

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

**Análise das forças de usinagem no torneamento de
diferentes materiais**

Gabriella de Oliveira Viana Machado

Prof. Orientador: Tatiane de Campos Chuvas

Rio de Janeiro

Junho de 2018

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

**Análise das forças de usinagem no torneamento de
diferentes materiais**

Gabriella de Oliveira Viana Machado

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

Prof. Orientador: Tatiane de Campos Chuvas

Rio de Janeiro

Junho de 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

AGRADECIMENTOS

À professora Tatiane de Campos Chuvas, por toda paciência, ajuda e atenção que me foi dispensada. Sem seu auxílio o projeto não poderia ser concluído.

Aos meus pais, Mauricio Machado e Emilia Machado, à minha irmã, Fernanda Machado, pelo amor, paciência, dedicação e incentivo, sendo fatores determinantes na minha formação e que auxiliaram diretamente na conclusão deste trabalho.

Aos monitores do LABUS, em especial à Natália Noce e Guilherme Dias, por todo apoio na realização dos testes do trabalho, além da amizade e companheirismo durante todo o processo.

Ao CEFET-RJ / Maracanã, por ter me acolhido e sido minha segunda casa durante muitos anos da graduação.

RESUMO

A indústria demanda por processos de fabricação que diminuam o tempo necessário para a produção com menores custos, sendo estes fatores que impulsionam os avanços tecnológicos obtidos nestes processos. Entretanto é preciso ter controle sobre o processo para garantir que as especificações de projeto sejam atingidas com menor tempo e custo. No âmbito dos processos de fabricação por usinagem, a determinação de forças de usinagem é um assunto de extrema importância para a indústria pois, em determinadas circunstâncias, as forças de usinagem envolvidas definem a viabilidade do processo de usinagem. Contudo, esse tema é bastante complexo, uma vez que muitos parâmetros podem influenciar, podendo causar benefícios ou prejuízos durante o processo. Nesse sentido, uma das principais operações de usinagem é o torneamento, processo responsável pela obtenção de diversas geometrias, desde simples até complexas, utilizando-se de diversos materiais que, ao serem colocados no torno, são rotacionados contra uma ferramenta e o material então é retirado da peça. O objetivo desse trabalho é analisar como os parâmetros de corte, avanço e profundidade de corte influenciam na magnitude das forças de corte e nos valores das pressões específicas de corte durante o tornamento de diferentes materiais metálicos. Para isso foram estudados os aços SAE 1020, SAE 4340 e duplex UNS S31803. Os resultados mostram que o aumento do avanço diminui os valores das pressões específicas de corte. Contudo, o nível de diminuição depende diretamente do tipo de material usinado.

Palavras-chaves: torneamento, força de usinagem, pressão específica de corte.

ABSTRACT

The industry demands manufacturing processes that reduce the time needed for production with lower costs, and these factors drive the technological advances obtained in these processes. However, you need to have control over the process to ensure that project specifications are met with less time and cost. In machining processes, the determination of machining forces is a matter of great importance for the industry because, in certain circumstances, the machining forces involved define the feasibility of the machining process. However, this theme is quite complex, since many parameters can influence and can cause benefits or losses during the process. In this sense, one of the main machining operations is turning, a process responsible for obtaining various geometries, from simple to complex, using a variety of materials that, when placed in the lathe, are rotated against a tool and the material is then removed from the part. The objective of this work is to analyze how the parameters of cutting, advancement and depth of cut influence the magnitude of the shear forces and the values of the specific cutting pressures during the turning of different metallic materials. For this, SAE 1020, SAE 4340 and duplex UNS S31803 steels were studied. The results show that the increase in feedrate decreases the values of specific cut-off pressures. However, the level of decrease depends directly on the type of machined material.

Keywords: turning, machining force, specific cutting pressure.

SUMÁRIO

Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Metodologia e Trabalho Realizado.....	2
Capítulo 2	4
Revisão Bibliográfica	4
2.1 Aço SAE 1020	4
2.2 Aço SAE 4340	5
2.3 Aço Inoxidável Duplex UNS S31803	8
2.4 Torneamento.....	10
2.4.1 Torneamento do aço SAE 1020.....	12
2.4.2 Torneamento do aço SAE 4340.....	14
2.4.3 Torneamento do aço inoxidável duplex UNS S31803	17
2.5 Forças e Potências de Usinagem	18
2.6 Acabamento Superficial	22
2.7 Temperatura na Região de Corte	24
Capítulo 3	26
Materiais e Métodos	26
3.1 Materiais	26
3.2 Preparações das amostras	27
3.3 Torneamentos das amostras.....	27
3.4 Obtenções da Força de Corte.....	29
3.5 Determinação da Pressão Específica de Corte	31
Capítulo 4	32

Resultados e discussão	32
4.1 Resultados teóricos	32
4.2 Resultados Experimentais	34
4.2.1 Aço SAE 1020	34
4.2.2 Aço SAE 4340	40
4.2.3 Aço Duplex UNS S31803	46
4.2.4 Comparação entre materiais	51
Capítulo 5	55
Conclusões.....	55
Capítulo 6	56
Sugestões para trabalhos futuros	56
Referências Bibliográficas.....	57
ANEXO I: Tabelas	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Micrografia do aço SAE 1020, com ampliação de 400x. (FREITAS <i>et. al</i> , 2016). ...	4
Figura 2: Microscopia aço SAE 4340, ataque nital 2%. Aumento 500x. (ANAZAWA, 2012).	7
Figura 3: Micrografia SAE 4340 com aumento de 500X (a) como fornecido; (b) após têmpera a 845°C seguida de revenido a 400°C. (BARROS, 2015).....	8
Figura 4: Micrografia de uma amostra de UNS31803 (SIEURIN, 2006).	9
Figura 5: Torneamento de aço SAE 1020 com $V_c = 50$ m/min, $f = 0,054$ mm/rev e $\gamma = 25^\circ$ (SANTOS, 2016).....	13
Figura 6: Comportamento das componentes da força de usinagem do aço AISI 4340 com 50 HRC de dureza para as ferramentas de PCBN e de metal duro (MD) (BORBA, 2016).....	14
Figura 7: Resultado experimental considerando $v = 150$ m/min e $f = 0,10$ mm/rev. F_c – força de corte e F_f – força de avanço (CERVELIN, 2009).	15
Figura 8: Resultado experimental considerando $v = 150$ m/min e $f = 0,15$ mm/rev. F_c – força de corte e F_f – força de avanço (CERVELIN, 2009).	15
Figura 9: Resultado simulado considerando $v = 150$ m/min e $f = 0,10$ mm/rev. F_c – força de corte e F_f – força de avanço (CERVELIN, 2009).	16
Figura 10: Resultado simulado considerando $v = 150$ m/min e $f = 0,15$ mm/rev. F_c – força de corte e F_f – força de avanço (CERVELIN, 2009).	16
Figura 11: Tensões residuais no aço UNS S31803. (MAGALHÃES, 2017).....	17
Figura 12: Representação das forças de corte na ferramenta de torneamento. (INGA PROJETOS, 2016).	18
Figura 13: Classificação de acabamento (MACHADO e SILVA, 2004).....	23
Figura 14: Representação esquemática das amostras.	26
Figura 15: Torno utilizado na preparação das amostras.	27
Figura 16: Representação do Inserto.	28
Figura 17: Dinamômetro usado no experimento e conexões.	30
Figura 18: Forças de usinagem para o aço SAE 1020 (a) $f = 0,394$ mm/rot e $a_p = 0,13$ mm e (b) $f = 0,394$ mm/rot e $a_p = 0,25$ mm.	35
Figura 19: Forças de usinagem no SAE 1020 nas Condições 1 ($f = 0,14$ mm/rot) e 2 ($f = 0,394$ mm/rot): (a) $a_p = 0,13$ mm (b) $a_p = 0,25$ mm.	37
Figura 20: Pressões específicas no SAE 1020: (a) K_{s1} com $a_p = 0,13$ mm e (b) K_{s2} com $a_p = 0,13$ mm.	38

Figura 21: Pressões específicas no SAE 1020: (a) Ks1 com $ap = 0,25\text{mm}$ e (b) Ks2 com $ap = 0,25\text{ mm}$.	39
Figura 22: Forças de usinagem para o aço SAE 4340 (a) $f = 0,394\text{ mm/rot}$ e $ap = 0,13\text{mm}$ e (b) $f = 0,394\text{ mm/rot}$ e $ap = 0,25\text{mm}$.	41
Figura 23: Forças de usinagem no SAE 4340 nas Condições 1 ($f = 0,14\text{ mm/rot}$) e 2 ($f = 0,394\text{ mm/rot}$): (a) $ap = 0,13\text{ mm}$ (b) $ap = 0,25\text{ mm}$.	43
Figura 24: Pressões específicas no SAE 4340: (a) Ks1 com $ap = 0,13\text{ mm}$ e (b) Ks2 com $ap = 0,13\text{ mm}$.	44
Figura 25: Pressões específicas no SAE 4340: (a) Ks1 com $ap = 0,25\text{mm}$ e (b) Ks2 com $ap = 0,25\text{ mm}$.	45
Figura 26: Forças de usinagem para o aço UNS S31803 (a) $f = 0,394\text{ mm/rot}$ e $ap = 0,13\text{mm}$ e (b) $f = 0,394\text{ mm/rot}$ e $ap = 0,25\text{mm}$.	47
Figura 27: Forças de usinagem no UNS S31803 nas Condições 1 ($f = 0,14\text{ mm/rot}$) e 2 ($f = 0,394\text{ mm/rot}$): (a) $ap = 0,13\text{ mm}$ (b) $ap = 0,25\text{ mm}$.	49
Figura 28: Pressões específicas no UNS S31803: (a) Ks1 com $ap = 0,13\text{ mm}$ e (b) Ks2 com $ap = 0,13\text{ mm}$.	50
Figura 29: Pressões específicas no UNS S31803: (a) Ks1 com $ap = 0,25\text{mm}$ e (b) Ks2 com $ap = 0,25\text{ mm}$.	51
Figura 30: Comparação da Força de Usinagem Média experimental dos materiais analisados, considerando $ap = 0,13\text{ mm}$.	52
Figura 31: Comparação da Força de Usinagem Média experimental dos materiais analisados, considerando $ap = 0,25\text{ mm}$.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do aço SAE 1020, de acordo com o % em peso (ABNT NBR NM 87:2000, 2000).	5
Tabela 2: Propriedas mecânicas do aço SAE 1020 (ABNT NBR NM 87:2000, 2000, modificado).....	5
Tabela 3: Composição química do aço SAE 4340, de acordo com o % em peso (ABNT NBR NM 87:2000, 2000)	6
Tabela 4: Propriedas mecânicas do aço SAE 4340 recozido (ANAZAWA, 2012, modificado).	7
Tabela 5: Propriedades mecânicas típicas de um aço SAE 4340 temperado sob diferentes temperaturas de revenido (BARROS, 2015, modificado).....	7
Tabela 6: Composição Química aço UNS S31803, de acordo com o % em peso. (ASTM A240 / A240M - 08, 2008).	9
Tabela 7: Propriedas mecânicas do aço UNS S31803 (SANDVIK, 2012, modificado).....	10
Tabela 8: Combinações realizadas no torneamento da amostra de aço SAE 1020 (SANTOS, 2016, modificado).....	13
Tabela 9: Fatores de correção para força de corte (Ferraresi [1977], modificado).	20
Tabela 10: Parâmetros de Operação.	28
Tabela 11: Dimensões do inserto.....	28
Tabela 12: Condições do fabricante.	29
Tabela 13: Pressão específica de corte para os materiais analisados (INGA PROJETOS, 2016, modificado).....	33
Tabela 14: Resultados teóricos da força de corte (Fc).....	33
Tabela 15: Força de usinagem experimental SAE 1020.	36
Tabela 16: Pressão Específica de Corte no aço SAE 1020.....	40
Tabela 17: Força de usinagem experimental SAE 4340.	42
Tabela 18: Pressão Específica de Corte no aço SAE 4340.....	46
Tabela 19: Força de usinagem experimental UNS S31803.....	48
Tabela 20: Pressão Específica de Corte no aço duplex UNS S31803.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - área [mm²]

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ap - profundidade de corte [mm]

b - largura de corte [mm]

CNC - Comando Numérico Computadorizado

d - diâmetro [mm]

f - avanço por rotação [mm/rot]

F_c - Força de Corte [N]

F_x - componente axial [N]

F_y - componente radial [N]

F_z - componente da força tangencial [N]

h - espessura do cavaco [mm]

K_s - Pressão Específica de Corte [N/mm²]

L_c - comprimento de corte [mm]

n - velocidade rotacional [rpm]

Pa - força de avanço [kgf]

PCBN - Nitreto de Boro Cúbico Policristalino

P_v - Força de corte [kgf]

SAE - Sociedade dos Engenheiros Automobilísticos

UNS - *Unified Numbering System* (Sistema Unificado de Numeração)

V_c - velocidade de corte [m/min]

V_f - velocidade de avanço [mm/min]

Wc - Carboneto de Tungstênio

Capítulo 1

Introdução

O estudo do comportamento dos materiais quando submetidos aos processos de usinagem vem ganhando destaque nos últimos anos, impulsionado pelos crescentes avanços tecnológicos e pelas demandas de peças cada vez mais complexas, com o objetivo de otimizar a produção e evitar perdas. O estudo do desempenho em usinagem é denominado usinabilidade, que é a facilidade com a qual um determinado material pode ser cortado ou torneado, sem que as suas propriedades mecânicas sejam afetadas (MACHADO *et al.*, 2009).

Entretanto, existe uma grande dificuldade de definir de forma quantitativa a usinabilidade, uma vez que ela não pode ser descrita em função de unidades fundamentais e, portanto, normalmente é obtida pela comparação entre outros materiais. Muitos métodos têm sido usados para avaliar a usinabilidade de vários materiais, sendo baseados em resultados de testes de vida da ferramenta em função da velocidade de corte, ou em medições de forças da ferramenta ou quantidades relacionadas a tais testes (PIMENTEL *et al.*, 2004; MACHADO *et al.*, 2009).

Desta forma, muitas pesquisas, voltadas tanto para as condições de usinagem, bem como da qualidade da peça gerada, vêm sendo elaborados nos últimos anos. Nesse sentido, o importante é tentar verificar de que forma os parâmetros usados influenciam no resultado, visando a otimização das forças, velocidades e avanços utilizados, com o intuito de aumentar a produtividade do processo e obter redução de custo.

1.1 Motivação

Com a grande demanda industrial recente, o torneamento é um dos processos mais explorados na indústria, pois permite uma produção de itens complexos e em alto volume. Assim, torna-se atrativa a realização de estudos para compreender o mesmo e como otimizá-lo. Um dos pontos mais importantes no torneamento é a força de usinagem e as suas influências, para determinar assim quais os melhores parâmetros de utilização do sistema

máquina ferramenta, para evitar desgastes e possíveis colapsos do ferramental. (RODRIGUES, 2009).

1.2 Justificativa

A importância do estudo acerca das forças atuantes sobre a ferramenta de corte é fundamentada para garantir que todo o processo de usinagem seja realizado de forma a obter os melhores resultados na performance industrial, além de fornecer informações que auxiliem no dimensionamento de máquinas ferramentas e na definição de outros parâmetros, como potências de corte (PEREIRA *et al.*, 2006). Além disso, diversas análises científicas da usinagem dos metais também requerem conhecimentos das forças, estimulando assim o desenvolvimento de dinamômetros capazes de medir forças com considerável precisão (RODRIGUES, 2009).

1.3 Objetivos

O estudo da usinabilidade com foco nos parâmetros de corte vem se destacando no cenário industrial, para otimização dos processos de torneamento. O presente trabalho tem como objetivo estudar os componentes da força de usinagem no torneamento dos aços SAE 1020, SAE 4340 e aço inoxidável duplex UNS S31803, gerando uma comparação entre os três materiais, quando os mesmos são submetidos a diferentes avanços e profundidades de corte.

1.4 Metodologia e Trabalho Realizado

O presente trabalho é baseado em estudos experimentais de forças de usinagem em diferentes classes de materiais, comparando os valores obtidos com cálculos analíticos. Para a aquisição das forças de usinagem foi utilizado um dinamômetro com sensor piezoelétrico, que garante maior precisão na obtenção dos dados de força dinâmica. Como processo de fabricação foi escolhido o torneamento. Os materiais estudados foram determinados em função do grau de usinabilidade dos mesmos, sendo o aço SAE 1020 considerando o de melhor usinabilidade entre os três materiais, o SAE 4340 com usinabilidade intermediária e o

aço UNS S31803 de baixa usinabilidade. Assim, é possível estudar a influência do tipo de material (classe) nos valores de força de usinagem (e pressão específica de corte) para as mesmas condições de usinagem, ou seja, mesmos parâmetros de corte.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Aço SAE 1020

O aço carbono SAE 1020 recebe esta designação por possuir 0,2% de carbono em sua composição, além de apresentar outros elementos de liga residuais, porém em teores muito pequenos. É um dos aços mais simples de serem produzidos e um dos mais usados nas indústrias em geral, por apresentar baixa temperabilidade, excelente forjabilidade e boas propriedades mecânicas e resistência à tenacidade. Entretanto, este material não é indicado para aplicações que requeiram resistência à corrosão e à oxidação (SANTOS, 2016).

Este tipo de aço apresenta a vantagem de poder ser aplicado em tratamentos térmicos de cementação, para melhora da dureza superficial, a um custo relativamente baixo, uma vez que o material possui um valor atrativo. De acordo com Freitas *et. al* (2016), a microestrutura é caracterizada pela presença de perlita (fase escura) e ferrita (fase clara), conforme apresenta a Figura 1.

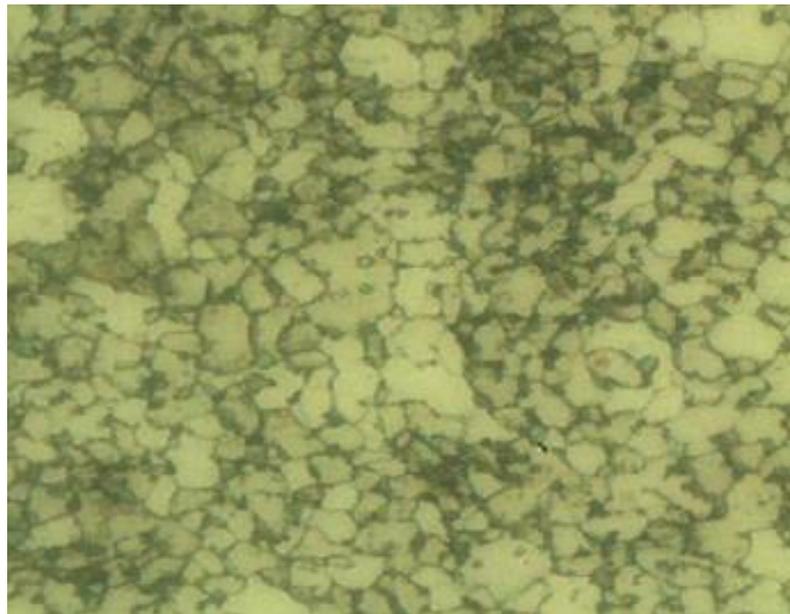


Figura 1: Micrografia do aço SAE 1020, com ampliação de 400x. (FREITAS *et. al*, 2016).

A composição química e as propriedades típicas do aço SAE 1020 seguem de acordo com as Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Composição química do aço SAE 1020, de acordo com o % em peso (ABNT NBR NM 87:2000, 2000).

Aço	C	Mn	P	S
SAE 1020	0,20 – 0,22	0,3 – 0,6	máx. 0,04	máx. 0,05

Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço SAE 1020 (ABNT NBR NM 87:2000, 2000, modificado).

Limite de Escoamento (MPa)	290
Resistência à Tração (MPa)	380
Alongamento %	15

As propriedades mecânicas do material e o seu respectivo desempenho em uma determinada aplicação dependem diretamente da composição química do mesmo, da estrutura cristalina, histórico de processamento e fabricação e dos tratamentos térmicos aos quais o material pode ter sido submetido.

2.2 Aço SAE 4340

Com o advento da tecnologia, verificou-se a necessidade do desenvolvimento de novos aços, com composições químicas diferenciadas, utilizando-se de elementos como Cr, Mo e V, em aplicações onde fadiga e fluência são as principais causas de falhas (Danielsen & Hald, 2009). A adição de molibdênio nos aços leva a um aumento da resistência à fluência dos mesmos, já que este é notadamente conhecido por ser um elemento endurecedor por solução sólida. Entretanto, o aumento do teor deste componente na composição química leva à perda de ductilidade e, além disso, existe a decomposição dos carbonetos de ferro para temperaturas superiores a 500°C, o que limita consideravelmente a aplicação destes aços. Desta forma, uma alternativa para a melhora da resistência ao calor destes materiais foi a adição de cromo, gerando assim carbonetos mais estáveis, aumento da resistência à corrosão e oxidação. (Danielsen & Hald, 2009).

A aplicabilidade dos aços CrMo é muito ampla, sendo utilizados por indústrias químicas, petroquímicas e aeroespaciais, devido à sua resistência, ductilidade e resistência à corrosão. Esse tipo de aço também apresenta excelente rigidez e alongamento.

Neste grupo, os aços mais comuns são os da classe 4340. Este tipo de aço compreende cerca de 0,40% de carbono, além de outros elementos de liga que conferem o aumento da resistência mecânica, resistência à oxidação e corrosão, como o cromo, molibdênio e níquel. De acordo com a norma ABNT NBR NM 87:2000, a composição típica para esta classe de material é definida na Tabela 3.

Tabela 3: Composição química do aço SAE 4340, de acordo com o % em peso (ABNT NBR NM 87:2000, 2000)

Aço	C	Mn	P	Si	S	Cr	Mo
SAE 4340	0,39	0,64	0,017	0,26	0,001	0,80	0,22

Na Figura 2 observa-se a micrografia de um aço 4340 quando submetido à condição de recozimento, sob ataque de nital 2%. As regiões mais escuras (cinza e preto) da imagem são formadas por bainita, martensita e carbonetos, enquanto que as regiões mais claras são constituídas por ferrita e austenita retida (ANAZAWA, 2012).

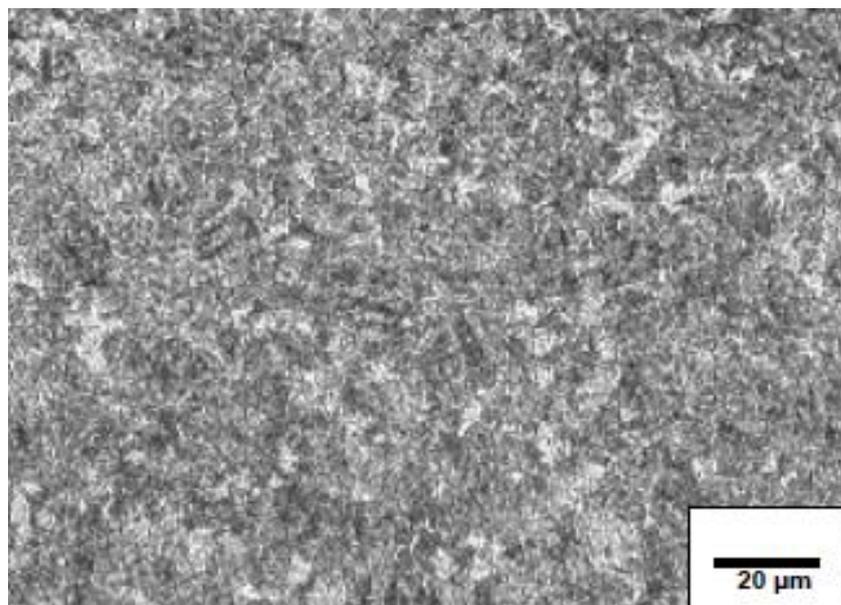


Figura 2: Microscopia aço SAE 4340, ataque nital 2%. Aumento 500x. (ANAZAWA, 2012).

Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço SAE 4340 recozido (ANAZAWA, 2012, modificado).

Limite de Escoamento (MPa)	899
Resistência à Tração (MPa)	1073
Alongamento %	14,2

O aço SAE 4340 pode, no entanto, pode apresentar baixa usinabilidade, dependendo do tipo de tratamento térmico ao qual é submetido. Um estudo desenvolvido por Barros (2015) sugere a identificação da microestrutura do SAE 4340 temperado a 845°C com resfriamento à óleo, que posteriormente foi submetido ao tratamento térmico de revenimento, tendo suas propriedades medidas em diferentes temperaturas durante o processo, conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Propriedades mecânicas típicas de um aço SAE 4340 temperado sob diferentes temperaturas de revenido (BARROS, 2015, modificado).

Temperatura revenimento (°C)	Resistência à tração (Mpa)	Tensão de escoamento (Mpa)	Alongamento em 50 mm (%)	Redução de área (%)	Dureza HB	Dureza HRC
205	1980	1860	11	39	520	53
315	1760	1620	12	44	490	50
425	1500	1365	14	48	440	46
540	1240	1160	17	53	360	39
650	1020	860	20	60	290	31
705	860	740	23	63	250	24

Posteriormente, foram analisadas as transformações na microestrutura em função da temperatura seguida do revenido a 400°C, por meio de um ataque com nital a 2%, entre 10 e 12 segundos, gerando assim as Figuras 3a e 3b.

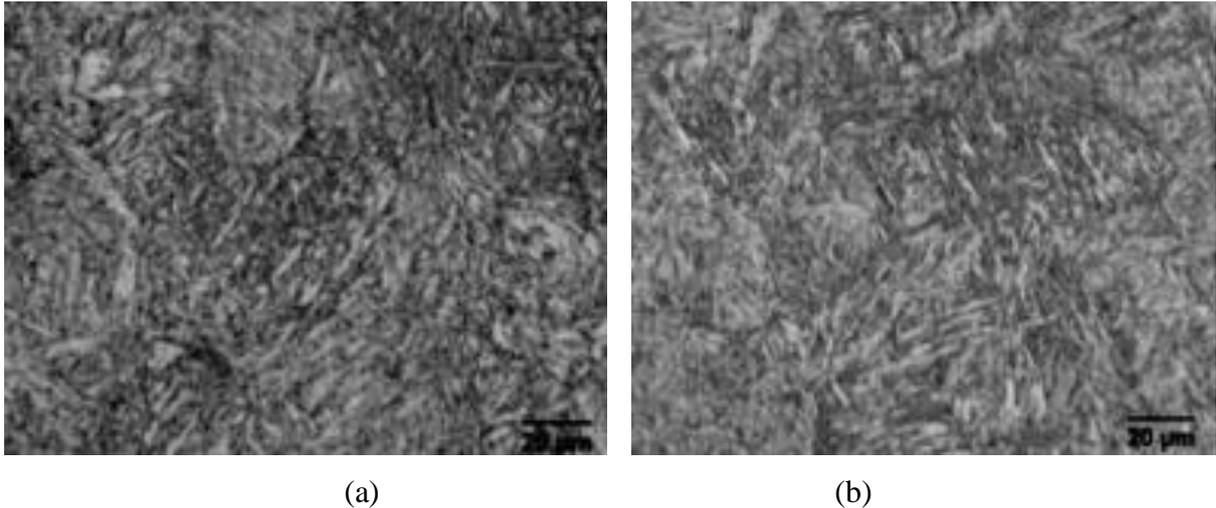


Figura 3: Micrografia SAE 4340 com aumento de 500X (a) como fornecido; (b) após têmpera a 845°C seguida de revenido a 400°C. (BARROS, 2015).

Desta forma, verifica-se que ao realizar o tratamento térmico, a microestrutura apresenta áreas escuras que se configuram como uma mistura de fases mais resistentes e enriquecidas de carbono (perlita, bainita e martensita), enquanto que as áreas claras constituem a ferrita e a austenita. Ao sofrerem o processo de têmpera, convertem-se em uma estrutura onde existe a predominância da martensita, com um acréscimo de dureza no material (BARROS, 2015).

2.3 Aço Inoxidável Duplex UNS S31803

Os aços inoxidáveis duplex são caracterizados por possuírem uma microestrutura formada por duas fases (ferrita e austenita), com frações volumétricas aproximadamente similares. Essa similaridade é dada pela presença de estabilizadores da austenita (carbono, níquel, nitrogênio, cobre e manganês) e estabilizadores de ferrita (cromo, molibdênio, tungstênio, nióbio, ferro e silício), sendo a austenita (regiões brancas) encontrada sob forma de ripas na matriz ferrítica (regiões escuras), conforme mostrado na Figura 4. (SIEURIN, 2006).

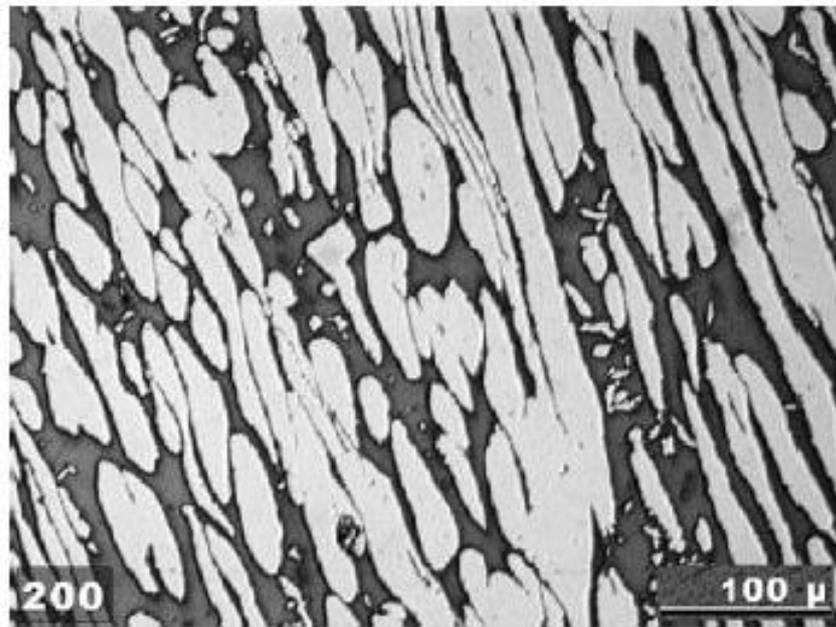


Figura 4: Micrografia de uma amostra de UNS31803 (SIEURIN, 2006).

Esse tipo de aço tem um comportamento superplástico, causado por sua estrutura refinada, suportando assim as grandes e uniformes deformações às quais podem ser sujeitos sem a formação de estrição em temperaturas próximas à metade da temperatura de fusão dos mesmos. Atualmente são muito utilizados nas indústrias de prospecção de petróleo, química, petroquímica, de energia elétrica, papel e celulose (MAGNABOSCO, 2009).

Dentre os aços inoxidáveis duplex, o UNS S31803 é um dos mais conhecidos. Segundo a norma ASTM A240, a composição química típica desse material é dada conforme apresenta a Tabela 6.

Tabela 6: Composição Química aço UNS S31803, de acordo com o % em peso.
(ASTM A240 / A240M - 08, 2008).

Aço	C	N	Ni	Mn	Cr	Mo
UNS S31803	0,03	0,08 – 0,2	4,5 – 6,5	2	21 – 23	2,5 – 3,5

Estes materiais também apresentam boas propriedades mecânicas e, segundo Martins (2007), estas são resultado da união do que se tem de melhor entre as fases que compõem

estes materiais, sendo a austenita responsável por melhorar as características mecânicas, por ser mais dura, e a ferrita, que contribui com a tenacidade. A Tabela 7 correlaciona alguns valores das principais propriedades destes materiais.

Tabela 7: Propriedades mecânicas do aço UNS S31803 (SANDVIK, 2012, modificado)

Limite de Escoamento (MPa)	485
Resistência à Tração (MPa)	680 – 880
Alongamento %	25

Nota-se que diante das características apresentadas, os aços inoxidáveis duplex são materiais que podem gerar uma elevada redução de custos com matérias-primas e mão de obra nas construções em que são empregados. Porém deve se atentar para as suas aplicações, pois são estruturas bem complexas e existe a possibilidade de formação de fases indesejáveis durante os processos pelos quais são submetidos. Um exemplo é a fase sigma (HUANG, 2005), a qual se forma principalmente devido as exposições em temperaturas de 700°C a 900°C, podendo acarretar a diminuição da sua resistência mecânica, fragilização e diminuição da resistência à corrosão. Além disso, existe a tendência da formação de nitreto de cromo, que pode reduzir a resistência mecânica do material. Uma vez atentando à estas limitações, com certeza os aços inoxidáveis dúplex podem ser de extrema valia nas mais variadas aplicações industriais, representando um material de alta qualidade e confiabilidade. (HUANG, 2005).

2.4 Torneamento

O torneamento é uma operação de usinagem que permite trabalhar peças cilíndricas movida por um movimento uniforme de rotação em torno de um eixo fixo, e dessa forma ocorre a retirada progressiva do cavaco da peça a ser trabalhada. O cavaco é cortado por uma ferramenta de um só gume cortante, que deve ter uma dureza superior à do material a ser cortado. (BARBOSA, 2016).

No torneamento, a ferramenta penetra na peça, cujo movimento rotativo uniforme ao redor do eixo permite o corte contínuo e regular do material. A força necessária para retirar o

cavaco é feita sobre a peça, enquanto a ferramenta, firmemente presa ao porta-ferramenta contrabalança a reação desta força. Para executar o torneamento, são necessários três movimentos relativos entre a peça e a ferramenta. São eles:

1° - **Movimento de corte:** movimento principal que permite cortar o material; movimento rotativo realizado pela peça.

2° - **Movimento de avanço:** movimento que desloca a ferramenta ao longo da superfície da peça.

3° - **Movimento de penetração:** movimento que determina profundidade de corte ao empurrar a ferramenta em direção ao interior da peça e assim regula a profundidade e espessura do cavaco.

Variando-se os movimentos, a posição e o formato da ferramenta, é possível realizar uma grande variedade de operações, como torneamentos cilíndricos (internos e externos), cônicos (internos e externos), roscar, perfilar, furar, alagar e recartilhar superfícies, configurando-se como uma máquina muito versátil. (BARBOSA, 2016).

Atualmente, muitos processos industriais são feitos por torneamento, pois permitem a produção em grande escala de peças específicas e complexas. Além disso, como sugerem alguns estudos (COPPINI, N.L, 1995), muitos processos anteriormente realizados por retificação, sobretudo os que envolviam a usinagem de metais duros, estão sendo feitos por torneamento com uso de pastilhas de nitreto cúbico de boro (CBN). Essa iniciativa baseia-se tanto em aspectos ambientais, já que o torneamento de peças duras é mais vantajoso que a retificação pelo fato da não utilização de óleo na maioria dos casos, como na redução dos custos e aumento da produtividade durante o processo de fabricação, pois o torneamento apresenta maior retirada de volume de cavaco por unidade de tempo do que a retificação.

Segundo Ferraresi (1977), no torneamento, a velocidade total do processo se divide em algumas variantes, a saber:

- **Velocidade de corte (V_c [m/min])**, definida como sendo a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte, conforme apresenta a Equação 2.1.

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

Onde:

d = diâmetro (mm)

n = rotações (rpm)

- **Avanço (A [mm/rot])**, definido como o deslocamento que a ferramenta faz em uma volta da peça.
- **Velocidade de avanço (Va [mm/min])**, velocidade instantânea da ferramenta, segundo a direção e sentido de avanço (Equação 2.2).

$$Va = a \cdot n \quad (2.2)$$

Onde:

a = avanço (mm/rot)

n = rotações (rpm)

- **Profundidade de corte (p [mm])**, profundidade de penetração da aresta principal de corte, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho (Equação 2.3).

$$p = \frac{D-d}{2} \quad (2.3)$$

Onde:

D = diâmetro inicial (antes do passe) em mm.

d = diâmetro final (após o passe) em mm.

2.4.1 Torneamento do aço SAE 1020

O estudo do torneamento do aço SAE 1020 é bem vasto, por ser um material muito versátil e com diversas aplicações. SANTOS (2016) analisou os efeitos do torneamento desse material utilizando uma ferramenta de aço rápido. Foram verificados os efeitos da velocidade de corte, avanço e o ângulo de saída da ferramenta de corte sobre os componentes das forças de usinagem, pressão específica de corte, grau de recalque do cavaco e ângulo de cisalhamento do cavaco. Foram definidas 8 condições de operação, considerando diferentes ferramentas, avanços e velocidades de corte para o torneamento ortogonal, mostradas na Tabela 8.

Tabela 8: Combinações realizadas no torneamento da amostra de aço SAE 1020 (SANTOS, 2016, modificado).

Combinação	Ferramenta	f (mm/rev)	V_c (m/min)
1	1	0,031	50
2	1	0,031	100
3	2	0,031	50
4	2	0,031	100
5	1	0,054	50
6	1	0,054	100
7	2	0,054	50
8	2	0,054	100

Foram realizados três ensaios para cada conjunto de parâmetros de corte propostos acima. A Figura 5 demonstra o comportamento da média das forças de corte e avanço durante o torneamento com a combinação 7 da Tabela 8.

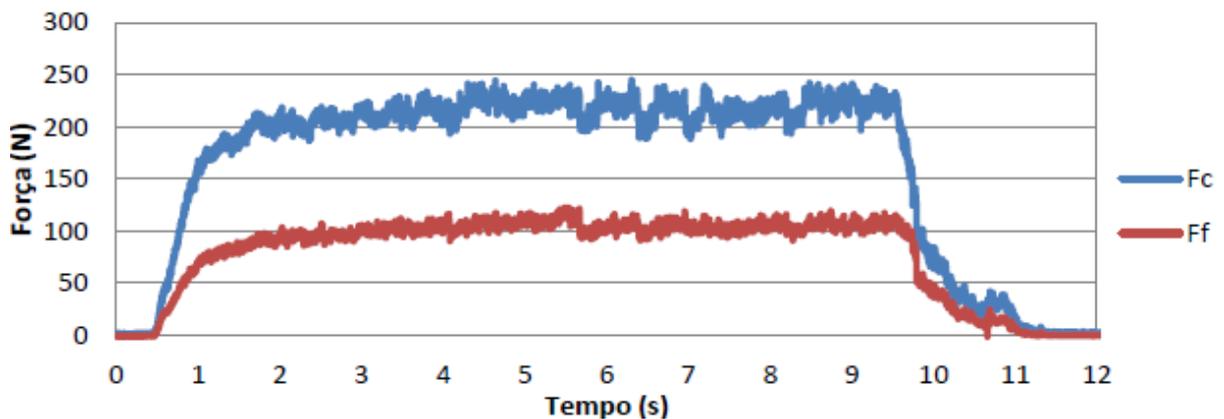


Figura 5: Torneamento de aço SAE 1020 com $V_c = 50$ m/min, $f = 0,054$ mm/rev e $\gamma = 25^\circ$ (SANTOS, 2016).

Após análises experimentais foi observado que o parâmetro que mais afeta as forças de usinagem e a pressão específica de corte é o avanço, uma vez que, com seu aumento, ocorre um aumento nas forças de usinagem.

Além disso, notou-se a formação de a aresta postiça de corte, piorando o acabamento da peça e acelerando o desgaste da ferramenta, uma vez que quando ela se solta fica alojada

entre a peça e a superfície de folga. Desta forma, conclui-se que para evitar a formação das arestas, o mais indicado é o uso de velocidades de cortes mais elevadas.

2.4.2 Torneamento do aço SAE 4340

Na literatura podem ser encontrados muitos trabalhos que visam o estudo das influências das forças de corte e da sua influência na integridade superficial da peça, em operações de acabamento. Borba (2016) elaborou um estudo onde analisava a força de usinagem e da rugosidade no torneamento de três aços endurecidos (AISI 4340, AISI 52100 e AISI D2) com ferramentas de PCBN e de metal-duro. Após os testes elaborados, verificou-se que a relação entre o aumento das componentes da força de usinagem e o incremento da dureza dos aços para as duas ferramentas usadas eram diretamente proporcionais, pois a microestrutura dos aços analisados impacta diretamente nas forças analisadas. Assim, os valores de intensidade de força de usinagem do aço AISI 4340 foram menores do que dos outros aços, para ambas as ferramentas utilizadas, pela ausência de carbonetos na sua microestrutura. Os resultados estão evidenciados na Figura 6.

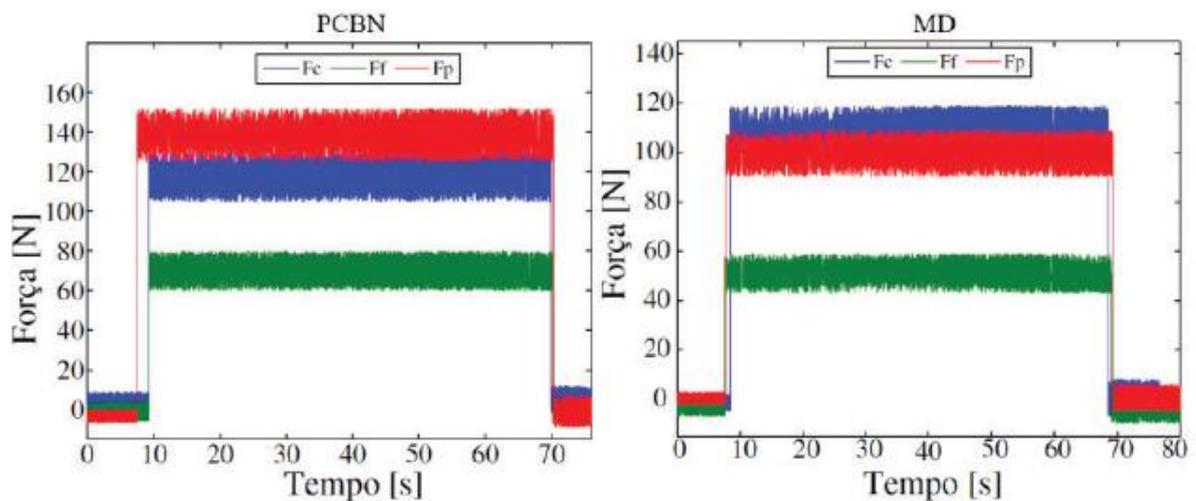


Figura 6: Comportamento das componentes da força de usinagem do aço AISI 4340 com 50 HRC de dureza para as ferramentas de PCBN e de metal duro (MD) (BORBA, 2016).

Em relação à geometria da ferramenta, a que era composta de PCBN apresentou forças significativamente mais elevadas do que a ferramenta de metal-duro de grãos ultrafinos para os três aços usados, em função da diferença entre os ângulos de saída das duas ferramentas.

Outro estudo relevante neste tema foi desenvolvido por Cervelin (2009), que realizou simulações do processo de torneamento do aço AISI 4340 por meio de elementos finitos, com uso de inserto de metal duro, por meio do programa Abaqus. As variáveis do processo foram a velocidade de corte e avanço, e foram definidas algumas condições de operação. Posteriormente, foram medidas as forças de corte e avanço durante o torneamento, gerando os resultados contidos nas Figuras 7 e 8.

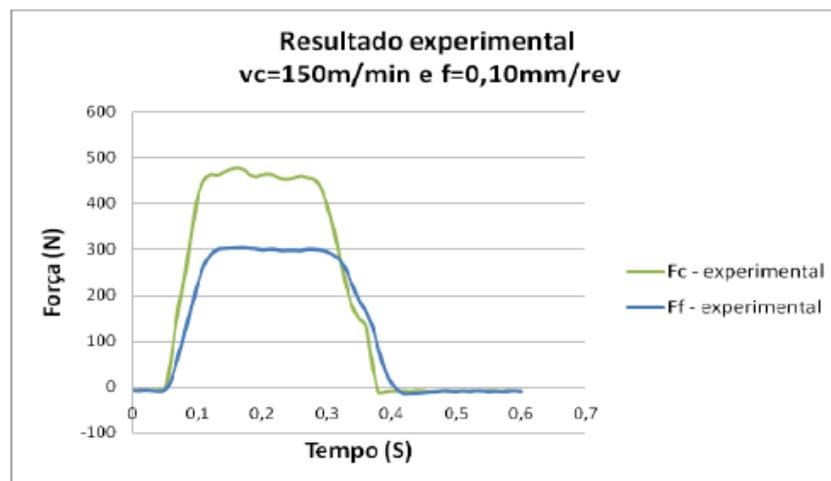


Figura 7: Resultado experimental considerando $v = 150$ m/min e $f = 0,10$ mm/rev. Fc – força de corte e Ff – força de avanço (CERVELIN, 2009).

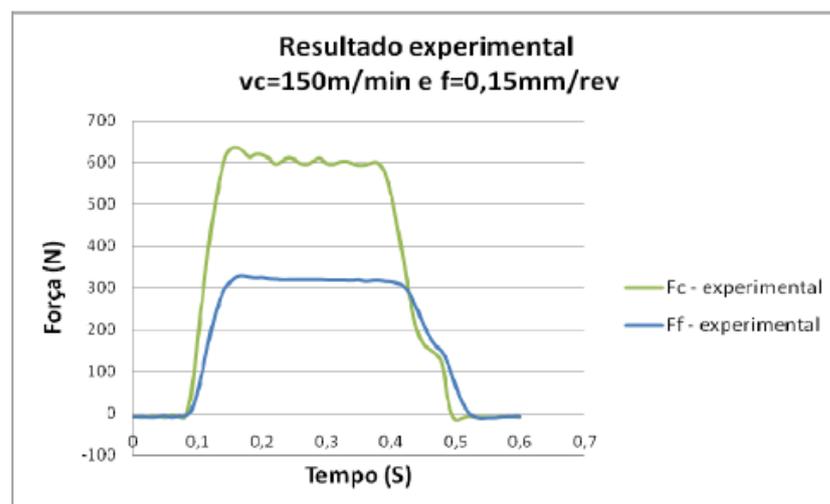


Figura 8: Resultado experimental considerando $v = 150$ m/min e $f = 0,15$ mm/rev. Fc – força de corte e Ff – força de avanço (CERVELIN, 2009).

Os valores gerados experimentalmente consideraram as forças nos regimes permanentes, ou seja, nos trechos onde a oscilação for menor e a força esteja mais

estabilizada. Esse período normalmente compreende-se entre a entrada da ferramenta na peça até a sua saída. Posteriormente, elas foram comparadas com estudos de simulação, como nas Figuras 9 e 10.

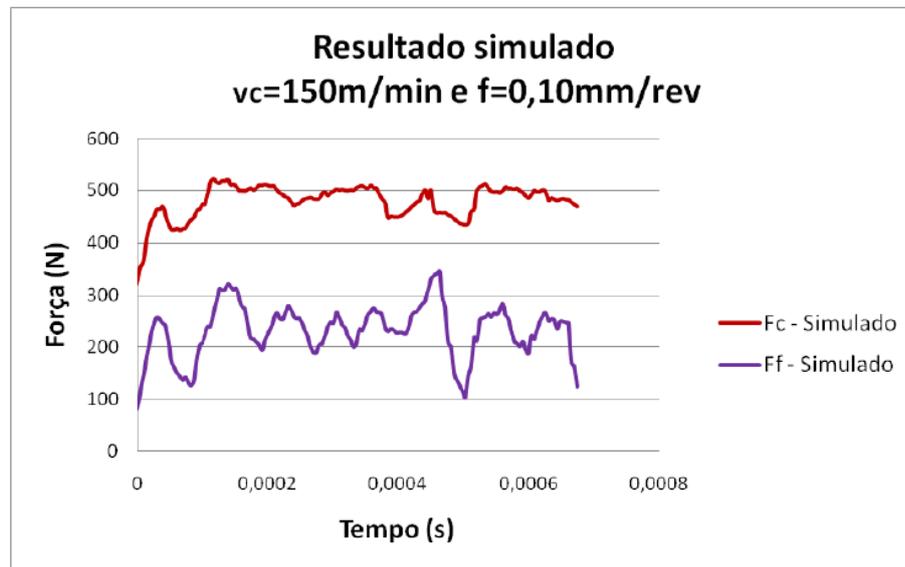


Figura 9: Resultado simulado considerando $v = 150$ m/min e $f = 0,10$ mm/rev. Fc – força de corte e Ff – força de avanço (CERVELIN, 2009).

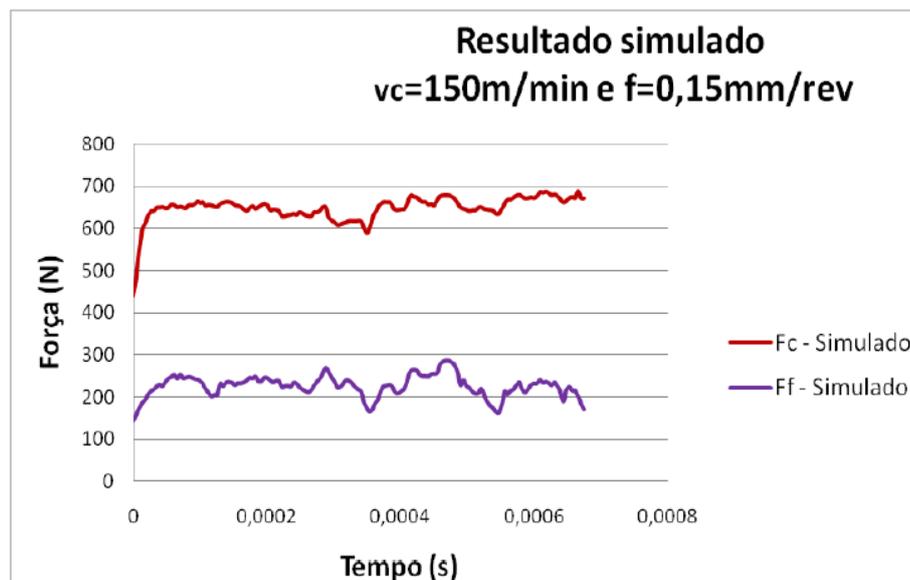


Figura 10: Resultado simulado considerando $v = 150$ m/min e $f = 0,15$ mm/rev. Fc – força de corte e Ff – força de avanço (CERVELIN, 2009).

2.4.3 Torneamento do aço inoxidável duplex UNS S31803

O aço inoxidável duplex UNS S31803 pertence à na família dos duplex 2205 e está entre os aços de maior volume no mercado, por sua vasta gama de utilizações. Com o crescente uso do mesmo, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos em relação à usinabilidade deste material, tanto em relação às forças de corte, por tratar-se de um material duro, como na integridade superficial, principalmente das tensões residuais geradas nas peças usinadas, visando assim estabelecer um limite seguro na vida do componente.

Magalhães (2017) torneou amostras de aço UNS S31803 com o objetivo de analisar as tensões residuais geradas na operação, ao serem empregadas diferentes velocidades de corte no material. A análise foi feita por difração de raios-X e ficou evidenciado que todas as tensões residuais, independente das condições de corte, foram trativas, o que seria prejudicial para o componente usando pois sabe-se que tensões residuais trativas são prejudiciais para a vida em serviço de peças e componentes por se somarem as tensões de serviço, facilitando a nucleação e propagação de trincas. A Figura 11 explicita os resultados encontrados para as tensões residuais médias no torneamento do material.

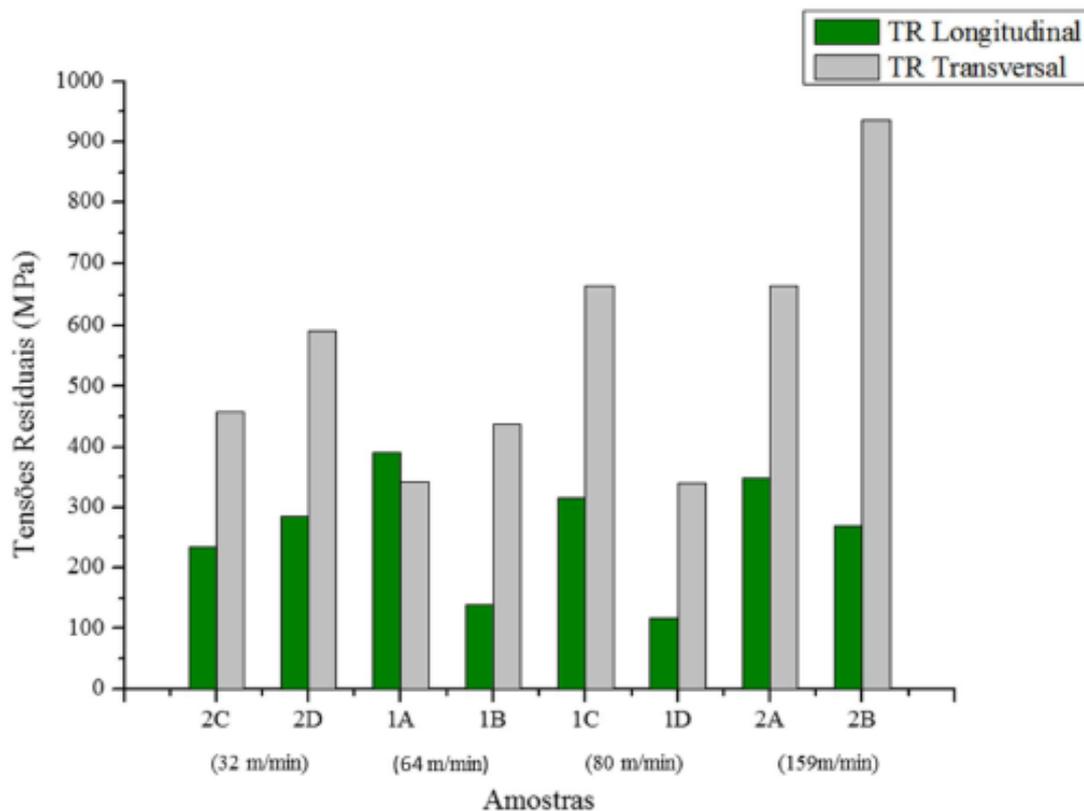


Figura 11: Tensões residuais no aço UNS S31803. (MAGALHÃES, 2017).

Além disso, evidencia-se pela Figura 11 que as tensões na direção transversal apresentaram maiores valores que os da direção longitudinal em geral, possivelmente devido ao valor do avanço utilizado. Os autores concluíram também que a rugosidade diminuiu com o aumento da velocidade de corte.

2.5 Forças e Potências de Usinagem

As forças de usinagem são consideradas como uma ação da peça sobre a ferramenta que está sendo usinada, definida como sendo a força total resultante que atua sobre a cunha cortante da ferramenta. A componente de força de usinagem num plano ou direção qualquer pode ser obtida pela projeção da força de usinagem F mediante decomposição ortogonal, conforme apresenta a Figura 12. (INGA PROJETOS, 2016).

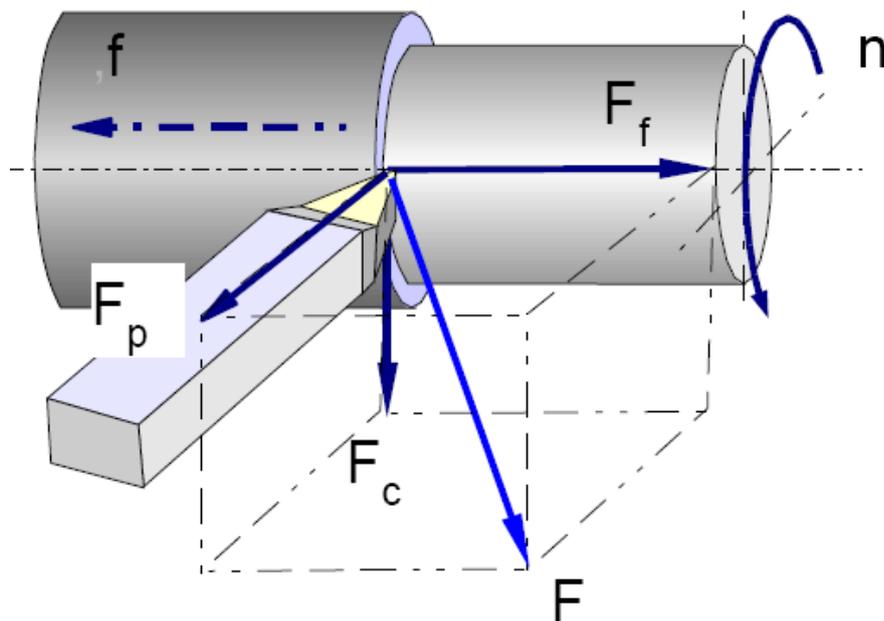


Figura 12: Representação das forças de corte na ferramenta de torneamento. (INGA PROJETOS, 2016).

Onde:

- F_p – força passiva – projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular ao plano de trabalho.

- F_c – força de corte – projeção da força de usinagem na direção de corte.
- F_f – força de avanço – projeção da força de usinagem na direção de avanço.
- F – força total de usinagem – força total (resultante) que atua sobre uma cunha cortante durante a usinagem.

Assim, verifica-se que a força de usinagem configura-se como principal fator no cálculo da potência necessária a usinagem e depende do material a ser usinado, área da seção de corte, espessura de corte, geometria da ferramenta e ângulo de posição, estado de afiação da ferramenta, material da ferramenta, lubrificação e velocidade de corte definida para a operação. (BARBOSA, 2016).

A determinação da força de corte é calculada através da Equação de Kienzle, que permite relacionar as constantes do processo de usinagem com o material a ser usinado.

$$F_c = A \cdot K_s \quad (2.4)$$

$$F_c = a_p \cdot f \cdot K_s \quad (2.5)$$

$$F_c = b \cdot h \cdot K_s \quad (2.6)$$

Onde:

A – área da seção de corte (mm²)

b – comprimento de corte (mm)

h – espessura de corte (mm)

a_p – profundidade de corte (mm)

f – avanço (mm/rot)

Além das forças, é importante notar, para torneamento, as potências de corte que acabam sendo geradas e envolvidas no processo. Assim, segundo Ferraresi (1977), temos as seguintes definições:

A) **Potência de corte** – representada por N_c , é o produto da força de corte pela velocidade de corte.

$$N_c = \frac{P_c \cdot v}{60 \cdot 75} \text{ (CV)} \quad (2.7)$$

Onde:

v – velocidade de corte (m/min)

P_c – força de corte (kfg)

B) **Potência de avanço** – representada por Na , é definida como o produto entre a força de avanço e a velocidade de avanço.

$$Na = \frac{Pa \cdot va}{1000 \cdot 60 \cdot 75} (CV) \quad (2.8)$$

Onde:

va – velocidade de avanço (mm/min)

Pa – força de avanço (kfg)

A pressão específica de corte (K_s), que é definida como sendo a força de corte por unidade de área da seção de corte. Esse dado é obtido experimentalmente e, com base nesses resultados, foram propostas algumas Equações que relacionam a pressão específica de corte com as demais grandezas que a influenciam. As relações mais importantes de pressão específica são as definidas pela ASME, Kienzle, Kronenberg. (Ferraresi, 1977).

Entretanto, em alguns casos, o ângulo de saída usado na operação de torneamento pode não coincidir com os ângulos experimentais definidos por Kienzle. Desta forma, existe a necessidade de corrigir os valores de força de corte encontrados, sendo os seguintes fatores de correção, conforme Tabela 9.

Tabela 9: Fatores de correção para força de corte (Ferraresi [1977], modificado).

K1	Correção do ângulo efetivo de corte
K2	Correção da velocidade de corte
K3	Correção do material da ferramenta
K4	Correção do desgaste

Desta forma, a Equação a ser aplicada para estes casos dependerá da correção a ser feita, ficando em sua forma completa conforme Equação 2.9.

$$F_c = K_{s1} \cdot h^{(1-z)} \cdot b (K1 \cdot K2 \cdot K3 \cdot K4) \quad (2.9)$$

Onde:

K_{s1} – pressão específica de corte (N/mm²)

h – espessura do cavaco (mm)

z – constante tabelada que varia de acordo com o material analisado (adimensional)

b – comprimento do gume ativo (mm)

Outras formas comumente usadas para cálculo das pressões específicas de corte são apresentadas abaixo. É importante ressaltar que, na teoria, o K_{s1} e o K_{s2} possuem o mesmo valor teórico:

$$K_{s1} = \frac{F}{(f \cdot ap)} \quad (2.10)$$

Onde:

K_{s1} – pressão específica de corte (N/mm²)

F – Força de corte (N)

f – avanço (mm/rot)

ap – profundidade de corte (mm)

$$K_{s2} = \frac{F}{2 \cdot f \cdot (D-d)} \quad (2.11)$$

Onde:

K_{s2} – pressão específica de corte (N/mm²)

F – Força de corte (N)

f – avanço (mm/rot)

D – diâmetro inicial (mm)

d – diâmetro final (mm)

Além disso, na comparação entre valores teóricos e práticos, é importante o cálculo do erro gerado:

$$\text{Erro (\%)} = \frac{\text{Valor teórico} - \text{Valor prático}}{\text{Valor teórico}} \times 100 \quad (2.12)$$

Assim como na força de corte, existem alguns fatores que influenciam diretamente a pressão específica de corte, que já foram verificados experimentalmente, como a seção de corte, a geometria da ferramenta com a influência direta do ângulo de saída e, finalmente, a velocidade de corte, onde verifica-se que a pressão de corte diminui com o seu aumento, principalmente utilizando-se de ferramenta de metal duro. (Ferraresi, 1977).

Além desses fatores, sabe-se que a refrigeração influencia bastante na pressão específica de corte, uma vez que o material pode sofrer com os efeitos da variação de temperatura. Estudos recentes (LIMA, 2017) sugerem ainda a utilização de resfriamento criogênico, realizada com a deposição de nitrogênio líquido sobre o material, visando agilizar o resfriamento do processo de torneamento. Entretanto, com temperaturas muito agressivas, a estrutura do material pode ser alterada, fazendo com que cavacos ducteis passem a apresentar comportamentos frágeis e quebradiços.

Existe uma grande variedade de materiais que podem ser utilizados como ferramentas nos processos de torneamento. A escolha destes depende do tipo de material a ser usinado, do custo do processo, da expectativa de vida útil da ferramenta. Entretanto, todos devem apresentar resistência maior que a da peça a ser usinada e boa resistência à temperatura, para que não quebrem ou trinquem. Os principais tipos de materiais usados, são os aços carbonos, aços rápidos (aços carbono com adição de Cr, Mo, V), metal duro (normalmente Wc), ligas fundidas (compostas por W, Cr e Co) e cerâmicas, por serem refratárias. (LIMA, 2017; BORBA, 2016).

2.6 Acabamento Superficial

O acabamento é um termo usado para descrever a qualidade geral de uma superfície usinada. Não está especificamente ligado a textura ou padrão característico da superfície

técnica e nem a valores de rugosidade. Entretanto, pode-se estabelecer a relação de que quanto maior a qualidade da peça, menor será a rugosidade da mesma, e isso depende das características da ferramenta, material a ser usinado, parâmetros de máquina e da operação. Segundo Shaw (2005), a integridade de uma superfície usinada é um dos mais importantes pontos a ser considerado durante uma usinagem. Integridade superficial é o termo que envolve vários fatores: acabamento superficial e ausência de trincas, alteração química, danos térmicos e tensão residual, além de ser a característica através da qual podem ser relacionadas ou identificadas as diversas exigências ou alterações metalúrgicas que se desenvolveram devido a usinagem como: transformação de fase, encruamento, tamanho de grão, recristalização, inclusões no material entre outros. A classificação dos acabamentos pode ser vista na Figura 13.



Figura 13: Classificação de acabamento (MACHADO e SILVA, 2004).

O objetivo da usinagem é obter, além de exatidão dimensional e geométrica, uma superfície que apresente fatores superficiais e subsuperficiais apropriados para o projeto, a fim de garantir segurança, confiabilidade e longa vida ao componente fabricado. Por esse motivo a importância do estudo do acabamento aumenta à medida que crescem as exigências de projeto (MACHADO e SILVA, 2004).

As superfícies usinadas são bastante complexas, já que seu desempenho pode ser influenciado por uma camada externa (transformação química e deformações plásticas) e por camadas internas (transformações metalúrgicas e tensões residuais). Como durante o processo de usinagem as energias do processo misturam-se com as propriedades do material da peça,

podem conseqüentemente surgir efeitos superficiais tais como: rugosidade, trincas e tensões residuais. A combinação destes fatores pode gerar desgaste ou fadiga na peça. Por isto é necessário selecionar apropriadamente os níveis das variáveis de entrada para se obter um melhor acabamento e conseqüentemente melhor integridade superficial.

A instensidade das deformações plásticas e transformações metalúrgicas diminuem consideravelmente à medida que se distancia da superfície usinada até que não seja mais percebida. A fim de garantir um bom acabamento superficial o controle do estado microestrutural é tão importante quanto o controle dos parâmetros de usinagem. (MACHADO e SILVA, 2004).

Segundo Barbosa (2016), o torneamento é responsável por produzir efeitos termomecânicos, que estão diretamente relacionados à integridade superficial da peça usinada. O efeito mecânico advém principalmente das tensões de cisalhamentos desenvolvidas no processo, sendo estas distribuídas em três zonas. A chamada zona primária ocorre na peça a medida que o material é removido e convertido em cavaco, a secundária fica localizada na parte inferior do cavaco a medida que este é forçado contra a ferramenta e a terciária ocorre na parte inferior da ferramenta à medida que esta é arrastada sobre o material recém cortado. As tensões primárias e terciárias afetam a superfície da peça cortada, já a secundária não. Logo, caso essas tensões sejam muito elevadas, podem causar deformações severas na superfície da peça ou então o colapso da ferramenta.

2.7 Temperatura na Região de Corte

Em usinagem, a retirada de material através da penetração da ferramenta de corte na peça resulta em um grande consumo de energia. Essa energia se converte em calor devido a fatores como o atrito, a deformação plástica da peça usinada. Além disso, o calor excessivo acelera os mecanismos de desgaste termicamente ativados, reduz o limite de escoamento das ferramentas, o que interfere diretamente na performance da mesma. (BORELLI *et al.*, 2001).

A temperatura também tem grande influência no controle dimensional e no acabamento superficial da peça (SUAREZ *et al.*, 2009). O aumento da temperatura também colabora para reduzir as forças e a potência de usinagem. Em cada um dos processos de corte as temperaturas máximas situam-se em regiões específicas, bem próximas à aresta de corte, onde as tensões atuantes (normais e cisalhantes) são extremamente elevadas (TRENT e WRIGTH, 2000).

Existem duas zonas de cisalhamento, por onde o calor é dissipado de formas diferentes, que influenciam na peça em maior ou menor grau. O calor gerado na zona de cisalhamento primário é, em sua maior parte, dissipado pelo cavaco e uma pequena parte é transmitida por condução para a peça, parte esta que não deve ser desprezada visto que pode causar erros de dimensionamento da peça. A zona de cisalhamento secundário é a principal fonte de calor responsável pelas altas temperaturas da ferramenta de corte (MACHADO E SILVA, 2004), principalmente quando na usinagem de materiais duros ou que apresentem alto ponto de fusão. É importante frisar que a temperatura na zona do fluxo depende da quantidade de trabalho realizado para cisalhar o material e da quantidade de material que passa pela mesma.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

O processo experimental apresentou as seguintes fases: escolha dos materiais, preparação das amostras, torneamento com dinamômetro acoplado para medição das forças resultantes e posterior análise dos resultados. Os itens subsequentes descrevem todos os métodos, equipamentos e procedimentos utilizados neste trabalho.

3.1 Materiais

Foram utilizados três aços distintos: aço SAE 1020, SAE 4340 e inoxidável duplex UNS S31803. Cada material foi extraído de uma barra original e cada amostra final apresentou entre 100 e 120 mm de comprimento. Os diâmetros foram usinados até atingirem 20,1 mm. Posteriormente, foram efetuados 4 rasgos de 20 mm cada, espaçados de 5 mm nas três amostras, conforme Figura 14.

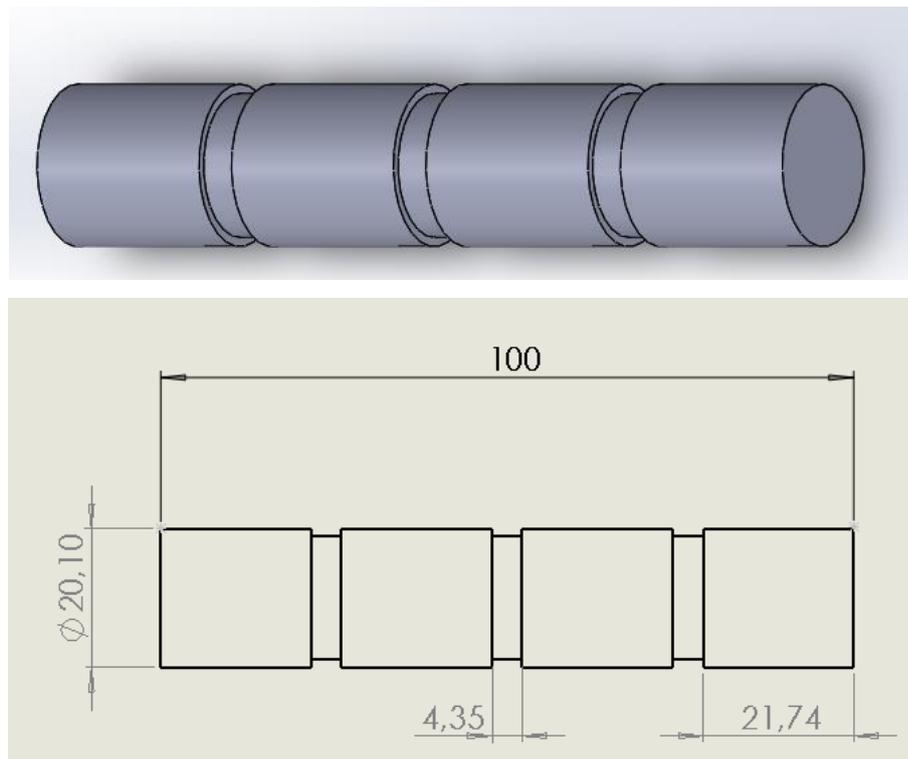


Figura 14: Representação esquemática das amostras.

3.2 Preparações das amostras

A amostra de duplex UNS S31803 já possuía o diâmetro final estabelecido de 20,1mm e, portanto, foi necessária apenas uma passagem com a ferramenta para retirar oxidações superficiais. As outras amostras foram submetidas à faceamento e desbaste, para redução do diâmetro de 25,3 mm para cerca de 20,1 mm. Todas as amostras foram usinadas no torno mecânico convencional do Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) do Centro Federal de Ensino Tecnológico Celso Suckow da Fonseca (CEFET – RJ / Maracanã), conforme a Figura 15.



Figura 15: Torno utilizado na preparação das amostras.

3.3 Torneamentos das amostras

O experimento foi realizado no torno mecânico convencional do Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS), considerando duas profundidades de corte e dois avanços distintos, gerando assim quatro combinações de experimentos por cada amostra, conforme Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros de Operação.

Profundidade de Corte [mm]	Avanço [mm/rot]
0,13	0,140
0,13	0,394
0,25	0,140
0,25	0,394

Para cada combinação da Tabela 10 foram realizados 2 passes em cada amostra, com medição dos diâmetros intermediários entre eles, gerando assim 24 resultados distintos a serem analisados. Não foi utilizado fluido de corte em nenhum dos passes realizados.

As ferramentas de corte utilizadas no experimento foram dois insertos DCMT 11T304LF – KC 5010 da Kenna Metal, de metal duro, aplicado para usinagem em velocidades mais altas, de aços em geral, aços inoxidáveis, ferros fundidos e materiais não ferrosos. Para cada condição foi utilizado um só gume de corte para garantir a uniformidade da aresta de corte e evitar que o desgaste da ferramenta influenciasse nos resultados finais. As características dos mesmos seguem na Tabela 11.

Tabela 11: Dimensões do inserto.

Tamanho Efetivo da aresta de corte (LE)	11,600 mm
Diâmetro círculo inscrito (IC)	9,502 mm
Raio da ponta (RE)	0,395 mm
Espessura (S)	3,970 mm

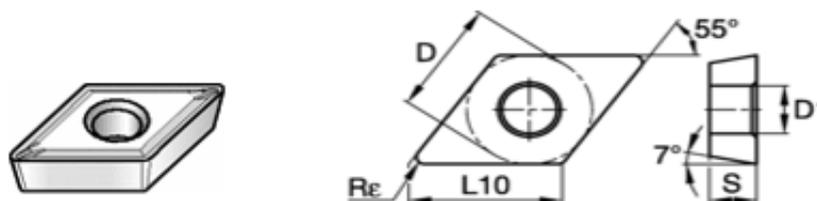


Figura 16: Representação do Inserto.

De acordo com as informações obtidas junto ao fabricante, o inserto deve ser usado nas faixas de operação especificadas na Tabela 12 para melhor desempenho.

Tabela 12: Condições do fabricante.

Velocidade de corte (V_c)	210 a 320 m/min
Avanço	0,08 a 0,3 mm/rot
Profundidade de corte	0,5 a 4,0 mm

Considerando a velocidade de corte mínima para o experimento, o número de rotações (rpm) a ser ajustado no torno é:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (3.1)$$

Consequentemente,

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot d} \quad (3.2)$$

Considerando $d = 20,1$ mm, tem-se que:

$$n = \frac{210 \cdot 1000}{\pi \cdot 20,1} = 3325 \text{ rpm}$$

Entretanto, o torno disponível e utilizado trabalha com rotação máxima de 2500 rpm. Desta forma, refazendo os cálculos de forma a obter a velocidade de corte que poderia ser usada no experimento, tem – se que:

$$2500 = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot 20,1} \cong 158 \text{ m/min}$$

Desta forma, para todos os casos, como os diâmetros iniciais eram similares e os materiais foram colocados em condições iguais de profundidades de corte e avanços, foi usada esta velocidade para todas as análises.

3.4 Obtenções da Força de Corte

As medições de força de corte foram realizadas no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) do Centro Federal de Ensino Tecnológico Celso Suckow da Fonseca (CEFET – RJ / Maracanã), com o uso do dinamômetro da Kistler Instrumente AG, Modelo

9257 BA acoplado ao torno mecânico convencional. O aparelho utilizado encontra-se na Figura 17.



Figura 17: Dinamômetro usado no experimento e conexões.

Os dados eram obtidos pelo programa LabView Signal Express 2011, enquanto as amostras estavam sendo usinadas, gerando 3 componentes de força:

- Força de avanço – eixo X
- Força passiva – eixo Y
- Força de corte – eixo Z

As forças de avanço e corte contribuem diretamente para remoção de material, enquanto que a força passiva não é responsável pela remoção de material e sim pela precisão dimensional e deformações da ferramenta ou porta-ferramenta.

As medições das forças com o programa eram iniciadas antes que a ferramenta começasse a remover material e eram encerradas após a passagem pela área da amostragem de 20 mm. Com isso, foram gerados gráficos das 3 forças atuantes e uma memória de cálculo contendo dados de forças (N) em função do tempo de deslocamento. Os dados posteriormente foram tratados no programa Origin Pro 8, para gerar gráficos mais confiáveis e de melhor visualização, visto que algumas análises poderiam gerar ruídos, vibrações, que necessitavam de correção para evitar erros nos cálculos finais das forças e pressões específicas de corte.

3.5 Determinação da Pressão Específica de Corte

A pressão específica de corte (K_s) é definida como sendo a força na direção do corte, necessária para cortar uma área de cavaco de 1 mm^2 que possui uma espessura de 1 mm. Este fator é puramente matemático, influenciado pela resistência mecânica e elementos de liga do material a ser usinado, sendo também e fortemente dependente da geometria da ferramenta de corte. (FERRARESI, 1977).

Os valores teóricos são puramente matemáticos. Para a escolha em cada material, foi levado em consideração os materiais usados, a profundidade de corte e o tamanho do cavaco no passe. Os valores definidos encontram-se na Tabela 13.

Para a definição dos valores práticos, foram usadas as Equações 2.10 e 2.11, considerando os avanços e profundidade de corte estabelecidos como premissas da análise. A partir destes, foram gerados os valores para cada caso, conforme Tabelas 16, 18 e 20.

Capítulo 4

Resultados e discussão

Foram medidas as forças de usinagem durante o torneamento dos três corpos de prova. Os dados iniciais de força x tempo gerados pelo programa LabView foram compilados, considerando os avanços e profundidades de corte aplicadas em cada passe, o que permitiu uma comparação gráfica entre as informações obtidas.

4.1 Resultados teóricos

Foi realizada uma análise teórica para a obtenção dos valores das forças de corte, para os três materiais testados, considerando os avanços e profundidades de corte da Tabela 11. Além disso, foi verificada, teoricamente, qual seria a pressão específica de corte para cada um dos casos, considerando os parâmetros analisados.

Para a determinação das forças de corte, foi utilizada a Equação de Kienzle (2.5), que relaciona o avanço, a profundidade de corte e a força específica de corte. Os dois primeiros valores foram definidos pela realização do experimento, enquanto que o último parâmetro é tabelado e depende de uma série de fatores. Para valores mais precisos, foi analisada a espessura do cavaco gerada no torneamento, para cada material, sugerindo em alguns casos, forças específicas de corte distintas para um mesmo material. A Tabela 13 mostra os dados usados para este trabalho, enquanto que os dados completos encontram-se no Anexo I.

Tabela 13: Pressão específica de corte para os materiais analisados (INGA PROJETOS, 2016, modificado).

Aços analisados	Profundidade de corte (mm)	Avanço (mm/rot)	Pressão Específica de Corte (N/mm ²)
SAE 1020	0,13	0,140	3621
		0,394	2486
	0,25	0,140	5256
		0,394	2907
SAE 4340	0,13	0,140	2907
		0,394	2907
	0,25	0,140	4915
		0,394	3916
Duplex UNS S31803	0,13	0,140	4286
		0,394	3280
	0,25	0,140	5552
		0,394	3782

Desta forma, usando os valores acima para calcular as forças de corte médias teóricas, os resultados obtidos em cada parâmetro de corte, para cada material, constam na Tabela 14.

Tabela 14: Resultados teóricos da força de corte (Fc).

Material	Condições de Corte		Força de Corte (N)
	Profundidade de corte (mm)	Avanço (mm/rot)	
SAE 1020	0,13	0,140	66
	0,25		127
	0,13	0,394	185
	0,25		296
SAE 4340	0,13	0,140	52
	0,25		148
	0,13	0,394	172
	0,25		384
UNS S31803	0,13	0,140	78
	0,25		168
	0,13	0,394	194
	0,25		373

Após a geração dos resultados, verificou-se que existe a tendência de, ao se aumentar o avanço e a profundidade de corte, a força de corte necessária para a realização do torneamento aumenta significativamente, uma vez que são exigidos maiores esforços para a operação. Em alguns casos, a força empírica pode quadruplicar.

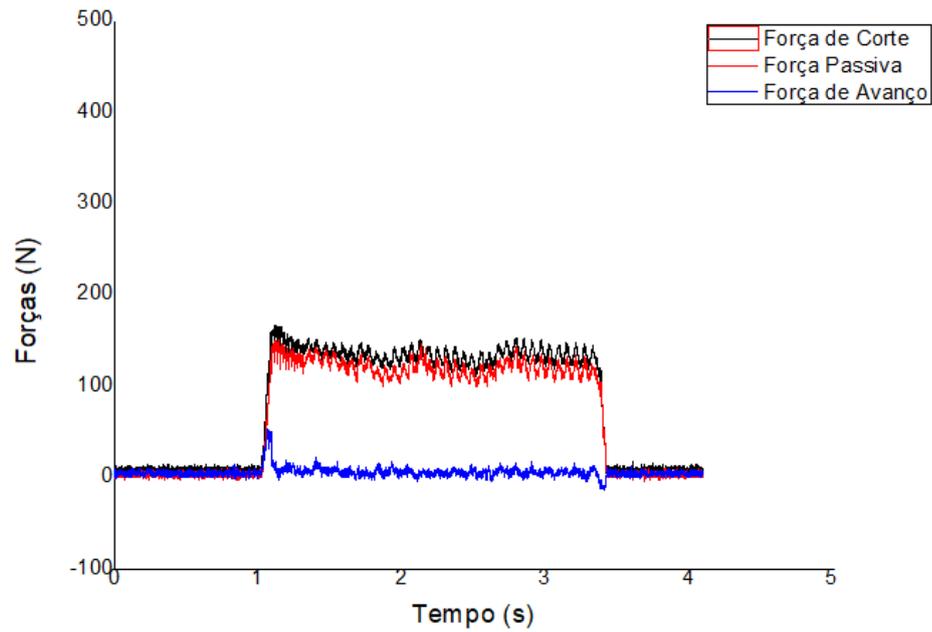
Outro ponto a ser destacado é a composição química do material, que normalmente influencia bastante na força a ser usada. Os materiais mais ligados, com maior adição de elementos de liga, ou com microestruturas ferríticas e austeníticas, tendem a exigir uma força de corte mais elevada, inclusive pela alta resistência desses materiais. Já o aço SAE 1020, por apresentar boa usinabilidade e baixo percentual de carbono, exige uma força de corte inferior aos demais. Entretanto, ao serem calculadas as forças de corte teóricas usando a pressão específica de corte tabelada, foi verificado que o aço SAE 4340 requereu forças de corte médias menores que o aço SAE 1020 para a menor profundidade de corte (0,13 mm), provavelmente por sua baixa dureza superficial.

4.2 Resultados Experimentais

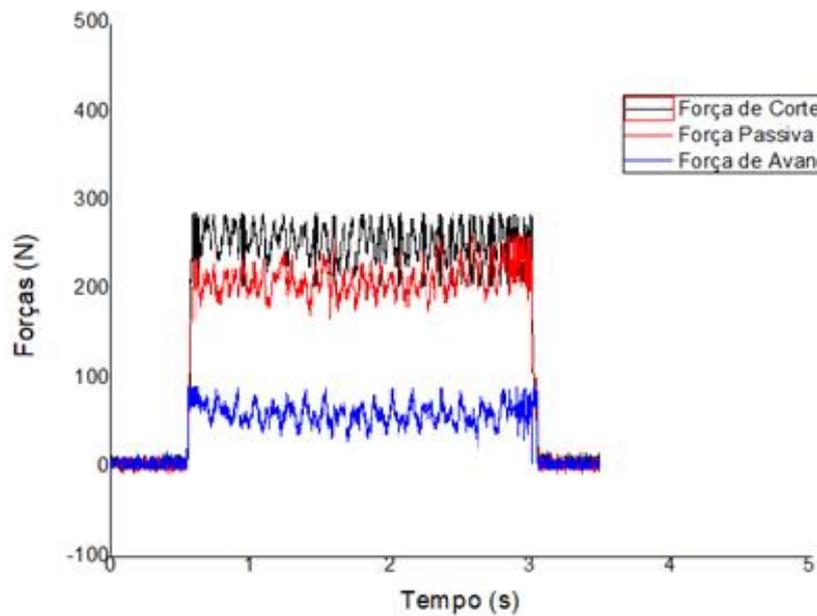
Os resultados obtidos em cada modalidade de profundidade de corte e avanço estipulados na Tabela 10 foram medidas pelo dinamômetro experimentalmente, gerando assim as três componentes de força: Força de Corte (F_c), Força Passiva (F_p) e Força de Avanço (F_f).

4.2.1 Aço SAE 1020

De acordo com SANTOS (2016), este material, por não possuir elementos de liga que o tornem altamente resistente, deveria exigir as menores forças de corte, passiva e avanço para seu torneamento. A Figura 18 apresenta os gráficos das forças de usinagem do aço SAE 1020 para um mesmo valor de avanço, aumentando-se o valor da profundidade de corte:



(a)



(b)

Figura 18: Forças de usinagem para o aço SAE 1020 (a) $f = 0,394$ mm/rot e $a_p = 0,13$ mm e (b) $f = 0,394$ mm/rot e $a_p = 0,25$ mm.

Com base nos gráficos da Figura 18 observa-se que antes do processo ser iniciado, as forças oscilam estavelmente perto do zero, e o primeiro pico de força ocorre no contato entre ferramenta e peça, estendendo-se até o momento em que o contato entre ambos cessa. Além disso, em todos os casos, a componente da força de corte (F_c) foi a maior dentre as três, sendo

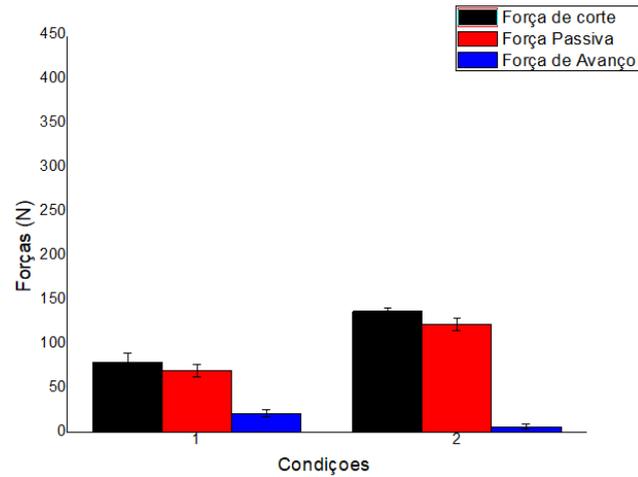
elevada com o aumento da profundidade de corte. O aumento do volume de cavaco retirado e, conseqüentemente, da área de seção transversal do mesmo, tende a aumentar os valores de força e potência requeridos para a realização do processo de usinagem. Assim, espera-se que com incremento nos valores de profundidade corte, as forças de usinagem (principalmente a de corte a passiva) aumentem.

A Tabela 15 mostra os valores de força adquiridos para todas as condições de corte do aço SAE 1020 onde se pode notar que os maiores valores de força estão relacionados aos maiores valores de avanço e profundidade de corte.

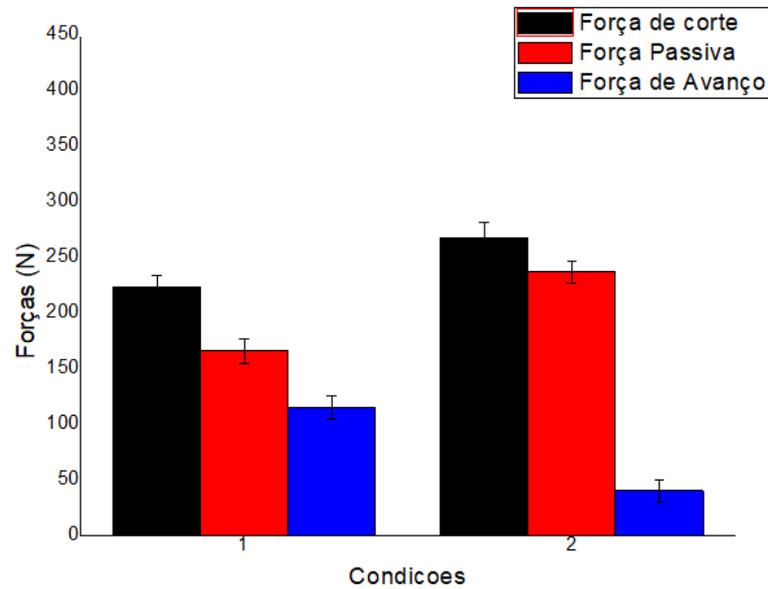
Tabela 15: Força de usinagem experimental SAE 1020.

Profundidade de corte (mm)	Avanço (mm/rot)	Componente da Força de usinagem	Média de Forças (N)	Desvio Padrão
0,13	0,140	Corte	79	10,5
		Passiva	70	6,8
		Avanço	21	4,0
	0,394	Corte	137	4,2
		Passiva	122	6,7
		Avanço	6	2,9
0,25	0,140	Corte	223	10,4
		Passiva	166	11,1
		Avanço	115	10,8
	0,394	Corte	267	13,3
		Passiva	237	10,1
		Avanço	40	9,5

Graficamente, obtém-se a Figura 19 de acordo com os valores obtidos nos cálculos das três componentes de força para ambas as situações de profundidade de corte e avanço. Nota-se a discrepância da força de avanço em relação às outras, mostrando que esta é bem inferior às demais.



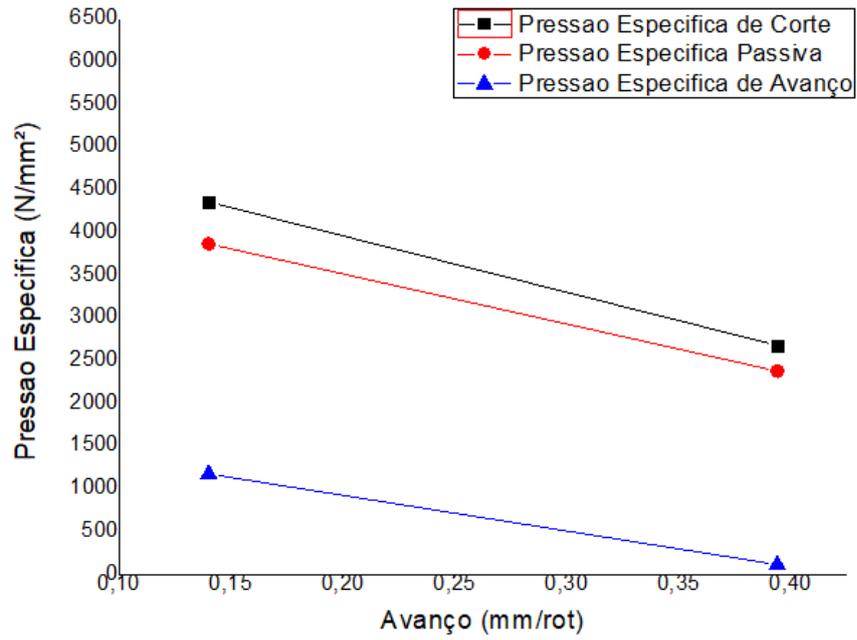
(a)



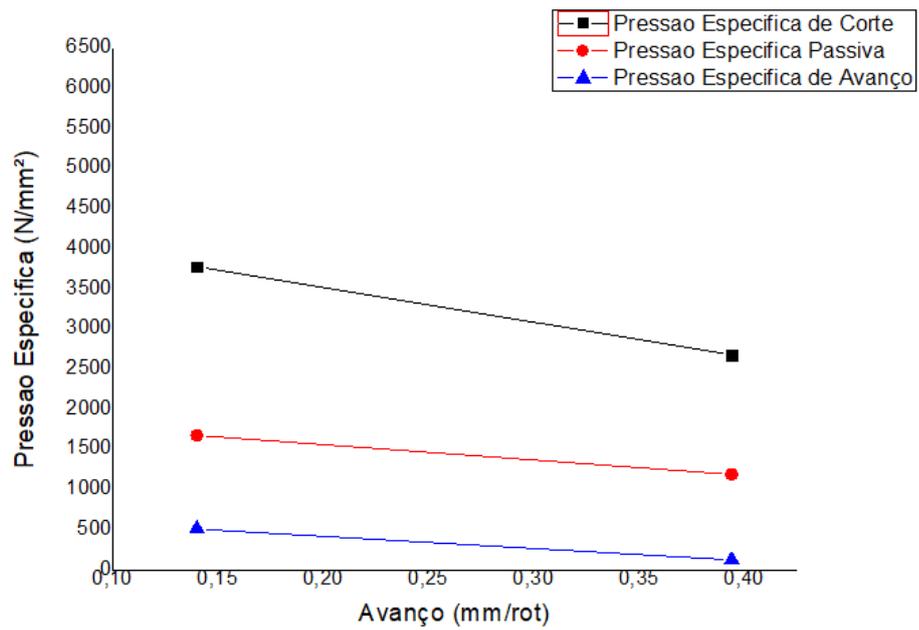
(b)

Figura 19: Forças de usinagem no SAE 1020 nas Condições 1 ($f = 0,14$ mm/rot) e 2 ($f = 0,394$ mm/rot): (a) $a_p = 0,13$ mm (b) $a_p = 0,25$ mm.

Com base nas Equações 2.10 e 2.11 foi possível obter os valores da pressão específica de corte (K_{s1} e K_{s2}) para as condições usinadas e assim obteve-se os gráficos das Figuras 20 e 21.

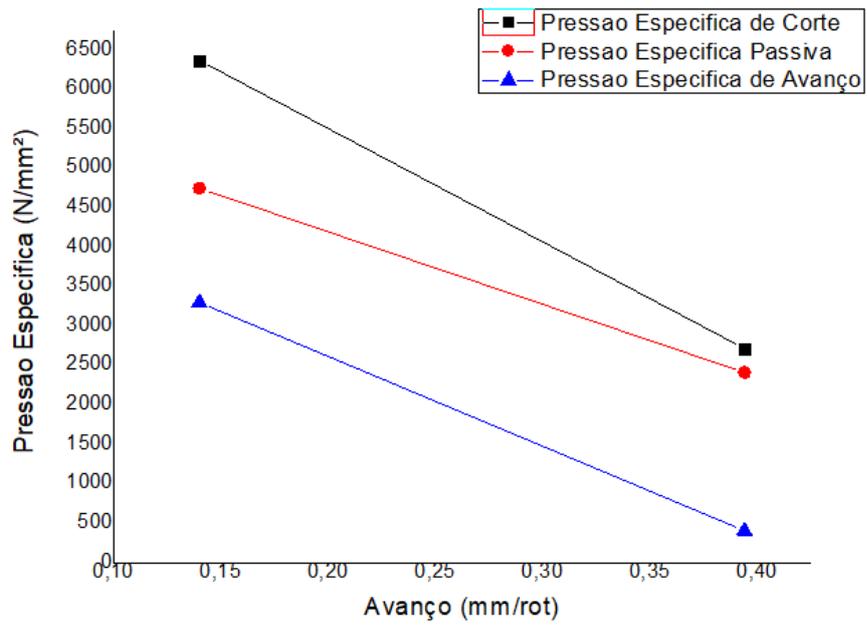


(a)

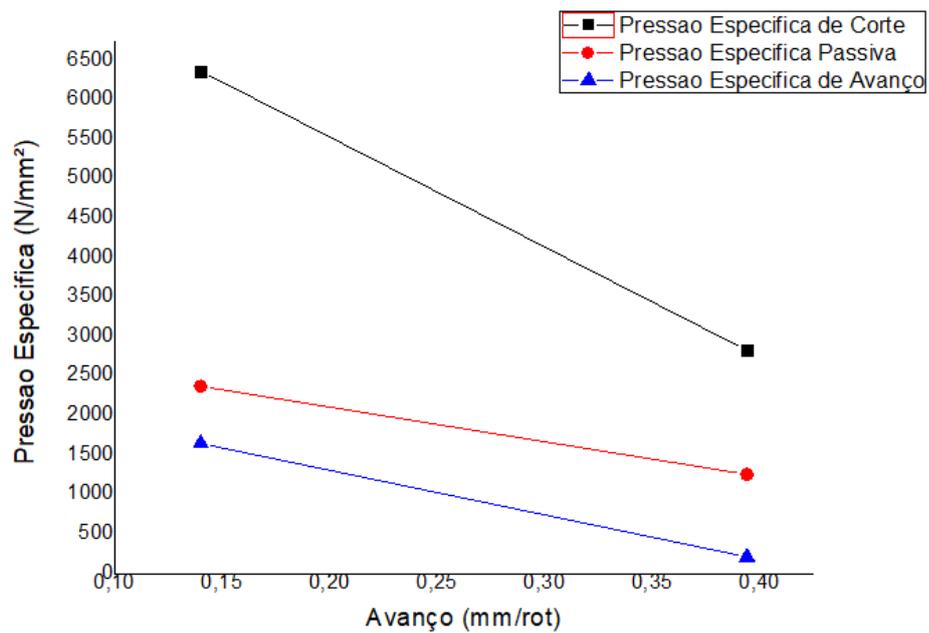


(b)

Figura 20: Pressões específicas no SAE 1020: (a) Ks1 com $a_p = 0,13$ mm e (b) Ks2 com $a_p = 0,13$ mm.



(a)



(b)

Figura 21: Pressões específicas no SAE 1020: (a) Ks1 com $a_p = 0,25$ mm e (b) Ks2 com $a_p = 0,25$ mm.

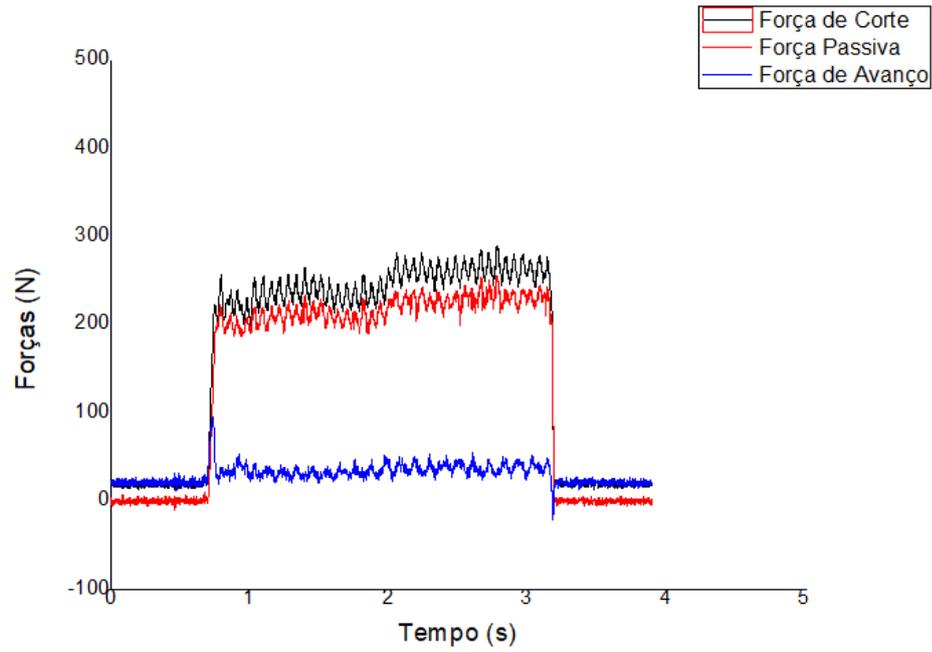
A Tabela 16 especifica os valores que foram calculados para os Ks1 e Ks2 práticos, visando sua comparação com os valores teóricos tabelados, calculando assim a diferença entre valores experimentais e práticos.

Tabela 16: Pressão Específica de Corte no aço SAE 1020.

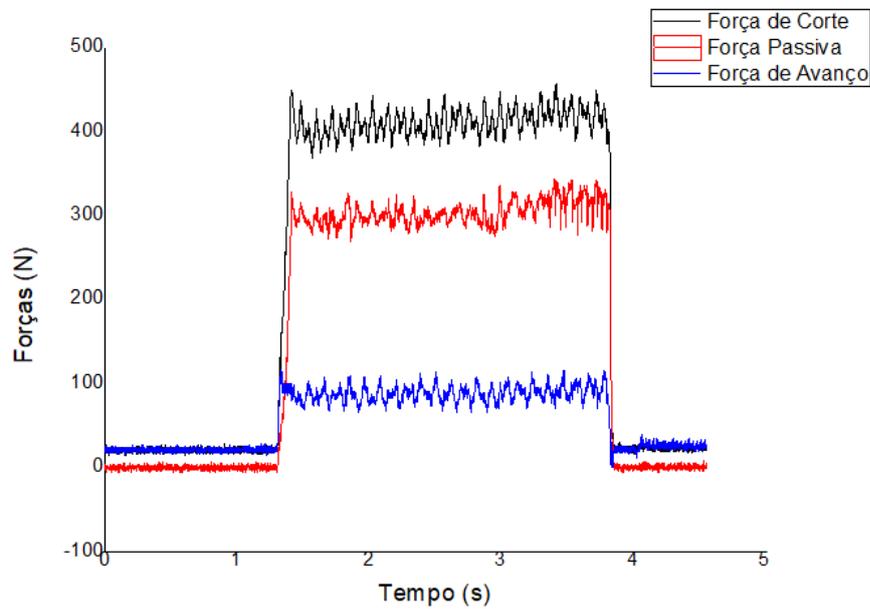
Profundidade de corte (mm)	Avanço (mm/rot)	Ks teórico (Ks1 = Ks2)	KS1 Prático	KS2 Prático	Erro KS1 (%)	Erro KS2 (%)
0,13	0,140	3621	4.360	3.779	-20%	-4%
0,13	0,394	2486	2.680	2.680	-8%	-7%
0,25	0,140	5256	6.368	6.368	-21%	-21%
0,25	0,394	2907	2.715	2.829	7%	2%

4.2.2 Aço SAE 4340

O aço SAE 4340 possui elevada temperabilidade e boa forjabilidade, porém, em determinadas condições de tratamento térmico, pode apresentar baixa usinabilidade, em função da quantidade de elementos de liga na sua composição. Desta forma, esperava-se que para esse material fossem atingidos maiores valores de força de usinagem, comparados ao SAE 1020. A Figura 22 apresenta os valores das componentes de força adquiridos durante o tornamento do aço SAE 4340 para o maior valor de avanço.



(a)



(b)

Figura 22: Forças de usinagem para o aço SAE 4340 (a) $f = 0,394$ mm/rot e $a_p = 0,13$ mm e (b) $f = 0,394$ mm/rot e $a_p = 0,25$ mm.

Com base nos gráficos da figura 22, antes do processo ser iniciado, as forças oscilam estavelmente perto do zero, e o primeiro pico de força ocorre no contato entre ferramenta e

peça, estendendo-se até o momento em que o contato entre ambos cessa. Além disso, em todos os casos, a componente da força de corte (F_c) foi a maior dentre as três, sendo elevada com o aumento da profundidade de corte. Na Figura 22 (a), inicialmente houve uma aproximação entre as Forças de Corte e Passiva. O motivo pelo qual isso pode ter ocorrido foi alguma vibração no sistema. O aumento do volume de cavaco retirado e, conseqüentemente, da área de seção transversal do mesmo, tende a aumentar os valores de força e potência requeridos para a realização do processo de usinagem. Assim, espera-se que com incremento nos valores de profundidade corte, as forças de usinagem (principalmente a de corte a passiva) aumentem.

Estes resultados também podem ser comparados aos achados por Cervelin (2009), onde sugerem que os picos de força nas Figuras 8 e 9 são esperados para este material, nas condições semelhantes ($v_c = 150$ m/min e $f = 0,15$ mm/rev).

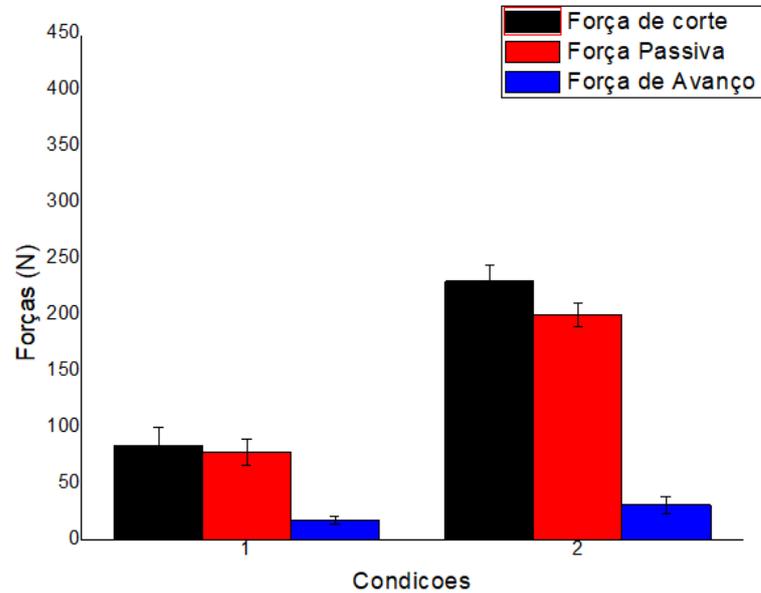
A Tabela 17 mostra os valores de força adquiridos para todas a condição de corte do aço SAE 4340 onde se pode notar que os maiores valores de força estão relacionados aos maiores valores de avanço e profundidade de corte.

Tabela 17: Força de usinagem experimental SAE 4340.

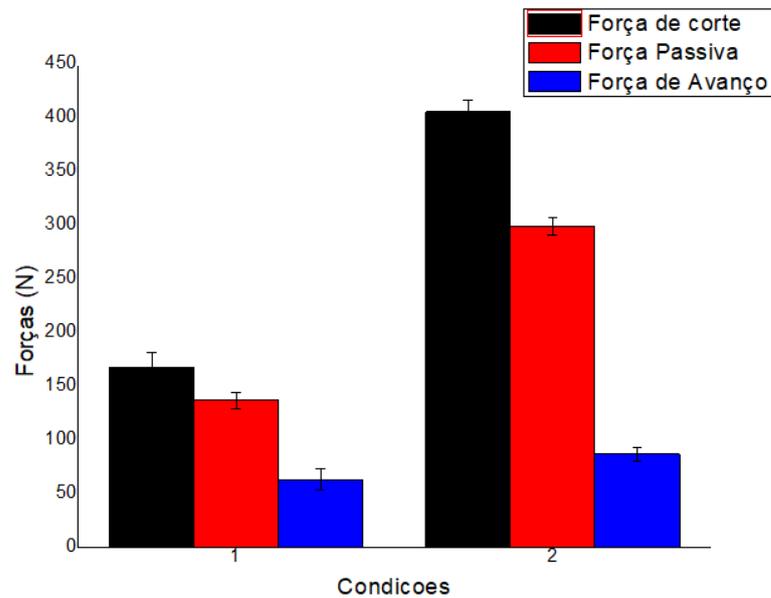
Profundidade de corte (mm)	Avanço (mm/rot)	Componente da Força de usinagem	Média de Forças (N)	Desvio Padrão
0,13	0,140	Corte	84	16,2
		Passiva	78	11,8
		Avanço	17	3,8
	0,394	Corte	230	13,9
		Passiva	220	11,0
		Avanço	31	7,5
0,25	0,140	Corte	167	14,1
		Passiva	137	7,7
		Avanço	63	9,6
	0,394	Corte	406	11,0
		Passiva	300	7,8
		Avanço	87	6,5

Graficamente, obtem-se a Figura 23 de acordo com os valores obtidos nos cálculos das três componentes de força para ambas as situações de profundidade de corte e avanço. Nota-

se a discrepância da força de avanço em relação às outras, mostrando que esta é bem inferior às demais.



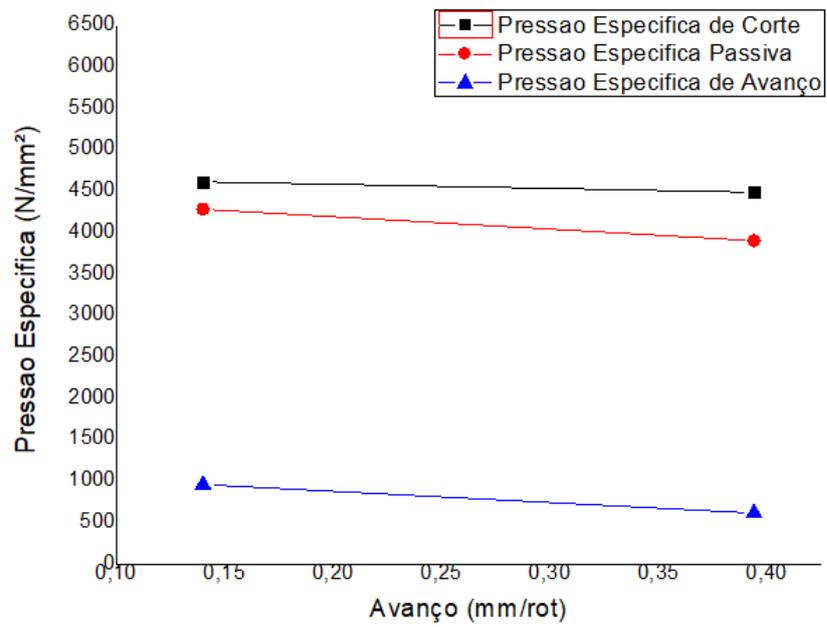
(a)



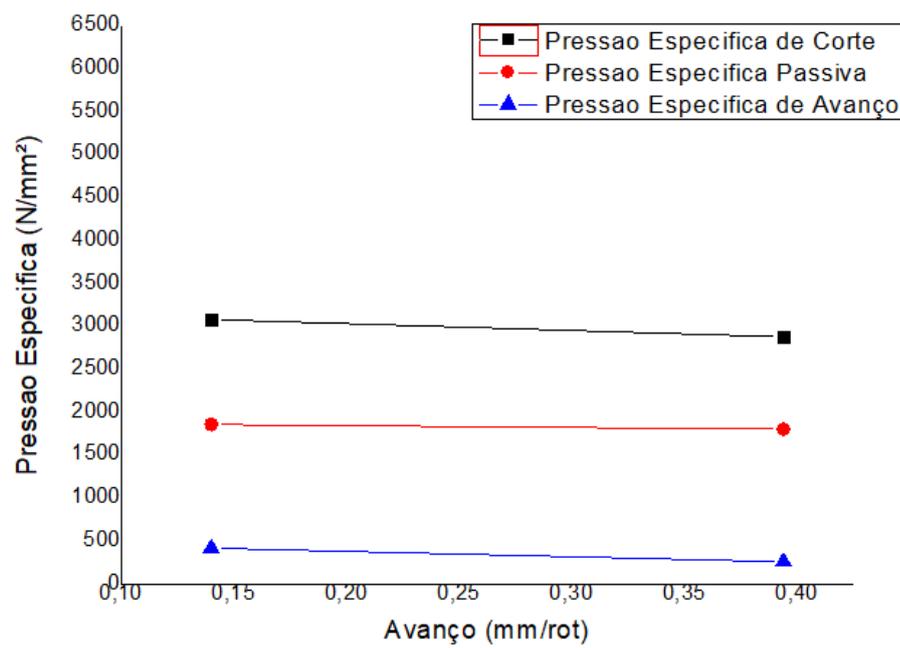
(b)

Figura 23: Forças de usinagem no SAE 4340 nas Condições 1 ($f = 0,14$ mm/rot) e 2 ($f = 0,394$ mm/rot): (a) $a_p = 0,13$ mm (b) $a_p = 0,25$ mm.

Com base nas Equações 2.10 e 2.11 foi possível obter os valores da pressão específica de corte (K_{s1} e K_{s2}) para as condições usinadas e assim obteve-se os gráficos das Figuras 24 e 25.

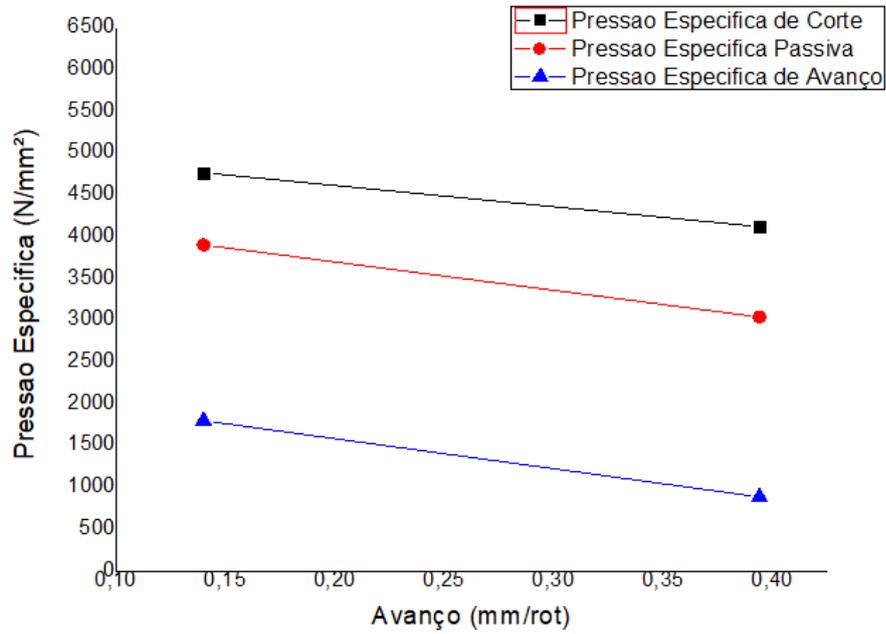


(a)

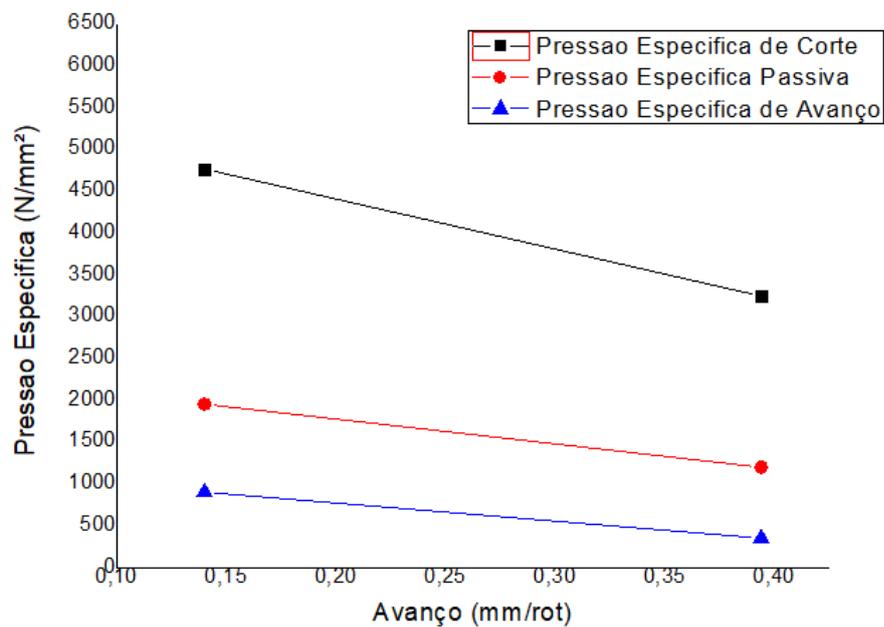


(b)

Figura 24: Pressões específicas no SAE 4340: (a) Ks1 com $a_p = 0,13$ mm e (b) Ks2 com $a_p = 0,13$ mm.



(a)



(b)

Figura 25: Pressões específicas no SAE 4340: (a) Ks1 com $a_p = 0,25\text{mm}$ e (b) Ks2 com $a_p = 0,25\text{ mm}$.

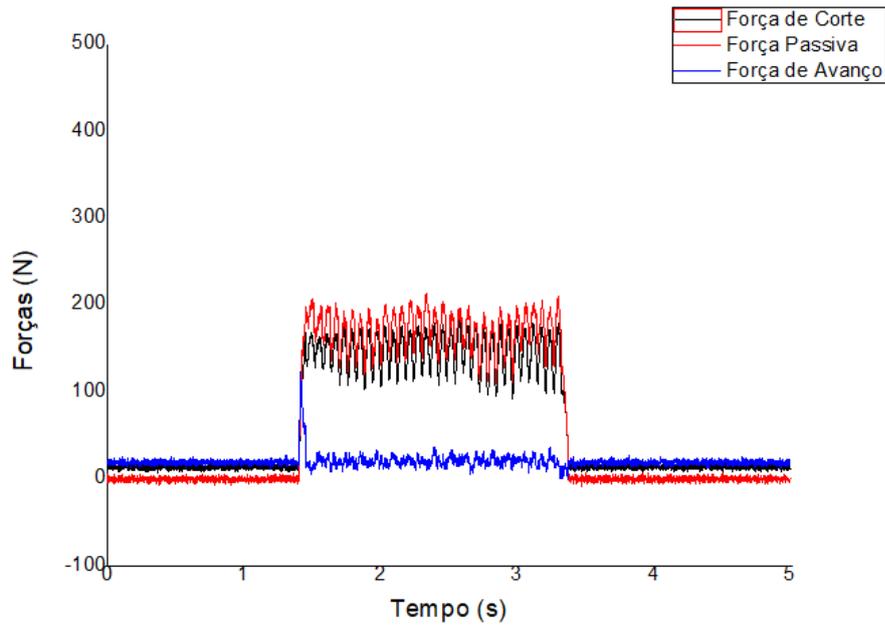
A Tabela 18 especifica os valores que foram calculados para os Ks1 e Ks2 práticos, visando sua comparação com os valores teóricos tabelados, calculando assim a diferença entre valores experimentais e práticos.

Tabela 18: Pressão Específica de Corte no aço SAE 4340.

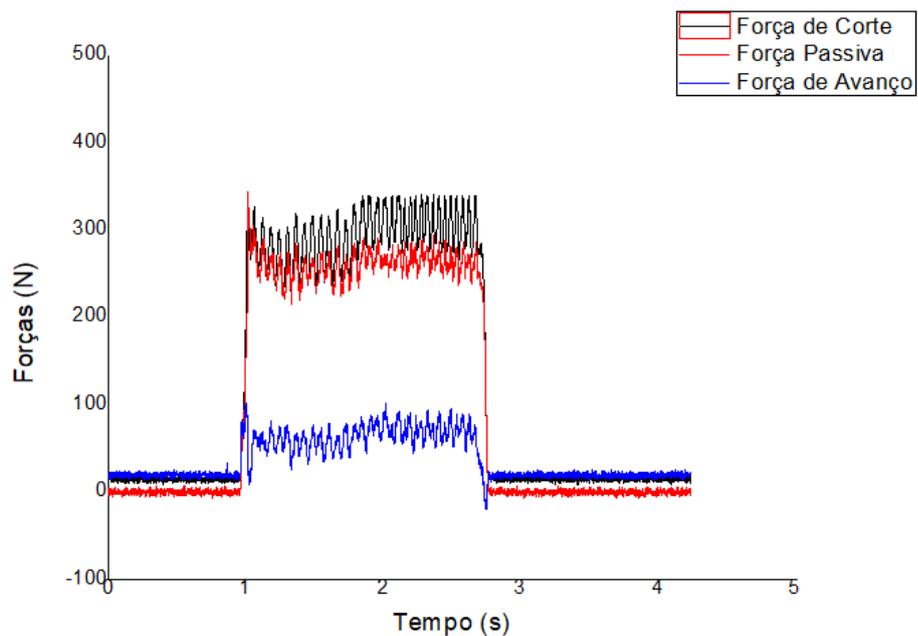
Profundidade de corte (mm)	Avanço (mm/rot)	Ks teórico (Ks1 = Ks2)	KS1 Prático	KS2 Prático	Erro KS1 (%)	Erro KS2 (%)
0,13	0,140	2907	3.003	3.079	-3%	-6%
0,13	0,394	2907	2.846	2.878	2%	1%
0,25	0,140	4915	4.768	4.768	3%	3%
0,25	0,394	3916	4.122	3.246	-5%	17%

4.2.3 Aço Duplex UNS S31803

O aço duplex UNS S31803 apresenta elevada resistência mecânica, o que lhe confere uma usinabilidade ruim, principalmente quando comparados aos aços inoxidáveis austeníticos, pelo fato de que os aços duplex apresentam alta resistência, uma falta de inclusões não metálicas e baixo teor de carbono. Também se torna difícil estabelecer parâmetros de usinagem para esse tipo de material porque o mesmo apresenta características de usinabilidade de aços ferríticos e austeníticos em pequenas frações de área, tornando o corte heterogêneo, desgastando prematuramente a ferramenta de corte. Pela composição química do mesmo, esperava-se que ele exigisse forças de corte bastante elevadas, semelhantes ou superiores ao SAE 4340. A Figura 26 mostra os resultados obtidos.



(a)



(b)

Figura 26: Forças de usinagem para o aço UNS S31803 (a) $f = 0,394$ mm/rot e $a_p = 0,13$ mm e (b) $f = 0,394$ mm/rot e $a_p = 0,25$ mm.

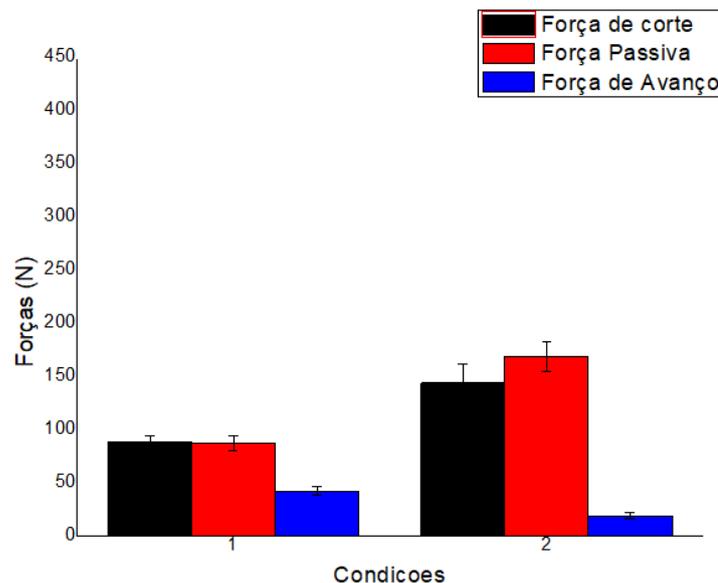
Experimentalmente, foi verificado que existe um pico de força no momento em que ocorre o contato entre a peça e a ferramenta, que logo se estabiliza. Além disso, nota-se uma inversão da força passiva (F_p) com a força de corte (F_c), em função da pior usinabilidade do material e da baixa profundidade de corte. As forças encontradas foram de fato similares às

encontradas no SAE 4340. A Tabela 19 mostra os valores de força adquiridos para todas a condição de corte do aço Duplex UNS S31803 onde se pode notar que os maiores valores de força estão relacionados aos maiores valores de avanço e profundidade de corte.

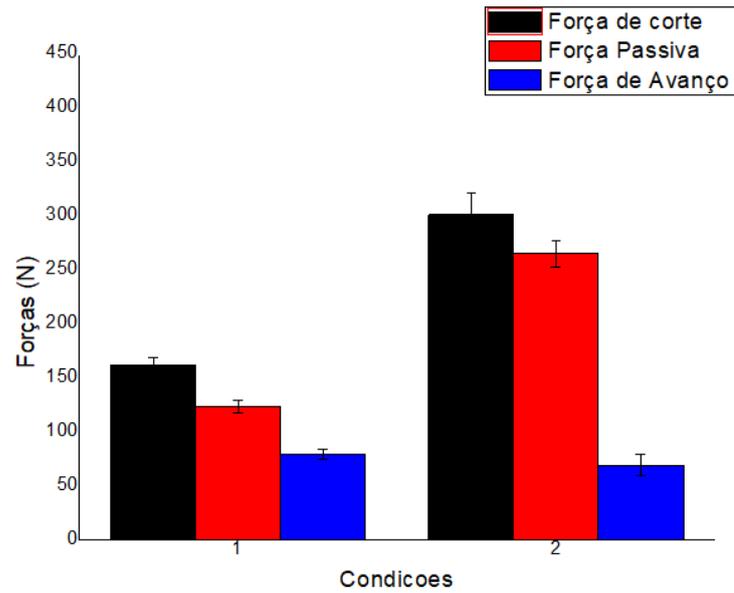
Tabela 19: Força de usinagem experimental UNS S31803.

Profundidade de corte (mm)	Avanço (mm/rot)	Componente da Força de usinagem	Média de Forças (N)	Desvio Padrão
0,13	0,140	Corte	88	6,6
		Passiva	87	6,9
		Avanço	42	4,0
	0,394	Corte	144	17,4
		Passiva	169	14,2
		Avanço	19	3,2
0,25	0,140	Corte	162	6,7
		Passiva	123	6,0
		Avanço	79	5,1
	0,394	Corte	302	19,7
		Passiva	265	12,4
		Avanço	69	10,3

Graficamente, obtem-se a Figura 27 de acordo com os valores obtidos nos cálculos das três componentes de força para ambas as situações de profundidade de corte e avanço. Nota-se a discrepância da força de avanço em relação às outras, mostrando que esta é bem inferior às demais.



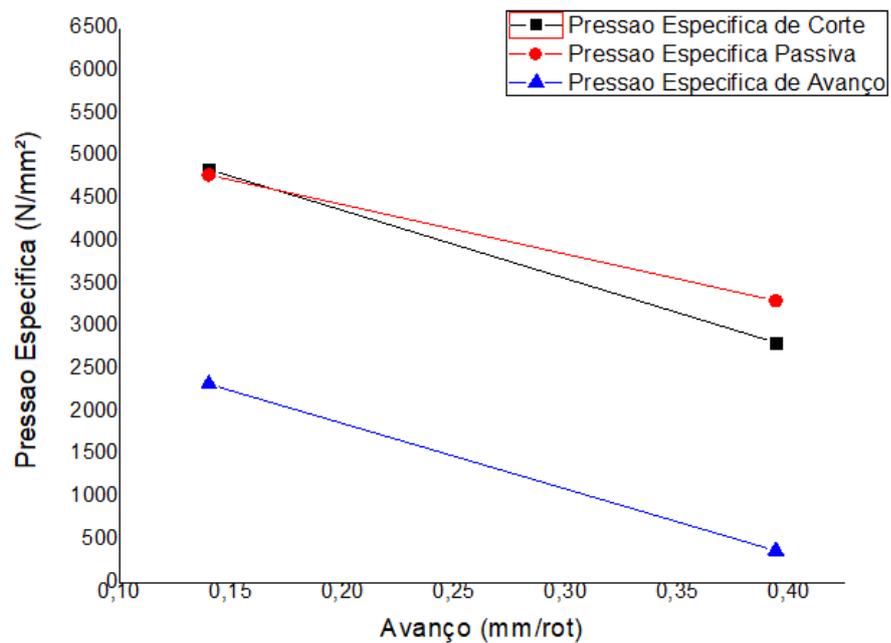
(a)



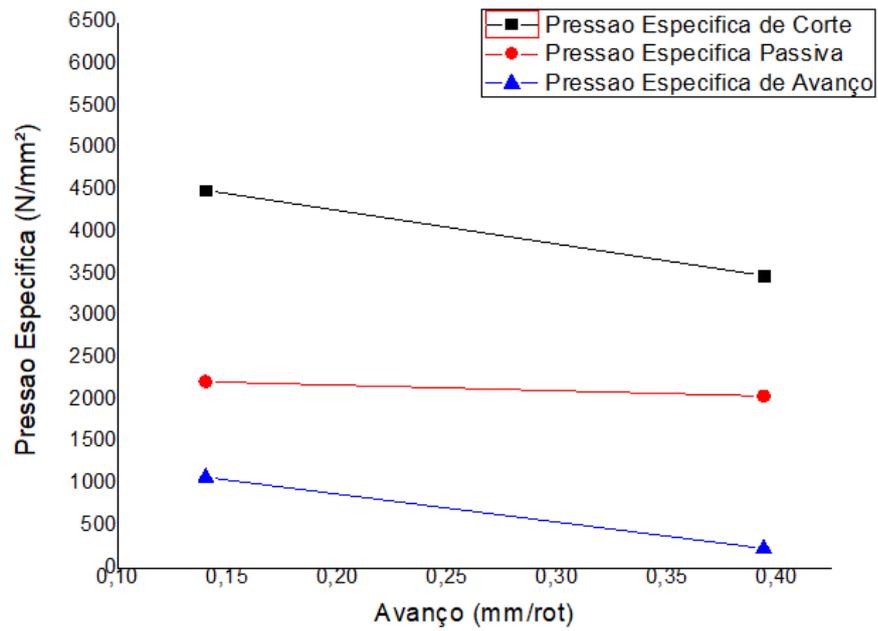
(b)

Figura 27: Forças de usinagem no UNS S31803 nas Condições 1 ($f = 0,14$ mm/rot) e 2 ($f = 0,394$ mm/rot): (a) $a_p = 0,13$ mm (b) $a_p = 0,25$ mm.

Com base nas Equações 2.10 e 2.11 foi possível obter os valores da pressão específica de corte (K_{s1} e K_{s2}) para as condições usinadas e assim obteve-se os gráficos das Figuras 28 e 29.

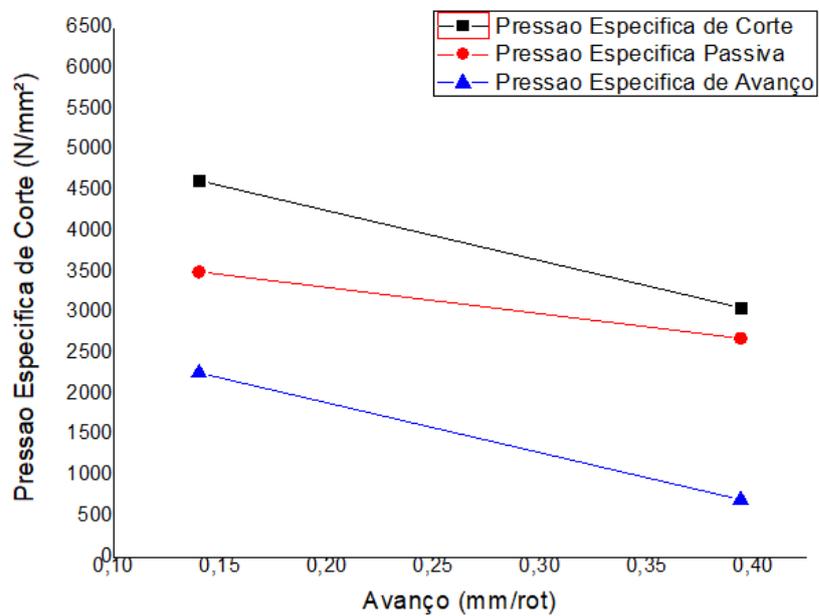


(a)

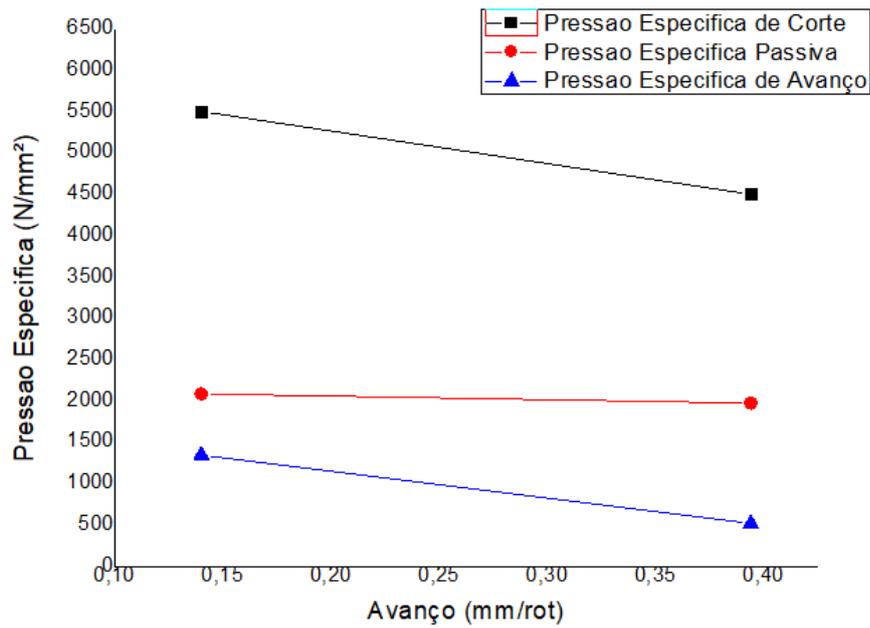


(b)

Figura 28: Pressões específicas no UNS S31803: (a) Ks1 com $a_p = 0,13$ mm e (b) Ks2 com $a_p = 0,13$ mm.



(a)



(b)

Figura 29: Pressões específicas no UNS S31803: (a) Ks1 com $a_p = 0,25\text{mm}$ e (b) Ks2 com $a_p = 0,25\text{ mm}$.

A Tabela 20 especifica os valores que foram calculados para os Ks1 e Ks2 práticos, visando sua comparação com os valores teóricos tabelados, calculando assim a diferença entre valores experimentais e práticos.

Tabela 20: Pressão Específica de Corte no aço duplex UNS S31803

Profundidade de corte (mm)	Avanço (mm/rot)	Ks teórico (Ks1 = Ks2)	KS1 Prático	KS2 Prático	Erro KS1 (%)	Erro KS2 (%)
0,13	0,14	4286	4.847	4.501	-13%	-5%
0,13	0,394	3280	2.813	3.483	14%	-6%
0,25	0,14	5552	4.626	5.507	17%	1%
0,25	0,394	3782	3.062	4.503	19%	-19%

4.2.4 Comparação entre materiais

Em todas as análises efetuadas, ficou evidente que quanto maior o avanço, maior a força de corte, considerando uma mesma profundidade de corte. De acordo com VIEIRA

(2001), com o aumento da profundidade de corte, igualmente se eleva a taxa de remoção de material, bem como a área de contato entre o cavaco e a ferramenta, onde o cavaco encontra uma restrição ao seu deslizamento sobre a superfície de saída, de tal maneira que causa um aumento das componentes da força de usinagem. Outro fator que contribui para a elevação da força de corte é o aumento progressivo do fluxo de material na zona de cisalhamento, que tende a gerar tensões normais elevadas, o que dificulta ainda mais a saída do material. O comparativo entre as forças de corte, considerando uma mesma profundidade de corte e o aumento do avanço, evidencia o aumento da força de corte (F_c) ao longo do processo encontra-se nas Figuras 30 e 31.

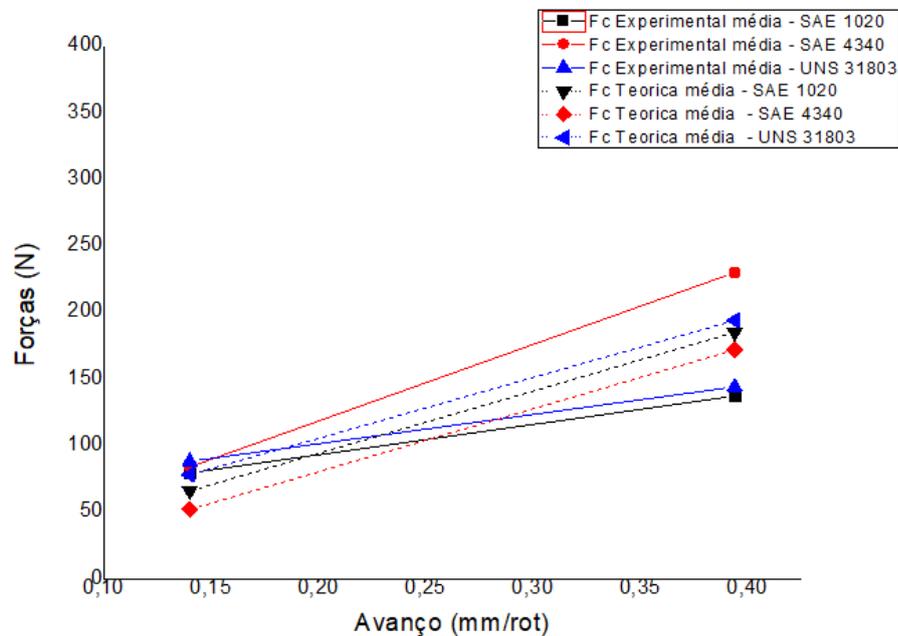


Figura 30: Comparação da Força de Usinagem Média experimental dos materiais analisados, considerando $ap = 0,13$ mm.

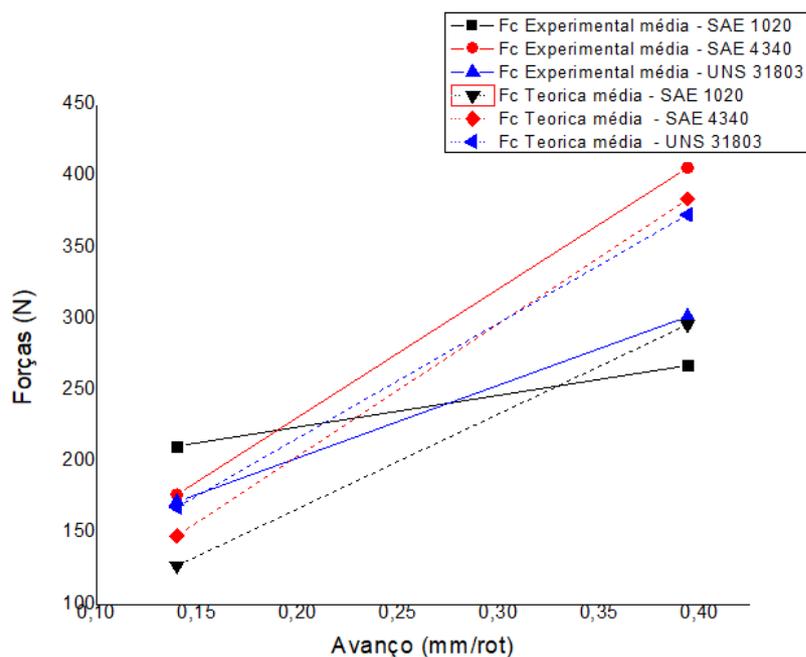


Figura 31: Comparação da Força de Usinagem Média experimental dos materiais analisados, considerando $ap = 0,25$ mm.

Segundo a Teoria do Corte Ortogonal, existe uma relação entre a tensão de cisalhamento na ruptura do material, o grau de recalque e a pressão específica de corte. O aumento da pressão específica não é diretamente proporcional ao aumento da tensão de cisalhamento. Com o aumento da resistência mecânica, os materiais tendem a perder plasticidade e o valor do recalque diminui e essa resultante de perda de plasticidade e recalque influencia nos valores das forças de usinagem. Mesmo sob mesmas condições de corte, os materiais podem apresentar valores de força de usinagem diferente. Observando as Figuras 27 e 28 nota-se que o aço SAE 4340 apresenta maior aumento de força de usinagem com o aumento da profundidade de corte, devido a sua composição química. Mesmo sendo um aço com elevado teor de elementos de liga, o aço inoxidável duplex apresentou comportamento semelhante ao aço SAE 1020 devido à alta plasticidade que apresenta durante o corte. Contudo, esse material apresentou tendência à formação de cavacos tipo fita, que são prejudiciais para a integridade da peça e da ferramenta de corte.

Outro ponto a ser destacado é a elevação da rugosidade superficial à medida que o avanço e a profundidade de corte eram aumentados, corroborando assim a influência destes fatores nas forças de corte, que sofreu aumento significativo de forma direta.

Em relação à pressão específica de corte, ficou evidenciada a sua relação inversa com as forças, tendo em vista que, quanto maior era a força de corte (F_c) aplicada, menor era a

pressão. O experimento também mostrou que K_{s1} e K_{s2} assumiram valores distintos na prática, gerando em alguns casos grandes divergências com os valores propostos na teoria, de acordo com os cálculos da Equação 2.11. Isso pode ocorrer por má centralização da peça no torno, folga na marcação das profundidades de corte, vibrações no sistema, erro na leitura da medição do diâmetro.

Todos os experimentos foram realizados sem fluido de corte, uma vez que o a temperatura é fator de grande influência no processo de torneamento. Desta forma, os materiais analisados podem ter sofrido alterações microestruturais ao longo do próprio experimento, aumentando suas durezas superficiais, em função da exposição à temperatura. Assim, uma possível solução para medir este efeito real seria a repetição do experimento com fluido de corte, além de repeti-los mais vezes, para definir o comportamento do material e sua usinabilidade.

Capítulo 5

Conclusões

Após a realização dos experimentos e da obtenção dos resultados deste trabalho, junto ao conhecimento atual da influência dos parâmetros de corte na geração das forças de usinagem, pode-se concluir que:

1. Mesmo com os preparos, os diâmetros iniciais de cada amostra tiveram pequenas variações, o que na prática levou a valores de K_{s1} e K_{s2} distintos.
2. A força de corte é um dos principais pontos a ser observado no processo de usinagem, pois influencia o desenvolvimento de mecanismos de desgaste e podem determinar o colapso da ferramenta utilizada.
3. Conforme esperado, quanto maior a força de corte aplicada, menor será a pressão específica de corte, pois existe uma relação inversamente proporcional entre ambas. Contudo, cada material apresenta seu comportamento e isso deve ser levado em consideração na determinação dos parâmetros de corte.
4. Pelos experimentos foi observado que, nos aços SAE 1020 e 4340, a força de corte (F_c) foi a maior de todas, acompanhada pelas forças passivas (F_p) e de avanço (F_f). A exceção foi o aço inoxidável duplex, que apresentou a força passiva superior à força de corte. Um possível motivo para tal fenômeno ter ocorrido são as vibrações do sistema, ou alguma alteração na superfície do material.
5. Após a comparação dos três materiais, verificou-se que o aço SAE 4340 foi o que requereu maiores forças de corte para a execução do torneamento. Já o aço SAE 1020, por ter maior ductilidade, foi o que exigiu menores forças de corte. O aço inoxidável duplex comportou-se de forma similar ao SAE 1020, com baixas forças de cortes sendo necessárias para sua usinagem. Isso ocorreu pelo fato de que ele apresenta alta plasticidade.

Capítulo 6

Sugestões para trabalhos futuros

1. Analisar o desgaste das ferramentas usadas neste trabalho.
2. Realizar mais usinagens para obtenção de dados mais precisos a respeito das forças de corte.
3. Realizar ensaios de dureza das amostras usinadas, para verificar se há modificação superficial pela alta temperatura no corte;
4. Realizar estudo das tensões residuais em profundidade para melhor avaliar os efeitos da profundidade de corte.
5. Realizar o mesmo experimento usando fluido de corte, para verificar qual a influência da temperatura durante o torneamento.

Referências Bibliográficas

ABNT NBR NM 87:2000; “Aço carbono e ligados para construção mecânica-Designação e composição química”. Disponível em <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=9638> >. Acesso em: 22/01/2018.

ALVAREZ – ARMAS, I. “Duplex Stainless Steels: Brief history and some recent alloys”. *Recent Patens on Mechanical Engineering*, Vol. 1, pp. 51-57, 2008.

ANAZAWA, R.M., et al, “Caracterização Microestrutural E Mecânica Dos Aços 4340 e 300m Após Tratamentos Térmicos Isotérmicos E Intercríticos”, *VI Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico*, Atibaia-SP, 2012.

ASLAN, E., CAMUSCU, M., e BIRGÖREN, B., “Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with Al₂O₃ + TiCN mixed ceramic tool,” *Materials & Design* 28, pp. 1618-1622, 2007.

ASTM A240; “Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications”. Disponível em <<https://pt.scribd.com/document/225659312/ASTM-A240-pdf>> Acesso em: 24/01/2018.

BARBOSA, M., SOUZA, R., “Análise das Tensões Residuais Geradas no Torneamento em Altas Velocidades de um Aço SAE 4140”. CEFET/RJ, Rio de Janeiro – RJ, 2016.

BARROS, R.A., “Caracterização de um aço SAE/AISI 4340 com diferentes microestruturas”. *Rev. Bras. Apl. Vac.*, Vol. 34, N°2, pp. 71-74, 2015.

BORELLI, J.E.; FRANÇA, C.A.; MEDEIROS, C.F.; GONZAGA, A., “Análise da temperatura na região de contato entre a peça e a ferramenta”, *Revista Máquinas e Metais*, vol, 420, pp. 114-125, 2001.

CERVELIN, J.E. “Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento.” Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

COPPINI, N.L., & COSTA, D.D., “Combinacao de Tempera e Torneamento de Aços, um Processo Alternativo”, *Revista Maquinas e Metais*, v. 349, n. 1, pp. 40-53, 1995.

D. Ferraresi, *Fundamentos da Usinagem dos Metais*, vol. 1, 751p, São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

DANIELSEN, H. K., HALD, J. “On the nucleation and dissolution process of Z-phase Cr (V,Nb)N in martensitic 12%Cr steels.” *Materials Science & Engineering: A*, Vol. 505, No. 1-2, pp. 169-177, 2009.

ESPANHOL, V., “Análise dos esforços de corte e acabamento superficial de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra cavaco”. Universidade do Rio Grande do Sul. Faculdade de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, 2008.

FREITAS, R.C, RODRIGUES, L.M., VELOSO, R. R., “Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060”. Centro Universitário de Volta Redonda, Rio de Janeiro, 2016.

HUANG, C.S., SHIH, C.C. “Effects on nitrogen and high temperature aging on sigma phase precipitation of duplex stainless steel”. *Materials Science and Engineering*, v. A402, pp. 66-75, 2005.

INGA PROJETOS, “Forças, pressão específica e potência de corte”. Disponível em: <ingaprojetos.com.br/download/processo%20de%20usinagem.pdf>. Acesso em 18/05/2018.

LIMA, A. O: “Refrigeração por LN₂ no torneamento do aço inoxidável super duplex ASTM A890”. *Revista Máquinas e Metais*, v. 615, n. 1, pp. 28-32, 2017.

MACHADO, A. R., DA SILVA, M. B., *Usinagem dos Metais*, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 8ª ed., 257p, 2004.

MACHADO, A., COELHO, R. C., ABRÃO, A. M., DA SILVA, M. B. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Editora Edgar Blücher Ltda, 2009.

MAGNABOSCO, R. “Kinetics of Sigma Phase Formation in a Duplex Stainless Steel”. *Materials Research*, v. 12, p. 321-327, 2009.

- MARTINS, M., CASTELETTI, L. C. “Aços inoxidáveis duplex e super duplex – Obtenção e caracterização”. *Revista Fundição e Serviços*, n 169. Rio de Janeiro – RJ, 2007.
- NASCIMENTO, A.M., MACHADO, J.P.S.E., SOBRAL, A.V.C., ABREU, H.F.G. “Estudo das transformações de fases do aço inoxidável duplex UNS 31803 quando submetido a altas temperaturas”. *Ver Technol.*, Vol 24, pp.13-22, 2003.
- NEVES, J.A., “Desenvolvimento de um dispositivo eletromecânico para troca automática de ferramentas em centros de torneamento cnc”. Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2005.
- RODRIGUES, J.R.P, et al, “Investigação Da Usinabilidade De Aços E Ligas Não-Ferrosas”. *Pesquisa em Foco*, v. 17, n.2, p. 53-59, 2009.
- SANDVIK STEEL. Corrosion Handbook Stainless Steel. Sandvikens Tryckeri, Suécia. Março, 1999.
- SANTOS, B. A. “Torneamento Ortogonal do Aço ABNT 1020.” Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- SIEURIN, H., SANDSTROM, R. “Austenite reformation in hea-affected zone of duplex stainless steel 2205”. *Materials Science and Engineering*, v. A418, pp.250-256, 2006.
- STEMMER, C.E. Ferramentas de Corte I. Editora da UFSC, 6ª Edição, Florianópolis,
- SUAREZ, M.P.; COSTA, E.S.; MACHADO, A.R., “Influência dos Parâmetros de Corte no Acabamento de Canais em Alumínio Aeronáutico 7075-T7”, V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM, Salvador – BA, 2008.
- TRENT, E.; WRIGHT, P. Metal Cutting. 4th ed. Massachusetts: Butterworth Heinemann Publications, 2000.
- V. Chiaverini, Tecnologia Mecânica - Materiais de Construção Mecânica, vol. 3, São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- VIEIRA, J.M., MACHADO, A.R.; EZUGWU. E.O. “Performance of cutting fluids during face milling of steels”. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 16, p.244–251, 2001.

ANEXO I: Tabelas

Tabela 21: Pressão específica de corte para os aços analisados. (INGA PROJETOS, 2016).

Material group	Strength (N/mm ²)	Material		Specific cutting force k_c (N/mm ²) depending on cutting thickness t (mm)											
		Material no.	Material designation according to DIN	$k_{c,1.1}$	n	0.05	0.06	0.1	0.16	0.3	0.4	0.5	0.8	1.6	2.5
1.0	Gen. structural steel	1.0037	St 37-2	1.780	0.17	2.962	2.872	2.633	2.431	2.253	2.080	2.003	1.849	1.643	1.523
1.1	Gen. structural steel	1.0050	St 50-2	1.990	0.26	4.336	4.136	3.621	3.206	2.854	2.525	2.383	2.109	1.761	1.568
		1.0060	St 60-2	2.110	0.17	3.511	3.404	3.121	2.861	2.671	2.466	2.374	2.192	1.948	1.806
2.0	Free cutting steel	1.0070	St 70-2	2.260	0.30	5.552	5.256	4.509	3.916	3.426	2.975	2.782	2.416	1.963	1.717
3.0	Unalloyed heat treatable steel	1.0718	93MnNb28	12.00	0.18	1.997	1.844	1.775	1.639	1.473	1.402	1.350	1.346	1.108	1.027
		1.0412	C 22	1.800	0.16	2.907	2.823	2.602	2.413	2.247	2.084	2.011	1.865	1.670	1.555
		1.0591	C 35	1.516	0.27	5.256	3.621	2.823	2.496	2.204	1.942	1.828	1.610	1.335	1.184
3.1	Unalloyed heat treatable steel	1.0503	C 45	1.680	0.26	3.661	3.491	3.057	2.705	2.409	2.132	2.012	1.780	1.487	1.324
		1.1191	Ck 45	2.220	0.14	3.371	3.292	3.064	2.869	2.606	2.524	2.446	2.290	2.079	1.953
3.2	Unalloyed heat treatable steel	1.1211	Ck 60	2.130	0.18	3.662	3.534	3.224	2.962	2.734	2.512	2.413	2.217	1.957	1.806
4.1	Alloyed heat treatable steel	1.7218	25CrMo4	2.070	0.25	4.373	4.182	3.681	3.273	2.927	2.603	2.462	2.189	1.841	1.646
		1.7215	42CrMo4	2.500	0.26	5.448	5.195	4.549	4.026	3.916	3.173	2.907	2.649	2.212	1.970
5.0	Unalloyed case hardening steel	1.0001	C 15	1.820	0.22	3.518	3.380	3.000	2.724	2.469	2.220	2.120	1.912	1.641	1.486
6.0	Alloyed case hardening steel	1.5919	15CrNi6	1.380	0.30	3.390	2.944	2.753	2.391	1.980	1.817	1.699	1.476	1.199	1.048
		1.7131	16MnCr15	2.100	0.20	4.379	4.304	3.621	3.302	3.011	2.665	2.515	2.225	1.858	1.655
6.1	Alloyed case hardening steel	1.7147	20MnCr5	2.140	0.25	4.526	4.324	3.806	3.384	3.026	2.691	2.545	2.263	1.903	1.702
		1.7262	15CrNi05	2.290	0.17	3.811	3.694	3.387	3.127	2.899	2.676	2.576	2.379	2.114	1.960
7.0	Nitride steel	1.8507	34CrAlMo5	1.740	0.26	3.792	3.616	3.166	2.802	2.495	2.206	2.064	1.844	1.540	1.371
8.0	Tool steel	1.1710	C 45W	1.680	0.26	3.666	3.491	3.067	2.705	2.409	2.132	2.012	1.780	1.487	1.324
		1.2067	1.00Cr6	1.410	0.30	4.535	3.776	3.461	2.881	2.255	2.016	1.846	1.538	1.174	0.66
8.1	Tool steel	1.2312	40CrMnMoS8-6	1.800	0.27	4.042	3.847	3.352	2.952	2.617	2.326	2.170	1.912	1.585	1.405
		1.2842	90MnCrV	2.300	0.21	4.315	4.153	3.730	3.380	3.027	2.788	2.650	2.410	2.064	1.897
8.2	Tool steel	1.2080	X210Cr12	1.820	0.26	3.966	3.782	3.312	2.931	2.610	2.310	2.179	1.929	1.611	1.434

Material group	Strength (N/mm ²)	Material		Specific cutting force kc (N/mm ²) depending on cutting thickness h													
		Material no.	Material designation according to DIN	kc1.1	m	[mm]											
						0.06	0.1	0.16	0.3	0.4	0.5	0.8	1.6	2.5			
12.0	Spring steel	1.5023	35S7	1.800	0.27	4.042	3.352	2.952	2.617	2.305	2.170	1.912	1.585	1.405			
		1.8159	50CrV4	2.220	0.26	4.925	4.113	3.639	3.241	2.868	2.706	2.395	2.000	1.761			
13.0	Stainless steel, sulphured	1.4104	X14CrMnS17	1.800	0.26	3.066	3.312	2.081	2.610	2.310	2.179	1.929	1.611	1.434			
13.1	Stainless steel, austenitic	1.4301	X5CrNi18 10	2.350	0.21	5.552	4.243	3.782	3.453	3.144	2.840	2.718	2.463	2.129			
		1.4401	X5CrNiMo17 12	2.600	0.19	4.594	4.427	4.027	3.683	3.383	3.094	2.966	2.713	2.185			
13.2	Stainless steel, austenitic	1.4094	X4CrNi13	1.800	0.26	3.966	3.782	3.312	2.931	2.610	2.310	2.179	1.929	1.611			
13.3	Stainless steel, martensitic / ferritic	1.4028	X30Cr13	1.800	0.26	3.066	3.782	3.312	2.931	2.610	2.310	2.179	1.929	1.611			
		2.4631	NC120TiAl	2.088	0.29	4.976	4.721	4.071	3.553	3.121	2.724	2.553	2.228	1.601			
15.0	Cast iron (GG) (lamellar graphite)	0.6020	GG 20	1.020	0.25	2.157	2.081	1.814	1.613	1.442	1.289	1.213	1.079	811			
15.1	Cast iron (GG) (lamellar graphite)	0.6040	GG 40	1.470	0.26	3.203	3.055	2.675	2.367	2.108	1.865	1.760	1.558	1.301			
15.2	Cast iron (GGG, GT) (spheroidal graphite, malleable cast iron)	0.7090	GGG-40	1.005	0.25	2.125	2.031	1.787	1.589	1.421	1.264	1.195	1.068	804			
		0.8040	GTW-40	2.060	0.19	3.640	3.576	3.191	2.918	2.681	2.452	2.350	2.149	1.884			
15.3	Cast iron (GGG, GT) (spheroidal graphite, malleable cast iron)	0.7080	GGG-80	1.132	0.44	4.230	3.004	3.118	2.535	2.083	1.694	1.536	1.240	921			
		0.8165	GT5-65	1.180	0.24	2.422	2.318	2.051	1.882	1.646	1.470	1.394	1.245	1.084			
16.1	Ti, Ti alloys	3.7164	TiAl6V4	1.370	0.21	2.570	2.378	2.222	2.013	1.764	1.661	1.585	1.436	1.241			
17.0	Al, Al alloys	3.3525	AlMg3	780	0.23	1.554	1.490	1.325	1.189	1.073	0.953	0.15	821	700			
		3.1325	AlCuMg1	780	0.23	1.554	1.490	1.325	1.189	1.073	0.953	0.15	821	700			
17.1	Cast alumin. alloys Si<10%	3.2381	G-AlSi10Mg	830	0.23	1.653	1.585	1.410	1.265	1.142	1.025	973	874	745			
17.2	Cast alumin. alloys Si>10%	3.2581	G-AlSi12	830	0.23	1.653	1.585	1.410	1.265	1.142	1.025	973	874	745			
19.1	Brass, short-chipping	2.0380	CuZn30Pb2	780	0.18	1.337	1.294	1.181	1.065	1.001	920	864	812	717			
19.3	Bronze, short-chipping	2.1000	CuSn7Zn5Pb	640	0.25	1.353	1.293	1.138	1.012	905	805	761	677	569			