

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

BERNARDO PEREIRA DO AMARANTE

ESTUDO DO AÇO TOOLOX® 44 NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA
2022

BERNARDO PEREIRA DO AMARANTE

ESTUDO DO AÇO TOOLOX® 44 NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

STUDY OF TOOLOX® 44 STEEL IN TURNING MACHINE PROCESS

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dra. Sílvia do Nascimento Rosa

GUARAPUAVA
2022



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

BERNARDO PEREIRA DO AMARANTE

ESTUDO DO AÇO TOOLOX® 44 NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 07/março/2022

Sílvia do Nascimento Rosa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Guarapuava

Aldo Przybysz
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Guarapuava

Daniel Iwao Suyama
Doutorado
Faculdade de Ciências Aplicadas da Unicamp - Limeira

GUARAPUAVA
2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer a Deus pela força e ajuda diárias.

Agradecer a minha orientadora Professora Dra. Sílvia do Nascimento Rosa pela importante contribuição no desenvolvimento, andamento e refinamento do trabalho. Aos técnicos Adriana e Silva da Costa e Lucas Franco Wrege, os quais seus conhecimentos foram fundamentais em algumas etapas, e sem a ajuda deles, várias etapas teriam sido muito mais difíceis e demandariam muito mais tempo.

Agradecer a UTFPR por proporcionar materiais e a disponibilizar os laboratórios para a realização do trabalho.

Agradecer aos meus pais Flávio Rogerio do Amarante e Angela Maria Nunes Pereira do Amarante por todo o apoio possível e necessário para a realização do curso. Agradecer à minha irmã Giulia Pereira do Amarante e meus amigos pelo apoio, incentivo e paciência em todos os momentos. Sou eternamente grato por todos vocês.

RESUMO

AMARANTE, Bernardo Pereira do. **Estudo do aço Toolox® 44 no processo de torneamento.** 2022. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2022.

Com o surgimento de novos materiais surge também a necessidade de conhecer seu desempenho nos mais diversos processos de fabricação. A disponibilidade dos dados a serem inseridos nas máquinas-ferramentas é uma informação muito importante. Isso porque, diminuiu o tempo de testes preliminares para um certo produto e permite uma maior utilização do material na indústria. Empresas que trabalham com moldes, matrizes, suporte para ferramentas, eixos de carro e fundição sobre pressão, por exemplo, necessitam que os materiais utilizados nesses produtos tenham algumas características como: alta resistência, dureza e boa usinabilidade. Diante disso, o objetivo do trabalho é conhecer o comportamento do Toolox® 44, um aço ferramenta que tem as características citadas acima, no processo de torneamento, comparando-o com o aço SAE 1045. Para essa comparação, o foco do estudo foi analisar a micrografia, a dureza, a corrosão, a temperatura de usinagem, o cavaco, o desgaste das ferramentas e a rugosidade. Duas ferramentas de corte foram utilizadas, uma de metal duro com revestimento por deposição física de vapor e uma cerâmica com óxido de alumínio. As velocidades de corte variaram de 179,446 m/min até 245,3 m/min, a profundidade de corte foi mantida sempre em 0,25 mm e dois valores de avanço foram utilizados (0,079 mm e 0,14 mm). Os resultados do estudo mostraram que a taxa de corrosão anual do Toolox® 44 é mais que três vezes menor do que a do aço 1045, aproximadamente 964 e 3417 mm/ano, respectivamente. A dureza do Toolox® 44 é quase cinco vezes maior do que a do aço 1045, 352 e 174 HB, respectivamente. Durante o processo de torneamento, os valores das temperaturas medidas no cavaco foram maiores para a ferramenta de metal duro, com a média em aproximadamente 178 °C. O formato e a coloração do cavaco é diferente durante a operação de sangramento para os dois materiais, pois para o aço Toolox® a operação não deve ser interrompida. A ferramenta de cerâmica obteve menor desgaste. Já a rugosidade média para as duas ferramentas ficou dentro do intervalo esperado para o processo de torneamento. Diante do exposto, a sugestão quanto a escolha de umas das ferramentas para a usinagem desses materiais é optar pela mais barata, visando minimizar os custos do processo.

Palavras-chave: Toolox® 44, Torneamento, Rugosidade, Corrosão, Cavaco.

ABSTRACT

With the emergence of new materials, the need to know their development in the various manufacturing processes was also found. The availability of data to be entered into machine tools is very important information. This is because, it reduces the time of preliminary tests for a product and allows a greater use of the material in the industry. The companies that work with mold, matrix, tools holder, carriage shaft and pressure casting, for example, need that the used materials have some characteristics such as: high strength, hardness and good machinability. In front of this, the objective of this study is to know the behavior of Toolox® 44, a tool steel that has the characteristics mentioned above, in the turning process, comparing it to the SAE 1045 steel. For this comparison, the focus of the study was to analyze the micrograph, the hardness, the corrosion, the machining temperature, the chip, the tool wear and the roughness. Two cutting tools were used, a hard metal with physical vapor deposition coating and a ceramic with aluminum oxide. The cutting speeds ranged from 179.446 m/min to 245.3 m/min, the deep cutting was kept always in 0.25 mm and two values of feed rate was used (0.079 mm and 0.14 mm). The results of this study showed that the annual corrosion rate on Toolox® 44 is more than three times smaller than that of 1045 steel approximately 964 and 3417 mm/year, respectively. The hardness on Toolox® 44 is almost five times bigger than that of 1045 steel, 352 and 174 HB, respectively. During the turning process, the values of temperatures measured in the chip were bigger for the hard metal tool, with an average of approximately 178 °C. The shape and color of the chip is different during the cutoff operation for the two materials, because for Toolox® steel the operation must not be interrupted. The ceramic tool got less wear. Yet The average roughness for the two tools was within the expected range for the turning process. In view of the above, the suggestion regarding the choice of one of the tools for machining these materials is to choose the cheapest one, in order to minimize the costs of the process.

Keywords: Toolox® 44, Turning, Roughness, Corrosion, Chip.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Operação de torneamento.	3
Figura 2 – Tipos de torneamento.	4
Figura 3 – Redução da resistência à fadiga de acordo com o acabamento superficial. . .	8
Figura 4 – Desvios de superfície utilizados para definir a rugosidade da superfície. . . .	9
Figura 5 – Ilustração da operação do apalpador de um rugosímetro.	9
Figura 6 – Representação de R_p, R_v, R_t	10
Figura 7 – Formas de corrosão.	11
Figura 8 – Modelo dos corpos de prova.	15
Figura 9 – Medição de Corrosão.	16
Figura 10 – Luneta fixa.	17
Figura 11 – Pastilha WNMG 080408 NM PL10, broca de aço rápido e pastilha para canal.	18
Figura 12 – Ferramentas de metal duro (a) e cerâmica (b).	20
Figura 13 – Tarugos ao término dos ensaios.	21
Figura 14 – Rugosímetro Mitutoyo SJ-140.	21
Figura 15 – Termovisor Infravermelho HOT TEC HT7.	22
Figura 16 – Microestrutura do aço Toolox® 44.	23
Figura 17 – Microestrutura do aço ABNT 1045.	23
Figura 18 – Comparação de dureza.	24
Figura 19 – Cavacos gerados na abertura dos canais no 1045.	25
Figura 20 – Cavacos gerados na abertura dos canais no Toolox® 44.	25
Figura 21 – Comparação das temperaturas no Toolox® 44.	26
Figura 22 – Cavacos gerados no ensaio durante o torneamento do Toolox® 44.	26
Figura 23 – Comparação das temperaturas no 1045.	27
Figura 24 – Cavacos gerados no ensaio durante o torneamento do aço 1045 com a ferramenta de metal duro.	27
Figura 25 – Comparação das arestas de corte metal duro.	28
Figura 26 – Comparação das arestas de corte da ferramenta cerâmica no 1045.	29
Figura 27 – Valores do parâmetro R_a	29
Figura 28 – Valores do parâmetro R_z	30
Figura 29 – Valores do parâmetro R_t	31
Figura 30 – Valores do parâmetro R_p	31
Figura 31 – Valores do parâmetro R_v	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Química do aço Toolox®	6
Tabela 2 – Recomendações de usinagem	6
Tabela 3 – Valores de rugosidade média de superfície produzidos por usinagem.	8
Tabela 4 – Composição química do aço Toolox® 44.	15
Tabela 5 – Parâmetros de usinagem na preparação do tarugo de aço 1045.	18
Tabela 6 – Parâmetros de usinagem na preparação do tarugo de Toolox® 44.	18
Tabela 7 – Parâmetros de corte recomendados.	19
Tabela 8 – Parâmetros de corte.	20
Tabela 9 – Resultado do ensaio de corrosão dos materiais.	24
Tabela 10 – Medição do desgaste na superfície de saída das ferramentas no Toolox® 44 .	28
Tabela 11 – Medição do desgaste das ferramentas no aço 1045.	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO	2
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
3.1	TORNEAMENTO	3
3.2	MATERIAIS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA	4
3.2.1	Toolox®	5
3.3	INTEGRIDADE SUPERFICIAL	6
3.3.1	Rugosidade	8
3.3.2	Dureza	10
3.3.3	Corrosão	11
3.3.3.1	Cálculos de corrosão	12
3.4	Temperatura na usinagem	13
3.5	Estudo de caso	13
4	MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.1	MATERIAIS	15
4.2	ANÁLISE DOS MATERIAIS	15
4.3	TORNEAMENTO	17
4.3.1	Preparação dos corpos de prova	17
4.3.2	Ensaio	19
4.4	RUGOSIDADE	20
4.5	DESGASTE	20
4.6	TEMPERATURA	21
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	23
5.1	MICROGRAFIA, DUREZA E CORROSÃO	23
5.2	PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA E ENSAIOS	24
5.3	TEMPERATURA, CAVACO E DESGASTE	26
5.4	RUGOSIDADE	29
6	CONCLUSÃO	33

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de materiais cada vez mais resistentes e com um menor peso nos projetos induz o desenvolvimento de materiais mais leves que substituirão materiais equivalentes, porém mais pesados, trazendo inúmeras vantagens de construção, performance e, conseqüentemente, sustentabilidade. Alguns aços com essas características são chamados de aços de alta resistência e baixa liga (ARLB), resultado de muitos anos de pesquisas e desenvolvimento.

Devido a adição de elementos de liga, que conforme a porcentagem, oferecem propriedades mecânicas específicas, resultando em benefícios para a composição final, os aços ARBL têm atingido valores de resistência mecânica superiores a 1200 MPa. Quando se trata de processos de usinagem, algumas das características provenientes da adição desses elementos de liga podem prejudicar a usinabilidade. Justamente por este ponto, experimentos são realizados no intuito de buscar as melhores alternativas e as melhores estratégias para se trabalhar com esses aços. A utilização de fluidos de corte, escolha correta da ferramenta e até mesmo a fixação, para evitar vibrações indesejadas, são de extrema importância para a indústria.

Um tipo específico de aço ARBL tem chamando atenção da indústria, o Toolox® 44. Esse aço vem sendo muito utilizado e mostrando resultados expressivos em componentes de máquinas de alto desempenho de todos os formatos e tamanhos (SSAB, 2020). O maquinário de alto desempenho precisa de componentes com alto grau de confiabilidade, já que o controle das peças é extremamente rígido, para minimizar falhas.

Devido a crescente procura por este material e a expansão da utilização, a decisão de utilizar o aço Toolox® para este trabalho se deu pelo pouco número de publicações se tratando da usinagem, e, menos ainda, do comportamento deste aço durante o processo de torneamento. Além de que a região de Guarapuava tem potencial para se beneficiar dos resultados desse trabalho, por se tratar de uma região que está se inserindo ao mercado de indústrias mais pesadas, as quais exigem maquinário de alto desempenho.

Dessa forma, este trabalho utilizará o processo de torneamento no aço Toolox® e avaliará os resultados se baseando nos testes de corrosão, dureza e rugosidade. Serão avaliadas as ferramentas, assim como o comportamento do aço após cada etapa da pesquisa.

2 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é comparar o comportamento do aço Toolox® 44 e do aço 1045 durante o processo de torneamento, a fim de entender o desempenho do primeiro aço, utilizando duas ferramentas de corte, uma de metal duro e outra de cerâmica.

Para alcançar o objetivo do trabalho, serão realizados:

- metalografia dos aços;
- medição de macrodureza;
- medição da taxa de corrosão anual;
- medição da rugosidade;
- medição do desgaste na superfície de saída das ferramentas;
- análise do formato e da coloração dos cavacos;
- medição de temperatura na saída do cavaco.

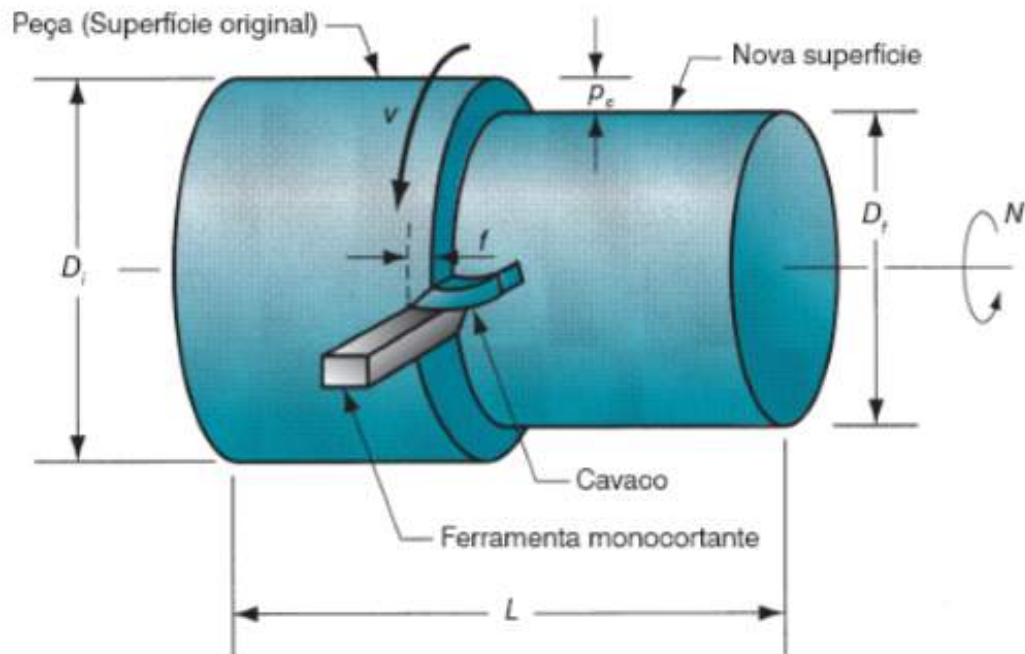
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 TORNEAMENTO

O processo de torneamento é um dos processos de usinagem convencional mais utilizados e o corte se dá através da rotação da peça em torno de um eixo fixo, geralmente fixada por castanhas, juntamente com o deslocamento transversal da ferramenta em direção a peça (GROOVER, 2014). Para realizar a operação se faz necessário o uso de tornos mecânicos convencionais ou de comando numérico computadorizado (CNC), conforme a complexidade e tolerâncias das peças. O torno mecânico universal horizontal é uma das máquinas mais comuns na indústria metal-mecânica e é também uma das mais antigas. É a máquina que apresenta a maior variação de tipos para atender os diversos processos de fabricação seriada ou áreas, como ferramentaria, e manutenção para usinagem de peças de reposição (ALMEIDA, 2015).

A Figura 1 ilustra o resultado do corte quando uma ferramenta se desloca no sentido longitudinal da peça. O desbaste faz com que haja a formação do cavaco e surja uma nova superfície, com um diâmetro diferente do original.

Figura 1 – Operação de torneamento.

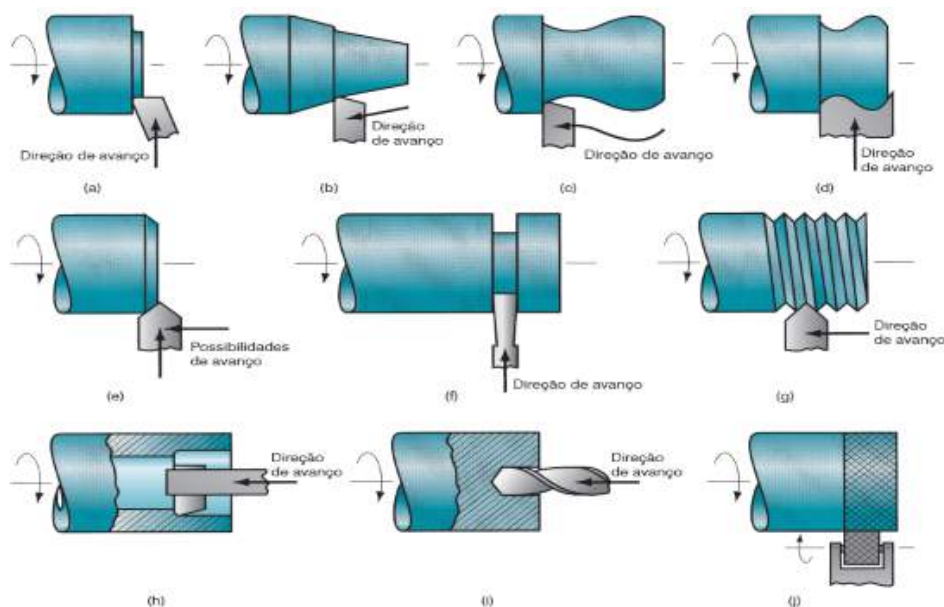


Fonte: Adaptado GROOVER (2014).

A maior parte das operações de torneamento acontecem com um ponto único de contato entre a peça e a ferramenta. Como exceção e, pode-se citar o perfilamento e a furação. O primeiro é realizado com uma ferramenta projetada especialmente para dar a forma do perfil. A segunda é realizada por uma broca.

No processo de torneamento existem diversas operações que podem ser executadas, cada uma com a sua particularidade, como mostra a Figura 2:

Figura 2 – Tipos de torneamento.



Fonte: Adaptado GROOVER (2014).

As operações mais comuns são:

- (a) faceamento;
- (b) torneamento cônico;
- (c) torneamento curvilíneo;
- (e) chanframento;
- (f) canal;
- (g) rosqueamento;
- (h) torneamento interno;
- (i) furação;

Independente de ser comum ou não, não significa que as outras não sejam importantes. A seleção da operação varia conforme o tipo de trabalho que precisa ser realizado.

3.2 MATERIAIS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA

Os materiais de alta resistência e baixa liga (ARBL) são utilizados quando se quer aumentar a resistência mecânica, melhorar a resistência à corrosão atmosférica, melhorar a resistência ao choque e o limite de fadiga e elevar a relação do limite de escoamento para o limite de resistência à tração (CHIAVERINI, 1979).

Quando se trata das proporções de cada elemento, a quantidade de carbono é dada entre 0,02% até 0,2%. Quaisquer adições de liga, como Ni, Cu, Cr, and Mo, são limitados a 1,5% no total, enquanto Mn varia de 1% até 2% e Si até 0,5% (PERELOMA, EDMONDS, 2012).

Segundo Chiaverini (1979), os aços ARBL podem ser agrupados em quatro categorias, conforme o limite de escoamento:

1- Aços estruturais perlíticos na condição laminada, com limite de escoamento de 275 a 345Mpa.

2- Aços carbono normalizados ou temperados e revenidos, com limite de escoamento de 290 a 690Mpa.

3- Aços de baixo teor em liga temperados e revenidos, com um limite de escoamento de 550 a 760Mpa.

4- Aços micro ligados, com uma combinação de micro adições de determinados elementos de liga, de alto limite de escoamento, obtidos em condições controladas de laminação e forjamento.

Baseado em sua microestrutura, um estudo feito em 2001 a ASM International dividiu os aços ARBL em seis diferentes grupos. Dependendo da aplicação, esta segmentação pode tornar a escolha de qual ARBL usar mais simples.

1- Aços de intemperismo, que são formados por pequenas quantidades de elementos de liga (fósforo e cobre), para aumentar a resistência a corrosão atmosférica.

2- Aços ferrita perlita microligados, com uma melhor precipitação das ligas adicionadas e maior refinamento de grão.

3- Aços perlíticos laminados que provém de aços carbono manganês, ou outros elementos de liga, buscando melhorar a resistência, tenacidade, formabilidade e soldabilidade.

4- Aços de dupla fase possuem uma microestrutura martensítica disposta em uma matriz ferrítica, produzindo uma boa ductilidade e alta resistência a tração.

5- Aços de ferrita acicular (bainita de baixo carbono) combinam alta resistência, chegando a 690 MPa, soldabilidade, formabilidade e tenacidade.

6- Aços controlados por inclusão trazem boas ductilidade e tenacidade.

As aplicações desse tipo de aço são, principalmente, em oleodutos e gasodutos, veículos de off road, construção de rodovias, máquinas agrícolas, tanques de armazenamento, vagões de minas, veículos para neve, componentes automotivos, pontes, torres de transmissão de energia, vigas, entre outros. A escolha se dá pela aplicação, onde se decide quais as características físicas e mecânicas são necessárias para suprir as deficiências que outros materiais não conseguiriam resolver.

3.2.1 Toolox®

O aço Toolox® é um aço do tipo ARBL, para ferramentas e pré-endurecido, podendo ser utilizado em praticamente todas as aplicações (SSAB, 2017). É um aço de engenharia que consegue atender e até mesmo superar as exigências de equipamentos de produção industrial de última geração. Sua produção foi desenvolvida para que ele atenda, com precisão, as propriedades mecânicas e químicas que superam as grades tradicionais de aço em termos de dureza, qualidade superficial, resistência e usinabilidade. Tudo isso para suprir uma produção

rápida, obtendo um desempenho mais confiável dos produtos finais.

O Toolox® é um aço que combina tenacidade e dureza, juntamente com uma excelente usinabilidade, estabilidade dimensional, alto nível de pureza e resistência à fadiga. Devido a estas propriedades, está sendo cada vez mais utilizados em moldes e matrizes que podem produzir produtos, como: capas de motores, molduras de televisores e peças de segurança de veículos até componentes de alto desempenho (SSAB, 2017).

Um exemplo deste tipo de aço utilizado para componentes de máquinas de alto desempenho de todos os tamanhos e formatos é o Toolox® 44 que tem em sua composição química as seguintes quantidades dos elementos, mostrados na Tabela 1:

Tabela 1 – Composição Química do aço Toolox®

Composição Química Toolox® 44)	
Carbono	0,32%
Silício	0,9%
Manganês	10,8%
Fósforo	MÁX 0,011%
Enxofre	MÁX 0,003%
Cromo	MÁX 1,7%
Molibidênio	MÁX 1,4%
Vanádio	MÁX 0,17%
Níquel	MÁX 1,4%

Fonte: SSAB (2017).

Na parte mecânica, considerando uma temperatura de 20 °C, possui resistência à tensão de 1450 MPa e a dureza (HBW), em torno de 450.

Para torneamento dos aços Toolox®, de uma forma geral, as recomendações de velocidade de corte para metal duro, cuja classe tenha propriedades onde haja impacto na operação estão mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Recomendações de usinagem

Classe	Velocidade de corte (m/min)
Toolox® 33	150 - 200
Toolox® 40	90 -140
Toolox® 44	80 - 120

Fonte: SSAB (2017).

Com um avanço mais alto, recomenda-se diminuir a velocidade de corte para estes aços.

3.3 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

O termo integridade superficial foi citado pela primeira vez em 1964 por Field and Kahles (GRIFFITHS, 2001), e pode ser definida pela qualidade final da superfície após algum

tipo de processo de fabricação. Ela é descrita como um conjunto de múltiplas propriedades que afetam o acabamento, e conseqüentemente, o desempenho desta superfície, e alterações microestruturais na camada superficial.

No processo de usinagem, a integridade superficial depende de muitas características do sistema, que inclui a ferramenta, porta ferramentas, fuso e acionamento, dispositivos de fixação e alimentação, fluido refrigerante, dentre outros, o que torna esse conceito, na manufatura, bastante complicado (ASTAKHOV, 2009).

No acabamento, de uma forma geral, são levados em conta aspectos como falhas, rugosidade e ondulações. Na parte da camada superficial, são levados em conta fatores como microdureza, deformação plástica, recristalização, tensões residuais e transformações metalúrgicas. Estas características representam a funcionalidade e a vida, em relação a fadiga, do material usinado. Os processos de fabricação podem gerar mudanças nas propriedades do material na camada subsuperficial. Uma das causas mais conhecidas são as altas temperaturas desenvolvidas durante a remoção de material, seja ela por deformação plástica ou feita quimicamente.(MACHADO et al, 2015).

As alterações mais recorrentes nas camadas subsuperficiais, provenientes dos processos de usinagem, são: martensita revenida, microtrincas, ataque intragranular, deformação plástica e camada branca (ASTAKHOV, 2009).

As tensões residuais ocasionadas pelo torneamento dependem do tipo de material a ser usinado e dos parâmetros selecionados para o processo. O acabamento gerado é afetado por uma combinação de raios de ponta da ferramenta. As tensões residuais ocasionadas pelo torneamento dependem do tipo de material a ser usinado e dos parâmetros de torneamento. O torneamento geralmente produz uma integridade superficial aceitável, desde que as ferramentas sejam afiadas e as condições de usinagem empregadas promovam uma vida útil elevada da ferramenta (GRIFFITHS, 2001).

Segundo Astakhov (2009), pode-se dividir os parâmetros da seguinte maneira:

- Parâmetros geométricos (acabamento de superfície);
- Parâmetros físicos (microdureza e tensões residuais);
- Parâmetros químicos (oxidação, adsorção);
- Parâmetros biológicos (proliferação celular);
- Condições de serviço (forças, temperaturas);
- Análises abrangentes do modo e da causa raiz da falha;

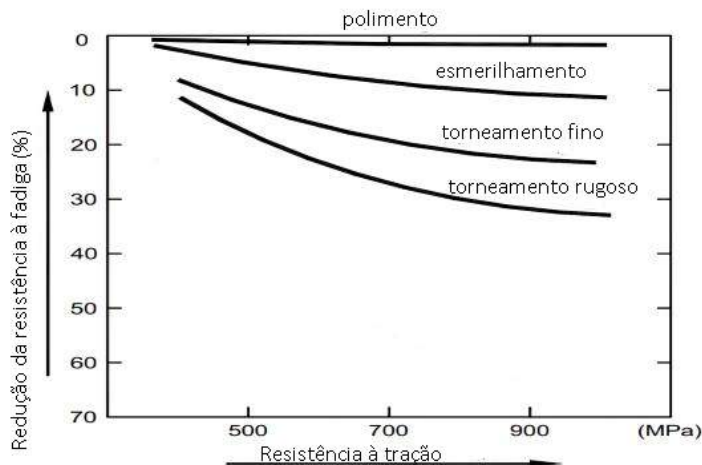
A integridade superficial não se refere somente a aspectos topológicos das superfícies, mas um conjunto de componentes físicos, mecânicos, químicos, metalúrgicos e propriedades características. Cada tipo de processo de desgaste deixará marcas exclusivas na superfície usinada, onde teremos quatro exemplos:

- Polimento;
- Esmerilhamento;
- Torneamento;

- Torneamento Rugoso;

A Figura 3 representa o comportamento de cada exemplo.

Figura 3 – Redução da resistência à fadiga de acordo com o acabamento superficial.



Fonte: Adaptado ASTAKHOV (2009).

O padrão da superfície será influenciado pelo método de usinagem selecionado. O objetivo é garantir as propriedades necessárias para a atribuição, já que muitas operações de fabricação afetam diretamente essas propriedades.

3.3.1 Rugosidade

A rugosidade de uma superfície é caracterizada por irregularidades finas ou falhas micro geométricas provenientes do corte/desbaste do material. Ela é utilizada como parâmetro de saída, ou seja, é utilizada como parâmetro para o controle no final de um processo. A rugosidade também depende de outros fatores, como: ferramenta, geometria do material, material da peça, material da ferramenta, dentre outros (GROOVER, 2014).

Na Tabela 3 temos alguns exemplos de como se comporta conforme o processo de usinagem.

Tabela 3 – Valores de rugosidade média de superfície produzidos por usinagem.

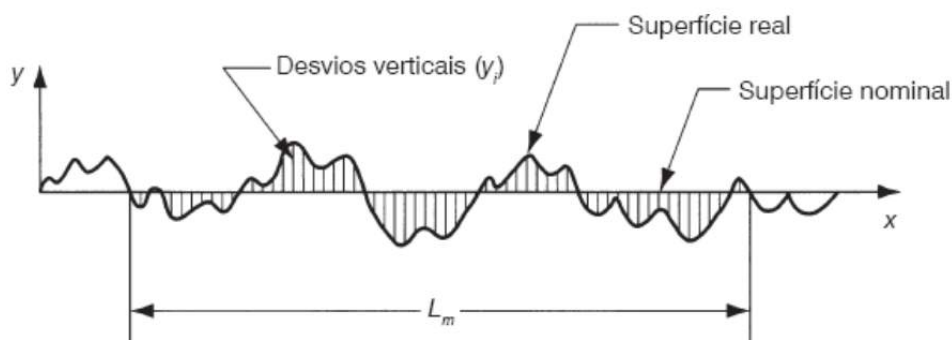
Processo de Usinagem	Acabamento Típico	Faixa de Rugosidade $\mu\text{m}(\mu\text{-in})$
Torneamento interno	Bom	0,5 - 6 (15 - 250)
Furação	Regular	1,5 - 6 (60 - 250)
Fresamento	Bom	1 - 6 (30 - 250)
Alargamento	Bom	1 - 3 (30 - 125)
Aplainamento	Regular	1,5 - 12 (60 - 500)
Serramento	Pobre	3 - 25 (100 - 1000)
Torneamento externo	Bom	0,5 - 6 (15 - 250)

Fonte: Adaptado GROOVER (2014).

Irregularidades como ondas e falhas devem ser evitadas, ou minimizadas ao máximo, durante o processo de fabricação da superfície, já que caracterizam erros de fabricação. Entretanto, a rugosidade é um parâmetro que varia conforme a aplicação da superfície. Uma rugosidade baixa é essencial em superfícies de mancais, superfícies que requerem pintura, superfícies que servirão de escoamento de fluidos e gases, superfícies cujo visual exige brilho e superfícies que devem refletir raios e luzes. Superfícies que trabalham sob lubrificação devem ter uma rugosidade característica, como as paredes dos cilindros de motores de combustão interna. Neste caso, a operação de brunimento tem a função de deixar a superfície com uma rugosidade que favoreça a lubrificação. (MACHADO et al, 2015).

Segundo Groover (2010), a medição mais comum para textura de superfície é a rugosidade. Ela pode ser obtida pelos desvios verticais da superfície ao longo de um comprimento especificado, que é representada pela linha denominada linha média, como é representado na Figura 4.

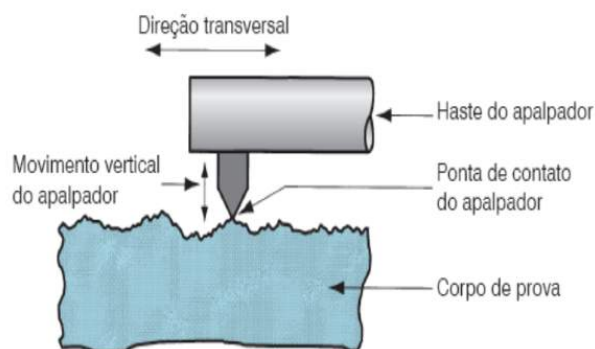
Figura 4 – Desvios de superfície utilizados para definir a rugosidade da superfície.



Fonte: Adaptado GROOVER (2010)

A medição é feita pelo rugosímetro, podendo ou não ter contato entre o apalpador e a peça. A com contato é a mais utilizada, já que o funcionamento é mais simples, versátil e com custo mais baixo. Um apalpador de diamante percorre uma distância predeterminada, em linha reta, convertendo um sinal elétrico que, posteriormente, é amplificado, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Ilustração da operação do apalpador de um rugosímetro.



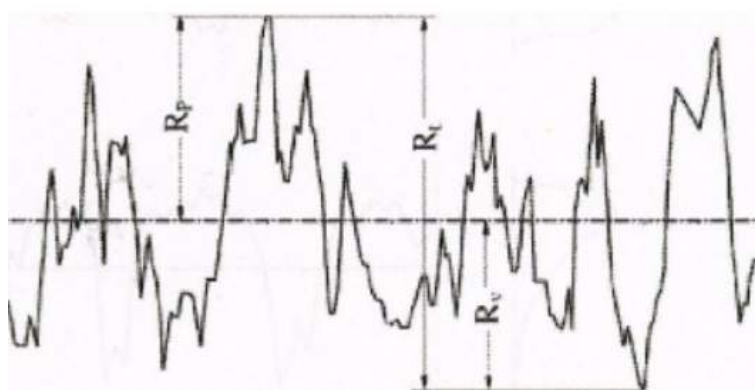
Fonte: GROOVER (2014).

Pelo perfil gerado pelo sistema de medição é possível obter parâmetros de avaliação, definidos como (MACHADO et al, 2015):

- Parâmetros de amplitude: determinados por alturas dos picos, profundidade dos vales ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície.
- Parâmetros de espaço: determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.
- Parâmetros híbridos: determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço.

A Figura 6 representa os perfis mais comuns gerados após a medição.

Figura 6 – Representação de R_p , R_v , R_t .



Fonte: Adaptado PETROPOULOS; PANDAZARAS; DAVIM (2010).

A rugosidade média aritmética (R_a) é o valor médio do perfil de rugosidade de uma região determinada. De acordo com Machado (2015), pode ser estimada pela equação (1).

$$R_a = \frac{f^2}{31,2 \cdot r_e} \quad (1)$$

O valor do pico mais alto acima da linha central (R_p) e o valor do vale mais abaixo da linha central (R_v) são medidas que, considerando uma região determinada, a soma dos seus valores retorna o parâmetro R_t .

3.3.2 Dureza

Uma das variações que surgem na superfície de uma peça usinada é a dureza. Essa alteração pode ser significativa ao longo da seção transversal em função das alterações metalúrgicas. Nos aços a temperatura na superfície, associada ao resfriamento rápido, pode levar a formação de martensita não revenida, onde tem-se a elevação da microdureza das camadas atingidas. No caso de um resfriamento menos severo, ocorre a formação de revenido dessa martensita, reduzindo a dureza em relação ao valor inicial (MACHADO et al, 2015).

De acordo com Hassanpour et al. (2016), esta dureza pode ser dividida em três mecanismos. O primeiro seria o gradiente de temperatura provocado pelo cisalhamento que, após um resfriamento, pode transformar a fase do material, resultando no aumento da dureza. O

segundo é proveniente das severas deformações plásticas e encruamento na superfície da peça. O terceiro é uma mudança na microestrutura, formando camadas brancas, regiões que caracterizam o endurecimento do material, em função das condições de corte.

Groover (2014) define a dureza como uma resistência à indentação permanente. Um material com uma boa dureza, geralmente é um material resistente ao riscamento e ao desgaste. Os ensaios de dureza normalmente são usados para avaliar as propriedades de um material, devido a rapidez e a praticidade e os mais conhecidos são: Rockwell e Brinell. Ensaios de dureza Brinell são utilizados em metais e não metais de média ou baixa dureza. A dureza Rockwell passou por muitas melhorias ao longo do tempo, tornando-se um ensaio adaptável a uma variedade de materiais.

3.3.3 Corrosão

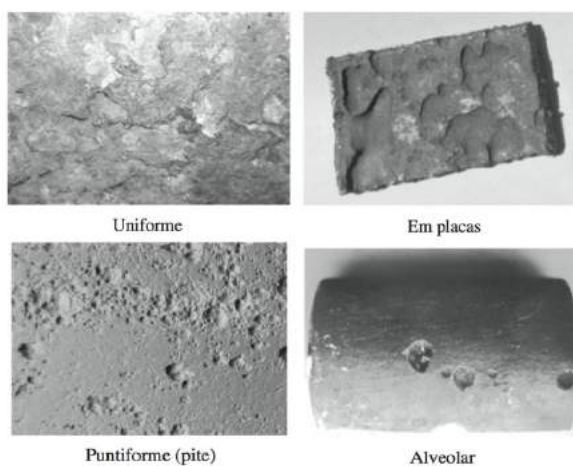
A corrosão pode ser definida como um ataque gradual e contínuo que causa deterioração de um material, geralmente metálico. Este ataque ao metal pode ser por ação química ou física, ou seja, ambiente em que o material está inserido, ou esforços mecânicos sofridos (CHIAVERINI, 1979; GENTIL, 2011).

Segundo Chiaverini (1979), o tipo de corrosão mais comum é a atmosférica que tem como principais agentes os óxidos sulfurosos gasosos, provenientes de combustíveis fósseis, indústrias, entre outros, e, nas áreas costeiras, partículas de água salgada. Gentil (2011) retrata que a corrosão atmosférica depende fundamentalmente dos fatores:

- substâncias poluentes — particulados e gases.
- umidade relativa.
- tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica.
- temperatura.

Quando se trata das diferentes formas de corrosão, para a superfície, Gentil (2011) cita quatro tipos, representados na Figura 7.

Figura 7 – Formas de corrosão.



Fonte: Adaptado GENTIL (2011).

A corrosão em placas forma placas com escavações e não ocorrem em toda a extensão. A uniforme percorre toda a extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura. Também pode ser chamada de corrosão generalizada, mas essa terminologia não deve ser usada só para corrosão uniforme, pois pode-se ter, também, corrosão por pite ou alveolar generalizada, isto é, em toda a extensão da superfície corroída. A corrosão por pite ocorre em pontos ou em pequenas áreas na superfície metálica. Os pites são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior do que o seu diâmetro. A corrosão alveolar ocorre na superfície, produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos. Estes, com fundo arredondado e profundidade geralmente menor que o seu diâmetro.

3.3.3.1 Cálculos de corrosão

Reações químicas tanto consomem quanto produzem elétrons. A medição do fluxo de elétrons é dada em corrente (I), com a unidade em amperes. Um ampere equivale a um Coulomb ($6,2 \cdot 10^{18}$ elétrons) de carga por segundo. A Lei de Faraday dá a proporcionalidade entre a corrente (I) e a massa reagida (m) em uma reação eletroquímica.

$$m = \frac{I \cdot t \cdot a}{n \cdot F} \quad (2)$$

Na equação (2), (t) representa o tempo em segundos, (a) é o peso atômico do elemento metálico, (n) é o número de elétrons do processo que transfere carga e (F) é a constante de Faraday (96487 Coulomb/mol).

Segundo Gogola (2014), quando se divide a equação (2) pelo tempo e pela área da superfície, consegue-se a taxa de corrosão r:

$$r = \frac{m}{t \cdot A} = \frac{i \cdot a}{n \cdot F} \quad (3)$$

Na equação (3), i é a densidade da corrente, ou seja, I/A. A equação (3) devolve o valor de proporcionalidade entre da massa pela área pelo tempo, por exemplo, mg/dm²/dia (GOGOLA, 2014).

De acordo com Jones (1992), a densidade de corrente, geralmente, é usual e medida em valores extremamente baixos ou extremamente altos, o que tornam as medições eletroquímicas algo muito sensível e conveniente para o estudo da corrosão.

Para chegar a uma taxa de corrosão (x), primeiro deve-se encontrar a densidade de corrente de corrosão (i_{cor}) através da equação (4):

$$i_{cor} = \frac{|\beta_c| \cdot |\beta_a|}{2,303 \cdot R_p \cdot (\beta_c + \beta_a)} \quad (4)$$

Onde o R_p é a resistência à polarização e o β_a e o β_c são as inclinações de Tafel anódicas e catódicas .

Com a junção das equações (3) e (4) pode-se determinar a taxa de corrosão do material (x) proporcional ao tempo (mm/ano), através da equação (5).

$$x = \frac{10.i_{cor}.a.t}{n.F.d.A} \quad (5)$$

Onde (a) é o peso atômico do elemento metálico (g/mol). Quando utilizar ligas, deve-se fazer a média ponderada dos principais elementos. O (A) é a área do eletrodo ensaiado (cm^2), (d) é a densidade do material metálico que sofre a corrosão (g/cm^3) e o (t) é o tempo total, em segundos, equivalente a um ano, ou seja, 31.557.600 segundos, considerando um ano tendo 365,25 dias.

3.4 Temperatura na usinagem

As temperaturas geradas durante o processo de torneamento dependem diretamente dos parâmetros de corte utilizados, como a velocidade de corte, a profundidade de corte, o avanço e a utilização, ou não, de fluido de corte. O monitoramento desta temperatura pode evitar algumas falhas durante o processo. Isto porque, as propriedades mecânicas podem ser alteradas, e de forma significativa, conforme a variação de temperatura (MACHADO et al., 2009; GROOVER, 2014).

Segundo Costa (2004), o aumento de temperatura pode acelerar o desgaste das ferramentas, além de reduzir o limite de escoamento, também prejudicando a taxa de remoção de material, principalmente em materiais com alto ponto de fusão ou materiais duros.

A medição pode ser feita partindo-se de uma resistência elétrica envolvida em uma manta isolante, para que haja um aquecimento local, relacionando valores de tensão e temperatura (CARVALHO; ABRÃO; RUBIO, 2004).

Outra forma de medição pode ser a utilização de câmeras térmicas. Um exemplo é a câmera termográfica modelo FLIR C2, com resolução de 4800 pixels, tela de 3 polegadas, iluminação no formato LED integrada, possibilidade de medição de temperatura em qualquer ponto da imagem, distância de foco mínima de 0,15 metros, frequência espectral de 7.5 - 14 μm e uma frequência de imagem de 9 Hz. A câmera foi utilizada para a análise da temperatura na interface ferramenta-peça no torneamento do aço 1020 sob diferentes condições de corte e a seco ou com fluido. Conseguiu-se observar que o aumento da velocidade de corte e da rotação da peça causou o aumento da temperatura. O uso da câmera termográfica na usinagem não tem muita aplicabilidade, pois a utilização é mais para manutenção preditiva e inspeção predial, contudo os resultados foram satisfatórios na medição das temperaturas (NOGUEIRA; BATISTA; BA; CRUZ; MORAES; NEVES; MARTINS, 2018).

3.5 Estudo de caso

Mesmo sendo um aço promissor, aço Toolox® 44 não tem sido alvo de muitas pesquisas acadêmicas, pois há poucos trabalhos científicos disponíveis. Vale destacar um trabalho referente a esse aço.

Os efeitos causados pelo processo de brunimento por rolo em um material pré-temperado foram analisados por Guerreiro (2015), que trata-se de um estudo prático onde buscou-se realizar um levantamento dos principais parâmetros que devem ser utilizados para o brunimento do material. Os parâmetros considerados foram: força de contato entre o rolo de brunir e o corpo de prova, avanços, número de passes e velocidade de corte adequada para o processo. Após o experimento, confirmou-se que é possível realizar o brunimento por rolo no Toolox® 44, já que os parâmetros de rugosidade ficaram de acordo com os objetivos do trabalho. Não houve aumento da dureza superficial do material estudado.

Além do estudo, existe também a experiência de alguns clientes que começaram a usar o Toolox® 44. De acordo com o CEO da Krenhof Schmiedetechnik AG, Matthias Hartmann, com o Toolox® 44 eles finalmente encontraram um material que procuravam. O primeiro sucesso desse novo aço para ferramentas foi alcançado com a construção de protótipos. A empresa fabrica, todos os anos, 100 componentes diferentes para novos modelos de veículos. Agora, eles são produzidos exclusivamente utilizando-se ferramentas feitas com o aço Toolox® 44. Ainda, segundo Hartmann, na maioria das vezes, precisa-se sacrificar dureza para alcançar um nível de resistência a trincas, porém, com o Toolox®, consegue-se obter um equilíbrio entre dureza, tenacidade e resistência ao calor.

A Krenhof Schmiedetechnik AG, indústria automotiva que produz peças forjadas, também passou a utilizar o Toolox® 44 nas lâminas das tesouras utilizadas para o corte de hastes. Quase não há mais quebras e a vida útil das lâminas ficou dez vezes maior (SSAB, 2021).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Para o experimento, foi utilizado um tarugo de 45,8 mm de diâmetro, com 500 mm de comprimento do aço Toolox® 44 e um tarugo de 48,8 mm de diâmetro, com 500 mm de comprimento do aço 1045. O tarugo de aço Toolox® foi adquirido da empresa FEX Comércio de Ferro, localizada em Ponta Grossa - PR. O tarugo de 1045 estava disponível no laboratório de usinagem da UTFPR - Câmpus Guarapuava. A composição do 1045 não foi informada durante a aquisição do mesmo e não foi possível realizar o ensaio de composição. A composição química do aço Toolox® 44 está listada na Tabela 4, segundo seu lote e dada em porcentagem:

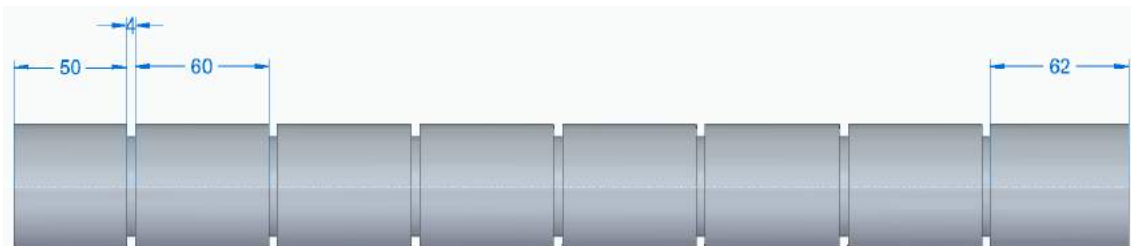
Tabela 4 – Composição química do aço Toolox® 44.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0,324	1,06	0,80	0,008	0,001	1,37	0,70	0,79
V	Ti	Cu	Al	Nb	B	N	
0,14	0,01	0,01	0,005	0,017	0,0021	0,03	

Fonte: SSAB (2020).

As dimensões dos corpos de prova (dadas em milímetros) para o processo de torneamento estão mostradas na Figura 8:

Figura 8 – Modelo dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria (2021).

O lado com 50 mm foi o lado que ficou o contraponto, já a extremidade maior, ficou para o lado da castanha.

4.2 ANÁLISE DOS MATERIAIS

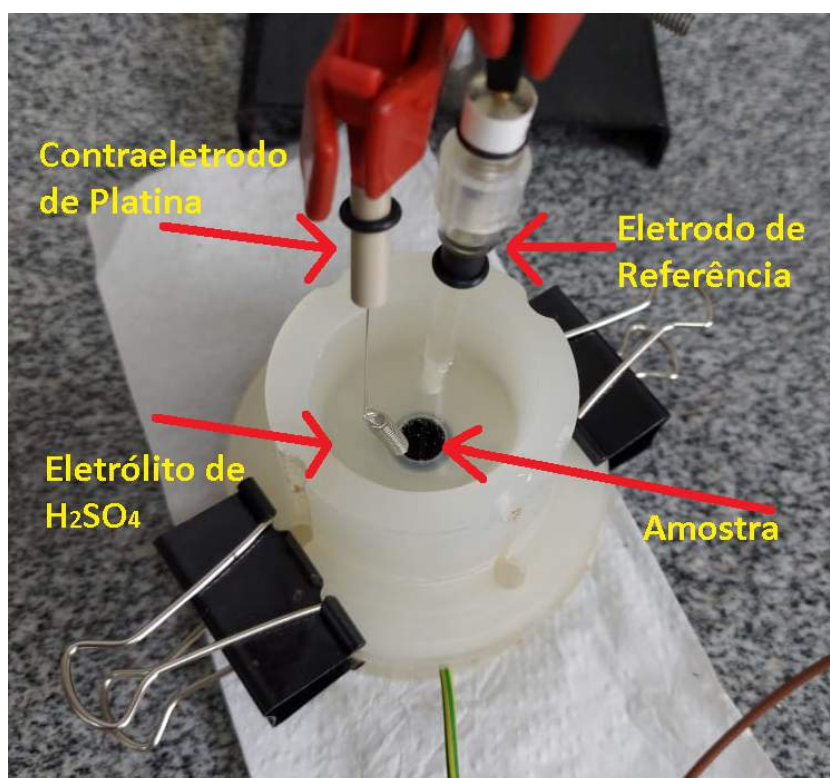
Para a obtenção dos corpos de prova para a preparação metalográfica e ensaio de dureza, foram utilizadas uma serra fita (marca S. Ramos) do Laboratório de usinagem e uma cortadora metalográfica Teclago CM 60. Após o corte, ambas as amostras foram embutidas em uma embutidora Teclago EM30D.

As amostras foram lixadas e polidas para que pudessem ser analisadas no microscópio ótico Olympus e as lixas utilizadas foram: 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. No polimento, foi utilizada a politriz manual com um pano e solução de alumina. Antes de serem analisadas no microscópio, as amostras foram atacadas com Nital 3% . O Toolox® durante, aproximadamente, um segundo e o 1045 durante 5 segundos.

Para a medição da dureza utilizou-se um durômetro Rockwell normal(DIGIMESS). Para o Toolox® 44 foi utilizado um penetrador de diamante, apropriado para aços temperados e materias com dureza superiores a 100 HRB. Para o 1045 o penetrador foi uma esfera de aço, ideal para aços, com dureza inferior a 100 HRB.

Para os testes de corrosão, utilizou-se o potenciostato / galvanostato PGSTAT204 da AutoLab. No experimento, foi montada a célula de eletroquímica utilizando-se um contraeletrodo auxiliar de platina, um eletrodo de referência H_2SO_4 e o eletrólito de H_2SO_4 , como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Medição de Corrosão.



Fonte: Autoria própria (2021).

A medição do pontencial de circuito aberto (OCP - Open Circuit Potential) foi realizado conforme a norma ASTM G59-97, 2009. A polarização aconteceu em duas etapas. Na primeira etapa, foi realizada uma micropolarização, variando a tensão entre ± 10 mV em torno do potencial de corrosão (E_{cor}). Na segunda etapa da polarização, foi realizada uma macropolarização, com a variação de tensão entre ± 100 mV em torno do E_{cor} . A corrente de corrosão (I_{cor}) e a taxa de corrosão (x mm/ano) .

Foram feitos os testes de corrosão apenas nos materiais base, ou seja, não foram feitos testes nas partes usinadas.

4.3 TORNEAMENTO

A máquina ferramenta que foi utilizada foi o torno mecânico da marca Nardini e modelo Mascote MS205 x 1000, com rotação máxima de 2500. Para iniciar o experimento, primeiramente, fez-se uma preparação dos corpos de prova. Na preparação, também foram usinados os canais que separam cada etapa do experimento nos tarugos.

Após a preparação dos dois corpos de prova, começou-se os ensaios com o Toolox® 44. Neste aço foram dadas duas passadas completas, ou seja, em toda a extensão do corpo de prova, com cada ferramenta, na seção predeterminada. No aço 1045, foi dada uma passada completa com cada ferramenta.

4.3.1 Preparação dos corpos de prova

Antes de começar os experimentos com o Toolox® 44, viu-se a necessidade de fazer um corpo de prova teste. Para este corpo de prova, foi utilizado um tarugo de aço SAE 1045. Foi cortada uma sessão de SAE 1045 com 550 mm de comprimento. Após o corte, o tarugo foi fixado no torno para as operações de torneamento externo, o faceamento e o primeiro furo, para fixar o contraponto, que contribuiu na diminuição da vibração. Com o intuito de diminuir a vibração, também foi acoplada ao sistema uma luneta fixa, como mostra a Figura 10.

Figura 10 – Luneta fixa.



Fonte: Autoria própria (2021).

A limpeza e o faceamento, em ambos os lados do tarugo, foram feitos com a ferramenta WNMG 080408 NM PL10. A furação foi realizada com uma broca de aço rápido de 5 mm e os

canais foram usinados com uma pastilha para canal MGMN 400. Os canais foram usinados para dividir as réplicas dos ensaios e para as saídas das ferramentas ao final do processo, que foram feitas com arestas diferentes de cada ferramenta. Todas as ferramentas utilizadas na preparação são mostradas na Figura 11.

Figura 11 – Pastilha WNMG 080408 NM PL10, broca de aço rápido e pastilha para canal.



Fonte: Autoria própria (2021).

Os parâmetros de usinagem utilizados na preparação do tarugo de aço 1045 estão listados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de usinagem na preparação do tarugo de aço 1045.

Procedimento Realizado	Velocidade de Corte (Vc) (m/min)	Profundidade de Corte (ap) (mm)	Avanço (f) (mm)
Torneamento externo	50,27	0,25	0,116
Faceamento	50,27	0,15	0,116
Furação	10,05	2,5	manual
Canais	9,66	5	manual

Fonte: Autoria própria (2021).

Para o Toolox® 44, o procedimento foi muito parecido e os parâmetros são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de usinagem na preparação do tarugo de Toolox® 44.

Procedimento Realizado	Velocidade de Corte (Vc) (m/min)	Profundidade de Corte (ap) (mm)	Avanço (f) (mm)
Torneamento externo	98,96	0,05	0,094
Faceamento 1	98,96	0,3	0,094
Faceamento 2	49,48	0,05	0,094
Furação	15,71	2,5	manual
Canais	17,99	5	manual

Fonte: Autoria própria (2021).

Após a preparação, ambos os corpos de prova ficaram com um comprimento de 390 mm. No diâmetro, o Toolox® ficou com 45,8 mm e o 1045 com 48,8 mm.

Nas regiões que se trabalhou com a ferramenta cerâmica, os canais foram chanfrados.

4.3.2 Ensaio

Os parâmetros utilizados foram baseados nos fornecedores, tanto do aço Toolox® 44, como das fabricantes das ferramentas de corte utilizadas. Os valores de profundidade de corte e avanço foram menores que o recomendado visando a operação de acabamento, a limitação da máquina e a menor perda de material.

Os parâmetros de corte recomendados para as ferramentas são mostrados na Tabela 7. A ferramenta de metal duro é do fabricante LAMINA e a ferramenta de cerâmica é do fabricante KYOCERA.

Tabela 7 – Parâmetros de corte recomendados.

Ferramenta	Velocidade de corte (Vc)	Profundidade (ap)	Avanço (f)
Cerâmica (CER)	300 - 350 - 400	0,5 - 1 - 1,5	0,1 - 0,2 - 0,3
Metal Duro (MD)	150 - 250 - 300	0,5 - 1 - 1,5	0,1 - 0,2 - 0,3

Fonte: Catálogo KYOCERA e LAMINA.

No decorrer do estudo, se teve as variações dos parâmetros das ferramentas "CER" e "MD". As variações dependeram de qual passada foi dada. No aço Toolox®, foram feitos dois desbastes com cada ferramenta, ou seja, "CER1" e "CER2", "MD1" e "MD2" que representam cada passada com as suas características. Para o aço 1045, como foi feito apenas um desbaste, foi nomeado apenas como "CER" e "MD".

O experimento começou no tarugo de Toolox® 44 e com a ferramenta de metal duro TNMG 160408 NN LT10. Após as três primeiras arestas da primeira ferramenta serem utilizadas, passou-se para a ferramenta de cerâmica, TNGA 160408 A65, com as suas três primeiras arestas. As ferramentas utilizadas durante todo o experimento tinham 0,8 mm de raio de ponta e são mostradas e indicadas na Figura 12.

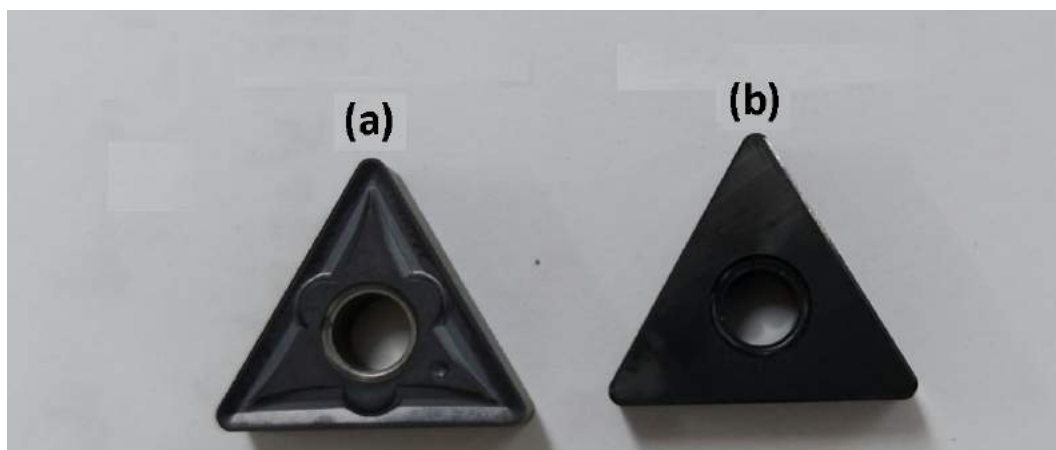
Após os seis primeiros desbastes, foi retirado o tarugo do torno, e levado para as primeiras medições de rugosidade. O procedimento foi repetido a cada final de passagem e em todas as regiões.

Os parâmetros de corte utilizados nas duas passadas são mostrados na Tabela 8.

A Figura 13 ilustra como ficaram os corpos de prova após o processo de sangramento. A parte identificada como (1) foi utilizada para o estudo da ferramenta de metal duro e a (2) para a ferramenta cerâmica. Percebe-se também que, o tarugo possui comprimento maior na parte (2), o que possibilitou também a identificação da seção do tarugo usinada com a ferramenta cerâmica.

Após cada etapa de torneamento, as medidas de rugosidade foram registradas. O tarugo era retirado do torno e levado ao Laboratório de Metalografia, para realizar a medição.

Figura 12 – Ferramentas de metal duro (a) e cerâmica (b).



Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 8 – Parâmetros de corte.

Aço	Ferramentas	Velocidade de corte (Vc) (m/min)	Profundidade de corte (ap) (mm)	Avanço (f) (mm)
1045	MD	179,46	0,25	0,079
	CER	245,3	0,25	0,079
Toolox 44	MD1	179,46	0,25	0,14
	CER1	230,22	0,25	0,14
	MD2	230,22	0,25	0,079
	CER2	230,22	0,25	0,079

Fonte: Autoria própria.

4.4 RUGOSIDADE

A rugosidade foi medida no rugosímetro portátil da marca Mitutoyo, modelo SJ-140, como mostra a Figura 14. Em todas as regiões do tarugo foi medida a rugosidade.

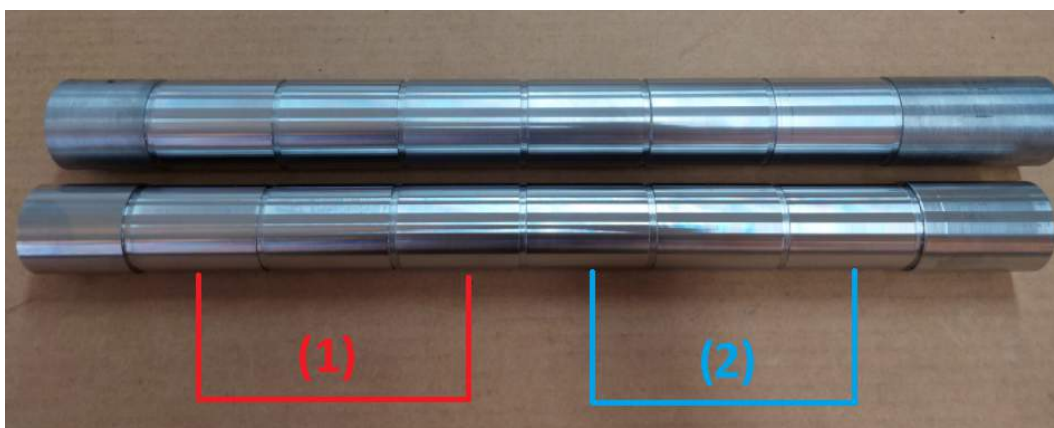
Os parâmetros medidos para a comparação de resultados foram: Ra, Rp, Rt, Rv e Rz. Sendo Rz a rugosidade média entre os cinco maiores picos e vales dos cinco comprimentos de amostragem.

4.5 DESGASTE

O desgaste da ferramenta foi medido através do microscópio Olympus, o mesmo utilizado durante a caracterização dos materiais. A lente utilizada para estas medições foi a ampliação de vinte vezes.

Foram medidas e fotografadas as arestas utilizadas e as não medidas, foram fotografadas para critério de comparação visual.

Figura 13 – Tarugos ao término dos ensaios.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 14 – Rugosímetro Mitutoyo SJ-140.



Fonte: Autoria própria (2021).

4.6 TEMPERATURA

Devido a percepção na diferença de coloração do cavaco durante a realização dos canais, ainda na preparação, decidiu-se medir a temperatura de saída do cavaco durante o processo de desbaste. Durante o experimento, também foram coletadas as temperaturas de todas as passadas realizadas pelas duas ferramentas nos dois tarugos.

As medidas de temperatura foram obtidas usando um termovisor infravermelho da HOT TEC, modelo HT7, como mostra a figura 15.

Figura 15 – Termovisor Infravermelho HOT TEC HT7.



Fonte: Autoria própria (2021).

Foi utilizada a função de ponto quente, durante a medição, para que se conseguisse visualizar onde ocorriam as maiores temperaturas durante o torneamento. Foi constatado que, as partes possíveis de ocorrer a medição, era a saída do cavaco que se tinham as maiores temperaturas, por isso os dados se referem à essa região.

Os dados obtidos nesta etapa também serão comparados conforme os parâmetros de usinagem, material do corpo de prova e tipo de inserto.

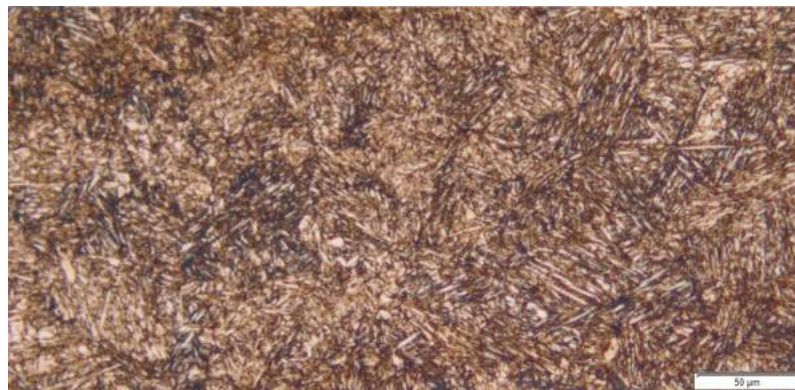
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesse tópico serão apresentados os resultados da micrografia, da dureza e da corrosão, do ensaio, da temperatura, do cavaco e do desgaste e da rugosidade.

5.1 MICROGRAFIA, DUREZA E CORROSÃO

Analisando a micrografia, primeiramente do aço Toolox® 44, percebe-se uma matriz martensítica na sua microestrutura, como mostra a Figura 16. Essas estruturas são os grãos mais alongados, semelhantes a agulhas. Isso explica o valor de dureza do Toolox® 44.

Figura 16 – Microestrutura do aço Toolox® 44.



Fonte: Autoria própria (2021).

Para o aço 1045, como são hipoeutetóides, as áreas escuras são perlita e as claras são ferrita. Quanto maiores forem as áreas escuras, maior a presença do carbono, como mostra a Figura 17. O aço 1045 não possui muita presença de perlita.

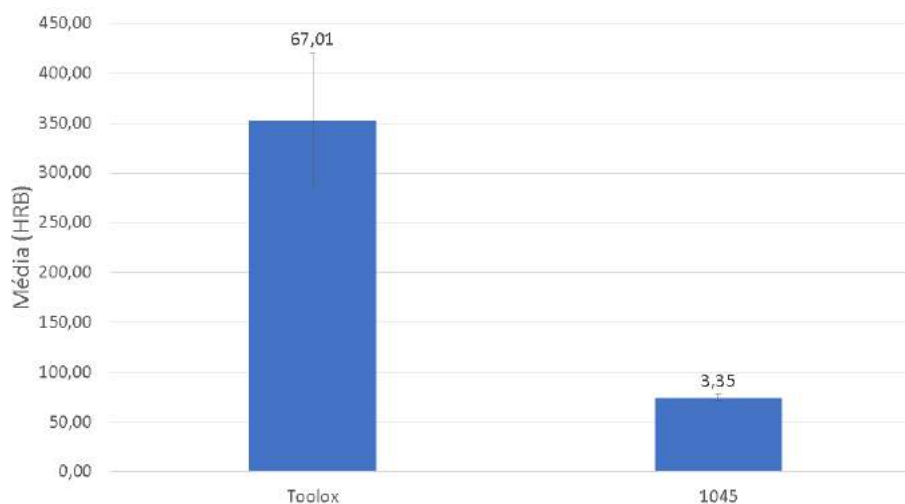
Figura 17 – Microestrutura do aço ABNT 1045.



Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 18 mostra os valores de dureza para os dois aços analisados.

Figura 18 – Comparação de dureza.



Fonte: Autoria própria (2021).

Percebeu-se que haveria diferença de valores ao analisar a microestrutura dos aços, e após a medição, constatou-se esta diferença. Pelo resultado de medição o Toolox® 44 tem dureza cinco vezes maior do que o aço 1045.

A Tabela 9 indica os valores obtidos no ensaio de corrosão para ambos os aços. Vale ressaltar que as amostras utilizadas para este ensaio não foram retiradas das regiões torneadas. As amostras foram cortadas, lixadas e depois submetidas ao ensaio.

Tabela 9 – Resultado do ensaio de corrosão dos materiais.

Material	Potencial de corrosão (V)	Corrente de corrosão (A)	Taxa de corrosão (mm/ano)	Resistência de polarização (Ω)
Toolox® 44	-0,070398	0,065143	963,91	0,40001
Aço 1045	-0,71709	0,23093	3417	0,11284

Fonte: Autoria própria.

O potencial de corrosão é uma medida para constatar a iniciação da corrosão, isso quer dizer que quanto maior o valor, menor a suscetibilidade do aço à corrosão. A corrente de corrosão corresponde a velocidade de corrosão, ou seja, quanto maior o valor, mais rápido ocorre a corrosão. A resistência de polarização auxilia na estimativa do tempo de vida útil de um material para resistir à corrosão e é inversamente proporcional a taxa de corrosão anual. A taxa de corrosão anual do Toolox® 44 foi de 28,21% menor do que o aço 1045. Essa diferença pode estar relacionada com a quantidade de cromo níquel na composição do primeiro aço, como pode ser visto na Tabela 7

5.2 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA E ENSAIOS

Durante a preparação dos corpos de prova, como era a primeira vez que o Toolox® era usinado e não se tinha conhecimento de como ele iria reagir, foram feitos diversos testes até

chegar em uma velocidade de corte apropriada para a limpeza, furação e para a abertura dos canais. Percebeu-se que velocidades maiores, em comparação ao 1045, eram mais apropriadas para o Toolox®.

Para o faceamento, o avanço teve que ser diminuído, em comparação com o 1045, pois percebeu-se que a ferramenta não estava cortando durante o desbaste do material. Para os canais, diferentemente do 1045, no Toolox®, a ferramenta apresentou melhores resultados desbastando o material sem perder o contato com a ferramenta até se alcançar a profundidade desejada, ou seja, não se pôde interromper a usinagem, como é de costume se fazer nessa operação.

Os cavacos obtidos na abertura dos canais para o 1045 e para o Toolox® 44 são mostrados, respectivamente, nas Figuras 19 e 20. Pelo formato do cavaco, percebe-se que a resposta dos aços é diferente para esse processo. Durante a operação foi difícil identificar que o corte deveria ser contínuo e não interrompido, como é de costume na operação de sangramento, ou seja, na abertura dos canais.

Figura 19 – Cavacos gerados na abertura dos canais no 1045.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 20 – Cavacos gerados na abertura dos canais no Toolox® 44.



Fonte: Autoria própria (2021).

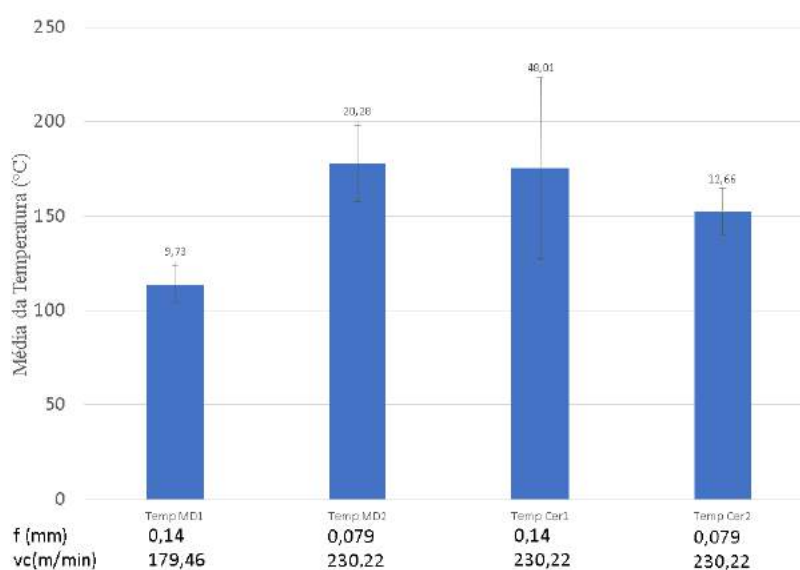
A coloração diferente do cavaco se refere à diferença de temperatura entre o começo e o final do desbaste. No 1045, como o cavaco não é retirado de forma contínua, a temperatura não se eleva e não há mudança na coloração dos cavacos.

5.3 TEMPERATURA, CAVACO E DESGASTE

Foram medidas as temperaturas de todas as passadas das ferramentas utilizadas. Os gráficos foram divididos de acordo com o material do corpo de prova.

O gráfico da Figura 21 compara as temperaturas obtidas nas doze passadas de acabamento realizadas no aço Toolox® 44, seis delas com as arestas das ferramentas de metal duro (MD1 e MD2) e as outras seis, com as arestas das ferramentas de cerâmica (Cer1 e Cer2).

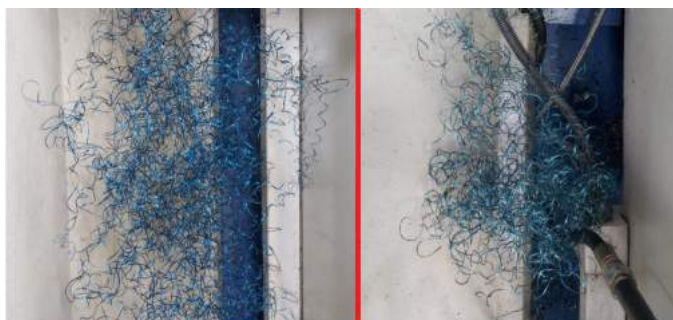
Figura 21 – Comparação das temperaturas no Toolox® 44.



Fonte: Autoria própria (2021).

O primeiro ensaio com a ferramenta de metal duro, com a velocidade de corte de 179,46 m/min, obteve a menor temperatura na usinagem do Toolox® 44. A temperatura no segundo ensaio utilizando a pastilha de cerâmica obteve valor menor do que no primeiro ensaio com a mesma pastilha. Variando apenas o avanço, a temperatura teve um comportamento inesperado. Devido a diminuição da área de troca de calor, esperava-se que a temperatura fosse maior quando o avanço fosse diminuído. Essa diminuição pode estar relacionada também com a troca de calor entre o aço e a cerâmica. A diferença pode ser visualizada na Figura 22.

Figura 22 – Cavacos gerados no ensaio durante o torneamento do Toolox® 44.

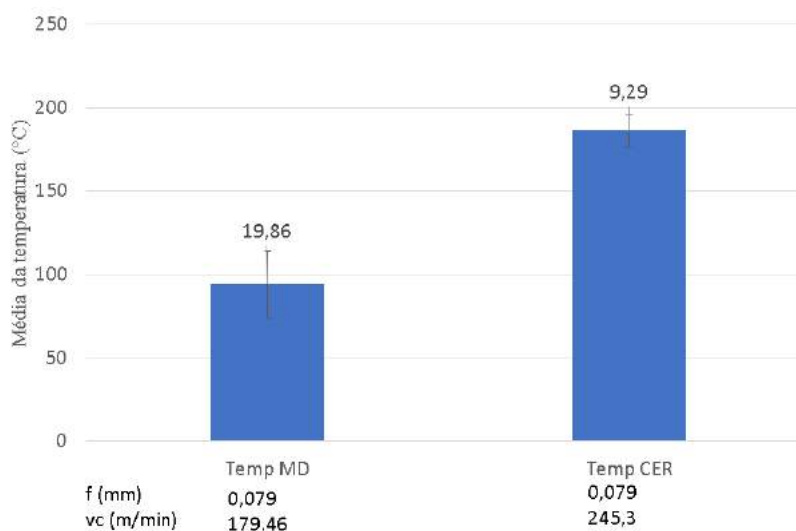


Fonte: Autoria própria (2021).

O cavaco da esquerda, o qual apresenta uma coloração azul mais escuro, foi obtido com velocidade de 230,22 m/min e com a ferramenta de cerâmica. O cavaco da direita foi da ferramenta de metal duro, com velocidade de 179,46 m/min. Percebe-se também que o formato dos cavacos se manteve para ambas as ferramentas.

A variação da temperatura do cavaco gerado no aço 1045 está ilustrada na Figura 23.

Figura 23 – Comparação das temperaturas no 1045.

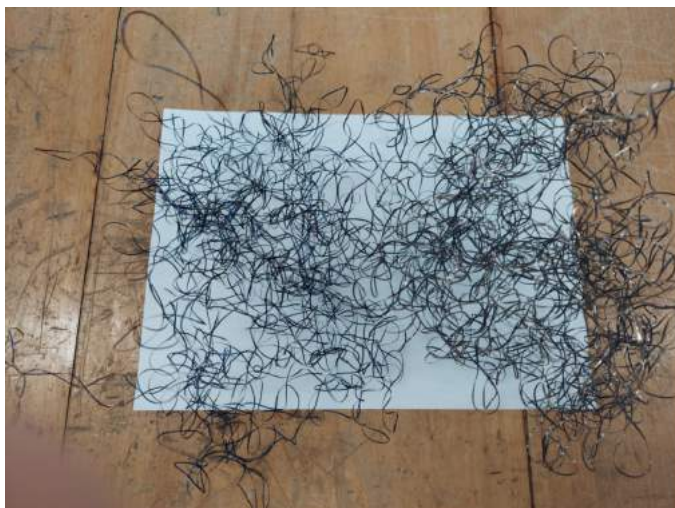


Fonte: Autoria própria (2021).

Na operação do aço 1045, como a velocidade para a ferramenta de metal duro foi menor, a temperatura também se manteve menor, em comparação a ferramenta de cerâmica.

Mesmo com uma diferença de temperaturas significativa entre as ferramentas, a coloração do cavaco não teve muita variação, tornando-se praticamente imperceptível, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Cavacos gerados no ensaio durante o torneamento do aço 1045 com a ferramenta de metal duro.



Fonte: Autoria própria (2021).

Apesar das ferramentas de metal duro possuírem quebra cavacos, o cavaco ficou muito longo, pois a profundidade de corte utilizado nos testes não está no intervalo recomendado pelo fabricante.

Quanto aos valores de desgaste, a ferramenta cerâmica não apresentou desgaste que fosse possível medir no microscópio utilizado. Já as ferramentas de metal duro apresentaram desgaste conforme indicado na Tabela 10.

Tabela 10 – Medição do desgaste na superfície de saída das ferramentas no Toolox® 44 .

Ferramenta	Desgaste1 (mm)	Desgaste2 (mm)	Desgaste3 (mm)	Média	Desv. Pad
MD1	0,19	0,18	0,20	0,1900	0,0100
MD2	0,18	0,17	0,18	0,1767	0,0058

Fonte: Autoria própria.

Na usinagem do aço 1045, a ferramenta cerâmica apresentou desgaste, como pode-se observar na Tabela 11.

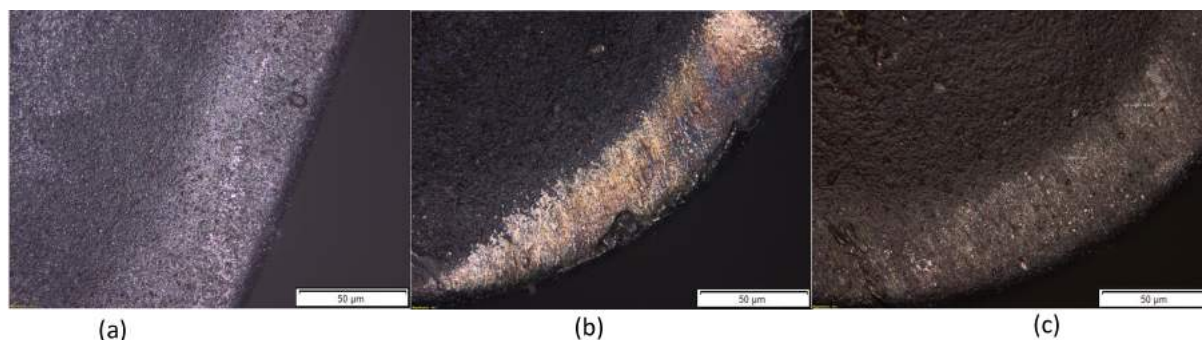
Tabela 11 – Medição do desgaste das ferramentas no aço 1045.

Ferramenta	Desgaste1 (mm)	Desgaste2 (mm)	Desgaste3 (mm)	Média	Desv. Pad
MD	0,18	0,19	0,20	0,1900	0,0100
Cer	0,11	0,13	0,11	0,1167	0,0115

Fonte: Autoria própria.

A Figura 25 mostra a comparação entre uma aresta da ferramenta de metal duro não utilizada (a), uma utilizada na usinagem do Toolox® 44 (b) e outra no 1045 (c), respectivamente.

Figura 25 – Comparação das arestas de corte metal duro.

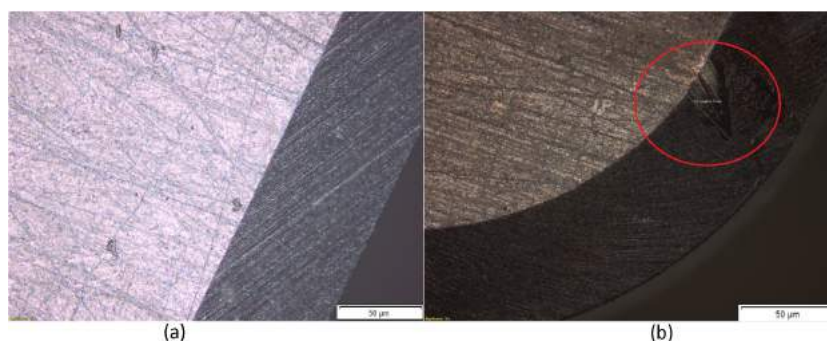


Fonte: Autoria própria (2021).

Percebe-se que a ferramenta de metal duro utilizada no aço Toolox® 44 aparentou que teve maior desgaste do que a utilizada no 1045. A superfície está com aspecto mais claro e há alguns lascamentos na aresta.

Na Figura 26, tem-se a comparação entre uma aresta não utilizada (a) e uma aresta utilizada (b) da ferramenta de cerâmica, na usinagem do aço 1045.

Figura 26 – Comparação das arestas de corte da ferramenta cerâmica no 1045.



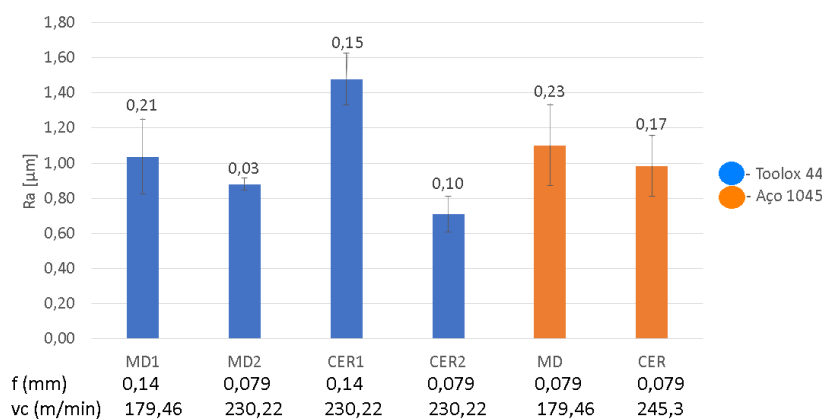
Fonte: Autoria própria (2021).

Percebe-se que houve apenas um pequeno lascamento, localizado na região circulada da Figura 26. As temperaturas, independente do material e da ferramenta, variam mais com a velocidade do que com o avanço, como mostram as Figuras 21 e 23. Para as velocidades mais altas, as temperaturas se mantiveram mais altas. Os cavacos tiveram variações na tonalidade da coloração para o Toolox® 44. No 1045, os cavacos não tiveram diferença notável. O desgaste nas ferramentas cerâmicas não pode ser medido para o Toolox® 44, mas no aço 1045 percebe-se um lascamento, como pode ser visto na Figura 26. As ferramentas de metal duro, para ambos os materiais, mostram regiões com aspecto claro e com alguns lascamentos, mostradas na Figura 25.

5.4 RUGOSIDADE

Os parâmetros de rugosidade medidos foram: a rugosidade média (R_a), as médias entre as cinco maiores distâncias entre picos e vales (R_z), a rugosidade máxima (R_t), a maior distância entre linha média do perfil e pico (R_p) e a maior distância entre a linha média do perfil e vale (R_v). A rugosidade apresentou valores semelhantes para ambas as ferramentas e em ambos os materiais. Para a rugosidade média (R_a), os valores são mostrados na Figura 27.

Figura 27 – Valores do parâmetro R_a .



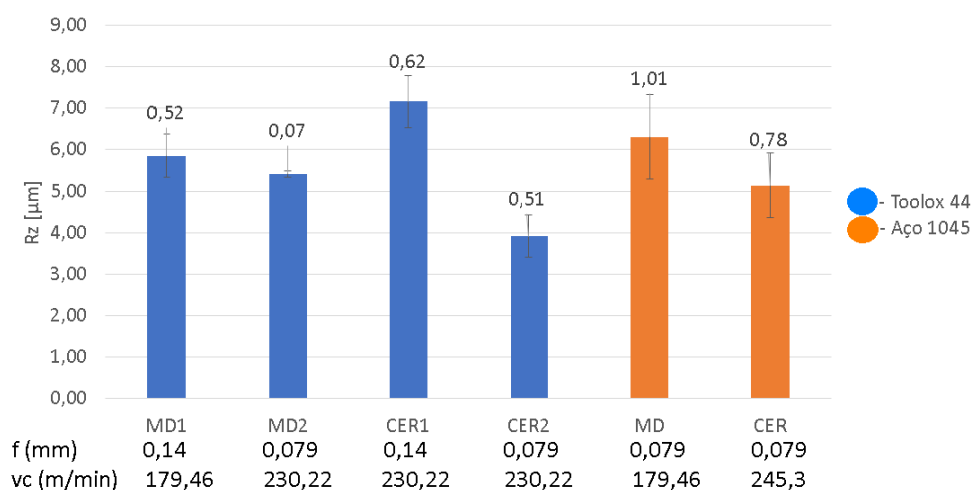
Fonte: Autoria própria (2021).

De acordo com o gráfico, para o Toolox® 44, houve uma diminuição na rugosidade média para as ferramentas de metal duro quando a velocidade de corte foi aumentada para 230,22 m/min e o avanço foi diminuída para 0,079 mm. Para as de cerâmica, mantendo a velocidade de corte em 230,22 m/min e diminuindo o avanço para 0,079 mm, também houve uma redução na rugosidade média. No aço 1045, a ferramenta de cerâmica obteve valores de rugosidade média menores do que o metal duro. Isso pode ter acontecido pelo fato da velocidade de corte na cerâmica, 245,3 m/min, ser maior do que a utilizada na ferramenta de metal duro, 179,46 m/min, visto que os outros parâmetros de corte, profundidade de corte e avanço, foram mantidos para as duas ferramentas.

Comparando os resultados da cerâmica quando o avanço é diminuído, percebe-se uma diminuição significativa na rugosidade média. Teoricamente, os valores de Ra para os avanços de 0,14 mm e de 0,079 mm seriam de 0,79 μm e 0,25 μm , respectivamente. Os valores encontrados na medição foram de 1,48 μm e 0,71 μm , respectivamente. A diferença se dá por outros fatores que interferem durante o torneamento, como a rigidez da máquina e a realocação do tarugo no torno.

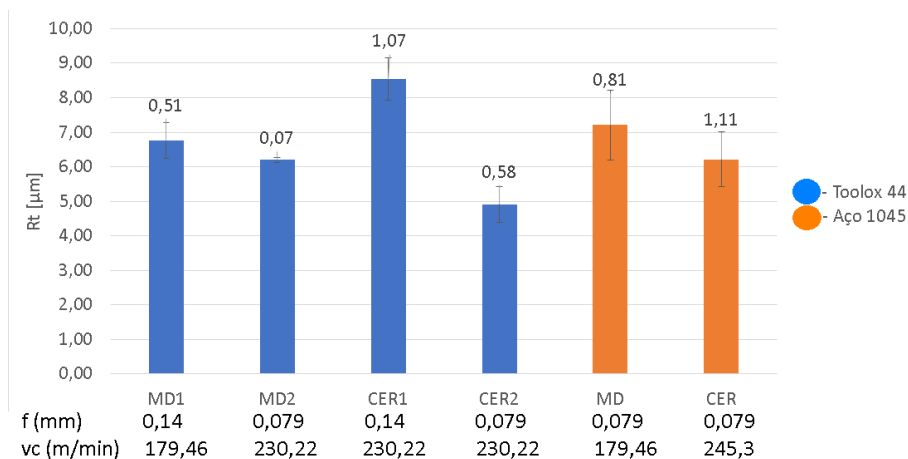
As Figuras 28 a 31 indicam os valores de rugosidade para os outros parâmetros estudados. Percebe-se um comportamento similar da rugosidade média e os outros parâmetros medidos no trabalho.

Figura 28 – Valores do parâmetro Rz.



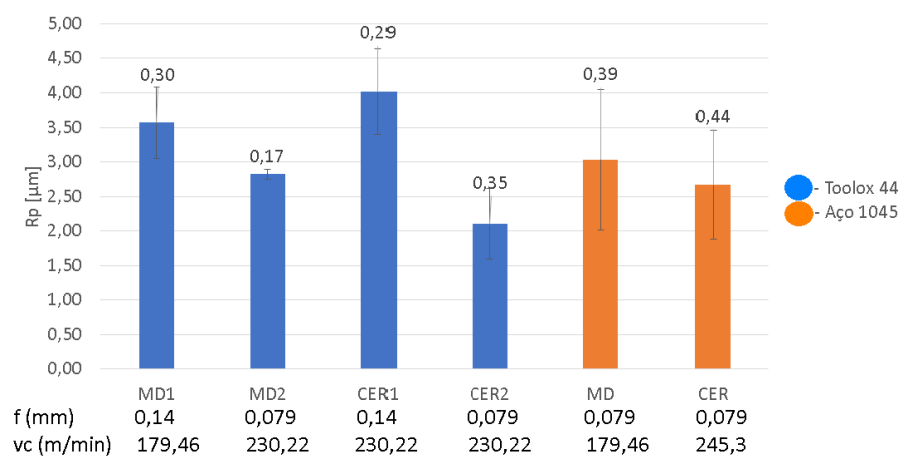
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 29 – Valores do parâmetro Rt.



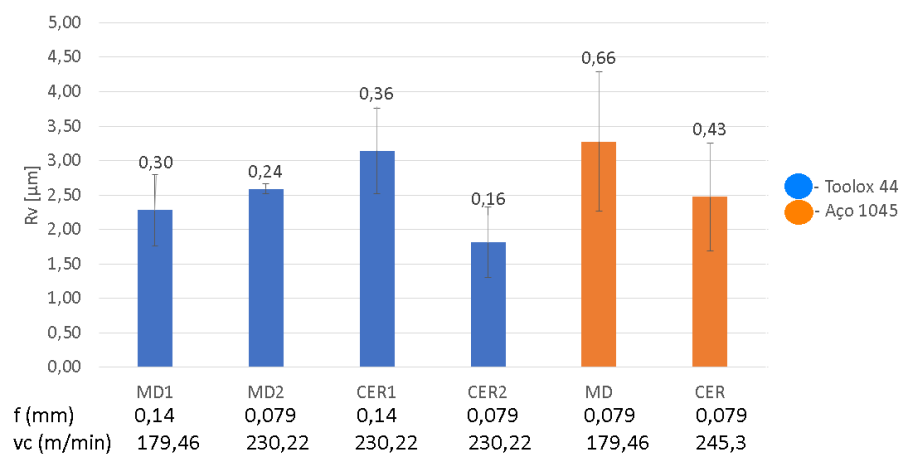
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 30 – Valores do parâmetro Rp.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 31 – Valores do parâmetro Rv.



Fonte: Autoria própria (2021).

De acordo com a Tabela 3, para todas as condições e ferramentas, a faixa de rugosidade esperada para o processo de torneamento está entre $0,5 \mu\text{m}$ e $6 \mu\text{m}$. A rugosidade média (R_a) ficou dentro dessa faixa. Os maiores e menores valores encontrados para este parâmetro foram gerados pela ferramenta de cerâmica ao usinar o aço Toolox® 44. Com uma velocidade de 230 m/min , profundidade de corte de $0,25 \text{ mm}$ e avanço de $0,079 \text{ mm}$, obteve-se o menor valor para R_a , ficando em $0,71 \mu\text{m}$. O maior valor encontrado para R_a foi de $1,48 \mu\text{m}$, que foi obtido a uma velocidade de corte de 230 m/min , profundidade de corte de $0,25 \text{ mm}$ e avanço de $0,14 \text{ mm}$. Quando o avanço foi diminuído, a qualidade superficial melhorou.

Para os outros parâmetros, R_t , R_z , R_p e R_v , percebeu-se que o comportamento para os valores maiores e menores se mantiveram para a ferramenta de cerâmica.

Os parâmetros de rugosidade no aço 1045 para ambas as ferramentas tenderam a serem maiores do que para o Toolox® 44. Como na ferramenta cerâmica se manteve a mesma velocidade de corte, a rugosidade atingiu maiores valores quando se utilizou o maior avanço ($0,14 \text{ mm}$), o que era esperado por teoria.

6 CONCLUSÃO

A partir das análises realizadas no material, nas condições propostas do estudo, chegou-se nas seguintes conclusões:

- A micrografia do aço Toolox® 44 apresentou microestrutura predominantemente martensítica. A dureza desse aço foi maior que a do aço 1045. Para a taxa corrosão o Toolox® 44 obteve uma taxa de corrosão de 28,21% menor que o 1045.

- A temperatura média de 163,83 °C, usinando o Toolox® 44 com a cerâmica, enquanto o metal duro teve uma média de 145,9 °C. No 1045 a cerâmica teve média de 186,33 °C e o metal duro de 94,33 °C.

- Os cavacos do Toolox® 44 apresentaram coloração azulada para velocidades mais baixas e cavacos tendendo a um roxo para velocidades mais altas. No 1045 também houve a presença de cavaco azulado.

- O desgaste encontrado nas ferramentas de metal duro foram maiores para o Toolox® 44, porém, para os insertos cerâmicos, não foi encontrada nenhuma deformação ou desgaste. No SAE 1045 houve desgaste, mesmo que menor, para a ferramenta de metal duro. A ferramenta de cerâmica obteve desgaste ao usar este material.

- Os valores de rugosidade estão dentro dos limites esperados para o processo de torneamento. A cerâmica obteve melhores resultados, mas o metal duro possuiu melhor custo benefício.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Quanto às várias hipóteses utilizadas no trabalho, algumas recomendações para a continuidade de trabalhos na área de estudo:

- Analisar a influência da velocidade e do avanço na rugosidade, alterando os dois parâmetros. Fixar velocidade e mudar avanço ou fixar o avanço e mudar a velocidade;
- Realizar teste de corrosão na área usinada e comparar com o material base;
- Utilizar outro método na medição de temperatura e comparar com medições de uma câmera termográfica.

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Processos de Usinagem - Utilização e Aplicações das Principais Máquinas Operatrizes**. São Paulo: Érica, 2015. 136 p.

ASTAKHOV, V. P. Surface Integrity -Definition and Importance in Functional Performance. In: **Surface Integrity in machining** by Davim, J.P. p.215. 2010. DOI 10.1007/978-1-84882-874-2

ASTM G59-97. **Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements**, 2009.

CARVALHO, Davidson Santos; ABRÃO, Alexandre Mendes; RUBIO, Juan Carlos Campos. **Monitoramento da Temperatura de Usinagem**. 2004. 2 f. Monografia (Especialização) - Curso de Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. Cap. 1. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.510.8029&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 17 out. 2021

COSTA, E.S., **Furação de Aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de Corte – MQF**, 2004, 311 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – Minas Gerais, 2004.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 4. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1979. 576 p.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 376p

GOGOLA, Eliane Engel. **Estudo da corrosão dos aços aisi 1020, 304L, 316L e Duplex saf 2205 em planta do tratamento de efluentes em indústria de celulose e papel**. 2014. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2014.

GRIFFITHS, B. **Manufacturing Surface Technology: Surface Integrity & Functional Performance**, Penton Press, p. 256, 2001.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

GROOVER, Mikell P. (ed.). **Introdução aos processos de fabricação**. Rio de Janeiro: Ltc — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2014. 737 p. Coordenação de tradução: Anna Carla Araujo. Disponível em: [https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2640-/epubcfi/6/8 \[%3Bvnd.vst.idref%3Dtitle\]!/4/2/4%4050:1](https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2640-/epubcfi/6/8 [%3Bvnd.vst.idref%3Dtitle]!/4/2/4%4050:1). Acesso em: 14 maio 2021.4

GUERREIRO, Roberto Magalhães. **EFEITOS DO PROCESSO DE BRUNIMENTO POR ROLO NO TOOLOX 44**. 2015. 67 f. Monografia (Especialização) - Curso de Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2015. Disponível em: <file:///E:/TCC2/TCC%20-%20Roberto%20Magalh%C3%A3es%20Guerreiro.pdf>. Acesso em: 8 out. 2021.

HASSANPOUR, H.; SADEGHI, M. H.; RASTI, A.; SHAJARI, S. **Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication**, Journal of Cleaner Production, v. 120, p. 124–134, 2016.

JONES, D.A. **Principles and Prevention of Corrosion**. MacMillan, New York: 1992.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**, 3º Ed., São Paulo: Ed. Blucher, 2015.

MACHADO, A.R.; DA SILVA, M.B. ; COELHO, R. T; ABRÃO, A. M. **Teoria da Usinagem dos Materiais**, 1ª Ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

Nardini **Torno universal Mascote M-205** Disponível em <<http://www.nardinisa.com.br/site/produto/mascote-ms-205x1000/>>. Acesso em: 03 jul. 2021

NOGUEIRA, Gean Flávio Soares de Melo; BATISTA, Maira Daniel; BA, Elhadji Cheikh Talibouya; CRUZ, Matheus Philippe Martins da; MORAES, Lucas Phillip Zólio Gonzaga de;

NEVES, Carlos Alberto de Sousa; MARTINS, Paulo Sérgio. **ANÁLISE DA TEMPERATURA NA INTERFACE FERRAMENTA-PEÇA NO TORNEAMENTO DO AÇO 1020 SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CORTE, A SECO E COM FLUIDO**. 2018. 9 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Elhadji-Cheikh-2/publication/326431687_ANALISE_DA_TEMPERATURA_NA_INTERFACE_FERRAMENTA-PEÇA_NO_TORNEAMENTO_DO_ACO_1020_SOB_DIFERENTES_CONDICOES_DE_CORTE_A_SECO_E_COM_FLUIDO/links/5c892a8c45851564fad7ed5/ANALISE-DA-TEMPERATURA-NA-INTERFACE-FERRAMENTA-PEÇA-NO-TORNEAMENTO-DO-ACO-1020-SOB-DIFERENTES-CONDICOES-DE-CORTE-A-SECO-E-COM-FLUIDO.pdf. Acesso em: 07 nov. 2021.

PERELOMA, Elena; EDMONDS, David V.. **Phase Transformation in steels: volume 2: diffusionless transformations, high strength steels, modelling and advanced analytical techniques**. Daryaganj: Woodhead Publishing Limited, 2012. 634 p.

PETROPOULOS. G. P.; PANDAZARAS, C. N.; DAVIM, J. P. Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining. In: **Surface Integrity in machining** by Davim, J.P. p.215. 2010. DOI 10.1007/978-1-84882-874-2.

SOUZA, Dalton José Bladt de. **Otimização do processo de torneamento de eixos para geradores e turbinas empregados em pequenas centrais hidrelétricas através da análise morfológica dos cavacos**. 2018. 59 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

SSAB **Cases dos clientes**. Disponível em <<https://www.ssab.com.br/products/brands/toolox/customer-cases>>. Acesso em: 29 set. 2021

SSAB **Grupo de produtos Toolox 44**. Disponível em <<https://www.ssab.com.br/products/brands/toolox/products/toolox-44>>. Acesso em: 5 set. 2021

SSAB **Usinagem para Toolox**. Disponível em <<https://www.ssab.com.br/products/brands/toolox/toolox-download>>. Acesso em: 6 set. 2021