

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

IRAJÁ GEHRKE

ESTUDO DO EFEITO DA NORMALIZAÇÃO NO FRESAMENTO DE SUPERFÍCIES
CORTADAS A PLASMA EM AÇO ABNT 1045

JARAGUÁ DO SUL

NOVEMBRO DE 2019

IRAJÁ GEHRKE

ESTUDO DO EFEITO DA NORMALIZAÇÃO NO FRESAMENTO DE SUPERFÍCIES
CORTADAS A PLASMA EM AÇO ABNT 1045

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Campus Jaraguá do Sul – Rau, do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gil M. P. Chagas

JARAGUÁ DO SUL

NOVEMBRO DE 2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do campus Rau, do IFSC

Gehrke, Irajá

Estudo do efeito da normalização no fresamento de superfícies cortadas a plasma em aço ABNT 1045 / Irajá Gehrke ; orientação de Gil M. P. Chagas. Jaraguá do Sul, SC, 2019.

64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul - Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .
Inclui Referências.

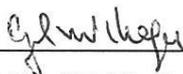
1. Normalização. 2. Corte a plasma. 3. Fresamento.
I. M. P. Chagas, Gil. II. Instituto Federal de Santa Catarina. . III. Título.

IRAJÁ GEHRKE

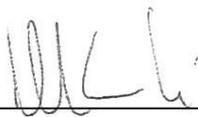
ESTUDO DO EFEITO DA NORMALIZAÇÃO NO FRESAMENTO DE SUPERFÍCIES
CORTADAS A PLASMA EM AÇO ABNT 1045

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo
indicada.

Jaraguá do Sul, 27 de novembro de 2019.



Prof. Dr. Gil M. P. Chagas
Orientador
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Me. Delcio Luís Demarchi
Avaliador
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Me. Cristiano da Silva
Avaliador
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me permitiu trilhar este caminho, sempre me guiou e me deu sabedoria para as tomadas de decisão.

A minha mãe Clarice, padrasto Elmo, irmão laçanã, irmã Indiara e sobrinho Théo, pelo amor, incentivo e paciência durante todo o período de estudo.

A esta instituição de ensino, corpo docente, direção e administração por manter um ambiente respeitoso, adequado e amigável, assim como, por proporcionar o conhecimento técnico e humano.

Em especial ao professor Dr. Gil M. P. Chagas que prontamente aceitou o desafio desta orientação e contribuiu significativamente para com o enriquecimento deste trabalho.

Por fim um agradecimento a todos que de forma direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

Muito obrigado!

“A maior recompensa para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso”

(John Ruskin)

RESUMO

Na área de usinagem por fresamento existem diversos fatores que influenciam no acabamento superficial da peça e no desgaste da ferramenta, dentre eles, a velocidade de avanço, a profundidade de corte, a velocidade de corte, o sentido de corte, o material utilizado e o tipo de ferramenta utilizada. Além destes parâmetros, em diversas situações, processos anteriores ao fresamento como o corte a plasma e o tratamento térmico de normalização também podem impactar diretamente a qualidade do acabamento superficial da peça, assim como, aumentar ou diminuir a vida útil da ferramenta. O corte a plasma é executado em elevadas temperaturas com resfriamento rápido, ocasionando o endurecimento na região do corte. A normalização normalmente é recomendada para casos onde se necessita melhores condições de usinabilidade e é indicada para aços que possuem teores de carbono, em peso, superiores a 0,20% na sua composição, abaixo disso não é possível identificar vantagens na sua aplicação. Diversas indústrias do ramo metalmeccânico produzem peças em aço ABNT 1045 utilizando os processos de corte a plasma, normalização e fresamento. Sabendo que este aço apresenta 0,45% do seu peso de carbono em sua composição, este trabalho tem como objetivo principal verificar a necessidade de aplicação do processo de normalização para tornar possível o fresamento de uma superfície que passou pelo corte a plasma. Para que isso seja possível, foi comparado a rugosidade (R_a) dos corpos de prova, o desgaste de flanco (V_b) dos insertos de corte utilizadas no fresamento e os custos empregados no ensaio. A comparação foi executada entre corpos de prova cortados a plasma e fresados e corpos de prova cortados a plasma, normalizados e fresados. Após o estudo, o fresamento sem a normalização apresentou o menor custo total empregado e o alcance de baixos valores de rugosidade média, desta forma pode-se concluir que a normalização não é necessária para tornar possível o fresamento de superfícies cortadas a plasma em aço ABNT 1045.

Palavras-Chave: Normalização, Corte a Plasma e Fresamento.

ABSTRACT

In the area of machining by milling there are several factors that influence the surface finishing of the part and the use of tools, among them, the feed speed, the depth of cut, the cutting speed, the cutting direction, the material and the tool type used. Besides these parameters, in many situations, processes before machining by milling such as plasma cutting and normalization heat treatment can also directly affect the quality of the surface finish of the part, such as increasing or decreasing tool life. Plasma cutting is performed at high temperatures with rapid cooling, causing hardening in the cutting region. Normalization is usually recommended for cases where need best conditions of machining by milling, and are indicated for items that have carbon content, by weight, higher than 0.20% in its composition, below that it is not possible to use the advantages of its application. Several metalworking industry produce ABNT 1045 steel parts using plasma cutting, normalization and upgrading processes. Knowing that steel has 0.45% of its carbon weight in its composition, this work aims to verify the need to apply the normalization process to make possible the milling of a surface that has been cut in plasma. To make this possible, the roughness (R_a) of the specimens or the flank wear (V_b) of the cutting inserts used in milling and the costs used in the test has displayed. The comparison has performed between plasma cut and milled specimens and normalization cut and milled plasma cut specimens. After the study, milling without normalization had the lowest total cost and achievement of low average roughness values, so it can be concluded that normalization is not necessary to make possible machining by milling of surfaces in ABNT 1045 steel plasma cutting.

Keywords: Normalize, Plasma Cutting and Milling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de fresamento horizontal (a) e vertical (b)	15
Figura 2 – Esquema de formação de cavaco mostrando o plano de cisalhamento ..	17
Figura 3 – Pastilhas com diferentes geometrias e número de arestas de corte	17
Figura 4 – Exemplo de avaria de quebra (a), de trinca (b) e de sulco (c).....	26
Figura 5 – Exemplo desgaste de flanco (a), desgaste de entalhe (b) desgaste de cratera (c).....	27
Figura 6 – Mecanismos e processos de desgaste que podem acontecer nas ferramentas de corte	28
Figura 7 – Ilustração do sentido de corte Concordante (a) e Discordante (b)	30
Figura 8 – Ilustração da medição do comprimento de corte.....	32
Figura 9 – Avaliação da média aritmética R_a de desvio do perfil avaliado.	33
Figura 10 – Avaliação da altura máxima do perfil R_z	33
Figura 11 – Avaliação da altura máxima do perfil (R_t).....	34
Figura 12 – Escalas comparativas dos valores para vários métodos de durezas e aplicações recomendáveis para diversos materiais	41
Figura 13 – Fluxograma do desenvolvimento.....	42
Figura 14 – Locais para medição da dureza	44
Figura 15 – Durômetro EQTRB-250.....	44
Figura 16 – CNC Romi D600 Fanuc.....	45
Figura 17 – Método de fixação do corpo de prova	45
Figura 18 – Cabeçote utilizado (a) Inseto Metal duro ISO 490R-08T312M-PM 4220 (b).....	46
Figura 19 – Locais do fresamento	47
Figura 20 – Rugosímetro digital portátil modelo TR-220 marca TIME.....	48
Figura 21 – Posicionamento das medições da rugosidade Média (R_a)	48
Figura 22 – Zeiss™ Stemi 2000-C Stereo Microscop.....	49
Figura 23 – Diferença média de dureza HRb entre as amostras.....	52
Figura 24 – Desgaste de flanco insertos do Ensaio 1.	53
Figura 25 – Desgaste de flanco insertos do Ensaio 2.	53
Figura 26 – Desgaste de flanco insertos do Ensaio 3.	54
Figura 27 – Gráfico da rugosidade média – Ensaio 1	55
Figura 28 – Gráfico da rugosidade média – Ensaio 2	56
Figura 29 – Gráfico da rugosidade média – Ensaio 3	56
Figura 30 – Comparação rugosidade média entre os ensaios 1, 2 e 3	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química e características dos metais duros	21
Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos aços laminados, normalizados e recozidos	35
Tabela 3 – Temperaturas de normalização recomendadas para aços carbono de baixa liga	36
Tabela 4 -Quadro com as informações sobre corrente e espessura	38
Tabela 5 – Parâmetros de usinagem dos corpos de prova	47
Tabela 6 – Tabela ensaio de Dureza HRb	51
Tabela 7 – Número de operações por jogo de insertos	58
Tabela 8 – Custo de produção Ensaio 1 e 3	59

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Objetivo geral	13
1.1.2 Objetivos específicos.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Usinagem por fresamento	14
2.1.2 Formação do cavaco	15
2.1.3 Ferramentas de corte	17
2.1.4 Materiais para ferramentas de corte.....	18
2.1.4.1 Aços rápidos e aços rápidos com cobertura.....	18
2.1.4.3 Metal duro e metal duro com cobertura.....	20
2.1.4.3 Cermet.....	23
2.1.4.4 Materiais ultraduros para ferramentas.....	24
2.1.5 Avarias e Desgaste das Ferramentas.....	25
2.1.6 Movimentos de Corte	30
2.1.7 Acabamento de superfícies fresadas	31
2.3 Processo de normalização em aços.....	34
2.3.1 Normalização em aço 1045.....	36
2.4 Corte a Plasma.....	37
2.5 Ensaio de Dureza	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 Material.....	43
3.2 Processo de normalização	43
3.3 Ensaio de dureza	43
3.4 Ensaio de usinagem.....	45
3.5 Ensaio de Rugosidade	48
3.5 Medição do desgaste do inserto.....	49
3.6 Análise dos custos.....	49
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	51
4.1 Análise da dureza.....	51
4.2 Avaliação do desgaste da ferramenta	52
4.3 Medição da Rugosidade média (Ra)	55

4.4 Avaliação dos custos de usinagem.....	58
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
5.1 Conclusão	61
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	62
REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

No cenário tecnológico atual, melhorar a qualidade do produto final e encontrar métodos que possibilitem a economia de recursos é indispensável para garantir a existência das empresas. Evitar o desperdício de matéria prima, tempo e ferramentas, podem levar ao aumento da lucratividade. Além disso, zelar pela qualidade do produto final e pela satisfação dos clientes pode refletir no aumento das vendas.

Dentro da indústria metalmeccânica existem diversas oportunidades para o desenvolvimento de trabalhos relacionados a melhoria de processos. Uma das áreas que necessita atenção é a usinagem. A usinagem pode apresentar alto custo de operação e, na maioria dos casos, é aplicada a componentes que exigem excelentes condições de acabamento, além de ser conhecida também, por permitir a obtenção de uma infinidade de formatos de peças.

Entre os processos de usinagem mais utilizados pode-se destacar o processo de fresamento. Groover (2002) destaca que dentre os diversos processos de usinagem, o fresamento constitui um dos mais importantes pela sua produtividade e flexibilidade.

O fresamento acontece pela retirada de material de uma peça que avança em direção a uma ferramenta cortante em rotação. Para que o fresamento ocorra adequadamente, diversos parâmetros como velocidade de avanço, profundidade de corte, velocidade de corte, sentido de corte, entre outros, devem sempre ser levados em consideração.

Além dos parâmetros citados, existem processos relacionados à preparação da peça que também podem interferir diretamente no resultado do fresamento, como por exemplo o corte a plasma e o tratamento térmico de normalização.

Kiminami, Castro e Oliveira (2013) explicam que o corte a plasma é aplicado para separar metais por meio de fusão, e atinge temperaturas de até 15.000°C. O corte ocorre através de um jato de plasma em altas velocidades. Este processo pode causar efeito de endurecimento pela formação da Zona Afetada pelo Calor (ZAC).

Silva e Mei (2010) explicam que a normalização consiste basicamente na austenização completa da peça seguida de resfriamento ao ar, com a finalidade de homogeneizar a estrutura do material. Um dos efeitos da normalização é proporcionar a melhoria da usinabilidade dos materiais.

Silva e Mei (2010) descrevem também que o processo de normalização é recomendado apenas para aços com teores de carbono superiores a 0,20%. Abaixo disso, não é possível observar melhorias significativas em sua estrutura. Desta forma, supõe-se então, que trabalhar com a normalização em peças de aço carbono com teores pouco superior a 0,20% também não traria benefícios significativos para a usinagem.

Dentro de uma indústria metalmeccânica, situada no norte do Estado de Santa Catarina, uma peça é produzida em aço carbono ABNT 1045, passa pelo processo de corte a plasma, normalização e fresamento. Levando em consideração a quantidade de 0,45% de carbono em sua composição, e a possibilidade de ocorrer endurecimento superficial na região do corte a plasma, há a necessidade de aplicar o processo de normalização para tornar possível a sua usinabilidade?

Diante disso, este trabalho propõe o estudo do fresamento do aço ABNT 1045, para verificar a necessidade de aplicação do processo de normalização para melhoria da usinabilidade de superfícies cortadas a plasma.

Para atingir este objetivo, será utilizado a comparação dos resultados do acabamento superficial (R_a) da peça, o desgaste de flanco (V_b) do inserto e o custo empregado em cada processo. O experimento será realizado na superfície de um corpo de prova cortado a plasma e fresado, e na superfície de outro corpo de prova cortado a plasma, normalizado e fresado.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Verificar a necessidade da normalização para tornar possível o fresamento de superfícies cortadas a plasma em aço ABNT 1045.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar a rugosidade média (R_a) dos corpos de prova com e sem normalização;
- b) Medir o Desgaste de Flanco (V_b) das ferramentas após o fresamento;
- c) Comparar os custos de fabricação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Usinagem por fresamento

A usinagem é um dos processos de fabricação mais conhecidos dentro da indústria metalmeccânica. Segundo Coppini (2015, p. 23) “a usinagem consiste em dar forma, tolerância dimensional, geométrica e acabamento superficial de peças em conformidade com seus projetos”.

Coppini (2015) diz que dentre os processos mais utilizados na usinagem destaca-se o fresamento, por causa da sua flexibilidade e produtividade. O processo de fresamento, assim como todos os processos de usinagem, ocorre pela remoção de material em excesso na matéria-prima, sendo retirado na forma de cavaco. Para realização da usinagem utiliza-se máquinas, ferramentas de corte e dispositivos de fixação da peça e ferramenta, adequados para cada tipo de operação.

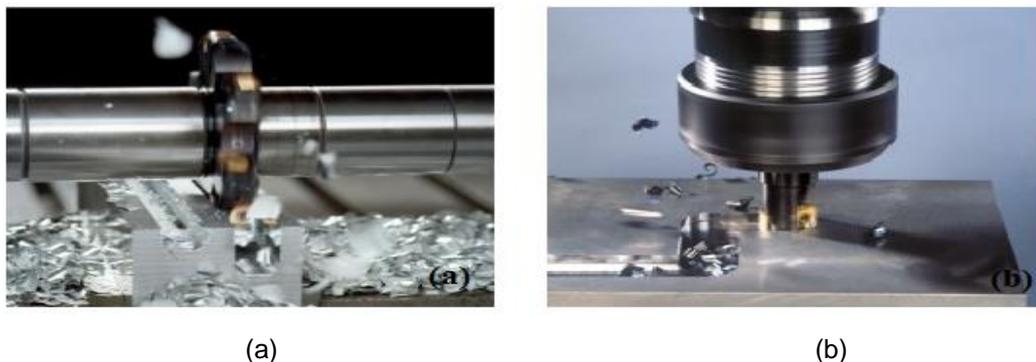
Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p.117) descrevem a usinagem por fresamento como “um processo mecânico onde a remoção de material e a geração da superfície usinada ocorrem em decorrência do movimento relativo entre a peça e a ferramenta”.

Kiminami, Castro e Oliveira (2013) explicam também que a ferramenta de fresamento possui vários gumes de corte. A remoção de material ocorre quando a ferramenta é pressionada contra a peça durante o movimento rotativo do eixo da máquina. Devido à variedade de máquinas e da diversidade de tipos de ferramentas, o fresamento é um dos tipos de usinagem mais utilizados na indústria.

2.1.1 Tipos de fresamento

O fresamento pode ser classificado em dois tipos, fresamento horizontal ou fresamento vertical. Sua aplicação depende principalmente do formato da superfície que se deseja adquirir na peça. Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 117) explicam que “o processo de fresamento horizontal é destinado a obtenção de superfícies paralelas ao eixo de rotação da ferramenta, enquanto a o fresamento vertical é indicado para obtenção de superfícies planas perpendiculares ao eixo de rotação da ferramenta”, conforme demonstrado na Figura 1 a e b.

Figura 1 – Exemplo de fresamento horizontal (a) e vertical (b)



Fonte: Sandvik (2019)

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) classificam os tipos de fresamento como tangencial e frontal conforme descrito abaixo:

Fresamento tangencial é aquele no qual o eixo da fresa fica paralelo a superfície que está sendo gerada, neste caso os dentes ativos da ferramenta estão na superfície cilíndrica da ferramenta. As ferramentas utilizadas neste tipo de operação são conhecidas como fresas cilíndricas ou tangenciais.

Fresamento frontal: é aquele no qual a fresa fica perpendicular à superfície que está sendo usinada e os dentes ativos ficam na superfície frontal da ferramenta. As ferramentas utilizadas neste tipo de operação são conhecidas como fresas frontais e de topo.

Existem vários tipos de fresas e diversos tipos de geometria a serem usinados, por isso, de acordo com a necessidade, pode-se combinar métodos diferentes para obtenção das geometrias pré-estabelecidas por um projeto.

2.1.2 Formação do cavaco

De acordo com Coppini (2015, p. 41) “cavaco é o nome que se dá ao material removido pela ferramenta. Pode ser classificado quanto ao seu tipo e quanto a sua forma. Os tipos são três: cavaco de ruptura, cavaco de cisalhamento e cavaco contínuo”.

Coppini (2015) explica que o cavaco pode ocorrer em formato de fita helicoidal, espiral, lascas e/ou pós. Os cavacos de ruptura ocorrem na usinagem de materiais frágeis, como por exemplo o ferro fundido cinzento, e que sua forma é lascas ou pó. As formas dos cavacos de cisalhamento e contínuos podem ser em fita,

helicoidal, espiral e lascas.

A forma do cavaco pode interferir na qualidade da superfície usinada, no desempenho da ferramenta e no próprio processo. Dentre os tipos de cavaco, o cavaco em forma de fita é o pior de todos.

O cavaco em forma de fita é o mais inconveniente, podendo prejudicar a qualidade da superfície usinada, provocar danos da ferramenta e além disso, ser relativamente mais difícil de transportar e armazenar. As demais formas de cavaco são de efeitos negativos respectivamente cada vez menores, sendo o cavaco em lascas aquele que apresenta as maiores vantagens. (COPPINI, 2015, p. 35).

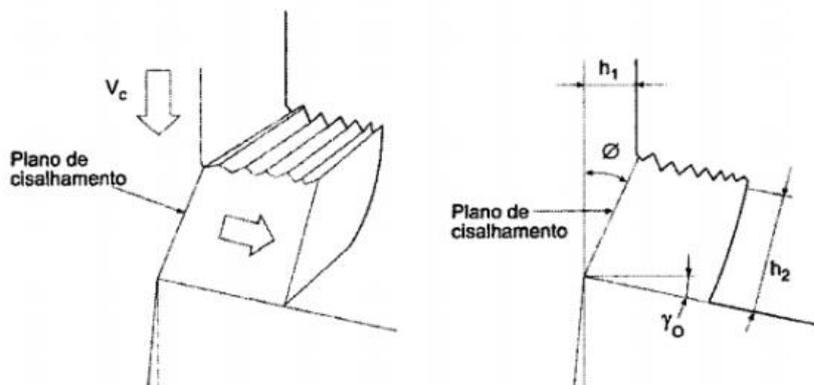
Diniz, Marcondes e Coppini (2013, p.39) complementam dizendo que,

A formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte, etc. Assim, estão envolvidos com o processo de formação de cavaco aspectos econômico e de qualidade da peça, segurança do operador, utilizando adequadamente a máquina-ferramenta, etc.

Sobre a formação do cavaco, Diniz, Marcondes e Coppini (2013, p.39), dizem que “o corte dos metais envolve o cisalhamento concentrado ao longo de um plano chamado plano de cisalhamento (ou zona primária de cisalhamento)”. A formação do cavaco é explicada através da Figura 2, onde:

O ângulo entre o plano de cisalhamento e a direção do corte é chamado de ângulo de cisalhamento (ϕ). Quanto menor o ângulo de saída (γ), maior a variação da direção de fluxo do cavaco, maior sua deformação e menor o ângulo de cisalhamento. Consequentemente, maior será a razão h_2 (espessura do cavaco depois de formado)/ h_1 (espessura do cavaco antes de formado), chamada de grau de recalque. Esta Influência do ângulo de saída na deformação do cavaco e no grau de recalque é marcante na usinagem de matérias dúcteis, muito suscetíveis à deformação. (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013, p.39).

Figura 2 – Esquema de formação de cavaco mostrando o plano de cisalhamento



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2013)

Os materiais frágeis possuem pequena zona plástica quando submetidos a grandes tensões, desta forma, costumam se romper com baixa taxa de deformação. Por outro lado, os materiais dúcteis possuem grande zona plástica, por isso costumam causar grandes deformações antes da ruptura do cavaco.

2.1.3 Ferramentas de corte

Coppini (2015) afirma que é possível trabalhar com ferramentas de corte inteiriças ou com pastilhas intercambiáveis, e que de forma geral, o preço depende do volume de material especial utilizado para fabricá-lo. Além disso, deve-se levar em consideração que as ferramentas de corte intercambiáveis podem possuir duas, três, quatro, seis ou oito arestas cortantes, conforme apresentado na Figura 3. Este fator irá influenciar diretamente no custo total da usinagem.

Figura 3 – Pastilhas com diferentes geometrias e número de arestas de corte



Fonte: Sandvik (2019)

2.1.4 Materiais para ferramentas de corte

Ferraresi (1970) explica que a ferramenta foi um dos primeiros instrumentos a ser utilizados pelo homem desde as eras pré-históricas. Algumas foram feitas de pedra e outras de madeira. Complementavam o homem permitindo a realização de tarefas como lavrar a terra, cortar e conformar substâncias úteis para a vida, assim como, garantir maior segurança para defender-se contra o meio ambiente, que era de modo geral, adverso.

Com o passar dos anos houve o aperfeiçoamento das técnicas e logo aprendemos a tornar as ferramentas mais duras e mais afiadas, até chegar a idade dos metais. Aprendemos a utilizar o cobre, a extrair o ferro do seu minério e transformá-lo em aço, temperar o aço resfriando em água e fabricar o aço Damasco (obtido por fusão).

Nos dias atuais, contamos com a disponibilidade de diversos tipos de ferramentas de corte para usinagem, com formatos, materiais e finalidades diferentes. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) ainda não existe uma classificação geral de materiais para ferramentas, porém com base nos seus característicos químicos, elas podem ser agrupadas em ordem crescente de dureza a quente e resistência ao desgaste por abrasão da seguinte forma:

- Aços rápidos
- Aços rápidos com cobertura
- Metal duro
- Metal duro com cobertura;
- Material cerâmico;
- Nitreto cúbico de boro;
- Diamante.

2.1.4.1 Aços rápidos e aços rápidos com cobertura

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) descrevem os aços rápidos como ferramentas de alta liga de tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio, cobalto e nióbio. Foram chamados desta forma pois, em 1905 quando criados, foi o material

ferramenta que suportava maiores velocidades de corte. Os aços rápidos são materiais tenazes, de elevada resistência ao desgaste e elevada dureza a quente, podendo ser utilizados até temperaturas de corte na ordem de 600°C.

Os aços rápidos podem também serem produzidos pela metalurgia do pó (HSS-PM). As principais características dos HSS- PM são:

- Facilidade de usinagem e alta retificabilidade;
- Melhor resposta ao tratamento térmico;
- Maior resistência ao revenimento;
- Excelente capacidade dimensional após o beneficiamento;
- Alta resistência ao desgaste;
- Melhor resposta ao recobrimento TiN (Nitreto de Titânio).

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013) os aços rápidos se dividem em duas categorias, onde, a categoria “T” corresponde os tipos predominantemente de tungstênio e a categoria “M” que compreende predominantemente ao grupo do molibdênio. Ambas as categorias possuem o cobalto, cromo e vanádio em sua composição.

O aço rápido por si só, nem sempre consegue desempenhar todas as funções necessárias dentro da usinagem pois também possuem limitações. Entretanto, o desenvolvimento das ferramentas vem melhorando suas condições através da aplicação de coberturas mais resistentes ao desgaste do que o próprio aço rápido.

Bons exemplos de tipos de cobertura são o nitreto de titânio (TiN), o carbonitreto de titânio (TiCN), O nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) e o nitreto de cromo-alumínio (AlCrN). Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), essas camadas possuem as seguintes características:

- Alta dureza, de 2300 a 3300 HV;
- Elevada ductilidade;
- Redução sensível ao caldeamento a frio (evita a formação de aresta postiça de corte);
- Baixo coeficiente de atrito;
- Alta estabilidade química;

- Espessura de 1-4 μm .

A utilização de ferramentas de aço rápido com revestimento proporciona menores coeficientes de atrito durante a usinagem, conseqüentemente, a ferramenta trabalha com menores esforços. Diniz, Coppini e Marcondes (2013, p.81) explicam que “devido ao fato desta camada possuir alta dureza (tanto a frio, quanto a quente) e também pequeno atrito, os desgastes são menores, principalmente o desgaste da superfície de folga da ferramenta”.

2.1.4.3 Metal duro e metal duro com cobertura

Sobre o metal duro, Diniz, Coppini e Marcondes (2013, p.84) explicam que se trata de “um produto da metalurgia do pó feito com partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto) formando um corpo de alta dureza e resistente a compressão”.

No metal duro, os tamanhos destas partículas normalmente variam entre 1 a 10 μm . Normalmente são carbonetos de tungstênio e ocupam de 60 a 90% do volume do material da ferramenta. O principal aglomerante utilizado na composição é o cobalto.

As principais características dos metais duros relatadas por Diniz, Coppini e Marcondes (2013) são a dureza em altas temperaturas e a tenacidade (capacidade de resistência ao choque).

Os metais duros são classificados pela norma ISO em três grupos designados pelas letras P, M e K. Existe ainda uma subdivisão dentro destes grupos usando números. Assim, existe os subgrupos P01 a P50, M01 a M40 e K01 a K40 conforme demonstrado na Tabela 1.

De acordo com Machado et al. (2009) as ferramentas das classes P e M se aplicam principalmente a usinagem de materiais ferrosos já a classe K se destina a usinagem de materiais não ferrosos como o alumínio, cobre titânio e níquel.

Tabela 1 – Composição química e características dos metais duros

Designação ISO	% WC	% TiC + TaC	% Co	Densidade (g/cm ³)	Dureza (HV)	Resistência a ruptura transversal (kgf/mm ²)
P01	30	64	6	7,2	1800	75
P10	55	36	9	10,4	1600	140
P20	76	14	10	11,9	1500	150
P30	82	8	10	13,0	1450	170
P40	77	12	11	13,1	1400	180
P50	70	14	16	13,4	1300	200
M10	84	10	6	14,4	1650	140
M20	82	10	8	13,5	1550	160
M30	81	10	9	14,4	1450	180
M40	78	7	15	13,5	1300	200
K10	92	2	6	14,8	1650	150
K20	91,5	2,5	6	14,8	1550	170
K30	89	2	9	14,5	1450	190
K40	88	-	12	14,3	1300	210

Fonte: Adaptado pelo autor de Diniz, Marcondes e Coppini (2013)

De acordo com essa classificação, o grupo “P” é composto de metais duros de elevado teor de TiC + TaC que proporcionam ao material elevada dureza a quente e resistência ao desgaste. É indicado para materiais que produzem cavacos contínuos (aços e metais dúcteis em geral).

O Grupo “K” foi o primeiro grupo de metal duro a ser desenvolvido. Sua composição possui carbonetos de tungstênio aglomerados pelo cobalto. Trata-se de um material indicado para usinagem de materiais frágeis que geram cavacos curtos como por exemplo os ferros fundidos e latões.

Por fim, o grupo “M” que possui propriedades intermediárias ao grupo “P” e “K”. Se aplica este tipo de ferramenta para operações diversas, porém o principal material usinado com esse tipo de ferramenta é o aço inoxidável.

Mais recentemente, a Norma ISO 523 (2004) acrescentou a classe N, para metais e ligas não ferrosas; a classe S para as superligas, e; a classe H para os aços endurecidos. Esta nova classificação tirou a classe K do rótulo de classe dos metais não ferrosos.

Os metais duros também podem receber camadas de cobertura para melhorar sua resistência ao desgaste, diminuir os esforços de corte e aumentar a

vida útil da ferramenta.

Existe pastilhas com uma, duas e até três camadas de cobertura. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013, p.91) “os materiais mais usados são o carboneto de titânio (TiC), óxido de alumínio (Al_3O_3), nitreto de titânio (TiN) e o carbonitreto de titânio (TiCN)”.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppin (2013) a primeira camada de revestimento de uma ferramenta de metal duro normalmente é o carboneto de titânio, e algumas vezes trata-se da única camada de revestimento. As pastilhas que possuem duas camadas de revestimento normalmente possuem uma camada de óxido de alumínio ou nitreto de titânio por cima de uma camada de uma camada de TiC ou TiCN. No caso de três camadas de revestimento se aplica uma camada de TiN, que recobre uma camada intermediária de Al_2O_3 , que recobre uma camada de TiC ou TiCN, que fica por cima do núcleo.

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) explicam que as camadas de revestimento são aplicadas por CVD (deposição química a vapor) por meio de fornos com atmosfera protetora de hidrogênio, temperatura na casa dos $1000^{\circ}C$ e pressão levemente negativa. As características de cada aplicação dependem do tipo de revestimento:

- Carboneto de titânio (TiC) e carbonitreto de titânio (TiCN) – Possui excelente resistência ao desgaste por abrasão. Sua dureza chega na ordem dos 3000HV, se tornando a maior dureza entre os metais com revestimento. Trata-se também do material que melhor gera adesão entre as camadas.
- Óxido de alumínio – Garante a estabilidade térmica para trabalhos em altas temperaturas, possui grande resistência ao desgaste por abrasão e a oxidação. Diminui a tendência de desgaste de cratera, porém, possui baixa resistência a choques térmicos e mecânicos.
- Nitreto de titânio – Reduz o coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco, e é quimicamente mais estável que o TiC.

De forma geral, as camadas de revestimento do metal duro variam de 2 a $12\mu m$. Quando se aumenta a espessura do revestimento a resistência ao desgaste aumenta, porém, a tenacidade diminui, tornando a chance de lascamento maior.

Existe também a cobertura de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) e a cobertura

de nitreto de alumínio-titânio (AlTiN), o qual o nome se dá dependendo se há mais alumínio ou titânio na composição. Diniz, Marcondes e Coppini (2013, p.93) explicam que,

a estequiometria destes compósitos pode variar em larga margem, permitindo diferentes produtos com diferentes teores de Ti e Al para diversas aplicações. Tais coberturas são aplicadas ao metal duro utilizando-se do processo de PVD, o que propicia que se tenha coberturas mais finas e assim arestas mais afiadas, o que é importante quando se deseja melhores acabamentos superficiais e/ou quando se usina materiais muito dúcteis, como o aço inoxidável austenítico.

As principais características proporcionadas por estas camadas são:

- Maior resistência a oxidação;
- Baixa condutividade térmica;
- Alta dureza a frio e a quente (próxima a 3300HV);
- Alta estabilidade química;
- Coeficiente de atrito mais baixo que os proporcionados pelo TiN e TiC.

Além das coberturas citadas, existe diversas outras como a fina camada de diamante sintético, diamante sintético policristalino, ZrCN, CrTiAlN, ZrO₂, entre outras, que normalmente se destinam a aplicações específicas de acordo com a necessidade de usinagem.

2.1.4.3 Cermet

O cermet trata-se de um material que possui uma fase cerâmica e uma fase metálica. Sua estrutura é similar ao metal duro pois trata-se de partículas ligadas por um aglomerante. Os aglomerantes mais usuais são o níquel e o cobalto.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013, p. 97) estes materiais “possuem resistência ao desgaste, estabilidade química, e dureza intermediárias entre o metal duro e o material cerâmico, porém conseguem manter a tenacidade

comparável ao metal duro”. A alta resistência a oxidação, a formação de aresta postiza de corte e alta resistência a deformação plástica também são propriedades dos cermets.

Aplica-se os Cermets em torneamento e fresamento leve, principalmente sem refrigeração, para aços moles (antes da têmpera) e de aços inoxidáveis, e no fresamento em acabamento e semi-acabamento de aços moles e matrizes com dureza até 50HRc.

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) dizem que os materiais cerâmicos possuem propriedades interessantes para uma ferramenta, tais como, dureza a quente e a frio, resistência ao desgaste e estabilidade química. Por outro lado, também apresenta limitações como a baixa condutividade térmica para dissipação do calor e baixa tenacidade, que facilita a trinca e quebra da ferramenta.

As ferramentas cerâmicas podem ser a base de óxido de alumínio (Al_2O_3 – Alumina) puras ou mistas. As cerâmicas puras podem possuir grãos finos de Al_2O_3 sinterizados, com algum teor de MgO para inibir o crescimento do grão e óxido de cromo, titânio e níquel para aumentar a resistência mecânica, ou ainda baixos percentuais de óxido de zircônio (ZrO_2) que aumenta a tenacidade. As cerâmicas mistas podem conter de 20 a 30% do volume de carbonetos de titânio (TiC) e pequenas quantidades de nitreto de titânio (TiN), além da alumina.

Outro tipo de ferramenta cerâmica conhecida é a base de nitreto de silício (Si_3N_4) – são cristais de Si_3N_4 numa fase irregular do SiO_2 que são sinterizados na presença da alumina (SiAlON) e óxido de ítrio (I_2O_3) e magnésio (MgO).

2.1.4.4 Materiais ultraduros para ferramentas

Segundo Machado et al. (2009) são materiais com dureza superior a 3.000 HV. Entre as ferramentas de corte mais conhecidas estão os diamantes naturais mono e policristalinos, diamantes sintéticos monocristalinos, diamante sintético policristalinos (PCD), nitreto cúbico de boro (CBN) e o nitreto cúbico de boro policristalino.

Sobre os diamantes, Diniz, Marcondes e Coppini (2013) explicam que seria ótimo usar este material como ferramenta de corte devido a sua alta dureza, porém o custo torna a operação inviável. Por esse motivo, aplica-se essa ferramenta apenas quando se necessita alta precisão e acabamento brilhante, como por exemplo o

acabamento de espelhos e lentes.

Com a dificuldade de usar o diamante natural criou-se o PCD (Diamante Sintético Policristalino). Para formação de uma camada de PCD é dada pela sinterização de partículas de diamante com cobalto em um processo de alta pressão e temperatura. Essa camada de aproximadamente 0,5mm é aplicada sobre uma pastilha de metal duro, ou então ligada ao metal duro através de brasagem.

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) dizem que entre as características do PCD destaca-se alto valor de condutividade térmica e altíssima dureza, consideradas acima de 4 vezes superiores ao metal duro de classe “K”, e altíssima resistência ao desgaste por abrasão. As desvantagens deste material estão relacionadas a anisotropia, que faz com que haja a necessidade de uma cuidadosa lapidação do PCD para que possa garantir a resistência aos esforços de corte. O seu custo de fabricação é elevado e o uso deste material não é recomendado para usinagem de metais ferrosos devido a compatibilidade entre o ferro do metal e o carbono do PCD. Aplica-se o PCD na usinagem de peças de ligas de alumínio e cobre, plásticos abrasivos, cerâmicos, metais duros, madeira abrasiva, pedras naturais e concreto.

No que diz respeito ao CBN (Nitreto Cúbico de Boro) Diniz, Marcondes e Coppini (2013) explicam que se trata de um material sintético, obtido do grafite, nitreto de boro e lítio como catalizador, através da sinterização em elevada pressão e temperatura. O CBN é quimicamente mais estável que o diamante, podendo suportar usinagem de ligas ferrosas sem problema de desgaste por difusão. Sua tenacidade é similar ao material cerâmico, e sua dureza só é superada pelo diamante. Recomenda-se a aplicação do CBN para fresamento de aços endurecidos (dureza entre 45 a 65 HRC) e de ferro fundido cinzento.

Machado et al. (2009) relata que o CBN pode ser aplicado para praticamente todos os tipos de materiais de uso comum na engenharia, entretanto, pode não ser economicamente viável. O autor complementa que o custo é um fator limitante para ampla aplicação dos materiais ultraduros na usinagem.

2.1.5 Avarias e Desgaste das Ferramentas

Durante o processo de utilização das ferramentas de corte, diversos fatores podem influenciar na sua vida útil. A inutilização de uma ferramenta de corte pode se dar por mudança física rápida (avarias) ou lenta (desgaste).

De acordo com Ferraresi (1970, p. 352) “Consideram-se como avarias da ferramenta as quebras, trincas, sulcos distribuídos em forma de pente e as deformações plásticas, que ocorrem no gume cortante durante a usinagem”. Conforme demonstrado na Figura 4:

Figura 4 – Exemplo de avaria de quebra (a), de trinca (b) e de sulco (c)



Fonte: Sandvik (2019)

De acordo com Ferraresi (1970), a quebra é a ruptura da ponta ou da aresta cortante da ferramenta. Ela pode ocorrer pela ação de grandes forças de usinagem em diversos casos, dentre eles:

- Ângulo da ponta ou ângulo de cunha pequeno;
- Material de corte quebradiço;
- Corte Interrompido, ou;
- Parada instantânea do movimento de corte sem a retirada prévia da ferramenta da peça.

Sobre as trincas, o autor diz que elas se formam principalmente nas pastilhas de carboneto pouco tenazes devido às variações de temperatura. Os dois fatores contribuem para a formação destas trincas são a variação brusca de temperatura e a solda da pastilha no cabo da ferramenta.

No que diz respeito aos sulcos distribuídos em forma de pente, eles possuem origem térmica e normalmente aparecem no corte interrompido, na usinagem com avanço variável e no acesso irregular do refrigerante de corte. São observados com frequência na operação de fresamento com pastilhas de metal duro.

Sobre o desgaste, Diniz, Marcondes e Coppini (2013, p.107) dizem que, “desgaste é a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à

ação do corte”. Para estes autores os desgastes da ferramenta se classificam em desgaste de flanco, desgaste de entalhe e desgaste de cratera, conforme apresentado na Figura 5:

Figura 5 – Exemplo desgaste de flanco (a), desgaste de entalhe (b) desgaste de cratera (c)



Fonte: Sandvik (2019)

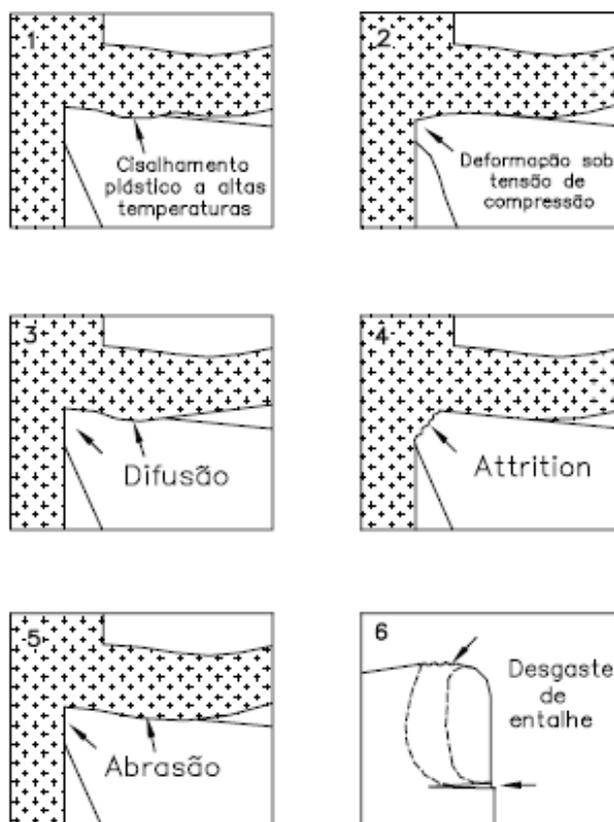
Desgaste frontal (ou de flanco) é o mais comum de todos, ocorre na superfície da folga da ferramenta, e é causado pelo contato entre a ferramenta e a peça. Este tipo de desgaste se apresenta em todas as ferramentas de corte. De forma geral, o aumento da velocidade de corte faz com que ocorra o aumento do desgaste de flanco. Porém quando se tem a formação da aresta postiça de corte, o aumento da velocidade de corte pode diminuir a taxa de crescimento deste desgaste;

O desgaste de entalhe, quando ocorre, normalmente aparece nos dois extremos de contato da peça com a ferramenta. Este tipo de desgaste influencia diretamente no acabamento superficial da peça, pois muda a forma da ponta da ferramenta. É agravado pelo aumento da temperatura e velocidade de corte;

O desgaste de cratera é causado pelo atrito entre a ferramenta/cavaco e ocorre na superfície de saída da ferramenta. A quebra da ferramenta de corte pode ocorrer quando o crescimento da cratera se encontra com o desgaste frontal. Pode não ocorrer em alguns processos de usinagem, principalmente quando se utiliza ferramentas de metal duro recobertas (a cobertura de Al_2O_3 é o mais eficiente contra a craterização), ferramentas cerâmicas e quando o material da peça é frágil (gera cavacos curtos).

Santos e Sales (2007) dizem que em condições normais de corte, as ferramentas podem desenvolver diversas formas de desgaste, e essas formas são chamadas de mecanismos de desgaste. Estes mecanismos são classificados em pelo menos seis tipos, conforme ilustrado na Figura 6:

Figura 6 – Mecanismos e processos de desgaste que podem acontecer nas ferramentas de corte



Fonte: Santos e Sales (2007)

Os exemplos 3, 4 e 5 são considerados mecanismos de desgaste, e podem atuar tanto isoladamente quanto em conjunto através da deformação plástica. Já os exemplos 1, 2 e 6 são apenas formas de desgaste. Santos e Sales (2007) explicam cada uma delas:

A deformação plástica superficial por cisalhamento em altas temperaturas (1) trata-se de um mecanismo de desgaste. Ocorre normalmente na usinagem em alto ponto de fusão com aço rápido. O material da superfície da ferramenta é arrancado, formando uma espécie de cratera. A principal causa deste efeito é a redução da resistência ao escoamento da ferramenta por causa das altas temperaturas.

A deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão (2), ocorre na usinagem de materiais de alta dureza. Ferramentas de metal duro e aço rápido normalmente apresentam este tipo de mecanismo de desgaste. Este tipo de desgaste ocorre na aresta de corte da ferramenta devido as altas velocidades de

corte e avanço.

Desgaste difusivo (3) envolve um mecanismo de transferência de átomos de um material para outro. Este processo depende basicamente da temperatura e da solubilidade de elementos na zona de fluxo. Este desgaste pode ocorrer na superfície de saída do cavaco e na superfície de folga da ferramenta. O desgaste se apresenta em forma lisa (quando avaliado microscopicamente).

Desgaste por aderência e arrastamento – *attrition* (4) ocorre normalmente em operações com baixa velocidade de corte, onde o fluxo de material sobre a superfície de saída torna-se irregular. A formação da aresta postiça de corte (APC) faz com que pedaços microscópicos da ferramenta sejam arrastados junto com o fluxo de material.

Desgaste abrasivo (5) trata-se da perda por microsulcamento, microcorte ou microlascamento causado por partículas de elevada dureza relativa. É um mecanismo de desgaste importante em aplicações de pastilhas revestidas, cerâmicas puras e mistas.

Desgaste de entalhe (6) ocorre principalmente na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas e com elevado grau de encruamento, como por exemplo, ligas de níquel, titânio, cobalto, e aço inoxidável. Esta forma de desgaste é apresentada normalmente onde existe abrasão e transferência de material.

Conhecer os tipos de desgaste é importante para poder avaliar a possibilidade da continuidade da utilização da ferramenta. De acordo com Santos e Sales (2007) fatores como elevação da força de usinagem, aumento do ruído, qualidade do acabamento não satisfatório, aumento das rebarbas, entre outros, podem ser sinais de que a ferramenta de corte deve ser substituída.

De acordo com Santos e Sales (2007) a norma ISO 3685 utiliza parâmetros para quantificar o desgaste nas ferramentas de corte. Estes parâmetros são aplicados para validar ferramentas de aço rápido, metal duro e cerâmica por:

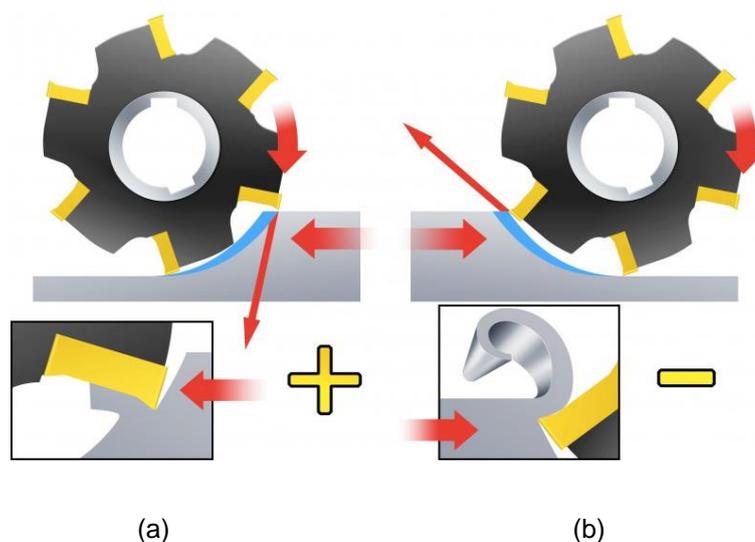
- Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3\text{mm}$;
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{B\text{max}} = 0,6\text{mm}$;
- Profundidade de Cratera, $K_T = 0,6\text{mm} + 0,3f$, onde f é o avanço em mm/rev;
- Falha catastrófica.

2.1.6 Movimentos de Corte

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) classificam os movimentos de corte na usinagem por movimentos ativos e movimentos passivos. Os movimentos ativos são aqueles que promovem a remoção de material, sendo estes, movimento de corte, movimento de avanço, e movimento efetivo de corte. Já nos movimentos passivos não ocorre esta remoção de material, porém são fundamentais para o processo, sendo estes, movimento de ajuste, movimento de correção, movimento de aproximação e movimento de recuo.

Quando se fala em movimento de corte em uma operação de fresamento, a peça avança na mesma direção ou na direção contrária ao sentido de rotação da fresa, o que afeta o início e o fim do corte. Estes métodos de corte são chamados de fresamento concordante ou discordante, conforme na Figura 7.

Figura 7 – Ilustração do sentido de corte Concordante (a) e Discordante (b)



Fonte: Sandvik (2019)

De acordo com a fabricante Sandvik (2019), no fresamento concordante, a ferramenta de corte avança no sentido da direção da rotação. O fresamento concordante é o método sempre recomendado - sempre que a máquina-ferramenta, a fixação e a peça permitirem. No fresamento concordante periférico, a espessura dos cavacos diminuirá a partir do início do corte, se aproximando de zero gradualmente ao final do corte. Isso evita que o esfregamento e a queima da aresta contra a superfície antes do início do corte.

Já no fresamento discordante, a direção de avanço da ferramenta de corte é oposta à sua rotação. A espessura de cavaco começa em zero e aumenta até o final do corte. A aresta de corte precisa ser forçada para dentro do corte, criando um efeito de esfregamento ou de queima devido ao atrito, altas temperaturas e, geralmente, contato com a superfície endurecida pelo trabalho causado pela aresta anterior. Tudo isto reduz a vida útil da ferramenta.

De forma geral, sempre que uma aresta de fresamento entra em corte, ela fica sujeita a uma carga de choque, o que se deve levar em consideração é a entrada e a saída da ferramenta a qual possibilite um fresamento bem-sucedido e com um acabamento satisfatório.

2.1.7 Acabamento de superfícies fresadas

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) diversos fatores podem contribuir ou comprometer o acabamento de uma superfície fresada, dentre eles se destacam:

- Diâmetro da fresa e avanço por dente;
- Posicionamento irregular das pastilhas no sentido radial;
- Desgastes não uniformes das arestas;
- Fluxo de saída de cavacos irregular;
- Condições operacionais da máquina-ferramenta: se a rotação da fresa for excêntrica (causada por excentricidade do eixo árvore), a rugosidade é diretamente influenciada, pois somente a aresta que gira no maior diâmetro realiza o corte mais profundo que gera a rugosidade;
- Fixação e/ou rigidez deficientes da peça, que podem gerar vibrações que são reproduzidas na superfície da peça.

Além das condições citadas,

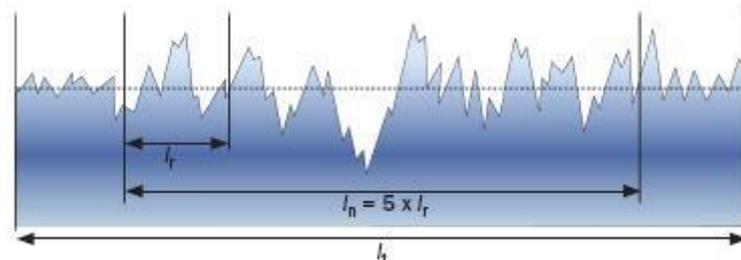
A utilização do fresamento concordante, como já visto, pode melhorar o acabamento da peça, devido a diminuição da vibração. Outras ações com este fim são: Uso adequado de fluido de corte

(principalmente na usinagem de materiais que tem a tendência ao empastamento) e diminuição da penetração de trabalho (a_e) no fresamento tangencial, que tem importante efeito na deflexão da ferramenta. No entanto, no corte de materiais que tem alta taxa de encruamento, como o aço inoxidável austenítico, a penetração de trabalho não pode diminuir demais, para que evite o encruamento da superfície. (DINIZ; MARCONDES, COPPINI, 2013, p.145).

Para verificar se os parâmetros usados estão permitindo um acabamento adequado ao solicitado no projeto, sugere-se que seja realizada a medição do acabamento da superfície.

Sandvik (2019) afirma que “a avaliação é baseada em um comprimento referencial especificado. Se o comprimento referência não for determinado no desenho de projeto da peça, quem medir a textura superficial deve determinar o comprimento de referência”, conforme ilustrado na Figura 8:

Figura 8 – Ilustração da medição do comprimento de corte



Fonte: Sandvik (2019)

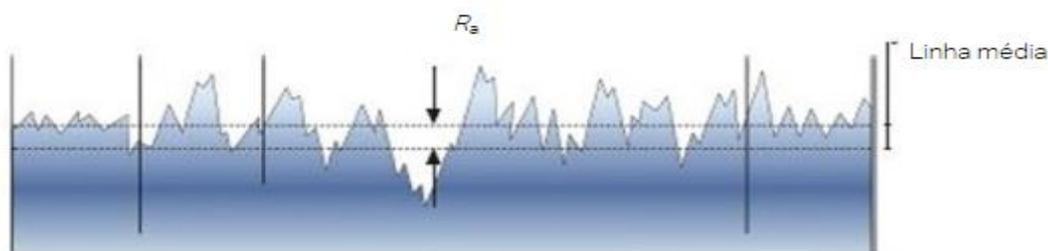
Onde,

- l_t = o comprimento total (a avaliação inicial e o comprimento de parada).
- l_n = o comprimento da avaliação (cinco comprimentos de referência são considerados padrão).
- l_r = o comprimento de referência.

Os parâmetros mais comuns no perfil R (principal perfil, perfil geral) são a Rugosidade Média (R_a), Altura máxima (R_z) e Altura total (R_t). Existe também outros parâmetros como a Altura Máxima de Pico (R_p) e a relação do material (R_{mr}), porém são menos usados.

A Rugosidade Média (R_a) é um valor médio de todos os desvios de uma linha reta dentro do comprimento de avaliação vertical, por isso não se utiliza o R_a para definir se o desvio está relacionado a picos ou vales. Pela Figura 9 conseguimos verificar como funciona esta medição.

Figura 9 – Avaliação da média aritmética R_a de desvio do perfil avaliado.

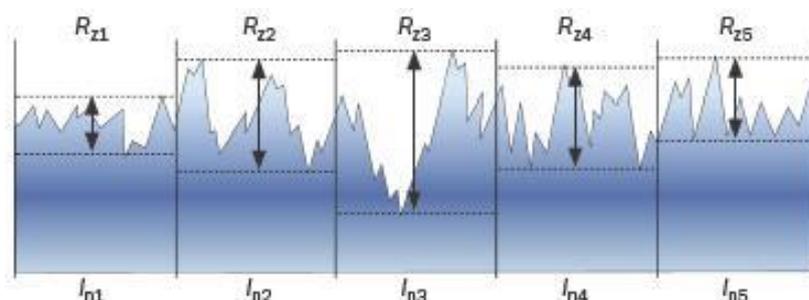


Fonte: Sandvik (2019)

Sandvik (2019) explica que o R_a , não é significativamente afetado por desvios individuais, ou seja, há um risco de faltar um pico grande ou um arranhão. O valor R_a mais comum para superfícies metálicas está entre $0,02 \mu\text{m}$ e $3,5 \mu\text{m}$ – quanto mais baixo o valor, mais fina a superfície ($0,02 \mu\text{m} = \textit{blank}$ de espelho). (SANDVIK, 2019).

A altura máxima do perfil (R_z) trata-se do valor médio das alturas individuais do perfil, R_z , obtido entre a maior altura de pico e o maior vale dentro do comprimento de avaliação conforme representado na Figura 10.

Figura 10 – Avaliação da altura máxima do perfil R_z .

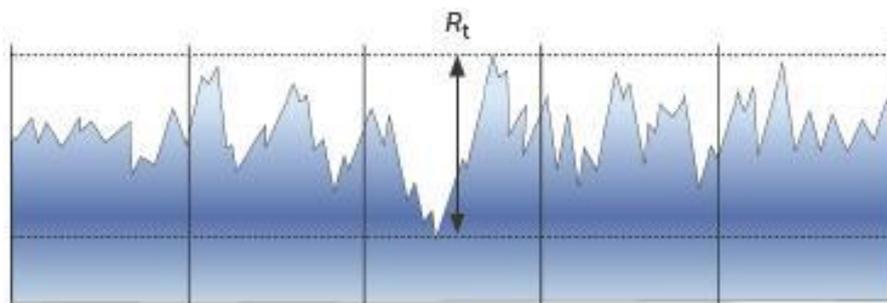


Fonte: Sandvik (2019)

De acordo com Sandvik (2019) no R_z , geralmente, há cinco comprimentos de referência, mas o número pode variar com um equipamento de medição moderno. O valor R_z no comprimento de referência que mostra o maior desvio é chamado de $R_{z\text{max}}$ ou R_{max} . (SANDVIK, 2019).

A altura total do perfil (R_t) é a soma da altura do pico mais alto do perfil e a maior profundidade do vale do perfil dentro no comprimento de avaliação, que assim como no R_z , esta medição abrange pelo menos cinco comprimentos de referência conforme demonstrado na Figura 11.

Figura 11 – Avaliação da altura máxima do perfil (R_t).



Fonte: Sandvik (2019)

Todas as formas de medição trazem informações diferentes sobre as condições do acabamento da peça em consideração. Muitas vezes se usa mais de um parâmetro para atestar a qualidade necessária.

2.3 Processo de normalização em aços

A normalização é um tratamento térmico que possui a finalidade de melhorar características dos materiais. Segundo Silva e Mei (2010) a normalização consiste na austenitização completa do aço, seguida de resfriamento ao ar parado ou agitado. É indicada normalmente para homogeneização da estrutura após o forjamento e antes da têmpera ou revenimento. Obviamente, aços ligados que temperam (endurecem) ao ar não são normalizados.

Silva e Mei (2010) comentam que em termos de propriedades mecânicas, para baixos teores de carbono ($C < 0,20\%$), não se observam diferenças significativas na aplicação da normalização, porém, com o aumento deste elemento, a dureza e a resistência mecânica ficam mais elevadas, a ductilidade mais baixa, embora a resistência ao impacto não seja muito alterada.

A Tabela 2, relaciona as mudanças nos valores de algumas propriedades mecânicas para aços de baixa liga laminados, normalizados e recozidos, classificados de acordo com as normas SAE-AISI e ABNT.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos aços laminados, normalizados e recozidos

Aço	Condições	Limite de Resistência MPa	Limite de Escoamento MPa	Redução da área %	Alongamento em 50mm	Dureza Brinell	Impacto Isod J
1020	Laminado	450	330	36,0	59	143	87
	Normalizado	440	345	35,8	58	131	118
	Recozido	395	295	36,5	66	111	123
1030	Laminado	550	345	32,0	57	179	75
	Normalizado	525	345	32,0	61	149	94
	Recozido	460	345	31,2	58	126	69
1040	Laminado	620	415	25,0	50	201	49
	Normalizado	595	370	28,0	55	170	65
	Recozido	520	350	30,2	57	149	45
1050	Laminado	725	425	20,0	40	229	31
	Normalizado	750	430	20,0	39	217	27
	Recozido	635	365	23,7	40	187	18
1060	Laminado	815	485	17,0	34	241	18
	Normalizado	775	420	18,0	37	229	14
	Recozido	625	370	22,5	38	179	11

Fonte: Adaptado pelo autor de Silva e Mei (2010)

De acordo com Silva e Mei (2010), a normalização pode ser usada, portanto, para qualquer das seguintes aplicações:

- Refino de grão (por meio de recristalização) e homogeneização da estrutura visando obter uma melhor resposta na têmpera ou no revenimento posterior;
- Melhoria da usinabilidade;
- Refino de estruturas brutas de fusão (peças fundidas por exemplo);
- Obter propriedades mecânicas desejadas.

Cada aço necessita de uma temperatura de aquecimento diferente para atingir a fase de austenitização para possibilitar normalização. Para o aço ABNT 1045, por exemplo, a temperatura recomendada para que possa atingir a austenitização é 860°C, conforme indicado pela na Tabela 3:

Tabela 3 – Temperaturas de normalização recomendadas para aços carbono de baixa liga.

Aço	Temperatura °C
1015	915
1020	915
1022	915
1025	900
1030	900
1035	885
1040	860
1045	860
1050	860
1060	830
1080	830
1090	830
1095	845

Fonte: Adaptado pelo autor de Silva e Mei (2010)

2.3.1 Normalização em aço 1045

Souza (1989) relata que a escolha da composição química de um aço depende de vários fatores, dentre eles a resistência mecânica necessária durante a sua utilização, a resistência ao meio ambiente necessário, o tamanho da peça, o método de fabricação da peça, o tratamento térmico que a peça será submetida e o tratamento superficial que a peça será submetida.

No aço SAE 1045 a Normalização induz a obtenção do grão fino o que melhora as propriedades mecânicas e sobretudo a usinabilidade do material. De acordo com o distribuidor Aço Especial,

A normalização proporciona dureza e resistência aos componentes deste aço SAE 1045. Além disso, a normalização ajuda a reduzir as tensões internas induzidas por operações tais como forjamento, fundição, corte a fogo com maçarico (oxicorte) usinagem ou solda em aços de baixo teor de carbono (normalmente abaixo de 0,50%). A normalização também melhora a homogeneidade microestrutural e a resposta ao tratamento térmico (por exemplo, recozimento ou têmpera) e aumenta a estabilidade dimensional. (AÇO ESPECIAL, 2019)

Dentre os principais benefícios, a normalização pode ser utilizada no aço ABNT 1045 para se obter as seguintes propriedades:

- Melhorar a usinabilidade;
- Melhorar a estabilidade dimensional em caso de tratamento térmico posterior;
- Modificar e / ou aperfeiçoar a estrutura de grãos;
- Produzir uma microestrutura homogênea;
- Reduzir bandejamento;
- Melhorar a ductilidade;
- Fornecer uma resposta mais consistente à têmpera ou cementação.

2.4 Corte a Plasma

O Processo de corte plasma foi desenvolvido desde os anos 50 para cortar metais condutores, principalmente o aço inoxidável e o alumínio. Hoje é um processo amplamente utilizado e conhecido pela indústria.

De acordo com Kiminami, Castro e Oliveira (2013) o corte a plasma é um processo que separa materiais pela fusão da área localizada por um arco de plasma. Esta remoção de material ocorre em uma temperatura próxima aos 15.000°C, fazendo com que o material se funda pela ação de um jato de gás ionizado que é direcionado por um orifício de uma tocha.

O plasma trata-se do quarto estado da matéria, de acordo com o Indústria Hoje (2013) é um gás eletricamente condutor, onde,

A ionização dos gases gera a criação de elétrons livres e de íons positivos junto com os átomos de gás. Quando isso ocorre, o gás torna-se eletricamente condutor, com a característica de transportar corrente, tornando-se assim o plasma. (INDÚSTRIA HOJE, 2013).

Aplica-se o corte a plasma principalmente em metais como o aço carbono, aço inoxidável, alumínio e outros metais eletricamente condutores.

Os principais mercados atendidos por este processo de corte são:

- Soldagem – corte e preparação dos conjuntos a serem soldados;

- Manutenção em geral;
- Estruturas metálicas e móveis metálicos;
- Usinas siderúrgicas, usinas de açúcar e álcool;
- Caldeirarias;
- Indústrias agrícolas, autopeças e automotiva;
- Funilarias;
- Carrocerias metálicas;
- Sucata de aço.

O equipamento de corte é dimensionado conforme a espessura do material a ser cortado, velocidade de corte, e o comprimento de corte. A corrente é a principal informação do equipamento de corte a plasma. A Tabela 4 exemplifica qual a corrente exigida para o corte de três diferentes materiais.

Tabela 4 -Quadro com as informações sobre corrente e espessura

Material	Espessura (mm)	Corrente (Ampére)	Velocidade de corte (mm/min)
Aço Carbono	0,5	25	10540
	1,5	40	5600
	3,0	60	5400
	6,0	80	2700
	12,0	100	1500
	19,0	100	660
	25,0	100	460
Aço Inoxidável	0,5	25	10400
	1,5	40	6200
	3,0	60	4500
	6,0	80	2600
	12,0	100	1320
	19,0	100	640
	25,0	100	390
Alumínio	0,5	25	10000
	1,5	25	4400
	3,0	40	3300
	6,0	60	2400
	12,0	80	1000
	19,0	100	840
	25,0	100	540

Fonte: Adaptado pelo autor de Indústria Hoje (2013)

De acordo com a Indústria Hoje (2013) o processo de corte a plasma se demonstra eficiente por diversos aspectos, dentre os fatores com maior relevância se destacam algumas vantagens e limitações:

- Velocidade e facilidade na operação;
- Preparação de juntas para a soldagem;
- Corta uma ampla faixa de espessuras (dependendo da capacidade do equipamento, é possível cortar metais desde 0,5mm até 60mm de espessura);
- Processo muito seguro, não utiliza perigosos cilindros de oxigênio e gás combustível e nem mangueiras transportando elementos combustíveis;
- Corta qualquer metal condutor;
- Alta velocidade de corte;
- Perfura sem pré-aquecimento;
- Permite cortar placas empilhadas;
- Corte limpo (O corte não deixa escória, por isso, não é necessária a limpeza posterior com esmeril);
- Zona térmica afetada (ZTA) é pequena;
- Não cortar materiais não condutivos de eletricidade;
- Para materiais muito espessos, ainda perde para processos de corte “oxigênio+combustível”;
- Além do equipamento de corte, há necessidade de um compressor para a produção do ar comprimido;
- Não é tão portátil.

Dentre as limitações do corte a plasma destaca-se a zona térmica afetada (ZTA). O uso de elevadas temperaturas no processo faz com que o material seja fundido, e com isso, as áreas remanescentes próximas ao local do corte podem apresentar alterações em sua microestrutura.

Pimenta (2013, p. 40) explica que “a microestrutura do metal que sofre o corte térmico sofre alteração de estrutura com desenvolvimento de microtrincas, endurecimento do material e formação de escória”.

A alteração da estrutura de um material pode colocar em risco componentes

que estejam sujeitos a grandes cargas em virtude do aparecimento de microtrincas, ou também, ser um fator prejudicial ao desgaste da ferramenta em peças que necessitem de usinagem posterior ao corte a plasma em virtude do endurecimento local.

2.5 Ensaios de Dureza

Os ensaios de dureza são amplamente utilizados nas indústrias em componentes elétricos e mecânicos. Os ensaios possuem a finalidade de medir a resistência a deformação permanente das peças produzidas.

Garcia, Spim e Santos (2013, p. 115) descrevem a dureza como “uma propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco à deformação de uma marca permanente.

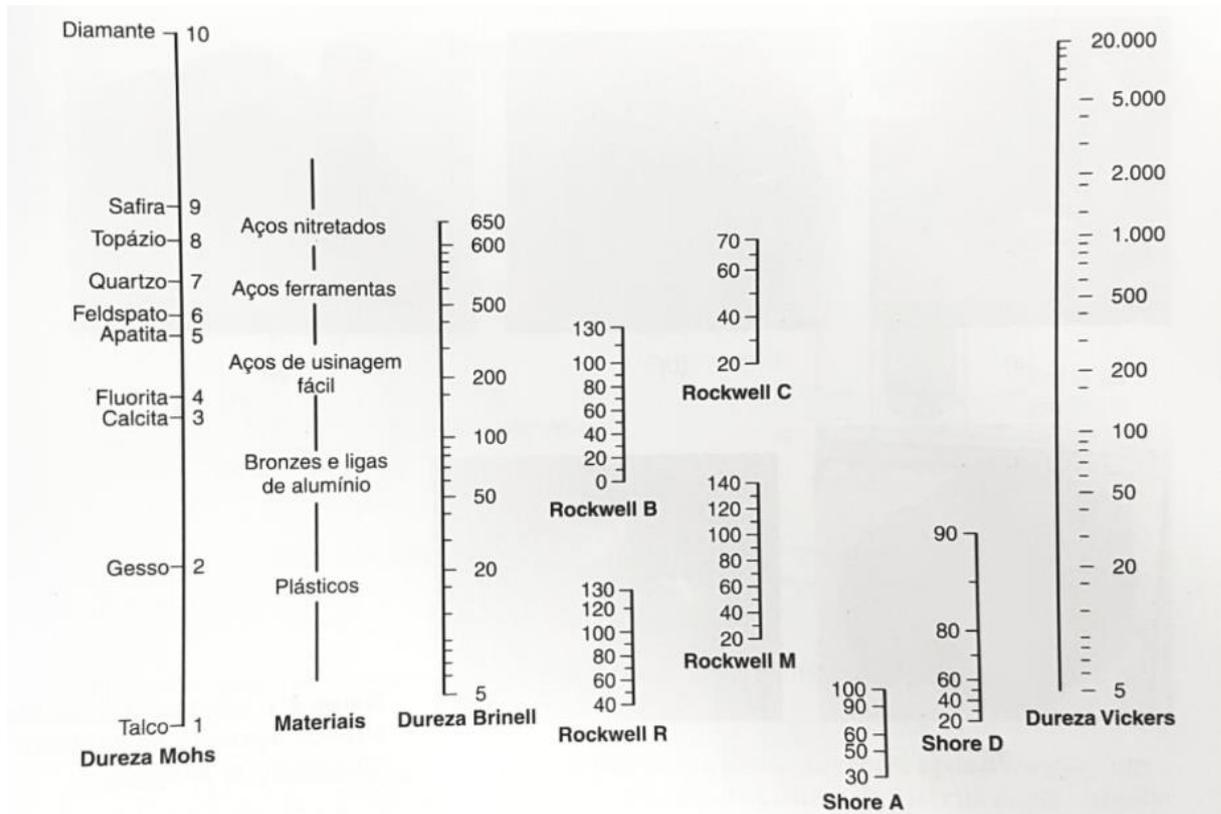
Os métodos de verificação da dureza mais conhecidos e utilizados são por Risco, Rebote e Penetração. O método por Risco consiste na utilização de minerais com durezas diferentes para projetar riscos sobre a superfície de uma peça, neste caso o silicato de magnésio é o material menos duro e o diamante é o material mais duro.

O método de rebote consiste na impressão causada pela queda livre de um material com peso e dimensões conhecidas. Sua ponta é padronizada e produzida por diamante. A análise deste método se dá pela impressão causada na peça, quanto maior a impressão, mais dúctil é o material.

O método por Penetração exige equipamentos mais modernos, e por isso possuem maior precisão de medição. Dentre os ensaios de dureza por penetração mais conhecidos, estão a dureza Brinell (HB), Rockwell (HR) e Vickers (HV).

Cada tipo de escala atende uma respectiva faixa de medição própria. A aplicação de cada método depende da dureza média que o material deve atingir, conforme exemplificado na Figura 12.

Figura 12 – Escalas comparativas dos valores para vários métodos de durezas e aplicações recomendáveis para diversos materiais



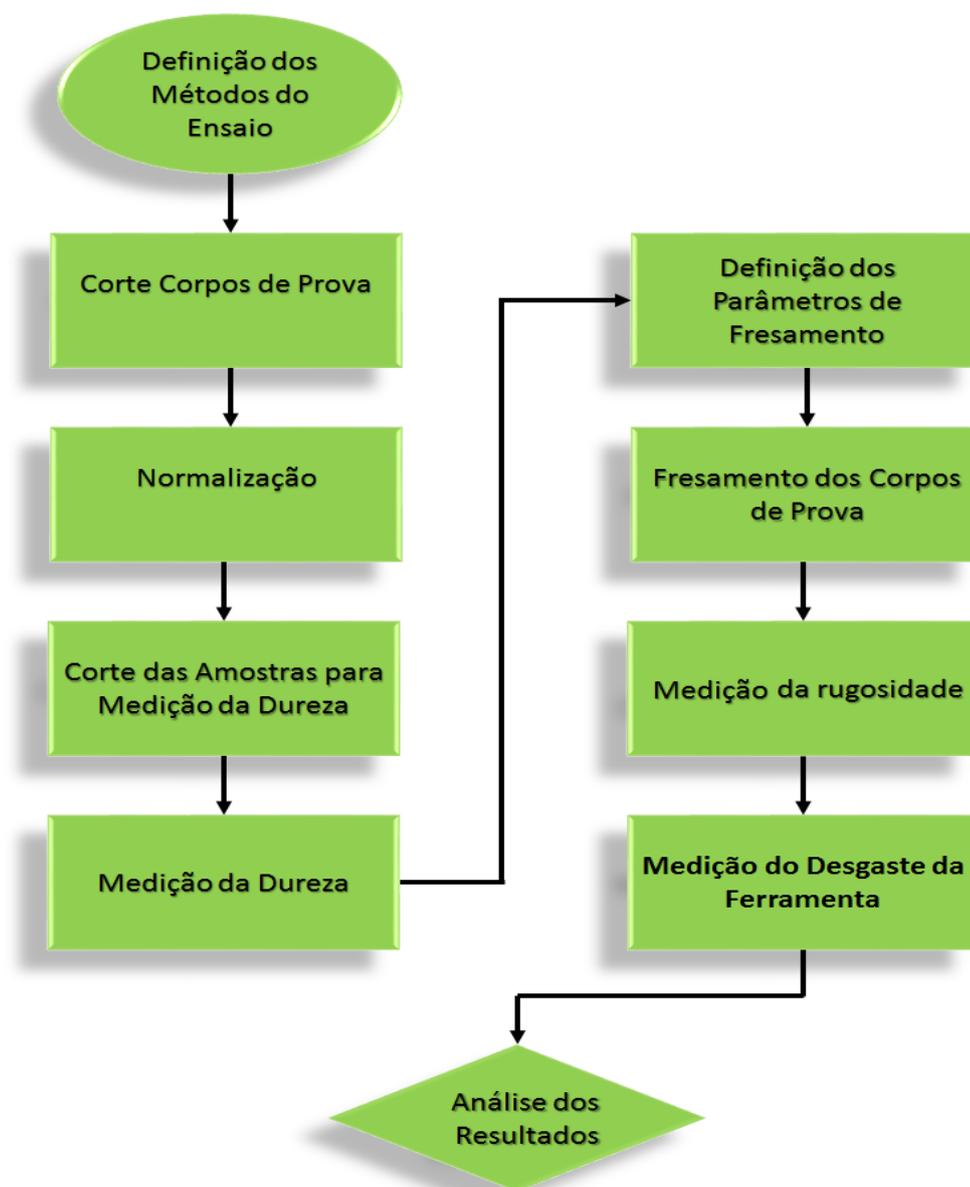
Fonte: Garcia, Spim e Santos (2013)

Os penetradores usados em cada escala de medição variam de acordo com a necessidade de medição, entre os mais conhecidos estão os de ponta esférica (com diferentes possíveis diâmetros), os de diamante e os de pirâmide de diamante. As cargas e as pré-cargas também variam de acordo com as medições de cada material e equipamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia utilizados na produção dos corpos de prova, no tratamento térmico aplicado, na medição da dureza dos corpos de prova, nas definições sobre os parâmetros de fresamento utilizados, na execução do fresamento das faces cortadas a plasma, verificação do desgaste dos insertos e comparação dos custos de fresamento. O sequenciamento da metodologia foi executado de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma do desenvolvimento



Fonte: O autor (2019)

O sequenciamento apresentado no fluxograma permite atingir do objetivo principal que é a verificação da necessidade da normalização para tornar possível o fresamento de superfícies cortadas a plasma em aço ABNT 1045.

3.1 Material

Os corpos de prova foram fabricados em aço ABNT 1045 com as dimensões de 400mm de comprimento, 50mm de largura e 12,7mm de espessura. Para este trabalho foi padronizado de 20 amostras com as mesmas dimensões e mesmo material.

O processo utilizado para corte dos corpos de prova foi o corte a plasma. Este processo foi executado por uma empresa metalmeccânica da região de Jaraguá do Sul. Esta empresa não visou lucro na venda do material por se tratar de um trabalho acadêmico científico.

3.2 Processo de normalização

Metade dos corpos de prova (10 unidades) passaram pelo processo de normalização. Para este processo, os corpos de prova foram pré-aquecidos no forno a uma temperatura de 450°C, por um tempo de aproximadamente 40min. Após o pré-aquecimento, a temperatura foi elevada entre 820°C e 870°C por 30min para normalização. O método de resfriamento utilizado foi o ar.

A normalização dos corpos de prova foi executada em uma empresa especializada em tratamentos térmicos situada na região de Jaraguá do Sul.

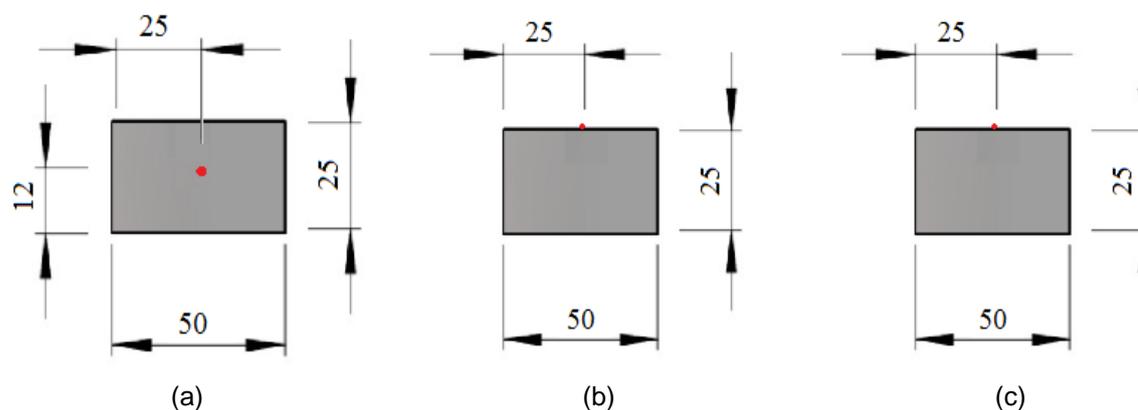
3.3 Ensaio de dureza

Após o processo de normalização, foi retirado uma amostra de 25x50x12,7mm de um dos corpos de prova normalizados e outra amostra de um dos corpos de prova sem normalização. Estas duas amostras foram submetidas ao ensaio dureza HRb no laboratório de ensaios de materiais do Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC, Campus Jaraguá do Sul - RAU.

Foi realizado 3 ensaios de dureza, em 2 pontos diferentes para o material não normalizado e em um ponto para o material normalizado. O primeiro ensaio de

dureza foi em uma superfície não afetada pelo corte a plasma, sendo este no corpo de prova que não passou por normalização, este ensaio ocorreu a 12mm da região cortada a plasma conforme representando na Figura 14a. O segundo ensaio ocorreu na superfície cortada a plasma que não passou por normalização, Figura 14b. O terceiro, na superfície cortada a plasma do corpo de prova normalizado, Figura 14c.

Figura 14 – Locais para medição da dureza



Fonte: O autor (2019)

Foram executadas 5 medições de dureza para cada superfície para obter o cálculo da dureza média.

A dureza Rockwell “C” (HRc) não foi utilizada neste ensaio pois devido à baixa dureza do material analisado, não seria possível obter resultados com a mesma precisão da Rockwell “B” (HRb).

O Durômetro utilizado para medição da dureza foi o modelo EQTRB-250, marca Equilam, conforme Figura 15. A escala utilizada foi a Rockwell “B” (HRb), observada na escala vermelha do comparador analógico. O penetrador usado foi o de esfera $\varnothing 1/16$ ”, com pré-carga de 10Kgf, e carga de ensaio de 100Kgf.

Figura 15 – Durômetro EQTRB-250



Fonte: O autor (2019)

3.4 Ensaio de usinagem

Para a realização dos ensaios de usinagem foi utilizado o processo de fresamento de topo em um centro de usinagem CNC ROMI D600 FANUC, com 15 Kw de potência e rotação de 7500 RPM conforme Figura 16. Este ensaio de fresamento ocorreu no laboratório de usinagem CNC do Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC, Campus Jaraguá do Sul - RAU.

Figura 16 – CNC Romi D600 Fanuc



Fonte: Manual ROMI (2019)

Todos corpos de prova foram fixados na mesa da máquina por duas morsas hidráulicas do modelo Vertex VH-5, com capacidade de 3500Kgf conforme Figura 17. Este método de fixação com duas morsas foi implementado para minimizar os efeitos da vibração do corpo de prova.

Figura 17 – Método de fixação do corpo de prova



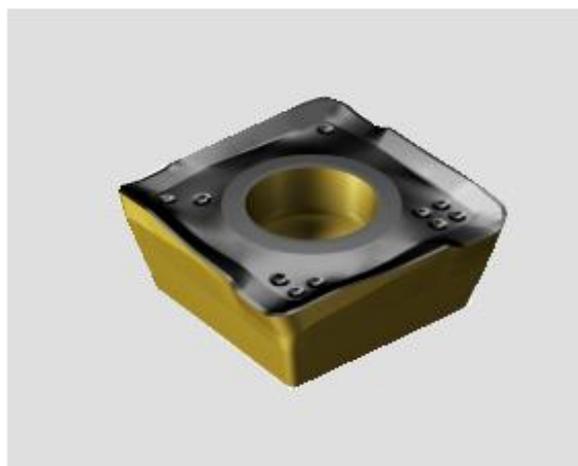
Fonte: O autor (2019)

O cabeçote de fresamento utilizado foi de diâmetro $\varnothing 25\text{mm}$ (Dc), fixado por cone ISSO conforme Figura 18a. Na fresa foram utilizados 3 insertos de metal duro classe PM4220, revestidos com $\text{TICN}+\text{AL}_2\text{O}_3+\text{TIN}$ por CVD, com código ISO P 490R-08T312 Sandvik GC4220. O comprimento da aresta alisadora é de 0,85 mm, comprimento efetivo da aresta de corte de 5,6 mm e raio de corte 1,2 mm do fabricante Sandvik, conforme Figura 18b.

Figura 18 – Cabeçote utilizado (a) Inseto Metal duro ISO 490R-08T312M-PM 4220 (b)



(a)



(b)

Fonte: O autor (2019) / Sandvik (2019)

Como o interesse deste trabalho é verificar a necessidade da normalização para usinagem dos corpos de prova cortados a plasma em aço ABNT 1045, foi definido que a usinagem seria de 2mm em cada face em que o corte ocorreu no corpo de prova. Estes 2mm foram removidos em 2 passes de 1mm cada, sendo o primeiro passe no sentido concordante (avanço) e o segundo passe no sentido discordante (retorno).

Para todo o experimento foi mantido o mesmo método de fixação da peça, o mesmo tipo de inserto de corte, o mesmo sentido de corte (concordante no avanço e discordante no retorno). Em todos os casos, a usinagem foi executada sem a utilização de refrigerante de corte.

O experimento foi executado em 3 etapas conforme demonstrado na Tabela 5:

Tabela 5 – Parâmetros de usinagem dos corpos de prova

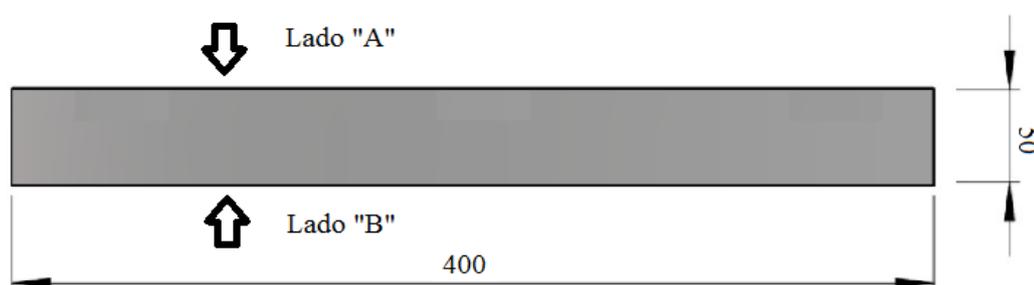
Parâmetro	Ensaio 1: Normalizado	Ensaio 2: Não normalizado	Ensaio 3: Não normalizado
Velocidade de corte	385m/min	385m/min	365m/min
Rotação	4904 RPM	4904 RPM	4650 RPM
Avanço por dente (fz)	0,14 mm/dente	0,14 mm/dente	0,08 mm/dente
Profundidade axial de corte (ap)	1mm	1mm	1mm
Largura de corte	12,7mm	12,7mm	12,7mm
Passes sentido concordante	18	9	9
Passes sentido discordante	18	9	9
Número de passes total	36	18	18

Fonte: O autor (2019)

A primeira coluna da Tabela 5 mostra os parâmetros utilizados para o fresamento do corpo de prova que passou pelo corte a plasma e normalização (Ensaio 1). Neste caso, foi executado 36 passes de 1mm, sendo 18 passes no lado “A” e 18 passes no lado “B”.

A segunda e a terceira coluna (Ensaio 2 e 3), mostra os parâmetros utilizados para fresamento do corpo de prova que passou pelo processo corte a plasma, e que não foi normalizado. Para o Ensaio 2 foi executado 18 passes de 1mm no lado “A” do corpo de prova. Para o Ensaio 3 foi executado 18 passes de 1mm no lado “B” do corpo de prova, conforme exemplificado no Figura 19.

Figura 19 – Locais do fresamento



Fonte: O autor (2019)

Os parâmetros de usinagem utilizados nos Ensaios 1 e 2 foram os mesmos, já no Ensaio 3 foi reduzido a velocidade de corte de 385m/min para 365m/min, a rotação de 4920 RPM para 4650 RPM, e o avanço de 0,14 mm/dente para

0,08mm/dente (valor mínimo recomendado pelo fabricante) com a finalidade de melhorar as condições de usinagem.

3.5 Ensaio de Rugosidade

Para medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro digital portátil modelo TR-220 marca TIME, com resolução do display de $0,01\mu\text{m}$, precisão de $\pm 10\%$, escala de medição de $0,025$ à $12,5\mu\text{m}$, conforme Figura 20. Foi utilizado o comprimento de medição *cut-off* de $0,8\text{mm}$ para obtenção da Rugosidade Média (R_a).

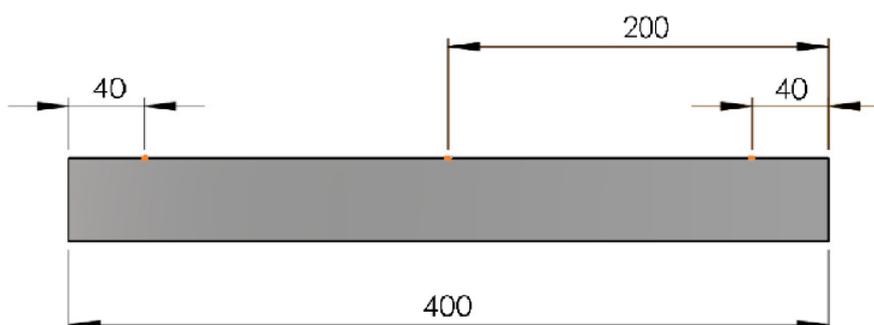
Figura 20 – Rugosímetro digital portátil modelo TR-220 marca TIME.



Fonte: Homis do Brasil (2019)

A rugosidade média (R_a) foi medida em 3 pontos do corpo de prova conforme demonstrado na Figura 21. A média destas 3 medições foi utilizada para análise dos resultados. Cada medição foi executada após 2 passes (1 concordante e 1 discordante).

Figura 21 – Posicionamento das medições da rugosidade Média (R_a)



Fonte: O autor (2019)

3.5 Medição do desgaste do inserto

A realização da medição do desgaste dos insertos foi executada com o Microscópio Carl Zeiss™ Stemi 2000-C Stereo Microscop, equipado com a câmera AxioCam ERc 5s conforme Figura 22. Este microscópio destinado ao exame de pares de fotografias ou imagens vistas de pontos diferentes resultando numa impressão mental de uma visão tridimensional. Na sua construção são utilizados espelhos, lentes e prismas.

Figura 22 – Zeiss™ Stemi 2000-C Stereo Microscop.



Fonte: Eing (2018)

A utilização deste aparelho, para medição dos desgastes dos insertos, ocorreu no laboratório de usinagem do Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC, Campus Jaraguá do Sul - RAU.

3.6 Análise dos custos

Para realização da análise dos custos entre os ensaios, foram coletadas informações relacionadas ao tempo de usinagem, tempo de entrada e saída da

ferramenta, tempo de troca de insertos, tempo de troca dos corpos de prova durante o ensaio.

Outros dados como o custo do processo de normalização, custo da hora de fresamento de peças de baixa complexidade e custos dos insertos foram coletados por meio de pesquisa em fornecedores de Jaraguá do Sul/SC.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com este experimento foi possível extrair a dureza da superfície que passou por corte a plasma (com e sem processo de normalização), analisar o acabamento superficial gerado pela usinagem, verificar o desgaste de flanco gerado na ferramenta de corte, e comparar os custos empenhados para cada processo de fresamento com e sem normalização.

4.1 Análise da dureza

No ensaio de dureza Rockwell “B” (HRb), as medições da dureza na superfície do corte a plasma sem normalização apresentaram resultados superiores aos valores encontrados na superfície com corte a plasma e normalização. Na superfície sem corte (natural) se obteve valores intermediários as outras duas condições, conforme apresentado na Tabela 6.

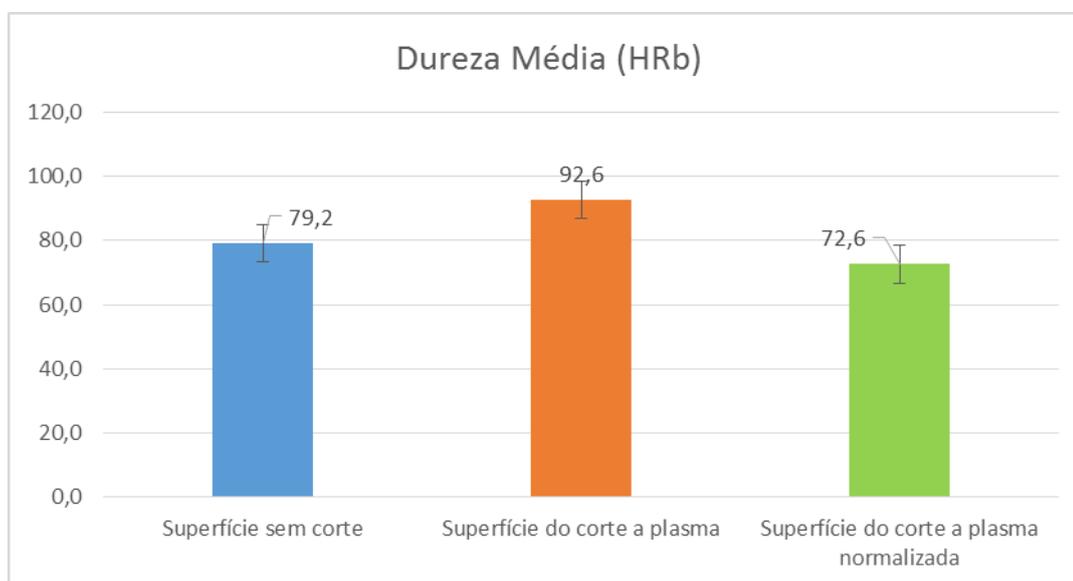
Tabela 6 – Tabela ensaio de Dureza HRb

Dureza HRb	Superfície sem corte a plasma – não normalizada	Superfície do corte a plasma – não normalizada	Superfície do corte a plasma normalizada
Resultado 1	77	91	74
Resultado 2	84	90	78
Resultado 3	80	92	65
Resultado 4	79	92	67
Resultado 5	78	98	79
Média	79,2	92,6	72,6

Fonte: O autor (2019)

Esta diferença pode ser melhor visualizada pelo cálculo da média dos resultados obtidos em cada superfície. Conforme Figura 23, a dureza média encontrada na superfície sem corte foi de 79,2HRb, para a superfície cortada a plasma este valor foi de 92,6HRb e para a superfície da amostra cortada a plasma e normalizada o valor foi de 72,6HRb.

Figura 23 – Diferença média de dureza HRb entre as amostras



Fonte: O autor (2019)

Estes resultados demonstram que o aço ABNT 1045, quando submetido ao corte a plasma, sofre alteração da dureza superficial. Esta alteração é causada pela zona afetada pelo calor (ZAC) seguido de resfriamento rápido. Neste ensaio, a dureza média passou de 79,2HRb para 92,6HRb após o corte a plasma, o qual representa um aumento médio de dureza de aproximadamente 17%.

Este resultado comprova parte da explicação de Pimenta (2013, p. 40) que “a microestrutura do metal que sofre o corte térmico sofre alteração de estrutura com desenvolvimento de microtrincas, endurecimento do material e formação de escória”.

Se comparado a dureza entre a superfície que passou por corte a plasma e normalização (72,6HRb) e a superfície que passou apenas pelo corte a plasma (92,6HRb), estes resultados demonstram uma redução da dureza de aproximadamente 22%, comprovando o alívio de dureza obtido pela normalização.

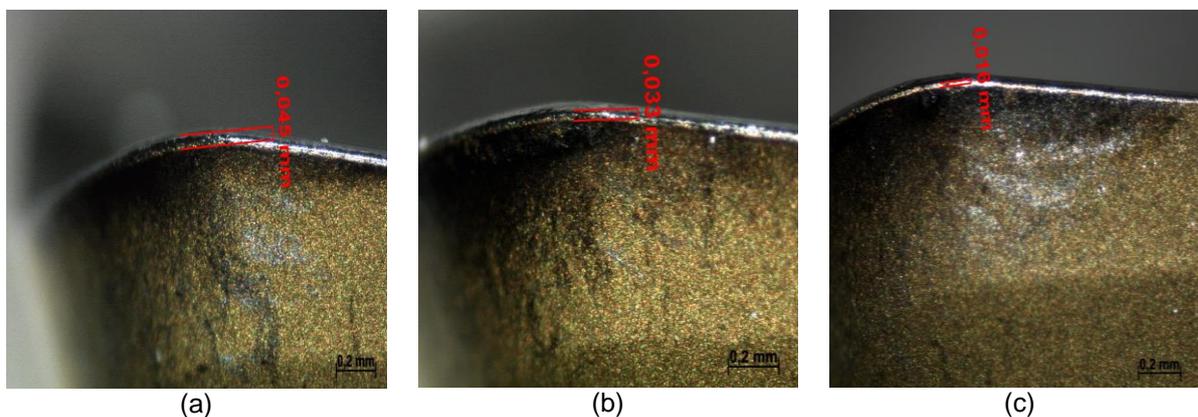
Ao comparar a dureza da superfície sem corte (79,2HRb) com a superfície cortada a plasma e normalizada (72,6HRb), também percebemos a diminuição da dureza de aproximadamente 9%.

4.2 Avaliação do desgaste da ferramenta

No processo de fresamento da superfície cortada a plasma dos corpos de

prova normalizados (Ensaio 1), os insertos de corte apresentaram pouco desgaste. O maior desgaste de flanco encontrado foi de 0,045mm conforme Figura 24, com um tempo efetivo de usinagem de 7min.

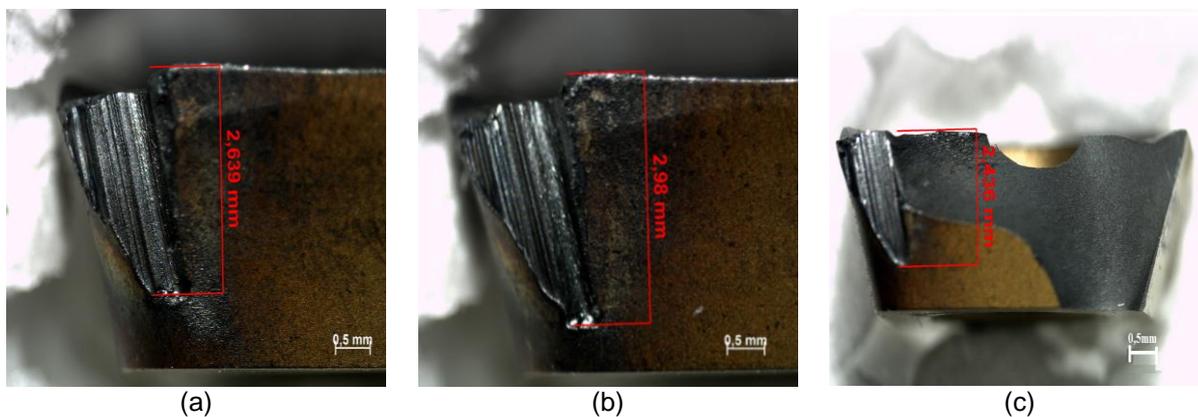
Figura 24 – Desgaste de flanco insertos do Ensaio 1.



Fonte: O autor (2019)

Para o processo de fresamento da superfície cortada a plasma dos corpos de prova que não passaram por normalização (Ensaio 2), os resultados de desgaste de flanco foram visualmente superiores aos encontrados no Ensaio 1. De acordo com as especificações citadas por Santos e Sales (2007) com base na norma ISO 3685, 2 dos 3 insertos apresentaram desgaste de flanco superiores ao máximo recomendado, $VB_{Bmax} = 0,6\text{mm}$; O terceiro inserto também apresentou desgaste de flanco superior ao indicado por norma, seguido ainda de falha catastrófica por quebra. Estes resultados podem ser verificados na Figura 25.

Figura 25 – Desgaste de flanco insertos do Ensaio 2.



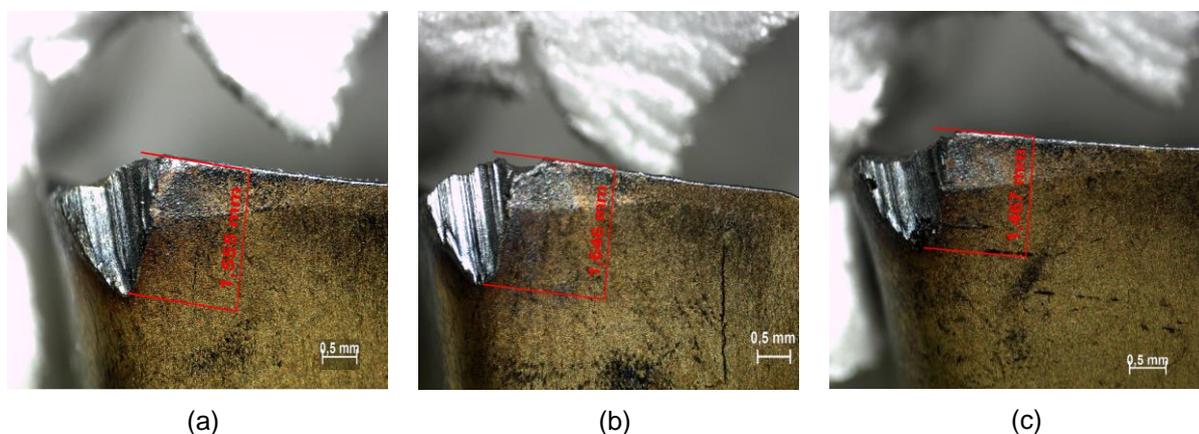
Fonte: O autor (2019)

O tempo efetivo de fresamento aplicado para o Ensaio 2 foi de apenas 3,5min, metade do tempo de fresamento aplicado no Ensaio 1. Por este resultado foi possível perceber que mantendo os mesmos parâmetros de corte não seria possível executar o mesmo tempo de usinagem para o corpo de prova sem normalização. O principal fator apontado como responsável pelo alto desgaste e falha catastrófica no ensaio 2 é o endurecimento superficial causado pelo plasma.

Para os corpos de prova com fresamento na superfície cortada a plasma e não normalizados (Ensaio 3), com redução na velocidade de corte, rotação e avanço de corte (para 0,08mm - medida mínima recomendado pelo fabricante do inserto), os resultados do desgaste de flanco foram inferiores aos apresentados no Ensaio 2. Entretanto, foram muito elevados para se enquadrar dentro dos parâmetros recomendáveis pela ISO 3685.

Dentre os 3 insertos utilizados no Ensaio 3, o menor desgaste de flanco encontrado foi de 1,467mm conforme demonstrado na Figura 26 (c), após 3,5 minutos de usinagem efetiva.

Figura 26 – Desgaste de flanco insertos do Ensaio 3.



Fonte: O autor (2019)

Convém ressaltar que, foi realizado 18 passes de 1mm para os Ensaios 2 e 3, enquanto para o Ensaio 1 foi realizado 36 passes. Mesmo com a redução de 50% dos passes, não foi possível atingir um desgaste de flanco adequado ao máximo recomendado pela norma ISO 3685 para os dois últimos ensaios.

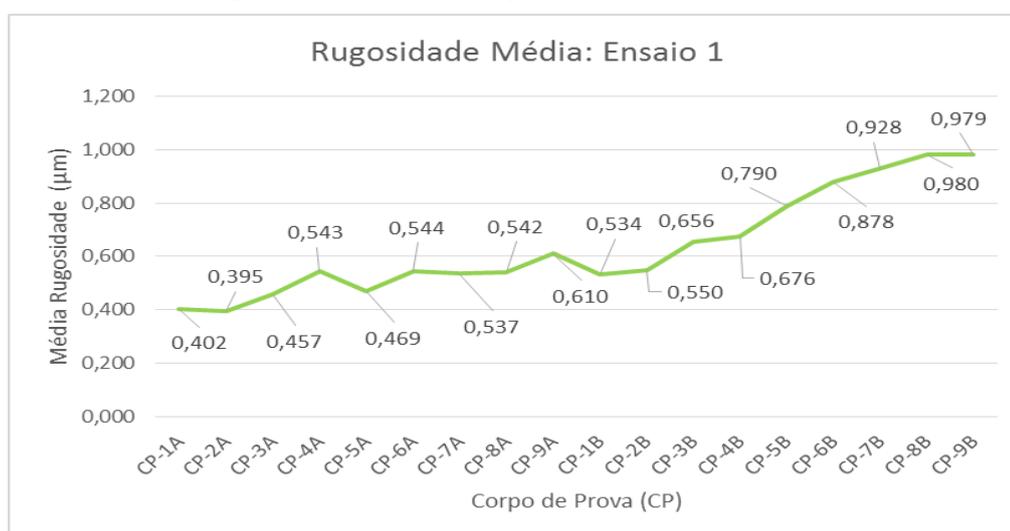
Conforme Santos e Sales (2007) a avaliação da vida útil da ferramenta também está relacionada a outros fatores além do desgaste de flanco, dentre eles, o acabamento superficial da peça.

4.3 Medição da Rugosidade média (Ra)

No que diz respeito ao acabamento superficial, foi possível verificar a diferença do comportamento da rugosidade média (Ra) dos corpos de prova que passaram por normalização em relação aos corpos de prova que não passaram por normalização.

No Ensaio 1 foi utilizado o corpo de prova cortado a plasma e normalizado. Obteve-se um gráfico de rugosidade média em forma ascendente do início ao fim dos 38 passes. Neste ensaio foram extraídas 18 medidas de rugosidade média, conforme Figura 27.

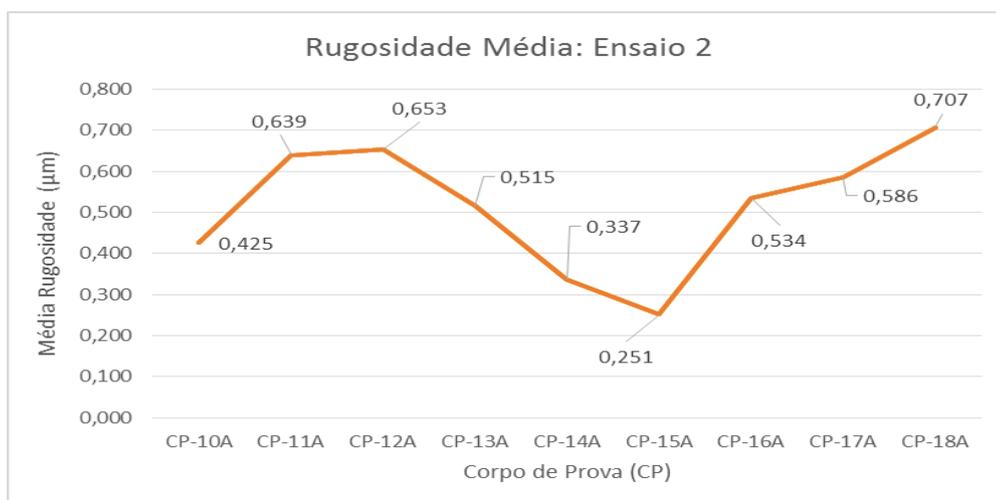
Figura 27 – Gráfico da rugosidade média – Ensaio 1



Fonte: O autor (2019)

No Ensaio 2 foi utilizado o corpo de prova cortado a plasma, sem o processo de normalização. Todos os parâmetros de usinagem do Ensaio 1 foram mantidos no Ensaio 2. Neste caso, obteve-se um gráfico de rugosidade média em forma ascendente para as medições de CP-10A até CP-12A, descendente até CP-15A e ascendente até CP-15A, conforme Figura 28.

Figura 28 – Gráfico da rugosidade média – Ensaio 2

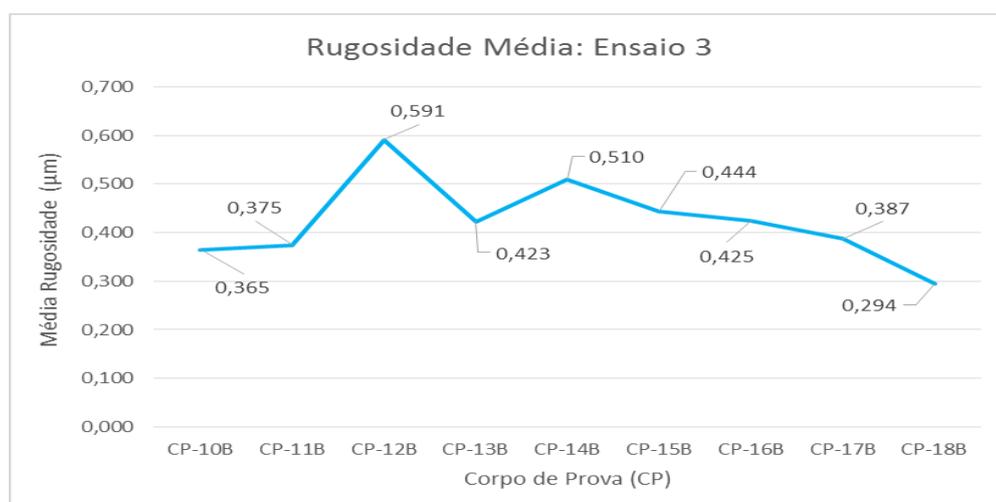


Fonte: O autor (2019)

No ensaio 2, foram extraídas 9 medidas de rugosidade média. Não foi possível dar andamento a extração das demais medidas devido a falha catastrófica apresentada em um dos insertos. No momento da quebra a superfície atingiu a maior rugosidade média.

Para o ensaio 3, também foi utilizado o corpo de prova cortado a plasma, sem o processo de normalização. Neste caso, obteve-se um gráfico de rugosidade média em forma ascendente para as medições de CP-10B ao CP-12B e descendente até CP-18B, conforme Figura 29.

Figura 29 – Gráfico da rugosidade média – Ensaio 3

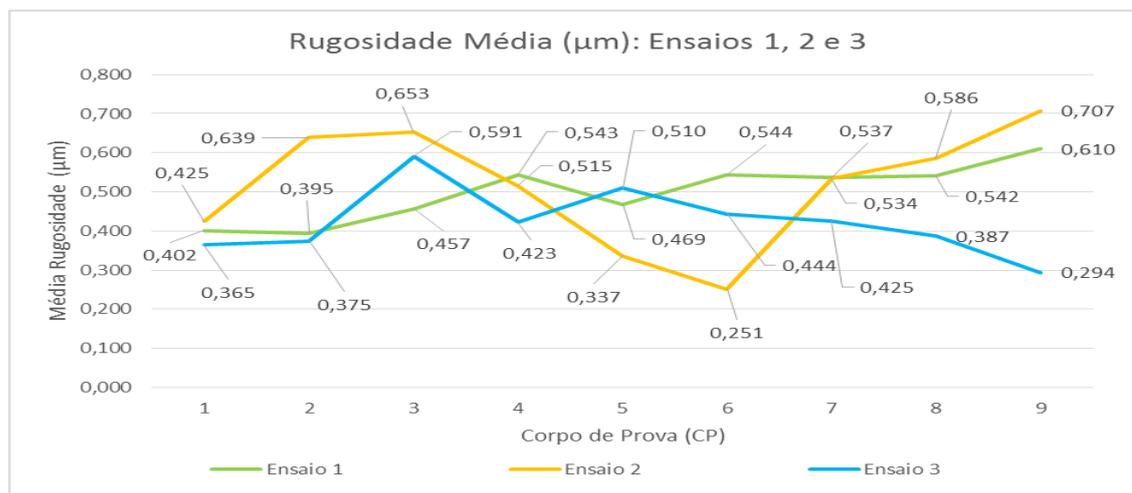


Fonte: O autor (2019)

No Ensaio 3, nota-se que os valores obtidos da rugosidade medida são,

quase em sua totalidade, inferiores ao Ensaio 2. Também pode-se perceber que a rugosidade média obtida no ensaio 3 foi em vários pontos inferiores as encontradas no Ensaio 1, conforme demonstrado na figura 30.

Figura 30 – Comparação rugosidade média entre os ensaios 1, 2 e 3



Fonte: O autor (2019)

A rugosidade normalmente apresenta uma tendência a ser ascendente nos primeiros passes, e depois de um certo número de passes, passa a ser descendente, para os Ensaios 2 e 3 esta característica fica evidenciada. Para o Ensaio 1, devido ao pouco desgaste de flanco atingido, esta característica não pode ser observada até a usinagem do corpo de prova 9 (CP-9), o que significa que continuaria apresentando valores ascendentes de rugosidade por mais alguns passes, e depois apresentaria valores descendentes.

O Ensaio 2 apresentou os maiores índices de rugosidade entre os 3 Ensaios, assim como, as maiores oscilações de rugosidade entre uma medição e outra, além do fator de avaria por falha catastrófica. Estes resultados obtidos indicam a inviabilidade da utilização deste processo.

De acordo com a teoria de Santos e Sales (2007), para o Ensaio 3, mesmo com os índices de desgaste de flanco superiores aos indicados por norma, os corpos de prova apresentaram baixas taxas de rugosidade média, tornando assim o ensaio 3 viável, segundo este critério.

4.4 Avaliação dos custos de usinagem

Apesar da redução dos parâmetros de corte do Ensaio 3 terem causado a diminuição da rugosidade, diminuição da oscilação entre os valores de rugosidade e da diminuição do desgaste de flanco dos insertos, estes ajustes de parâmetros causaram o aumento do tempo de usinagem.

O tempo efetivo de usinagem passou de 11,8s/passe para 21,7s/passe. Esta mudança de parâmetros representou um aumento no tempo de usinagem de aproximadamente 84%, o qual acarreta em um processo mais moroso se for considerado apenas este fator.

Com a finalidade de comparar o custo de produção entre o Ensaio 1 e 3, foi definido que os insertos do Ensaio 1 seriam substituídos a cada 30min (1.800s) de fresamento. Este método foi adotado pois estes insertos não apresentaram desgaste de flanco superior 0,045mm mesmo após 7,08min de fresamento.

No Ensaio 3 o maior desgaste de flanco foi de 1,646mm, porém manteve baixos índices de rugosidade média. Para cálculo do custo, foi considerado que o número de operações possíveis nestas condições é 9 por jogo de insertos, correspondente a 431s de usinagem, assim como executado no Ensaio 3.

Com essas definições, obtivemos um número de 76 repetições no Ensaio 1 e 9 repetições possíveis no Ensaio 3 sem a necessidade da troca de insertos, conforme demonstrado na tabela 7.

Tabela 7 – Número de operações por jogo de insertos

Dados	Ensaio 1	Ensaio 3
Tempo de corte possível para a condição (s)	1800s	391s
Tempo de corte 2 passes (concordante + discordante)	23,6s	43,4s
Números de operações possíveis	76	9

Fonte: O autor (2019)

Para poder comprar os custos totais de fresamento foi definido um lote de 152 peças para execução nos mesmos parâmetros apresentados no Ensaio 1 e 3. Estes custos correspondem ao custo do tempo de usinagem, custo dos insertos e custo da normalização conforme demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Custo de produção Ensaio 1 e 3

Custo para produção de 152 peças	Ensaio 1	Ensaio 3
Tempo de fresamento efetivo (s) total:	3587 s	6597 s
Número de troca de insertos	2	17
Tempo troca de insertos (1 jogo):	90 s	90 s
Tempo de troca dos insertos total (s):	180 s	1520 s
Tempo programação e ajuste máquina total	3600 s	3600 s
Tempo troca de corpos de prova total	7600 s	7600 s
Tempo entrada e saída da ferramenta total	1824 s	1824 s
Preço da hora de Fresamento CNC	R\$ 100,00	R\$ 100,00
Tempo necessário total (h)	4,66	5,87
Preço total usinagem (R\$)	R\$ 466,42	R\$ 587,24
Custo jogo de aresta de corte do inserto (R\$)	R\$ 39,00	R\$ 39,00
Número de troca de insertos	2	17
Preço insertos total (R\$)	R\$ 78,00	R\$ 658,67
Custo da normalização (R\$)	R\$ 936,00	R\$ 0,00
Custo total	R\$ 1480,42	R\$ 1245,91

Fonte: O autor (2019)

Os dois fatores que influenciam diretamente no cálculo do tempo empregado para esta usinagem são: o tempo de fresamento efetivo e o tempo de troca dos insertos. A soma destes valores promove uma diferença de 3.767s para 8.117s, ou seja, há um aumento aproximado 220% no tempo de execução.

Os tempos de programação e ajuste da máquina, tempo troca de corpos de prova e o tempo entrada e saída da ferramenta são os mesmos para os dois ensaios, desta forma, não causam impacto na somatória dos custos.

O tempo total necessário para realizar esta operação nas condições do Ensaio 1 é de 4,66h, enquanto o tempo para realizar o Ensaio 3 é de 5,87h, esta diferença corresponde a um aumento de 25% no tempo total. Se calculado a um preço médio de R\$ 100,00/h obtemos um preço total de usinagem de R\$ 466,42 para o Ensaio 1 e R\$ 587,24 para o Ensaio 3.

O custo médio encontrado para o Inseto Metal duro ISO 490R-08T312M-PM

4220 Sandvik foi de R\$ 52,00 por unidade. Cada Inserto possui 4 faces cortantes, e a ferramenta utilizou 3 insertos na ferramenta. Desta forma encontramos o custo do jogo de aresta de corte do inserto cálculo $(R\$ 52,00/4)*3 = R\$ 39,00$.

Nas condições propostas, o custo total com os insertos foi de R\$ 78,00 para o Ensaio 1 (com 2 trocas de inserto) e de R\$ 658,67 para o Ensaio 3 (com 17 trocas de inserto).

O preço médio da normalização é de R\$ 4,11/Kg. Cada peça possui 1,5kg, totalizando 228kg. Neste caso o custo total da normalização foi de R\$ 936,00. Como a normalização foi aplicada apenas ao Ensaio 1 este valor foi somado apenas a este ensaio.

Na somatória dos custos empregados para esta operação temos um custo total de R\$ 1.480,42 para realização do fresamento da peça normalizada (correspondente ao Ensaio 1) e de R\$ 1.245,91 para realização do fresamento da peça não normalizada (correspondente ao ensaio 3).

Mesmo com o maior tempo de usinagem total e maior desgaste de flanco do inserto, o Ensaio 3 apresentou os menores custos de fabricação. Entretanto, vale ressaltar que não foram considerados os fatores como tempo de *lead time* (tempo de processamento) em função da operação de normalização. Também não foi considerado o tempo de ocupação da máquina para fresamento CNC.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios realizados mostraram que o processo de corte a plasma gera o endurecimento superficial das peças produzidas em aço ABNT 1045. A utilização da normalização, antes do fresamento, não é indispensável, porém, deve-se levar em consideração fatores como a disponibilidade de insertos de corte, disponibilidade de tempo para usinagem e recursos financeiros que se deseja aplicar.

Este trabalho apresentou um estudo sobre o efeito da normalização no fresamento de superfícies cortadas a plasma em aço ABNT 1045. A metodologia empregada deste estudo poderá ser utilizada para analisar outros materiais e outras ferramentas de corte.

5.1 Conclusão

Neste estudo foram levados em consideração fatores como o endurecimento da superfície cortada a plasma, a rugosidade após o fresamento, o desgaste de flanco dos insertos, os custos com o tempo de usinagem e com a normalização. Dentre os pontos mais relevantes para conclusão estão:

- a) O corte a plasma ocasionou o endurecimento superficial na região do corte de aproximadamente 17%;
- b) Após o processo de normalização, a superfície inicialmente endurecida obteve redução média de 22% na dureza;
- c) O desgaste de flanco resultante do fresamento dos corpos de prova que passaram por normalização (Ensaio 1) foi mais baixo se comparados aos demais ensaios;
- d) O Ensaio 2, com corpo de prova sem normalização, obteve o pior desgaste de flanco dentre os ensaios, seguido de avaria de quebra catastrófica de 1 dos 3 insertos. Esta avaria indica que estes parâmetros não são recomendados para peças que sofrem endurecimento pela ação do corte a plasma;
- e) O Ensaio 3, com corpo de prova sem normalização e parâmetros de usinagem reduzidos, apresentou menores índices de desgaste de flanco no inserto se comparados ao Ensaio 2.
- f) Com parâmetros de corte reduzidos e corpos de prova não normalizados, o Ensaio 3 foi o que apresentou os menores valores de rugosidade média.

- g) Dentre os 3 ensaios, a pior rugosidade média encontrada foi para o Ensaio 2, (corpo de prova que apresentou avaria de quebra catastrófica);
- h) O tempo efetivo de fresamento dos corpos de prova que não passaram por normalização (Ensaio 3) é aproximadamente 84% maior que do que o tempo de fresamento efetivo do material normalizado (Ensaio 1);
- i) O corpo de prova sem normalização (Ensaio 3) necessita de mais troca de insertos para usinagem que o corpo de prova com normalização (Ensaio 1)
- j) Mesmo com maior tempo de usinagem total e maior necessidade da troca de insertos devido desgaste de flanco da ferramenta, o Ensaio 3 apresentou o menor custo de fabricação que o custo do Ensaio 1.

Com base neste estudo, conclui-se que a normalização não é necessária para tornar possível o fresamento de superfícies cortadas a plasma em aço ABNT 1045. O fresamento pode ser executado desde que seja utilizado parâmetros de corte reduzidos conforme Ensaio 3. Entre as vantagens do fresamento sem a normalização, destaca-se o menor custo total empregado e o alcance de baixos valores de rugosidade média quando trabalhados com parâmetros de corte reduzidos. As desvantagens deste processo sem a normalização é o maior número de troca de insertos pelo desgaste, o maior tempo necessário de usinagem e o maior tempo de ocupação da máquina CNC.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A partir dos resultados e conclusões deste trabalho, fica como sugestão para trabalhos futuros:

- a) Aplicar a mesma metodologia para verificar a necessidade de normalização utilizando diferentes tipos de ferramentas/insertos;
- b) Refazer o estudo para diferentes parâmetros de corte;
- c) Aplicar a metodologia em diferentes materiais.

REFERÊNCIAS

Aço Especial. **Aço SAE 1045 e Suas Propriedades**. Disponível em: <<https://www.acoespecial.com.br/aco-sae-1045-propriedades.php>>. Acesso em: 21 out. 2019.

COPPINI, Nilvaldo Lemos. **Usinagem Enxuta: gestão do processo**. São Paulo. Artliber Editora, 2015. 134p.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8.ed. São Paulo: Artliber, 2013. 270p.

EING, Guilherme Souza. **Análise da Influência da Geometria da Ferramenta e dos Parâmetros de Corte no Acabamento Superficial da Resina Polimérica Necuron 620**. 2018. 39 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia da Fabricação Mecânica, Instituto Federal de Santa Catarina - Campus Rau, Jaraguá do Sul, 2018.

FERRARESI, D. **Fundamento da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 754 p.

GARCIA, Amauri. SPIM, Jaime Alvares. SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: Editora Grupo GEN, 2013. 365p.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, processes, and systems**. New Jersey: Ed. John Wiley & Sons. 2002

Homis do Brasil. **Rugosímetro Digital Portátil - TR-220 - TIME**. Disponível em: <<https://www.homis.com.br/rugosímetros/rugosímetro-digital-portátil-tr-220-time-homis-rugosidade-ra-rz-ry-rq-rt-rp-rmax-rv-r3z-rs-rsm-rsk-rmr-rpc-rk-rpk-rvk-mr1-mr2>>. Acesso em: 21 out. 2019.

INDÚSTRIA HOJE; HOJE, Redação Indústria. **Processo de Corte a Plasma**. 2013. Disponível em: <<https://industria hoje.com.br/processo-de-corte-a-plasma>>. Acesso em: 21 out. 2019.

KIMINAMI, Claudio Shyinti. CASTRO, Walman Benício de. OLIVEIRA, Marcelo Falcão de. **Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos** 5.ed. São Paulo. 2013. 325p.

MACHADO, et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**; 1.ed. São Paulo: BUCHER. 2009. 371p.

PIMENTA, Salvador Walter. **Estudo Comparativo Entre os Processos de Corte Plasma e Jato D'água para chapa de Aço Inoxidável de 1" Utilizado na Construção de Máquinas Especiais**. 2013 49 f. TCC (Pós Graduação) - Engenharia de Soldagem, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP. 2013.

ROMI (Comp.). **Centros de Usinagem Verticais**. Catálogo do Produto. Disponível em: <https://www.operatrix.com.br/arquivos/anuncio/catalogo/catalogo__201310110512.pdf>. Acesso em: 21 out. 2019.

Sandvik Coromant do Brasil S.A. **Desgaste das arestas de corte**. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>>. Acesso em: 21 out. 2019.

Sandvik Coromant do Brasil S.A. **Desgaste das arestas de Fresamento concordante vs. fresamento discordante**. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/Pages/up-milling-vs-down-milling.aspx?nodeid=694>>. Acesso em: 21 out. 2019.

Sandvik Coromant do Brasil S.A. **Medição da superfície da peça**. Conhecimento. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/workpiece-surface-measurement.aspx>>. Acesso em: 21 out. 2019.

Sandvik Coromant do Brasil S.A. **Pastilha 490R-08T312M-PM 4220**. Especificações do produto. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=490r-08t312m-pm%204220>>. Acesso em: 21 out. 2019.

SANTOS, Sandro Cardoso. SALES, Wisley Falco. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo. Artliber Editora, 2007. 246p.

SILVA, André Luiz V. da Costa.; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**; 3.ed. São Paulo: BUCHER. 2010. 646p.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição Química dos Aços**; 1.ed. São Paulo: BUCHER. 1989. 134p.