

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

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS ZANON COSTA

**ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE MATERIAL ASPERGIDO APÓS
PROCESSO DE USINAGEM POR TORNEAMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RIO DE JANEIRO

NOVEMBRO DE 2021

LUCAS ZANON COSTA

**ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE MATERIAL ASPERGIDO APÓS
PROCESSO DE USINAGEM POR TORNEAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Engenheiro Mecânico

Prof. Orientadora: Tatiane De Campos Chuvas

Coorientador: Rafael da Cunha Hamano

RIO DE JANEIRO

NOVEMBRO DE 2021

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

C837 Costa, Lucas Zanon
Análise da superfície de material aspergido após processo de usinagem por torneamento / Lucas Zanon Costa. — 2022.
72f. + apêndice : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2022.

Bibliografia : f. 69-72

Orientadora: Tatiane de Campos Chuvás

Coorientador: Rafael da Cunha Hamano

1. Engenharia mecânica. 2. Revestimentos. 3. Aspersão térmica.
4. Metais. 5. Tecnologia de materiais. I. Chuvás, Tatiane de Campos. (Orient.). II. Hamano, Rafael da Cunha (Coorient.). IV. Título.

CDD 621

AGRADECIMENTOS

A professora orientadora Tatiane de Campos Chuvas, por todo direcionamento, conhecimento, ajuda, paciência e atenção que me foi fornecido;

Ao mestre Rafael da Cunha Hamano, por toda ajuda e direcionamento que me foi prestado na reta final da realização deste trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca que me acolheu e ofereceu toda infraestrutura disponível para a conclusão deste trabalho;

À minha família, por ter me apoiado, compreendido e me incentivando todo o tempo ao longo de minha caminhada;

Aos meus amigos da Cds, republica da qual fui recebido, acolhido e passei esses anos de estudo, assim como os Paizadas que fizeram essa jornada mais leve.

Agradeço a todos que tornaram possível, de forma direta ou indireta, a realização desse estudo realizado.

RESUMO

A aspersion térmica é um processo de revestimento que tem como objetivo principal a proteção de equipamentos, evitando danos à superfícies de peças que operam em ambientes sujeitos ao desgaste, assim como propriedades específicas, como condutividade térmica e o limite de escoamento, entre outras propriedades tal como a dureza. O torneamento de aços endurecidos geralmente é realizado com ferramentas de PCBN e cerâmica que possuem propriedades suficientes para suportar as condições de atrito do processo impostas pela dureza e resistência mecânica, bem como pela composição microestrutural do material aspergido termicamente. Diante disso, este trabalho busca avaliar o desempenho do inserto CBN no torneamento de uma amostra revestida e endurecida por uma camada de liga inox martensítica AISI 420 por meio da análise das forças de usinagem e rugosidade da superficial. Para se chegar nesse objetivo, houve a variação das velocidades de corte sem o uso de lubrificantes (usinagem a seco). Foi realizado dois passes, sendo o primeiro para homogeneizar a superfície do material e o segundo passe para debastar o material a cada velocidade de corte aplicada, com isso foi possível verificar o aparecimento de um aumento na componente de força passiva de corte devido ao ângulo de saída negativo do cavaco. Outro fator analisado foi a qualidade superficial do material após o processo de torneamento através do parâmetro de rugosidade Ra.

Palavras-chave: Torneamento de materiais endurecidos. Inserto CBN. Aspersion térmica. Material endurecido.

ABSTRACT

Thermal spraying is a coating process whose main objective is to protect equipment, preventing damage to the surfaces of parts that operate in environments subject to wear, as well as specific properties, such as thermal conductivity and the yield point, among other properties such as hardness. Turning of hardened steels is usually performed with PCBN and ceramic tools that have sufficient properties to withstand the frictional conditions of the process imposed by hardness and mechanical strength, as well as the microstructural composition of the thermally sprayed material. Therefore, this study seeks to evaluate the performance of the CBN insert in turning a sample coated and hardened by a layer of martensitic stainless steel AISI 420 by evaluating the machining forces and roughness of the machined surface. To reach this objective, there was a variation of cutting speeds without the use of lubricants (dry machining). Two passes were carried out, the first to homogenize the surface of the material and the second pass to thin the material at each applied cutting speed, with this it was possible to verify the appearance of an increase in the passive cutting force component due to the rake angle. chip negative. Another factor analyzed was the surface quality of the material after the turning process through the roughness parameter Ra.

Keywords: Turning of hardened materials. CBN insert. Thermal spray. Hardened material.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos processos de fabricação (Fonte: MACHADO <i>et. al</i> 2009).....	14
Figura 2 - Principais operações executadas no torno (Fonte: MACHADO <i>et al.</i> , 2009).....	15
Figura 3 - Representação dos movimentos e direções no torneamento (Fonte: MACHADO <i>et al.</i> , 2009).....	16
Figura 4 - Ângulo para ferramentas de torneamento (Fonte: ASM 1994).	17
Figura 5 - Relação entre tenacidade e dureza dos materiais aplicados como ferramentas de corte (Fonte: Mitsubishi 2018).	19
Figura 6 - Dureza a quente dos principais materiais de ferramentas aplicados no torneamento duro (Fonte: adaptado de Klocke 2011).	20
Figura 7 - Rugosidade versus tolerância ISO IT para o torneamento de materiais endurecido (Fonte: Byrne 2003).....	21
Figura 8 - Ângulos de uma ferramenta de corte - vista R sobre o plano de referência da ferramenta P_r : (a) α_o (folga), β_o (cunha) e γ_o (saída) (b) λ_o (inclinação) (c) χ_r (posição), ϵ_r (ponta) e χ'_r (posição secundário) (Fonte: Ferraresi 2011).	22
Figura 9 – Principais planos de referência (Fonte: Wiedenhöft 2010).....	23
Figura 10 - Efeito do ângulo de saída efetivo na transição da macro para microgeometria da ferramenta (Fonte: Denkena e Biermann 2014).	25
Figura 11 - Definição da média aritmética do perfil (R_a) (Fonte: Adaptado de DAVIM, 2009).	28
Figura 12 - Definição da rugosidade de profundidade média (R_z). (Fonte: Adaptado de GADELMAWLA, <i>et al.</i> , 2002).....	29
Figura 13 - Definição da rugosidade máxima (R_t). (Fonte: Adaptado de GADELMAWLA, <i>et al.</i> , 2002).....	31
Figura 14 - Componentes da força de usinagem (Fonte: Ferraresi 2011).	31
Figura 15 - Dependência das componentes da força de usinagem: (a) avanço; (b) profundidade de corte; (c) velocidade de corte e (d) ângulo de posição (Fonte: Klocke 2011).	33
Figura 16 - Esquema de aplicação de revestimento por aspersão térmica	35
Figura 17 - Classificação dos processos de aspersão térmica (Fonte: Pawlowski 1995).....	36
Figura 18 - Velocidade média de impacto das partículas conforme os processos	37
Figura 19 - Esquema do processo de aspersão térmica a arco elétrico.....	38
Figura 20 - Esquema de uma instalação para AT de arco elétrico (Fonte: Pawlowski 1995)..	39

Figura 21 - Camada típica depositada pelo processo de aspersão térmica (Fonte: Cortés 1998).	42
Figura 22 - Perfis de velocidade e temperatura (K) de acordo com a distância da tocha até o substrato (Fonte: Pawlowski 2008).	43
Figura 23 - Esquema de partículas aspergidas fazendo analogia com a tensão superficial de fluidos (Fonte: Cortés 1998).....	45
Figura 24 - Esquema de ancoragem mecânica lenticular na superfície rugosa do substrato (Fonte: Gimenes 2004).	46
Figura 25 - Comparação das características dos processos de torneamento duro e retificação (Fonte: Klocke 2005).....	51
Figura 26 - Fotografia do corpo de prova com substrato de aço AISI 420 C aspergido termicamente (Fonte: Autor)	53
Figura 27 - Inserto cerâmico TNMG 160408 3T (Fonte: Autor)	54
Figura 28- Porta-ferramenta MTJNR 2020 K16 (Fonte: Sandvik Coromant 2021)	54
Figura 29 - Torno MS 205 da Indústrias Nardini S/A. (Fonte: Pinheiro.Caio 2021).....	55
Figura 30 - Dinamômetro Kistler modelo 9257 BA (Fonte: Pinheiro. Caio 2021).....	56
Figura 31 - Condicionador de sinais Kistler modelo 5233 A (Fonte: Pinheiro. Caio 2021)....	57
Figura 32 - Placa de aquisição de dados National Instruments modelo NI USB-6221 (Fonte: Pinheiro. Caio).....	58
Figura 33 - Esquema representativo da aquisição dos sinais de força de usinagem utilizados neste estudo (Fonte: adaptado de POLLY 2019).....	59
Figura 34 - Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210P (Fonte: Autor)	60
Figura 35 – Gráfico de força de corte 500 RPM $v_c = 119,38 \text{ m/mim}$ $a_p = 0,2 \text{ mm}$	61
Figura 36 - Gráfico de força de corte 800 RPM $v_c = 191,01 \text{ m/mim}$ $a_p = 0,2 \text{ mm}$	62
Figura 37 - Gráfico de força de corte 1000 RPM $v_c = 238,76 \text{ m/mim}$ $a_p = 0,2 \text{ mm}$	63
Figura 38 - Gráfico de força de corte 1250 RPM $v_c = 298,45 \text{ m/mim}$ $a_p = 0,2 \text{ mm}$	63
Figura 39 - Gráfico de força de corte 1600 RPM $v_c = 382,02 \text{ m/mim}$ $a_p = 0,2 \text{ mm}$	64
Figura 40 – Valores das médias das Forças de Usinagem com as variações da velocidade de corte (Fonte, Autor)	65
Figura 41 – Valores das médias de Ra com as variações de velocidade de corte (Fonte: Autor)	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperaturas das fontes de calor (Fonte: adaptado de ASM 1994).	36
Tabela 2 - Vantagens relacionadas aos processos de aspensão térmica. Fonte: modificado de CORTÉS (1998)	40
Tabela 3 - Desvantagens relacionadas aos processos de aspensão térmica Fonte: modificado de CORTÉS (1998)	41
Tabela 4 - Características de abrasivos usados para jateamento (Fonte: adaptado de Menezes 2007).	48
Tabela 5 - Condições usuais de jateamento para obtenção de rugosidade adequada (Fonte: adaptado de Lima 2002).	49
Tabela 6 -Dados de rugosidades adquiridos durante o processo de usinagem do corpo de prova (Fonte: Autor).	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA.....	11
1.2	OBJETIVO.....	12
1.3	METODOLOGIA	12
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	USINAGEM.....	14
2.2	TORNEAMENTO	15
2.3	FERRAMENTAS DE CORTE	17
2.4	GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE	21
2.5	INTEGRIDADE SUPERFICIAL	25
2.6	RUGOSIDADE	26
2.7	PARÂMETROS DE RUGOSIDADE	28
2.7.1	PARÂMETROS DE RUGOSIDADE Ra	28
2.7.2	PARÂMETRO DE RUGOSIDADE DE PROFUNDIDADE MÉDIA (Rz).....	29
2.7.3	PARÂMETRO DE RUGOSIDADE Rt.....	30
2.8	FORÇAS DE USINAGEM	31
2.9	ASPERSÃO TÉRMICA	35
2.10	ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO ASP (ARC SPRAY PROCESS)	37
2.11	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA	41
2.11.1	MACROESTRUTURA.....	41
2.11.2	MICROESTRUTURA	43
2.11.3	FORMAÇÃO DE ÓXIDOS.....	43
2.11.4	POROSIDADE	44
2.11.5	ADERÊNCIA	46
2.11.6	MICROTRINCAS.....	46
2.12	PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE.....	47
2.12.1	LIMPEZA	47

2.12.2	RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE	48
2.12.3	CAMADA DE LIGAÇÃO	49
2.12.4	PRÉ AQUECIMENTO DO SUBSTRATO.....	50
2.13	TORNEAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS	50
2.14	FERRAMENTAS DE CORTE DE MATERIAL CBN	52
3	<i>MATERIAIS E MÉTODOS.....</i>	53
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	53
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA FERRAMENTA DE CORTE.....	53
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE TORNEAMENTO	54
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DOS SINAIS DAS COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM	55
3.5	CARACTERIZAÇÃO DA AQUISIÇÃO DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE	59
4	<i>RESULTADOS E DISCUSSÃO</i>	61
4.1	COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM	61
4.1.1	RESULTADOS DAS COMPONENTES DE FORÇA EM DIFERENTES ROTAÇÕES	61
4.1.2	RESULTADOS DAS MÉDIAS DAS FORÇAS DE USINAGEM (F_u)	64
4.2	RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE	65
	RESULTADOS COMPARATIVOS DOS VALORES DE R_a	66
5	<i>CONCLUSÃO.....</i>	68
6	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</i>	69

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a utilização de revestimentos metálicos vem se tornando uma alternativa relativamente mais simples quando se deseja melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos materiais que são utilizados nas mais diversas aplicações no ramo da engenharia (KLOCKE, 2005).

Levando em consideração o alto custo das peças de reposição e as vantagens da reciclagem sem reposição de peças, o desenvolvimento da tecnologia de aspersão térmica baseia-se na necessidade de aumentar a vida útil do sistema e das peças. O objetivo do processo de aspersão térmica é melhorar o desempenho do sistema mecânico em uso. As ferramentas comerciais de metal-duro e PCBN possuem significativas diferenças em função da geometria, principalmente do ângulo de saída. Tradicionalmente, a ferramenta de PCBN tem ângulo de saída negativo, o que confere boa resistência ao gume. As propriedades do material em PCBN e a sua geometria refletem no comportamento da vida do mesmo assim como no desempenho do processo de torneamento como a qualidade da superfície bem como nas componentes da força de usinagem (BOUCHA, 2010).

Sendo assim o objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento das componentes da força de usinagem e a qualidade da superfície na operação de torneamento de um material endurecido via o processo de aspersão térmica a arco elétrico.

1.1 JUSTIFICATIVA

A melhoria da proteção de componentes metálicos contra degradação por corrosão ou desgaste através da aplicação de técnicas de revestimento é de grande importância para a indústria. As tecnologias de aplicação de revestimentos estão bastante disseminadas e são aprimoradas a cada dia, melhorando os produtos e reduzindo os custos. Em particular, os processos de revestimento por aspersão térmica têm sido amplamente empregados em diferentes ambientes industriais. Entretanto, devido as características do processo, pode ser necessária a usinagem do componente após a aspersão, devido aos requisitos dimensionais e/ou de acabamento superficial e esse é um desafio do setor.

Grande parte das pesquisas sobre usinagem de materiais aspergidos está focada em ligas de cobre, que possuem maior ductilidade, ficando evidente a necessidade de buscar dados acerca da usinabilidade de aços inoxidáveis aspergidos.

1.2 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é analisar a qualidade superficial de peças aspergidas termicamente após processo de usinagem por torneamento. Neste caso, será analisada um revestimento de aço AISI 420 C. Os parâmetros analisados serão a rugosidade e textura da peça utilizando diferentes condições de corte.

1.3 METODOLOGIA

Este trabalho baseia-se em experimentos práticos baseados em literatura sobre o comportamento de forças de usinagem e rugosidade final constituída por uma liga de aço inoxidável AISI 420 endurecido por aspensão térmica. A força de usinagem é obtida com dinamômetros com transdutores piezoelétricos, e seus sinais são obtidos com auxílio de uma placa condicionadora de sinais e processados por meio de software específico para a área. Os diferentes parâmetros são a velocidade de corte e a condição da ferramenta. Desta forma, procuramos obter resultados que proporcionem as melhores condições para obter uma rugosidade final de maior qualidade.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho de conclusão deste curso é basicamente dividido nas seguintes partes:

Capítulo 1 Introdução. Apresenta a proposta de trabalho de forma concisa, utilizando diferentes abordagens sobre o tema.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica. Apresenta todos os aspectos do processo de aspensão térmica, a tecnologia de usinagem do material, os componentes usados e outros tópicos relacionados a este trabalho são exibidos.

Capítulo 3: Materiais e métodos. Descreve os métodos usados para atingir os objetivos propostos.

Capítulo 4: Resultados. Este capítulo apresenta os resultados obtidos durante os testes realizados neste trabalho, seguindo os métodos descritos e sua síntese.

Capítulo 5: Conclusão. São apresentadas as principais conclusões que podem ser tiradas deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 6: Bibliografia: Listagem da bibliografia citada ao longo do trabalho e uma revisão do referencial teórico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 USINAGEM

Segundo Souza (2011) pode-se definir processos de usinagem como operações de corte que permitem remover excessos de um material bruto com auxílio de uma ferramenta, resultando assim em uma peça pronta que, posteriormente, irá compor algum componente mecânico. O processo de usinagem pode ser classificado como convencional (o excesso de material bruto é retirado através cisalhamento) e não-convencional (o excesso de material bruto é retirado por ações mecânicas, químicas, etc). A Figura 1 apresenta os tipos de processos de usinagem conforme essas classificações (convencional e não-convencional). O cavaco é definido como a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizado por apresentar forma geométrica irregular. Estão envolvidos no mecanismo da formação de cavaco alguns fenômenos, tais como o recalque, a aresta postiça de corte, a craterização na superfície de saída da ferramenta e a formação periódica do cavaco (FERRARESI, 2003).

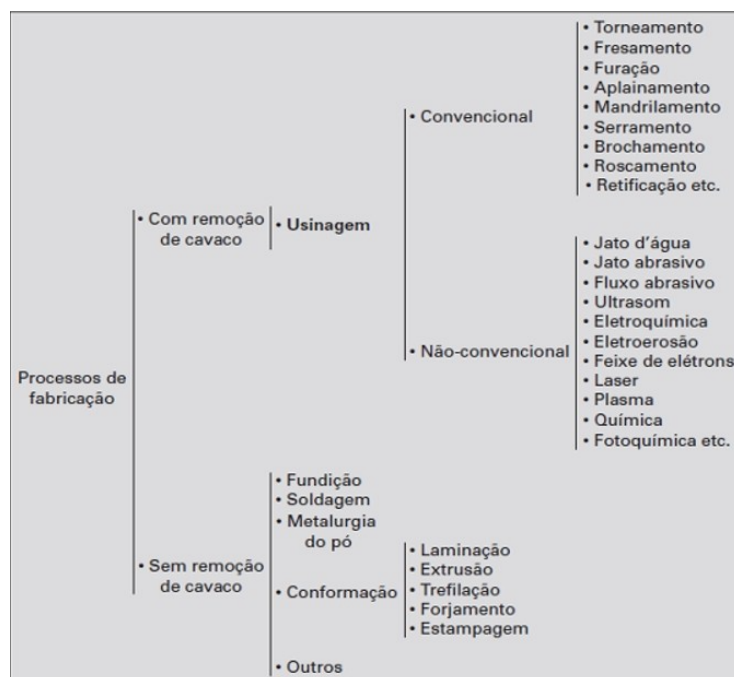


Figura 1 - Classificação dos processos de fabricação (Fonte: MACHADO *et. al* 2009)

2.2 TORNEAMENTO

Torneamento é um processo de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Seguindo esses princípios a peça gira em torno de um eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. A forma da trajetória, no torneamento pode ser retilíneo ou curvilíneo (FERRARESI, 2003). O torneamento se destaca entre os processos de usinagem, graças à simplicidade de sua ferramenta e a facilidade no monitoramento de suas variáveis (NUNES, 2011). A Figura 2 apresenta as operações mais específicas realizadas.

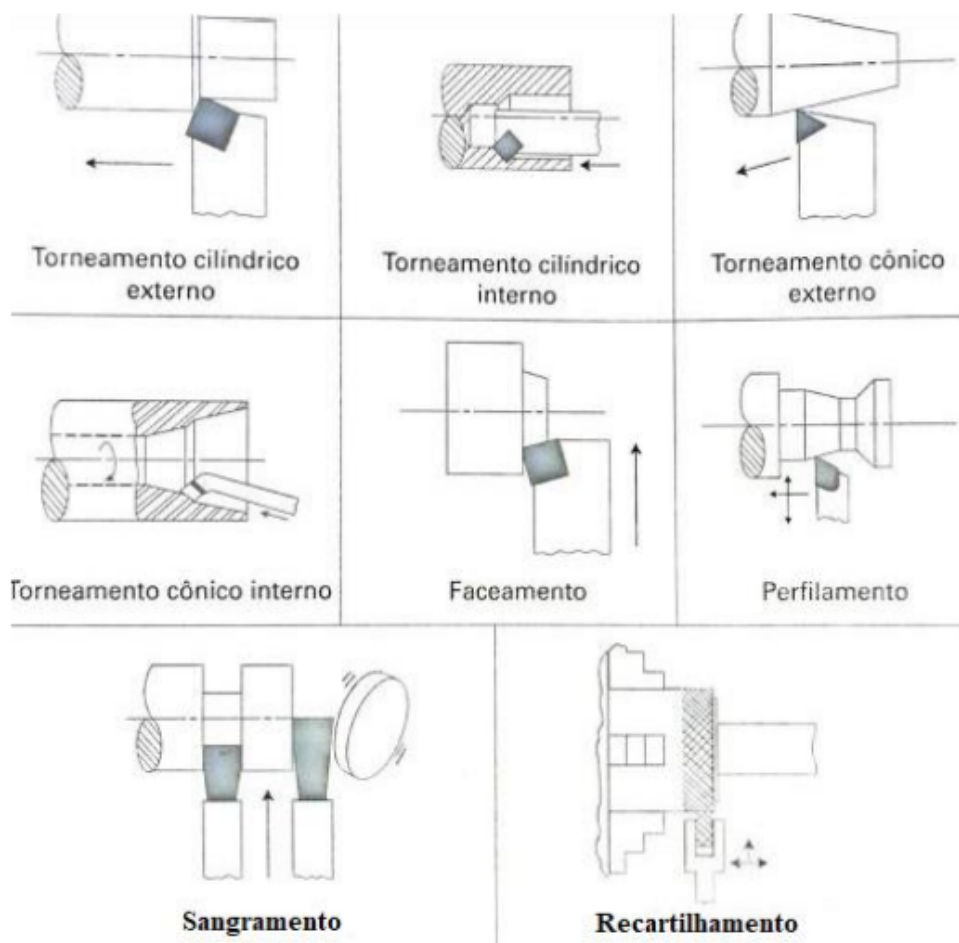


Figura 2 - Principais operações executadas no torno (Fonte: MACHADO *et al.*, 2009).

As interações entre a ferramenta e a peça durante a usinagem são aquelas que permitem a ocorrência do processo de usinagem. Esta interação ocorre através de movimentos que são levados em conta durante o projeto de fabricação das máquinas- ferramentas. Os movimentos sempre estarão ocorrendo supondo-se a peça parada e, portanto, todo o movimento sendo realizado pela ferramenta (Diniz *et. al*, 2010). Na figura 3 é demonstrado a direção destes movimentos.

Ainda segundo Diniz *et. al* (2010) os movimentos podem ser classificados como:

- Movimento de corte - é o movimento entre a ferramenta e a peça que, sem a ocorrência conjunta do movimento de avanço, provoca remoção de cavaco durante uma única rotação ou um curso da ferramenta
- Movimento de Avanço - é o movimento entre a ferramenta e a peça que, juntamente com o movimento de corte, possibilita uma remoção contínua do cavaco, durante várias rotações da ferramenta. O movimento de avanço pode ser contínuo ou intermitente.
- Movimento efetivo de corte - é o movimento entre a ferramenta e a peça, a partir do qual resulta o processo de usinagem. Quando o movimento de avanço é contínuo, o movimento efetivo é o resultante da composição dos movimentos de corte e de avanço. Quando o movimento de avanço é intermitente, o movimento efetivo é o próprio movimento de corte.

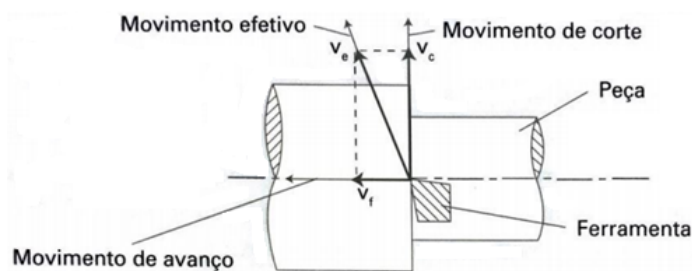


Figura 3 - Representação dos movimentos e direções no torneamento (Fonte: MACHADO *et al.*, 2009).

O revestimento por aspensão pode ser torneado com máquinas de alta rigidez, ferramentas feitas de materiais mais duros e técnicas especiais. A ferramenta mais comum usada para processar revestimentos é o metal duro. A Figura 4 mostra os ângulos recomendados para ferramentas típicas de metal duro e ferramentas de aço rápido.

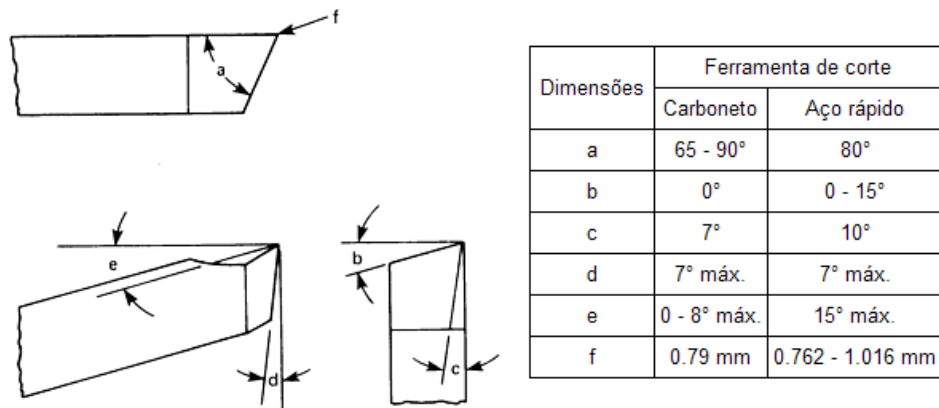


Figura 4 - Ângulo para ferramentas de torneamento (Fonte: ASM 1994).

2.3 FERRAMENTAS DE CORTE

A escolha da matéria-prima utilizada na ferramenta depende de vários fatores, nomeadamente o material a usinar, a natureza da máquina que executa o procedimento de usinagem, as condições da mesma máquina, a forma e o tamanho da máquina. A própria ferramenta e o resfriamento ou o uso de lubrificação, etc (FERRARESI, 1977).

Com base no princípio da dureza relativa, o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e alta dureza contribuiu para o surgimento de novos e mais duráveis materiais de ferramentas para usinagem. As principais propriedades desejáveis dos materiais das ferramentas de corte estão listadas abaixo (MACHADO *et al.*, 2009):

- alta dureza

- tenacidade suficiente para evitar falha por fratura
- alta resistência ao desgaste abrasivo
- alta resistência à compressão
- alta resistência ao cisalhamento
- boas propriedades mecânicas e térmicas em temperatura elevadas
- alta resistência ao choque térmico
- alta resistência ao impacto
- ser quimicamente inerte

Como dureza e tenacidade são duas propriedades opostas, para equilibrar essas propriedades em materiais de ferramentas de corte tornou-se um desafio para os fabricantes. Mais uma vez, o compromisso com a pesquisa e o investimento em pesquisa se mostraram eficazes, pois hoje é possível encontrar no mercado uma infinidade de ferramentas com propriedades simultâneas invejáveis de tenacidade e dureza. A conciliação dessas propriedades é alcançada pela produção de ferramentas com diferentes composições químicas, granulometria fina e controle total sobre os processos de fabricação e tratamento térmico, que lhes conferem pureza e qualidade excepcionais. (ROSA, 2017).

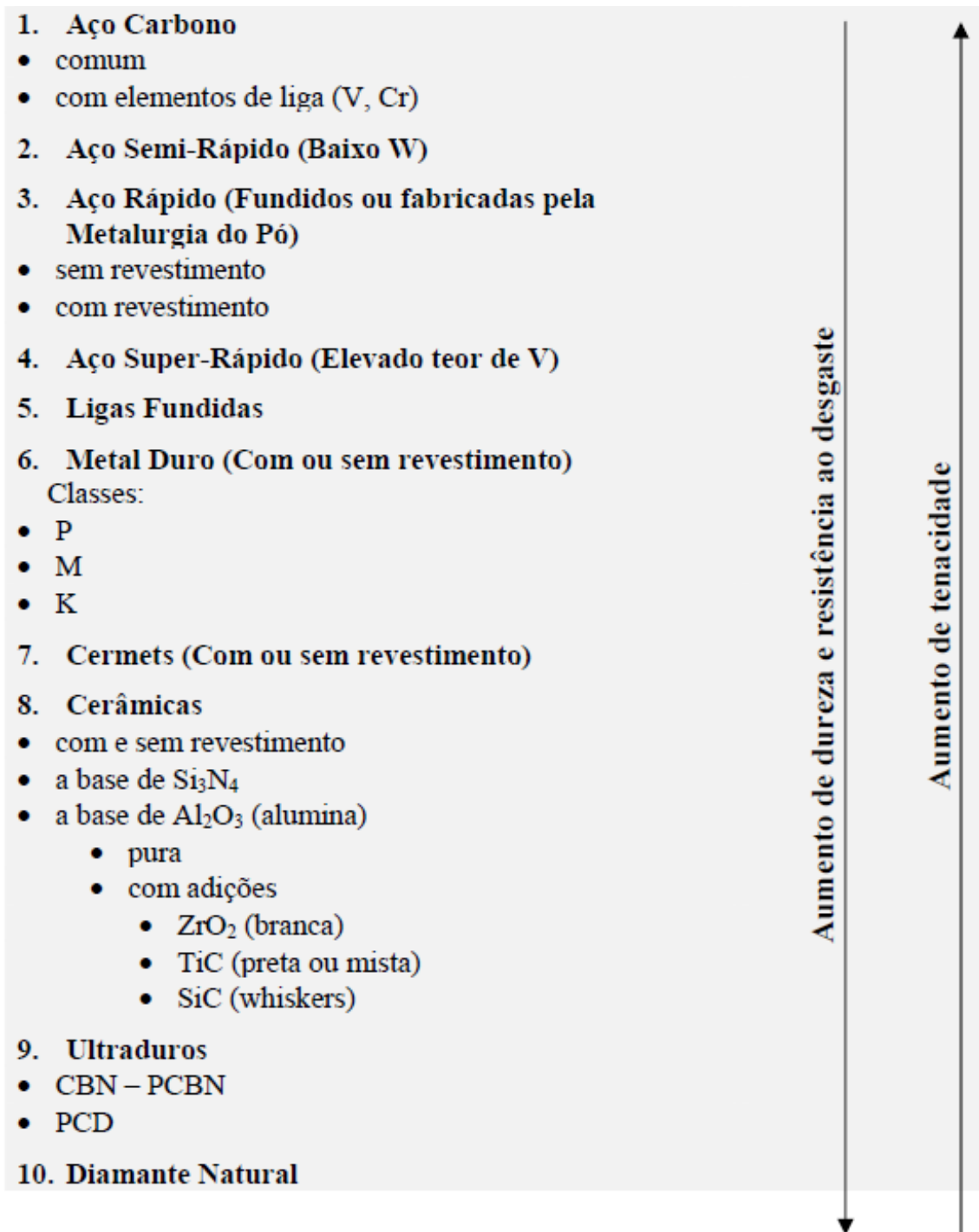


Figura 5 - Relação entre tenacidade e dureza dos materiais aplicados como ferramentas de corte (Fonte: Mitsubishi 2018).

As pastilhas de PCBN e cerâmica são frequentemente usadas no torneamento de aços difíceis de usinar (aços endurecidos, ferros fundidos, superligas, etc.). Estes materiais de ferramentas são considerados os melhores materiais para torneamento duro, pois resistem a

altas temperaturas e forças de corte, resultando em maior vida útil da peça usinada e melhor acabamento (KORN. D, 2004).

Todavia ferramentas de corte de metal duro vem sendo amplamente utilizadas em processos de fabricação de usinagem devido ao seu custo relativamente baixo, bem como boa dureza a quente (resistência ao desgaste) e boa tenacidade, possibilitando assim uma gama de aplicações com diferentes combinações de parâmetros de corte (DINIZ *et al.*, 2010). Entretanto essas ferramentas possuem, menor dureza a quente e maior resistência ao impacto do que os materiais comumente utilizados como demonstrado na Figura 6 abaixo (DINIZ *et al.*, 2010; KLOCKE, 2011).

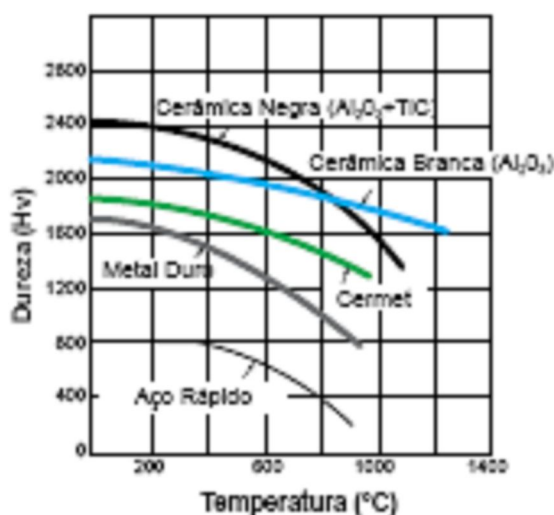


Figura 6 - Dureza a quente dos principais materiais de ferramentas aplicados no torneamento duro
(Fonte: adaptado de Klocke 2011).

Embora o processo de torneamento de materiais endurecidos só possa atingir as tolerâncias padrão ISO IT3 e rugosidade R_t de cerca de $1 \mu\text{m}$ sob certas condições, as tendências indicam níveis ainda mais baixos de acabamento e tolerância. Para tanto, é necessário melhorar a geometria específica da aresta da ferramenta (incluída no método de caracterização) e vinculá-la ao controle do desgaste, como demonstrado na Figura 7.

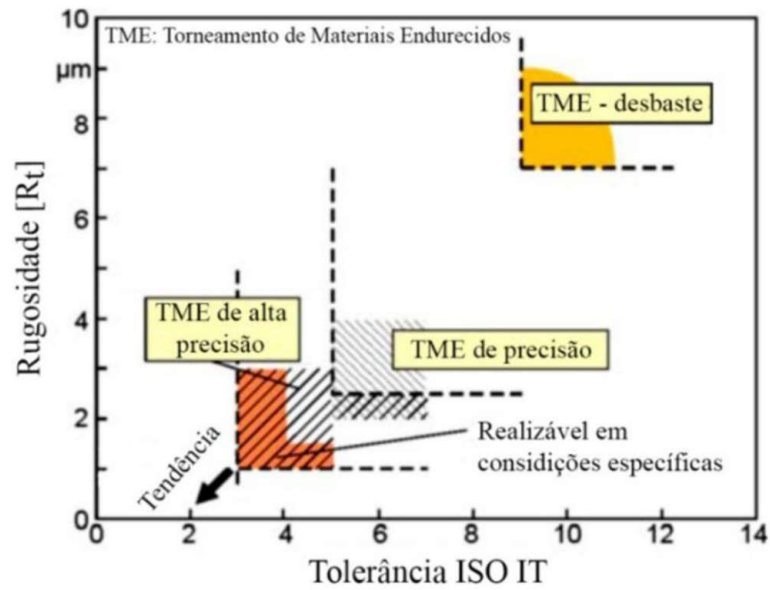


Figura 7 - Rugosidade versus tolerância ISO IT para o torneamento de materiais endurecido (Fonte: Byrne 2003).

2.4 GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE

A geometria da ferramenta e os fatores relacionados ao material da peça e da máquina-ferramenta têm impacto no processo de usinagem. Portanto, é necessário definir a forma da ferramenta e controlar o ângulo básico para um ótimo desempenho. (MACHADO *et al.*, 2009).

Ainda segundo Machado *et al.*, 2009 os principais ângulos que compõem a cunha de corte e suas devidas funções, quando $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$ (complementares) e $\chi_r + \varepsilon_r + \chi'_r = 180^\circ$ (suplementares) devidamente demonstrados na Figura 8 são:

- O ângulo de folga (α_o) é responsável em evitar o atrito entre a peça e a ferramenta. Dessa forma, a marca de desgaste de flanco é consideravelmente influenciada por esse ângulo;
- O ângulo de cunha (β_o) é responsável pelo corte do material e proporciona uma resistência mecânica à ferramenta e dissipando assim o calor;

- O ângulo de saída (γ_o) afeta diretamente a formação de cavacos, força de corte e potência. Neste caso, quanto maior γ_o , menor será o trabalho de flexão do cavaco. Portanto, valores negativos de γ_o são usados para usinagem de materiais duros (porque as cunhas requerem maior resistência mecânica, como $\alpha_o + \beta_o + \gamma_o = 90^\circ$);
- O ângulo de inclinação (λ_o) controla a direção de saída dos cavacos e protege a aresta de corte contra impactos. A redução do ângulo λ_o aumenta a estabilidade da aresta, porém aumenta a força passiva e guia o cavaco para a superfície usinada;
- O ângulo de entrada (χ_r) distribui a tensão de corte, afeta a geometria do cavaco e afeta o avanço e a força passiva. Quanto maior χ_r , maior a vida útil da ferramenta, pois o comprimento de contato do cavaco na aresta de corte aumenta e a espessura do cavaco (h) diminui para o mesmo avanço (f). Como resultado, as forças de usinagem são distribuídas por uma aresta de corte mais longa, prolongando a vida útil da ferramenta;
- O ângulo de ponta (ϵ_r) garante boa estabilidade da ferramenta e dissipação de calor. Em relação à ponta (borda e cunha), sua forma determina a topografia da superfície.

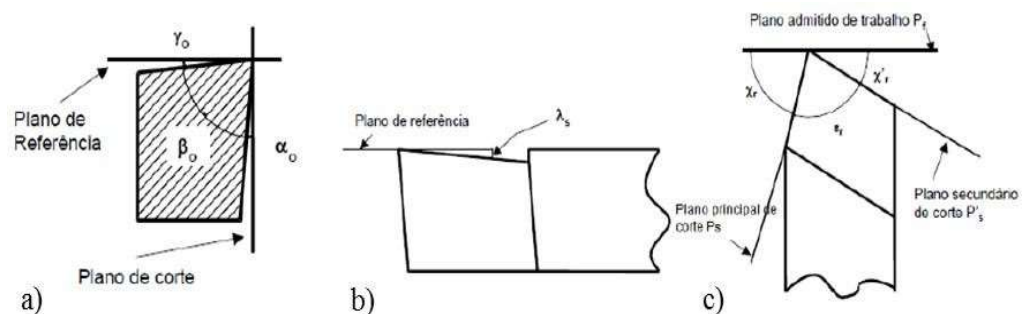


Figura 8 - Ângulos de uma ferramenta de corte - vista R sobre o plano de referência da ferramenta P_r : (a) α_o (folga), β_o (cunha) e γ_o (saída) (b) λ_o (inclinação) (c) χ_r (posição), ϵ_r (ponta) e χ'_r (posição secundário)
(Fonte: Ferraresi 2011).

possível à superfície ou eixo da ferramenta. Nas ferramentas de barra, o plano de referência é paralelo à superfície de apoio do cabo.

- Plano de corte (P_s) – é tangente à aresta principal de corte e perpendicular ao plano de referência da ferramenta.
- Plano ortogonal da ferramenta (P_o) – é perpendicular aos planos de referência e de corte da ferramenta, passando pelo ponto de referência. É também conhecido como “plano de medida”.
- Plano admitido de trabalho (P_f) – é perpendicular ao plano de referência e paralelo à direção admitida de avanço.
- Plano dorsal da ferramenta (P_p) – perpendicular aos planos de referência da ferramenta e admitido de trabalho.
- Plano normal à aresta de corte (P_n) – perpendicular à aresta principal de corte.

A geometria da ferramenta de corte é classificada em macrogeometria e microgeometria. A macrogeometria da ferramenta é definida por suas dimensões espaciais, enquanto a microgeometria é responsável por especificar a geometria da parte ativa da ferramenta de corte, ou seja, define a forma da aresta, a interseção entre as superfícies de saída e os flancos de uma cunha de corte (DENKENA e BIERMANN, 2011). A geometria da aresta de corte tem grande impacto na vida útil da ferramenta durante o torneamento, principalmente com pequenas espessuras de cavacos como torneamento de materiais endurecidos (ROSA, 2017). A Figura 10 mostra um detalhamento da geometria, com enfoque nos ângulos de saída.

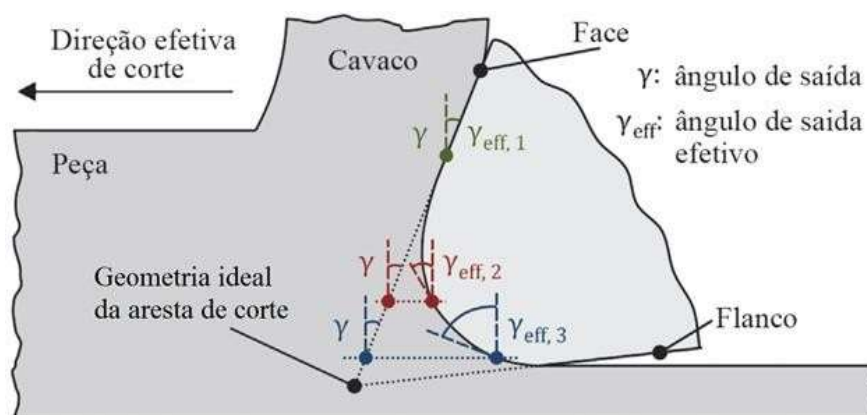


Figura 10 - Efeito do ângulo de saída efetivo na transição da macro para microgeometria da ferramenta
(Fonte: Denkena e Biermann 2014).

2.5 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Integridade superficial é um termo usado para descrever a qualidade final de uma superfície após ter passado por algum tipo de processo de fabricação. Esse termo engloba textura da superfície, geometria, características da superfície em serviço e das camadas abaixo delas. Essas características podem ser classificadas como de acabamento e alterações nas camadas superficiais. Em termos de acabamento, são avaliados aspectos como ondulações, falhas e rugosidade. No que se refere a alterações nas camadas superficiais são avaliados principalmente fatores como tensões residuais, microdureza, deformação plástica, recristalização e transformações metalúrgicas (MACHADO *et al.*, 2009).

As superfícies de peças usinadas, por mais perfeitas que pareçam, são resultado do tipo de operação empregada nas mesmas e apresentam picos e vales com espaçamento regular ou irregular, que tendem a formar um perfil ou uma textura característica de formação. O perfil da superfície desempenha um papel importante nos componentes mecânicos, influenciando em características como resistência ao desgaste, possibilidade de ajuste forçado e montagem de peças, resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, resistência à corrosão e à fadiga e capacidade de vedação (GAMARRA, 2017).

As peças produzidas em processos de usinagem são caracterizadas pela precisão dimensional e qualidade superficial. Para a avaliação superficial, o conceito de rugosidade se torna um parâmetro pertinente. Segundo DINIZ *et al.* (2010), a rugosidade é definida como irregularidades e erros microgeométricos presentes nas superfícies trabalhadas em processo de geração de superfície, como a usinagem.

Cada parâmetro no processo de usinagem tem uma influência específica na rugosidade, principalmente o avanço e a velocidade de corte. Valores de avanço maiores aumentam a rugosidade, tornando a superfície da peça mais grosseira. Já o aumento da velocidade de corte melhora o acabamento superficial, diminuindo a rugosidade (STEMMER, 1993). Quanto maior a velocidade de corte, mais vezes a ferramenta passará na superfície do material, diminuindo essas irregularidades. Já a profundidade de corte não possui relevância nos valores de rugosidade.

Segundo BERNARDOS e VOSNIAKOS (2003), a rugosidade é parâmetro para avaliação de produtividade de máquinas-ferramentas, pois componentes mecânicos de peças usinadas tem sua funcionalidade baseada em uma boa qualidade superficial. A rugosidade de peças usinadas deve ser controlada pela sua influência em outras propriedades do material, assim como a resistência a fadiga. Superfícies rugosas podem facilitar o surgimento de pontos de concentrações de tensões, que são vetores para nucleação de trincas por fadiga, sendo de suma importância para elementos estruturais, submetidos a tensões constantes ou intermitentes (SMITH e HASHEMI, 2012).

2.6 RUGOSIDADE

A textura ou rugosidade superficial é caracterizada por deixar microirregularidades geométricas na superfície do material trabalhado devido ao processo de fabricação. A rugosidade da superfície pode ser expressa de várias maneiras. Na usinagem é basicamente composto por marcas regulares e outras irregularidades deixadas pelo contorno da ferramenta, irregularidades que dependem do processo e do material, como a microvibração entre a ponta da ferramenta e a peça devido às inclusões duras, vazios intermoleculares na matriz do material e até mesmo deformação térmica, esses tamanhos irregulares podem variar de 10^{-10} a 10^{-5} mm, podendo desta forma, influenciar na superfície usinada.

Estas microirregularidades são em geral sobrepostas a outras irregularidades geométricas de dimensões com ordem de grandeza crescentes, decorrentes ainda da vibração relativa entre ferramenta cortante e peça, e também irregularidades que caracterizam os erros de forma da superfície.

A rugosidade de uma superfície é basicamente quantificada através de parâmetros relacionados à altura (amplitude) e largura (ou espaçamento) das irregularidades. ou uma combinação desses atributos. Parâmetros comumente usados são rugosidade média, R_a (roughness average), rugosidade média quadrática, R_q (rms roughness), máxima distância pico a vale, R_t , média das distâncias entre saliências, S_m , fração de contato, t_p (bearing ratio), média da inclinação das irregularidades do perfil, Δa , entre outros (DAGNALL 1986: STOUT 1981).

A qualidade superficial de uma peça pode ser medida por diferentes métodos e instrumentos. Essa medição é realizada utilizando instrumentos denominados perfilômetros de contato mecânico. Em instrumentos desse tipo, as irregularidades de uma superfície são detectadas através do deslizamento de uma agulha sobre um determinado segmento da superfície. Assumisse o segmento medido como o representativo do resto da superfície sendo analisada (C. R. CARPINETTI *et.al* 1996).

Parâmetros decisivos na escolha de um determinado tipo de instrumento de medição são:

- se o rastreamento da superfície é feito através de contato mecânico com a superfície ou não;
- se o rastreamento é feito ao longo de um perfil (seção transversal da superfície) ou sobre uma área;
- a resolução e faixa nominal de medição na vertical;

- a resolução e faixa nominal de medição na horizontal.

2.7 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

2.7.1 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE Ra

O parâmetro de rugosidade Ra, também conhecido como CLA (Center Line Average) ou linha média central, é de longe o método mais usado para indicação da rugosidade. Instrumentos para medi-lo usam circuitos eletrônicos relativamente simples para a operação de integração. Este parâmetro é compreendido como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo (medido) em relação à linha média em um comprimento de amostragem (DAVIM, 2009; GADELMAWLA, *et al.*, 2002), conforme ilustrado pela Figura 11.

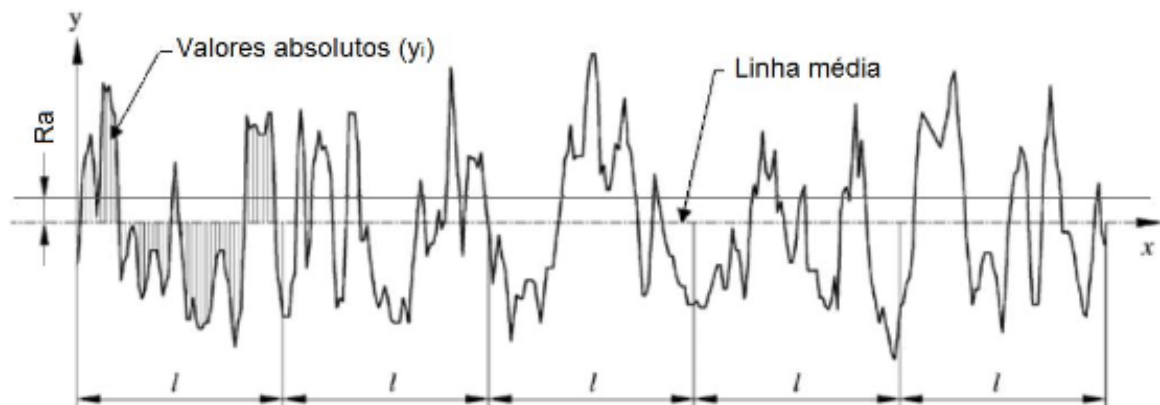


Figura 11 - Definição da média aritmética do perfil (Ra) (Fonte: Adaptado de DAVIM, 2009).

Este parâmetro corresponde à área entre o perfil de rugosidade e a linha média, ou ainda, a integral dos valores absolutos das amplitudes do perfil de rugosidade dentro de um comprimento de amostragem. Analiticamente, o Ra pode ser expresso conforme Equação 1 (GADELMAWLA, *et al.*, 2002):

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad [\mu m] \quad (1)$$

Onde:

l = comprimento de amostragem avaliado [mm];

$y(x)$ = distância de cada ponto até a linha de centro
[μm].

2.7.2 PARÂMETRO DE RUGOSIDADE DE PROFUNDIDADE MÉDIA (R_z)

O parâmetro de rugosidade R_z ou rugosidade de profundidade média é definido como a média aritmética das distâncias entre o pico mais alto e o vale mais profundo de cada intervalo considerado na amostragem do perfil de rugosidade (NBR ISO 4287, 2002; GADELMAWLA, *et al.*, 2002). A Figura 12 mostra essa definição.

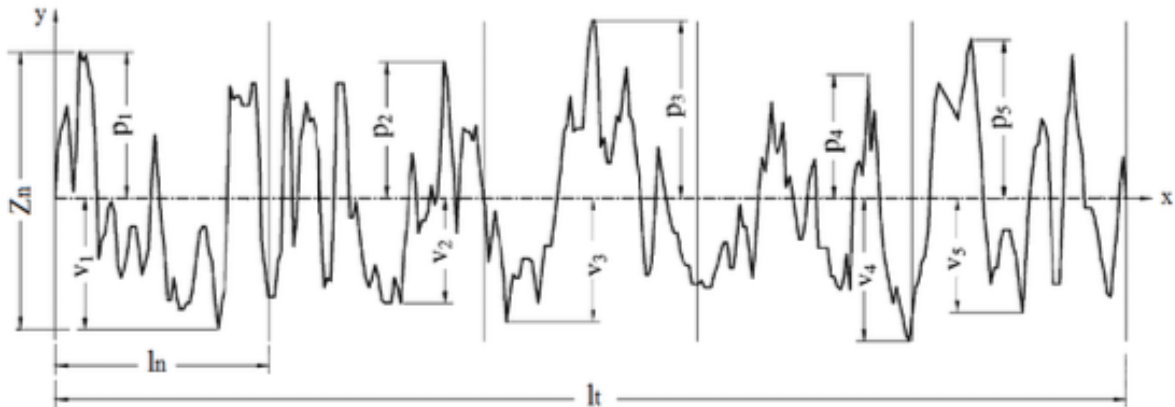


Figura 12 - Definição da rugosidade de profundidade média (R_z). (Fonte: Adaptado de GADELMAWLA, *et al.*, 2002).

Na figura acima, o valor de “ n ” representa o número de intervalos considerados na amostragem; “ v ” e “ p ” indicam, respectivamente, a profundidade de cada vale e a altura de cada pico. Matematicamente, o valor de R_z pode ser obtido pela Equação 2 (GADELMAWLA, *et al.*, 2002):

$$R_z = \frac{1}{n} X \left(\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i \right) = \frac{1}{n} X \sum_{i=1}^n z_i \quad [\mu\text{m}] \quad (2)$$

De acordo com a NBR ISO 4287 (2002), o comprimento de amostragem para os cálculos dos parâmetros de rugosidade deve ser dividido em seções iguais, para que em cada uma seja calculada a distância vertical “ Z_i ” entre o maior pico e o vale mais profundo, compondo os valores de distância por comprimento de amostragem. O R_z é calculado, então, como a média dessas distâncias ao longo do perfil.

A rugosidade de profundidade média é muito utilizada nos casos em que o perfil é periódico e conhecido, principalmente em aplicações que envolvem selantes, vedantes, desgaste, atrito e corrosão. Ainda assim, grandes variações pontuais não podem ser medidas por este parâmetro, além de que ele não permite identificar informações sobre a forma e a distância entre marcas e ranhuras (DAVIM, 2009; MACHADO, 2009).

2.7.3 PARÂMETRO DE RUGOSIDADE R_t

O parâmetro R_t ou rugosidade máxima total, corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação, independentemente dos valores de rugosidade parcial (Z_i) (GADELMAWLA, *et al.*, 2002). Na Figura 13 o valor de R_t é evidenciado como a soma dos valores de R_{p3} (pico mais elevado) e R_{v4} (vale mais profundo); e tem como unidade de medida o micrometro.

Este parâmetro é bastante sensível a grandes desvios de picos e vales, a partir da linha média. Normalmente, é utilizado em conjunto com o R_a , quando este último é um indicador geral de textura da superfície (DAVIM, 2009).

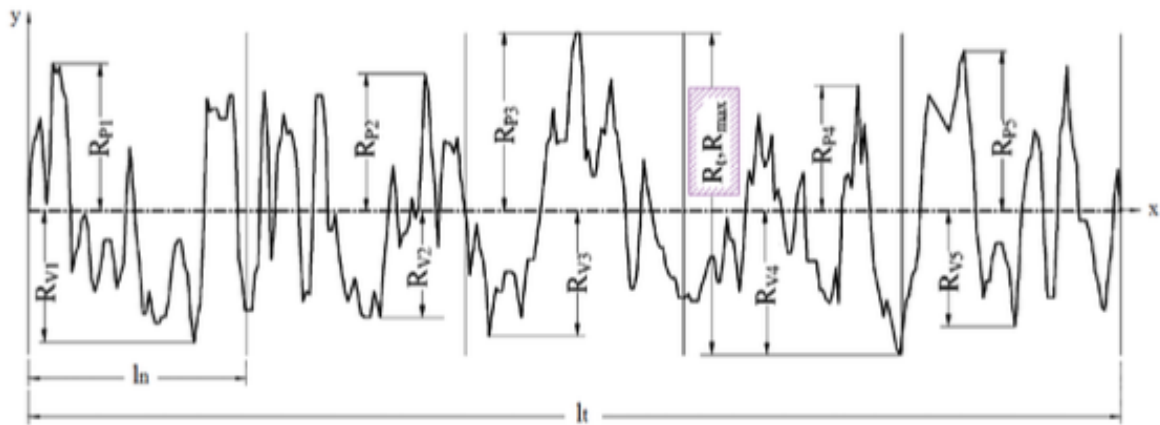


Figura 13 - Definição da rugosidade máxima (R_t). (Fonte: Adaptado de GADELMAWLA, *et al.*, 2002).

2.8 FORÇAS DE USINAGEM

O conhecimento das forças de usinagem que atuam sobre a cunha de corte e o estudo de seus componentes é muito importante, pois podem estimar a potência necessária para o corte e as forças que atuam nos elementos da máquina, além de manter uma relação com o desgaste da ferramenta de corte e afetar a viabilidade econômica do processo (MACHADO, *et al.*, 2009).

Por estar no espaço tridimensional, a força de usinagem (F_u) possui três componentes fundamentais, que atuam diretamente na cunha de corte e, portanto, na estrutura da máquina-ferramenta. A Figura 14 mostra as forças de usinagem tridimensional e seus componentes para operações de torneamento que são as forças de corte (F_c), de avanço (F_f) e passiva (F_p).

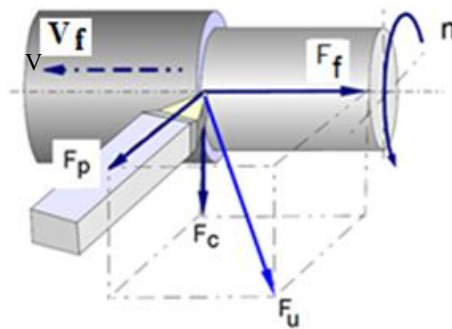


Figura 14 - Componentes da força de usinagem (Fonte: Ferraresi 2011).

Onde:

- F_c – Força de Corte - É a projeção da força de usinagem sobre a direção de corte;
- F_f – Força de Avanço - É a projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço;
- F_p – Força Passiva - É a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho;
- F – Força total de usinagem – Força resultante a qual atua sobre uma cunha cortante durante a usinagem.

As forças de usinagem permitem determinar a potência de corte, as forças atuantes nos elementos da máquina, eficiência da máquina em diferentes cargas e velocidades de operação, além de auxiliar no projeto da ferramenta de corte. Desta forma a magnitude da força de usinagem depende do material da peça (propriedades mecânicas, físicas e químicas), parâmetros de corte, geometria da ferramenta, afiação da ferramenta, fluido de corte e material da ferramenta (BORBA, 2015).

É possível realizar o cálculo teórico da força de corte através da Equação de Kienzle. Esta permite se relacionar constantes do processo de usinagem com o material a ser usinado.

$$F_c = A \cdot K_s \quad (1)$$

$$F_c = a_p \cdot f \cdot K_s \quad (2)$$

$$F_c = b \cdot h \cdot K_s \quad (3)$$

Onde:

- A – área da seção de corte (mm^2)
- b – comprimento de corte (mm)

- h – espessura de corte (mm)
- a_p – profundidade de corte (mm)
- f – avanço (mm/rot)

Os parâmetros de corte tais como: profundidade de corte, taxa de avanço, velocidade de corte, assim como a geometria da ferramenta utilizadas sofrem alterações durante o processo de usinagem, influenciam diretamente na força de usinagem (ROSA, 2017). A Figura 15 mostra esses componentes em função dos parâmetros de corte (v_c , f , a_p) e ângulo de posição da ferramenta (χ_r).

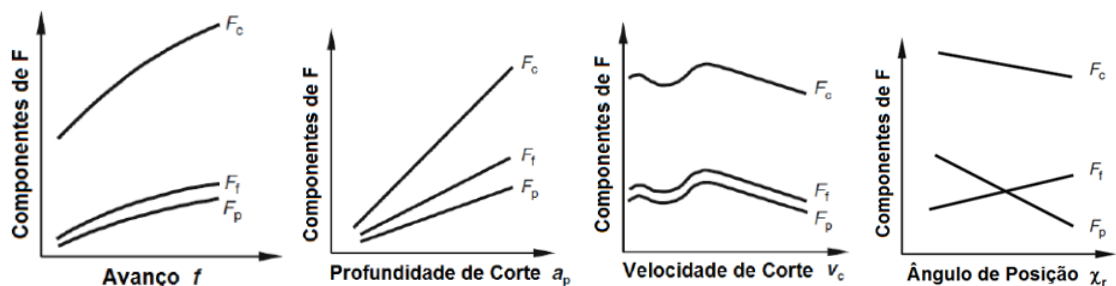


Figura 15 - Dependência das componentes da força de usinagem: (a) avanço; (b) profundidade de corte; (c) velocidade de corte e (d) ângulo de posição (Fonte: Klocke 2011).

Na Figura 15(a) os valores das componentes de usinagem aumentam devido ao comportamento crescente do perfil linear e ao aumento geométrico da seção cortada. No gráfico da Figura 15(b), as componentes da força de usinagem aumentam proporcionalmente com o aumento da profundidade de corte. Este comportamento de aumento linear das componentes mostra uma independência da largura de usinagem sobre as componentes (DINIZ,2010). Na Figura 15(c) pode-se observar que a componente da força de usinagem diminui com o aumento da velocidade de corte. Essa redução é causada pelo aumento da temperatura na raiz do cavaco devido à redistribuição da condução térmica que ocorre nesta área, minimizando a condução ao calor da peça. Observa-se também que essa diminuição das componentes de força ocorrem depois da velocidade crítica (onde o ângulo de posição altera a geometria da aresta postiça de

corte, dificultando assim o corte do material). Portanto alterar o ângulo de posição resulta em uma redução na área de contato da ferramenta-cavaco (KLOCK, 2011). Já na Figura 15(d) segundo Klocke (2011) a ação de χ_r sobre as forças de avanço (F_f) e passiva (F_p) ocorre devido à localização geométrica do gume principal com relação ao eixo da peça, já que com maiores valores de χ_r , a componente F_f aumenta e têm seu máximo quando $\chi_r = 90^\circ$.

Sharman *et al.*, (2006) confirmaram que tanto a força em ferramentas novas, como em ferramentas desgastadas não diminui com o aumento da taxa de avanço, o que leva a temperaturas mais altas e propriedades mecânicas mais baixas naquela parte. Os autores relacionam isso ao fato de que maiores profundidades de deformação são observadas com maior progressão, o que também resulta em maiores forças. Em relação à velocidade de corte, o valor das forças também não diminuiu com o aumento da profundidade.

Na usinagem de materiais com elevada dureza, a pressão de corte específica gerada durante a remoção do material é maior do que na usinagem convencional. Nakayama *et al.*, 1988 menciona que materiais de maior dureza desgastam a ferramenta mais rapidamente e possuem maiores forças de usinagem, especialmente forças de avanço. Apesar da alta dureza e consequente resistência mecânica, dependendo dos parâmetros de processamento normalmente utilizados para o torneamento de materiais endurecidos de precisão ($v_c \approx 100-200$ m/min, $f \approx 0,05-0,15$ mm/rot, $ap \approx 0,1-0,5$ mm), esses componentes de amplitude não são necessariamente alto. Porém, segundo Klocke(2011) e Sandvik (2015), a pressão específica de corte (K_s) é alta, atingindo valores entre 3500 e 5000 N/mm².

Ao trabalhar com materiais endurecidos, a força diminui à medida que a velocidade de corte aumenta. Isso se deve à reduzida resistência do material a altas temperaturas, resultando em um amolecimento térmico do material da peça, o que facilita o corte e reduz as forças de usinagem do processo (EBRAHIMI e MOSHKSAR, 2009; KLOCKE, 2011; MACHADO *et al.*, 2009).

O ângulo da ferramenta que tem o maior impacto no componente da força de usinagem é o ângulo de saída (γ). Uma diminuição em γ tende a aumentar a área de contato do cavaco com a ferramenta, impondo assim uma maior restrição ao deslizamento do cavaco na face de saída, resultando em um aumento da força. Vale ressaltar também que pequenos ângulos de

alívio (α) (inferiores a 3°) aumentam o atrito na interface ferramenta-peça, o que afeta proporcionalmente as forças de usinagem (TRENT e WRIGHT, 2000).

2.9 ASPERSÃO TÉRMICA

A aspersão térmica consiste em um processo em que partículas de um material para revestimento metálico ou não metálico são depositadas em condições fundidas ou semi-fundidas em um substrato adequadamente preparado para formar uma camada superficial. O calor necessário para a operação é gerado através de uma tocha de aspersão que pode ser proveniente da queima de gases inflamáveis ou da criação de um arco elétrico. As partículas aquecidas são aceleradas pelo gás comprimido, confinadas no feixe e direcionadas para o substrato. Ao colidirem com o substrato, as partículas se achatam e formam lentes finas que se adaptam e aderem às irregularidades da superfície e umas às outras. À medida que o processo continua, as partículas esfriam, formando um revestimento com uma estrutura em camadas como demonstrado na Figura 16 (Menezes 2007).

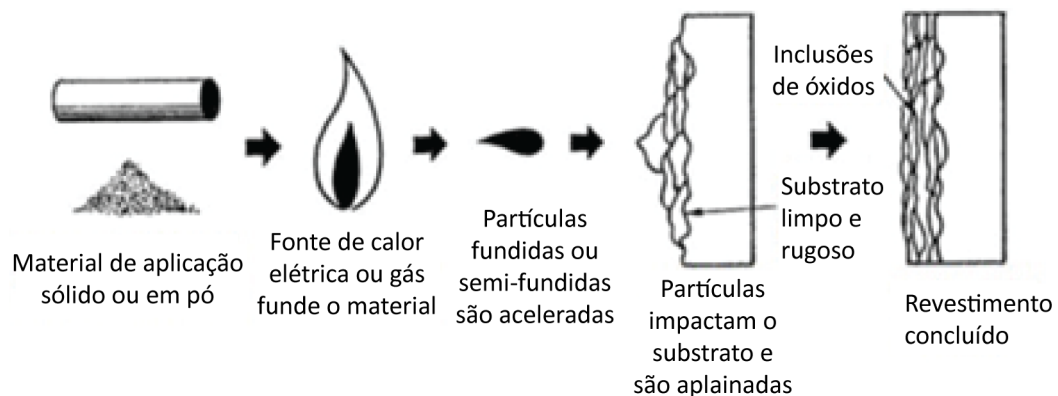


Figura 16 - Esquema de aplicação de revestimento por aspersão térmica

(Fonte: Menezes 2007)

Para que o revestimento de aspersão térmica tenha êxito, é necessário que se tenha um cuidado em manter procedimentos bem claros e preestabelecidos durante todo o processo. Esse processo possui três aspectos fundamentais, são eles o tipo de substrato utilizado, a taxa de aderência do revestimento e sua estrutura. Além disso esses revestimentos protetores podem ser classificados e divididos em três grupos de aplicação (MENEZES, 2007).

- Aqueles que envolvem fusão do metal e do material de aporte.
- Aqueles que envolvem somente a fusão do material de aporte.
- Aqueles que envolvem um processo de difusão.

O processo de aspersão térmica é dividido em dois grupos, um tem como princípio ativo o uso de combustão através de chama e o outro tem como princípio ativo o uso de energia elétrica. Ambos os casos podem ser vistos na Figura 17 a seguir.

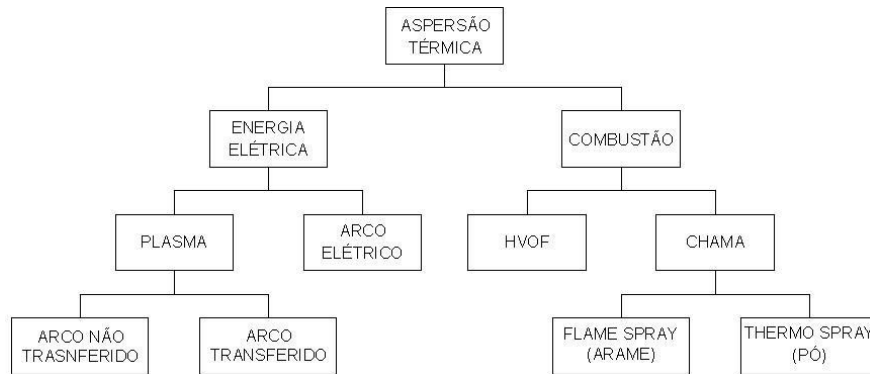


Figura 17 - Classificação dos processos de aspersão térmica (Fonte: Pawlowski 1995).

No processo de aspersão térmica possui variantes básicas tais como: o material de revestimento, o método de aquecimento e o de aceleração de partículas. A Tabela 1 temos poder calorífero dos gases combustíveis utilizados e a Figura 18 a velocidade de impacto das partículas.

Tabela 1 - Temperaturas das fontes de calor (Fonte: adaptado de ASM 1994).

Fonte	Temperatura (°C)
Propano + Oxigênio	2526
Gás Natural + Oxigênio	2538

Hidrogênio + Oxigênio	2660
Propileno + Oxigênio	2843
Acetileno + Oxigênio	3087
Arco Plasma	2200 - 28000

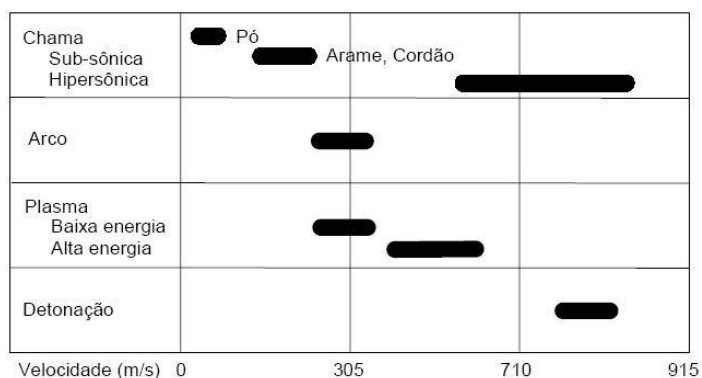


Figura 18 - Velocidade média de impacto das partículas conforme os processos
(Fonte: Menezes 2007).

2.10 ASPERSÃO TÉRMICA POR ARCO ELÉTRICO ASP (ARC SPRAY PROCESS)

O processo de aspersão a arco elétrico, acontece de forma que dois arames eletrodos consumíveis são alimentados de forma a se encontrarem no mesmo ponto a frente de um jato de gás, que serve para atomização dos mesmos. Uma diferença de potencial de 18 a 40V é estabelecida entre os arames, produzindo assim um arco elétrico que funde a ponta destes. O jato de gás atomizante destaca o material fundido, produzindo um jato de gotículas fundidas que são aspergidas em direção ao substrato produzindo assim uma camada “protetora”. O esquema deste processo é destacado na Figura 19 (PAWLOWSKI, 1995).

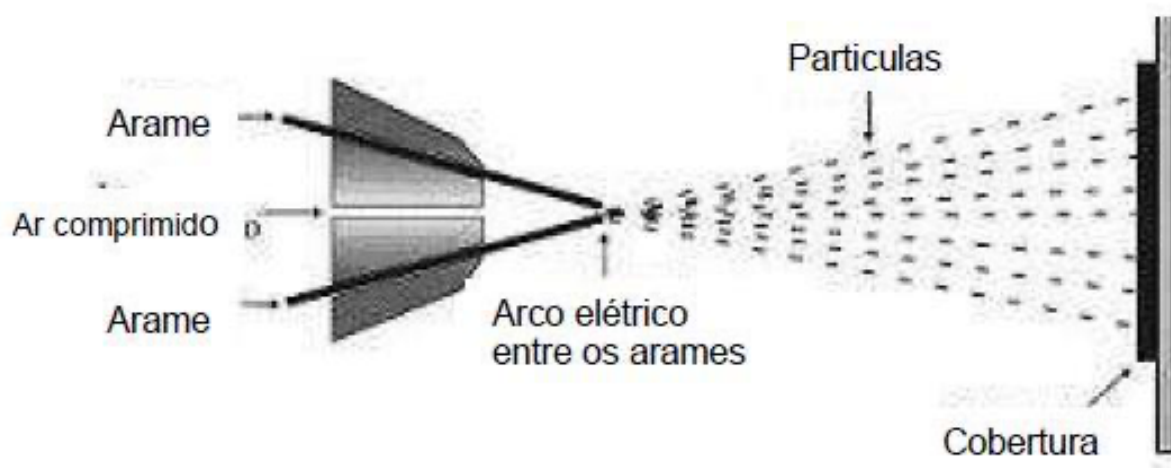


Figura 19 - Esquema do processo de aspersão térmica a arco elétrico

(Fonte: modificado de Berndt, Bernecki 2004).

Quando há a necessidade de se reduzir a oxidação no processo de confecção de um substrato específico uma alternativa é a utilização de gases inertes como o argônio e o hélio.

Marques (2003) afirma que pode ocorrer um superaquecimento e volatilização (uma vez que a temperatura do arco é superior ao ponto de fusão do material aspergido) do substrato durante o processo, isso ocorre de maneira mais acentuada na utilização de zinco e alumínio, podendo causar assim uma reação química, difusão ou ambas após atingir o substrato.

Na Figura 20 é demonstrado um conjunto de componentes que são utilizados para a realização do processo de aspersão térmica, são eles: uma fonte de corrente contínua de tensão constante, alimentadores de arame com velocidade constante, tocha de aspersão e um sistema de fornecimento de gas comprimido controlável.

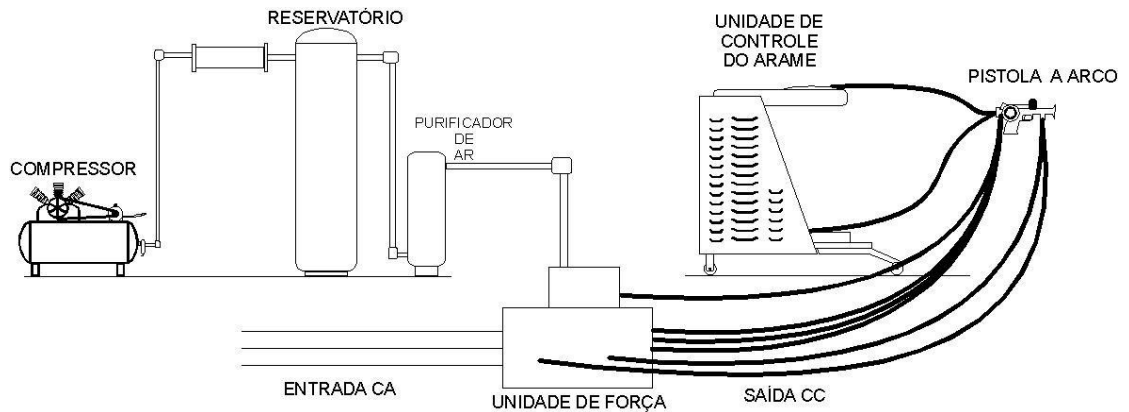


Figura 20 - Esquema de uma instalação para AT de arco elétrico (Fonte: Pawlowski 1995)

A técnica de aspersão a arco se difere das demais técnicas de aspersão térmica por não possuir uma fonte externa de calor, como uma chama de gás ou plasma eletricamente induzido. Quando o fio e o material de entrada têm cargas opostas, eles são aquecidos e fundidos. Sendo um dos fios o ânodo e o outro o cátodo (LIMA e TREVSAN, 2002).

Segundo Pawloski (1995) os parâmetros e propriedades do revestimento através do processo a arco elétrico são:

- Distância de aplicação de 50 a 170 mm.
- Alimentação de arame de 50 a 1000 g/min.
- Diâmetro mais comum do arame de 1.6 a 5.0 mm.
- Com uma corrente de 280 A a temperatura do arco pode atingir até 5800°C.
- Potência elétrica de 5 a 10 kW.
- Diferença de potencial entre os arames de 20 a 40 volts.
- Pressão do gás de atomização de 0.2 a 0.7 MPa.

- Fluxo de gás de atomização de 20 a 1300 l/min.
- Velocidade das partículas, dos arames fundidos, pode atingir até 150 m/s.

Ainda segundo Pawloski o processo a arco elétrico tem como características principais:

- Aderência da camada para zinco e alumínio de 10 a 30 MPa e para ligas de NiAl pode chegar a 70 MPa.
- Porosidade entre 10 a 20%.
- Espessura de camada de 100 a 2000 μm , (0.1 a 2.0 mm).

As Tabelas 2 e 3 mostram as principais vantagens e desvantagens, respectivamente, para os processos de aspersão térmica.

Tabela 2 - Vantagens relacionadas aos processos de aspersão térmica.
Fonte: modificado de CORTÉS (1998)

Detonação	Excelente coesão
	Camada com baixo índice de porosidade
	Grau de acabamento muito bom durante os trabalhos posteriores
Chama Oxiacetilênica	<p>Permite a aplicação de 3 tipos de camadas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ligas para camadas fundidas, resistentes a corrosão e oxidação - Ligas com carbetos, recomendados onde as condições de abrasão são severas - Ligas com cerâmicas, resistentes ao desgaste, calor e abrasão e também funcionam como isolantes térmicos e elétricos
Arco elétrico	Maior aderência
	Maior coesão entre as partículas
	Maior velocidade de deposição chegando a aplicar 30 kg/h
	Materiais mais usados são: aço inoxidável martensítico e austenítico, bronze, alumínio, cobre, molibdênio e carbetos

Tabela 3 - Desvantagens relacionadas aos processos de aspersão térmica
 Fonte: modificado de CORTÉS (1998)

Detonação	Operações devem ser automatizadas
	Operações devem ser controladas a distância
	Ambiente necessita proteção acústica
	Altíssimo nível de ruído, acima de 150 decibéis
Chama Oxiacetilênica	Oxidação das partículas quando transportadas pelo ar comprimido
	Aderência prejudicada
	Necessário o uso de gás inerte para transporte das partículas
Arco elétrico	Possui as mesmas características da chama oxiacetilênica
HVOF	Devido utilização dos combustíveis (propileno, propano ou querosene), requer maior atenção a segurança da instalação
Plasma	Melhor qualificação do operador
	Proteção extra ao operador, devido à energia liberada

2.11 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

2.11.1 MACROESTRUTURA

A macroestrutura revestimento possui uma estrutura formada por lamelas (camadas) devido a colisão sucessiva das partículas sobre a superfície do substrato. A alta velocidade de colisão faz com que essas partículas se achatem e se aderem a superfície do material de forma mecânica. Como pode ser observado na Figura 21, existem o aparecimento de óxidos, poros e partículas não fundidas, estas inclusões podem ser consideradas defeitos superficiais do revestimento (PAWLOWSKI, 1995).

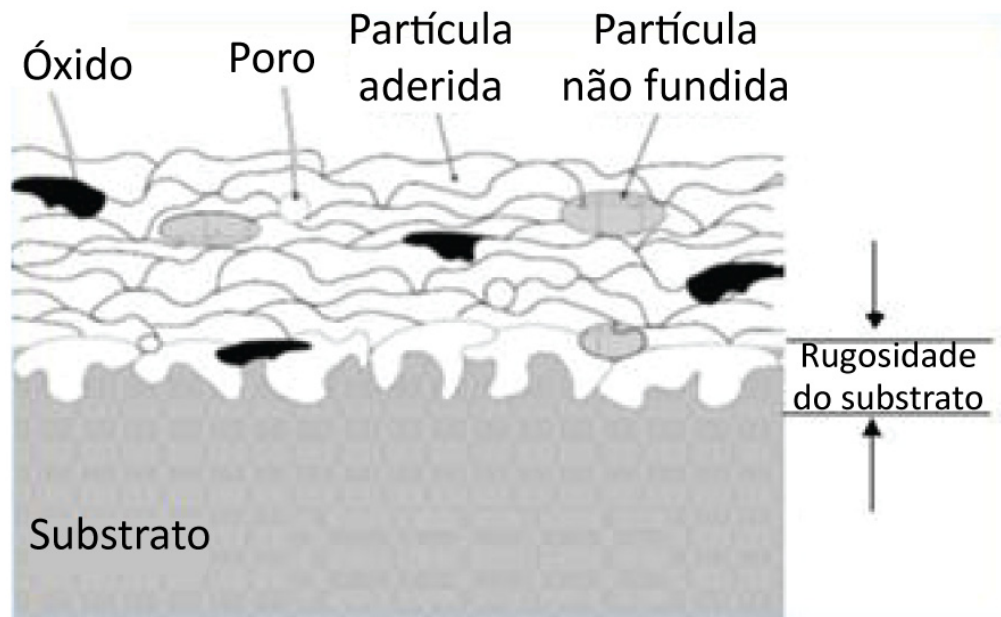


Figura 21 - Camada típica depositada pelo processo de aspersão térmica (Fonte: Cortés 1998).

De acordo com Pawlowski (1995) um jato de revestimento trabalha em diferentes perfis de velocidade e temperatura, e isso ocasiona uma má solidificação e aderência do revestimento no substrato. Quando uma partícula sólida se funde a essa partícula líquida ocorre uma ligação fraca entre revestimento e o substrato. Esses perfis de velocidade e temperatura podem ser vistos na Figura 22.

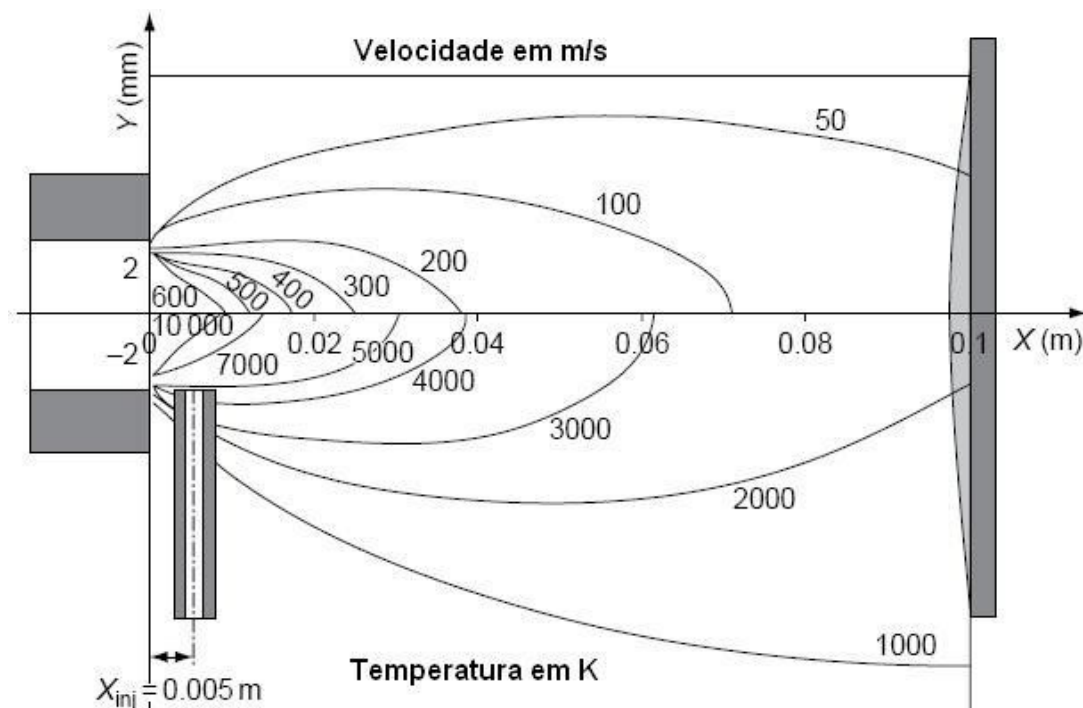


Figura 22 - Perfis de velocidade e temperatura (K) de acordo com a distância da tocha até o substrato (Fonte: Pawlowski 2008).

2.11.2 MICROESTRUTURA

A microestrutura do revestimento aspergido será definida levando em consideração o comportamento das partículas antes de atingirem o substrato. Cortés *et. al* 1998 diz que para se entender a respeito de uma microestrutura é necessário o conhecimento prévio de formação da mesma.

2.11.3 FORMAÇÃO DE ÓXIDOS

Fatores como a atmosfera, alta temperatura e condições de fundição das partículas influenciam diretamente da formação de óxidos. Uma vez que as partículas entram em contato com a atmosfera ambiente cria uma camada de óxidos nas mesmas. Esse fenômeno causa o aumento da dureza do revestimento tornando-o quebradiço e diminuindo sua força coesiva de revestimento.

Berndt e Bernecki *et.al* 2004 listaram alguns parâmetros capazes de minimizar a formação de óxidos.

- Remoção de ambiente reativo através do uso de câmaras de gases inertes;
- Redução da temperatura média das partículas pela diminuição do poder calorífico dos jatos de aspersão;
- Redução da temperatura na superfície substrato / revestimento usando jatos de ar ou aumentando a velocidade de aspersão;
- Uso de partículas de pó para a alimentação com tamanho adequado. Partículas grandes têm uma razão área superficial por volume menor, o que minimiza a quantidade total de óxidos.
- O controle da distância entre a pistola e o substrato é de vital importância para a qualidade dos revestimentos. Fatores como oxidação em movimento, perda de energia cinética durante o transporte das partículas e temperatura da partícula no impacto estão relacionados com a distância. Pistolas automatizadas evitam tais problemas.

2.11.4 POROSIDADE

A porosidade encontrada nos processos de aspersão térmica afetam as propriedades físicas do material e, são inerentes a este processo. Os parâmetros estabelecidos para realização do processo de aspersão térmica tais como velocidade do jato, distância da pistola de aspersão, etc, irão definir a quantidade de poros que irão se formar na superfície do substrato. Este defeito (como mencionado anteriormente neste trabalho, a porosidade é considerada um defeito no

processo de aspersão térmica) pode permitir que o substrato entre em contato com o meio corrosivo, isso não é desejável uma vez que o revestimento tem a função de servir como uma barreira contra a corrosão (CORTÉS 1998; THORPE, 1993).

Cortés *et. al* (1988) apontou dois tipos de porosidades associados aos revestimentos, o primeiro tem relação aos poros grosseiros que se formam entre os interstícios do substrato provenientes da falta de energia cinética ou falta de fusão das partículas durante a colisão. Já o segundo tem relação aos poros finos que podem ser interpretados como a falta de contato entre as lamelas durante a formação da camada de revestimento.

A Figura 23 mostra o ângulo (α). Este ângulo surge após as partículas aspergidas aderirem ao substrato. Quanto menor for este ângulo, maior será a dificuldade de preenchimento do espaço durante a colisão entre as partículas, ocasionando assim a formação de poros nas cavidades (espaços) isoladas ou interconectadas (entre as lameas) (MENEZES, 2007). Esse ângulo pode ser medido através de análises metalográficas utilizando microscopia óptica ou microscopia eletrônica de varredura. Estas análises permitem detectar e medir espessura do revestimento, porosidade, óxidos, partículas não fundidas, contaminações, delaminação do revestimento e da interface do substrato (LIMA, 2002).

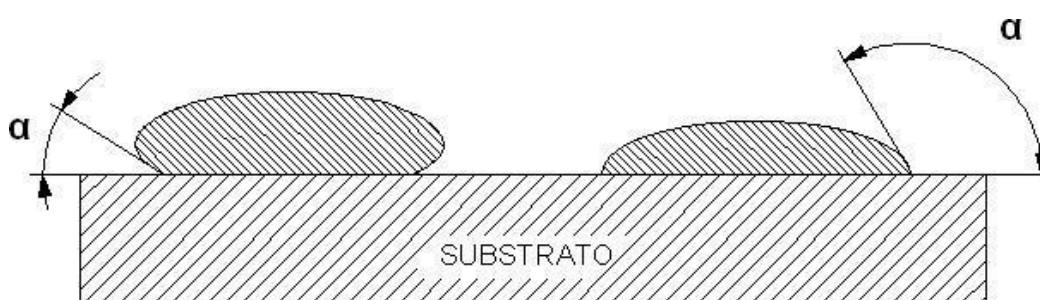


Figura 23 - Esquema de partículas aspergidas fazendo analogia com a tensão superficial de fluidos (Fonte: Cortés 1998).

2.11.5 ADERÊNCIA

A Figura 24 mostra a atuação da força de contração sofrida pelo substrato durante a colisão das partículas com o substrato, obtendo assim um formato lenticular durante a solidificação, esse fenômeno acontece devido a capacidade do revestimento de se aderir a superfície do substrato. Aderência esta que é uma característica básica de um bom revestimento (GIMENES, 2004). A aderência pode ser definida pela combinação dos fatores de ancoramento mecânico, químico-metalúrgico e físico. Esses fatores podem atuar de forma conjunta ou isolada.

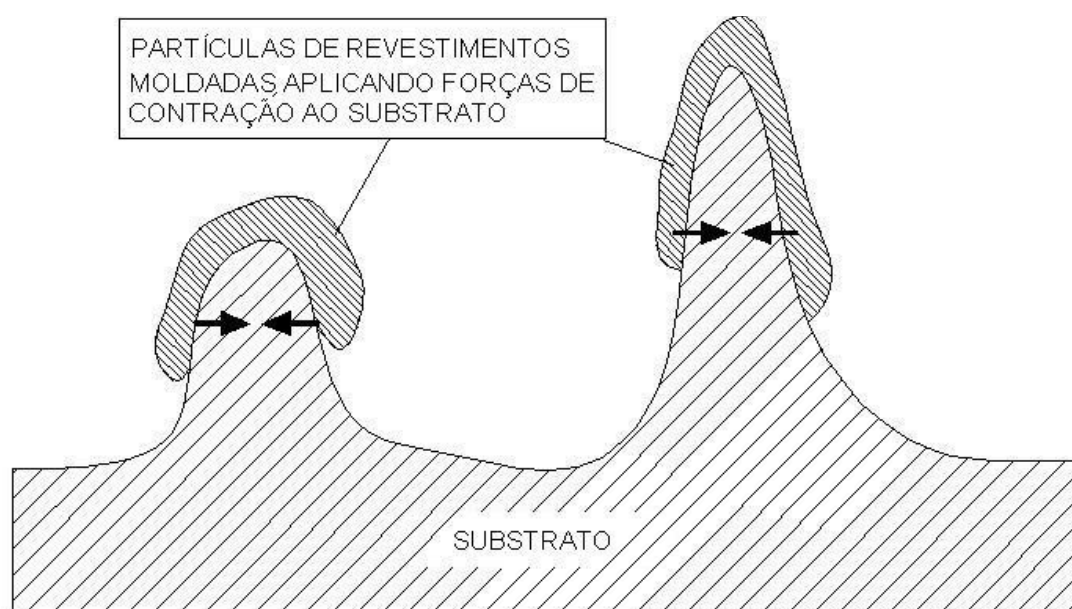


Figura 24 - Esquema de ancoragem mecânica lenticular na superfície rugosa do substrato (Fonte: Gimenes 2004).

2.11.6 MICROTRINCAS

As microtrincas são formadas durante a solidificação, onde ocorre uma restrição a contração térmica entre lamelas devido o aparecimento de tensões. As mesmas são aceitas somente em materiais cerâmicos pois nesses casos existe um aumento de da resistência a fadiga e o aumento da capacidade de deformação do material (LIMA E TREVISAN, 2002).

2.12 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Para garantir uma melhor qualidade de adesão do revestimento na superfície do material, é necessário que exista uma preparação da mesma. Este procedimento irá garantir que as partículas aspergidas obtenham o máximo de desempenho de aderência ao se colidirem com o substrato. A limpeza, a rugosidade, a camada de ligação e o preaquecimento, fazem parte deste processo de preparação e serão descritos a seguir.

2.12.1 LIMPEZA

É comum que a superfície do substrato contenha algum tipo de contaminante como por exemplo, ferrugem, graxa, óleos, etc. logo é de modo importante fazer a retirada desses contaminantes antes de se iniciar o processo de aspersão térmica.

Como já mencionado neste trabalho, a atmosfera interfere na qualidade superficial do substrato. Sabendo disso, é de suma importância que a aplicação do revestimento seja feita imediatamente após a limpeza da superfície do material para que o mesmo não volte a se contaminar (PAWLOWSKI, 1995).

Atualmente a limpeza das superfícies são realizadas de duas formas. A primeira é a limpeza mecânica, esta consiste na retirada dos contaminantes através de escovação, lixamento ou jato abrasivo (ar comprimido) que contenham um material mais duro que a superfície que será limpa. É indicado materiais abrasivos que facilitem a formação de irregularidades superficiais que auxiliem na hora do revestimento do substrato. Entretanto quando o jato abrasivo for escolhido deve se tomar o cuidado com o tempo de exposição para que não resulte em uma superfície inadequada. A Tabela 4 irá mostrar as principais características dos jatos abrasivos que irão facilitar a escolha na hora de realizar o processo de limpeza (MENEZES, 2007).

A segunda maneira é a limpeza química é dividida em três categorias: a detergência ou alcalina que é o meio mais utilizado para remoção de graxas, óleos e partículas de metais. Já a limpeza desgraxante utiliza o vapor na quente na remoção de graxas mais leves e por último é a decapagem que remove camadas de óxidos, hidróxidos e sulfetos (LIMA, 2002).

Tabela 4 - Características de abrasivos usados para jateamento (Fonte: Paredes, 2009).

Meio abrasivo	Origem	Principal componente químico	Forma	Densidade (g/cc)	Perda % *	Dureza Rockwell C
Aço coquilhado	Fabricado	Ferro	Angular	7.65	0	100
Ferro coquilhado	Fabricado	Ferro	Angular	7.40	8	97
Óxido de alumínio virgem	Fabricado	Alumínio	Cúbico	3.80	24	76
Óxido de alumínio reciclado	Fabricado	Alumínio	Cúbico	3.76	34	66
Granalha	Natural	Ferro Silício	Cúbico	4.09	46	54
Escória mineral	Fabricado	Sílica, Alumínio e Ferro	Cúbico	2.79	61	39
Areia silicosa	Natural	Sílica	Cúbico	2.61	77	23
Areia silicosa	Natural	Sílica	Angular	2.63	90	10
Carbeto de silício	Fabricado	Carbeto de Silício	Blocos	3.81	57	43
Areia comum	Natural	Sílica	Angular	2.62	84	16
* - Quantidade da amostra reduzida a um tamanho inaceitável num teste de jateamento padrão						

2.12.2 RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE

O processo de aspersão térmica requer uma boa qualidade superficial com características específicas que auxiliam na qualidade da mesma. Um parâmetro que ajuda atingir essa qualidade é quando a superfície do substrato possui mais zonas de contato onde o revestimento possa se adrir ao substrato através do ancoramento mecânico que é quando o revestimento ao se colidir com picos de rugosidade da superfície do substrato se aderem

mutuamente mantendo a forma lamelar que irá eliminar planos preferências de cisalhamento durante as camadas depositadas (FERRARESSI, 2011).

Lima e Tresvian (2002) dizem que se o parâmetro de rugosidade Ra se encontrar entre 2.5 e 13 μm então a superfície se encontra em boas condições para a adesão das partículas aspergidas. Logo a força de adesão do revestimento na superfície do substrato será proporcional ao aumento da rugosidade superficial. A Tabela 5 mostra as condições usuais de jateamento para se obter uma superfície mais rugosa, esse destaque se faz pois o jateamento é o procedimento mais adequado para atingir essas condições de rugosidade.

Tabela 5 - Condições usuais de jateamento para obtenção de rugosidade adequada (Fonte: adaptado de Lima 2002).

Tamanho do abrasivo	Material abrasivo	Pressão de ar (kPa)	Diâmetro do bocal (mm)	Tipo de equipamento	Substrato	Rugosidade Ra (mm)
24	Óxido de alumínio	414	7.9	Pressão	Aço	13
60	Carbeto de silício ou óxido de alumínio	414	7.9	Sucção	Inox	6
80	Óxido de alumínio	414	7.9	Pressão	Plástico	6

2.12.3 CAMADA DE LIGAÇÃO

As camadas de ligação são comumente usadas quando se está trabalhando com aços que sofreram algum tipo de tratamento que tenha alterado seu valor de dureza ou tenha passado por tempera e super ligas. Essas camadas de material tem a finalidade de tornar a superfície do substrato mais rugosa fortalecendo assim suas interações interatômicas, físicas e difusoras. Este processo pode trabalhar de forma conjunta ou isodamente com o processo de jato abrasivo, caso

se escolha a segunda opção pode vir a se obter uma superfície mais propícia para a adesão do revestimento (LIMA E TREVISAN, 2002).

2.12.4 PRÉ AQUECIMENTO DO SUBSTRATO

O pré-aquecimento (entre 90 a 150°C) é um processo que agrega muito na aspersão térmica pois ele age na redução das tensões internas, assim como na limpeza da superfície do substrato eliminando impurezas que possam estar presentes tais como, graxas (queima e volatilização), óleos e umidade através da queima dos mesmos utilizando dispositivos propícios (autônomos ou por indução) ou até mesmo a tocha do próprio dispositivo (pistola) de aspersão térmica. Em contra partida, esse processo pode ter um resultado reverso caso seja realizado por um longo período de tempo formando assim uma camada indesejada de óxidos que já discutido anteriormente é prejudicial para o processo de aspersão térmica pois pode aumentar a taxa de corrosão do substrato (THORPE, 1993).

2.13 TORNEAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS

Diante do alto desenvolvimento de máquinas-ferramentas que possuem propriedades como elevada rigidez, estabilidade dinâmica, potência e com precisão dimensional, se fez necessário desenvolver ferramentas de usinagem que fossem compatíveis com as mesmas. Assim foram desenvolvidos materiais ultraduros (cerâmicas e o PCBN) e seus revestimentos (ANEIRO, F. M.; COELHO, R. T.; BRANDÃO, L. C, 2008). O conceito mais encontrado na literatura sobre o processo de torneamento de materiais endurecidos define que este ocorre quando a dureza do material usinado é superior a 45 HRC (ASTAKHOV, V. P, 2011). Para Klocke *et.al*, (2005) a concepção de torneamento de materiais endurecidos é caracterizada quando a dureza do material usinado está acima de 50 HRC.

O processo de torneamento de materiais endurecidos surgiu como uma alternativa para substituir o processo de retificação que é o mais utilizado atualmente, uma vez que o processo de torneamento é capaz de produzir uma superfície tão boa quanto a da retificação quando trabalhado em baixas profundidades de corte e avanço, e em altas velocidades de corte. O processo de torneamento produz uma redução do tempo de produção (*lead-time*), flexibilidade do processo, qualidade superficial, facilidade de automação do processo e ausência de fluidos de usinagem, resultando em impactos financeiros e ambientais positivos (SURESH, R, 2012)

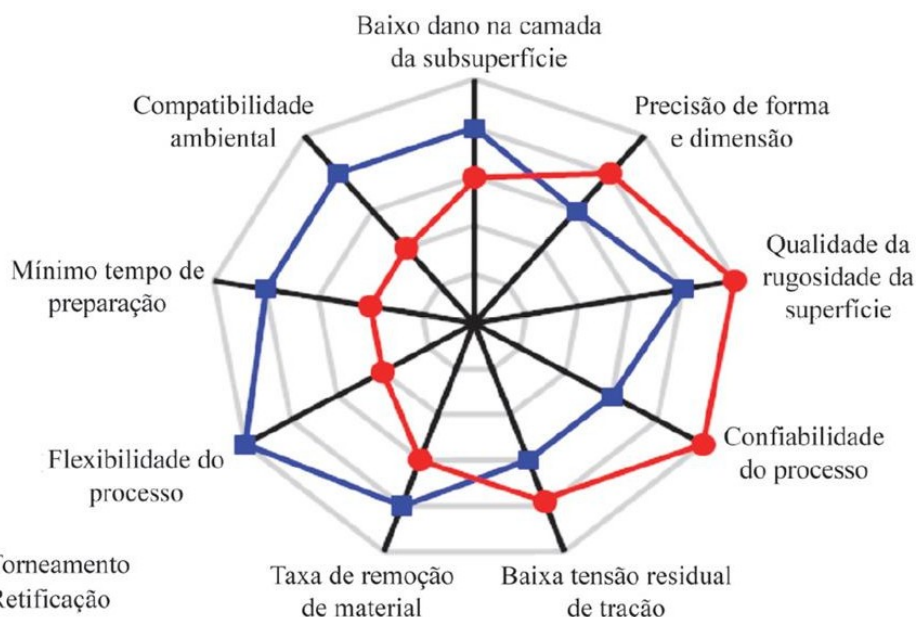


Figura 25 - Comparação das características dos processos de torneamento duro e retificação (Fonte: Klocke 2005).

Quando se compara os processos (Fig.25), o torneamento leva vantagem por ser um processo mais flexível e mais rápido, isso ajuda a reduzir o tempo de produção como também a possibilidade de combinação de múltiplas operações em uma mesma máquina.

Outro destaque é a compatibilidade ambiental que o torneamento apresenta, ou seja, a possibilidade de usinar a seco, resultando em vantagens econômicas e ecológicas se comparado à usinagem que utiliza fluido de corte. O uso de fluido de corte acaba fazendo com que o processo fique mais caro como também, o descarte incorreto do mesmo pode ocasionar a proliferação de doenças e contaminação do meio ambiente.

Destaca-se também na Figura 25 que o torneamento de materiais endurecidos possuem uma maior taxa de remoção de material e baixa taxa de danos na superfície da peça quando comparado com a retificação.

2.14 FERRAMENTAS DE CORTE DE MATERIAL CBN

O nitreto cúbico de boro (CBN) é um dos materiais de ferramenta classificados como superduros. Tais materiais possuem propriedades de dureza extremamente altas, excedendo 3.000 HV. Ferramentas de CBN são amplamente utilizadas na indústria para o corte de materiais endurecidos como aços ferramenta, aços para moldes, aço para rolamentos, aços-liga, aços cementados, ferros fundidos, ligas de ferro fundido e revestimentos duros com altas porcentagens de carboneto de tungstênio ou Cr-Ni aplicados por deposição ou soldagem por pulverização. (MACHADO *et al.*, 2009).

As classes de CBN são amplamente usadas para torneamento de acabamento em aços endurecidos, com uma dureza superior a 45 HRC. Acima de 55 HRC, o CBN é a única ferramenta de corte que pode substituir os métodos de retificação tradicionalmente usados. Os mesmos contêm uma quantidade maior de ferrita, o que causa um efeito negativo na resistência ao desgaste do CBN (FERRARESI, 2011). O custo do inserto de CBN é mais alto que o de material cerâmico, mas devido à maior vida da ferramenta de CBN, o custo do ferramental muito vezes é compensado não somente pelo maior número de peças usinadas por aresta de corte, como também pela consequente diminuição do tempo em que a máquina permanece parada para retirada da ferramenta gasta e ajustagem da nova.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve as etapas seguidas para o desenvolvimento deste trabalho, abrangendo as características da matéria-prima, ferramentas de corte e máquina ferramenta empregada. Os critérios e técnicas também são descritos.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

O corpo de prova utilizado neste trabalho tem formato cilíndrico, conforme mostrado na Fig. 26, com diâmetro $D = 76$ mm e comprimento $L = 370$ mm. O material base é o aço SAE 1020, endurecido por um revestimento AISI 420 pelo processo de aspersão térmica a arco a uma profundidade de aproximadamente $p = 1,5$ mm, consistindo de uma liga de aço inoxidável martensítico.



Figura 26 - Fotografia do corpo de prova com substrato de aço AISI 420 C aspergido termicamente (Fonte: Autor)

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA FERRAMENTA DE CORTE

Na confecção do processo de usinagem foi utilizado o inserto de CBN modelo TNMG 160408 3T CBN do fabricante DASAN (Figura 27). O porta-ferramenta utilizado foi o modelo MTJNR 2020 K16 (ângulo de posição = 93°) da fabricante Sandvick Coromant (Figura 28).

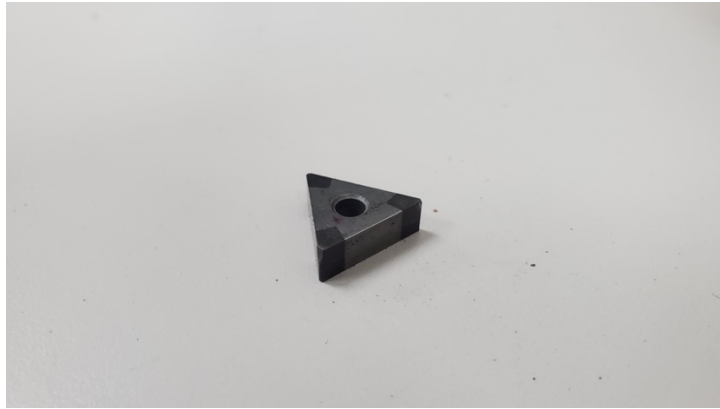


Figura 27 - Inserto cerâmico TNMG 160408 3T (Fonte: Autor)



Figura 28- Porta-ferramenta MTJNR 2020 K16 (Fonte: Sandvik Coromant 2021)

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE TORNEAMENTO

Através um passe foi removido uma camada de material afim de se manter uma melhor camada superficial, em seguida foi realizado um segundo passe em cada uma das 5 partições realizadas no corpo de prova para fazer as análises das componentes de força. O inserto TNMG 160408 3T CBN foi utilizado em cada execução para manter este parâmetro fixo e não interferir no processo. A profundidade de cada passe aplicado foi $ap = 0,2$ mm no diâmetro. Durante o passe houve uma variação de rotação da maquina-ferramenta em cada uma das partições do corpo de prova sendo essas variações de 500 RPM ($v_c = 119,38$ m/min), 800 RPM ($v_c = 191,01$ m/min), 1000 RPM ($v_c = 238,76$ m/min), 1250 RPM ($v_c = 298,45$ m/min) e 1600 RPM ($v_c = 382,02$ m/min). O processo de torneamento foi feito a seco, ou seja, não houve a utilização de

lubrificantes como sugerido por Polly *et. al*, (2019) por se tratar de uma usinagem com utilização de inserto CBN.

Para a confecção do torneamento foi utilizado a maquina-ferramenta MS 205 da Indústrias Nardini S/A (torno) (Figura 29) disponível no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS – CEFET/RJ). A rotação máxima do torno é de 2500 rpm e sua potência máxima de 23,5 kVA.



Figura 29 - Torno MS 205 da Indústrias Nardini S/A. (Fonte: Pinheiro.Caio 2021).

Os valores de avanço escolhido para o torneamento foram os mínimos disponíveis na maquina-ferramenta, pois segundo Rosa *et.al* para se atingir uma melhor qualidade superficial é recomendado o uso de baixos valores de avanço. Dessa forma avanço foi mantido constante igual $f = 0,042$ mm/rev .

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DOS SINAIS DAS COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM

O dispositivo Kistler modelo 9257 BA (Fig 30) também disponível no laboratório do CEFET/RJ foi utilizado para adquirir os dados de força. Este equipamento é um dinamômetro

piezoelétrico (também chamado de estágio piezoelétrico), o mesmo adquire as três componentes ortogonais da força de usinagem.



Figura 30 - Dinamômetro Kistler modelo 9257 BA (Fonte: Pinheiro. Caio 2021)

Juntamente com o dinamômetro foi utilizado um condicionador Kistler modelo 5233 A para captação, amplificação, e filtragem do sistema de monitoramento e aquisição dos sinais de forças, uma placa de aquisição de dados e um software específico também foram utilizados Figura 31.



Figura 31 - Condicionador de sinais Kistler modelo 5233 A (Fonte: Pinheiro. Caio 2021)

A placa de aquisição de dados National Instruments modelo NI USB-6221 (Figura 32), instalada em um microcomputador dedicado é responsável pela captação do sinal analógico que é fornecido pelo amplificador de carga. Além disso, o mesmo permite adquirir até 100 mil pontos por segundo (100 kS/s) em até oito entradas analógicas diferenciais com 16 bits de resolução.

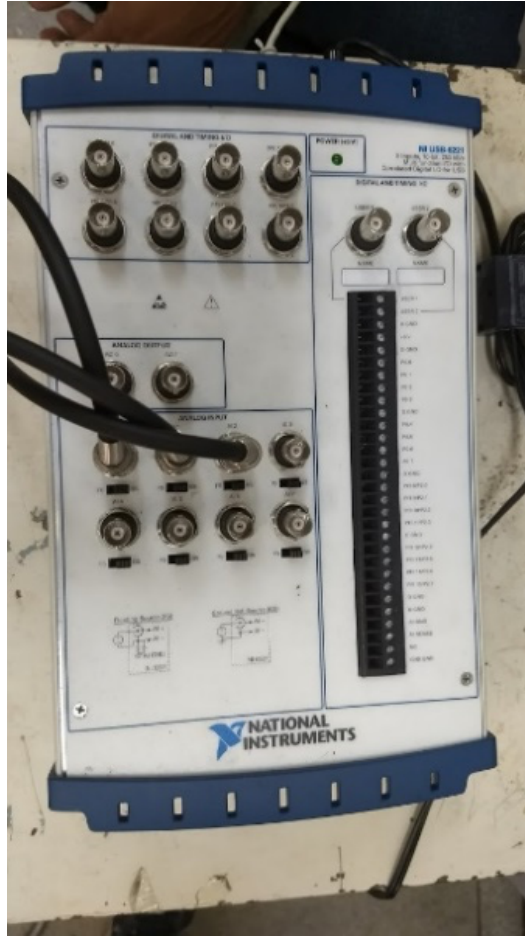


Figura 32 - Placa de aquisição de dados National Instruments modelo NI USB-6221 (Fonte: Pinheiro. Caio).

Posteriormente a isso são gerados sinais digitais em eixos X, Y e Z e são adquiridos através de sinais digitais, armazenados no computador, e posteriormente, foram plotados os gráficos para análise. Abaixo traz uma esquematização do processo de aquisição de dados (Fig.33).

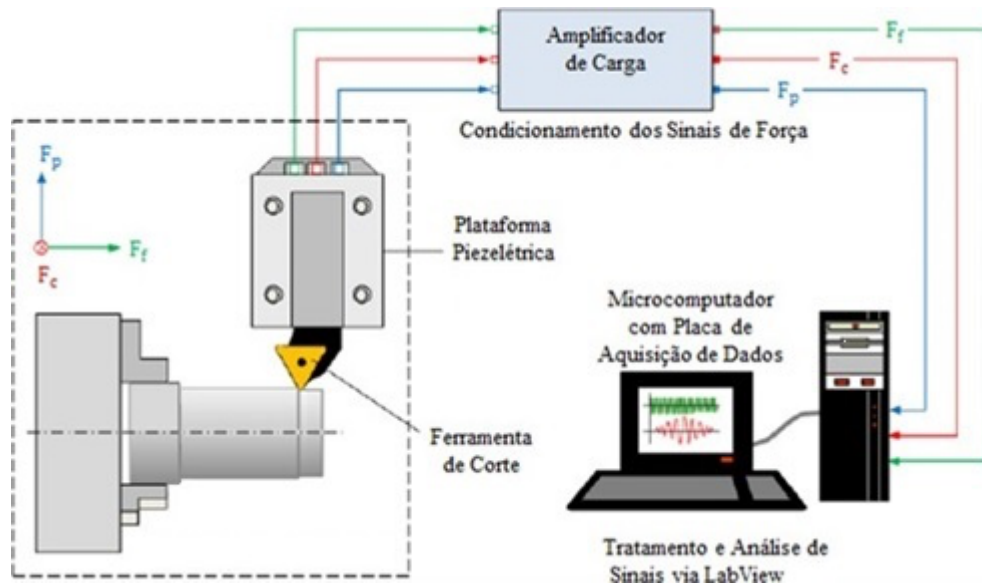


Figura 33 - Esquema representativo da aquisição dos sinais de força de usinagem utilizados neste estudo
(Fonte: adaptado de POLLY 2019).

3.5 CARACTERIZAÇÃO DA AQUISIÇÃO DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

O rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210P (Figura 34) foi utilizado para medir a rugosidade superficial do corpo de prova. O mesmo possui uma resolução de $0,01 \mu\text{m}$ e a agulha do apalpador possui raio de ponta de $5 \mu\text{m}$, com força de medição de 4 mN . O curso máximo é de $12,5 \text{ mm}$ e a velocidade de medição de $0,50 \text{ mm/s}$.

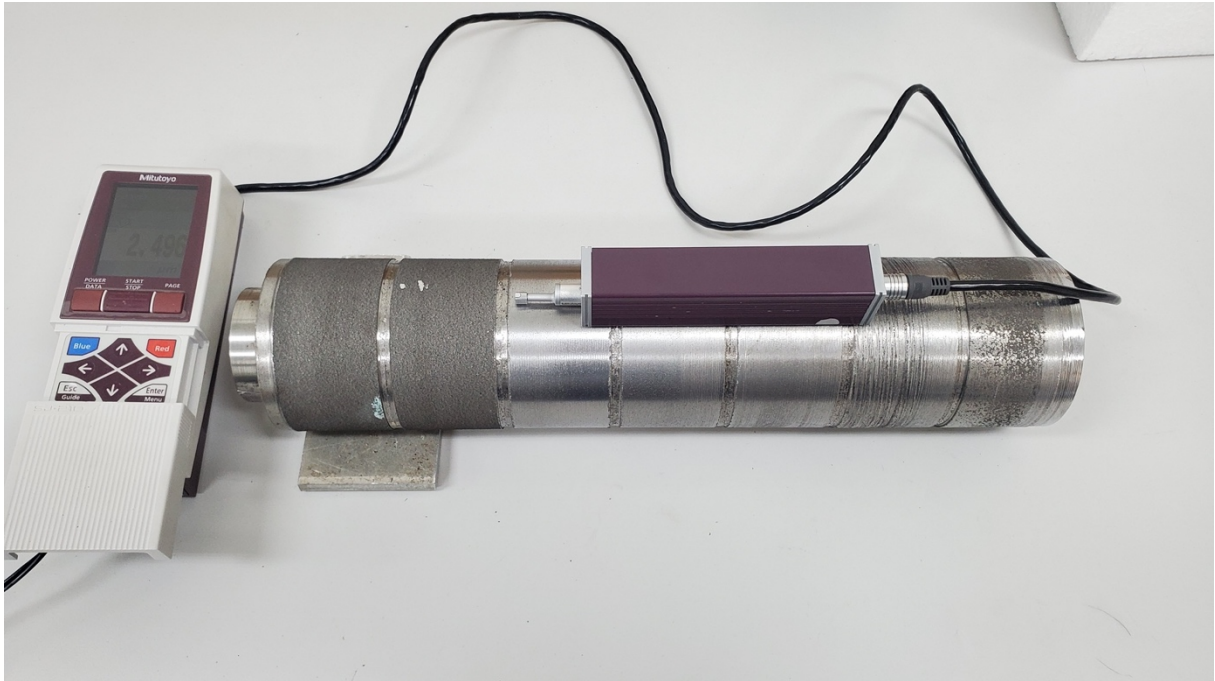


Figura 34 - Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210P (Fonte: Autor)

Os parâmetros de medição da rugosidade do corpo de prova foram o de cutoff em 2,5 e percurso de medição (l_m) de 12,5 mm. Após, as medições de rugosidade em cada uma das cinco condições estudadas, foram os parâmetros de R_a (rugosidade média), R_q (desvio médio quadrático), R_z (rugosidade média parcial) e R_t (rugosidade total).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM

Na seção a seguir será apresentado a análise do comportamento das forças de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p) que foram adquiridas através dos pontos recolhidos pelo dinamômetro e transformados em gráficos utilizando o programa microsoft excel.

4.1.1 RESULTADOS DAS COMPONENTES DE FORÇA EM DIFERENTES ROTAÇÕES

Na Figura 35 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 2 ($ap = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $vc = 119,38$ m/min (500 RPM).

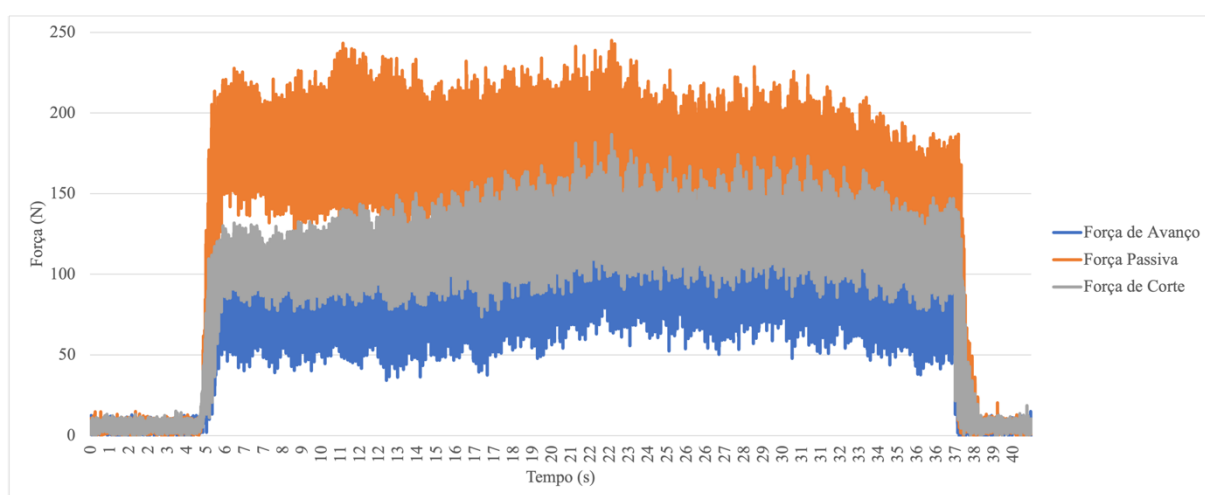


Figura 35 – Gráfico de força de corte | 500 RPM | $vc = 119,38$ m/min | $ap = 0,2$ mm

(Fonte: Autor)

Ao se utilizar uma rotação de 500 RPM ($vc = 119,38$ m/min) foram observados os maiores valores das componentes da força de usinagem. Este fator pode estar relacionado ao desgaste inicial do inserto utilizado juntamente com a faixa de velocidade de corte e de temperatura durante o processo. Uma vez que o aumento da temperatura em baixas rotações causa um aumento da dureza do material. Outro fator que pode ser observado é o alto valor da força passiva de corte segundo a literatura esse fator ocorre devido a combinação dos fatores

do aumento da resistência do material, do tipo de material e a escolha de um ângulo de saída negativa do cavaco. Este ângulo de saída negativo, faz com que a ferramenta tenha que utilizar mais força para cisalhar o material devido o aumento da profundidade de corte e conseqüentemente o aumento do plano primário e secundário. Esse comportamento também é encontrado nas rotações de 800 RPM ($v_c = 191,01$ m/min) (Fig.35) e 1000 RPM ($v_c = 238,76$ m/min) (Fig.36), a diferença é que nos últimos dois citados se mantem valores das componentes de força de usinagem menores (BOUCHA, 2010).

Na Figura 36 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 2 ($ap = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $v_c = 191,01$ m/min (800 RPM).

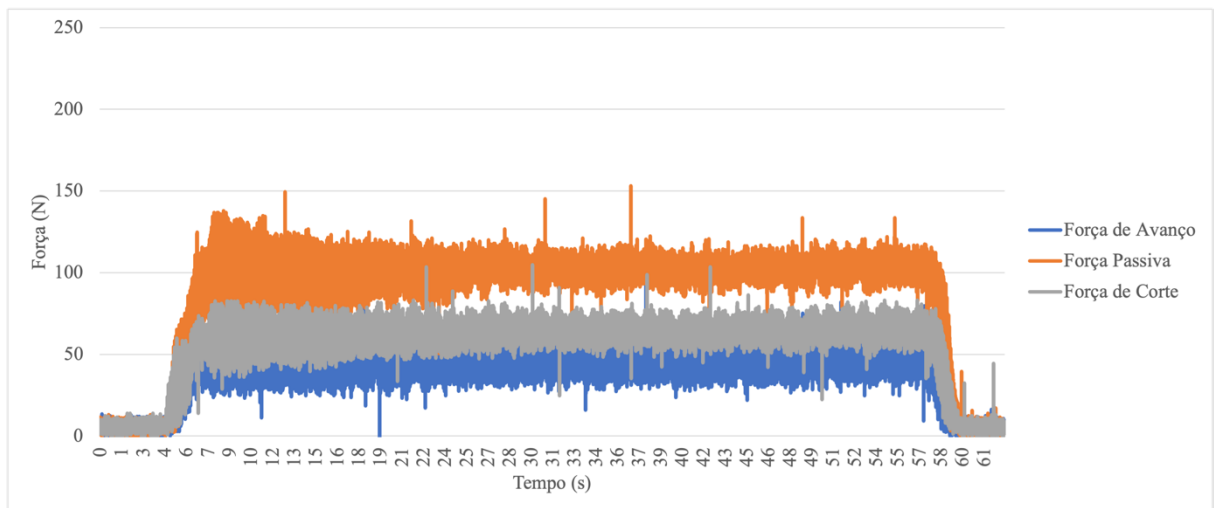


Figura 36 - Gráfico de força de corte | 800 RPM | $v_c = 191,01$ m/min | $ap = 0,2$ mm

(Fonte: Autor)

A Figura 37 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 2 ($ap = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $vc = 238,76$ m/min (1000 RPM).

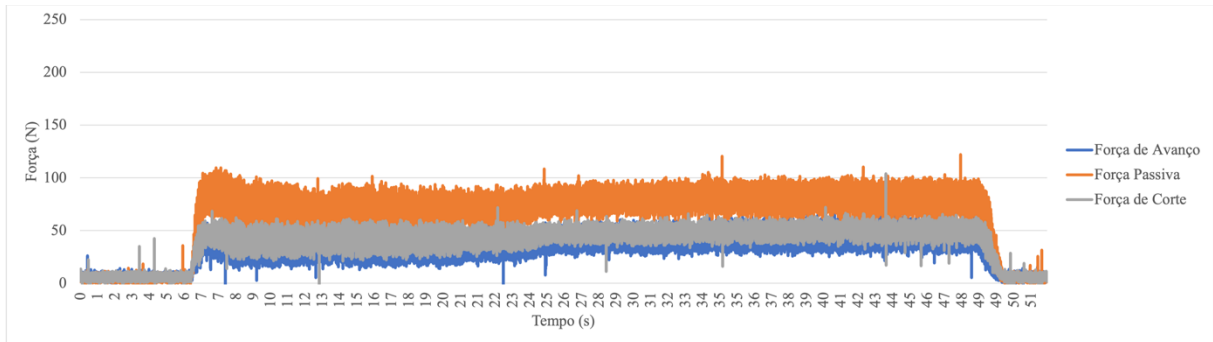


Figura 37 - Gráfico de força de corte | 1000 RPM | $vc = 238,76$ m/mim | $ap = 0, 2$ mm

(Fonte: Autor)

Na Figura 38 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 2 ($ap = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $vc = 298,45$ m/min (1250 RPM).

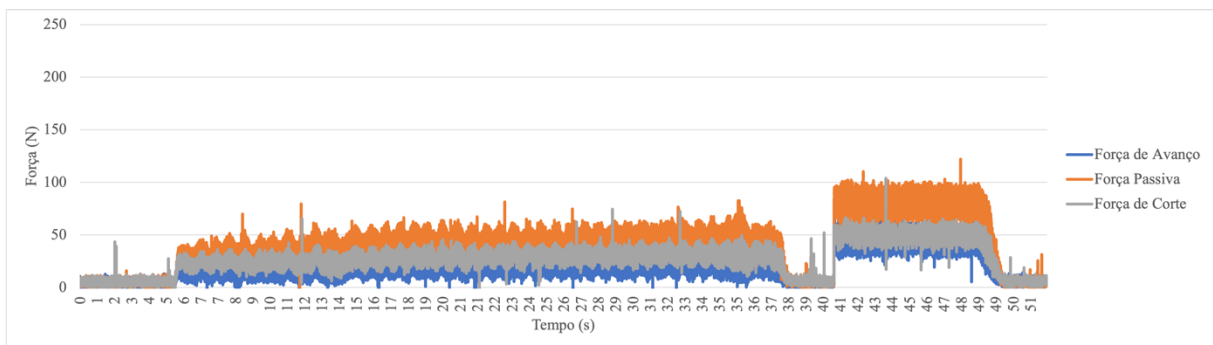


Figura 38 - Gráfico de força de corte | 1250 RPM | $vc = 298,45$ m/mim | $ap = 0, 2$ mm

(Fonte: Autor)

Nos gráficos representados pelas Figuras 37 e 38 é observado o mesmo comportamento da força passiva de corte, que demonstraram-se expressivas em todas as condições de corte como consequência da geometria do inserto utilizado. Outro fator que pode ser notado é uma alteração (picos) nas componentes de força de usinagem. Este fator pode ser justificado pelo

desgaste natural sofrido pela ponta da ferramenta que pode ter ocasionado um encruamento do material dificultando assim a remoção do cavaco (FERRARESI, 2011).

Na Figura 39 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 2 ($a_p = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $v_c = 382,02$ m/min (1600 RPM). Pode-se observar que as componentes de força se apresentaram mais baixas, entretando as mesmas se comportaram de forma mais irregular. As forças obtiveram uma diminuição, seguido de um aumento. Esse comportamento demanda novos estudos para avaliação do desgaste da ponta da ferramenta.

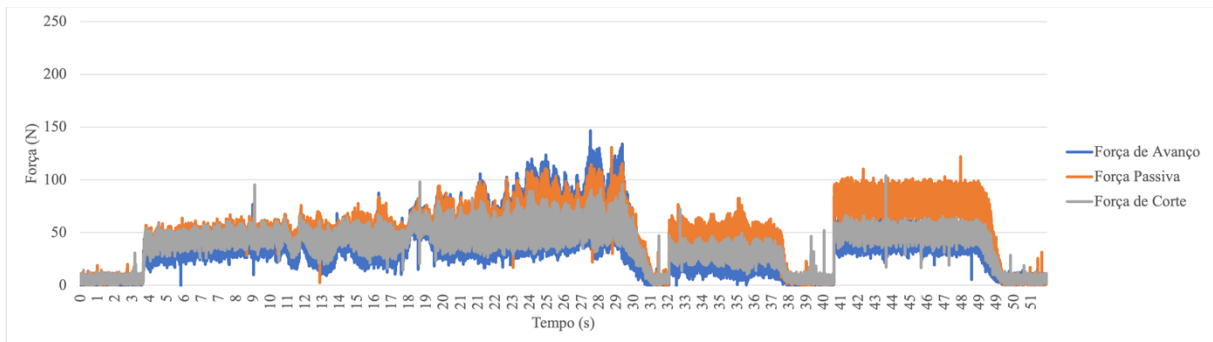


Figura 39 - Gráfico de força de corte | 1600 RPM | $v_c = 382,02$ m/min | $a_p = 0,2$ mm

(Fonte: Autor)

4.1.2 RESULTADOS DAS MÉDIAS DAS FORÇAS DE USINAGEM (F_u)

Devido ao aumento das velocidades de corte, ocorreu uma diminuição das médias das forças de usinagem em decorrência do aumento da temperatura, tornando a superfície do material usinado menos resistente a ferramenta de usinagem. Na $v_c = 382,02$ m/min (1600 RPM) houve um aumento na média da força devido ao desgaste da ferramenta de usinagem (Fig.40). Essas análises foram realizadas com o intuito de exemplificar de forma mais clara como os parâmetros atuam diretamente na força de usinagem.

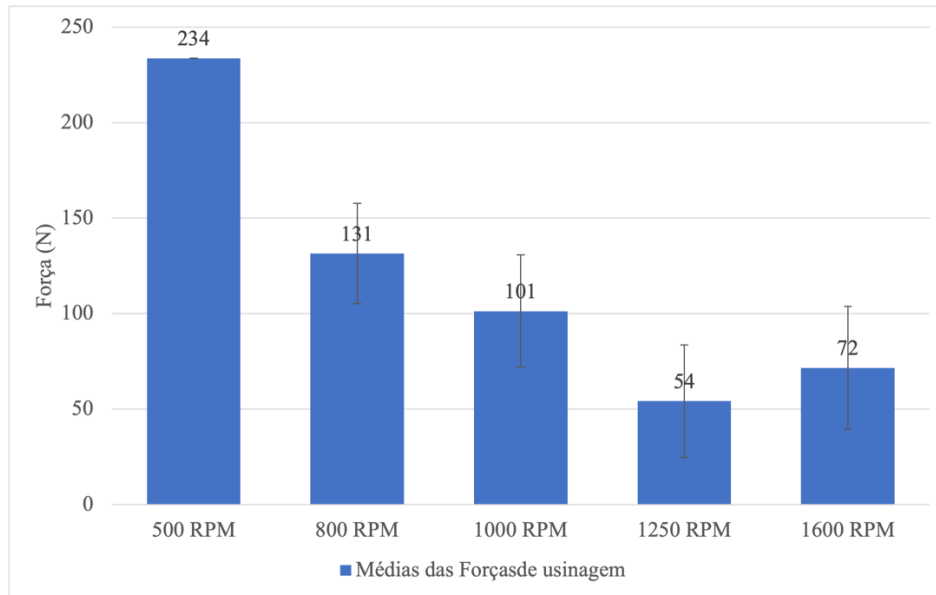


Figura 40 – Valores das médias das Forças de Usinagem com as variações da velocidade de corte (Fonte, Autor)

4.2 RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE

Os valores de rugosidade Ra (rugosidade média), Rq (desvio médio quadrático), Rz (rugosidade média parcial) e Rt (rugosidade total) registrados após a finalização do passe de retirada de material superficial do corpo de prova estão sendo representados na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6 -Dados de rugosidades adquiridos durante o processo de usinagem do corpo de prova (Fonte: Autor).

		Rugosidade			
1	n 500	Ra	3,561	3,414	3,612
		Rt	33,637	28,357	33,812
		Rz	23,605	21,518	28,905
2	n 800	Ra	2,278	1,569	1,708
		Rt	20,687	9,921	13,768
		Rz	14,311	9,762	10,467
3	n 1000	Ra	2,367	2,281	1,956
		Rt	32,372	31,684	11,404
		Rz	21,575	20,437	10,341
4	n 1250	Ra	2,338	2,159	2,069
		Rt	44,031	31,684	19,806
		Rz	25,126	20,437	16,877
5	n 1600	Ra	2,754	2,489	4,301
		Rt	29,684	20,374	36,494
		Rz	21,706	15,501	31,290

RESULTADOS COMPARATIVOS DOS VALORES DE Ra

Segundo Rosa (2017) o parâmetro de rugosidade Ra é o mais utilizado para avaliar a rugosidade em aplicações variadas. Os riscos superficiais inerentes ao processo, não alteram substancialmente o seu valor e para a maioria das superfícies, o valor da rugosidade neste parâmetro está de acordo com a curva de Gauss que caracteriza a distribuição de amplitude. fornecendo assim um resultado mais equilibrado. Sendo assim, o uso desse parâmetro possibilitou uma melhor análise dos resultados obtidos nesse trabalho. A Figura 41 mostra o comparativo entre os valores das médias de rugosidade Ra obtidos em diferentes velocidades de corte.

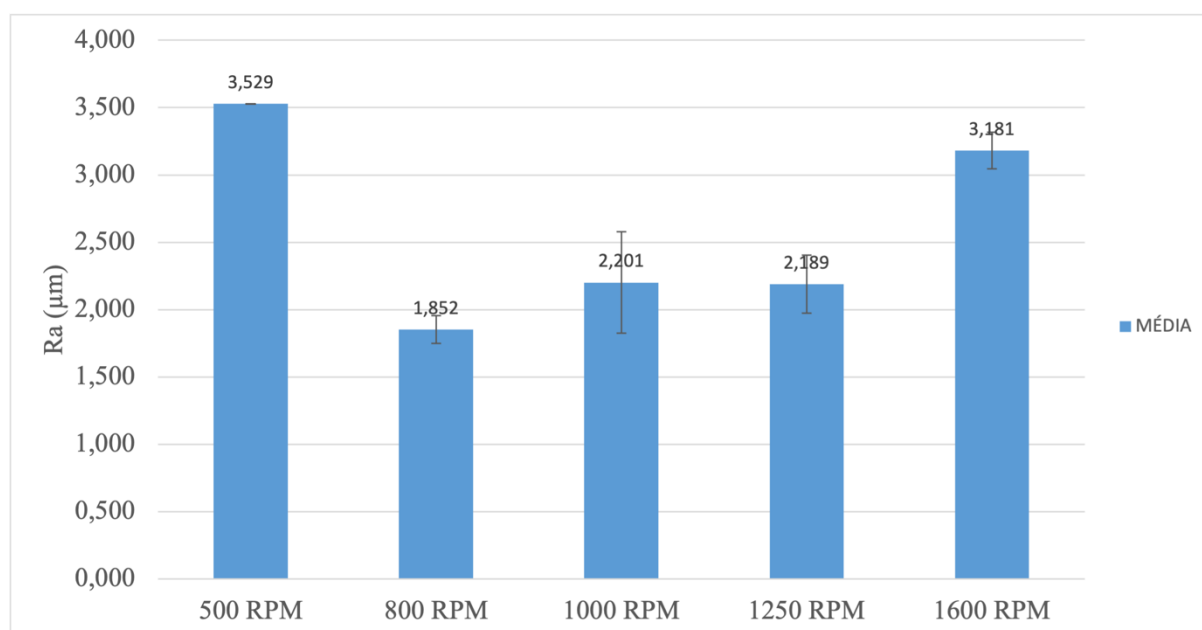


Figura 41 – Valores das médias de Ra com as variações de velocidade de corte (Fonte: Autor)

Segundo Rosa (2017) o aumento da força de avanço afeta de forma significativa os resultados de Ra. Ao se comparar as médias de Ra encontradas no experimento prático apresentado pela Fig.40 observou-se a interferência do aumento da força de avanço na qualidade superficial do material. Nas rotações de 500 RPM ($v_c = 119,38$ m/min) e 1600 RPM ($v_c = 382,02$ m/min) foram onde se encontraram os maiores valores de força de avanço perto

de 100N e 150N respectivamente como apresentados na seção anterior e os maiores valores de R_a .

5 CONCLUSÃO

Após o torneamento a seco do aço AISI 420 aspergido termicamente com uma camada de liga inox martensítica utilizando um inserto CBN de modelo TNMG 160408 3T do fabricante DASAN obteve-se as seguintes conclusões ao analisarem os resultados:

- Devido o ângulo de saída nulo do inserto resultou em expressivos valores nas forças passivas de corte ao longo de todo processo e em todas as rotações estudadas. Esse fator dificulta o cisalhamento do material e aumenta os planos primários e secundário.
- Nas rotações de 800 RPM ($v_c = 191,01$ m/min) e 1000 RPM ($v_c = 238,76$ m/min) as componentes de força mantiveram-se mais homogêneas, indicando assim que o inserto obteve boas condições de trabalho
- Observou-se que de modo geral, as condições de maiores velocidades tiveram menores forças resultantes. Entretanto, os os gráficos indicaram variações e irregularidades que podem indicar um desgaste acentuado da ferramenta de usinagem para essas condições.
- Em velocidades de corte mais baixas ($v_c = 119,38$ m/min), ocorreu ruído durante a usinagem, e isso pode indicar a presença de chatter. Isso impacta diretamente na rugosidade. Em 1600 RPM ($v_c = 382,02$ m/min) os gráficos de força descreveram corte irregular, que impacta diretamente na qualidade da superfície, e no Ra.
- A média das forças de usinagem diminuíram conforme as velocidades de corte aumentaram. A média força de usinagem na condição de 1600 RPM ($v_c = 382,02$ m/min) sofreu um aumento no último trecho usinado, indicando um possível desgaste da ferramenta.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEIRO, F. M.; COELHO, R. T.; BRANDÃO, L. C. Turning hardened steel using coated carbide at high cutting speeds. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 30, 2008.

ASTAKHOV, V. P. **Machining Of Hard Materials: Definitions and Industrial Applications**. In: Davim, J. D., *Machining of Hard Materials*, 2011. Springer- Verlag: London.

BERNARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G. S., 2003; *Predicting surface roughness in machining*; a review. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* v.43,1977.

BERNDT, C. C., BERNECKI, T., et.al, *Handbook of Thermal Spray Technology*, ASM International, ed USA, 2004.

BORBA, V. R.; BOING, D.; SCHROETER, R. B. **Avaliação das Componentes da Força de Usinagem no Torneamento do Aço 4340 (35 HRC) com Ferramentas de Metal-duro e PCBN**. In: XIX COLÓQUIO DE USINAGEM, Natal, 2015.

BOUACHA, K. et al. Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 28, 2010.

BYRNE, G.; DORNFELD, D.; DENDENA, B. *Advancing Cutting Technology*. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 52, n. 2, 2003.

C. R. Carpinetti. Luiz; Vila Gonçalves Filho. Eduardo; J. V. Porto. Arthur; Goulart Jasinevicius. Renato. *Rugosidade superficial Conceitos e Princípios de Medição*. Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia mecânica. São Paulo, 1996.

CORTÉS P. R. **Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica para a proteção do aço contra a corrosão marinha**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

DAGNALL H., *Exploring Surface Texture*, Rank Taylor Robson, 1986.

DENKINA, B.; BIERMANN, D. *Cutting Edge Geometries*. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 63, 2014.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. *Tecnologia na Usinagem Dos Materiais*, 7a Edição, São Paulo, Editora Artliber, 2010.

EBRAHIMI, A.; MOSHKARSAR, M.M. Evaluation of Machinability in Turning of Microalloyed and Quenched-Tempered Steels: Tool Wear, Statistical Analysis, Chip Morphology, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, 2009.

FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. 13 ed. São Paulo: Blucher, 1977.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgar Blücher Ltda, 2003.

FERRARESI, D.; **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, São Paulo: Blücher, 14a Edição, 2011.

GADELMAWLA, E.S; KOURA, M.M; MAKSOD, T.M.A; ELEWA, I.M; SOLIMAN, H.H. **Roughness parameters**. Journal of Materials Processing Technology 123 (2002), Elsevier, 2002.

GAMARRA, J. R. Estratégias de Usinagem no Torneamento de Aço Inoxidável Super Duplex (UNS S32750). 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GIMENES, L, SANTOS, E. F, TOLEDO, L. B, CARRILHO, M. S. **Comparativo entre os processos de aspersão térmica na manutenção**. Tese de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1 - Cutting**. Aachen: Springer, 2011.

KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K. Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. **CIRP Annals- Manufacturing Technology**, v. 54, 2005.

KORN, D. Hard turning might not be as hard as you think”. Modern machine shop review, 2004.

LIMA, C. C., TREVISAN, R. **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicação**. São Paulo – Artliber Editora, 2002.

LIMA, F. E. **Características do Processo de Torneamento de Materiais Endurecidos**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 152p., 2001.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 1a ed. São Paulo, Editora Blucher, 2009.

MARQUES.P,V. Aspersão Térmica, American Welding Society, Miami, 2003.

MENEZES, D. D. **Avaliação da resistência à corrosão de revestimentos de alumínio aplicados pelas técnicas de arco elétrico e chama convencional em meio cloreto**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

NAKAYAMA, K.; ARAI, M.; KANDA, T. Machining characteristics of hard materials. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 37, 1988.

NUNES, L. T. Análise estatística da influencia dos parâmetros de corte na rugosidade do torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

PAREDES, Ramón S. C. **Aspersão Térmica**. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica. Curitiba, 2009.

PAWLOWSKI, L. **The science and engineering of thermal spray coatings**. England: John Wiley & Sons, 1995.

PINHEIRO.C. CAIO. **INFLUÊNCIA DA USINAGEM NAS CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS DE REVESTIMENTO OBTIDOS POR ASPERSÃO TÉRMICA**, Rio de Janeiro, 2021.

POLLY, C. M.; **Análise comparativa de ferramentas de metal-duro classe s e cerâmica mista no torneamento a seco e com mql do aço sae 4340 endurecido**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2019.

ROSA, C. G.; **Estudo Da Usinabilidade No Torneamento A Seco Do Aço Inoxidável Martensítico Aisi 420 C Endurecido Com Ferramenta De Metal-Duro**. Tese de doutorado, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2017.

SANDVIK COROMANT. STEEL TURNING ENDURANCE, Disponível em: <

<http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/campaigns/cutting-steel-inserts/assets/white-paper-eng.pdf>>. Acesso em: 25 de Outubro de 2021.

SHARMAN, A. R. C.; HUGHES, J. I.; RIDGWAY, K. An Analysis of the residual Stresses Generated in Inconel 718 When Turning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 173, 2006.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais.. 5 ed. , Porto Alegre: AMGH, 2012.

SOUZA, D. J. A. D.; SCHROETER, R. B; WEINGAERTNER, W. L.; TEIXEIRA, C. R. Estudo da influência da geometria do gume no desgaste. **6o Congresso Brasileiro de Engenharia e Fabricação - COBEM 2011**, Caxias do Sul - RS, 2011.

STEMMER, C. E. **Ferramenta de corte I**. 7a. ed. Florianópolis: UFSC, 2007.

STOUT, K. J., Surface roughness: measurement, interpretation and significance of data, part II, *Materials in Engineering*, vol. 2, dezembro, 1981.

SURESH, R. et al. Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 33, 2012.

THORPE, M. L. **Thermal spray – industry in transition**. *Advanced Materials & Process*, v.5, 1993.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K.; **Metal Cutting**, 4.ed., Butterworth-Heinemann, 2000.

WIEDENHÖFT, Aldoni Gabriel. Processos de fabricação por usinagem: Movimentos em usinagem e terminologia de ferramentas. Alegrete: Universidade Federal do Pampa, 2010.

