estão na Tabela 2.9 [23].

A utilização de Fluido de Corte para lubrificação e refrigeração está relacionada ao fator x . Para a determinação desse fator, é necessária experimentação em laboratório com as diversas condições de usinagem, tais quais com jorro abundante, MQL e sem fluido. A partir dos valores do tempo de vida da ferramenta é possível, por interpolação na equação de Taylor, definir os novos valores de x e de T . Não se irá aprofundar muito nesse assunto. Ele será citado como sugestões para trabalhos futuros [18].

As situações em que é necessária a substituição da ferramenta são essas [20]:

- Valores elevados de desgaste;
- Temperaturas excessivas;
- Tolerâncias dimensionais que fogem do controle;
- Acabamento superficial insatisfatório;
- A força de usinagem começa a aumentar.

Fixar um valor limite de desgaste para o fim da vida de uma ferramenta apresenta diversos problemas, esses associados ao tipo de operação [20]:

- *Operações de Desbaste:* por temer que a ferramenta quebre, costumeiramente é feita a troca bem antes dos valores tolerados para essa operação.
- *Operações de Acabamento:* é fácil detectar quando as dimensões da peça saem da faixa de tolerância projetada. Geralmente se utiliza um calibrador ou outro equipamento e procede a medição por amostragem. Dessa forma, não é necessário trocar a ferramenta imediatamente, pois ainda é possível ajustar sua posição e continuar a usinar com a mesma aresta de corte (essa compensação é feita em tornos CNC's, automaticamente).

Assim como há fatores que influenciam no desgaste da ferramenta, também existem diversos fatores que determinam o tempo de vida da mesma, direta e indiretamente [20].

- *Peça:* natureza do material; processo de fabricação; composição química; tratamento térmico; microestrutura; propriedades físicas, químicas e mecânicas; dimensões e formas.
- *Ferramenta:* tipo do material; propriedades físicas, químicas e mecânicas; geometria; composição; largura do desgaste de flanco.
- *Máquina:* tipo da máquina; rigidez; avanço e profundidade de corte; área da seção de corte; forma da seção de corte; meio lubrificante; velocidade de corte (parâmetro mais importante).

Relação da vida da ferramenta com as variáveis dependentes do processo

As dimensões de corte influenciam significativamente na vida da ferramenta para uma dada velocidade de corte. Kronenberg, em 1954, agrupou equações de velocidade de corte de vários pesquisadores que relacionaram com a forma e a seção de corte, e introduziu as seguintes igualdades [20][23]:

- área da secção transversal de corte;

$$A = a_p \cdot f \tag{2.4}$$

- índice de esbeltez do cavaco.

$$G = \frac{a_p}{f} \tag{2.5}$$

A constante C_t depende de vários fatores, como o material da peça, material da ferramenta, dimensões de corte, etc. A equação resultante foi obtida experimentalmente e relacionando diversas outras equações. Para o estudo, não se faz interessante demonstrar como essas relações foram feitas. No entanto, explicar-se-á cada variável envolvida e as tabelas de consultas [20]. Assim tem-se:

$$C_t = 60^y \cdot C_v \cdot \frac{(0,2 \cdot G)^g}{A^i} \tag{2.6}$$

Onde:

y = índice que mostra o quão sensível é a ferramenta à mudança de V_c . Depende de outras variáveis como máquina, ferramenta e peça. Os seus valores médios estão indicados na Tabela 2.9.

C_v = velocidade de corte que dá à ferramenta uma vida de 60 minutos de usinagem em uma seção de 1 mm² com índice de esbeltez de 5. Os valores típicos se encontram na Tabela 2.10.

g = expoente do índice de esbeltez do cavaco, Tabela 2.11.

i = expoente da área da seção de corte, Tabela 2.11.

Tabela 2.9 – Valores dos expoentes x e y [20].

Ferramenta	Peça	x	y
Aço-rápido (AR)	Aço	6 a 8	0,125 a 0,167
	Fofo	4 a 7	0,143 a 0,25
	Latão	4	0,25
	Cobre	7,7	0,13
	Alumínio	2,44	0,41
Metal-duro (MD)	Aço	5	0,2
	Fofo	4	0,25
	Alumínio	2,44	0,41
Cerâmica	Aço	2	0,5

Tabela 2.10 – Valores típicos de V_c para as ferramentas de aço-rápido e metal-duro [20].

Dureza Brinell HB	Tensão de Ruptura σ_r [N/mm ²]	V_c na usinagem de aço c/ ferramenta de:		V_c na usinagem de fofo c/ ferramenta de:	
		AR	MD	AR	MD
100	350	85	361	50	240
125	440	64	283	40	200
150	530	51	224	35	160
175	610	42	183	30	130
200	700	34	150	25	100
225	790	30	133	20	80
250	870	26	113	---	60
275	960	23	101	---	45
300	1050	20	89	---	45
325	1170	---	84	---	---
350	1220	---	76	---	---
375	1230	---	68	---	---
400	1400	---	63	---	---

Tabela 2.11 – Valores dos expoentes i , g e y para as ferramentas de aço-rápido e metal-duro [20].

Ferramenta	Material	C_v [m/min]	i	g	$y = 1/x$
Aço-rápido (AR)	Aço	Tabela 5.3	0,28	0,14	0,125 a 0,167
	Fofo		0,20	0,10	0,143 a 0,25
	Latão	100	0,31	0	0,25
	Cobre	45	0,23	0	0,13
	Alumínio	77	0,29	0	0,41
Metal-duro (MD)	Aço	Tabela 5.3	0,28	0,14	0,20
	Fofo		0,20	0,10	0,25
	Latão	1000	0,10	0	---
	Cobre	850	0,10	0	---
	Alumínio	1650	0,10	0	0,41

Dessa forma, a Equação 2.3 de Taylor pode ser escrita novamente [20][23]:

$$T = \left(\frac{C_t}{V_c} \right)^x = \left[\frac{60^y \cdot C_v \cdot (0,2 \cdot G)^g}{V_c \cdot A^i} \right]^x \quad (2.7)$$

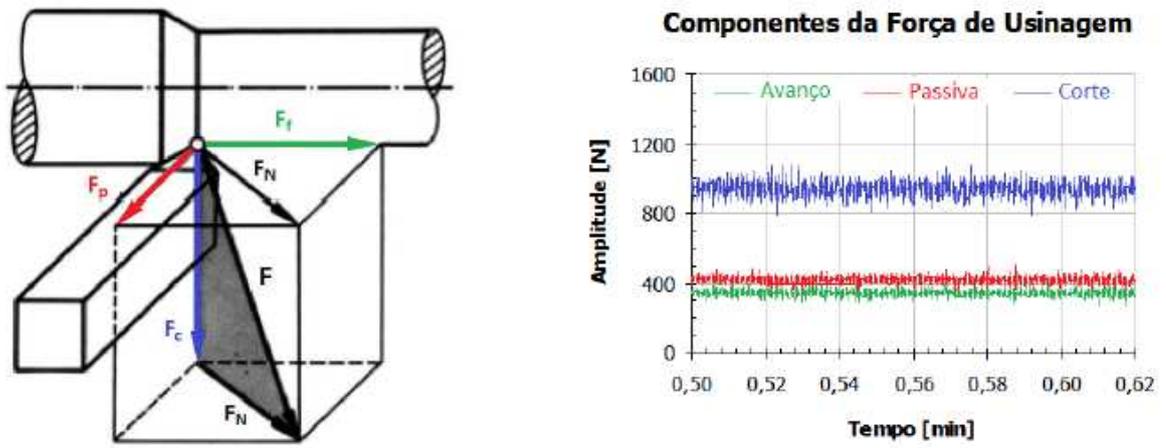
Em que:

$$K = C_t^x = \left[60^y \cdot C_v \cdot \frac{(0,2 \cdot G)^g}{A^i} \right]^x \quad (2.8)$$

2.2.3. Força de Usinagem

As componentes ortogonais da Força de Usinagem [F_f (Força de Avanço - Verde), F_p (Força Passiva – Vermelho) e F_c (Força de Corte - Azul)] são mostradas na Figura 2.11. O gráfico nessa figura demonstra qualitativamente a proporção entre as forças [20].

Figura 2.11 – (Esquerda) Componentes ortogonais da Força de Usinagem; (Direita) forças após 30 segundos de usinagem com ferramenta nova de metal-duro ($V_c = 350$ m/min, $f = 0,3$ mm/volta, $a_p = 1,5$ mm) [20].



As proporções médias entre as componentes da Força de Usinagem no torneamento de aços em geral com ferramentas de Metal-Duro podem ser consideradas na Equação 2.9 [20].

$$\frac{F_f}{2} = \frac{F_p}{5} = \frac{F_c}{9} \quad (2.9)$$

A intensidade da Força de Usinagem pode ser expressa pela Equação 2.10 [20].

$$F = \sqrt{F_f^2 + F_p^2 + F_c^2} \quad (2.10)$$

Determinação Empírica da Força de Corte

A Equação 2.11 mostra como a Força de Corte pode ser expressa [20].

$$F_c = K_s \cdot A \quad (2.11)$$

Onde:

K_s = Pressão Específica;

A = Área da Seção Transversal de Corte

$$A = b \cdot h = a_p \cdot f \quad (2.12)$$

Para o cálculo da Pressão Específica, existem várias teorias baseadas em dados experimentais. Dentre elas as de F. W. Taylor, ASME – American Society of Mechanical Engineers, AWF – Ausschuss für Wirtschaftliche Fertigung, Hucks e Kronenberg [20].

Na busca de uma fórmula simples e precisa, em 1951, Kienzle apresentou a Equação 2.13 que continha a Espessura de Corte [20].

$$K_s = K_{s1} \cdot h^{-z} \quad (2.13)$$

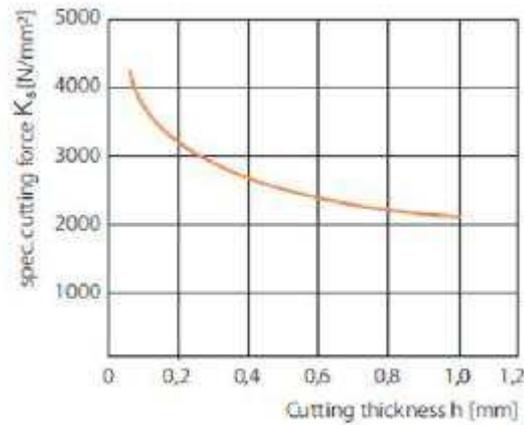
Onde:

K_{s1} e z são constantes dos material;

h é a Espessura de Corte.

A Figura 2.12 mostra a representação gráfica da Pressão Específica de Corte para um determinado par peça-ferramenta através de testes práticos [20].

Figura 2.12 – Representação aritmética da variação da pressão específica de corte com a espessura de corte [20].



Sabe-se que qualquer modificação no ângulo de saída γ provoca variação na Força de Corte. Portanto, uma correção é feita de 1,5% para cada grau do ângulo de saída em relação aos valores utilizados por Kienzle em suas experimentações ($\gamma = 6^\circ$ para Aço e $\gamma = 2^\circ$ para Ferro Fundido) [20].

A Força de Corte, segundo Kienzle, é dada substituindo a Equação 2.13 na Equação 2.11 e separando para cada material [20].

Para Aço:

$$F_c = [1 - (0,015 \cdot (\gamma - 6^\circ))]. K_{s1} \cdot b \cdot h^{1-z} \quad (2.14)$$

Para Ferro Fundido:

$$F_c = [1 - (0,015 \cdot (\gamma - 2^\circ))]. K_{s1} \cdot b \cdot h^{1-z} \quad (2.15)$$

A Tabela 2.12 contém os valores de $1-z$ e K_{s1} para os materiais ensaiados por Kienzle [20].

Tabela 2.12 – Valores dos parâmetros $1-z$ e K_{s1} para diferentes materiais [20].

Material	σ_t [N/mm ²]	$1-z$	K_{s1}
Aço DIN 16 Mn Cr 5	532	0,84	2000
15 Cr Mo 5	590	0,83	2290
18 Cr Ni 6	630	0,70	2260
34 Cr Mo 4	800	0,79	2240
42 Cr Mo 4	1070	0,84	2320
50 Cr V 4	600	0,74	2220
105 W Cr 6	744	0,71	2000

Material	σ_t [N/mm ²]	$1-z$	K_{s1}
Aço ABNT 1020	500	0,83	1800
1030/1035	520	0,74	1990
1040	620	0,83	2110
1045	670	0,86	2220
1050	720	0,70	2260
1060	770	0,82	2130
4137	600	0,79	2240
4140	730	0,74	2500
4320	630	0,70	2260
6150	600	0,74	2220
8620	770	0,74	2100
9260	960	0,73	1270
52100	640	0,71	1600

Material	σ_t [N/mm ²]	$1-z$	K_{s1}
Ferro Fundido	HRc 46	0,81	2060
F°F° GGL 14	124	0,79	950
F°F° GGL 18	124	0,87	750
F°F° GG 26	HB 200	0,74	1160

2.2.4. Potência de Usinagem

A soma das potências das componentes da Força de Usinagem gera a Potência de Usinagem, assim como o produto da Velocidade pela Força e pelo cosseno do ângulo entre ambas. Dessa forma, somente as componentes do Avanço e do Corte contribuem para a Potência de Usinagem [20].

A potência gerada pela Máquina-Ferramenta gira o eixo-árvore e executa os movimentos de Avanço e Corte. Com essas informações podem-se fazer relações com as potências de Avanço e Corte [20].

Potência de Avanço:

$$P_f = \frac{F_f \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} \quad (2.16)$$

Potência de Corte:

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 10^3} \quad (2.17)$$

A relação entre as duas potências fica assim [20]:

$$\frac{P_c}{P_f} = \frac{1000 \cdot F_c \cdot V_c}{F_f \cdot V_f} = \frac{F_c \cdot \pi \cdot d}{F_f \cdot f} \cong \frac{9}{2} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{f}\right) \quad (2.18)$$

Numa situação hipotética extrema com $d = 1$ mm e $f = 1$ mm/volta, para tornar a relação menor possível, tem-se [20]:

$$\frac{P_c}{P_f} > 4,5 \cdot \pi \cdot 10 = 141,4 \quad (2.19)$$

Percebe-se que a Potência de Avanço é muito menor que a Potência de Corte na Usinagem. De modo, é permitido desprezar a Potência de Avanço no cálculo da Potência do motor P_m [20].

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \tag{2.20}$$

Onde:

η = Rendimento da Máquina-Operatriz (para máquinas atuais, varia entre 85% a 95%).

2.3. Considerações sobre os Custos

Em uma produção em série, existem duas velocidades de extrema importância, para diferentes parâmetros de corte: a Velocidade Econômica de Corte e a Velocidade de Corte para Máxima Produção [9].

A primeira se refere àquela que, para condições de parâmetros constantes de corte, resulta no menor custo de fabricação por peça. Já a segunda, nas mesmas condições, acarreta no menor tempo possível de confecção por peças [9].

O próximo passo será como determinar essas duas velocidades. Mas antes disso devem-se introduzir os conceitos de tempos e custos de usinagem; que serão parâmetros fundamentais para essa determinação [9].

2.3.1. Velocidade de Corte para Máxima Produção

Tempo de Corte

Segundo Ferraresi, o ciclo de usinagem é constituído diretamente pelas seguintes etapas na confecção de uma única peça [7]:

- Fixação da peça na máquina-ferramenta;
- Aproximação da ferramenta;
- Corte;
- Afastamento da ferramenta;
- Retirada da peça usinada.

De forma indireta, há essas outras etapas, que só são realizadas depois de um número Z de peças [7]:

- Preparo da máquina para a usinagem;
- Remoção da ferramenta para substituição ou afiação;
- Afiação da ferramenta;
- Recolocação da ferramenta.

O tempo total para a fabricação da peça, somando todos os tempos gastos nessas fases, fica dessa forma [2][14][20]:

$$t_t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{n_t}{Z} \cdot (t_{ft} + t_{fa}) \quad (2.21)$$

Sendo:

t_t = tempo total de fabricação da peça

t_c = tempo de corte

t_s = tempo secundário de usinagem

t_a = tempo de aproximação e afastamento da ferramenta

t_p = tempo de preparo da máquina

t_{ft} = tempo de troca de ferramenta

t_{fa} = tempo de afiação da ferramenta

Z = número de peças fabricadas

n_t = número de trocas ou afiações da ferramenta; fórmula:

$$n_t = Z \cdot \frac{t_c}{T} - 1 \quad (2.22)$$

Simplificando a Equação 2.21, o Tempo Total se resume em 3 parcelas:

$$t_t = t_c + t_1 + t_2 \quad (2.23)$$

Onde:

t_c = tempo de corte;

t_1 = tempo improdutivo (colocação, fixação e retirada da peça, aproximação e afastamento da ferramenta, preparo da máquina);

t_2 = tempo de troca e afiação da ferramenta.

Velocidade de Corte para Máxima Produção

De posse da equação do tempo, pode-se determinar a equação da Velocidade de Corte para Máxima Produção. No entanto, faz-se necessário simplificar cada parcela dessa Equação 2.23. Realizando as operações necessárias se obtêm [20]:

$$t_c = \frac{L_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} \quad (2.24)$$

$$t_1 = t_s + t_a + \frac{t_p - t_{ft}}{Z} \quad (2.25)$$

$$t_2 = \frac{\pi \cdot d \cdot L_f \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} \quad (2.26)$$

Substituindo na equação do Tempo Total Equação 2.23 (lembrando que t_1 não depende da Velocidade de Corte):

$$t_t = \frac{L_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} + t_1 + \frac{\pi \cdot d \cdot L_f \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} \quad (2.27)$$

Por fim, derivando em função da Velocidade de Corte:

$$\frac{dt_t}{dV_c} = 0 \quad (2.28)$$

$$-\left(\frac{\pi \cdot d \cdot L_f}{1000 \cdot f}\right) \cdot V_c^{-2} + (x - 1) \cdot \left(\frac{\pi \cdot d \cdot L_f}{1000 \cdot f}\right) \cdot \left(\frac{t_{ft}}{K}\right) \cdot V_c^{x-2} = 0 \quad (2.29)$$

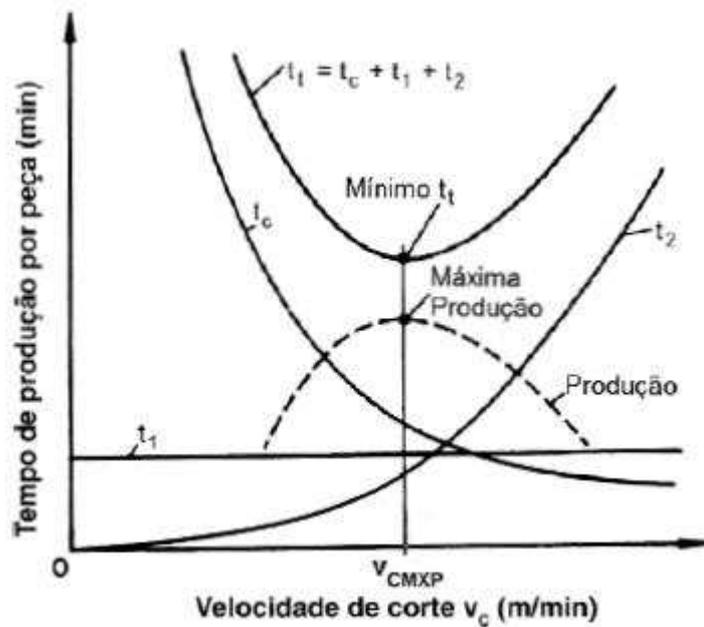
$$1 = \left(\frac{(x - 1) \cdot t_{ft}}{K}\right) \cdot V_c^x \quad (2.30)$$

Dessa forma se obtém a Velocidade de Corte para Máxima Produção:

$$V_{cmxp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \cdot t_{ft}}} \quad (2.31)$$

A Figura 2.13 apresenta a Velocidade de Máxima Produção com a junção das parcelas do tempo na produção.

Figura 2.13 – Tempo de produção por peça em função da Velocidade de Corte [20].



2.3.2. Velocidade Econômica de Corte

Devem-se considerar apenas os custos referentes ao processo quando se for determinar a velocidade econômica de corte [20]. Assim temos:

$$K_p = C_1 + K_{p1} + K_{p2} \quad (2.32)$$

Onde:

C_1 = Termo independente da velocidade de corte

$$C_1 = \left(\frac{t_1}{60} - \frac{1}{Z} \right) \cdot C_2 \quad (2.33)$$

Sendo:

C_2 = Soma das despesas com mão-de-obra e com máquinas

$$C_2 = S_h + S_m \quad (2.34)$$

K_{p1} = Custo do processo de Usinagem

$$K_{p1} = \frac{t_c}{60} \cdot C_2 = \left(\frac{\pi \cdot d \cdot L_f}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot V_c} \right) \cdot C_2 \quad (2.35)$$

K_{p2} = Custo com a troca da ferramenta

$$K_{p2} = \frac{t_c}{T} \cdot C_3 = \left(\frac{\pi \cdot d \cdot L_f \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} \right) \cdot C_3 \quad (2.36)$$

Sendo:

C_3 = Custo relativo à ferramenta

$$C_3 = K_{ft} + \frac{t_{ft}}{60} \cdot C_2 \quad (2.37)$$

Sendo:

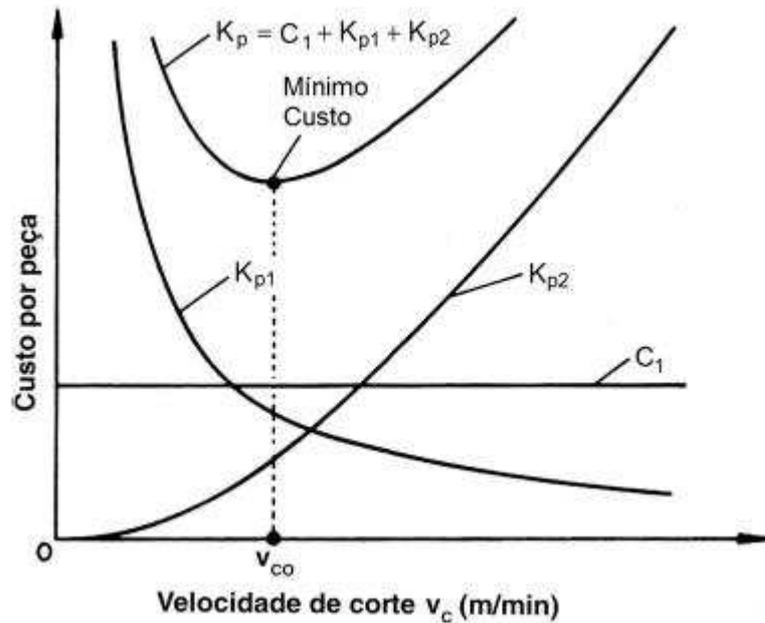
K_{ft} = Custo da ferramenta por vida

Substituindo tudo na Equação 2.32, tem-se:

$$K_p = C_1 + \left(\frac{\pi \cdot d \cdot L_f \cdot C_2}{60 \cdot 000 \cdot f} \right) \cdot V_c^{-1} + \left(\frac{\pi \cdot d \cdot L_f}{1000 \cdot f} \right) \cdot \left(\frac{C_3}{K} \right) \cdot V_c^{x-1} \quad (2.38)$$

A Figura 2.14 mostra as 3 parcelas que compõe o custo de usinagem de uma peça.

Figura 2.14 – Custo de Produção por peça em função da Velocidade de Corte [20].



A obtenção do valor mínimo de K_p é feita quando se deriva a Equação 2.38 em função da velocidade de corte e se iguala a zero (admitindo-se f e a_p constantes) [20].

$$\frac{dK_p}{dV_c} = 0 \quad (2.39)$$

$$-\left(\frac{\pi \cdot d \cdot L_f}{1000 \cdot f} \right) \cdot \frac{C_2}{60} \cdot V_c^{-2} + (x + 1) \cdot \left(\frac{\pi \cdot d \cdot L_f}{1000 \cdot f} \right) \cdot \left(\frac{C_3}{K} \right) \cdot V_c^{x-2} = 0 \quad (2.40)$$

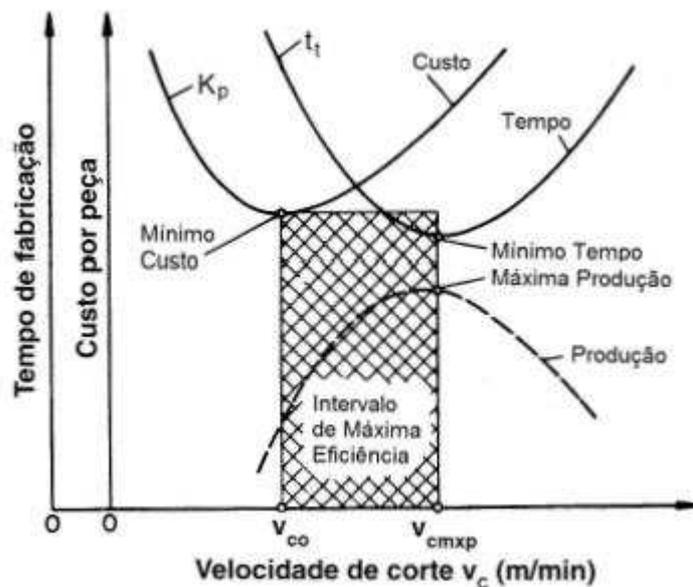
$$\frac{C_2}{60} = \left(\frac{(x-1) \cdot C_3}{K} \right) \cdot V_c^x \quad (2.41)$$

$$V_{co} = \sqrt[x]{\frac{C_2 \cdot K}{60 \cdot (x-1) \cdot C_3}} \quad (2.42)$$

2.3.3. Intervalo de Máxima Eficiência

Consiste no intervalo entre a Velocidade de Corte de Máxima Produção e a Velocidade Econômica de Corte. A Figura 2.15 abaixo demonstra as curvas de Custo Total e Tempo Total de Confeção de uma peça em função da Velocidade de Corte [20].

Figura 2.15 – Intervalo de Máxima Eficiência [7].



Fazendo uma análise variando os valores de V_c , tem-se que numa Velocidade de Corte baixa, o custo e o tempo de produção são elevados devido a produtividade ser baixa. Já numa Velocidade de Corte alta demais, o custo e tempo também são elevados devido a vida da ferramenta que diminui significativamente, perdendo tempo e dinheiro com paradas de produção excessivas.

Desse modo, vale salientar que o valor de V_c a ser utilizado deve estar necessariamente nesse intervalo. Pois, logicamente, se V_c estiver abaixo de V_{co} , o custo da peça vai ser bem mínimo, mas o tempo de produção vai ser bem alto; e se V_c estiver acima de V_{cmxp} , na produção o tempo é reduzido, mas o gasto cresce com a troca da ferramenta. Recomenda-se, então, escolher uma velocidade dentro do Intervalo de Máxima Eficiência, onde apesar de o tempo de confecção ser bem semelhante, pode-se definir um V_c que melhor se enquadra na produção [20].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A obtenção de dados para confirmar o estudo apresentado, se faz mediante ao cálculo das velocidades periféricas ao Intervalo de Máxima Eficiência – V_{co} e V_{cmxp} . Em seguida, compomos as curvas e inserimos esses pontos limites.

Para determinar a Velocidade de Máxima Produção e Velocidade Econômica de Corte, precisam-se definir alguns parâmetros necessários. Vale lembrar que os principais são o processo de usinagem (Torneamento) e o material utilizado (Aço Inoxidável ACE P439A).

Algumas informações nos materiais podem ser sofrer variações em relação aos valores reais de mercado. O foco do trabalho é o desenvolvimento dos conceitos apresentados. Os materiais utilizados e os parâmetros admitidos são esses:

- *Material da peça:* Aço Inoxidável ACE P439A (Composição química: 0,03% C; 1% Mn; 0,04% P; 0,03% S; 1% Si; 17-19% Cr; 0,5% Ni), $\sigma_{rt} = 481$ MPa, $\varnothing = 80$ mm;
- *Material da ferramenta:* Metal-duro tipo SNMG 120408 PM 4025 (Classe P25), $r_{\xi} = 0,8$ mm;
- *Operação:* Corte para $d = 75$ mm em único passe, comprimento $L = 200$ mm;
- *Condições de corte:* Rugosidade média na usinagem a seco $R_a \leq 5 \mu m$.

Dados sobre os custos:

- Salário do operador + Salário máquina $C_2 = S_h + S_m = 60,00$ [R\$/hora];
- Custo da ferramenta por vida do gume $C_f = 5,00$ [R\$/gume].

Dados auxiliares:

- Tempo de troca do gume ferramenta $t_f = 0,5$ min;
- Tempo de aproximação e afastamento $t_a = 0,2$ min/peça;
- Tempos secundários $t_s = 0,36$ min/peça;
- Tempo de preparo da máquina $t_p = 35$ min;
- Tamanho do lote $Z = 2\ 000$.

Após inserir todos os dados, obtêm-se as equações das curvas de Tempo Total de Produção e Custo Total de Produção. Utiliza-se o software MATLAB para compor as curvas. Continuando com o cálculo, derivam-se as equações das curvas para encontrar o ponto mínimo das mesmas; isto é, os limites do Intervalo de Máxima Eficiência. Todo o memorial de cálculo se encontra no Anexo 01.

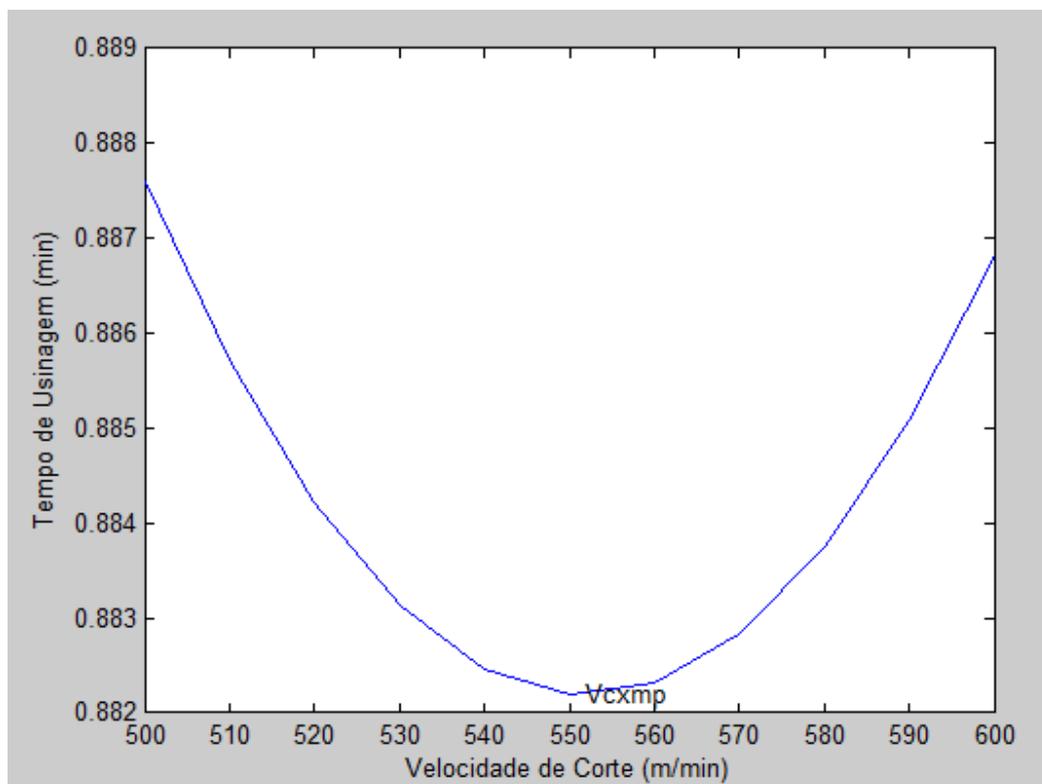
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o Aço ACE 439A com a Tensão de Ruptura em $\sigma_{rt} = 481$ MPa, as Velocidades de Corte encontradas ficam razoavelmente mais alta do que as encontradas nos demais Aços Inoxidáveis. As Velocidades de Corte estão intimamente ligadas à ductilidade do material. A Ferrita presente no aço, associada aos tratamentos térmicos correspondentes, dão essa característica de ductilidade.

As curvas apresentadas abaixo apresentam apenas os resultados do experimento com o Aço ACE P439A, como forma de determinação da Condição Ideal de Produção. Para comparações, deve-se fazer todo esse estudo com outro tipo de material e tomar os resultados desse. Nesse trabalho não foi feito esse procedimento como forma de dá oportunidade de novos trabalhos serem desenvolvidos em cima desse aspecto.

Na Figura 4.1, numa variação da Velocidade de Corte de 500 a 600 m/min, o valor encontrado para a Velocidade de Máxima Produção $V_{cxmp} = 551,9$ m/min teve como Tempo de Produção $t_t = 0,8822$ min. O Custo de Produção para essa velocidade é $K_p = 1,4611$ R\$/peça.

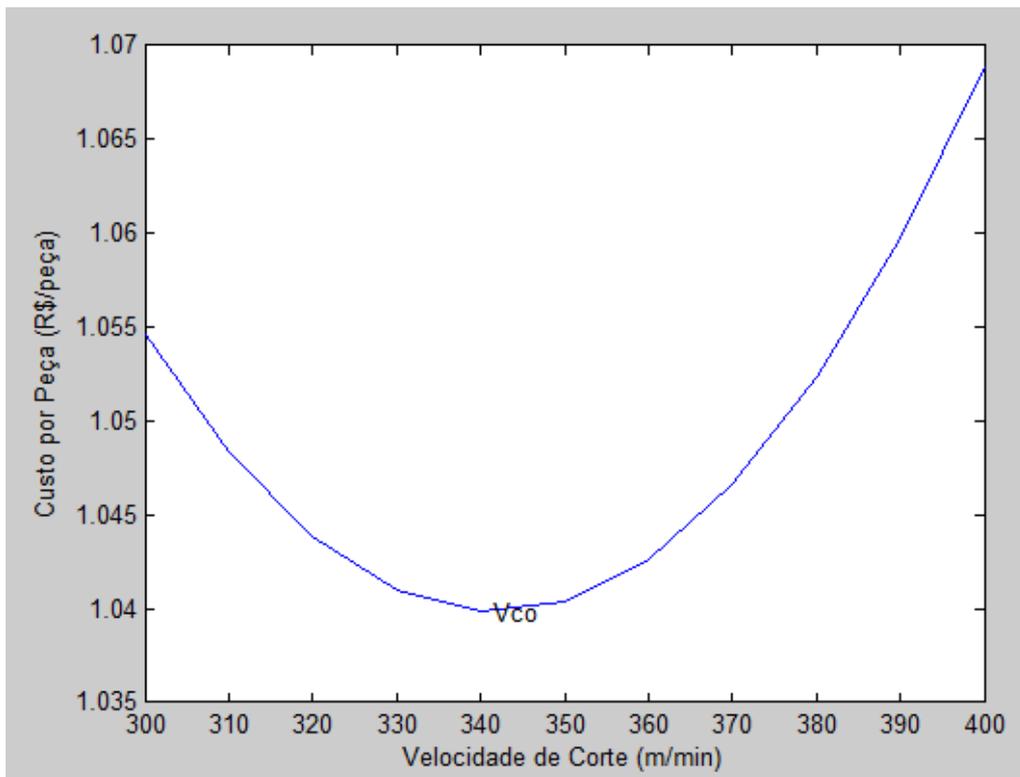
Figura 4.1 – Velocidade de Máxima Produção.



Se o objetivo do empreendimento for a alta produtividade, sem a preocupação com os custo de produção, esse ponto se faz interessante. O foco dessa análise é a rapidez do processo de usinagem, independente do custo que a peça vai obter.

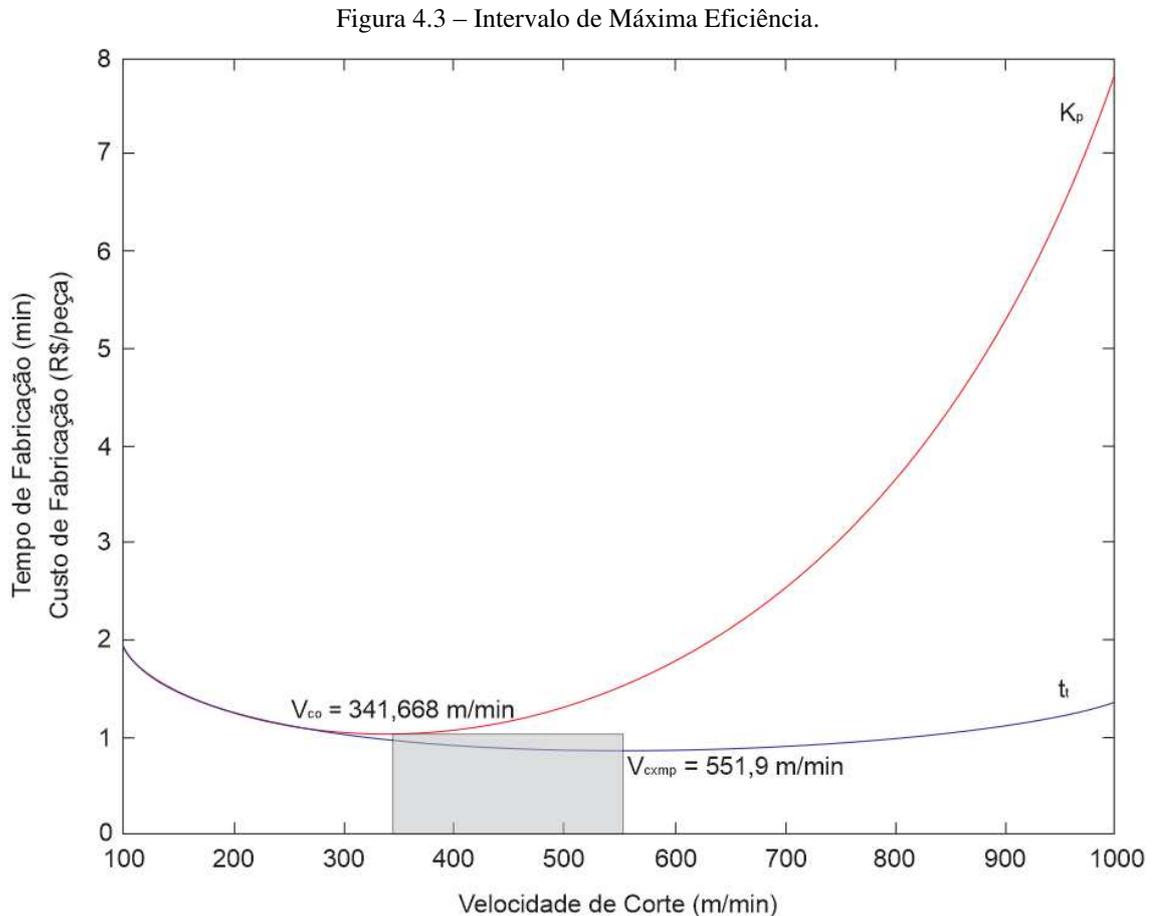
Com uma variação de Velocidade de Corte entre 300 a 400 m/min, a Figura 4.2 mostra a Velocidade Econômica de Corte $V_{co} = 341,668$ m/min que implica num Custo de Produção $K_p = 1,0398$ R\$/peça.

Figura 4.2 – Velocidade Econômica de Corte.



Para essa velocidade o Tempo de Produção é $t_t = 0,9803$ min. Nesse cenário, o preço da peça é o considerado, mesmo que a produção da mesma dure mais um pouco.

Para melhor visualização do Intervalo de Máxima Eficiência precisam-se unificar as curvas anteriores. A Figura 4.3 mostra essa união.



Fazendo o comparativo das duas situações, se a velocidade aumenta, a produtividade acompanha aumentando; no entanto, o custo da peça também se eleva; sendo o principal fator a vida da ferramenta utilizada. O contrário, não utilizando elevados valores de Velocidade de Corte, a integridade da ferramenta é mais preservada, ocasionando menor número de trocas de ferramentas e de paradas de produção, conseqüentemente, a custo da peça diminui. Porém, o tempo para a confecção dessa peça aumenta, e com isso a produtividade é reduzida.

Para administradores que pretendem não ficar somente com a produtividade ou com a economia, o Intervalo de Máxima Eficiência, apresentado na Figura 4.3, sugere valores entre esses dois extremos. Os valores apresentados das velocidades para o Aço Inoxidável ACE P439A no processo de Torneamento é de auxílio significativo para obtenção da situação ideal para uma determinada intensão de empreendimento no ramo.

Entretanto, esse intervalo poderia ser restringindo ainda mais. Segundo os experimentos de Kienzle, se poderia obter outro valor de Velocidade de Corte, por intermédio da Potência de Usinagem, relacionando as Forças de Usinagem, Ângulos da Ferramenta, Espessura de Corte, Pressão Específica de Corte entre outras constantes empíricas. A Equação 2.17 apresenta essa relação. Nesse trabalho, esse cálculo não foi considerado por falta de dados na literatura acadêmica referente ao material utilizado.

Referências em que há experimentos com o Aço Inoxidável Ferrítico ACE P439A para determinação da Pressão Específica de Corte, Força de Usinagem de Corte, constante $1-z$ e K_{s1} , não foram obtidas [20]. Esse aspecto referente a esse tipo de Aço poderá ser estudado em dissertações futuras.

Apesar de não ser inserida no cálculo, a determinação de mais um limite na busca das condições ideais de corte é fundamental para a escolha da melhor Velocidade de Corte. O Intervalo de Máxima Eficiência fica mais restringido, além de ter o mercado regendo essa escolha. Isto é, a potência da máquina-ferramenta também é considerada no cálculo, assim como o rendimento da mesma [20].

5. CONCLUSÕES

A avaliação dos resultados na relação entre os parâmetros de Usinagem com os de determinação da Máxima Eficiência de Produção, bem como a inserção dos aspectos do Aço Inoxidável Ferrítico, fez-se de maneira bastante didática e explicativa.

Percebeu-se que a Velocidade de Corte é o parâmetro crucial para a construção desse cenário, que apesar de fazer uma restrição por intermédio das considerações de projeto e constantes naturais, não limita que o administrador escolha um perfil específico para sua produção.

Valores de Velocidade de Corte escolhidos próximo ao limite mínimo V_{co} dão o caráter de redução de custo à produção, no qual o tempo de vida da ferramenta é mais preservado. Isto é, menos paradas de produção para troca de ferramentas e menor número de ferramentas utilizadas fazem com que o custo de produção diminua.

Por outro lado, ao se escolher velocidades próximas ao limite superior V_{cxmp} , pode-se produzir um maior número de peças num determinado intervalo de tempo. Portanto, o parâmetro Produtividade é aumentado.

O importante é manter-se dentro desse intervalo, porque a variação entre os tempos de produção e os custos de produção são minimizados. Além disso, outros fatores podem restringir esse intervalo, dependendo do caso. E o ajuste fino da produção pode ser feito com o decorrer do tempo.

A apresentação de um material novo abriu a possibilidade de diversos estudos relacionando o mesmo. Calcular o Intervalo de Máxima Eficiência para esse tipo de Aço Inoxidável obteve resultados bastante característicos.

Essa análise voltada para o aspecto econômico da Usinagem do Aço ACE P439A, será tão somente de grande utilidade para empresas que têm esse material no ramo de trabalho, como também para qualquer outro tipo de material em que as equações e considerações, feitas nesse trabalho, englobam.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por esse trabalho ser bastante amplo e ter diversas áreas envolvidas, diversos segmentos no raciocínio apareceram. Ou seja, há diversas sugestões para que trabalhos futuros possam ser desenvolvidos:

- Estudo da Usinabilidade do Aço Inoxidável ACE P439A;
- Análise da Utilização de Fluido de Corte na Usinagem do Aço Inoxidável ACE P439A;
- Formas de Custeio para a Produção com o Aço Inoxidável ACE P438A;
- Determinação de Pressão Específica de Corte para alguns Materiais Raros;
- Experimentação para obtenção da Potência de Usinagem para o Aço Inoxidável ACE P439A.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Arcelor Mittal Inox Brasil. **Aço Inoxidável Ferrítico – ACE P439A** site: http://www.acesita.com.br/port/arquivos/439Port_fin.pdf, Acessado: 03/06/2015.
- [2] BARNES, R. M. **Motion and Time Study: Design and Measurement of Work**. John Wiley e Sons. Inc. New York, 1968.
- [3] CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [4] CALLISTER, William D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- [5] Castolin Eutection. **Linha Mundial para Soldagem de Aço Inoxidáveis**. Site: http://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo_inox.pdf, Acessado em: 20/11/2015.
- [6] CORROSION, A. **Fundamentals, Testing, and Protection**. 9. ed. USA: ASM International: The Materials Information Society, v. 13, 2003. 1135 p.
- [7] FERRARESI. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 12ª edição. São Paulo: Edgar Blucher, 1970.
- [8] KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren**. 5ª ed., Berlin: Springer, 1997.
- [9] MAGALHÃES, Sávio Borba de. **Análise Econômica da Influência do Fluido de Corte no Torneamento Cilíndrico Externo do Aço Inox 304L**. UFRJ, 2013.
- [10] **Manual Técnico do Aço Inoxidável**. Rev. 09 – 05/2011 Site: <http://www.kloecknermetals.com.br/pdf/3.pdf> , Acessado em: 28/10/2015.
- [11] NÚCLEO INOX. **Coletânea de Informações Técnicas – Aço Inoxidável**. Site:

http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/A%E7o%20Inoxid%E1vel_No%E7%F5es%20b%E1sicas.pdf, Acessado em 11/11/2015.

[12] OLIVEIRA, Leonardo Albergaria. **Influência do Metal de Adição na Susceptibilidade à Corrosão sob Tensão de Juntas Soldadas Dissimilares de Aço Inoxidável Austenítico 316 e Aço Inoxidável Dúplex 2304**. Itajubá, 2013.

[13] PADILHA, A. F., GUEDES, L. C, **Aços Inoxidáveis Austeníticos: Microestrutura e Propriedades**, Editora Hemus, 1994.

[14] PALLEROSI, C. A. **Formação de um Método Geral de Análise das Condições Econômicas de Usinagem**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia de Campinas. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1973.

[15] ROCHA, Fernanda Mitke Maria de Larceda. **Considerações sobre os Aços**. Universidade Federal Fluminense, 2009.

[16] SHAW, M.C., **Metal cutting principles**, 432 p., 2ª ed., Oxford University Press, New York, USA, 2005.

[17] SIQUEIRA, Rodrigo Pinto de. **Efeitos de Orientação na Recristalização do Aço Inoxidável Ferrítico AISI 430 com grãos grosseiros e estabilizados ao Nióbio**. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de Lorena. Lorena, 2010.

[18] SOARES, Enio Yamamotu Ferreira. **Análise Econômica da Usinagem do Aço Automotivo DIN 100Cr6**.

Site: http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2009/Artigos/Art_TCC_003_2009.pdf, Acessado em: 10/11/2015.

[19] SOUSA, Jhonatan Peres de. **Estudo da Usinabilidade do Aço Inoxidável Austenítico**. UEMA. São Luís, 2014.

[20] SOUZA, André João de. **Processos de Fabricação por Usinagem - Parte 2**. UFRS, 2011.

[21] SOUZA, Antônio Carlos de; NOVASKI, Olívio; OLIVEIRA PAMPLONA, Edson de; BATOCCHIO, Antônio. **Condições Econômicas no Processo de Usinagem: Uma Abordagem para Consideração de Custos**. Universidade Estadual de Campinas e Escola Federal de Engenharia. Campinas-SP.

Site: <http://www.intercostos.org/documentos/Trabajo100.pdf>, Acessado em 24/11/2015.

[22] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 7ª Ed. 249 p., Ed. Da UFSC, Florianópolis, Brasil, 2007.

[23] TAYLOR, F.W. **On The Art of Cutting Metals**. Transactions of ASME, Volume 28, 1907.

[24] TEBECHERANI, Ciro de Toledo Piza. **Aços Inoxidáveis**. Site: ciropiza@osite.com.br, Acessado em: 20/10/2015.

[25] TRENT, E.M.; WRIGHT, P. K., **Metal Cutting**, 446 p., 2ª ed., Butterworth-Heinemann, Woburn, USA, 2000.

ANEXO 01

Utilizando os dados do item Materiais e Métodos e as equações do Referencial Teórico, segue abaixo o Memorial de Cálculo.

Avanço, Profundidade e C_v

$$R_a = 32,075 \cdot \frac{f^2}{r_\epsilon}$$

$$5 = 32,075 \cdot \frac{f^2}{0,8}$$

$$f = 0,350 \text{ mm/volta}$$

$$a_p = 2,5 \text{ mm}$$

$$C_v = 256,12$$

Vida da Ferramenta

$$T = \left[\frac{60^y}{V_c} \cdot \frac{C_v}{(a_p \cdot f)^i} \cdot \left(\frac{a_p}{5f} \right)^g \right]^x$$

$$T = \left[\frac{60^{0,2}}{V_c} \cdot \frac{256,12}{(2,5 \cdot 0,35)^{0,28}} \cdot \left(\frac{2,5}{5 \cdot 0,35} \right)^{0,14} \right]^5$$

$$T = \left[\frac{634}{V_c} \right]^5$$

Tempo Total de Produção

$$t_t = \left(\frac{\pi \cdot d \cdot L_f}{1000 \cdot f \cdot V_c} \right) + t_1 + \left(\frac{\pi \cdot d \cdot L_f}{1000 \cdot f \cdot V_c} \right) \cdot \left(\frac{t_{ft}}{T} \right)$$

$$t_t = \left(\frac{\pi \cdot 75 \cdot 200}{1000 \cdot 0,35 \cdot V_c} \right) + \left(0,36 + 0,2 + \frac{35 + 0,5}{2000} \right) + \left(\frac{\pi \cdot 75 \cdot 200}{1000 \cdot 0,35 \cdot V_c} \right) \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{V_c}{634} \right)^5$$

$$t_t = 0,57725 + 134,64 \cdot V_c^{-1} + \left(\frac{67,32}{634^5} \right) \cdot V_c^4$$

Velocidade de Corte de Máxima Produção

$$V_{cmaxp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \cdot t_{ft}}}$$

$$V_{cmaxp} = \sqrt[5]{\frac{634^5}{(5-1) \cdot 0,5}}$$

$$V_{cmaxp} = 551,9 \text{ m/min}$$

Custo Total de Produção

$$C_1 = \left(\frac{t_1}{60} - \frac{1}{Z} \right) \cdot (S_h + S_m)$$

$$C_1 = \left(\frac{0,57725}{60} - \frac{1}{2000} \right) \cdot 60$$

$$C_1 = 0,54725$$

$$K_{p1} = \left(\frac{\pi \cdot d \cdot L_f}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot V_c} \right) \cdot C_2$$

$$K_{p1} = \left(\frac{\pi \cdot 75 \cdot 200}{60 \cdot 1000 \cdot 0,35 \cdot V_c} \right) \cdot 60$$

$$K_{p1} = \frac{134,64}{V_c}$$

$$K_{p2} = \left(\frac{\pi \cdot d \cdot L_f}{1000 \cdot f} \right) \cdot \left(\frac{C_3}{K} \right) \cdot V_c^{x-1}$$

$$K_{p2} = \left(\frac{\pi \cdot 75 \cdot 200}{1000 \cdot 0,35} \right) \cdot \left(\frac{5,5}{634^5} \right) \cdot V_c^4$$

$$K_{p2} = \left(\frac{740,52}{634^5} \right) \cdot V_c^4$$

$$K_p = C_1 + K_{p1} + K_{p2}$$

$$K_p = 0,54725 + \left(\frac{134,64}{V_c} \right) + \left[740,5182 \cdot \left(\frac{V_c^4}{634^5} \right) \right]$$

$$K_p = 0,54725 + 134,64 \cdot V_c^{-1} + \left(\frac{740,52}{634^5} \right) \cdot V_c^4$$

Velocidade Econômica de Corte

$$V_{co} = \sqrt[x]{\frac{C_2 \cdot K}{60 \cdot (x - 1) \cdot C_3}}$$

$$V_{co} = \sqrt[5]{\frac{60 \cdot 634^5}{60 \cdot (5 - 1) \cdot 5,5}}$$

$$V_{co} = 341,668 \text{ m/min}$$