

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
ENGENHARIA METALÚRGICA

KARINA BONAMI VICENTE

METODOLOGIA PARA O ENSAIO DE USINABILIDADE DE LIGAS TRATADAS
TERMICAMENTE

TRABALHO DE FORMATURA

SÃO PAULO

2021

KARINA BONAMI VICENTE

METODOLOGIA PARA O ENSAIO DE USINABILIDADE DE LIGAS TRATADAS
TERMICAMENTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito da disciplina PMT3595 — Trabalho de Formatura II, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Lima Stoeterau

Co-orientador: Prof. Dr. Hélio Goldenstein.

SÃO PAULO

2021

RESUMO

Os aços de construção mecânica são amplamente empregados na indústria, sendo que o SAE 4340 possui aplicações específicas na fabricação de eixos, engrenagens, mangas e cilindros devido à sua boa resistência à fratura e elevada resistência à fadiga. Entender a usinabilidade de um material como este, é de suma importância para a metalurgia, por conta disto, o presente trabalho estudará uma metodologia para ensaios de usinabilidade de ligas, como a SAE 4340, tratadas termicamente.

Palavras-chave: Usinabilidade; Torneamento; Metodologia; Tratamento térmico; Normalização.

ABSTRACT

Mechanical construction steels are widely used in industry, and SAE 4340 has a specific program in the manufacture of shafts, gears, sleeves, and cylinders because of its good fracture resistance and high fatigue strength. Understanding the machinability of a material like this is of paramount importance for metallurgy, because of this, the present work seeks to study a methodology for testing the machinability of heat-treated alloys, such as SAE 4340.

Keywords: Machinability; Turning; Methodology; Heat treatment; Normalization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tabela de Classificação dos aços (GERDAU, 2020)	13
Figura 2 - Tabela dos tratamentos térmicos para aços(Tschiptschin).	17
Figura 3 - Plaina Neolítica de 6000 A.C.(Stoeterau, 2004)	18
Figura 4 - Classificação dos processos de fabricação(MACHADO, ABRÃO, COELHO, SILVA, & RUFFINO, 2009).....	19
Figura 5 - Torno Mecânico Horizontal(CERVELIN, 2009).	20
Figura 6 - Vista Explodida de um torno mecânico convencional(STOETERAU, 2007).	21
Figura 7 - Alinhamento entre o cabeçote móvel e a placa em um torno(STOETERAU, 2007).	22
Figura 8 - Alinhamento entre a placa e o castelo porta ferramenta(STOETERAU, 2007).	23
Figura 9 - Operações de Torneamento(STOETERAU, 2007).	23
Figura 10 - Efeitos da Geometria de ferramenta na amplitude de vibração(SANDVIK COROMANT).	25
Figura 11 - Fluxograma do processo de usinabilidade de ligas tratadas termicamente.....	27
Figura 12 - Material na forma bruta separado para os experimentos.....	28
Figura 13 - Certificado de análise química disponibilizado pela empresa INOVAPLAST.....	29
Figura 14 - Gráfico de porcentagem de formação de austenita para o aço SAE 4340 simulado no QFORM.....	30
Figura 15 - Simulação do THERMO-CALC para definir a temperatura de total austenitização.	31
Figura 16 - Na imagem A encontra-se o modelo do forno utilizado, na B a condição dos arames para a retirada do material, na C o posicionamento no forno e na D a condição de resfriamento ao ar livre.	32
Figura 17 - Corte das seções destinadas à análise metalográfica e MEV.	33
Figura 18 - Corpo de prova pronto para a análise metalográfica e MEV.....	33
Figura 19 - Representação das áreas de análise no Microscópio Óptico e MEV.....	34
Figura 20 - Modelo da pastilha de corte utilizada nos experimentos.	35
Figura 21 - Imagem da Pastilha CNMG 1204 08-PM 4025 usada nos experimentos.	35
Figura 22 - Torno utilizado para a usinagem dos corpos de prova e testes em dinamômetro.	36
Figura 23 - Modelo do amplificador de sinal utilizado.....	36
Figura 24 - Modelo do dinamômetro utilizado.	37
Figura 25 - Sistema de aquisição de dados.	37
Figura 26 - Representação gráfica do Corpo de Prova.	38
Figura 27 - Geometria final do corpo de prova.	38

Figura 28 - Posicionamento da ferramenta de corte no experimento de usinagem. .	39
Figura 29 - Material fixado no torno com o faceamento e furo de centro prontos.	39
Figura 30 - Usinagem da geometria do corpo de prova.	40
Figura 31 - Disposição do maquinário utilizado e do sistema de aquisição de dados.	40
Figura 32 - Vetorial dos esforços de corte (PMR2202 - Fundamentos dos Processos de Usinagem).....	42
Figura 33 - Ensaio de torneamento com 0,5 mm de profundidade para aço SAE 4340 laminado.....	42
Figura 34 - Ensaio de torneamento com 1 mm de profundidade para aço SAE 4340 laminado.....	43
Figura 35 - Ensaio de torneamento com 1,5 mm de profundidade para aço SAE 4340 laminado.....	43
Figura 36 - Ensaio de torneamento com 0,5 mm de profundidade para aço SAE 4340 normalizado.....	43
Figura 37 - Ensaio de torneamento com 1 mm de profundidade para aço SAE 4340 normalizado.....	44
Figura 38 - Ensaio de torneamento com 1,5 mm de profundidade para aço SAE 4340 normalizado.....	44
Figura 39 - Perfilômetro usado no processo de análise de rugosidade.....	45
Figura 40 - Micrografia do aço 4340 laminado com aumento de 200x, ataque com Nital 2%.....	46
Figura 41 - Micrografias do aço 4340 em duas condições, com aumento de 1000x, ataque com Nital 2%.	47
Figura 42 - Imagens do MEV do aço 4340 em duas condições, com aumento de 10.000x, ataque com Nital 2%.....	48
Figura 43 - Gráfico de comparação da máxima força de avanço.....	49
Figura 44 - Gráfico de comparação da máxima força passiva.	49
Figura 45 - Gráfico de comparação da máxima força de corte.	50
Figura 46 - Gráfico dos valores médios da força de avanço.	50
Figura 47 - Gráfico dos valores médios da força passiva.....	51
Figura 48 - Gráfico dos valores médios da força de corte.....	51
Figura 49 - Gráfico comparativo das forças de usinagem.	52
Figura 50 - Corpo de prova para medida de microdureza.....	53
Figura 51 - Microscopia das indentações para análise de microdureza.....	53
Figura 52 - Gráfico comparativo de Microdureza Vickers do Material	55
Figura 53 - Comparativo das saídas do Cavaco em Cada profundidade.	56
Figura 54 - Análise da superfície do Material Normalizado	57
Figura 55 - Análise da Rugosidade do Material sem tratamento térmico.	57
Figura 56 - Representação do rastro deixado pela ferramenta.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades Mecânicas do SAE 4340(Granta Design Limited., 2019)...	14
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do SAE 4340 Normalizado(Granta Design Limited., 2019).....	15
Tabela 3 - Composição Química da SAE 4340(ASM, 2005).....	15
Tabela 4 - Comparativo de composições químicas entre o Metals Handbook e o certificado disponibilizado pela INOVAPLAST.	29
Tabela 5 -Valores máximos do ensaio de torneamento em N.....	49
Tabela 6 - Valores médios do ensaio de torneamento em N.	50
Tabela 7 - Dados de Microdureza	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	DEFINIÇÃO DE LIGAS DE AÇO	12
2.1.1	Classificação dos aços	12
2.1.2	Aço SAE 4340	13
2.2	TRATAMENTOS TÉRMICOS	16
2.2.1	Definição	16
2.2.2	Normalização	17
2.3	USINABILIDADE	18
2.3.1	Histórico dos Processos de Usinagem	18
2.3.2	Usinagem Convencional	19
2.3.3	Torneamento Mecânico	20
2.3.4	Ferramentas de Torneamento	24
2.3.5	Fatores que Influenciam na Usinagem	25
3	METODOLOGIA	26
3.1	OBJETIVOS DO PROJETO	26
3.2	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	26
3.2.1	Definição do Processo	28
3.2.2	Ensaio	38
3.2.3	Forças de Corte	41
3.2.4	Perfilômetro	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	ANÁLISE DAS MICROGRAFIAS	46
4.2	ANÁLISE DO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA	47
4.3	ANÁLISE DOS ESFORÇOS DE CORTE	48
4.4	MICRODUREZA	52
4.5	ANÁLISE DE SAÍDA DE CAVACO	56
4.6	RUGOSIDADE	57
5	COMENTÁRIOS FINAIS	59
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos processos metalúrgicos mais antigos da humanidade, e sua importância percorre a linha do tempo se adaptando às condições de vida e às necessidades da sociedade. Fato é, que após a revolução industrial foi necessário criar métodos mais eficazes de produção que aproveitassem ao máximo o desempenho das ferramentas e materiais. Com isso se tornou necessário o estudo da usinabilidade de ligas para se obter a melhor produtividade possível na produção mecânica. Este trabalho visa estudar uma metodologia eficaz para definir as melhores condições de usinagem de aços de médio carbono.

Associando as características metalúrgicas dos materiais e sua usinabilidade é de grande utilidade na indústria da manufatura, visto que tais fatores implicam diretamente na vida útil das ferramentas, acabamento superficial, tolerâncias e desempenho do maquinário de fabricação.

Os aços de médio carbono tratados termicamente possuem uma demanda alta na indústria automobilística, aeroespacial, e na construção de maquinários-ferramenta. Isto é graças a sua alta resistência mecânica, estabilidade térmica e elevada tenacidade.

Entender como o processo de torneamento pode ser mais eficaz diminuir etapas de fabricação, pois com a relação ferramenta-material-parâmetro de corte correta pode-se finalizar tolerâncias dimensionais críticas sem a necessidade de retificação. Além disso, entender como os materiais tratados termicamente reagem aos esforços de corte abre uma ampla gama de possibilidades na manufatura e no desenvolvimento de novas ferramentas e ligas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DEFINIÇÃO DE LIGAS DE AÇO

Aplicações para os aços são facilmente encontradas diariamente, desde um semieixo de caminhão até uma agulha. Os aços, geralmente são ligas metálicas a base de ferro e carbono, contendo no mínimo 0,008% de carbono e no máximo de 2% do mesmo (GERDAU, 2019).

Existem milhares categorias de aços, e o que diferenciam eles são as suas composições químicas, microestruturas, tratamentos térmicos, condições de manufatura, geometria, etc. Basicamente três classificações os diferenciam quimicamente são elas: os aços de baixa-liga, aços de alta-liga e os de média-liga.

2.1.1 Classificação dos aços

Por conta da abundância de ligas de aço, foi necessário criar uma nomenclatura para cada tipo, atualmente têm-se os sistemas de classificação SAE/AISI, que são normas americanas, e a ABNT, que é a norma brasileira para nomear cada tipo.

Geralmente, são utilizados quatro algarismos da forma ABXX, onde A e B representam os principais elementos dessa liga e suas porcentagens em relação ao peso. Os dois algarismos finais indicam a porcentagem de carbono na composição do peso multiplicada por 100. Na tabela a seguir, têm-se as designações das principais categorias de aços e suas classificações.

Designação		Tipos de Aço
SAE	AISI/ABNT	
10XX	10XX	Aços carbono comuns, com máximo 1% Mn
11XX	11XX	Aços resulfurados de corte fácil, alta % S
13XX	13XX	Aços manganês com 1,75% Mn
23XX	23XX	Aços níquel com 3,5% Ni
25XX	25XX	Aços níquel com 5,0% Ni
31XX	31XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	33XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 3,5% de Ni e 1,55% de Cr
40XX	40XX	Aços molibdênio com 0,25% Mo
41XX	41XX	Aços cromo-molibdênio com 0,50 a 0,95% Cr e 0,12 a 0,30% Mo
43XX	43XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,80% Ni, 0,50 a 0,80% Cr e 0,25% Mo
46XX	46XX	Aços níquel-molibdênio com 1,80% Ni, 0,50 a 0,80% Cr e 0,25% Mo
47XX	47XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,05% Ni, 0,45 % Cr e 0,20 a 0,35% Mo
48XX	48XX	Aços níquel-molibdênio com 3,5% Ni e 0,25% Mo
50XX	50XX	Aços cromo com 0,27 a 0,65% Cr
50BXX	50BXX	Aços cromo-boro com 0,5% Cr e de 5 a 30 ppm B (^o)
51XX	51XX	Aços cromo com 0,8 a 1,05% Cr
51XXX	51XXX	Aços cromo com 1,0 % Cr e 1,0% min C
52XXX	52XXX	Aços cromo com 1,45 % Cr e 1,0% min C
61XX	61XX	Aços cromo-vanádio 0.60-0.95% Cr e 0,10 a 0,15% V
86XX	86XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 0,55% Ni, 0,5% Cr e 0,20% Mo*
87XX	87XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 0,55% Ni, 0,5% Cr e 0,25% Mo
92XX	92XX	Aços silício-manganês com 1,4 a 2,0% Si, 0,85 a 0,85% Mn e 0,65% Cr
93XX	93XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 3,25% Ni, 1,20% Cr e 0,12% Mo
94BXX	94BXX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 0,45% Ni, 0,40% Cr, 0,12% Mo e 30 ppm B (*)(^o)
98XX	98XX	Aços níquel-cromo-molibdênio com 1,0 % Ni, 0,80% Cr e 0,25% Mo

Figura 1 - Tabela de Classificação dos aços (GERDAU, 2020)

2.1.2 Aço SAE 4340

Essa liga possui uma resistência mecânica superior ao dos aços carbono, pois os seus elementos de liga além de melhorarem a temperabilidade do material, impactam positivamente na resistência mecânica. A aplicação desta liga, em geral, é em peças que sofrem alta tração, como engrenagens endurecidas, bielas e parafusos, e estrutura de armamentos.

2.1.2.1 Características Mecânicas

Dentre as propriedades deste material as principais seguem:

Tabela 1 - Propriedades Mecânicas do SAE 4340(Granta Design Limited., 2019).

Módulo de Young	205	-	213 GPa
Rigidez específica	26,1	-	27,2 MN.m / kg
Força de escoamento (limite elástico)	420	-	525 MPa
Resistência à tração	670	-	820 MPa
Força específica	53,5	-	66,9 kN.m/kg
Alongamento	17	-	27 %
Resistência à compressão	420	-	525 MPa
Módulo de flexão	205	-	213 GPa
Resistência à flexão (módulo de ruptura)	420	-	525 MPa
Módulo de cisalhamento	79	-	83 GPa
Módulo aparente	158	-	174 GPa
Razão de Poisson	0,285	-	0,295
Fator de forma	50		
Dureza - Vickers	200	-	245 HV
Energia elástica armazenada	427	-	653 kJ/m ³
Resistência à fadiga em 10 ⁷ ciclos	300	-	330 MPa
Modelo de resistência à fadiga (faixa de tensão)	257	-	386 MPa

Dentre as propriedades em destaque tem-se o limite elástico, e a boa resistência à flexão, porém essas características se tornam ainda melhores quando o material passa por tratamento térmico. No caso da normalização o aço tem os seguintes valores de propriedades:

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do SAE 4340 Normalizado(Granta Design Limited., 2019).

Módulo de Young	205	-	213 Gpa
Rigidez	26,1	-	27,2 MN.m/kg
Força de escoamento (limite elástico)	770	-	950 Mpa
Resistência à tracção	1,15 e3	-	1,41 e3 MPa
Força específica	98,1	-	121 kN.m/kg
Alongamento	9	-	15 %
Força compressiva	770	-	950 Mpa
Módulo de flexão	205	-	213 Gpa
Resistência à flexão (módulo de ruptura)	770	-	950 Mpa
Módulo de cisalhamento	79	-	83 Gpa
Módulo de massa	158	-	174 Gpa
Coefficiente de Poisson	0,285	-	0,295
Fator de forma	29	-	
Dureza - Vickers	325	-	405 HV
Energia elástica armazenada	1,43 e3	-	2,14 e3 kJ/m^3
Resistência à fadiga em 10^7 ciclos	472	-	545 Mpa
Modelo de resistência à fadiga (faixa de tensão)	412	-	624 Mpa

2.1.2.2Características Químicas

O aço em questão possui a seguinte composição química:

Tabela 3 - Composição Química da SAE 4340(ASM, 2005).

Carbono	0,38	-	0,43	%
Cromo	0,7	-	0,9	%
Ferro	95,2	-	96,3	%
Manganês	0,6	-	0,8	%
Molibdênio	0,2	-	0,3	%
Níquel	1,65	-	2	%
Fósforo	0	-	0,035	%
Enxofre	0	-	0,04	%
Silício	0,15	-	0,3	%

Dos elementos apresentados anteriormente, temos como destaque o Níquel, que possui a tendência de refinar os grãos, diminuindo também a velocidade de transformação na estrutura do aço. Basicamente este elemento é responsável por aumentar a resistência à tração e a ductilidade de um material; o cromo, que influencia na formação de carbonetos, aumentando as resistências à corrosão e a altas temperaturas; E o molibdênio que impacta na estabilização do carboneto, melhorando a resistência à corrosão por pites. Este também atua no aumento de dureza, resistência à tração e temperabilidade da liga.

2.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

2.2.1 Definição

Segundo o livro *Tratamento Térmico de Aços*, o tratamento térmico pode ser definido como o aquecimento ou resfriamento controlado dos metais realizado com a finalidade de alterar suas propriedades físicas e mecânicas, sem alterar a forma do produto final.

Em geral, os tratamentos térmicos são associados com o aumento de resistência do material, mas a lógica contrária também é possível de ser realizada, como, por exemplo, pode-se tratar termicamente o material para aumentar a sua usinabilidade, ou restauração da sua ductilidade após conformação.

Os tratamentos térmicos podem ser divididos em dois grupos, os de amolecimento e os de endurecimento, sendo que este é para reduzir a dureza do material, remover tensões residuais e melhorar a tenacidade, enquanto o primeiro consiste no aumento da resistência mecânica e resistência ao desgaste do material. Na imagem abaixo pode-se ver os possíveis tratamentos térmicos e termoquímicos para os aços.

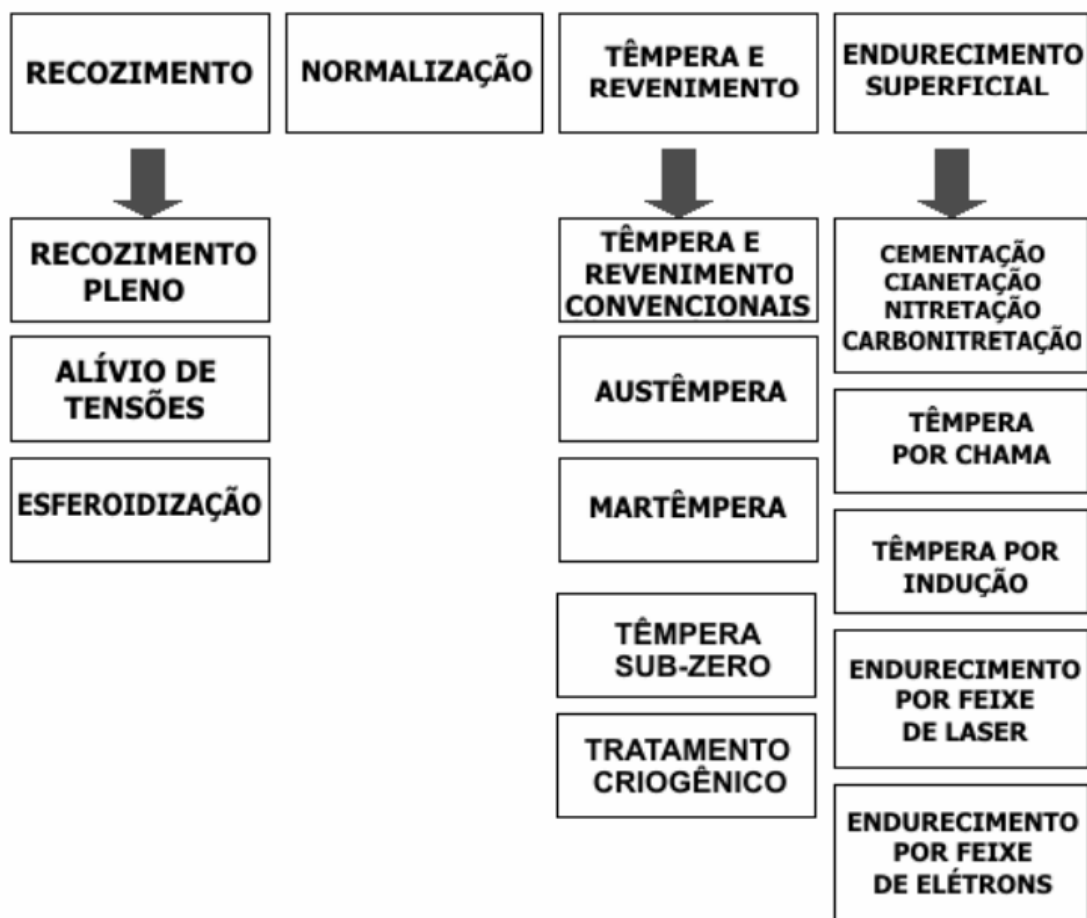


Figura 2 - Tabela dos tratamentos térmicos para aços(Tschiptschin).

2.2.2 Normalização

Este tratamento térmico é geralmente aplicado existindo a necessidade de refinar os grãos do material, promovendo maior homogeneidade das propriedades mecânicas e maior tenacidade. Neste é importante que o material seja aquecido até 60 °C acima do limite superior da zona crítica para garantir a austenitização do volume. Como resultado tem-se grãos de ferrita e perlita fina.

2.3 USINABILIDADE

2.3.1 Histórico dos Processos de Usinagem

Os processos de usinagem são usados pela humanidade desde antes do período Neolítico, sendo que neste tem-se o surgimento da primeira Plaina, datada de 6000 A.C. Fato é que a humanidade evoluiu e os processos de fabricação evoluíram com ela, sendo que este fato foi essencial para construir a sociedade atual.

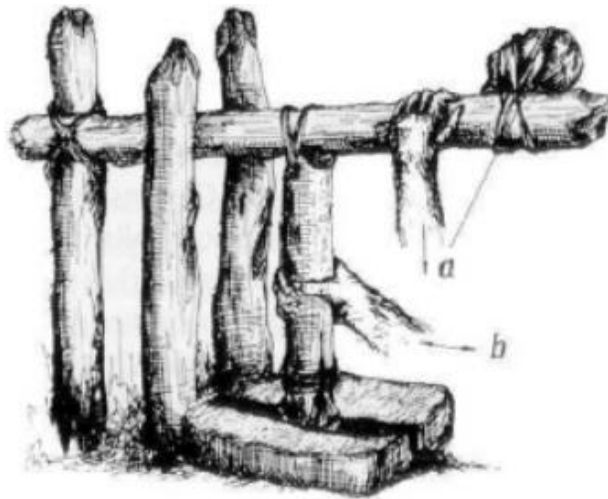


Figura 3 - Plaina Neolítica de 6000 A.C.

Na idade do bronze, começam a surgir os primeiros tornos e com o surgimento de técnicas aprimoradas de metalurgia, a sociedade começou a trabalhar com ferramentas de ferro, e assim os processos de fabricação começaram a se expandir.

O grande foco deste trabalho está no processo de torneamento, que começa a ganhar destaque no século XVI, com o francês Jacques Benson, que em 1569 começou a trabalhar com o torneamento ornamental. Mais adiante, o também francês, Charles Plumier, no século XVIII publica a primeira obra sobre torneamento, e nesta época surgem os primeiros modelos de máquinas operatrizes (Stoeterau, 2004).

No Período da Revolução Industrial, começaram a aparecer novos tipos de aços-ligas que propiciaram o desenvolvimento de melhores, e mais eficazes, ferramentas de corte(MACHADO, ABRÃO, COELHO, SILVA, & RUFFINO, 2009).

2.3.2 Usinagem Convencional

A usinagem é o processo que visa dar forma a uma matéria-prima, através da remoção de material por uma ferramenta cortante. Nos processos de fabricação, a usinagem está classificada como “Manufatura Extrativa”. Na imagem a seguir, tem-se um fluxograma de classificação de processos:

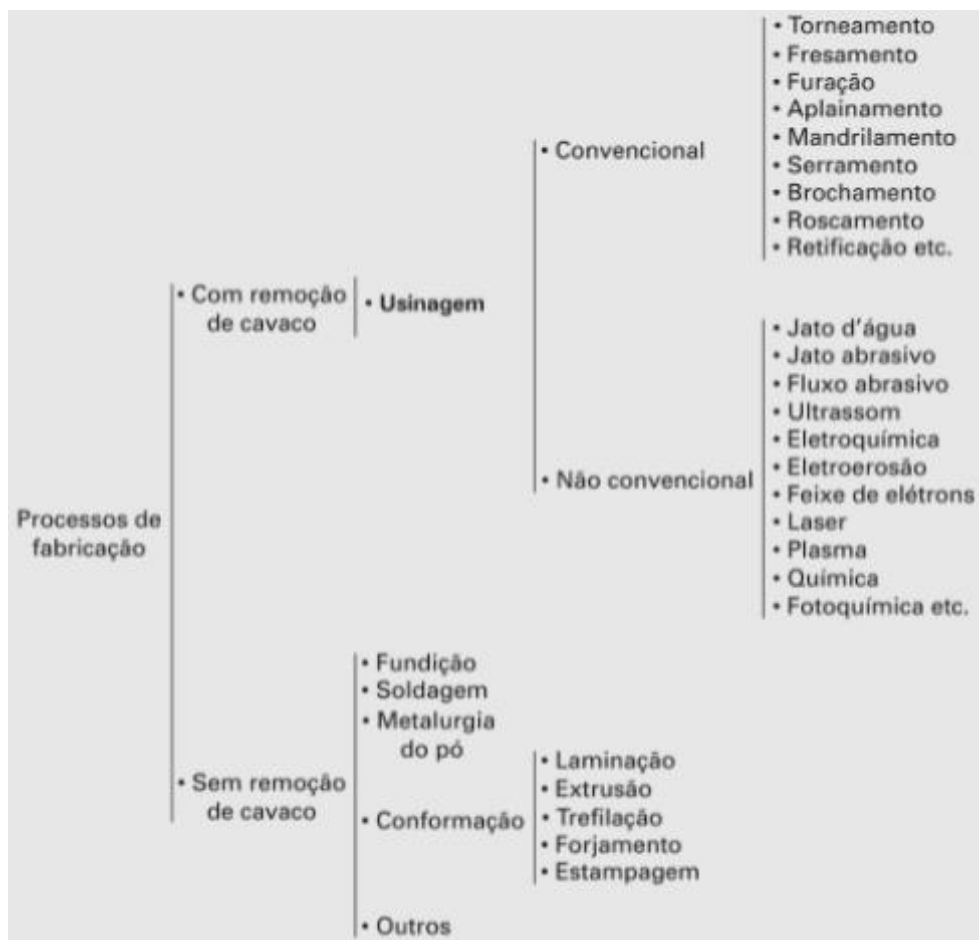


Figura 4 - Classificação dos processos de fabricação(MACHADO, ABRÃO, COELHO, SILVA, & RUFFINO, 2009).

Por usinagem convencional, entende-se todo processo de usinagem que usa máquinas coordenadas por um conjunto de engrenagens, polias, guias e fusos, e para tal, não há o uso de comando numérico para sincronia dos movimentos. As máquinas de usinagem convencionais mais conhecidas são os tornos, fresadoras, retíficas e plainas.

2.3.3 Torneamento Mecânico

O torneamento consiste em um processo de fabricação onde a matéria-prima é presa em uma placa com castanhas sendo rotacionada, enquanto a ferramenta executa um movimento linear para retirar material da mesma. Este processo é usado para se obter superfícies de revolução por meio da ação de uma ferramenta de corte, fixa, sobre uma peça girante(ASM, 1989).

Este processo é um dos mais empregados em trabalhos experimentais sobre usinagem(TRENT & WRIGHT, 2000). Na figura a seguir têm-se as partes de um torno mecânico horizontal modelo universal(CERVELIN, 2009).

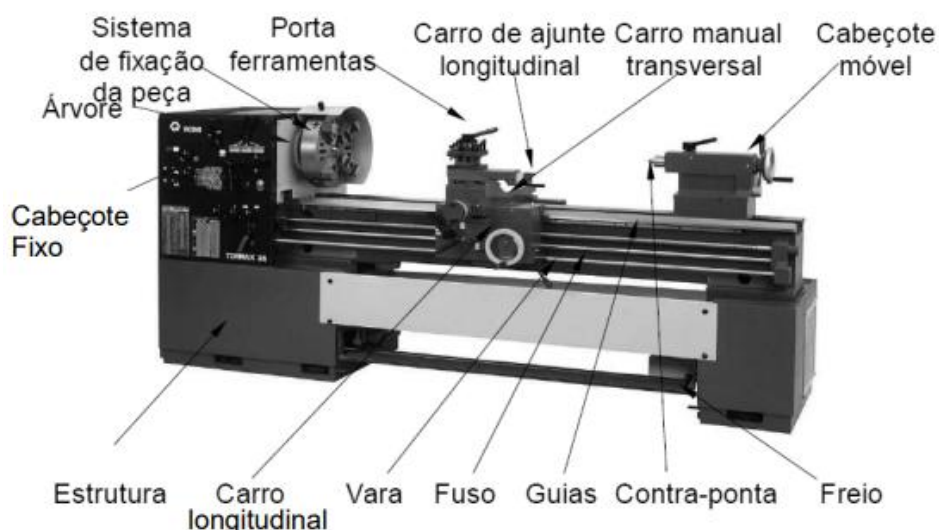


Figura 5 - Torno Mecânico Horizontal. (Stoeterau, 2004)

É de suma importância entender o funcionamento dos mecanismos em um torno mecânico, pois nele está baseado todo o sistema de esforços que a peça está sujeita, e assim pode-se entender a reação dos diferentes materiais a diferentes ferramentas. Na imagem a seguir pode-se analisar o esquema de montagem dessa máquina.

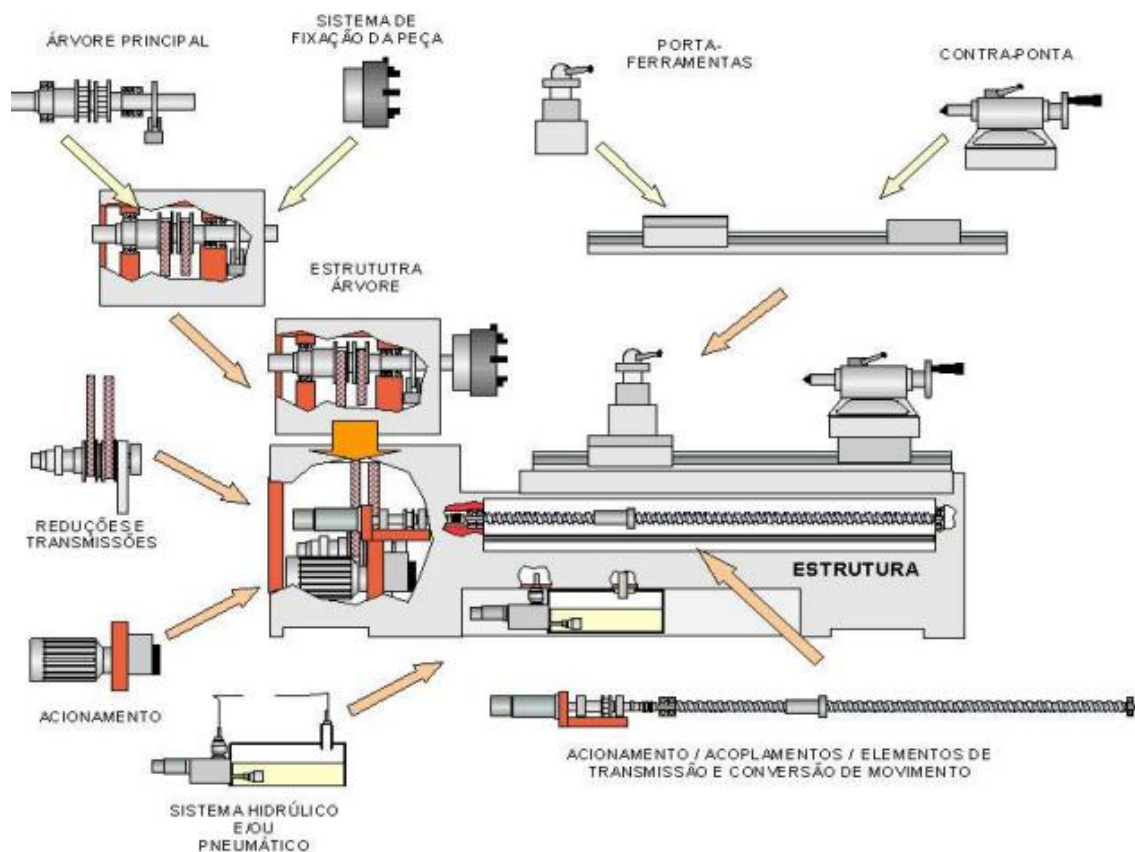


Figura 6 - Vista Explodida de um torno mecânico convencional(Stoeterau, 2007).

Essa máquina é composta por um sistema de potência localizado na caixa Norton, do lado esquerdo, onde se tem todo o sistema de engrenagens e polias que transmitem o movimento para o eixo árvore, que está associado ao conjunto de fixação da peça. Este aparelho está ligado a um fuso que transmite movimento para o carro longitudinal, no avanço automático.

No barramento principal da máquina, tem-se a movimentação do cabeçote móvel, que nos casos mais comuns de usinagem, deve estar perfeitamente alinhado com o eixo árvore da placa na sua altura e sentido transversal, a próxima imagem traz uma

demonstração deste alinhamento. Este “item” pode ser usado para apoio com o contra-ponta, em caso de usinagem de grandes eixos, ou pode ser associado a um mandril e executar o processo de furação na peça.

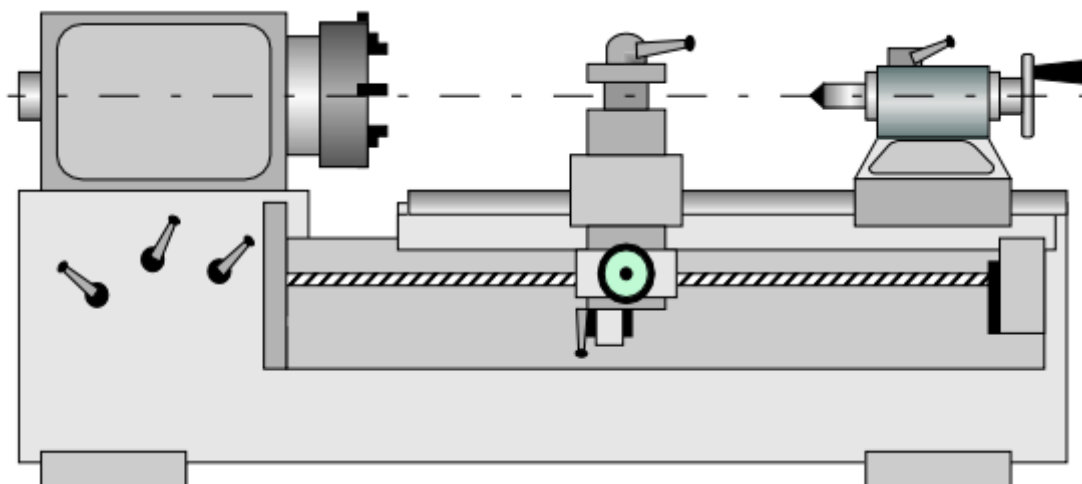


Figura 7 - Alinhamento entre o cabeçote móvel e a placa em um torno(STOETERAU, 2007).

O carro principal, ou carro longitudinal, tem a função de promover o movimento da ferramenta de corte, podendo ser manual ou automático. A vara é usada como suporte para o movimento do carro, os fusos, quando acionados, promovem o movimento síncrono do carro com a rotação da placa, e as guias direcionam a movimentação longitudinalmente.

A ferramenta de corte é fixa no castelo, que fica localizado no carro superior, ou carro de ajuste longitudinal, está também está associada ao carro manual transversal. Essa associação a três carros possibilita uma gama imensa de operações que se pode executar com essa máquina.

É de suma importância que a aresta cortante da ferramenta esteja perfeitamente alinhada com a linha de centro que sai da placa até o cabeçote móvel, pois somente assim tem-se a condição ideal de corte.

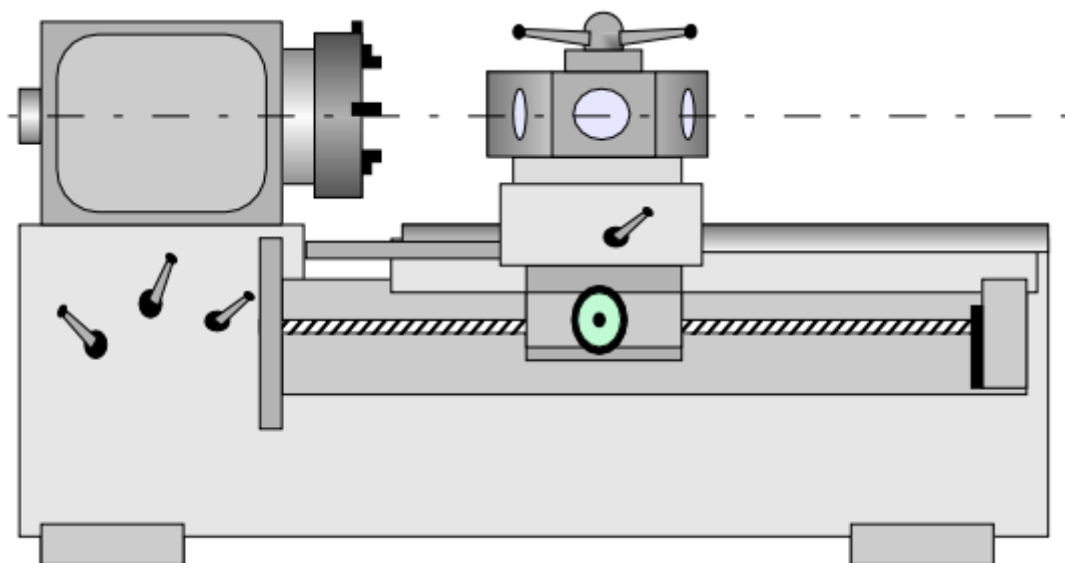


Figura 8 - Alinhamento entre a placa e o castelo porta ferramenta(STOETERAU, 2007).

Consoante a norma DIN 8589 têm-se as seguintes operações de torneamento:

<i>Operação de torneamento</i>	<i>Externo</i>	<i>Interno</i>
Longitudinal		
Piano ou transversal	<i>Faceamento</i> 	<i>Sangramento</i>
Helicoidal		
de forma		
de perfil		

Figura 9 - Operações de Torneamento(STOETERAU, 2007).

Este trabalho se baseará nos esforços de corte para o caso de torneamento longitudinal externo, por conta disso nos próximos tópicos a ênfase será somente neste processo.

2.3.4 Ferramentas de Torneamento

Para executar uma boa usinagem as ferramentas precisam ter algumas características indispensáveis, segundo König, Komanduri, Tönshoff e Ackerschott (1984), essas seguem:

- **Resistência às variações de temperatura**, pois o atrito entre a ferramenta e o material gera energia térmica, e a refrigeração, comum dos processos de usinagem, gera uma queda brusca de temperatura;
- **Manutenção da dureza a temperaturas elevadas**, com o aumento de temperatura alguns materiais tendem ao amolecimento. No caso de ferramentas de usinagem essa característica não é desejável, pois a ferramenta deve ter dureza maior do que o material;
- **Limite de resistência à ruptura**, durante todo processo de usinagem a ferramenta suporta esforços de reação do material que está sendo processado, por isso é importante que a ferramenta suporte a maior tensão de tração possível antes de falhar;
- **Tenacidade**, sendo a característica de absorver energia (elástica e plástica) sem fraturar;
- **Estabilidade Química**, que se faz necessário, pois a todo o momento a peça e a ferramenta, que possuem composições químicas diferentes, estão em contato e em condições de alta temperatura, possibilitando o surgimento de reações químicas não desejáveis.

Para o desenvolvimento deste estudo, dentre as ferramentas de corte cujas características se encontram dentro deste requisito estão as pastilhas de Metal Duro com cobertura, que representam em torno de 80% a 90% de todas as ferramentas de corte(SANDVIK COROMANT).

É fundamental que a tendência a vibração seja minimizada ao máximo neste projeto, pois pode interferir drasticamente nos resultados obtidos no dinamômetro. Com isso, será necessário selecionar a posição ideal de corte, raio de ferramenta, geometria para saída de cavaco e dissipação de calor corretamente. Na imagem a seguir, tem-se o demonstrativo do efeito desses fatores na vibração.

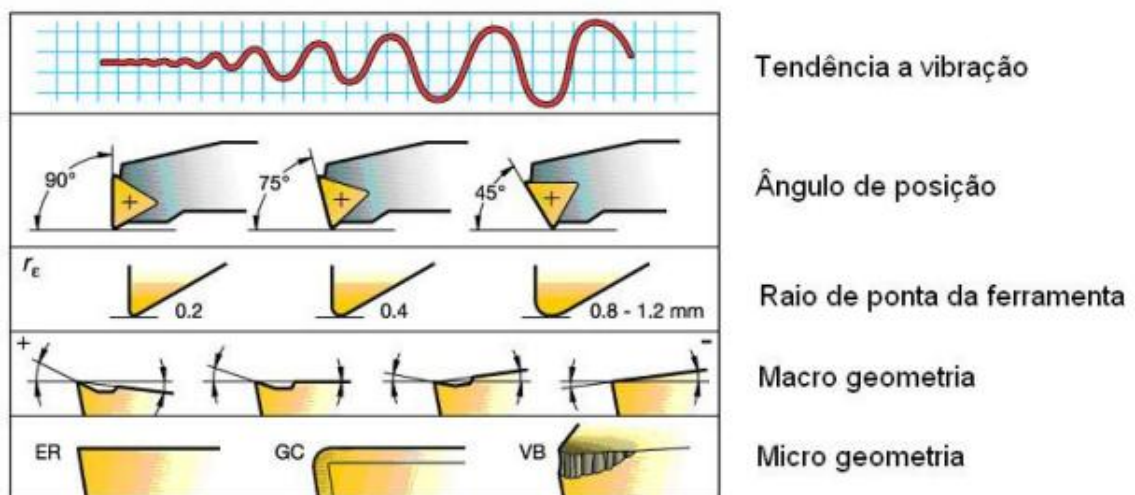


Figura 10 - Efeitos da Geometria de ferramenta na amplitude de vibração(SANDVIK COROMANT).

2.3.5 Fatores que Influenciam na Usinagem

O fator metalúrgico que mais influência na usinagem é a dureza, materiais que possuem baixa dureza são mais fáceis de serem usinados, enquanto materiais mais duros acabam gerando problemas de desgaste excessivo de ferramenta, acabamento superficial inadequado ou superaquecimento da ferramenta.

A microestrutura é o segundo fator mais impactante na fabricação, pois sem alterar a composição química de um material é possível alterar significativamente a sua usinabilidade. Para isso, os tratamentos térmicos são de suma importância na alteração microestrutural do material.

3 METODOLOGIA

3.1 OBJETIVOS DO PROJETO

O projeto visa estudar um método comparativo de usinabilidade entre um aço SAE 4340 laminado com um aço SAE 4340 normalizado através do torneamento com dinamômetro acoplado. Os esforços serão medidos a cada passagem da ferramenta no material, visando obter um modelo simples de resistência mecânica do material e um possível estudo sobre vida de ferramenta. Neste modelo, será de suma importância a correlação entre microestrutura e as forças de corte do material, e por conta disso, todo o planejamento será feito buscando relacionar a arte da usinagem com a metalurgia.

3.2 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi elaborada uma sequência de ações, desde seleção de materiais até os ensaios e análise de dados, sendo que a sequência de trabalho está desenvolvida no seguinte fluxograma.

As ações estão separadas em 3 grandes grupos, sendo eles:

- Definição do Processo (na cor azul/à esquerda)
- Ensaios (na cor amarela/meio)
- Análise de Dados (na cor roxa/à direita)

FLUXOGRAMA DE UM ENSAIO DE USINABILIDADE DE LIGAS TRATADAS TERMICAMENTE

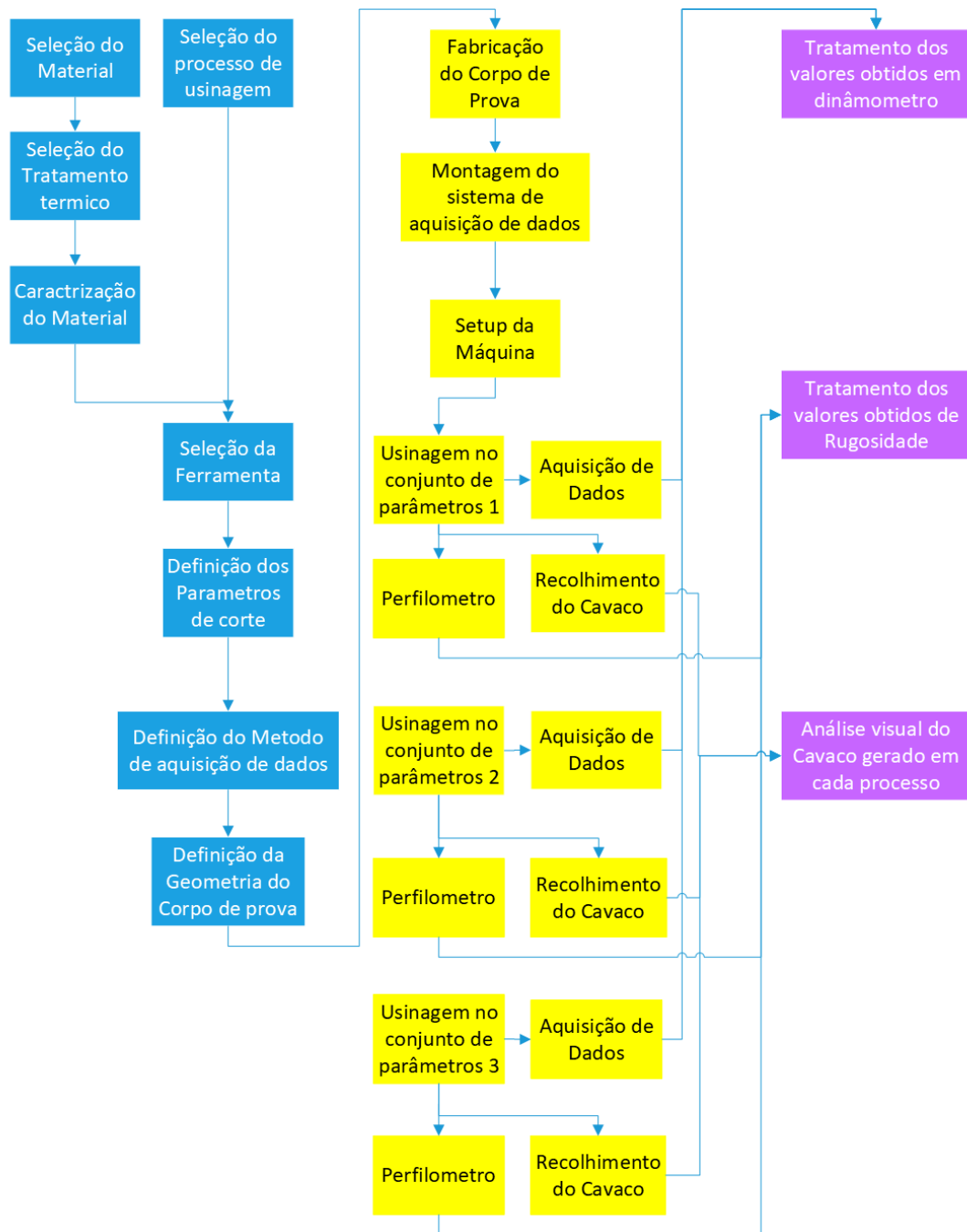


Figura 11 - Fluxograma do processo de usinabilidade de ligas tratadas termicamente.

3.2.1 Definição do Processo

Na definição do processo, tem-se a base do método de usinabilidade, sendo que neste momento é necessário encontrar todas as diretrizes para os ensaios que serão feitos posteriormente.

3.2.1.1 Definição do Material e Processo de Usinagem

Inicialmente é importante definir o material de estudo e o processo de usinagem a que ele será submetido. No caso deste, será utilizado o aço SAE 4340 normalizado e o processo convencional de torneamento, e para comparação, será usado o SAE 4340 laminado.

Na imagem a seguir, encontra-se o material bruto recebido e em seguida suas especificações químicas disponibilizada pela empresa fornecedora. Ele possui duas polegadas de diâmetro e duzentos milímetros de comprimento.



Figura 12 - Material na forma bruta separado para os experimentos.

DESCRIÇÃO DO MATERIAL

ACO 4340 Laminado

FORMATO: REDONDO 50,80 X 200MM

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Mn	S	C	P	Cu	Al	Ni	Cr	Si	Ti	Mo	V
0,680	0,013	0,380	0,006	0,130	0,026	1,730	0,770	0,280	-	0,230	0,10

NOTA: DADOS TRANSCRITOS CONFORME CERTIFICADO DO FABRICANTE.

Figura 13 - Certificado de análise química disponibilizado pela empresa INOVAPLAST.

Como se pode observar na Tabela 1, o material comprado possui as especificações nas tolerâncias de composição química para o carbono, manganês, silício, cromo, molibdênio e possui além desses, fósforo, enxofre, vanádio, cobre e alumínio na liga.

Tabela 4 - Comparativo de composições químicas entre o Metals Handbook e o certificado disponibilizado pela INOVAPLAST.

		C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al
Metals Handbook	4340	0.38-0.43	0.60-0.80	-	-	0.20-0.35	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.30	-	-	-
INOVAPLAST	4340	0.38	0.68	0.006	0.013	0.28	1.73	0.77	0.23	0.1	0.13	0.026

3.2.1.1.1 Tratamento térmico

Como o material de estudo é um aço SAE 4340 normalizado, se faz necessário entender quais as relações entre tempo e temperatura que deve-se submeter o material. A partir das composições químicas do Metals Handbook encontradas anteriormente foi possível simular no QFORM as condições de tratamento térmico ideal e quais fases serão formadas no processo.

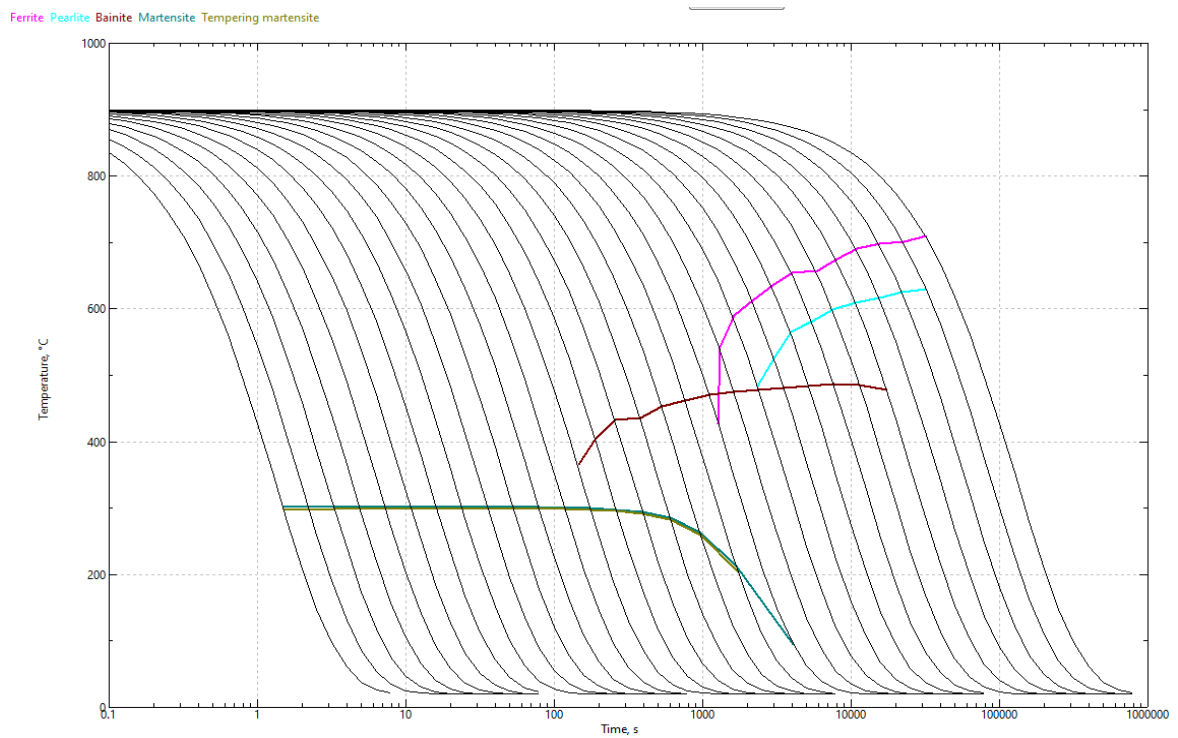


Figura 14 - Gráfico de porcentagem de formação de austenita para o aço SAE 4340 simulado no QFORM.

Em vista do que foi simulado anteriormente, e usando a composição real do material comprado, também foi simulada no THERMO-CALC a condição para a formação completa de austenita.

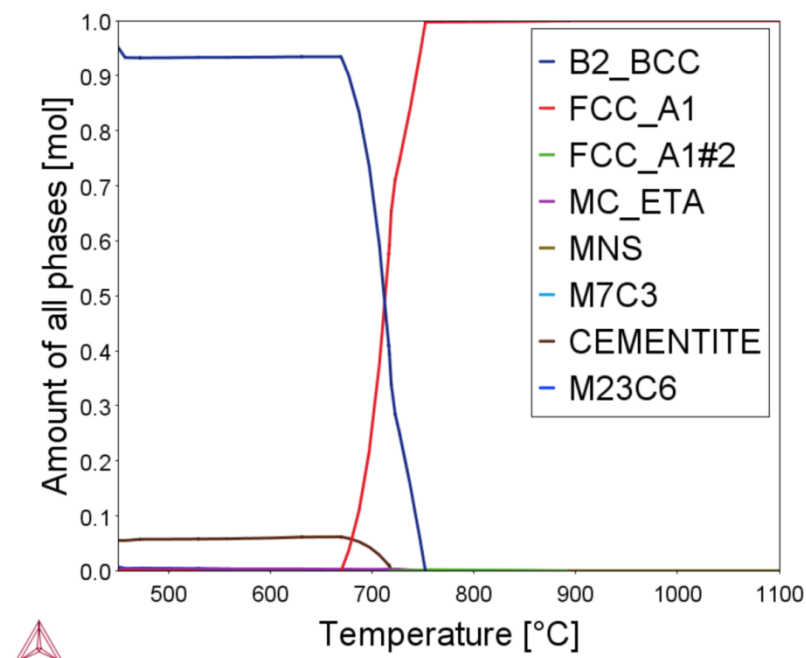


Figura 15 - Simulação do THERMO-CALC para definir a temperatura de total austenitização.

A partir das correlação do gráfico anterior e de manuais técnicos, foi possível definir que a normalização deve ser realizada na temperatura de 870 °C por 2 horas e o aço deverá ser resfriado ao ar livre até atingir a temperatura ambiente. Na imagem a seguir tem-se o modelo do forno utilizado, a condição dos posicionamentos dos tarugos no forno e a situação de resfriamento.

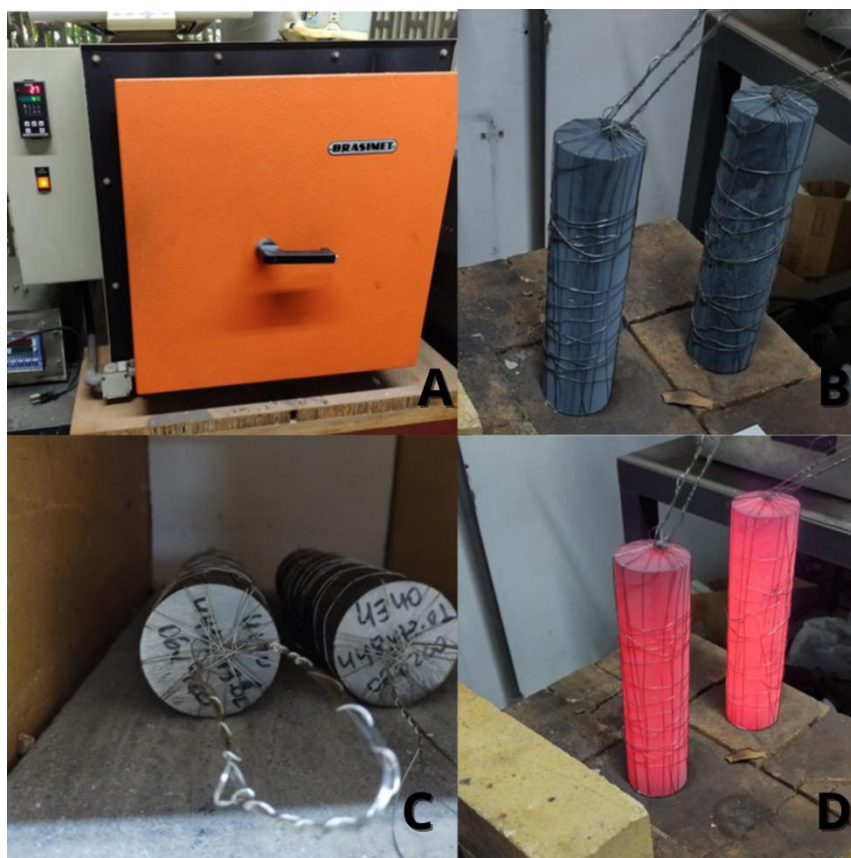


Figura 16 - Na imagem A encontra-se o modelo do forno utilizado, na B a condição dos arames para a retirada do material, na C o posicionamento no forno e na D a condição de resfriamento ao ar livre.

3.2.1.2 Caracterização do Material

A seguir, torna-se necessário avaliar as condições de recebimento do material, sendo necessário submeter o mesmo a ensaios de caracterização. Os métodos foram os seguintes:

- Microscopia Óptica
- Microscopia Eletrônica de Varredura
- Microdureza

Nas imagens a seguir, têm-se as condições de corte e dos corpos de prova finais para análise.



Figura 17 - Corte das seções destinadas à análise metalográfica e MEV.



Figura 18 - Corpo de prova pronto para a análise metalográfica e MEV.

Nas imagens a seguir, é possível observar as regiões de análise usadas no microscópio óptico e no MEV. Para fins de análise microestrutural, essas regiões são determinantes para entender a correlação com os esforços de corte.

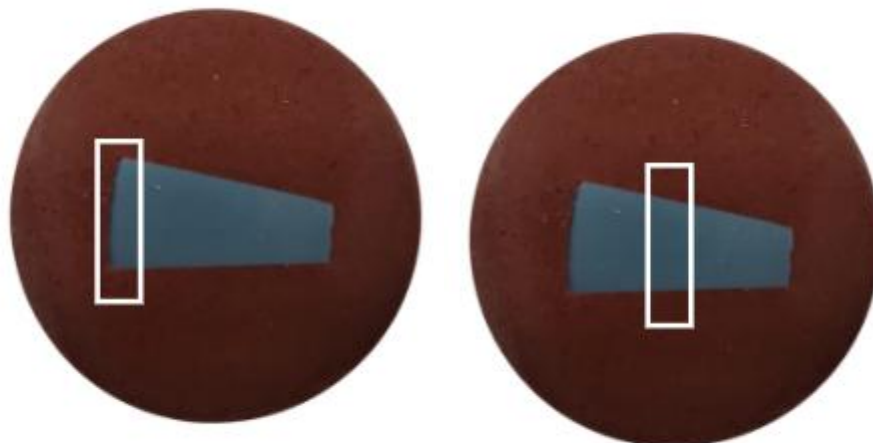


Figura 19 - Representação das áreas de análise no Microscópio Óptico e MEV.

3.2.1.3 Escolha da Ferramenta de Usinagem e Parâmetros de Corte

Ao certificar-se das condições iniciais do material, é necessário encontrar a ferramenta ideal para o processo, não causando interferências na análise e sendo compatível com as duas categorias de materiais que serão comparados. Neste trabalho a ferramenta utilizada é uma pastilha de metal duro sem revestimento classificada como CNMG 1204 08-PM 4025, e com 0,4 mm de raio. Na imagem a seguir, têm-se as imagens das especificações da pastilha escolhida e a imagem da pastilha.



Figura 20 - Modelo da pastilha de corte utilizada nos experimentos.

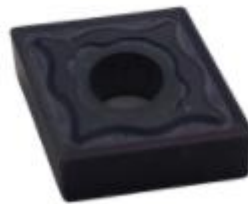


Figura 21 - Imagem da Pastilha CNMG 1204 08-PM 4025 usada nos experimentos.

Com a ferramenta definida, é necessário definir os parâmetros de corte do processo de usinagem. Neste trabalho usou-se a rotação de 1120 RPM e 4 mm/min de avanço de corte (ASM, 1989). Neste ponto é importante ressaltar, que os parâmetros devem ser adaptados para as condições da máquina, pois cada categoria de torno convencional possui uma relação diferente de rotações e avanços.

3.2.1.4 Sistema de Aquisição de Dados

Com as bases do processo de usinagem definidas, é necessário escolher o melhor método de aquisição que seja compatível com o maquinário disponível. Como o maquinário do estudo é um torno ROMI S-30 com 2 metros de barramento, o

sistema de aquisição utilizado é um dinamômetro KISTLER do tipo 9441B e um amplificador KISTLER do tipo 5070.



Figura 22 - Torno utilizado para a usinagem dos corpos de prova e testes em dinamômetro.



Figura 23 - Modelo do amplificador de sinal utilizado.

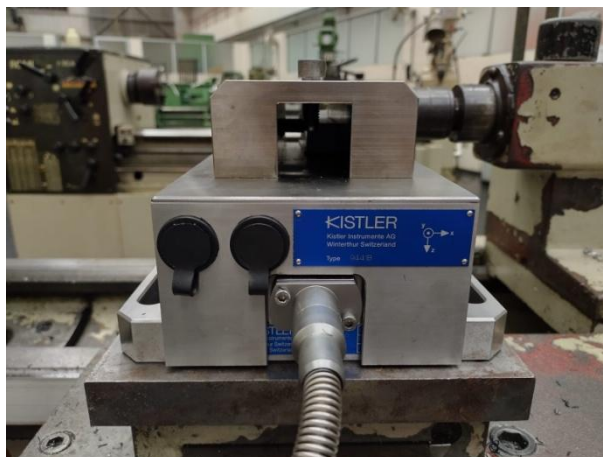


Figura 24 - Modelo do dinamômetro utilizado.

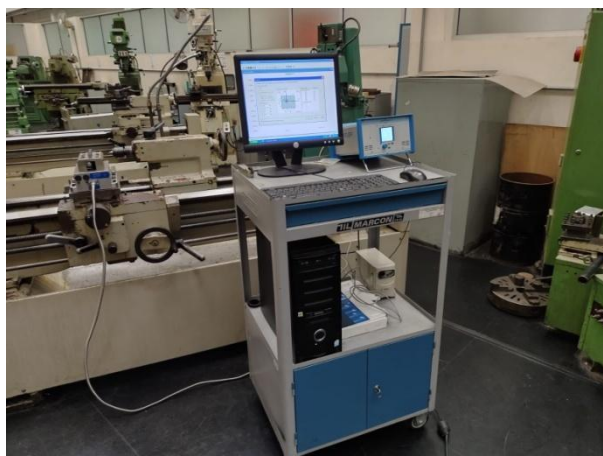


Figura 25 - Sistema de aquisição de dados.

3.2.1.5 Definição do Corpo de Prova

Por fim, é importante definir um modelo de corpo de prova que contribua na interpretação dos dados do dinamômetro, neste trabalho usou-se um tarugo com duas polegadas de diâmetro e uma série de rasgos, que servem como pontos de referência para a análise dos gráficos gerados. Na imagem a seguir, tem-se uma representação gráfica deste modelo de corpo de prova e em seguida a condição final deste.

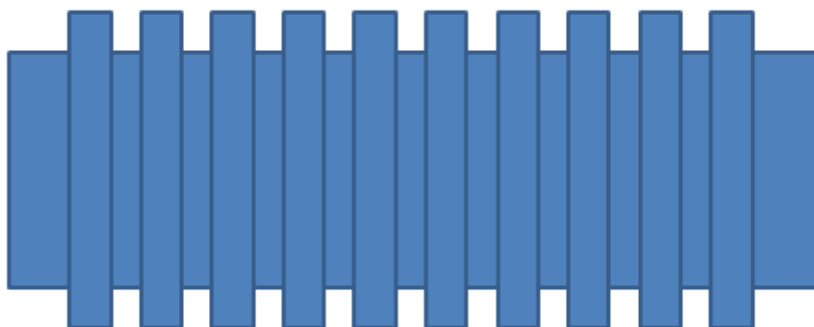


Figura 26 - Representação gráfica do Corpo de Prova.



Figura 27 - Geometria final do corpo de prova.

3.2.2 Ensaaios

Neste ponto, é de suma importância que o maquinário esteja completamente alinhado e com as fixações de dinamômetro e ferramenta bem estabelecidas, em vista disso, é necessário alinhar a placa ao cabeçote móvel com um relógio comparador. Além disso, é necessário fazer as adaptações para a fixação do dinamômetro no local do castelo do torno. Na imagem a seguir tem-se o esquema de posicionamento da ferramenta no dispositivo de medição.

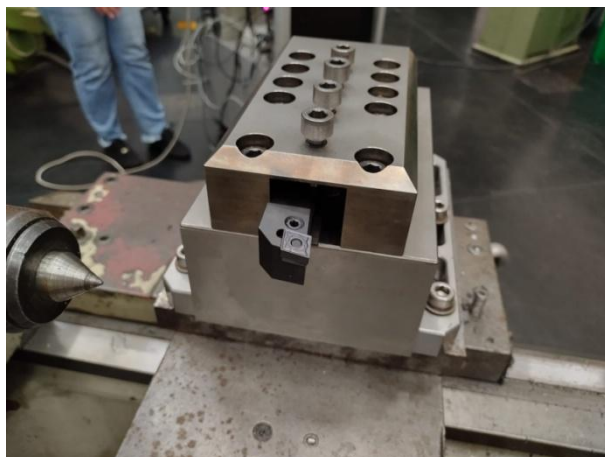


Figura 28 - Posicionamento da ferramenta de corte no experimento de usinagem.

3.2.2.1 Preparação do material

O material foi usinado antes do experimento para chegar à geometria final do corpo de prova definida anteriormente. Para isso, foi feito o faceamento, furos de centro e usinagem dos perfis. Nas imagens a seguir, podem-se observar tais processos.



Figura 29 - Material fixado no torno com o faceamento e furo de centro prontos.



Figura 30 - Usinagem da geometria do corpo de prova.

3.2.2.2 Setup de Máquina

Foi necessário fazer o posicionamento do maquinário e dos dispositivos de medição para certificar que todo o processo seja executado da forma correta. Para isso, a imagem a seguir exemplifica o posicionamento utilizado em todo o processo.



Figura 31 - Disposição do maquinário utilizado e do sistema de aquisição de dados.

3.2.2.3 Torneamento

Para este processo, foram definidas 3 condições de usinagem, sendo elas:¹

- RPM 1120; $a_p=0,5\text{mm}$, $f=0,4\text{mm/rev}$;
- RPM 1120; $a_p=1,0\text{mm}$, $f=0,4\text{mm/rev}$;
- RPM 1120; $a_p=1,5\text{mm}$, $f=0,4\text{mm/rev}$.

Com as condições definidas, o processo foi repetido três vezes para cada condição, sendo que a cada passada da ferramenta no corpo de prova é definido como um passe de usinagem.

3.2.3 Forças de Corte

Os dados obtidos em dinamômetro foram extraídos tanto na forma de gráficos, como nas imagens seguintes, ou na forma de tabela. A seguir, pode-se observar o padrão de esforços encontrados em cada condição de usinagem. A condição de esforços é definida da seguinte maneira:

- Eixo X: Força de avanço (CH1);
- Eixo Y: Força passiva (CH3);
- Eixo Z: Força de corte (CH5);

Na imagem a seguir tem-se a representação das forças de usinagem para facilitar a interpretação dos dados.

¹ a_p = Profundidade de corte; f =avanço da ferramenta.

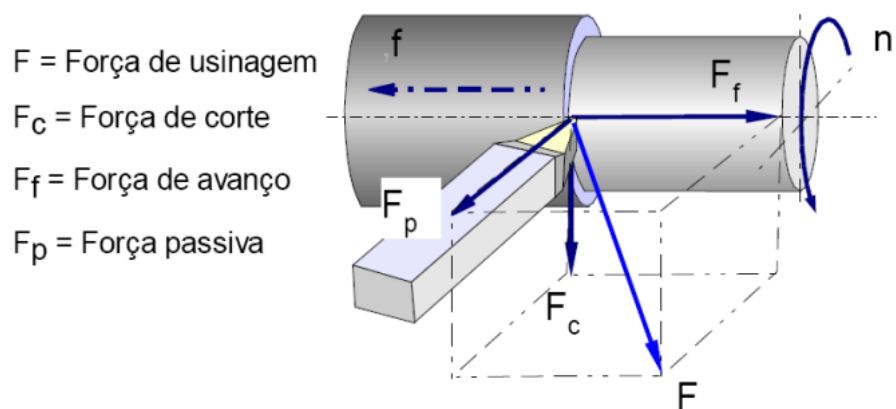


Figura 32 - Vetorial dos esforços de corte (PMR2202 - Fundamentos dos Processos de Usinagem).

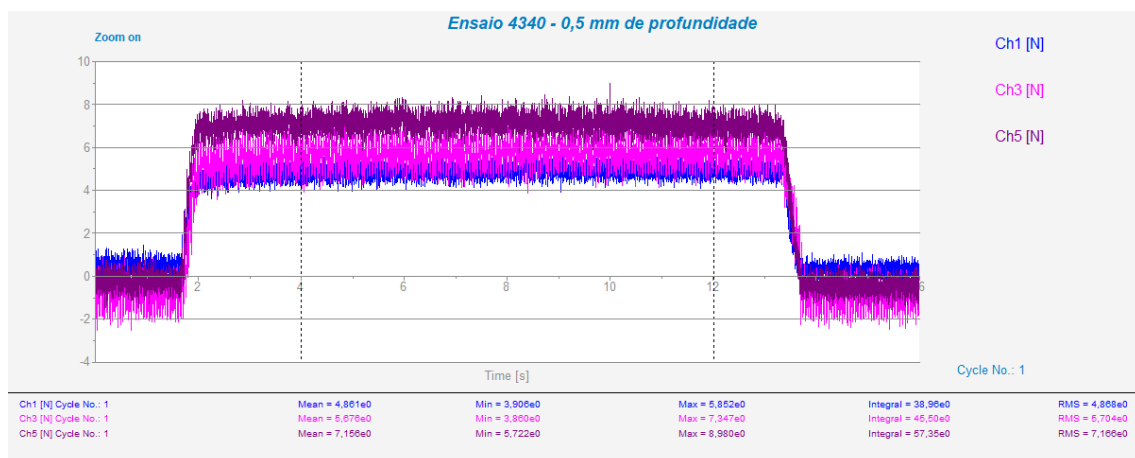


Figura 33 - Ensaio de torneamento com 0,5 mm de profundidade para aço SAE 4340 laminado.

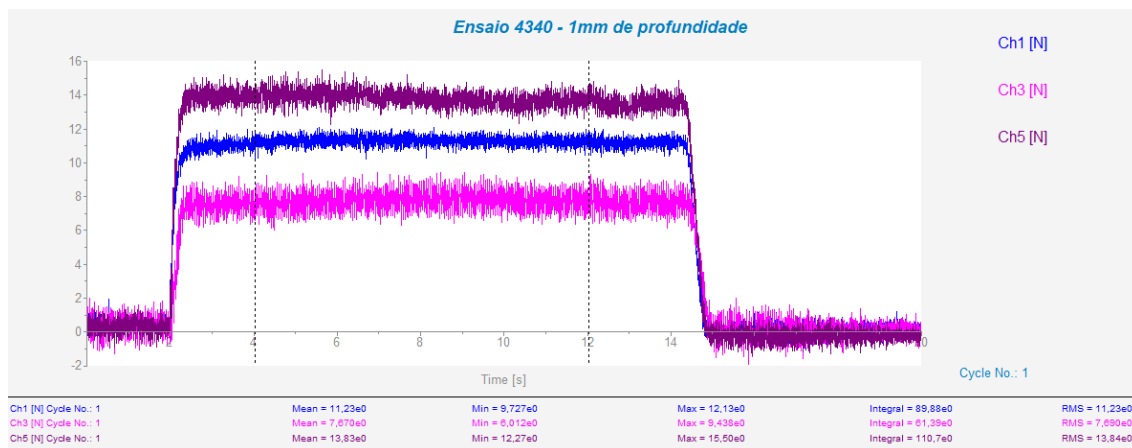


Figura 34 - Ensaio de torneamento com 1 mm de profundidade para aço SAE 4340 laminado.

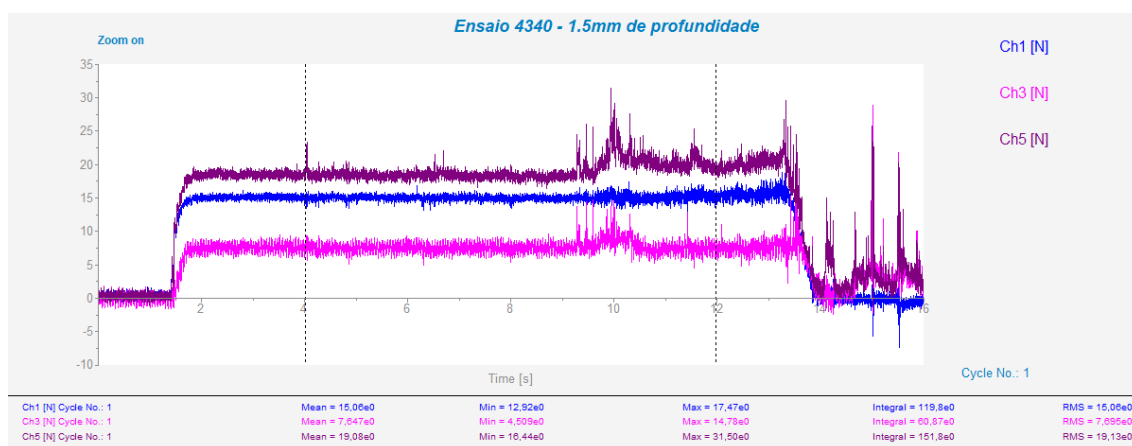


Figura 35 - Ensaio de torneamento com 1,5 mm de profundidade para aço SAE 4340 laminado.

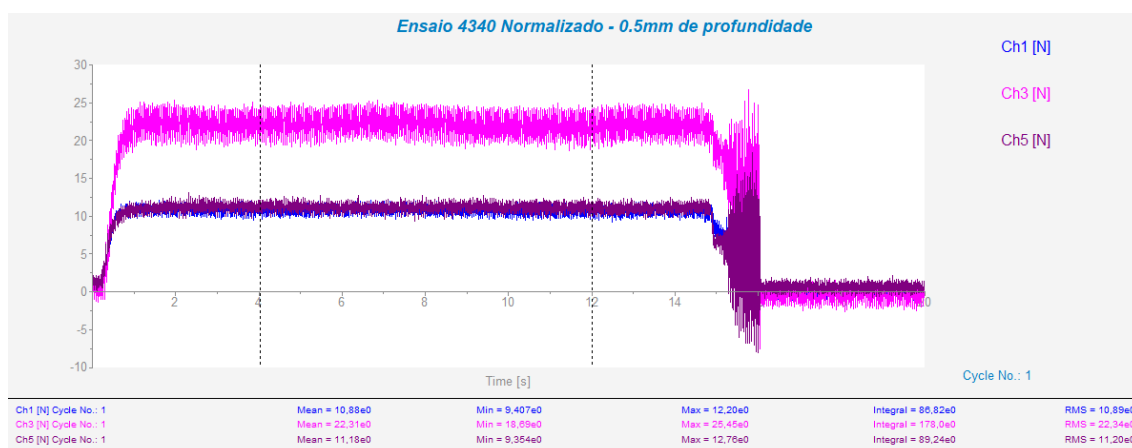


Figura 36 - Ensaio de torneamento com 0,5 mm de profundidade para aço SAE 4340 normalizado.

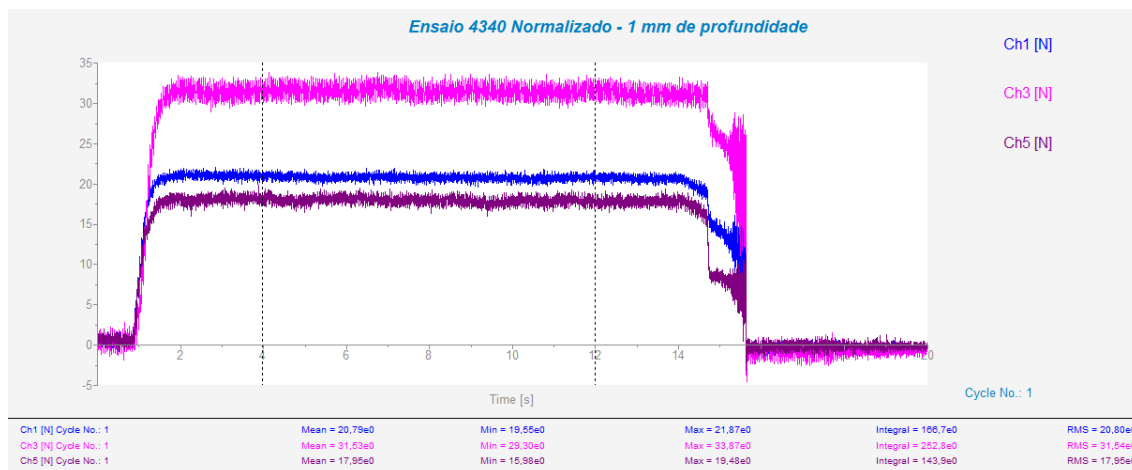


Figura 37 - Ensaio de torneamento com 1 mm de profundidade para aço SAE 4340 normalizado.

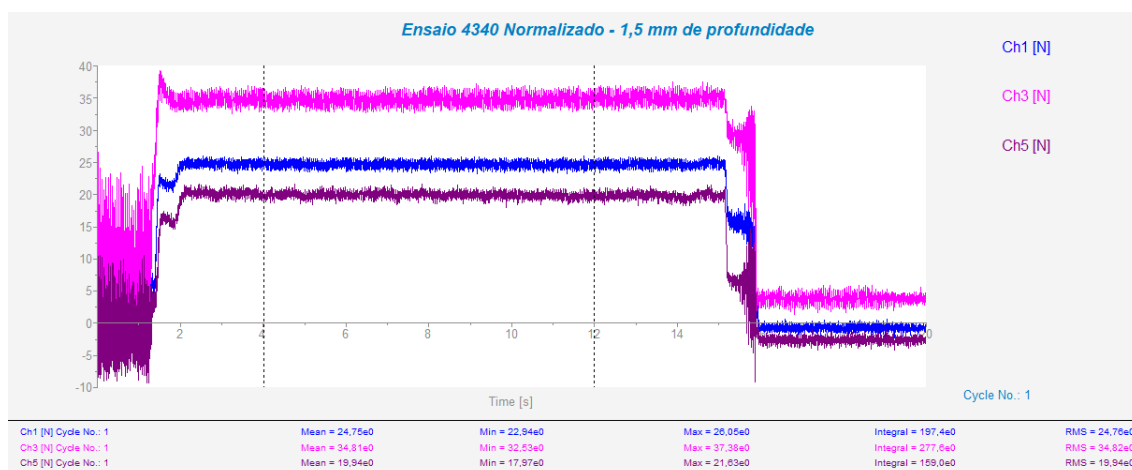


Figura 38 - Ensaio de torneamento com 1,5 mm de profundidade para aço SAE 4340 normalizado.

É importante notar que em cada condição foi encontrado um padrão de esforço e que esses esforços serão analisados no tópico seguinte.

3.2.4 Perfilômetro

Após cada passe de ferramenta é importante analisar a rugosidade da superfície do material. Nesta análise foi usada um perfilômetro Óptico 3D, Taylor-Hobson CCI, onde o corpo de prova foi posicionado no maquinário de modo que os sensores ópticos varressem a superfície indicando os valores de picos e vales.

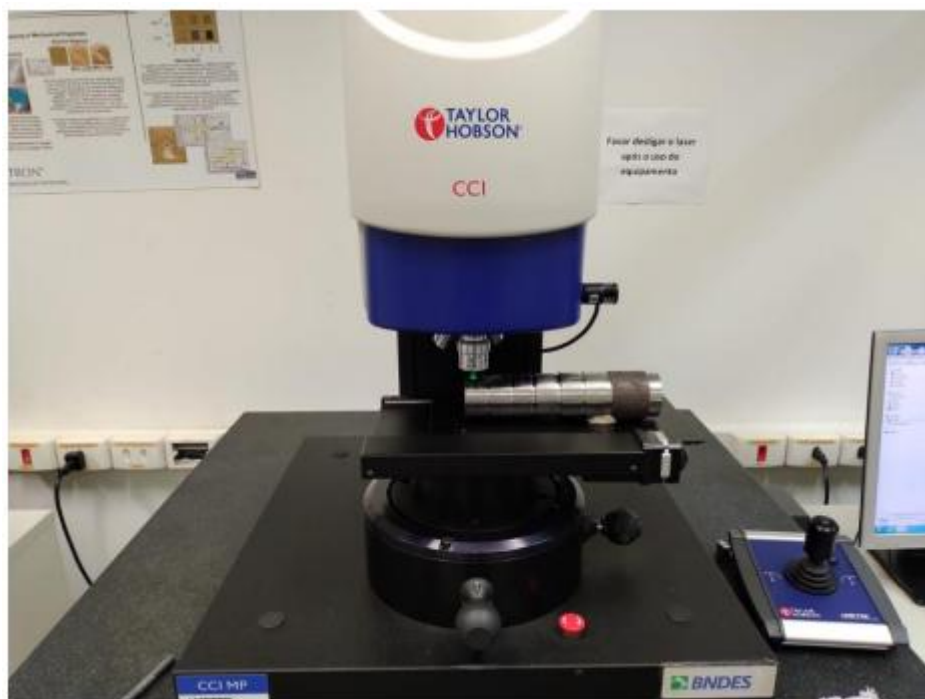


Figura 39 - Perfilômetro usado no processo de análise de rugosidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DAS MICROGRAFIAS

Na imagem a seguir, é possível observar um gradiente de microestruturas da superfície até o centro. Tal fato deve-se à presença de camada descarbonetada na superfície do material.

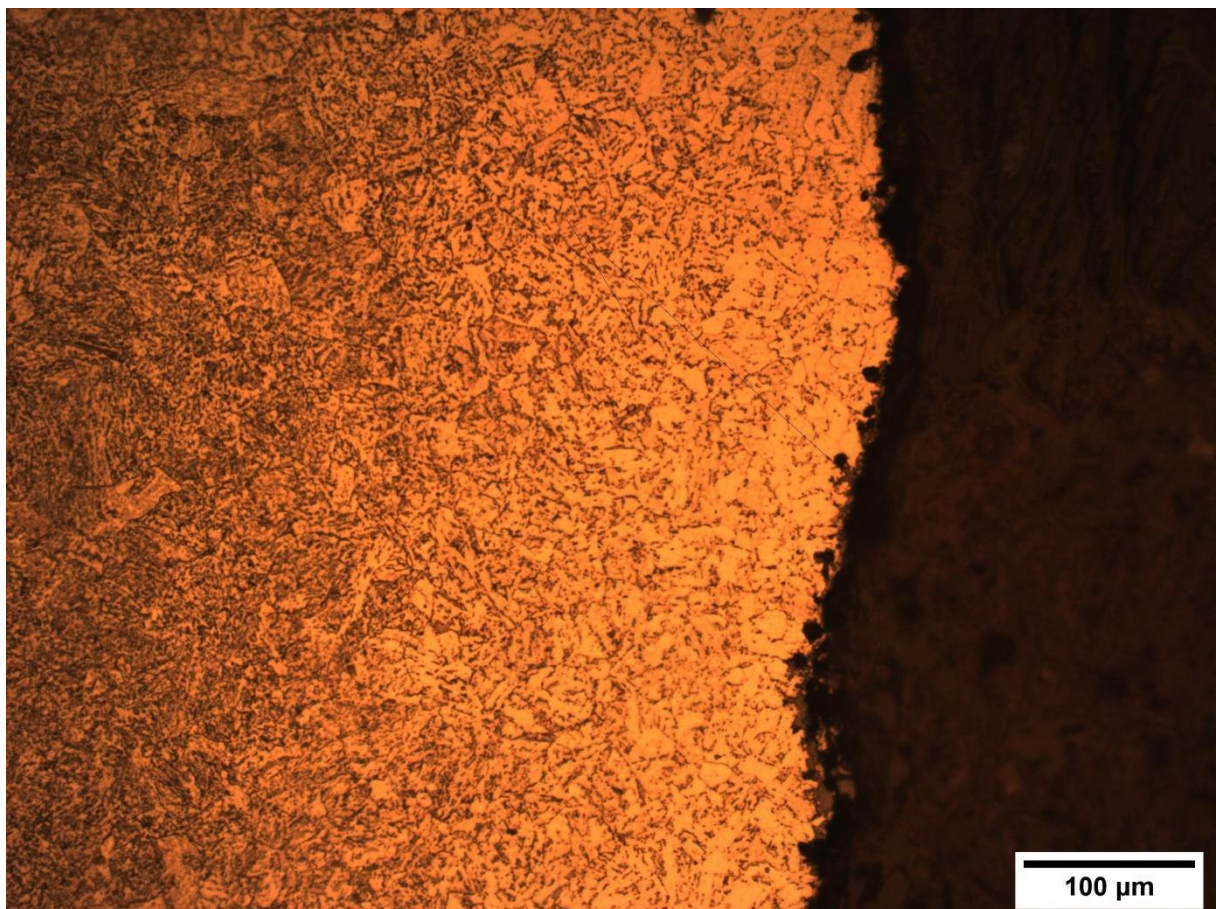


Figura 40 - Micrografia do aço 4340 laminado com aumento de 200x, ataque com Nital 2%.

Na figura a seguir, pode-se perceber que na micrografia da amostra na condição recebida o material possui uma matriz ferrítica com carbonetos espalhados nos contornos de grãos na região da borda. Enquanto na região central pode-se perceber a presença de carbonetos esferoidizados.

No caso normalizado, as regiões de borda possuem carbonetos esferoidizados com a presença de ferritas, e no centro pode-se encontrar a formação de martensitas.

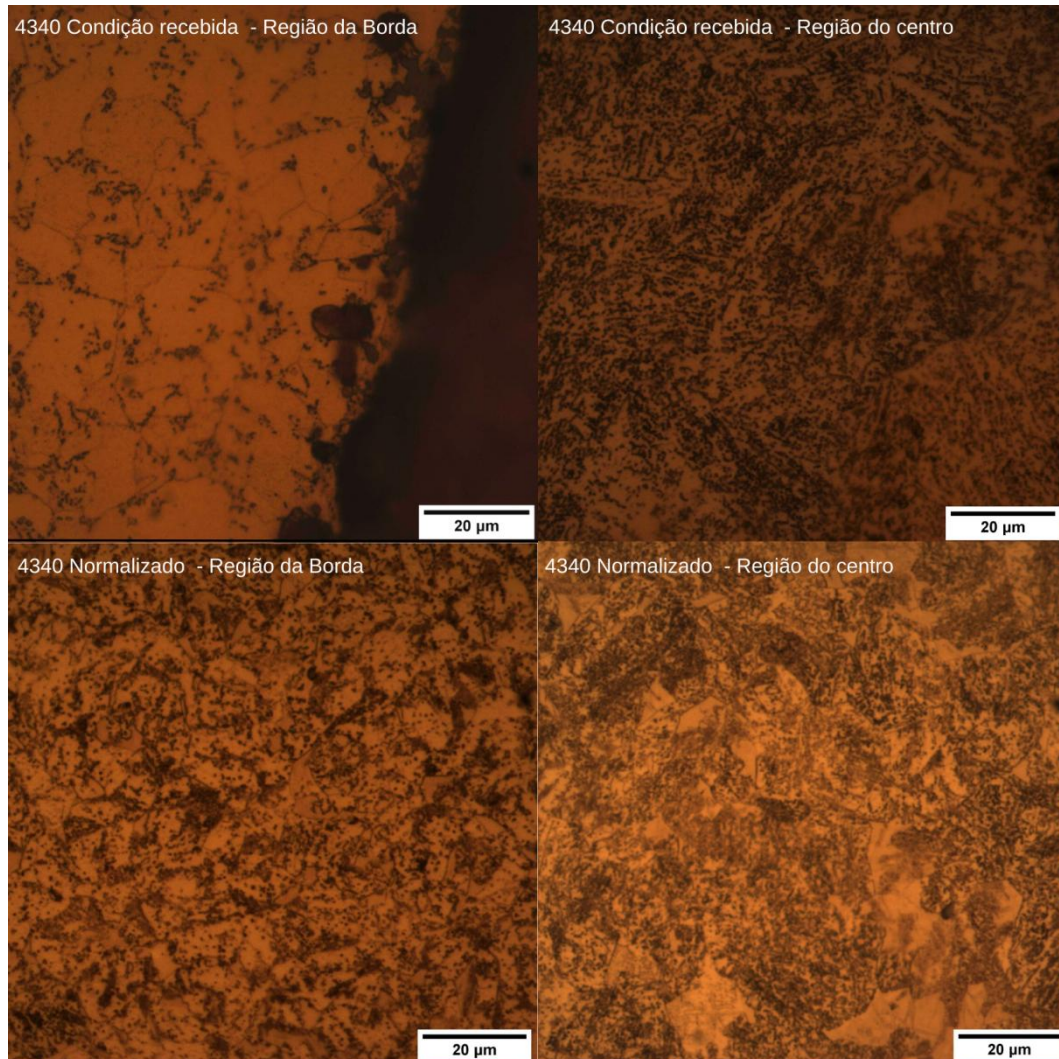


Figura 41 - Micrografias do aço 4340 em duas condições, com aumento de 1000x, ataque com Nital 2%.

4.2 ANÁLISE DO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

Na análise do MEV é possível perceber que na condição recebida fica clara a presença de carbonetos esferoidizados nos contornos de grão, além da presença de bainitas na região central e grãos de ferrita.

Na condição normalizada o material possui grãos de ferrita e é clara a presença de contornos de grãos austeníticos na imagem inferior esquerda. Para a região de centro pode-se encontrar duas possíveis formações de perlita, regiões de ferrita e martensitas.

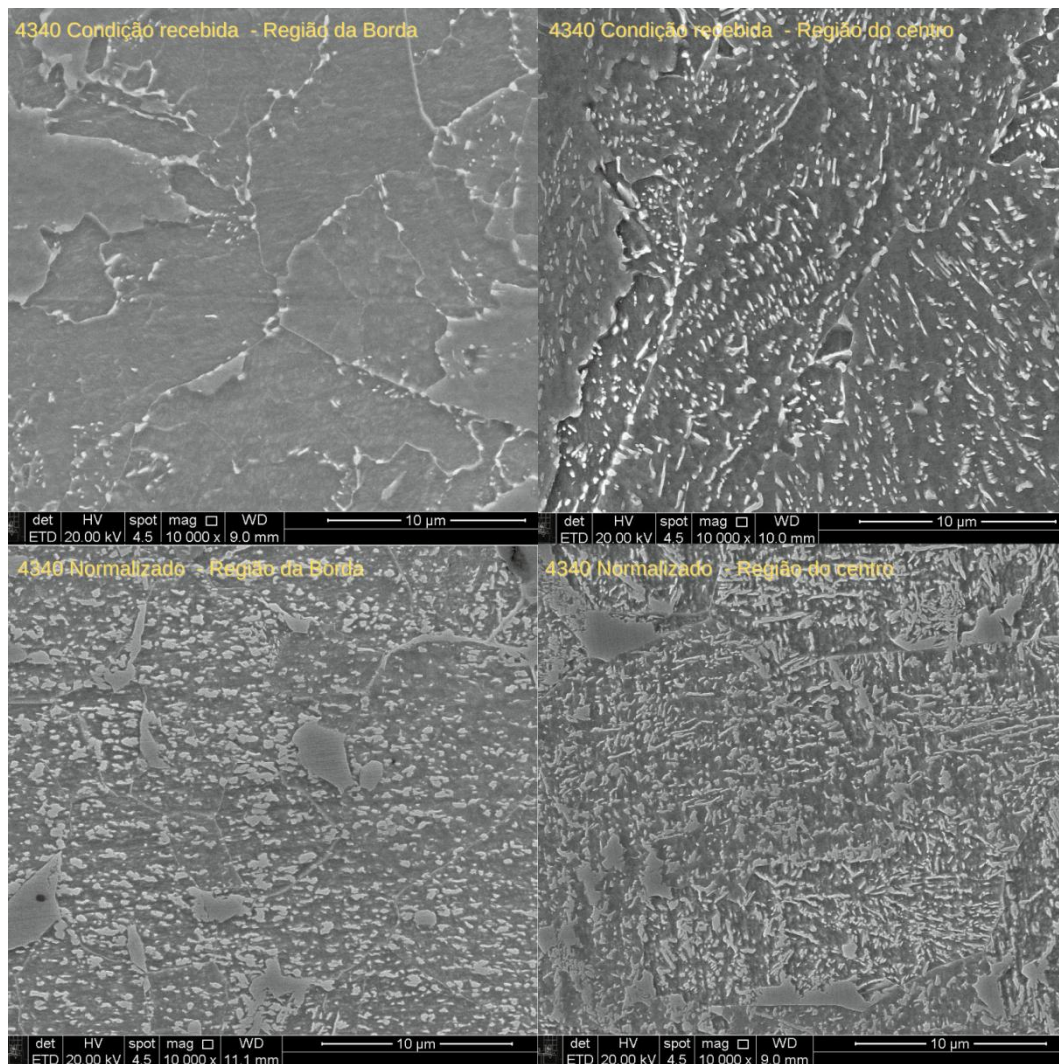


Figura 42 - Imagens do MEV do aço 4340 em duas condições, com aumento de 10.000x, ataque com Nital 2%.

4.3 ANÁLISE DOS ESFORÇOS DE CORTE

Com os dados obtidos em dinamômetro foi possível fazer uma análise para cada eixo dos esforços. Na tabela abaixo, é possível ver um resumo das condições de corte de cada material e os eixos de ação.

Tabela 5 -Valores máximos do ensaio de torneamento em N.

Máximo	X [N]		Y [N]		Z [N]		Força de Usinagem [N]	
	Recebido		Recebido		Recebido		Recebido	
	0,5 mm	1,0 mm	0,5 mm	1,0 mm	0,5 mm	1,0 mm	0,5 mm	1,0 mm
	5,852	12,2	7,347	25,45	8,98	12,76	12,995	30,974
	12,13	21,87	9,438	33,87	15,5	19,48	21,828	44,777
	17,47	26,05	14,78	37,38	31,5	21,63	38,935	50,435

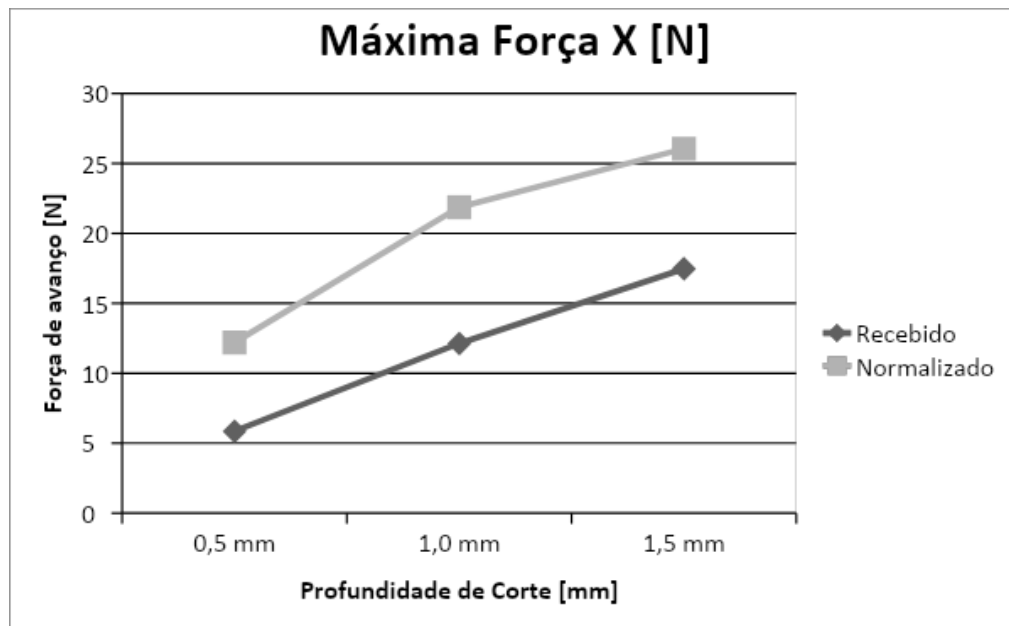


Figura 43 - Gráfico de comparação da máxima força de avanço.

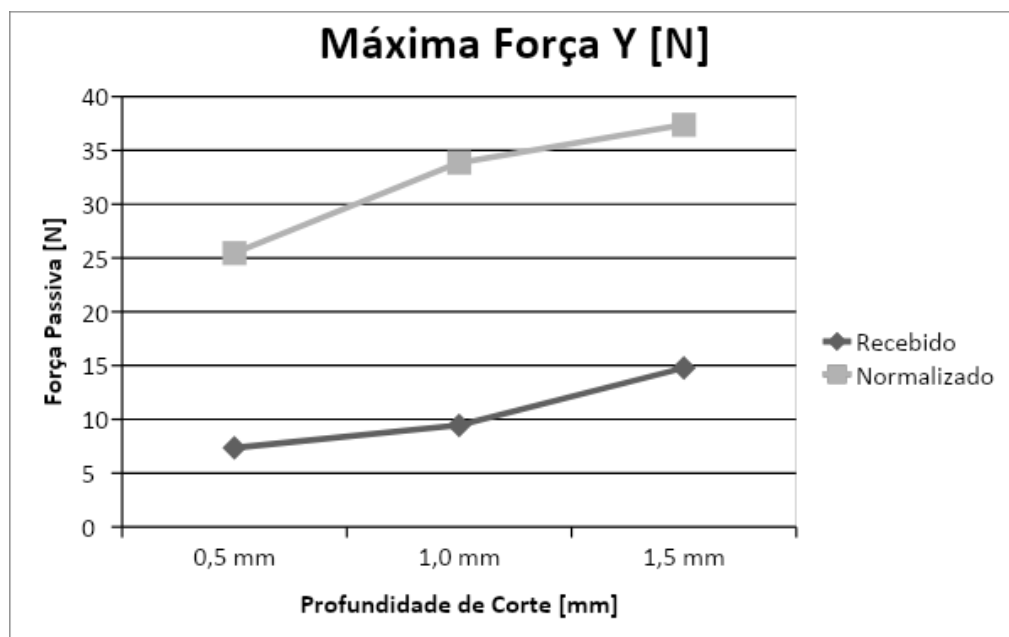


Figura 44 - Gráfico de comparação da máxima força passiva.

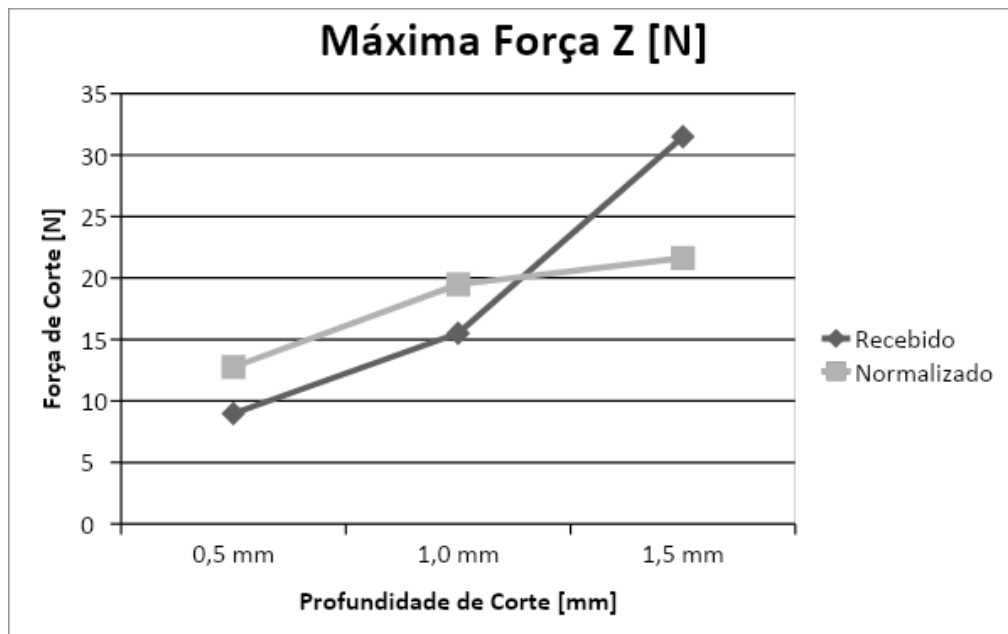


Figura 45 - Gráfico de comparação da máxima força de corte.

Tabela 6 - Valores médios do ensaio de torneamento em N.

Média	X [N]		Y [N]		Z [N]		Forças de Usinagem [N]	
	Recebido	Normalizado	Recebido	Normalizado	Recebido	Normalizado	Recebido	Normalizado
0,5 mm	4,861	10,88	5,676	22,31	7,156	11,18	10,347	27,223
1,0 mm	11,23	20,79	7,67	31,53	13,83	17,95	19,396	41,816
1,5 mm	15,06	24,75	7,647	34,81	19,08	19,94	25,482	47,137

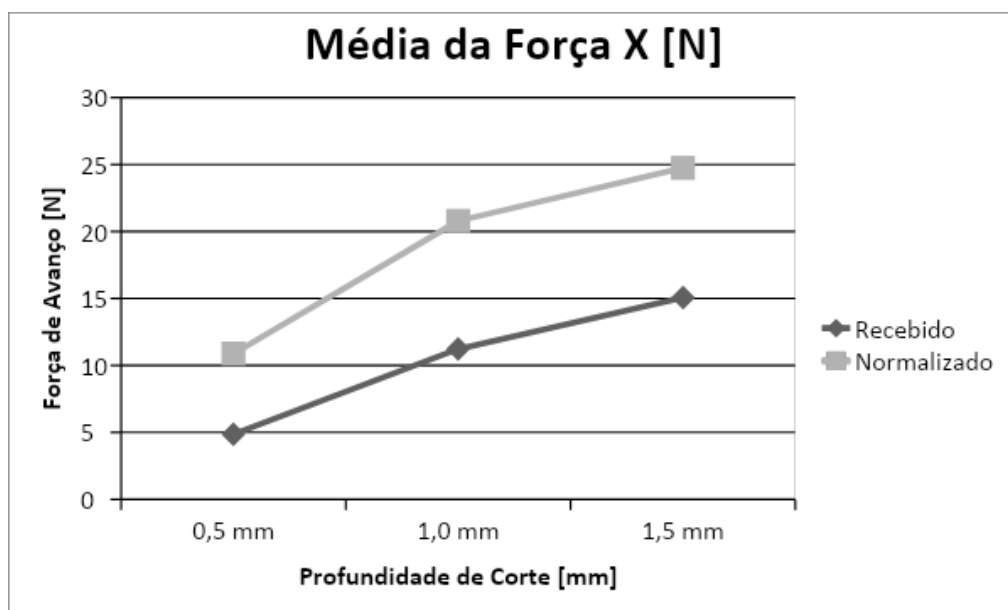


Figura 46 - Gráfico dos valores médios da força de avanço.

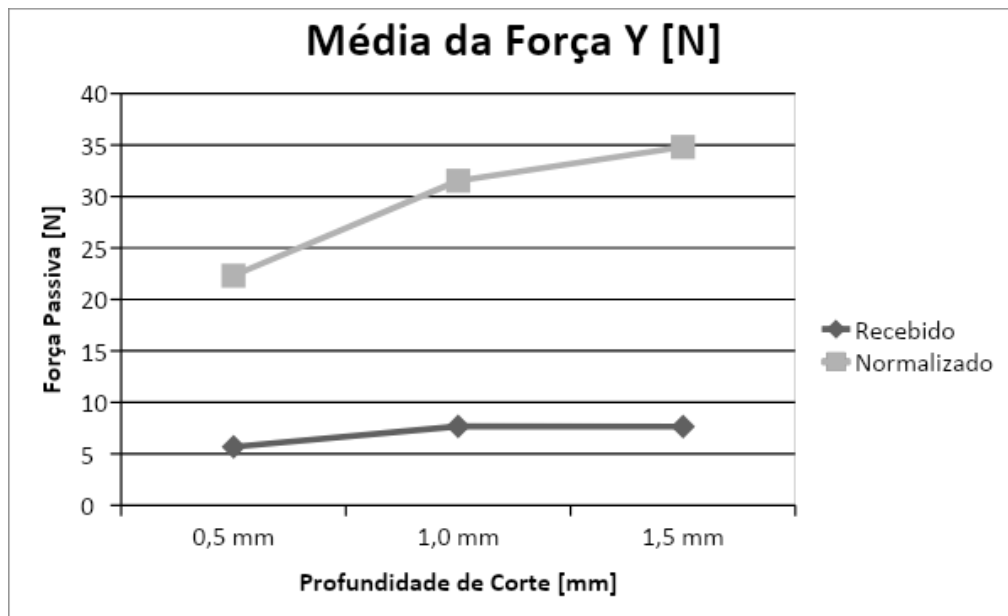


Figura 47 - Gráfico dos valores médios da força passiva.

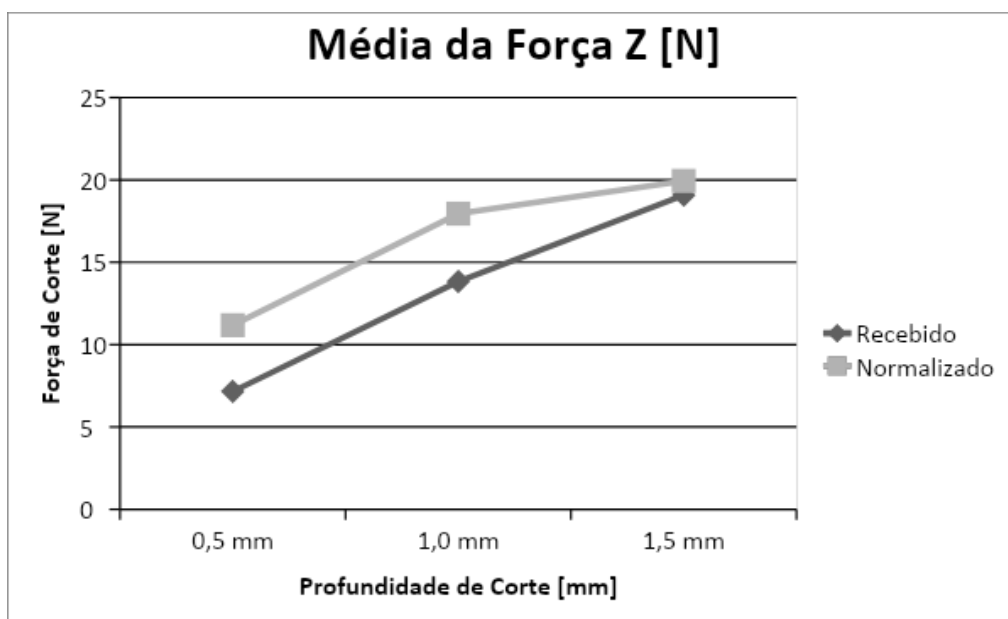


Figura 48 - Gráfico dos valores médios da força de corte.

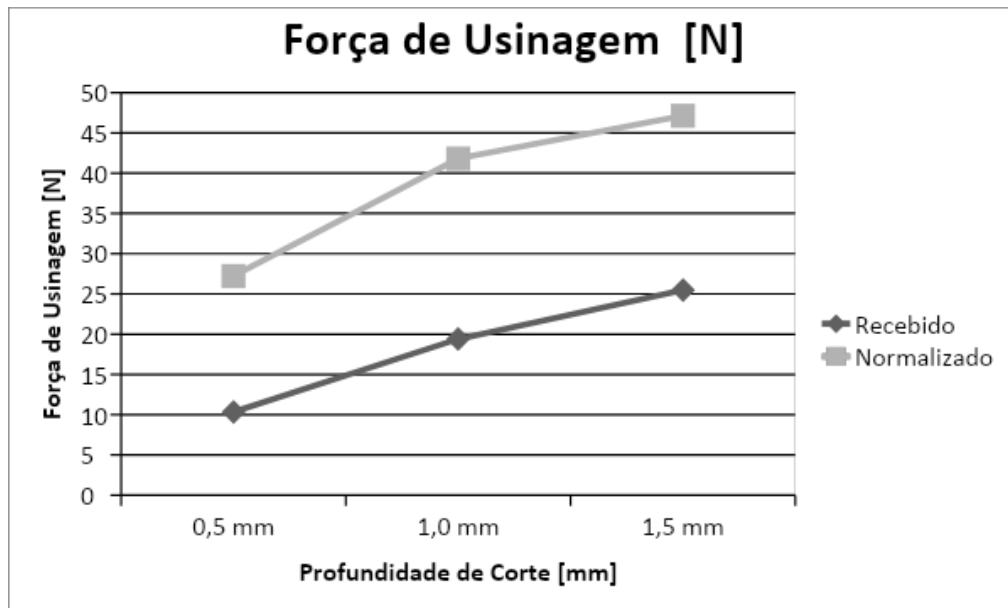


Figura 49 - Gráfico comparativo das forças de usinagem.

4.4 MICRODUREZA

Na caracterização do material foi necessário entender a relação de dureza da superfície para o centro do tarugo, por conta disto, foi cortada uma seção transversal circular da peça de modo que fosse possível retirar a dureza neste sentido mencionado. Na imagem a seguir, pode-se observar o corpo de prova e a direção da medição.

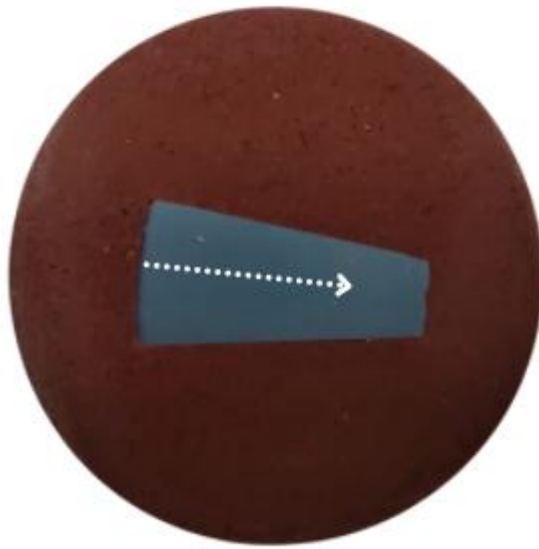


Figura 50 - Corpo de prova para medida de microdureza.

Vendo de um modo microscópico, as indentações da análise ficaram no material da seguinte maneira sendo que a distância entre elas corresponde a 0,5 milímetros, e foi pressionada com a carga de 0,3 kgf (2,94 N) por 15 segundos.

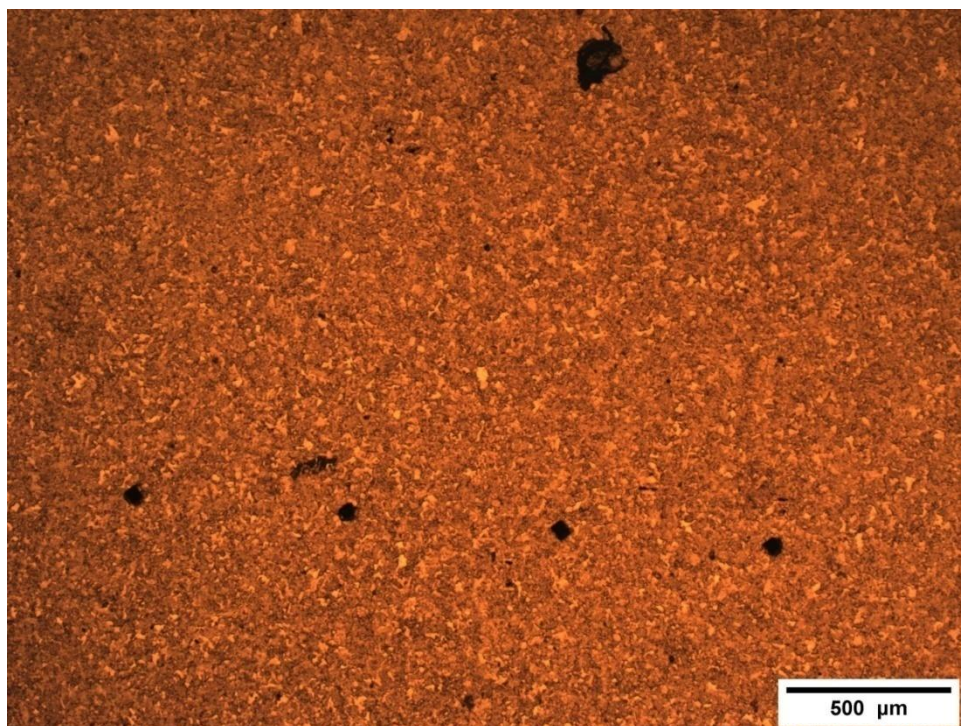


Figura 51 - Microscopia das indentações para análise de microdureza.

Os dados obtidos foram os seguintes:

Tabela 7 - Dados de Microdureza

SAE4340 Laminado			SAE4340 Normalizado		
Ensaio	Microdureza		Ensaio	Microdureza	
1	192	HV	1	227	HV
2	231	HV	2	315	HV
3	228	HV	3	315	HV
4	245	HV	4	328	HV
5	233	HV	5	325	HV
6	233	HV	6	337	HV
7	238	HV	7	314	HV
8	232	HV	8	357	HV
9	224	HV	9	319	HV
10	237	HV	10	315	HV
11	244	HV	11	337	HV
12	230	HV	12	322	HV
13	218	HV	13	325	HV
14	231	HV	14	333	HV
15	220	HV	15	310	HV
16	225	HV	16	328	HV
17	236	HV	17	340	HV
18	222	HV	18	322	HV
19	231	HV	19	371	HV
20	234	HV	20	345	HV
Média	229,2	HV	Média	324,25	HV
Des. Pad.	11,27456	HV	Des. Pad.	27,5564	HV

O gráfico de comparação dos dados foi o seguinte:

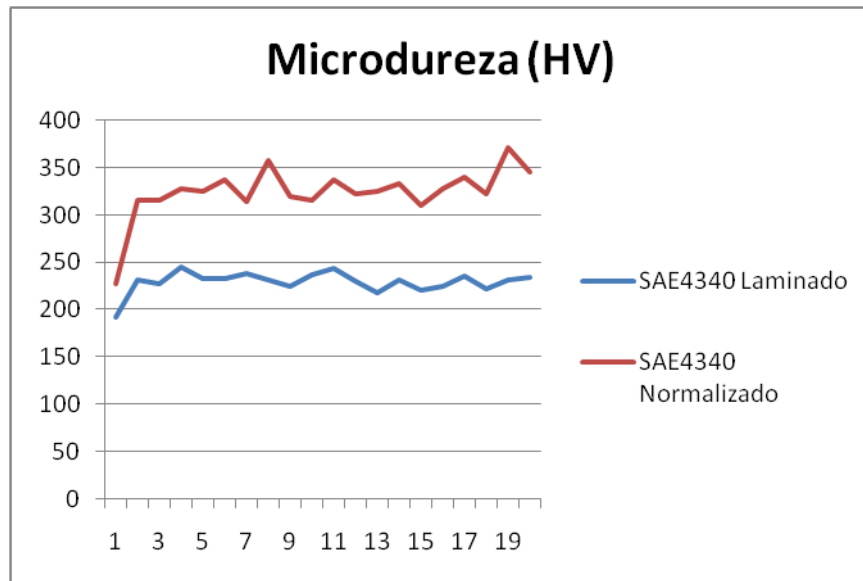


Figura 52 - Gráfico comparativo de Microdureza Vickers do Material

Nesta análise, percebe-se que o material normalizado possui dureza superior ao do material com a condição recebida, em torno de 40% (por cento) maior. Tal fato, pode ser correlacionado com a presença da martensita no material normalizado, fato explorado nas análises microscópicas anteriores.

4.5 ANÁLISE DE SAÍDA DE CAVACO

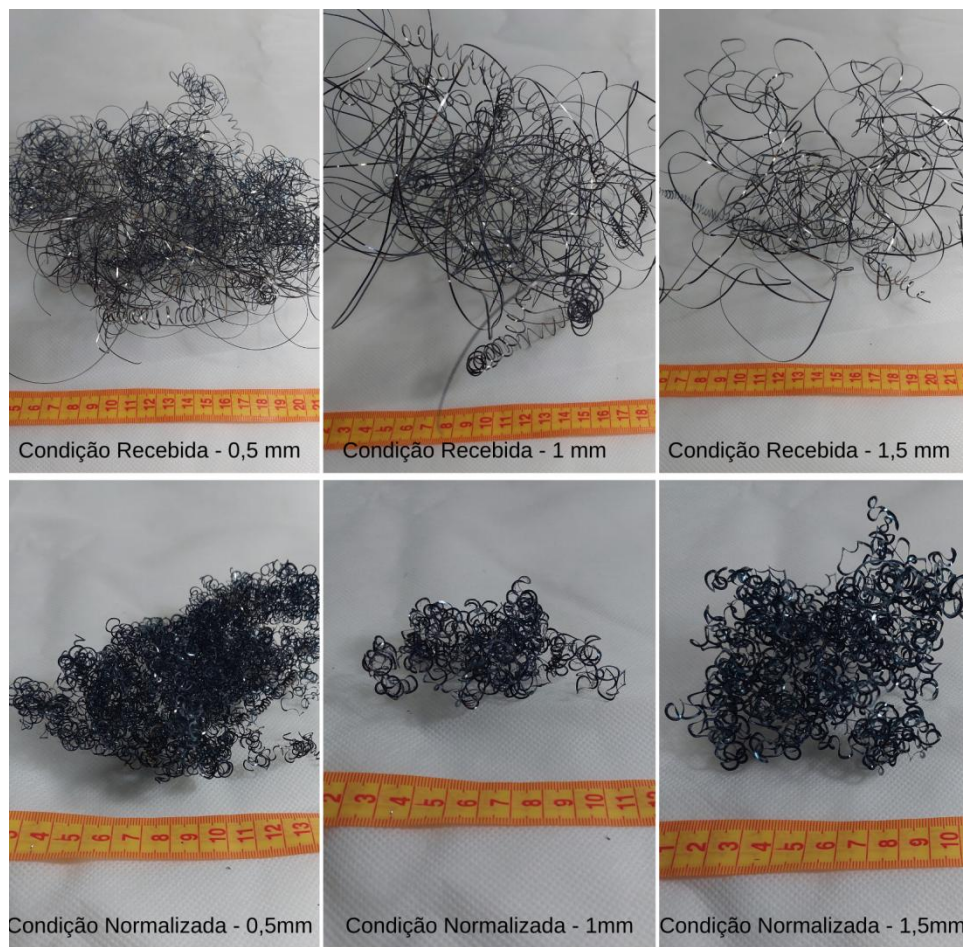


Figura 53 - Comparativo das saídas do Cavaco em Cada profundidade.

Ao analisar os cavacos pode-se perceber que a condição normalizada de fato possui a melhor condição de cisalhamento, pois o perfil encontrado é de anéis com diâmetro regular e quebra fácil do comprimento.

Enquanto que na condição recebida, pode-se perceber a pior condição de saída possível onde não há um padrão de formação de cavaco e o comprimento indica que não há quebra regular.

4.6 RUGOSIDADE

Os materiais usinados foram submetidos a um ensaio de rugosidade após o passe de 1,5 mm de profundidade, em vista disso é importante entender como a superfície da peça ficou após o processo. Os dados são os seguintes:

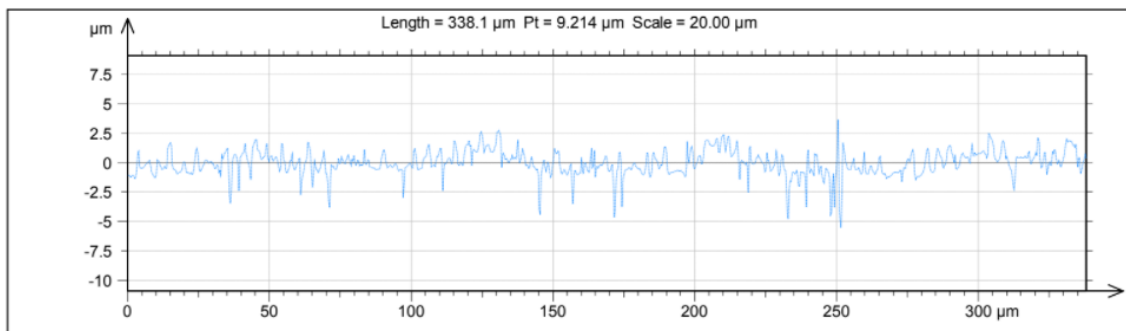


Figura 54 - Análise da superfície do Material Normalizado

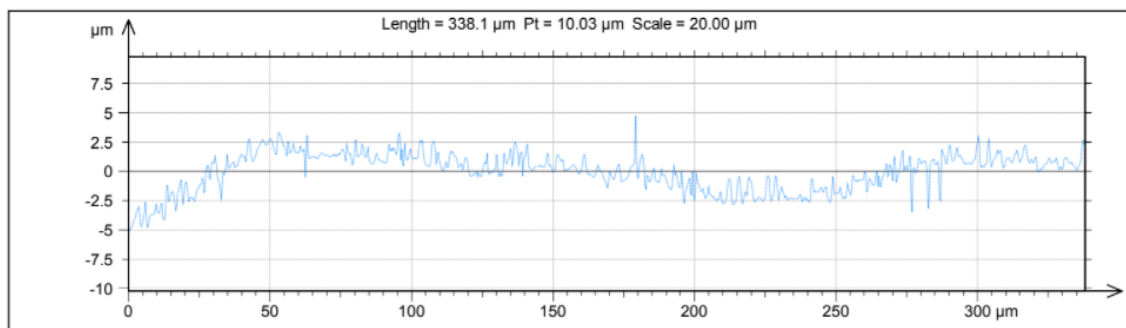


Figura 55 - Análise da Rugosidade do Material sem tratamento térmico.

A partir das imagens anteriores, pode-se perceber que o material normalizado possui uma rugosidade menor do que o material sem tratamento térmico. Ao comparar com as forças de corte percebe-se que na condição de 1,5 mm de profundidade os esforços tendem a estabilizar para os dois casos, portanto em relação à rugosidade este não é um fator determinante para o estudo. Por outro lado, ao comparar com a saída do cavaco, percebe-se que nessa profundidade a condição de saída para o

material recebido não é a ideal enquanto a para o material normalizado é a mais próxima da ideal, sendo este um fator determinante para esta análise.

A partir disto, tem-se que a correlação entre a saída do cavaco e a rugosidade mostra que quanto melhor a formação de cavaco subentende-se um cisalhamento mais adequado do material, acarretando um melhor acabamento superficial atingido.

Neste ponto é relevante ressaltar que o raio da ferramenta é um limitante para a rugosidade, sendo que a rugosidade e avanço sempre deixarão um rastro no material, nunca podendo atingir a condição de anulamento de dessa. Na imagem a seguir, pode-se exemplificar este fenômeno.



Figura 56 - Representação do rastro deixado pela ferramenta.

5 COMENTÁRIOS FINAIS

É importante perceber neste ponto do trabalho que o fator usinabilidade é relativo à condição ideal estabelecida na definição do processo. Por exemplo, um fabricante de maquinário deseja que seu equipamento dure a maior quantidade de anos possível, e para isso ele deseja que a condição de corte seja a de menor esforço evitando assim a fadiga em curto prazo. Um fabricante de rolamentos se preocupa com o acabamento superficial do material e o fabricante de pastilhas de corte está preocupado com a transferência de calor do processo.

Na presente análise foram estudados fatores como a relação entre os esforços de corte e a microestrutura do material em duas condições, também foi vista superficialmente a relação entre a rugosidade e as forças de usinagem e por fim a correlação entre saída de cavaco e os demais fatores. Cabe acrescentar que no ensaio de usinabilidade é possível avaliar outros fenômenos como transferência de calor e vida de ferramenta sendo estes dois como recomendação de trabalhos futuros.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álisson Rocha Machado, A. M. (2015). *Teoria da Usinagem dos Materiais* 3ª edição. Editora Blucher.
- ASM. (2005). *ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels and High*. ASM International.
- ASM. (1989). *Metals HandBook - Machining Processes*. ASM International.
- CERVELIN, J. E. (2009). *Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento*. Acesso em 10 de 07 de 2021, disponível em Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos.: doi:10.11606/D.18.2009.tde-28092009-152513
- DAVIM, J. (2008). *Machining: Fundamentals and Recent Advances*. London: Springer-Verlag.
- E. D. Doyle, J. G. (1979). Frictional Interactions between Chip and Rake Face in Continuous Chip Formation. *Royal Society of London*.
- EDMONDS, D. V. (1990). *Structure-Property Relationships in Bainitic Steels*, v. 21A, n. 6, pp. 1527-1540. Metallurgical Transactions.
- GERDAU. (11 de 07 de 2019). *Aço: Sua aplicação e relação com o carbono*. Acesso em 28 de 11 de 2021, disponível em GERDAU: <https://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/aco-e-sua-aplicacao-e-relacao-com-o-carbono>
- GERDAU. (18 de 03 de 2020). *Tipos de Aço e sua Classificação – normas SAE/AISI/ABNT*. Acesso em 05 de 11 de 2021, disponível em Blog Aços Especiais: <https://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/tipos-de-aco-e-sua-classificacao>
- Granta Design Limited. (2019). CES EduPack.
- Grzesik, W. (1996). A revised model for predicting surface roughness in turning. *WEAR, Volume 194, Issues 1–2*, Pages 143-148.
- LIMA, F. E. (2001). *Características do processo de torneamento de materiais endurecidos*. Acesso em 02 de 10 de 2021, disponível em Tese de Doutorado - Unicamp: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264223>
- MACHADO, Á. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., SILVA, M. B., & RUFFINO, R. T. (2009). *Teoria da usinagem dos materiais*. Editora Blucher.
- PMR2202 - Fundamentos dos Processos de Usinagem. (s.d.). Acesso em 05 de 10 de 2021, disponível em Sites Poli USP: <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS1.pdf>

SANDVIK COROMANT. (s.d.). *Materiais de ferramentas de corte*. Acesso em 15 de 06 de 2021, disponível em Conhecimento & Serviços: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>

Stoeterau, R. d. (2004). *Introdução ao Projeto de Máquina-Ferramentas Modernas*. Acesso em 15 de Setembro de 2021, disponível em Files Comunidade net: https://files.comunidades.net/mutcom/Projetos_de_maq._ferramentas.pdf

STOETERAU, R. L. (2007). *Aula 13*. Acesso em 14 de 09 de 2021, disponível em Processo de Torneamento e Tornos: http://files.alfa-silva.webnode.com/200000005-28d552952d/Aula-13-U-2007-1-torneamento_e_tornos-p1.pdf

SUYAMA, D. I. (2014). *Uma contribuição ao estudo do torneamento interno em aços endurecidos*. Acesso em 04 de 05 de 2021, disponível em Tese de Doutorado - Repositório Unicamp: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/265935>

TRENT, E., & WRIGHT, P. (2000). *Metal Cutting. 4th ed.* Woburn: Butterworth-Heinemann.

Tschiptschin, P. A. (s.d.). *Tratamento Térmico de Aços - PMT2402*. Acesso em 20 de 11 de 2021, disponível em EPUSP - Engenharia Metalúrgica e de Materiais: <http://www.pmt.usp.br/pmt2402/TRATAMENTO%20T%C3%89RMICO%20DE%20A%C3%87OS.pdf>