

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**CAMILA MORANI BENICIO DA SILVA
PEDRO HENRIQUE DOS SANTOS RIBEIRO**

**COMPORTAMENTO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS QUANDO
SUBMETIDOS AO TORNEAMENTO COM INSERTOS DE CBN**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RIO DE JANEIRO

2023

CAMILA MORANI BENICIO DA SILVA
PEDRO HENRIQUE DOS SANTOS RIBEIRO

**COMPORTAMENTO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS QUANDO
SUBMETIDOS AO TORNEAMENTO COM INSERTOS DE CBN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Educação Superior, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tatiane de Campos Chuvás

RIO DE JANEIRO

2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S586 Camila Morani Benicio da Silva
Comportamento de revestimentos aspergidos quando submetidos ao torneamento com insertos de CBN / Camila Morani Benicio da Silva [e] Pedro Henrique dos Santos Ribeiro – 2023.
65f.: il. (algumas color.), enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.
Bibliografia: f. 61-65.
Orientadora: Tatiane de Campos Chuvas.

1. Engenharia mecânica. 2. Revestimentos. 3. Torneamento.
I. Ribeiro, Pedro Henrique dos Santos. II. Chuvas, Tatiane de Campos (Orient.). III. Título.

CDD 620.1

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 nº 5281

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por nos ter dado saúde, esperança e força para concluirmos o curso.

A nossa família pelo apoio, suporte e confiança durante todos esses anos da graduação. Aos amigos conquistados durante os anos de graduação, que sempre ajudaram com conhecimento, apoio e incentivo.

Agradeço a professora Tatiane Chuvás pela orientação, por todo aprendizado e disponibilidade para nos direcionar ao longo deste trabalho. Ao professor Brenno, que nos orientou na utilização do laboratório. Aos professores do curso que nos proporcionaram conhecimentos em diversas áreas e contribuíram para nossa formação.

Agradeço a minha dupla, que foi meu parceiro durante todo o curso, apoiando nos estudos e na vida, que desde o início aceitou o desafio que sabíamos que não seria fácil, e com ajuda e motivação um do outro, conseguimos concluir este trabalho.

RESUMO

A indústria metal-mecânica está buscando constantemente que seus equipamentos tenham vida útil elevada, podendo operar durante muito tempo sem perder a eficiência, mesmo em ambientes hostis para os materiais dos componentes. Assim, o revestimento surge como uma alternativa de excelente custo-benefício para aprimorar a durabilidade de um material, prolongando sua vida útil e evitando problemas financeiros e operacionais ligados à substituição de componentes. Uma das formas de revestimento mais aplicadas é a aspersão térmica por arco elétrico, gerando uma camada protetora de alta durabilidade e resistência à fenômenos ligados ao aumento de temperatura e corrosão. Por conta do aspecto poroso de sua superfície, surge a necessidade de dar acabamento ao componente por meio de usinagem, um processo relativamente complexo levando em conta a necessidade do uso de ferramentas de alta dureza. Assim, o presente estudo busca avaliar o desempenho de insertos de nitreto cúbico de boro (CBN) no torneamento a seco de uma amostra revestida com liga com 13% Cr através de aspersão térmica. Foram analisadas as magnitudes das forças de usinagem e a rugosidade da superfície para diferentes velocidades de corte (de 150 m/min a 375 m/min). Os resultados mostraram que a velocidade de 295 m/min é a mais adequada em questão de esforços gerados e integridade superficial adquirida.

Palavras-chave: Torneamento. Inseto de CBN. Aspersão térmica.

ABSTRACT

The metal-mechanical industry is constantly seeking to ensure that its equipment has a long useful life, being able to operate for a long time without losing efficiency, even in hostile environments for the component materials. Thus, coating appears as an excellent cost-benefit alternative to improve the durability of a material, prolonging its useful life and avoiding financial and operational problems linked to component replacement. One of the most applied forms of coating is thermal spraying by electric arc, generating a protective coating of high durability and resistance to phenomena linked to increased temperature and corrosion. Due to the porous appearance of its surface, there is a need to finish the component through machining, a relatively complex process considering the need to use highly hard tools. Therefore, the present study seeks to evaluate the performance of cubic boron nitride (CBN) inserts in the dry turning of a sample coated with an alloy with 13% Cr through thermal spraying. The magnitudes of machining forces and surface roughness for different cutting speeds (from 150 m/min to 375 m/min) were analyzed. The results showed that the speed of 295 m/min is the most appropriate in terms of generated efforts and acquired surface integrity.

Keywords: Machining. CBN Insert. Thermal spray.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Movimentos no torneamento	13
Figura 2 - Vetores de velocidade no plano de trabalho em torneamento.....	14
Figura 3 - Parâmetros de corte.....	16
Figura 4 - Comportamento da dureza com o aumento de temperatura de Stellite 100 e dois aços-rápidos	17
Figura 5 - Faixas de velocidades de máximo rendimento no torneamento de uma liga de alumínio.....	18
Figura 6 - Dureza e tenacidade de materiais para ferramentas de corte	20
Figura 7 - Insetos revestidos com CBN.....	21
Figura 8 - Micrografias de amostra de CBN, aumento de 1000x	21
Figura 9 - Torneamento de Ferro Fundido Vermicular: tempos de corte de ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN	22
Figura 10 - Componentes da força de usinagem no torneamento	23
Figura 11 - Corte ortogonal.....	24
Figura 12 - Formação de cavaco no corte ortogonal.....	25
Figura 13 - Parâmetro de rugosidade Ra	27
Figura 14 - Parâmetro de rugosidade Rt.....	27
Figura 15 - Parâmetro de rugosidade Rz	28
Figura 16 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta.....	29
Figura 17 - Parâmetros de medição de desgastes de uma ferramenta	30
Figura 18 - Mecanismos de desgaste	31
Figura 19 - Esquema de aplicação de revestimento por aspersão térmica	32
Figura 20 - Classificação dos processos de aspersão térmica	33
Figura 21 - Aspersão térmica com arame fundido por arco elétrico	34
Figura 22 - Camada depositada por aspersão térmica	35
Figura 23 - Efeitos da velocidade das partículas na morfologia do revestimento, aspergidas num substrato polido de aço inoxidável 304	36
Figura 24 - Imagens de camada aspergida, ampliação de 200x e 1000x	36
Figura 25 - Esquema de ancoragem mecânica das partículas na superfície rugosa do substrato.....	37
Figura 26 - Comparação de rugosidade Ra por ferramenta no torneamento de camada aspergida termicamente - NiCrBSi.....	39
Figura 27 - Curvas que mostram a quantidade de trincas térmicas geradas em função da velocidade de corte, com e sem o uso de fluido de corte.	40
Figura 28 - Amostra usinada	41
Figura 29 - Desenho esquemático da amostra (cotada em milímetros).....	42
Figura 30 - Torno MS 205	42
Figura 31 - Dimensionamento do porta-ferramenta.....	43
Figura 32 - (a) Dimensionamento do inserto (b) Inserto real	44
Figura 33 - Dinamômetro Kistler modelo 9257 BA	45
Figura 34 - Posicionamento do Dinamômetro no torno com indicação dos eixos.....	46
Figura 35 - Condicionador de sinais Kistler modelo 5233 A	46
Figura 36 - Placa de aquisição de dados National Instruments modelo NI USB-6221....	47
Figura 37 - Posicionamento do rugosímetro sobre a amostra retificada	48
Figura 38 - Forças de Usinagem, exemplo de primeiro passe	50
Figura 39 - Forças de Usinagem $v_c = 150\text{m/min}$ (a) Passe 2 (b) Passe 3	50
Figura 40 - Forças de Usinagem $v_c = 190\text{m/min}$ (a) Passe 2 (b) Passe 3	51

Figura 41 - Forças de Usinagem $v_c = 295\text{m/min}$ (a) Passe 2 (b) Passe 3	52
Figura 42 - Forças de Usinagem $v_c = 375\text{m/min}$ (a) Passe 2 (b) Passe 3	52
Figura 43 – Inseto de CBN com ponta quebrada	53
Figura 44 - Comparação das Forças de Usinagem Médias.....	54
Figura 45 - Valores de R_a médio (μm) entre as velocidades.....	56
Figura 46 - Valores máximos e mínimos de R_z (μm) entre as velocidades	56
Figura 47 - Valores máximos e mínimos de R_t (μm) entre as velocidades.....	57
Figura 48 – Comparativo entre Rugosidade R_a e Forças de Usinagem Médias.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das Propriedades Físicas do Cermet (TiC) com o metal duro (WC)	19
Tabela 2 – Variação das Velocidades de Corte	45
Tabela 3 - Dados de rugosidade da amostra usinada e da amostra retificada (em μm) ..	55

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	15
Equação 2	15
Equação 3	23
Equação 4	26

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE EQUAÇÕES.....	10
SUMÁRIO.....	11
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 TORNEAMENTO	13
2.1.1 Parâmetros de corte	14
2.2 FERRAMENTAS DE CORTE.....	16
2.2.1 Materiais para Ferramentas.....	16
2.2.2 CBN.....	20
2.3 FORÇA DE USINAGEM	23
2.3.1 Corte Ortogonal.....	24
2.4 INTEGRIDADE SUPERFICIAL	26
2.4.1 Rugosidade	26
2.5 DESGASTE DA FERRAMENTA	28
2.6 ASPERSÃO TÉRMICA.....	31
2.6.1 Aspersão por arco elétrico	33
2.6.2 Propriedades dos revestimentos produzidos por aspersão térmica	34
2.6.3 Usinagem de camada aspergida	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA	41
3.2. TORNEAMENTO	42
3.2.1. Ferramenta de corte.....	43
3.2.2 Parâmetros de Corte	44
3.2.3. Sistema de aquisição das forças de usinagem.....	45
3.3. PARÂMETROS DE RUGOSIDADE.....	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1. FORÇAS DE USINAGEM	49
4.2. RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE.....	54
5. CONCLUSÕES.....	59
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1. INTRODUÇÃO

Na atual conjuntura, não há dúvidas quanto ao tamanho e a importância da indústria de petróleo e gás, sendo uma das principais matrizes energéticas empregadas em todo o mundo. No Brasil não é diferente, pois segundo o IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás), em 2019, o Brasil já ocupava o quarto lugar no ranking de exportação de petróleo. Contudo, o ambiente marítimo é conhecido por ser hostil em relação aos materiais aplicados na extração, principalmente por conta dos mecanismos de corrosão, que ocorrem por conta da presença de cloretos dissolvidos em água, além de gases e micro-organismos, sendo a corrosão por pites o mecanismo mais perigoso.

Nesse contexto, materiais resistentes ao ambiente marítimo têm sido desenvolvidos, dentre eles, destaca-se o aço inoxidável martensítico. MARIANO *et al.* (2005) afirma que dentre os materiais estudados, os aços inoxidáveis martensíticos se mostram uma opção eficaz e ao mesmo tempo econômica, pois como exposto por LINTER & BURSTEIN (1999), possuem alta resistência à corrosão em meio marítimo, causada por cloretos e outras substâncias como CO₂ e H₂S. Assim, sua aplicação se torna desejável em tubulações e componentes de bombas e quaisquer outros equipamentos que trabalharão em contato com a água do mar.

Entretanto, o aço inoxidável ainda é um produto que tem um elevado valor agregado em comparação com aço carbono comum, por este motivo, torna-se mais econômico usá-lo como revestimento ao invés de fabricar componentes formados inteiramente por ele. O processo de revestimento por aspensão térmica surge como uma excelente alternativa, visto que já é um procedimento consolidado nas mais diversas áreas industriais, desde a automotiva à aeroespacial, e ultimamente, têm sido aplicados em equipamentos voltados para biomedicina. Tal abrangência evidencia que o procedimento se mostra muito eficiente, prático e de considerável custo-benefício. (AMIN, 2016).

Materiais revestidos dessa maneira normalmente exigem acabamento posterior, por conta do aspecto poroso que o revestimento possui, como aponta PAREDES (2012). Quanto ao processo em si, a retificação para componentes cilíndricos normalmente resulta em melhores valores de rugosidade se comparada ao torneamento cilíndrico, porém, segundo BOING (2010), o processo de torneamento possui algumas vantagens sobre a retificação, como o fato de ser uma operação mais rápida, mais flexível (pode usinar superfícies mais complexas) e conseqüentemente, mais barata. Atualmente, com a disponibilidade de materiais ultraduros para ferramentas, é possível realizar desbaste de materiais endurecidos de forma satisfatória.

O presente estudo utiliza como ferramenta insertos de CBN, justamente por conta da alta dureza do material, e busca analisar sua eficácia e o impacto da alteração da velocidade de corte no torneamento cilíndrico de uma amostra revestida por uma camada aspergida termicamente, semelhante a uma liga inox martensítica com 13% Cr, comparando os resultados com outra amostra de mesmo material e revestimento, porém retificada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico serão abordados conhecimentos teóricos acerca dos processos empregados no trabalho, conceitos que permeiam o torneamento com inserto de CBN e revestimento por aspensão térmica a arco elétrico.

2.1 TORNEAMENTO

O torneamento consiste no processo de usinagem que se baseia no movimento de rotação da peça em torno de seu próprio eixo, que possibilita a fabricação de peças de formato cilíndrico para diversas utilidades. Para o procedimento, é utilizada uma máquina operatriz chamada de torno, que realiza um movimento linear com uma ferramenta de corte responsável pela remoção periférica do material.

Segundo a NBR 6162:2012, movimento de corte é o movimento relativo entre a aresta de corte da ferramenta e a peça, no qual origina uma única remoção de cavaco, durante uma rotação ou um curso. COELHO *et al.* (2015) evidencia que o processo é realizado por meio de três movimentos diferentes, como mostra a Figura 1, que ocorrem entre a peça e a ferramenta, sendo estes: movimento de corte, rotação da peça (1); movimento de penetração, translação da ferramenta (2); movimento de avanço (3).

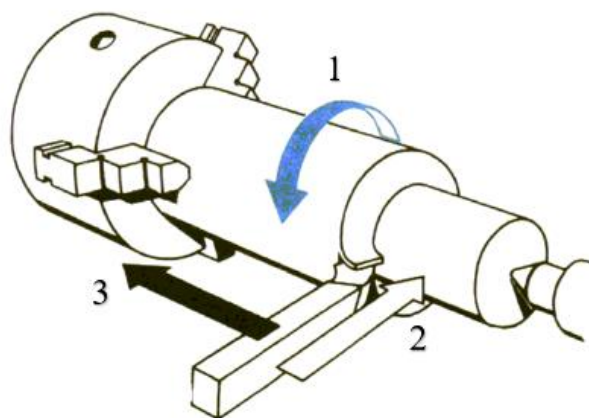


Figura 1 - Movimentos no torneamento

Fonte: COELHO *et al.* (2015)

2.1.1 Parâmetros de corte

Usando como base a NBR 6162:2012, parâmetros de corte são grandezas numéricas que representam valores de deslocamento da ferramenta ou da peça, adequados ao tipo de trabalho a ser executado, ao material a ser usinado e ao material da ferramenta. Os parâmetros ajudam a obter uma perfeita usinagem por meio da utilização racional dos recursos oferecidos por determinada máquina-ferramenta. O operador considera principalmente os parâmetros de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, como mostra a Figura 2, onde estão indicados alguns vetores de velocidade que serão abordados posteriormente.

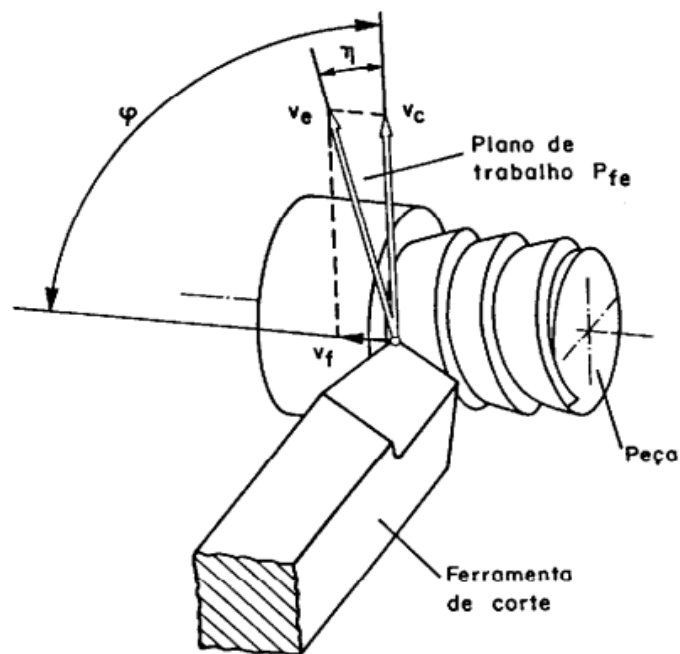


Figura 2 - Vetores de velocidade no plano de trabalho em torneamento

Fonte: NBR 6162:2012

A determinação desses parâmetros depende de muitos fatores: o tipo de operação, o material a ser usinado, o tipo de máquina-ferramenta, a geometria e o material da ferramenta de corte. Além disso, os parâmetros se inter-relacionam de tal forma que, para determinar um, geralmente, é necessário conhecer os outros.

Segundo a NBR 6162:2012, a escolha da velocidade de corte (V_c) correta é importante tanto para a obtenção de bons resultados de usinagem, quanto para a manutenção da vida útil da ferramenta e para o grau de acabamento. Para as operações onde os movimentos de corte e

de avanço ocorrem simultaneamente, como no torneamento, a velocidade de corte é calculada pela Equação 1:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ [m/min]} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

V_c = velocidade de corte [m/min];

d = diâmetro da peça [mm];

n = rotações por minuto da ferramenta [rpm].

A mesma norma também evidencia que o avanço (f) é o percurso linear realizado pela ferramenta em cada volta ou em cada curso (mm/rotação). Esses valores são tabelados, publicados em catálogos dos fabricantes das ferramentas, e estão relacionados com material a ser usinado, a ferramenta e a operação de usinagem. A velocidade de avanço (V_f), para operações do tipo torneamento, é o produto do avanço pela rotação da ferramenta, como mostra a Equação 2.

$$V_f = f \cdot n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d} \cdot f \text{ [mm/min]} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

V_f = velocidade de avanço [mm/min];

f = avanço [mm/rotação]

A profundidade de corte (a_p) é o quanto a ferramenta penetra na peça, é medida perpendicularmente ao plano de trabalho, como mostra a Figura 3.

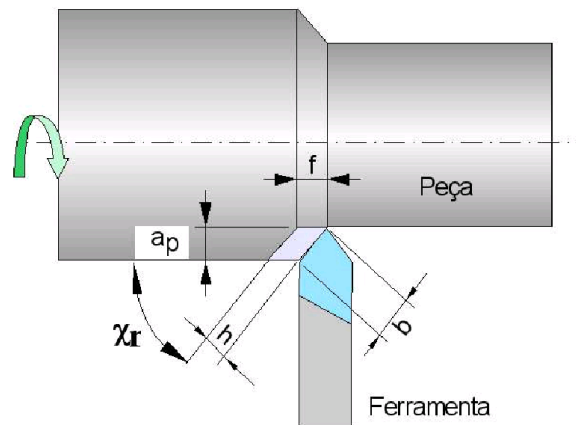


Figura 3 - Parâmetros de corte

Fonte: DINIZ (2013)

2.2 FERRAMENTAS DE CORTE

A ferramenta constitui um elemento fundamental no processo de usinagem, por isso, é necessário considerar fatores específicos para a escolha dos insertos, de modo que a ferramenta seja a mais adequada. Por essa razão, a escolha do material deve ser realizada com cautela.

2.2.1 Materiais para Ferramentas

COELHO & SILVA (2018) mencionam a existência de diferentes classes de materiais para ferramentas de usinagem, incluindo as vantagens e desvantagens dos principais tipos, já que não há material que possua todas as características desejadas em um nível elevado, como dureza, resistência ao desgaste, resistência à temperatura, ser quimicamente inerte e ser altamente resistente à esforços de compressão, cisalhamento e impacto. Resumidamente, esses materiais podem ser divididos em:

- ⇒ Aços Carbono e Ligados
- ⇒ Aços Rápidos
- ⇒ Ligas Fundidas
- ⇒ Cerâmicas

Aços Carbono são os materiais mais baratos em comparação com os outros, podendo ser de baixa ou média liga. Devido a sua baixa estabilidade dimensional e perda de dureza quando submetido a altas temperaturas, seu emprego em trabalhos de usinagem é limitado a processos com baixa velocidade de corte.

Por esse motivo os Aços Rápidos normalmente são utilizados em seu lugar, sendo capazes de trabalhar em velocidades de corte cerca de 30m/min, bem mais elevado que os 5m/min que os aços carbono poderiam atingir, de acordo com COELHO & SILVA (2018). Essa vantagem está atrelada a presença de certos elementos em sua composição, caracterizados pela alta resistência a elevação de temperatura, como Tungstênio ou Molibdênio.

Segundo o que afirma o autor, Ligas Fundidas não ferrosas à base de cobalto, contendo Tungstênio e Cromo em sua composição, têm dureza superior às de Aço Rápido mesmo a altas temperaturas, como mostra a Figura 4, em que há uma comparação entre o material *Stellite 100* (43% Co, 34% Cr, 19% W e 2% C) e dois aços rápidos, em questão de perda de dureza por aumento de temperatura.

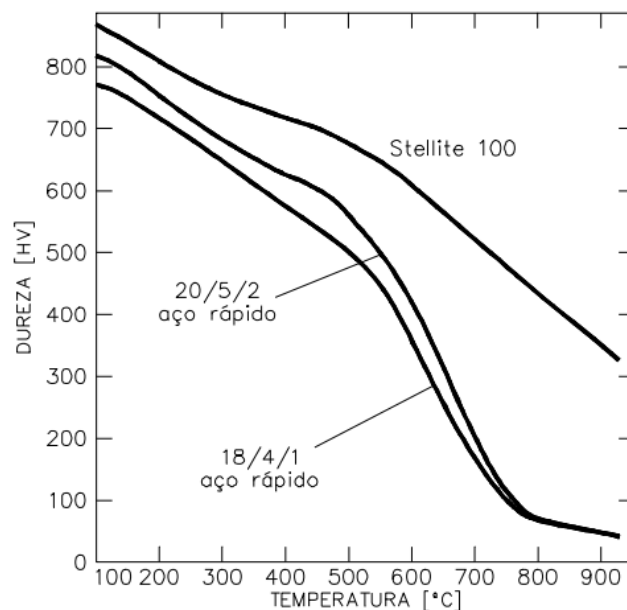


Figura 4 - Comportamento da dureza com o aumento de temperatura de Stellite 100 e dois aços-rápidos

Fonte: RIDHOUG (1970)

Materiais Cerâmicos também podem ser utilizados como ferramenta. Segundo a definição de CALLISTER (2002), cerâmicas são compostas por elementos metálicos e não metálicos, e possuem características um tanto singulares se comparados à materiais puramente

metálicos, como: altíssima resistência à elevação de temperatura, dureza e estabilidade química superiores, alta fragilidade, alta resistência a compressão e baixa resistência à tração. Dentre os tipos de material cerâmico para ferramentas, destacam-se o metal duro, o Cermet e os Ultraduros.

Segundo XAVIER (2003), o metal duro é constituído por carbonetos de tungstênio com ligante de cobalto, e são caracterizados por elevada dureza a quente, resistência ao desgaste e à compressão. Tais características corroboram para a possibilidade de ferramentas constituídas desse material poderem ser utilizadas em velocidades ainda mais elevadas se comparadas com ferramentas metálicas (Figura 5). Isso se deve ao fato de que o Tungstênio é seu principal elemento da liga, o que implica em altíssima resistência aos efeitos da elevação de temperatura, que está diretamente relacionada com o aumento da velocidade.

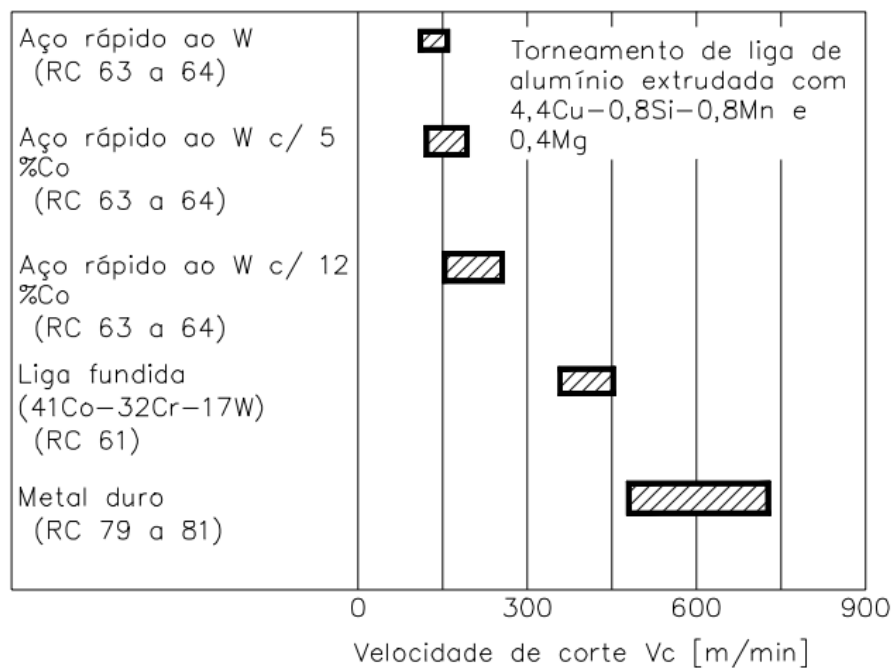


Figura 5 - Faixas de velocidades de máximo rendimento no torneamento de uma liga de alumínio

Fonte: FERRARESI (1970)

Quanto aos Cermets, COELHO & SILVA (2018) afirmam que o principal constituinte é o Titânio, complementados com outros elementos como Carbono, Nitrogênio, Alumínio, Cobalto ou Molibdênio. No geral, é superior ao metal duro em suas propriedades físicas e químicas como consta a Tabela 1, garantindo maior resistência ao desgaste e maiores velocidades de corte, porém, possui resistência inferior ao choque térmico. Portanto, os Cermets

costumam ser aplicados em operações de acabamento, em que há profundidades de corte majoritariamente superficiais.

Tabela 1 - Comparação das Propriedades Físicas do Cermet (TiC) com o metal duro (WC)

Propriedades Físicas	Cermet	Metal duro
Dureza (HV)	3200	2100
Energia Livre de Formação (kcal/g - atm 1000°C)	-35	-10
Solubilidade do Ferro (wt% a 1250 °C)	0,5	7
Temperatura de Oxidação (°C)	1100	700
Condutividade Térmica (cal/cm.s.°C)	0,052	0,42
Coefficiente de Dilatação Térmica (10-6/°C)	7,2	5,2
Coefficiente de Choque Térmico	1,9	27,1

Fonte: COELHO & SILVA (2018)

COELHO & SILVA (2018) definem também uma categoria de materiais chamada de ultraduros, que normalmente possuem dureza superior a 3000 HV. A fragilidade excessiva e o alto custo de ferramentas de diamante natural contribuíram para a criação de materiais sintéticos para substituí-lo, como é o caso dos diamantes sintéticos e o nitreto cúbico de boro (CBN). A elevada dureza desses materiais os torna muito resistentes ao desgaste, sendo superior aos materiais cerâmicos apresentados, mas também compartilham da baixa tenacidade que esses materiais possuem.

É notório que nenhum material é de fato perfeito para todas as condições de uso, sendo superiores em alguns aspectos, mas inferiores em outros, portanto, se faz necessário realizar um estudo comparativo entre as propriedades destes materiais (Figura 6). KOMANDURI (1997) explica o processo de seleção do material através de uma metodologia que desenvolveu, definindo como parâmetros iniciais: o material da peça a ser usinada, sua geometria e tamanho, sua usinabilidade, o tipo de corte a ser realizado e o tamanho do lote a ser produzido.

O próximo passo é avaliar as restrições existentes, que vão desde a capacidade da máquina operatriz a questões financeiras, como o valor do material a ser utilizado como ferramenta e o custo da produção em si. Desse modo, é possível obter principais candidatos para o material e geometria da ferramenta, e após serem testados em laboratório de pesquisa ou linha de produção, a ferramenta ideal é escolhida.

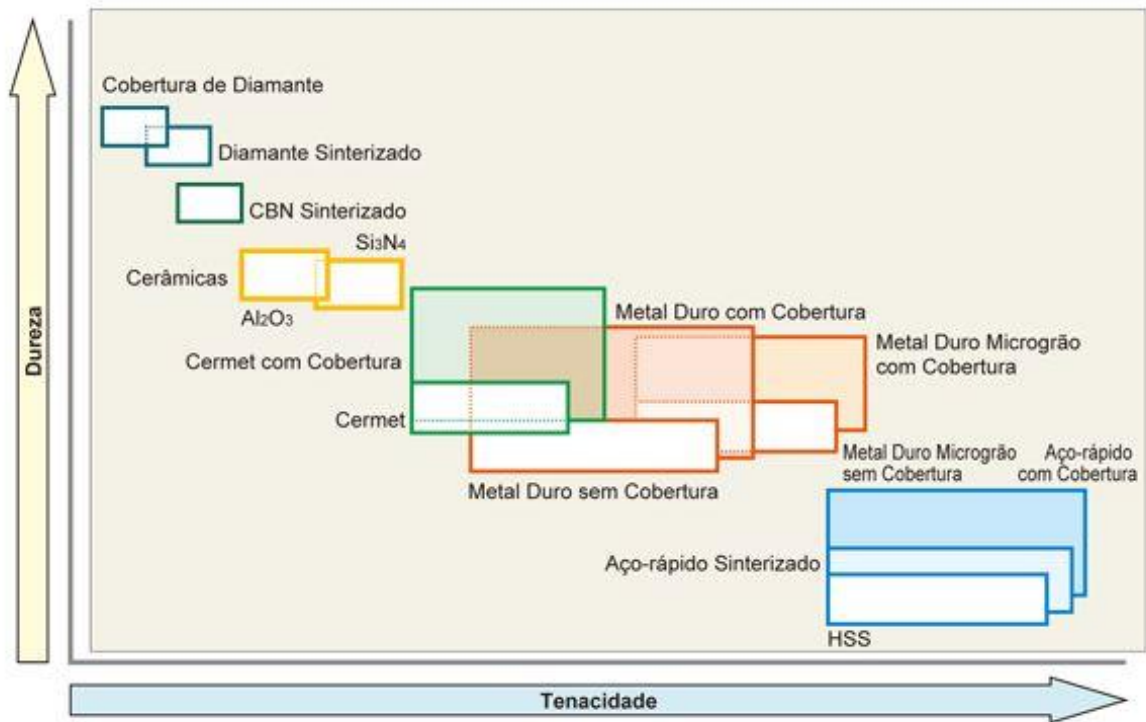


Figura 6 - Dureza e tenacidade de materiais para ferramentas de corte

Fonte:

<https://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/cutting_tool.html>. Acesso em: 16 de novembro de 2023.

2.2.2 CBN

A ferramenta utilizada no processo de usinagem do presente estudo é um ultraduro cerâmico, especificamente Nitreto Cúbico de Boro (CBN), a Figura 7 mostra alguns exemplos de insertos revestidos de CBN. Tratando-se de um material cerâmico, é possível realizar o corte a velocidades mais elevadas que os outros tipos de material, de modo que a aplicação desse tipo de ferramenta é mais adequada quando a máquina operatriz em questão consegue alcançar a potência necessária para atingir velocidades altas. Ferramentas dessa classe de material possuem elevada dureza e resistência à altas temperaturas, por isso são adequadas para usinar materiais mais resistentes, como é o caso de um material revestido.

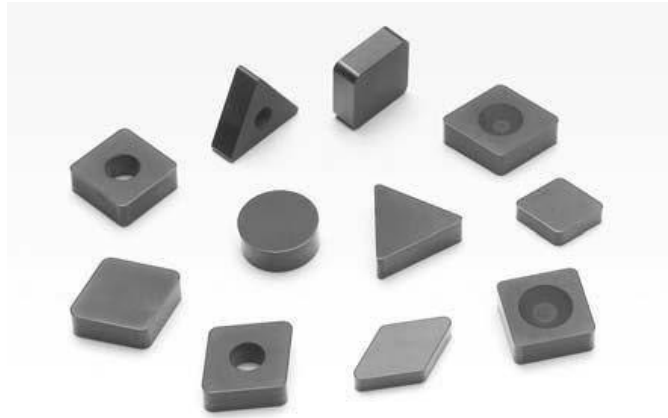


Figura 7 - Insertos revestidos com CBN

Fonte: <<https://www.wferferramentas.com.br/inserto-cbn>>. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

Segundo KURUC *et al.* (2022), o CBN atualmente é o segundo material para ferramenta mais duro conhecido, ficando atrás do diamante apenas. O nitreto cúbico de boro não é encontrado na natureza, mas sintetizado de forma similar ao diamante artificial, ou seja, envolve submeter o material a altas temperaturas e elevadas pressões por um longo período.

Apesar de possuir dureza inferior ao diamante, o CBN possui algumas vantagens, considerando que esse material não reage com o ferro e possui estabilidade química e térmica superior. O CBN é termicamente estável até 1300 °C em condições normais, podendo ser ainda mais resistente à altas temperaturas no vácuo (LEICHTFRIED, 2002).

Segundo o trabalho de JUNIOR *et al.* (2008), grãos de CBN, nucleados na forma de placas facetadas (Figura 8) são as mais adequadas para sinterização de pastilhas para usinagem de metais ferrosos. As imagens foram obtidas por um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

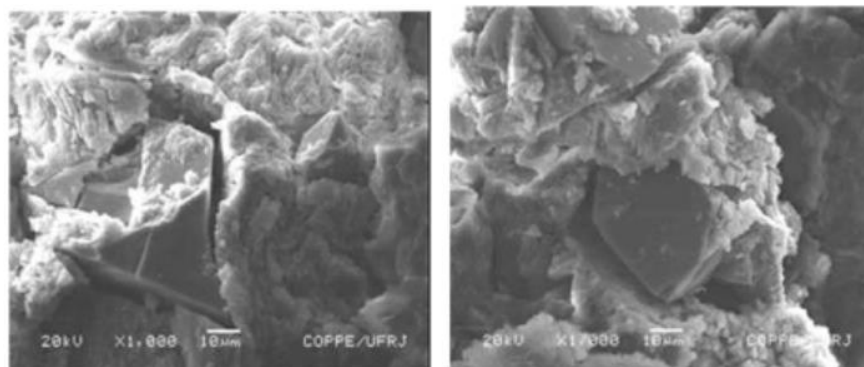


Figura 8 - Micrografias de amostra de CBN, aumento de 1000x

Fonte - JUNIOR *et al.* (2008)

Tendo em vista que o material a ser usinado possui alta dureza, é viável fazer um estudo comparativo de eficiência entre os materiais de ferramentas mais duros entre todos. Nesse cenário, o trabalho realizado por XAVIER (2003) torna-se uma base informativa relevante, tratando-se de um experimento de torneamento de ferro fundido vermicular feito em diferentes velocidades de corte, com ferramentas diferentes, cada uma obtida de dois fabricantes diferentes (Figura 9).

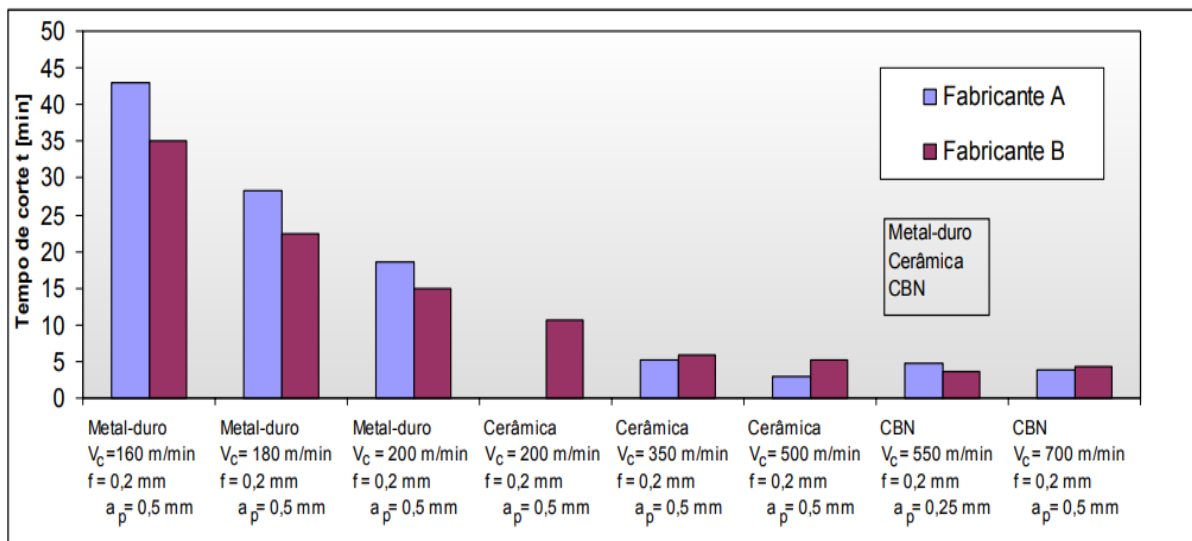


Figura 9 – Torneamento de Ferro Fundido Vermicular: tempos de corte de ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN

Fonte – XAVIER (2003)

É notável que os insertos de CBN são os mais eficientes no que tange ao tempo de corte, pois este material pode trabalhar em velocidades de corte consideravelmente mais altas em comparação com as outras apresentadas na imagem, o que é uma característica muito desejada quando é exigida a produção seriada, pois com rapidez, economiza-se tempo e energia. Mas não basta apenas escolher o material para a ferramenta, também é necessário avaliar como ele se comporta em diversas condições de usinagem, medindo a magnitude da força de usinagem que ele sofre no processo.

2.3 FORÇA DE USINAGEM

Conhecer como a força de usinagem e suas componentes agem sobre a aresta de corte possibilita estimar a potência necessária, as forças que atuam nos elementos da máquina-ferramenta, além de manter relação com o desgaste das ferramentas de corte, interferindo na viabilidade econômica do processo. (FERRARESI, 1970).

A força de usinagem (F_u) é a força total atuante sobre uma cunha cortante durante a usinagem, na qual é decomposta em 3 componentes básicas contidas no plano de trabalho e no plano efetivo de referência, como mostra a Figura 10, sendo elas: Força de corte (F_c), a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte (dada pela velocidade de corte); Força de avanço (F_f), a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço (dada pela velocidade de avanço); Força de profundidade ou Força passiva (F_p), projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho, sobre a direção efetiva de corte. Com a decomposição dessas 3 componentes vale a relação descrita na Equação 3:

$$\vec{F}_U^2 = \vec{F}_c^2 + \vec{F}_f^2 + \vec{F}_p^2 \quad \text{Equação 3}$$

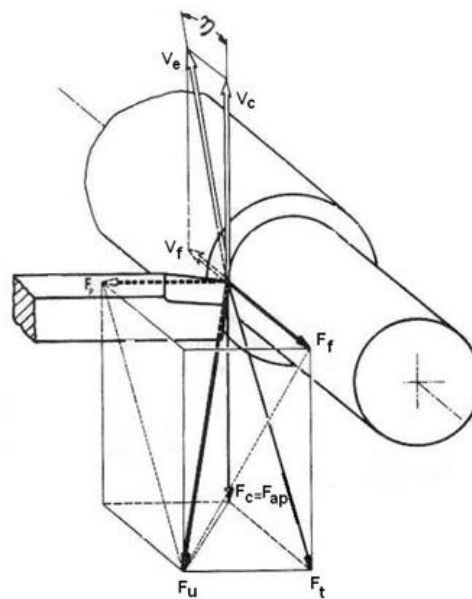


Figura 10 - Componentes da força de usinagem no torneamento

Fonte: Adaptada de FERRARESI (1970)

CAPUTO (2016) ressalta que a formação do cavaco influencia diversos fatores associados à usinagem, como o desgaste da ferramenta e os esforços de corte. A fim de simplificar os estudos é utilizado o modelo de formação do cavaco a partir de um corte ortogonal.

2.3.1 Corte Ortogonal

MACHADO *et al.* (2015) mostra o corte ortogonal como um processo no qual a aresta de corte é perpendicular à direção de corte e à direção de avanço, como representa a Figura 11. Neste modelo são mais acessíveis e compreendidos os cálculos do mecanismo da formação do cavaco, a qual acontece em um plano normal à aresta cortante, no plano de trabalho.

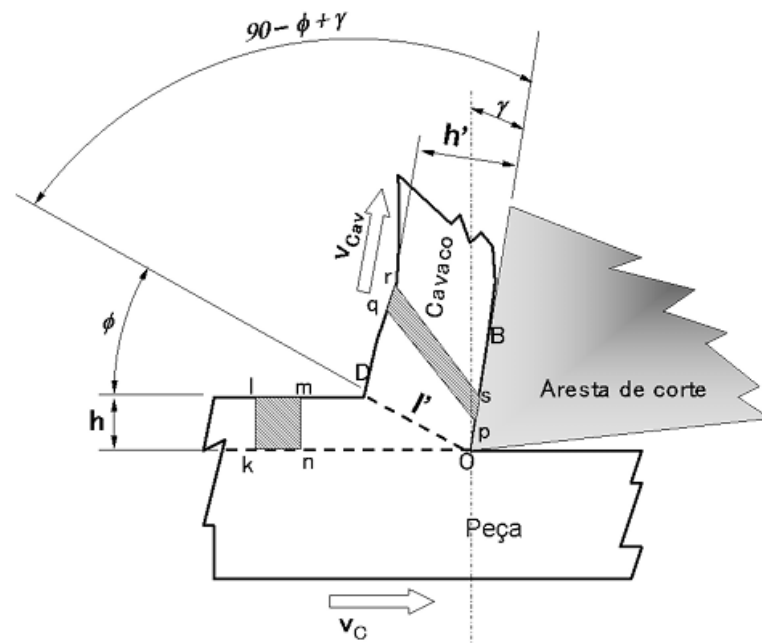


Figura 11 - Corte ortogonal

Fonte: MACHADO *et al.* (2015)

A ferramenta possui alguns elementos de geometria, sendo eles:

- ⇒ Ângulo de inclinação (γ): define a direção em que o cavaco escoia assim que é formado pela superfície de desprendimento da ferramenta e a direção perpendicular à superfície usinada da peça;
- ⇒ Ângulo de incidência (α): formado pela superfície de incidência da ferramenta de corte e a superfície da peça já usinada;

- ⇒ Ângulo de gume (β): formado pelas superfícies de incidência e desprendimento da ferramenta de corte;
- ⇒ Ângulo de cisalhamento (ϕ): formado pela superfície da peça e o plano de deslizamento, plano OD mostrado na Figura 11, onde ocorre a deformação do material da peça. O ângulo de cisalhamento é o ângulo no qual o material é cortado para formar o cavaco.
- ⇒ Espessura do cavaco não deformado (h): espessura do material que vai ser retirado da peça antes de sofrer qualquer deformação, ou seja, profundidade de corte;
- ⇒ Espessura do cavaco deformado (h'): espessura do material retirado depois de ter sofrido a deformação.

Segundo o material didático da USP (2017), as forças atuantes durante o corte podem ser decompostas em duas componentes, considerado um problema bidimensional, tal como apresenta a Figura 12, ao invés de três como ocorre com o modelo de corte oblíquo, o que simplifica o estudo da força de usinagem.

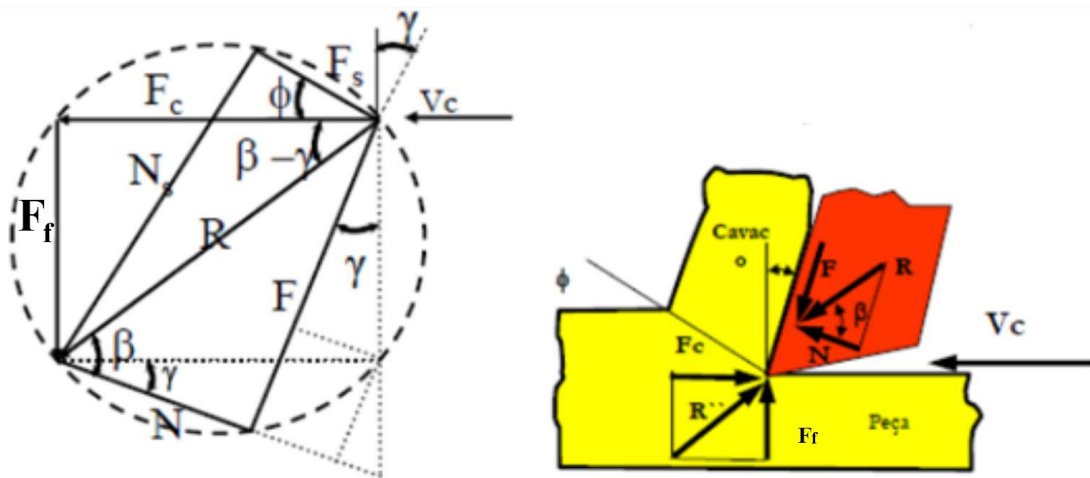


Figura 12 - Formação de cavaco no corte ortogonal

Fonte: USP (2017)

Contudo, a avaliação da magnitude da força de usinagem não é suficiente para compreender a eficácia da ferramenta, por isso, é necessário avaliar a integridade superficial da peça usinada.

2.4 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Segundo BORDINASSI (2006), a integridade superficial é uma característica associada a estrutura superficial e subsuperficial de materiais submetidos à processos de usinagem. São analisados fatores como tensões residuais, camada afetada pelo calor, textura e a rugosidade superficial, sendo este último o que recebeu maior enfoque neste estudo, pela facilidade de análise em comparação com os outros fatores e por representar de maneira direta a qualidade do processo, através da medição dos principais parâmetros que compõem esta característica.

2.4.1 Rugosidade

Como a usinagem se trata de um processo em que o material da superfície é arrancado em contato com uma ferramenta que possui uma considerada velocidade relativa, é lógico afirmar que a rugosidade será fortemente afetada. O processo de usinagem é responsável pelo surgimento de irregularidades na superfície da peça, e segundo TABENKIN (1999), fatores como a vibração do processo, parâmetros de usinagem, características da ferramenta de corte e a condição da máquina-ferramenta são fortes contribuintes.

Conceitualmente, a rugosidade é um conjunto, em pequena escala, de saliências e reentrâncias de uma superfície, sendo composta por picos e vales, tal como uma onda. Segundo a norma ISO 4287:2002, existem três parâmetros principais quando se trata da caracterização dos perfis de rugosidade.

O primeiro deles é o Ra (Figura 13) ou Desvio Aritmético Médio do Perfil. Trata-se de uma média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$, calculada como mostra a Equação 4, no comprimento de amostragem (l_r), também chamado de *Cut off*. É o mais utilizado, porém não define de fato a forma da rugosidade já que oculta o efeito dos picos e vales.

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx$$

Equação 4

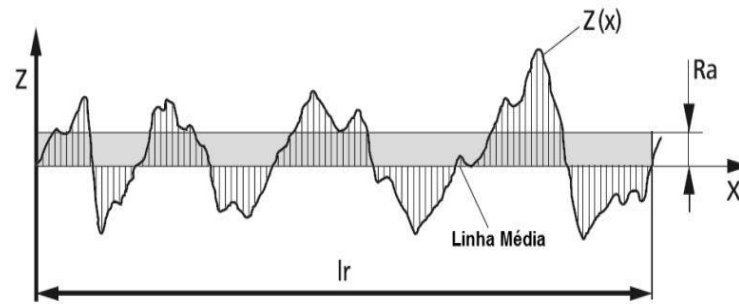


Figura 13 - Parâmetro de rugosidade R_a

Fonte: adaptado de JENOPTIK (2008)

O segundo parâmetro é o R_t (Figura 14) ou Altura Total do Perfil. O cálculo é feito a partir da soma da maior altura de pico (Z_p) e a maior profundidade de vale (Z_v) obtidas no comprimento de avaliação (l_n).

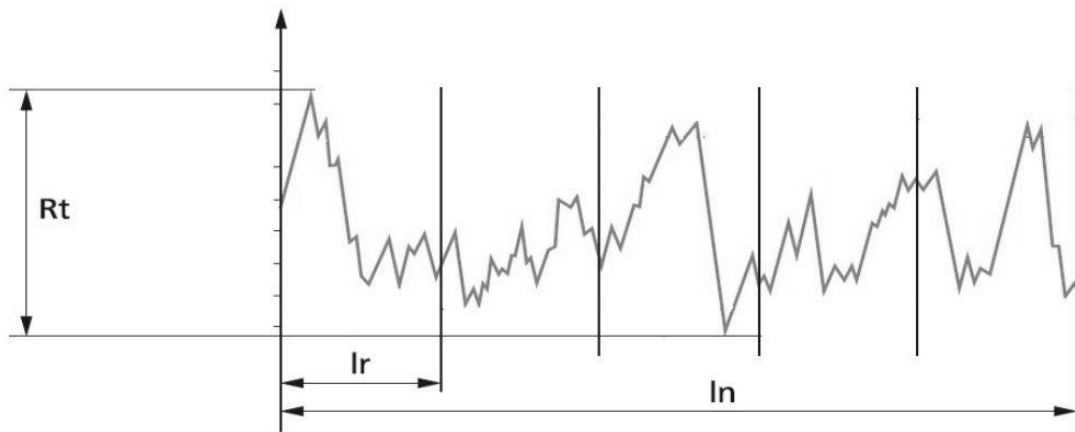


Figura 14 – Parâmetro de rugosidade R_t

Fonte: JENOPTIK (2008)

Por último, o parâmetro de rugosidade R_z (Figura 15) ou Altura Máxima do Perfil, é calculado somando a altura do vale mais profundo do perfil (Z_v) e a altura máxima dos picos do perfil (Z_p). É possível dividir a análise em seções de comprimento de amostragem (l_r) quando o comprimento de avaliação (l_n) é mais elevado, deste modo, R_z é definido com a média das somas obtidas em cada l_r (Figura 15).

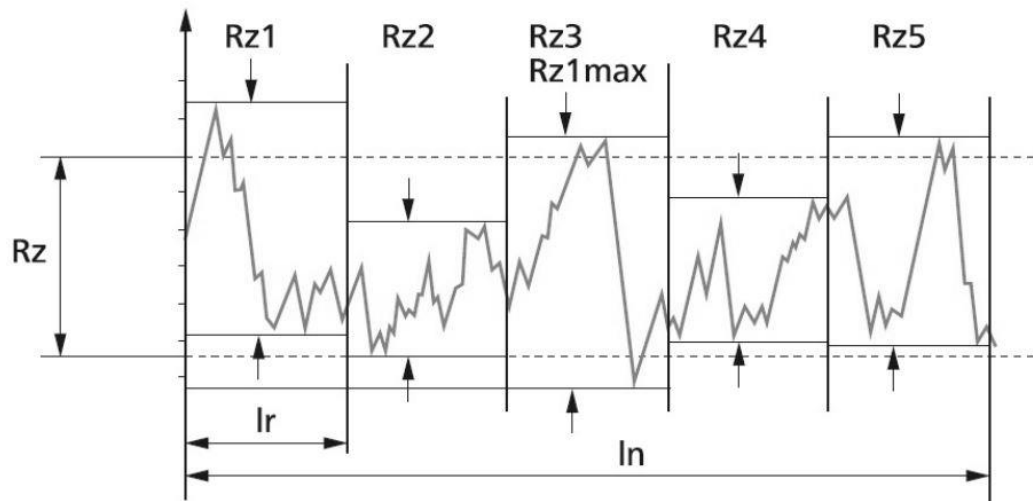


Figura 15 – Parâmetro de rugosidade Rz

Fonte: JENOPTIK (2008)

Segundo ALVES (2002), a rugosidade é um fator determinante quanto a qualidade de deslizamento, resistência ao desgaste, possibilidade de ajuste forçado, resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras, resistência à corrosão e a fadiga, vedação e aparência. Por essas razões, é fundamental que a rugosidade seja pensada no projeto e controlada nos processos de desbaste para se atingir a característica desejada.

2.5 DESGASTE DA FERRAMENTA

Durante o processo de usinagem, o corte muda a geometria original da ferramenta, ficando evidente um desgaste progressivo nas superfícies de folga e de saída dela. A Figura 16 mostra as principais áreas de desgaste de uma ferramenta.

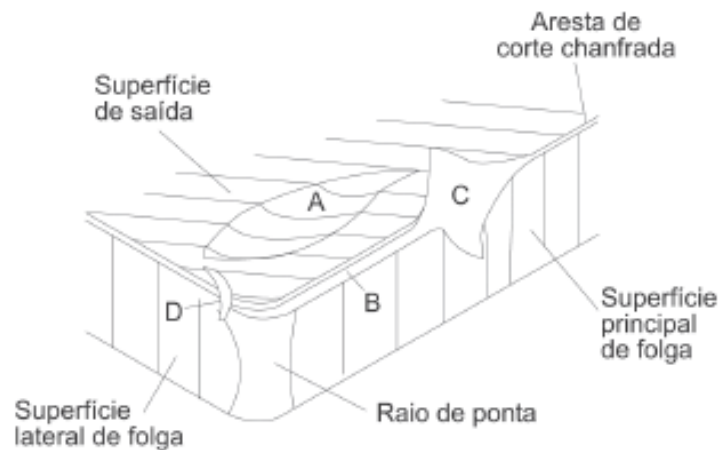


Figura 16 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta

Fonte: DEARNLEY & TRENT (1982)

Pode-se distinguir pelo menos três formas de desgaste, de acordo com DEARNLEY & TRENT (1982):

1. De cratera (área A): ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito do cavaco gerado com a superfície de saída por meio do mecanismo de difusão, seu crescimento aliado ao desgaste de flanco leva a quebra da ferramenta;
2. De flanco (área B): ocorre na superfície de folga da ferramenta, causada pelo contato da ferramenta com a peça e reforçada com o aumento da velocidade de corte, é o desgaste mais comum;
3. De entalhe (áreas C e D): ocorre nos dois extremos da região de contato do cavaco com a ferramenta, causado pelo atrito das relativas regiões coincidentes com a lateral do cavaco, ocorre geralmente em usinagem de materiais mais resistentes a altas temperaturas.

Para caracterizar o desgaste de uma aresta de corte pode-se medir através da convenção normalizada ISO 3685:1993, como mostrada na Figura 17.

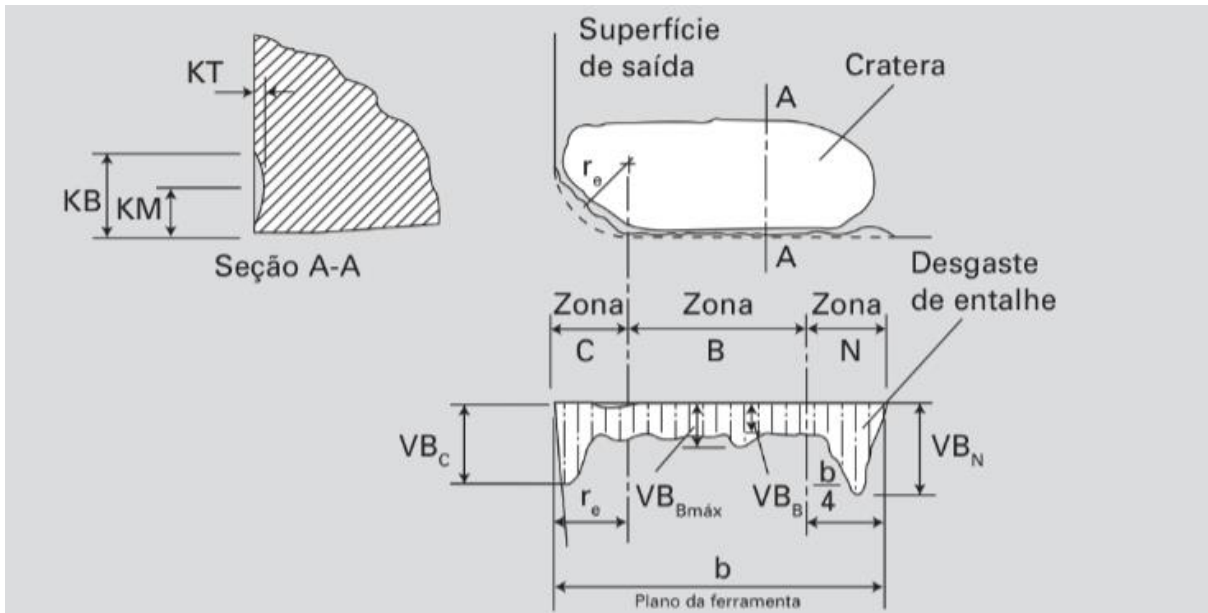


Figura 17 - Parâmetros de medição de desgastes de uma ferramenta

Fonte: MACHADO *et al.* (2015)

Na superfície de saída têm-se os desgastes: profundidade de cratera (KT), largura da cratera (KB) e distância do centro da cratera à aresta de corte (KM). Na superfície de folga mede-se a largura do desgaste de flanco (VB_B), que é um valor médio do desgaste na superfície de folga e a largura máxima do desgaste de flanco ($VB_{Bmáx}$). Mede-se ainda o valor dos desgastes gerados na superfície de folga pelos entalhes (VB_N e VB_C).

Conforme a ISO 3685:1993 para ferramentas de aço rápido, metal duro e cerâmica, em operações de desbaste, os critérios de vida recomendados, casos em que a troca da ferramenta é necessária, são:

- ⇒ Desgaste de flanco médio ($VB_B = 0,3 \text{ mm}$).
- ⇒ Desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx} = 0,6 \text{ mm}$).
- ⇒ Profundidade da cratera ($KT = 0,06 + 0,3a_f$), onde a_f é o avanço de corte em mm/rev.
- ⇒ Falha catastrófica.

Desse modo, quando forem ultrapassados qualquer um dos limites é aconselhada a reafiação ou substituição da ferramenta de corte. As formas de desgaste ocorrem devido aos mecanismos de desgaste, como difusão, adesão, abrasão e oxidação (Figura 18).

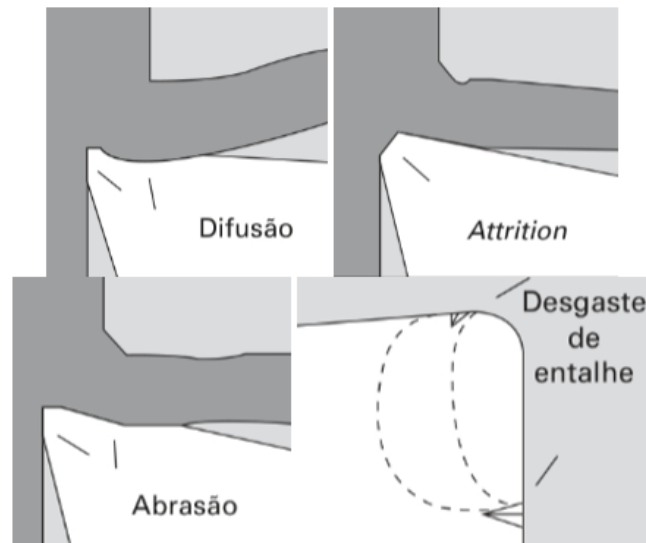


Figura 18 - Mecanismos de desgaste

Fonte: MACHADO *et al.* (2015)

De acordo com MACHADO *et al.* (2015), vida da ferramenta é o tempo no qual ela trabalha com precisão, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida estabelecido anteriormente.

Da mesma forma, SANTOS & SALES (2007) citam que o fim de vida de uma ferramenta de corte é definido pelo grau de desgaste previamente estabelecido. Este desgaste dependerá de fatores como o receio da quebra da cunha cortante, as altas temperaturas na interface da cavaco-ferramenta, o aumento nas dimensões de rebarba, e outros.

Segundo a norma ISO 3685:1993, a vida da ferramenta pode ser expressa pelo número de peças produzidas, percurso de avanço (mm), percurso efetivo de corte (km), velocidade de corte para determinado tempo de vida, volume de material removido, entre outros.

Através do controle de diversos fatores em uma operação de usinagem, é possível saber quando a ferramenta deve ser substituída e estabelecer o limite econômico de uma ferramenta, utilizando-a ao máximo e prolongando sua vida.

2.6 ASPERSÃO TÉRMICA

O processo de revestimento representa um passo de grande importância para aumentar a vida útil de peças produzidas na indústria, normalmente estando associado à elevação de propriedades como resistência ao calor, a corrosão, ao desgaste, dentre outros fatores adversos.

Neste contexto a aspersão térmica surge como uma alternativa viável. PAREDES (2012) explica que a aspersão térmica, ou *Thermal Spray*, consiste em depositar sobre o substrato ligas de material metálico ou não metálico em forma de pequenas partículas que aderem à sua superfície. O procedimento é realizado com uma ferramenta propulsora apropriada, munida de um sistema que gera calor suficiente para que o material de revestimento, em forma de pó, arame ou vareta, atinja um estado fundido ou semifundido.

Gases pressurizados são responsáveis por conferir energia cinética ao material, fazendo com que seja atirado em forma de pequenas partículas em direção ao substrato, formando camadas em direção paralela ao substrato, em formato de lamelas como mostra a Figura 19.

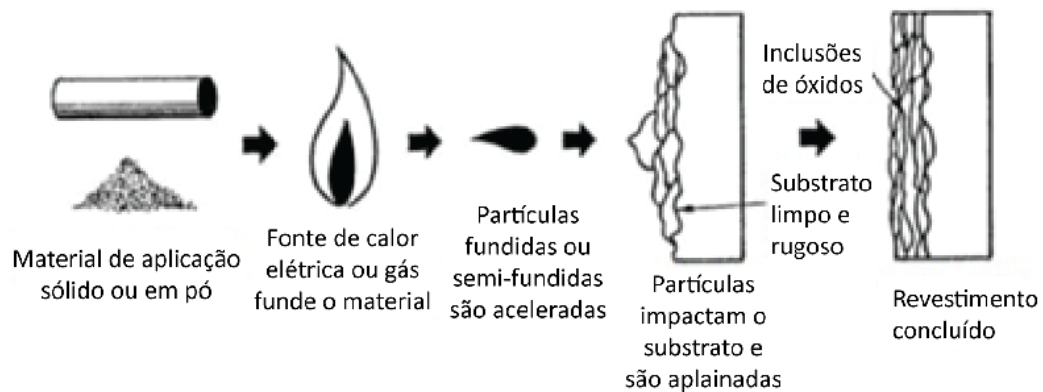


Figura 19 - Esquema de aplicação de revestimento por aspersão térmica

Fonte: LIMA (2007)

Para garantir um bom revestimento é necessário que a superfície esteja devidamente limpa para que as partículas propelidas possam aderir ao substrato sem dificuldade. A norma ISO 8501-1:2007 menciona métodos de preparação do substrato de aço para melhor adesão de produtos de revestimento, e pode ser usado como referência para realizar a limpeza superficial necessária.

Segundo PAREDES (2012) o próximo passo é trabalhar no aspecto da rugosidade da peça, de forma que esteja num grau adequado para que as partículas do revestimento sejam aderidas de forma eficaz. É necessário que a superfície do substrato tenha uma rugosidade considerável, levando em conta que maior rugosidade implica maior área de contato, assim, havendo mais pontos de ancoramento mecânico necessário para o revestimento se fixar.

Casos em que a dureza do material base seja muito elevada exigem a aplicação de uma camada de ligação, já que a alta dureza dificulta a alteração das características de sua superfície.

Segundo LIMA & TREVISAN (2002), a camada de ligação é uma fina camada formada por materiais que tenham fortes interações inter-atômicas com o substrato, que também elevam a rugosidade da superfície, melhorando a adesão do revestimento.

Vale ressaltar que a aplicação de pré-aquecimento também é uma etapa fundamental, já que favorece a redução das tensões internas, influenciando na aderência do revestimento. PAREDES (2012) afirma que o aquecimento da superfície gera certa dilatação, deste modo, após ser realizada a aspersão e cessado o pré-aquecimento, a contração do substrato reforçará mais ainda o ancoramento mecânico.

2.6.1 Aspersão por arco elétrico

Existem diversos meios de aplicação do revestimento por aspersão térmica, categorizados em dois grupos principais, a depender da forma como a energia térmica é originada. Essas formas são a combustão e a energia elétrica, cada uma destas fontes possibilita a aplicação do processo de diferentes formas (Figura 20).



Figura 20 - Classificação dos processos de aspersão térmica

Fonte: PAREDES (2012)

A forma aplicada no presente estudo foi a aspersão térmica por arco elétrico. O processo também é conhecido como *Arc Spray Process* e dentre os métodos de aspersão é, geralmente, o mais econômico, já que o custo de energia é mais baixo e a produtividade é maior do que os outros métodos. Dois arames condutores são utilizados (Figura 21), sendo eles os geradores do

arco elétrico que irá fundir o material do revestimento, a ser propelido para a superfície do substrato através de ar comprimido.

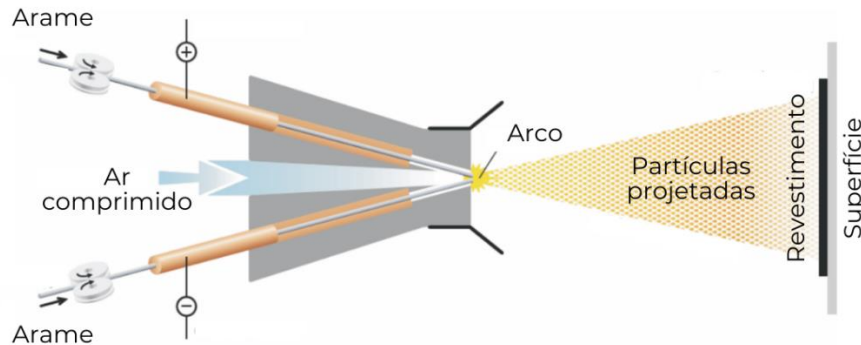


Figura 21 - Aspersão térmica com arame fundido por arco elétrico

Fonte: SULCROMO (2021)

Como explica MACHADO (1996), a quantidade de depósito é controlada por alguns fatores principais como: distância do bocal, diâmetro médio da partícula, tipos de gases empregados e vazão deles.

2.6.2 Propriedades dos revestimentos produzidos por aspersão térmica

Dependendo da variação dos parâmetros do processo, a qualidade do revestimento pode ser diferente. Segundo PAREDES (2012), os principais fatores são: macroestrutura, microestrutura, porosidade e aderência.

A alta velocidade com que as partículas fundidas do revestimento são aspergidas faz com que se depositem sobre o substrato ou sobre elas mesmas em forma de lamelas, por isso a macroestrutura pode ser chamada de lenticular ou lamelar (Figura 22).

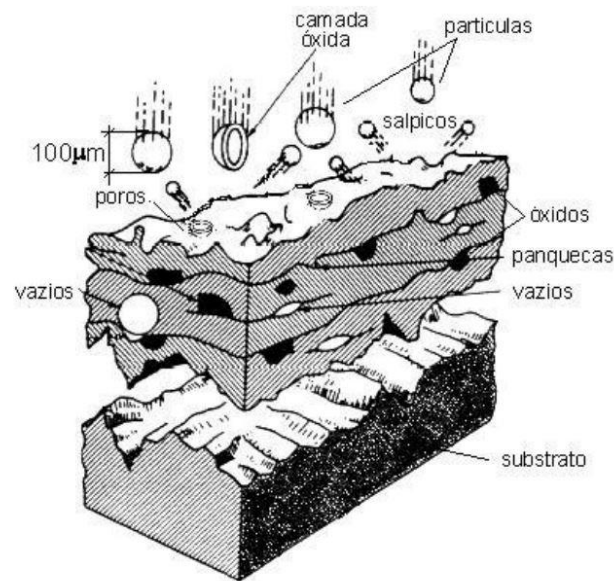


Figura 22 - Camada depositada por aspersão térmica

Fonte: CORTÉS (1998)

É necessário atentar-se aos parâmetros de aspersão para garantir uma boa macroestrutura, já que existem problemas inerentes ao processo que podem ser agravados caso não se tenha o devido controle sobre essas características. PAREDES (2012) menciona que temperaturas não suficientemente elevadas podem ocasionar em dificuldades de fusão, ficando parte do material ainda sólido e parte fundido, e as partículas não fundidas irão rebater, não sendo aderidas ao substrato, ou irão ser aprisionadas, mas não devidamente aderidas. Por outro lado, temperaturas demasiadamente elevadas, há maior proeminência de oxidação das partículas, pois como elas são aquecidas e propelidas no ambiente, é possível que nelas se formem camadas oxidadas, prejudicando suas propriedades e diminuindo a capacidade de aderência com o substrato.

Quanto à microestrutura, o trabalho de ZHANG (2001) mostra que, entrando em contato com o substrato ou outra partícula depositada, o material aspergido começa a solidificar, e na solidificação a partícula já se encontra achatada por conta do rápido impacto com o substrato. Pela superfície do material base possuir uma temperatura menor que o material fundido, os grãos são formados em sua interface, já que o calor flui em direção ao substrato.

Deste modo, no processo de contato ocorre simultânea deformação e solidificação das partículas, contribuindo para o entendimento de que é essencial manter o controle da velocidade de aspersão para se obter a microestrutura requerida, visto que ela altera a morfologia dos grãos significativamente, como mostra a Figura 23.

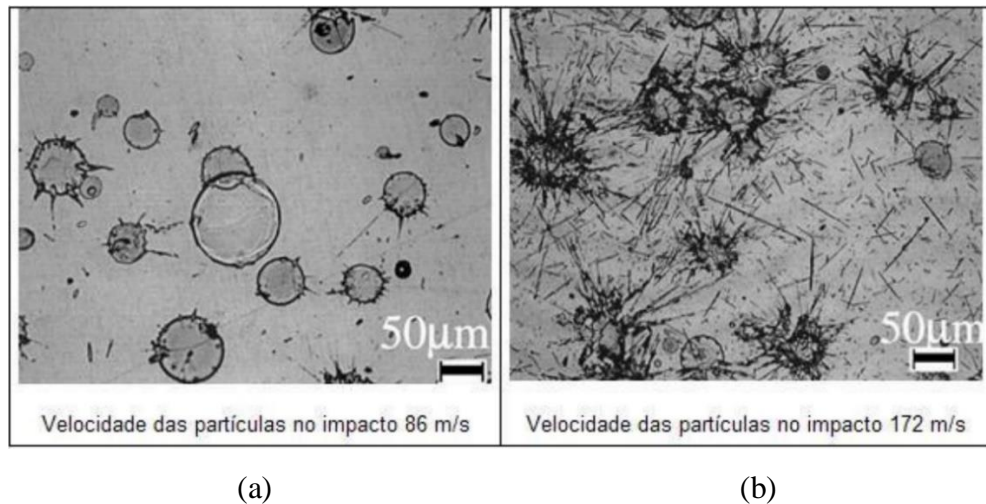


Figura 23 - Efeitos da velocidade das partículas na morfologia do revestimento, aspergidas num substrato polido de aço inoxidável 304

Fonte: ZHANG (2001)

A Figura 23 (a) mostra o efeito da aspersão à velocidade média de 86 m/s, é possível ver que as partículas têm suas formas mais bem definidas se comparadas às da Figura 23 (b), na qual o efeito da elevada velocidade de aspersão de 172 m/s resultou em espalhamento não uniforme do material, o que pode contribuir para a causa de efeitos indesejados, como vazios em certas áreas do revestimento, reduzindo sua resistência.

A porosidade é um fator inerente ao processo, como mostra a Figura 24. PAREDES (2012) afirma que essa porosidade afeta propriedades certas propriedades, como condutividade térmica, elétrica e a resistência mecânica. Poros grosseiros representam uma elevada permeabilidade, o que é um problema considerando que o revestimento deve proteger a superfície do substrato, e não permitir que ele tenha contato com o ambiente externo.

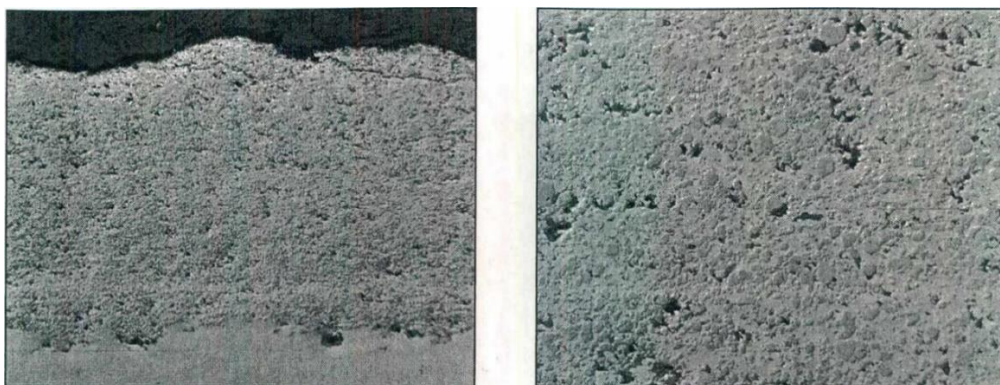


Figura 24 - Imagens de camada aspergida, ampliação de 200x e 1000x

Fonte: FREIRE (2002)

Uma maneira de uniformizar a aplicação da aspersão térmica de modo a evitar grande teor de porosidade é a técnica de jateamento com granalhas esféricas (*shot peening*). Segundo CORTÉS (1998), esse procedimento além de diminuir a porosidade, eleva a dureza e diminui a rugosidade da camada de revestimento.

Além dos fatores citados anteriormente, vale ressaltar a importância da aderência. As lamelas formadas pela aspersão ancoram-se mecanicamente ao substrato, nesse caso, a rugosidade da superfície é bem-vinda para facilitar essa adesão. PAREDES (2012) menciona que durante a fase de solidificação as partículas impõem força de contração, aderindo definitivamente ao substrato como apresenta a Figura 25. Quanto maior for a zona de contato, ou seja, quanto mais irregularidades houver na superfície do substrato, maior será a aderência do revestimento.

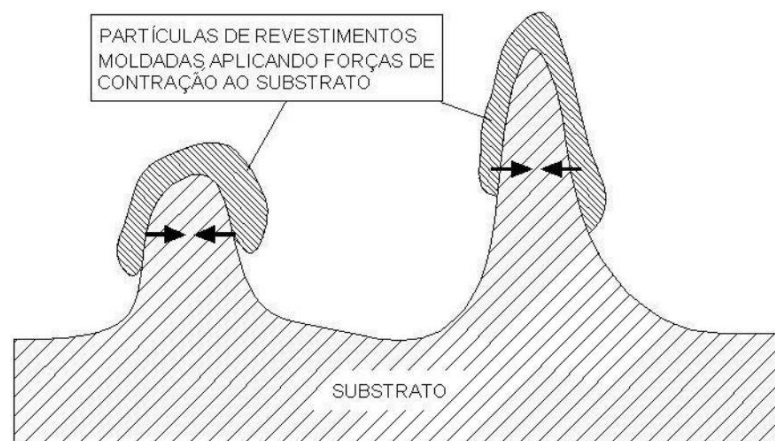


Figura 25 - Esquema de ancoragem mecânica das partículas na superfície rugosa do substrato

Fonte: PAREDES (2012)

A necessidade de acabamento superficial depois da aspersão do revestimento irá depender muito da sua finalidade. Por resultar em uma superfície de rugosidade muito grosseira, surge a necessidade de realizar procedimentos posteriores de desbaste para melhorar o aspecto superficial do revestimento, sendo bem-vinda a aplicação de processos de usinagem.

2.6.3 Usinagem de camada aspergida

Visto a estrutura singular de uma camada aspergida e suas características físicas, como alta dureza e alta resistência ao desgaste, os parâmetros para a usinagem de um material revestido desta forma precisam ser mais específicos.

CHAGAS (2022) define uma série de características do processo a serem observadas, definindo os efeitos gerados pela alteração de cada parâmetro. A começar pela ponta da ferramenta, sendo não recomendado utilizar pontas sem raios para que tensões demasiadamente elevadas não sejam geradas no revestimento, de modo a evitar a propagação de trincas. A camada aspergida pode perder suas lamelas durante o corte, que são arrancadas de sua estrutura, gerando vacâncias, ou retornar ao processo de usinagem, aderindo novamente ao revestimento ao ser forçada contra ele pela ferramenta.

Ainda se tratando de estrutura, para evitar essa perda de lamelas é necessário que a profundidade de corte se concentre na superfície, prevenindo arrancamento excessivo. Quanto ao material da ferramenta, o ideal é selecionar a que possui resistência ao desgaste mais elevada possível, de modo que não se desgaste rapidamente pelo efeito de contato com as lamelas.

ZATLOUKAL *et al.* (2020) realizou um trabalho que consistiu em usinar uma camada aspergida composta, em maior parte, de níquel e cromo, medindo comparativamente os resultados do parâmetro de rugosidade R_a para cada ferramenta utilizada (Figura 26). Segundo o autor, a camada aspergida confere elevada dureza ao componente, o que dificulta a usinagem da liga. Surge então a necessidade de empregar ferramentas de alta dureza, sendo utilizadas no projeto: SK IC20 (Cermet TiAlN), PCBN 1 (90% CBN) e CVD-D (diamante).

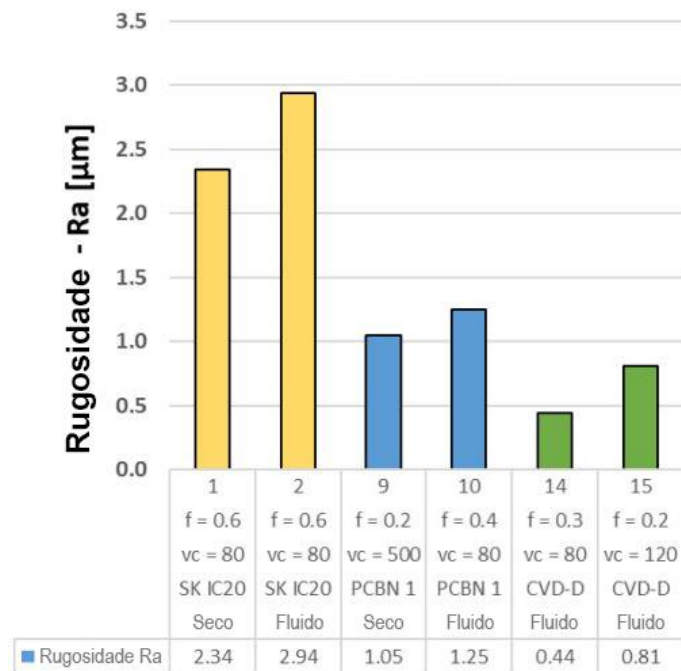


Figura 26 – Comparação de rugosidade Ra por ferramenta no torneamento de camada aspergida termicamente – NiCrBSi

Fonte – Adaptada de ZATLOUKAL *et al.* (2020)

Diante dos resultados apresentados, nota-se que a ferramenta de PCBN 1 resulta em razoáveis valores de rugosidade em comparação com o Cermet, ficando atrás apenas do diamante CVD, mas ainda mantendo valores próximos, o que indica sua eficácia no que tange ao aspecto superficial gerado após o corte.

Além disso, a aplicação de fluido de corte gerou resultados interessantes, usando o PCBN 1 como exemplo, é evidente que a aplicação de fluido traz benefícios à rugosidade final da superfície, como mostra o gráfico, aplicando velocidade de corte de 80 m/min e fluido de corte, traz valores de Ra bem similares quando se comparada com a mesma ferramenta usinando o material a velocidade de corte de 500 m/min a seco.

Entretanto, é importante se atentar sobre os riscos do uso de lubrificação quando se utilizada uma ferramenta de alta dureza, uma vez que a redução brusca na temperatura pode gerar trincas térmicas. O trabalho realizado por MELO (2000) consistiu em executar um processo de fresamento utilizando insertos de metal duro, e os experimentos indicaram maior ocorrência de trincas nos procedimentos em que fluido de corte foi aplicado, como mostra a Figura 27.

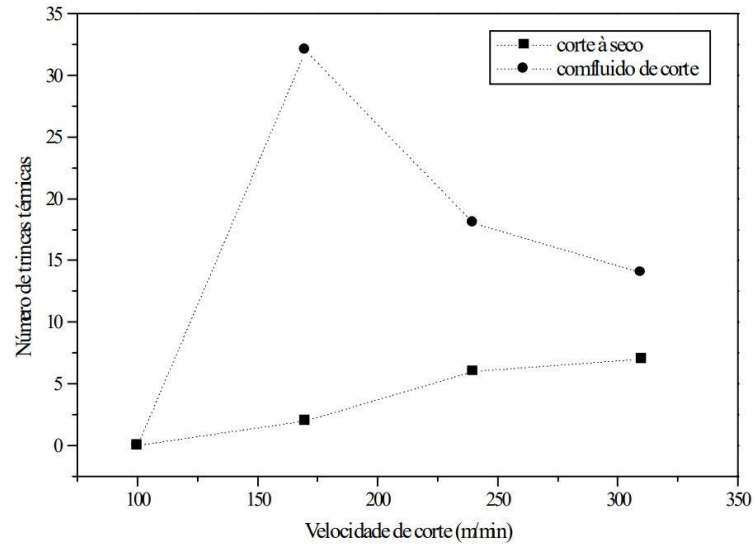


Figura 27 - Curvas que mostram a quantidade de trincas térmicas geradas em função da velocidade de corte, com e sem o uso de fluido de corte.

Fonte: MELO (2000)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritas as etapas para o desenvolvimento deste trabalho, envolvendo as características da amostra, ferramentas de corte, o método de torneamento e a coleta de dados. Os procedimentos deste estudo estão baseados no comportamento da ferramenta de corte através de: Análise comparativa dos esforços no corte a seco para velocidades de corte distintas; Análise da rugosidade gerada em cada condição de velocidade.

3.1. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Foi utilizada uma amostra de formato cilíndrico, como mostrado na Figura 28, com diâmetro $D = 75$ mm e comprimento de $L = 345$ mm, o material do substrato sendo de aço SAE 1020 endurecido a aproximadamente 45 HRC por uma camada aspergida termicamente por arco elétrico, com aproximadamente $p = 1,5$ mm de profundidade, composta de um material similar a uma liga inox martensítica 13% Cr. A amostra foi dividida igualmente em quatro seções de 67,5 mm, denominadas A, B, C e D, como mostra o desenho esquemático na Figura 29.

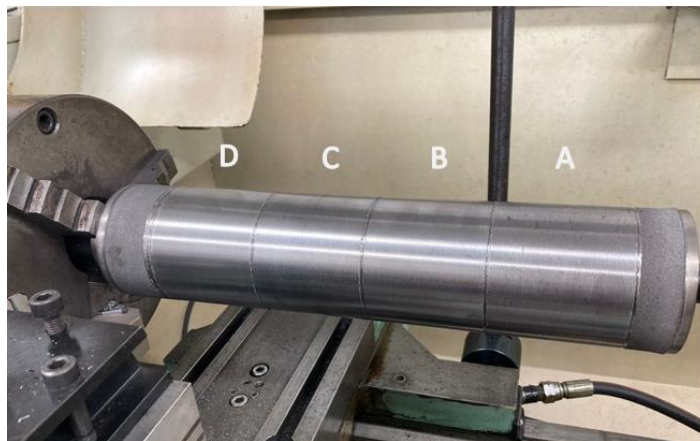


Figura 28 - Amostra usinada

Fonte: Autor

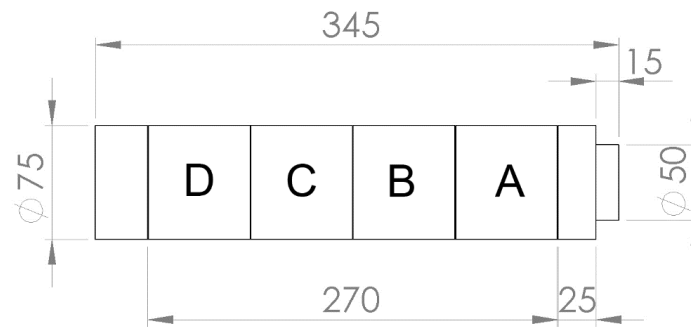


Figura 29 - Desenho esquemático da amostra (cotada em milímetros)

Fonte: Autor

3.2. TORNEAMENTO

Realizou-se o torneamento cilíndrico das amostras a seco, pois como explicado no tópico 2.6.3, existe um considerável risco de gerar trincas térmicas na ferramenta caso o fluido refrigerante fosse utilizado, uma vez que é característico de materiais duros, como é caso do CBN, de terem baixa resistência a mudanças bruscas de temperatura. A máquina-ferramenta utilizada foi o torno MS 205 da Nardini S/A (Figura 30), que se encontra no Laboratório de Usinagem (LABUS) no CEFET/RJ, e possui 18 velocidades de rotação, de 31,5 a 2500 rotações por minuto (rpm).



Figura 30 - Torno MS 205

Fonte: Autor

3.2.1. Ferramenta de corte

Para o torneamento foi empregado um porta-ferramenta modelo R166.4FG-2020-16 (Figura 31) da fabricante Sandvik Coromant.

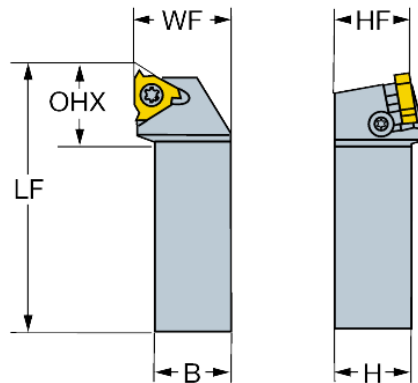


Figura 31 - Dimensionamento do porta-ferramenta

Fonte: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/product-details?c=r166.4fg-2020-16>>. Acesso em: 18 de novembro de 2023.

- ⇒ Largura funcional (WF) – 25 mm
- ⇒ Balanço máximo (OHX) – 21,6 mm
- ⇒ Comprimento funcional (LF) – 125 mm
- ⇒ Largura da haste (B) – 20 mm
- ⇒ Altura da haste (H) – 20 mm
- ⇒ Altura funcional (HF) – 20 mm

O inserto de CBN utilizado é o de modelo TNGA160408S01030A classe 7025 (Figura 32), também da fabricante Sandvik Coromant.

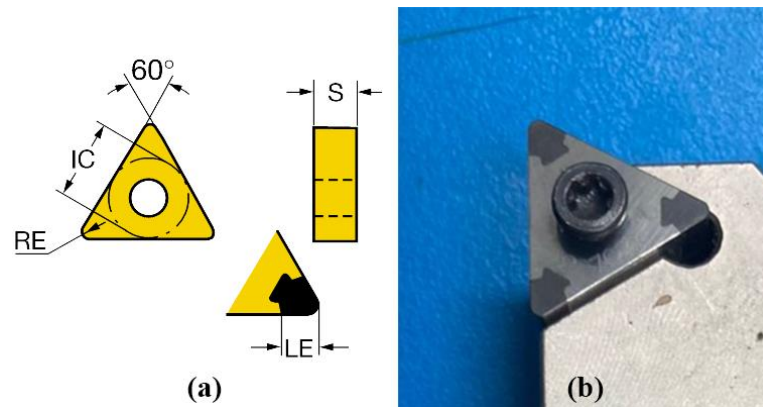


Figura 32 - (a) Dimensionamento do inserto (b) Inserto real

Fonte: (a) <[https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/product-](https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/product-details?c=TNGA160408S01030A%20%20%207025)

[details?c=TNGA160408S01030A%20%20%207025](https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/product-details?c=TNGA160408S01030A%20%20%207025)>. Acesso em: 18 de novembro de 2023. / (b) Autor

- ⇒ Raio de canto (RE) – 0,794 mm
- ⇒ Espessura do inserto (S) – 4,762 mm
- ⇒ Diâmetro do círculo inscrito (IC) – 9,525 mm
- ⇒ Comprimento efetivo da aresta de corte (LE) – 2,7 mm

O inserto CB7025 contém pontas de 60% de CBN com uma distribuição não homogênea de grãos (1 e 3 μm) em um ligante de cerâmica. Possui alta resistência a quebras, fazendo com que a classe seja boa em utilização de torneamentos de peças duras.

3.2.2 Parâmetros de Corte

Como indicado pelo fabricante Sandvik Coromant, as variações de avanço para este tipo de inserto são de 0,05 a 0,25 mm/rotação, sendo o valor inicial recomendado de 0,15 mm/rotação, que foi o escolhido para o trabalho. O fabricante também recomenda a utilização de velocidade de corte variando entre 135 m/min e 180 m/mim, porém, para fins de estudo, foram utilizados outros valores além dessa faixa na usinagem.

A profundidade de corte e avanço foram escolhidos com base nas condições de uso do fabricante do inserto e mantidos constantes. Em cada divisão, os passes foram feitos utilizando uma aresta nova do inserto para minimizar o efeito de desgaste da ferramenta, aplicando em

cada passe a profundidade de 0,2 mm e variando a velocidade de corte em cada seção. As velocidades variaram entre 150 e 375 m/min, conforme apresenta a Tabela 2.

Tabela 2 – Variação das Velocidades de Corte

Seção	Velocidade de corte (m/min)
A	150
B	295
C	190
D	375

Fonte: Autor

3.2.3. Sistema de aquisição das forças de usinagem

Para a aquisição de dados da força foi utilizado um dinamômetro piezoelétrico da Kistler, modelo 9257BA (Figura 33), que possui quatro sensores de força de três componentes, no qual cada sensor contém três pares de placas de quartzo, uma sensível à tensão na direção z e as outras duas respondendo ao cisalhamento nas direções x e y, sendo elas força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p), respectivamente, como mostra a Figura 34.



Figura 33 - Dinamômetro Kistler modelo 9257 BA

Fonte: KISTLER

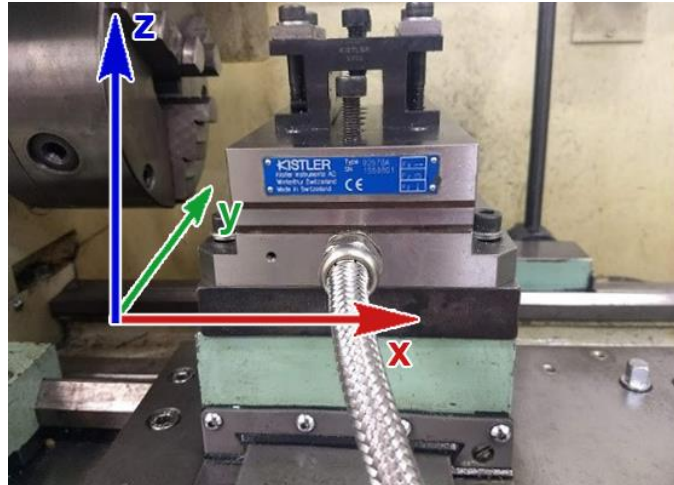


Figura 34 - Posicionamento do Dinamômetro no torno com indicação dos eixos

Fonte: Autor

O sistema de aquisição das forças possui também um amplificador de carga de 3 canais que está embutido no dinamômetro, um condicionador Kistler modelo 5233 A (Figura 35). O sinal que sai do dinamômetro é de baixa impedância, por isso, o amplificador para célula de carga recebe o sinal dos sensores e amplifica esse sinal para visualizar a tensão do material.



Figura 35 - Condicionador de sinais Kistler modelo 5233 A

Fonte: Autor

Uma placa de aquisição de dados da National Instruments modelo NI USB-6221 (Figura 36) capta o sinal analógico de saída do amplificador de carga.

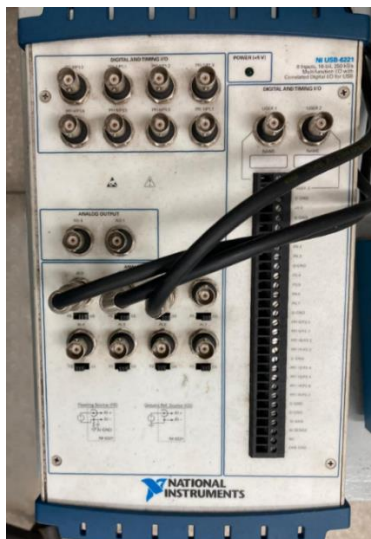


Figura 36 - Placa de aquisição de dados National Instruments modelo NI USB-6221

Fonte: Autor

Os sinais digitais gerados foram processados através do software *LabVIEW*, e tratados posteriormente para a geração de gráficos.

3.3. PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

Os parâmetros de rugosidade da superfície usinada foram medidas na posição transversal, ou seja, paralela à direção de avanço, a partir do Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210P (Figura 37), no qual possui força de medição de 4 mN, a agulha do apalpador com ponta de raio de 5 μm de diamante e velocidade de medição de 0,5 mm/s. Foi determinado um *cut off* (comprimento de amostragem) de 0,8 mm e realizadas 3 medições em cada divisão do corpo de prova, com um total de 12 medições, obtendo em cada uma delas os valores de Ra, Rz e Rt.



Figura 37 - Posicionamento do rugosímetro sobre a amostra retificada

Fonte: Autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O procedimento de usinagem foi realizado nas quatro seções da amostra, variando a velocidade de corte em cada uma delas, realizando três passes de 0,2 mm e mantendo o avanço fixo de 0,15 mm/rotação. Foram colhidos os dados referentes às forças de usinagem e as medições de rugosidade, que posteriormente foram comparadas entre as seções da amostra e a amostra retificada.

4.1. FORÇAS DE USINAGEM

As três componentes da força de usinagem, força de corte (F_c), força passiva (F_p) e força de avanço (F_a) foram medidas pelo dinamômetro, sendo a F_a representada pelo eixo x, a F_p pelo eixo y e por fim, a F_c pelo eixo z. A força passiva foi a mais elevada em todo experimento, permanecendo consideravelmente maior que os outros esforços em todas as medições feitas. Deste modo, com intuito de facilitar a interpretação dos resultados, as três componentes de força foram reduzidas a uma única, através da soma vetorial da Equação 3, sintetizando F_c , F_p e F_a em uma única variável, a força de usinagem (F_u).

A força F_u foi plotada em gráficos variando ao longo do tempo de corte. O primeiro passe em cada seção serviu apenas para nivelamento da superfície, o que justifica os diminutos valores das componentes de força nessa fase do processo, como exemplificado na Figura 38, que comparando com a escala utilizada para todos os gráficos, de 0 a 500 N, mostra valores bem baixos. Este é o motivo pelo qual os resultados apresentados serão referentes apenas ao segundo e terceiro passe, não levando em consideração o primeiro.

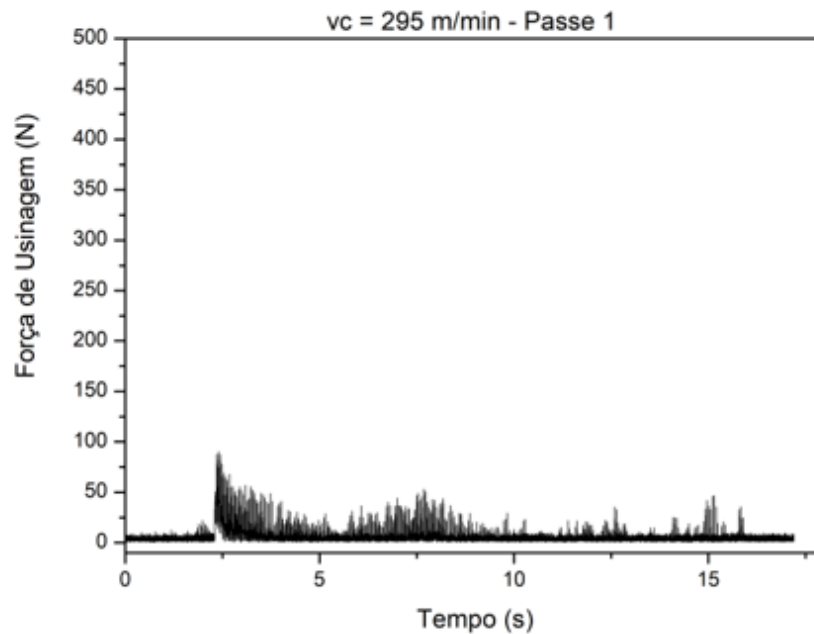


Figura 38 - Forças de Usinagem, exemplo de primeiro passe

Fonte: Autor

A usinagem das seções foi realizada sob diferentes velocidades de corte. Na Figura 39 são apresentados os dados referentes a velocidade de corte de 150 m/min.

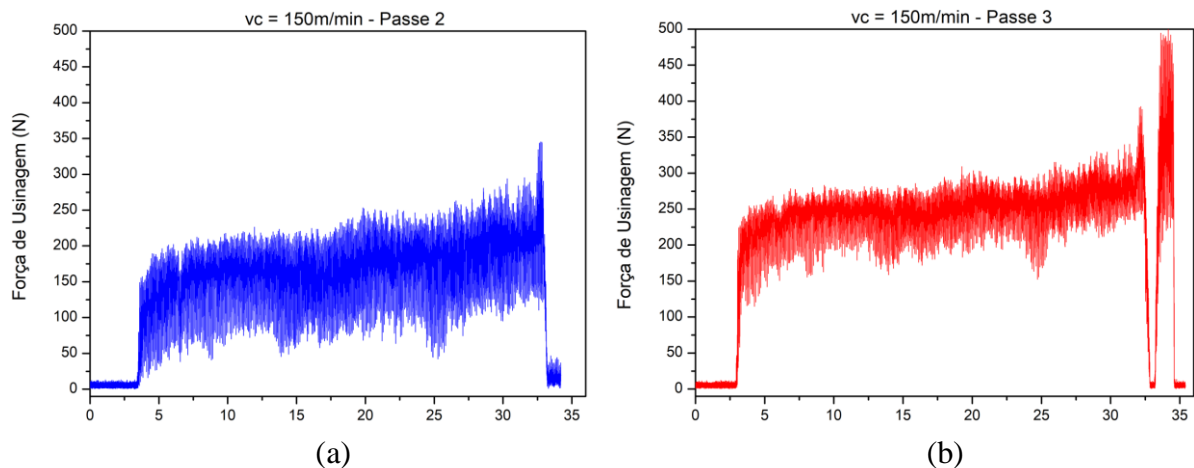


Figura 39 - Forças de Usinagem vc = 150m/min (a) Passe 2 (b) Passe 3

Fonte: Autor

Com pode ser observado na Figura 39, é notável na condição com velocidade de 150 m/min um crescimento na força de usinagem conforme a passagem do tempo de corte, indicando o efeito de desgaste que a ferramenta sofre conforme realiza o trabalho, além da própria dificuldade de eliminar o revestimento em si por conta de sua resistência. No terceiro

passo há uma anomalia que acontece por volta dos 33 segundos, uma queda abrupta nos valores de força seguida de uma subida intensa. Tal anomalia foi causada por conta de a ferramenta ter avançado sobre o sangramento feito entre a seção A e B, passando por um momento em que não usinou material (por isso as forças são praticamente nulas) e por consequência, ter começado a usinar a seção B de forma acidental, já em uma profundidade maior, de 0,6 mm.

Na Figura 40 são apresentados os valores das forças de usinagem realizada a uma velocidade de corte de 190 m/min.

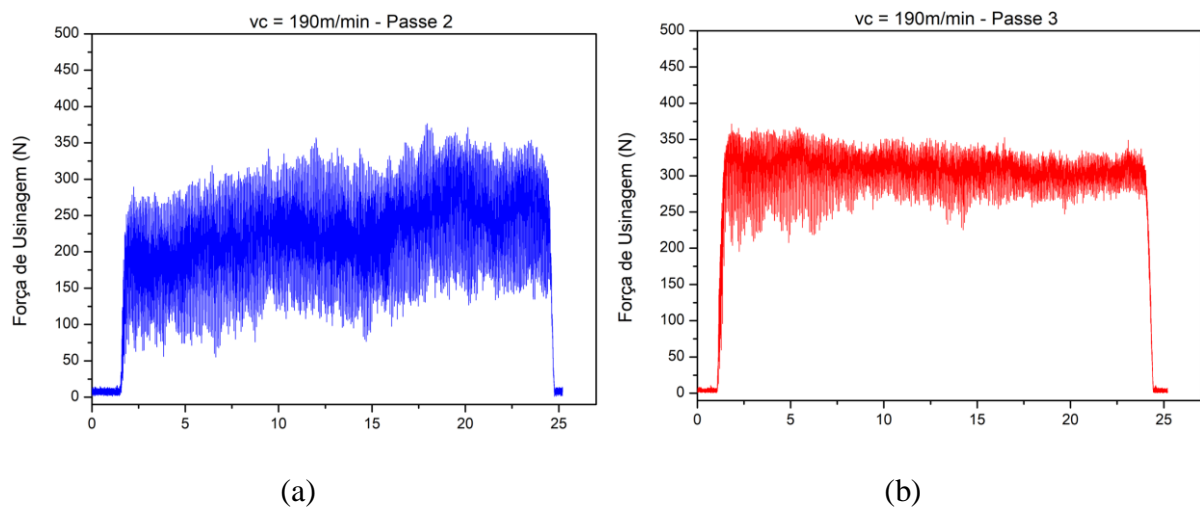


Figura 40 - Forças de Usinagem $vc = 190\text{m/min}$ (a) Passe 2 (b) Passe 3

Fonte: Autor

Analisando os gráficos da Figura 40 é possível verificar que o segundo passo apresenta valores crescentes de força em relação ao tempo, novamente indicando que a dificuldade no corte é maior conforme o avanço acontece, provavelmente por efeito do próprio desgaste da ferramenta. Já no terceiro passo, percebe-se que há um pequeno decaimento da força de corte ao longo do tempo, mesmo que pequeno. O comportamento da curva pode indicar o efeito de aumento de temperatura da peça por conta da velocidade de corte, que facilita o arrancamento de material da superfície usinada.

Os resultados da usinagem na seção com velocidade de corte de 295 m/min são mostrados na Figura 41, onde, em ambos os gráficos, as forças se mantiveram estáveis até o final, indicando uma homogeneidade no corte e uma possível redução do desgaste da ferramenta quando comparada com as condições anteriores.

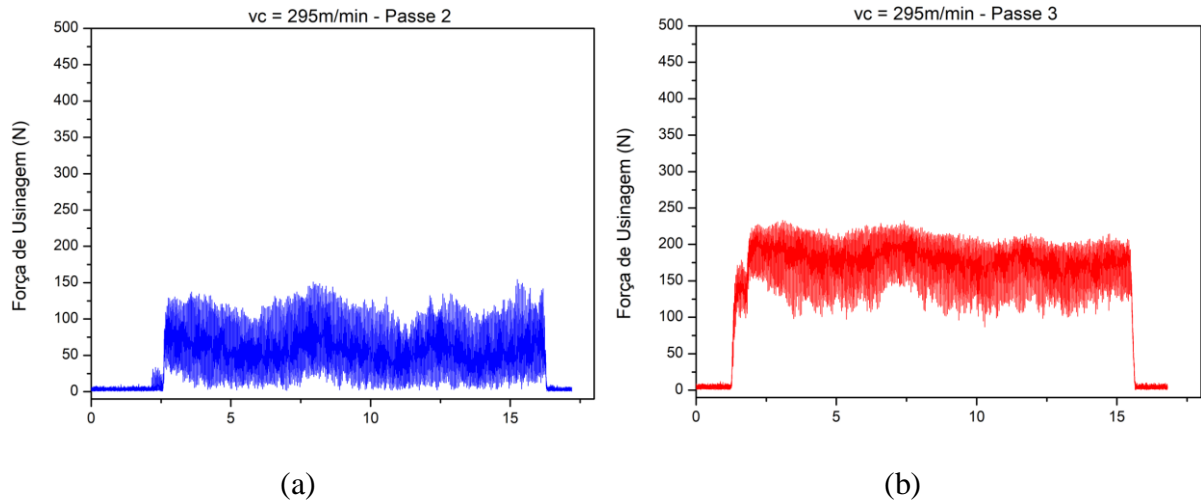


Figura 41 - Forças de Usinagem $vc = 295\text{m/min}$ (a) Passe 2 (b) Passe 3

Fonte: Autor

A Figura 42 apresenta os dados de forças de usinagem com velocidade de corte de 375 m/min.

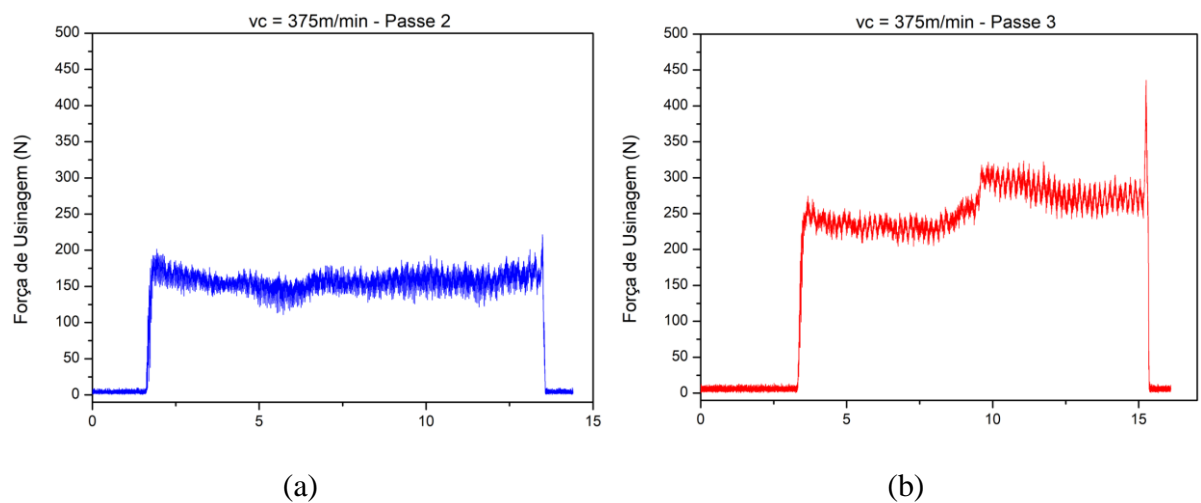


Figura 42 - Forças de Usinagem $vc = 375\text{m/min}$ (a) Passe 2 (b) Passe 3

Fonte: Autor

Ao analisar os gráficos da Figura 43 nota-se que no terceiro passe houve uma queda gradual de força no início do corte, havendo uma subida repentina que pode evidenciar a presença de danos consideráveis na ferramenta, principalmente considerando o pico de força existente no último segundo do passe, indicando a quebra da ponta da ferramenta, como mostra a Figura 43.

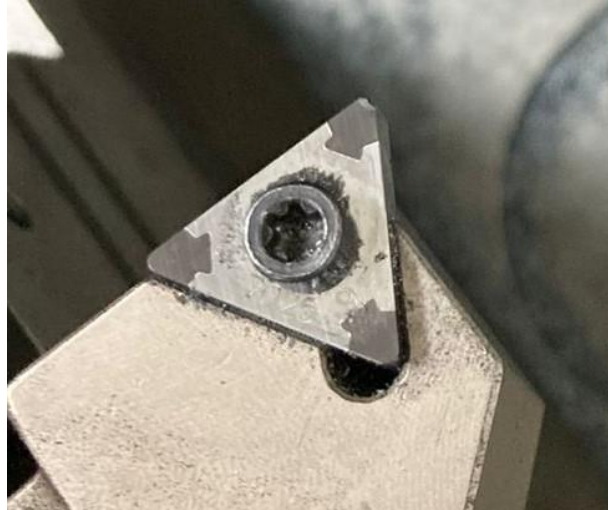


Figura 43 – Inserto de CBN com ponta quebrada

Fonte: Autor

Concluída a coleta de dados e a observação dos comportamentos dos gráficos de cada passe, uma análise comparativa geral foi feita. Os intervalos de valores de força de usinagem, mostrados nos gráficos anteriores, foram reduzidos a um único valor em cada seção, para que a comparação fosse visualmente mais simples. Foi feita uma média de força de usinagem associada a cada passe em cada seção (Figura 44), valores esses que foram plotados em gráfico de barras, contendo uma indicação do desvio padrão associado a cada média (representado por linhas verticais vermelhas).

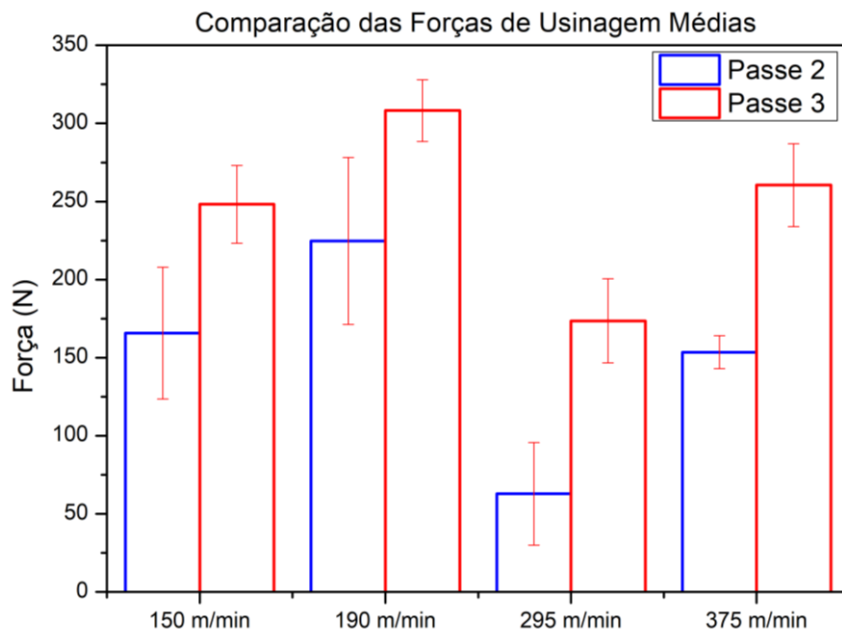


Figura 44 - Comparação das Forças de Usinagem Médias

Fonte: Autor

Apesar de haver valores consideráveis de desvio padrão em alguns casos, a síntese de resultados mostrada na Figura 44 permite uma comparação geral de forças entre todas as condições. Conforme esperado, os valores da força de usinagem no terceiro passe são sempre maiores em comparação com as do segundo passe para a mesma condição de usinagem, evidenciando o crescimento da resistência do revestimento com a profundidade. Além disso, é possível verificar que as forças de usinagem médias são menores na velocidade de 295 m/min, seguido pelos valores associados a velocidade de 375 m/min, sendo uma primeira evidência de condição ótima de usinagem.

4.2. RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE

Finalizando os passes, registrou-se os valores da rugosidade da superfície em cada seção. Para fins de comparação, foi usada uma amostra retificada, sendo considerado um acabamento superficial ótimo, ou seja, o ideal para a superfície. A Tabela 3 apresenta os valores de Ra (rugosidade média), Rz (rugosidade média parcial) e Rt (rugosidade total) obtidos para cada condição de usinagem.

Tabela 3 - Dados de rugosidade da amostra usinada e da amostra retificada (em μm)

Condição Analisada	Rugosidade	Valores (μm)		
		Medida I	Medida II	Medida III
150 m/min	R_a	8,216	8,513	8,506
	R_z	34,537	31,464	34,687
	R_t	37,959	37,265	46,873
190 m/min	R_a	1,377	1,585	1,447
	R_z	8,560	10,311	8,945
	R_t	11,347	14,277	11,121
295 m/min	R_a	1,824	1,919	2,097
	R_z	8,957	11,100	13,452
	R_t	9,869	19,035	21,099
365 m/min	R_a	6,325	6,619	6,039
	R_z	26,808	26,603	27,285
	R_t	28,931	27,642	31,464
Retificada	R_a	1,308	1,687	1,938
	R_z	8,106	10,151	9,584
	R_t	13,336	16,973	17,713

Fonte: Autor

Na Figura 45 pode-se observar de valores da rugosidade média, R_a , obtidos em cada condição, comparando com a amostra retificada. As linhas verticais vermelhas indicam o desvio padrão de cada média apresentada.

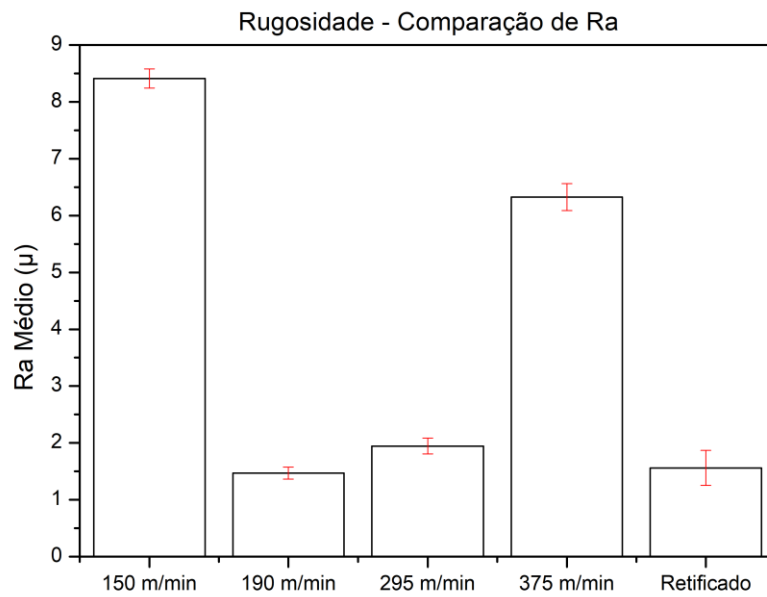


Figura 45 - Valores de Ra médio (μ) entre as velocidades

Fonte: Autor

Nas Figuras 46 e 47 são apresentadas as comparações entre os parâmetros Rz e Rt respectivamente, para cada seção e para a amostra retificada. Para essas rugosidades não foram analisados valores médios, mas sim os valores máximos e mínimos devido a característica do tipo de rugosidade medido.

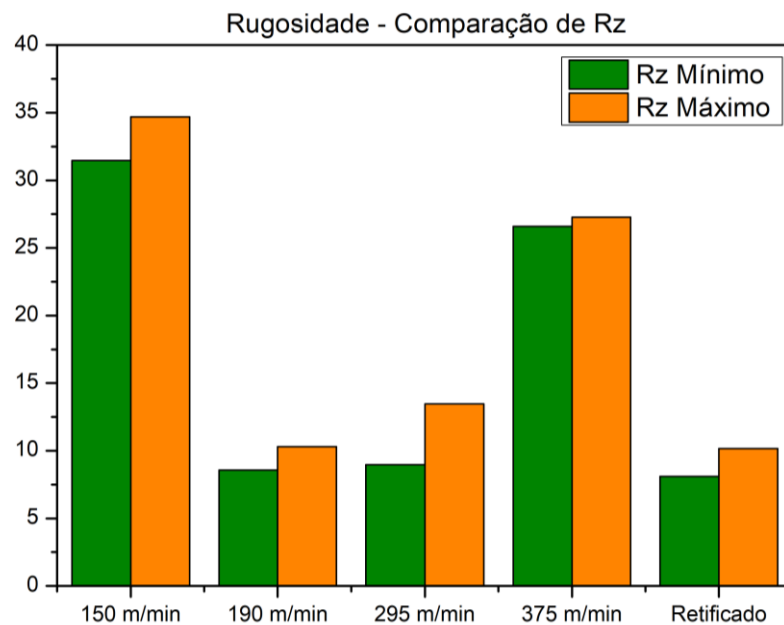


Figura 46 - Valores máximos e mínimos de Rz (μ) entre as velocidades

Fonte: Autor

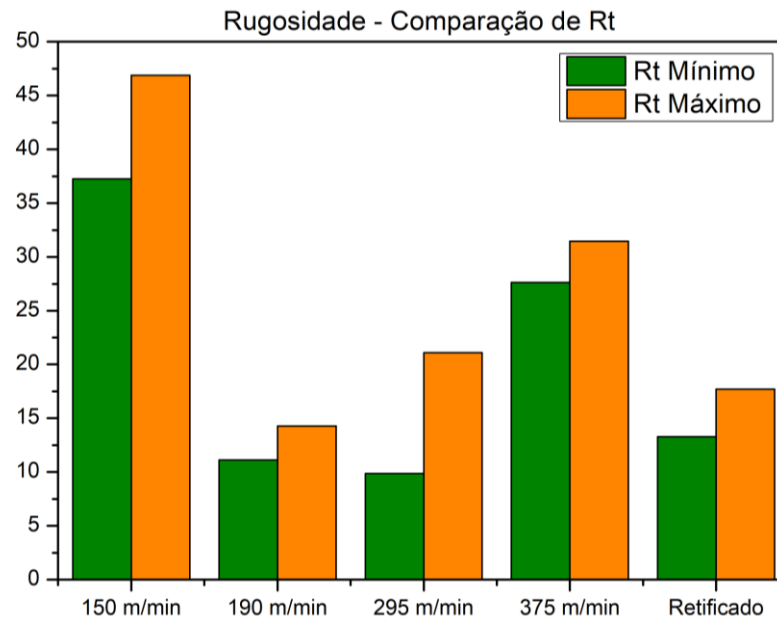


Figura 47 - Valores máximos e mínimos de Rt ($m\mu$) entre as velocidades

Fonte: Autor

Analisando os resultados, é possível observar que as condições que mais se aproximam dos valores dos parâmetros do estado retificado, no qual é considerado uma condição de superfície ideal, foram nas velocidades de corte de 190 m/min e 295 m/min, que tiveram valores bem próximos, enquanto o de 150 m/min apresentou maiores valores de rugosidade, tornando este o menos favorável dentre as rotações avaliadas. Na condição de 375 m/min os valores de rugosidade foram intermediários em comparação aos citados anteriormente, mas houve quebra da ferramenta, como citado anteriormente.

Esses dados podem indicar uma condição ótima de usinagem para esse tipo de material, mostrando que com avanço 0,15 mm/rotação, a melhor faixa de trabalho está entre 190 m/min e 295 m/min, no que tange ao acabamento superficial, como apresentado na Figura 48.

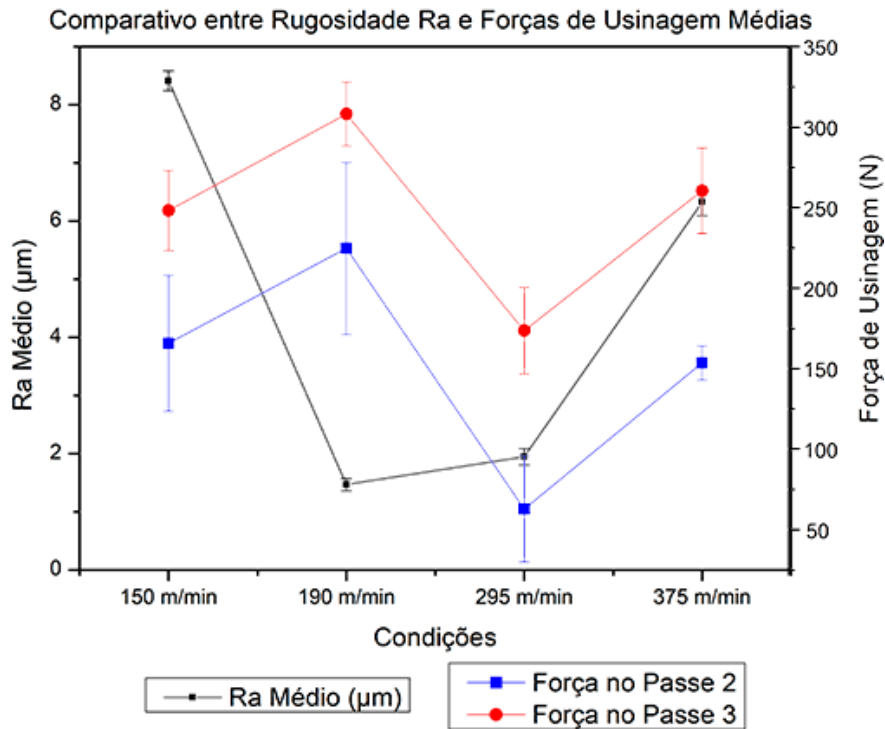


Figura 48 – Comparativo entre Rugosidade Ra e Forças de Usinagem Médias

Fonte: Autor

Fica nítido que a melhor condição está na velocidade de 295 m/min, que além de possuir o segundo menor valor médio de rugosidade, também foi a geradora dos menores esforços dentre todas as velocidades testadas.

MACHADO (2015) recomenda que aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos sejam usinados dentro de duas faixas de velocidade de corte, sendo elas de 40 m/min a 90 m/min, e entre 180 m/min e 400 m/min, o que explica os melhores resultados estarem dentro dessa faixa e na $vc=150\text{m/min}$, recomendada pelo fabricante, ter o pior resultado, por estar fora dessa faixa.

DUART (2021) relata que o aumento da velocidade de corte, aplicado a aços inoxidáveis martensíticos, leva a redução da rugosidade, e ao aumento da temperatura, reduzindo a força de usinagem, o que justifica a mesma tendência nos resultados obtidos. Porém, na $vc=375\text{ m/mm}$ mostra uma elevação na força de corte, que pode ser explicada pelo desgaste de flanco da ferramenta, mencionado do tópico 4.1., podendo ter sido causado pelo aumento da velocidade de corte, gerando altas temperaturas e o amolecimento na ponta da ferramenta de corte.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho, que teve por objetivo avaliar o comportamento da ferramenta de nitreto cúbico de boro (CBN), no torneamento cilíndrico de uma amostra revestida por liga semelhante a inox martensítica 13% Cr, comparando a magnitude dos esforços a cada passe e os resultados referentes à rugosidade superficial, em comparação com uma amostra retificada, trouxe resultados que justificam para as seguintes constatações:

- As melhores condições de esforços foram obtidas para velocidade de corte de 295 m/min, que está fora da faixa recomendada pelo fabricante da ferramenta, porém dentro da faixa para usinagem de aço inoxidável, no qual se assemelha a amostra estudada.
- Os melhores resultados de rugosidade foram obtidos para as amostras $v_c=190$ m/min e $v_c=295$ m/min, comparado a amostra usinada, todavia, para a primeira condição foram detectados os maiores esforços em comparação com a segunda.
- A melhor condição dentre as estudadas, com os parâmetros fixos de profundidade e velocidade de avanço, é a de 295 m/min de velocidade de corte, uma vez que essa gerou a menor magnitude de esforços dentre todas, e ainda foi capaz de manter os resultados dos parâmetros de rugosidade superficial bem próximos dos valores obtidos para a amostra retificada.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Existem ainda possibilidades para serem estudadas com base no trabalho apresentado, visto que nem todas as condições possíveis foram avaliadas.

- Sugere-se testar velocidades de corte mais baixas que 150 m/min, uma vez esse foi o único valor escolhido dentro da faixa recomendada, e todos os outros valores estão acima, sendo bem-vindo algum experimento abaixo da faixa de 135 a 180 m/min.
- Outra sugestão é a de utilizar as mesmas velocidades de corte deste trabalho, porém, com velocidade de avanço diferente de 0,15 mm/rotação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 4287:2002. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.**

ABNT NBR ISO 3685:2017. **Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento.**

AMIN, S. & PANCHAL, H. **A Review on Thermal Spray Coating Processes. International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER).** Volume 2 Issue 4 pp. 556 – 563. Abril, 2016.

ALVES, M. L. **Efeito da medição de rugosidade na massa de padrão de massa Classe F2.** Dissertação, PUC, Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6162: Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais.** 2012.

BOING, D. **Análise da vida de ferramentas de PcBN no torneamento de ferro fundido branco com alto teor de cromo.** Dissertação (Mestrado), Instituto Superior Tupy, Joinville. 2010.

BORDINASSI, E. C. **Contribuição ao Estudo da Integridade Superficial de um Aço Inoxidável Super-Duplex após Usinagem.** Tese de Doutorado, USP, São Paulo, 2006.

CAPUTO, P. C. **Estudo comparativo entre a temperatura no torneamento convencional a seco por imagem termográfica e o modelo analítico de Trigger e Chao.** Trabalho de Conclusão e Curso, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016.

CALLISTER, D. W. **Ciência e Engenharia de Materiais.** LTC – Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., Rio de Janeiro, 2002.

CHAGAS, S. I. **Avaliação do Processo de Usinagem de Revestimentos Aspergidos por Chama de Alta Velocidade.** UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Julho, 2022.

COELHO, R. T., SILVA, E. J. **Materiais para Ferramenta de Corte em Usinagem**. Departamento de Engenharia de Produção, USP. Março, 2018.

COELHO, R. T., OLIVEIRA, J. F. G., SILVA, E. J. **Introdução aos Processos de Torneamento-Fresamento e Furação**. Departamento de Engenharia de Produção, USP. Fevereiro, 2015.

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, UFSC 1998.

DEARNLEY, P. A., TRENT, E. M., **Wear mechanisms of coated carbides tools**, *Metals Technology*, v. 9. Fevereiro, 1982.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8ª Edição, Artliber. São Paulo, 2013.

DUARTE, JORGE DAYVISON CELESTINO. **Estudo sobre o torneamento de aços inoxidáveis**. Dissertação de Mestrado, UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais. 2021.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1970.

FREIRE, F. **Avaliação de Revestimentos Aplicados por Aspersão Térmica para Proteção Contra o Desgaste de Ponteiros de Risers**. Dissertação de Mestrado, UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. Abril, 2002.

IBP. **Estudo mostra importância do setor de petróleo e gás para a economia do Brasil**. Setembro, 2019. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/noticias/estudo-mostra-importancia-do-setor-de-petroleo-e-gas-para-a-economia-do-brasil/#:~:text=O%20setor%20de%20petr%C3%B3leo%20e,esferas%20municipal%2C%20estadual%20e%20federal>. Acesso em: 16 de novembro de 2023.

ISO 3685:1993. **Tool-life testing with single-point turning tools**.

ISO 8501-1:2007. **Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Visual assessment of surface cleanliness – Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings.**

JENOPTIK. **Roughness measuring systems from Hommel-Etamic – Surface texture parameters in practice.** 2008.

JUNIOR, J. S., RAMALHO, A. M., BOBROVNITCHII, G. S. **Transformação do nitreto hexagonal de boro em nitreto cúbico de boro com catalizador magnésio.** Fevereiro, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/HBxH4KJT77DX7MyFszHPBbL/?lang=pt#ModalTutors>. Acesso em: 16 de novembro de 2023.

KOMANDURI, R. **Tool Materials.** Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 4ª Edição, Vol. 24, ISBN 0-471-52693-2, John Wiley and Sons Inc. 1997.

KURUC, M., VOPÁT, T., MORAVČIKOVÁ, J., MILDE, J. **The Precision Analysis of Cutting Edge Preparation on CBN Cutting Inserts Using Rotary Ultrasonic Machining.** MDPI, setembro, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/13/10/1562>. Acesso em: 16 de novembro de 2023.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; **Teoria da Usinagem dos Metais, 3ª ed.** São Paulo; Edgard Blucher, 2015.

MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas.** Porto Alegre, 1996.

MARIANO, N. A., PIRES, A. C., MUROLO, J. P., KURI, S. E. **Avaliação da resistência à corrosão em aço inoxidável martensítico do tipo Cr-Ni em meio marinho sintético simulando atividades em águas profundas.** Revista Escola de Minas. Dezembro, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/85fpnKC43VsK7tsqW7Fzxjh/>. Acesso em: 16 de novembro de 2023.

MELO, A. C. A., MACHADO, A. R., FRANCO, S. D. **Estudo da formação de trincas de origem térmica no fresamento.** Congresso Nacional de Engenharia Mecânica 2000, Natal, 2000.

MITSUBISHI MATERIALS. **Materiais das Ferramentas de Corte**. Disponível em: https://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/cutting_tool.html. Acesso em: 16 de novembro de 2023.

LEICHTFRIED, G. **Properties of diamond and cubic boron nitride**. In **Landolt-Börnstein—Group VIII Advanced Materials and Technologies: Powder Metallurgy Data**. Refractory, Hard and Intermetallic Materials 2A2; Springer: Berlin/Heidelberg, Alemanha 2002.

LIMA, C.C.; TREVISAN, R. **Aspersão Térmica – Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Artliber Editora, 2007.

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

LINTER, B.B., BURSTEIN, G.T. **Reactions of Pipeline Steels in Carbon Dioxide Solutions, Corrosion science**, v.41, p. 117-139, 1999.

PAREDES, R.S.C. **Aspersão Térmica**. Monografia, UFPR, Curitiba. 2012.

RIDHOUGH, M. **Cast Cobalt Alloy Cutting Metal - Materials for Metal Cutting**. Proc. Conf. Of BIRSA, Scarborough. Abril, 1970.

SANDVIK COROMANT. **R166.4FG-2020-16**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/product-details?c=r166.4fg-2020-16>. Acesso em: 18 de novembro de 2023.

SANDVIK COROMANT. **TNGA160408S01030A 7025**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/product-details?c=TNGA160408S01030A%20%20%207025>. Acesso em: 18 de novembro de 2023.

SANTOS, S. C., SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. Artliber Editora, Brasil, 2007.

SMITH, G.T. **Advanced Machining – The Handbook of Cutting Technology**. IFS Publications, Inglaterra, 1989.

SULCROMO. **Aspersão térmica: entenda a técnica contra o desgaste.** Março, 2021. Disponível em: <https://www.sulcromo.com.br/noticias-corrosao/aspersao-termica-entenda-a-tecnica-contra-o-desgaste-por-abrasao/>. Acesso em: 17 de novembro de 2023.

TABENKIN, A. **Surface Finish: a machinist's toll. A desing necessity.** Modern Shop. n. 3, 1999. Disponível em: <https://www.mmsonline.com/articles/surface-finish-a-machinist39s-tool-a-design-necessity>. Acesso em 17 de novembro de 2023.

USP. **SEM534 – Processos de Fabricação Mecânica. Aula: Força, Potência e Temperatura de Corte.** 2017. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=36166>. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

WFER FERRAMENTAS DE CORTE. **Inserto CBN.** Disponível em: <https://www.wferferramentas.com.br/inserto-cbn>. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

XAVIER, F.A. **Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Fevereiro, 2003.

ZATLOUKAL, T., REHOR, J., FULEMOVA, J., POVOLNY, M. **Optimization of the Machining Process of NiCrBSi Thermal Spraying.** Publicado por DAAAM International, ISBN 978-3-902734- 29-7, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria, 2020.

ZHANG, H. WANG, X.Y., ZHENG, L.L., JIANG, X.Y. **Studies of splat morphology and rapid solidification during thermal spraying.** International Journal of Heat and Mass Transfer. March 2001.