unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LUIZ RAFAEL DOS SANTOS

Usinabilidade do aço AISI 4340, no processo de torneamento com ferramenta de metal duro revestido por CVD e PVD

Guaratinguetá - SP
2017

Luiz Rafael dos Santos

Usinabilidade do aço AISI 4340, no processo de torneamento com ferramenta de metal duro revestido por CVD e PVD

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

Guaratinguetá - SP
2017

Santos, Luiz Rafael dos

S237u Usinabilidade do aço aisi 4340, no processo de torneamento com ferramenta de metal duro revestido por CVD e PVD / Luiz Rafael dos Santos. – Guaratinguetá, 2018.

85 f : il.

Bibliografia: f. 82-85

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

1. Aço de alta resistência. 2. Aço - Ductilidade. 3. Metais - Usinabilidade. 4. Aspereza de superfície. I. Título

CDU 669.14

Pâmella Benevides Gonçalves

Bibliotecária/CRB-8/9203

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LUIZ RAFAEL DOS SANTOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"** APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. Sérgio Francisco dos Santos
UNESP-FEG

Prof. Msc. Marcel Yuzo Kondo
UNESP-FEG

Dezembro de 2017

DADOS CURRICULARES

LUIZ RAFAEL DOS SANTOS

NASCIMENTO	21.06.1987 - TAUBATÉ / SP
FILIAÇÃO	Luiz Marcelo dos Santos Vera Lúcia Maria dos Santos
2009/2018	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

A todos meus familiares, amigos (as) e colegas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus guias espirituais, aos meus excelentes e maravilhosos pais (Vera e Marcelo), a minha querida irmã (Juliana) e ao meu melhor amigo e irmão de coração (Danton). Sem os mesmos eu não teria chegado até onde cheguei, eles me apoiam, me incentivam, me ajudam, me protegem e sempre torcem e acreditam em mim. Esses anjos são tudo de melhor que eu poderia encontrar e ter por perto nessa minha passagem terrena.

Agradeço muitíssimo ao apoio, ensinamento, paciência e ajuda do professor Manoel Cleber (meu orientador), dos professores Marcel Yuzo e Cléverson que tiveram um papel fundamental na execução deste trabalho, os três foram primordiais desde o início até a finalização.

Por fim, não posso deixar de agradecer todas as pessoas que de alguma maneira passaram pela minha vida até o momento, positiva ou negativamente, familiares, amigos em geral, colegas de trabalho e faculdade, professores, etc.

“Conhece-te a ti mesmo.”

Sócrates

RESUMO

A busca por alternativas de otimização dos processos de fabricação por usinagem é uma realidade na indústria metal mecânica, visando assim diminuir custos, aumentar produtividade e reduzir problemas ambientais. Dentre essas alternativas destacam-se a utilização da usinagem a seco, o desenvolvimento e aperfeiçoamento de materiais para ferramentas de corte e do revestimento das mesmas, com o intuito de eliminar o processo de retificação. O aço AISI 4340 tem grande uso industrial em componentes mecânicos, solicitados a esforços dinâmicos, na indústria automobilística, aeronáutica, entre outras. Com base nisto, neste trabalho foi analisado e teve como objetivo o torneamento a seco do aço AISI 4340, em diferentes condições metalúrgicas, recozido e endurecido (temperado e revenido), utilizando ferramenta de metal duro revestidas pelos processos CVD (*Chemical Vapour Deposition*) e PVD (*Physical Vapour Deposition*). Verificando assim o comportamento das variáveis de saída: Rugosidade (Ra e Rt), Potência consumida, Vibração e Emissão acústica, em função da variação da velocidade de corte e avanço. Analisou-se ainda o desgaste das ferramentas e os tipos e as formas dos cavacos produzidos. Os resultados obtidos com esse trabalho nos indicam que o uso de ferramentas de metal duro recobertas são uma ótima opção visando o custo-benefício em um processo de usinagem. Deve-se salientar a observação de se selecionar a ferramenta mais adequada para cada tipo de material, como por exemplo para a usinagem do material recozido é aconselhável a utilização da ferramenta revestida pelo processo PVD e para a usinagem do material endurecido é aconselhável a utilização da ferramenta recoberta pelo processo CVD. E também o menor avanço foi fundamental para um menor desgaste da ferramenta.

PALAVRAS CHAVES: Rugosidade. Desgaste. Aço endurecido. Torneamento à seco. Potência. Vibração.

ABSTRACT

The search for alternatives to optimize machining processes is a reality in the metalworking industry, in order to reduce costs, increase productivity and reduce environmental problems. Among these alternatives are the use of dry machining, the development and improvement of materials for cutting tools and their coating, in order to eliminate the grinding process. The AISI 4340 steel has great industrial use in mechanical components, called for dynamic efforts, in the automobile industry, aeronautics, among others. Based on this, the objective of this work was the dry turning of the AISI 4340 steel in different metallurgical conditions, annealed and hardened (tempered and quenched) using a CVD (Chemical Vapor Deposition) and PVD (Physical Vapor Deposition). Thus verifying the behavior of the output variables: Roughness (Ra and Rt), Power consumption, Vibration and Acoustic emission, as a function of the variation of the cutting speed and feed rate. The wear of the tools and the types and shapes of the chips produced were also analyzed. The results obtained with this work indicate that the use of coated carbide tools are an excellent option for cost-effective machining processes. It should be noted that selecting the most suitable tool for each type of material, such as for machining the annealed material, it is advisable to use the tool coated by the PVD process and for the machining of the hardened material it is advisable to use the tool covered by the CVD process. And also the smaller advance was fundamental for a less wear of the tool.

KEYWORDS: Roughness. Wear. Hardened steel. Dry turning. Power. Vibration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática do recozimento, têmpera e revenido. 23
Figura 2: Classificação dos processos de fabricação. 24
Figura 3: Principais operações executadas no torno. 26
Figura 4: Limitantes do processo de usinagem por torneamento. 26
Figura 5: Grandezas relevantes ao processo de usinagem por torneamento. 27
Figura 6: Representação dos movimentos no processo de torneamento. 28
Figura 7: Classificação dos fluidos de corte. 29
Figura 8: Mecanismo de formação de cavacos. 31
Figura 9: Classificação dos cavacos de acordo com a norma ISO 3685 (1987). 32
Figura 10: Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos. 33
Figura 11: Classificação dos metais duros segundo a Norma ISO 513 (2004). 35
Figura 12: Esquema do processo de deposição química a vapor CVD. 37
Figura 13: Esquema do processo de deposição física a vapor PVD. 38
Figura 14: Comparação de ferramentas revestidas pelos processos CVD e PVD. 39
Figura 15: Principais tipos de desgaste e avaria da ferramenta. 40
Figura 16: Parâmetros de rugosidade Ra. 42
Figura 17: Parâmetros de rugosidade Rt. 43
Figura 18: Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M. 45
Figura 19: Sistema de aquisição de dados. 46
Figura 20: Corpo de prova do aço AISI 4340. 46
Figura 21: Ferramentas utilizadas. 47
Figura 22: Sensor de potência marca LEM modelo AT 100 B10. 48
Figura 23: Módulo de vibração modelo TV100. 48
Figura 24: Sistema de captação de emissão acústica da marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION ®. 49
Figura 25: Microscópio óptico Zeiss. 49
Figura 26: Rugosímetro marca Mahr modelo Marsurf M300. 50
Figura 27: Principais efeitos para Rugosidade Ra, material Endurecido. 52
Figura 28: Interação para Rugosidade Ra, material Endurecido. 53
Figura 29: Principais efeitos para Rugosidade Rt, material Endurecido. 54
Figura 30: Interação para Rugosidade Rt, material Endurecido. 55
Figura 31: Principais efeitos para Rugosidade Ra, material Recozido, ferramenta PVD. 56

Figura 32: Interação para Rugosidade Ra, material Recozido, ferramenta PVD. 57
Figura 33: Principais efeitos para Rugosidade Rt, material Recozido, ferramenta PVD. 58
Figura 34: Interação para Rugosidade Rt, material Recozido, ferramenta PVD. 58
Figura 35: Principais efeitos para Máximo de Potência consumida. 59
Figura 36: Interação para Máximo de Potência consumida. 60
Figura 37: Principais efeitos para Máximo de Vibração. 61
Figura 38: Interação para Máximo de Vibração. 62
Figura 39: Principais efeitos para Máximo de Emissão acústica. 63
Figura 40: Interação para Máximo de Emissão acústica. 64
Figura 41: Principais efeitos para Desgaste/Lc. 65
Figura 42: Interação para Desgaste/Lc. 66
Figura 43: Exemplo do desgaste da ferramenta, Ensaio n° 51. 68
Figura 44: Exemplo do desgaste da ferramenta, Ensaio n° 45. 69
Figura 45: Exemplo do desgaste da ferramenta, Ensaio n° 08. 70
Figura 46: Exemplo do desgaste da ferramenta, Ensaio n° 13. 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do aço ABNT 4340. 20
Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço AISI/SAE 4340. 20
Tabela 3: Principais tipos de desgaste e avaria da ferramenta. 40
Tabela 4: Composição Química do CDP 47
Tabela 5: Desgaste da ferramenta CVD usinando material endurecido. 67
Tabela 6: Desgaste da ferramenta PVD usinando material endurecido. 68
Tabela 7: Desgaste da ferramenta CVD usinando material recozido. 69
Tabela 8: Desgaste da ferramenta PVD usinando material recozido. 70
Tabela 9: Foto macro dos cavacos, material Endurecido, ferramenta CVD. 72
Tabela 10: Foto macro dos cavacos, material Endurecido, ferramenta PVD. 72
Tabela 11: Foto macro dos cavacos, material Recozido, ferramenta CVD. 73
Tabela 12: Foto macro dos cavacos, material Recozido, ferramenta PVD. 73
Tabela 13: Foto micro dos cavacos, material Endurecido, ferramenta CVD. 74
Tabela 14: Foto micro dos cavacos, material Endurecido, ferramenta PVD. 74
Tabela 15: Foto micro dos cavacos, material Recozido, ferramenta CVD. 75
Tabela 16: Foto micro dos cavacos, material Recozido, ferramenta PVD. 75

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

PCBN	Nitreto Cúbico de Boro Policristalino
CVC	Chemical Vapour Deposition
PVD	Physical Vapour Deposition
SAE	Society of Automotive Engineers
AISI	American Iron and Steel Institute
Ra	Rugosidade média
Rt	Rugosidade total
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
HRC	Dureza Rockwell C
HB	Dureza Brinell
f	Avanço
Vc	Velocidade de corte
ap	Profundidade de corte
CNC	Comando numérico computadorizado
ISO	Organização Internacional para Padronização
Nc	Potência de corte
Nf	Potência de avanço
Ne	Potência efetiva de corte
Fc	Força de corte
Ff	Força de avanço
Vf	Velocidade de avanço
CDP	Corpo de prova
Lc	Comprimento de corte

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
2 OBJETIVO 17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
3.1 AÇOS 18
3.1.1 Aço AISI 4340 19
3.2 TRATAMENTO TÉRMICO 21
3.2.1 Recozimento 21
3.2.2 Endurecimento 22
3.3 PROCESSO DE USINAGEM 23
3.3.1 Usinagem de Aços Endurecidos 24
3.3.2 Torneamento 25
3.3.3 Parâmetros de Corte para o Processo de Torneamento 27
3.3.4 Fluido de Corte 29
3.3.5 Mecanismo de Formação de Cavaco. 30
3.3.5.1 Tipos e Formas de Cavaco. 32
3.3.6 Materiais para Ferramenta 34
3.3.6.1 Metal Duro. 35
3.3.6.2 Revestimento pelo processo CVD (*Chemical Vapour Deposition*). 36
3.3.6.3 Revestimento pelo processo PVD (*Physical Vapour Deposition*). 37
3.3.6.4 Comparação entre os processos CVD e PVD. 38
3.3.7 Desgaste e Avaria da Ferramenta 39
3.4 USINABILIDADE 41
3.5 ACABAMENTO SUPERFICIAL 41
3.5.1 Rugosidade Média (Ra) 42
3.5.2 Rugosidade Total (RT) 42
3.6 POTÊNCIA DE USINAGEM 43
3.7 EMISSÃO ACÚSTICA 43
3.8 VIBRAÇÃO 44
4 MATERIAIS E MÉTODOS 45
4.1 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 45
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 52
5.1 RUGOSIDADE RA: (ENDURECIDO) 52

5.2 RUGOSIDADE RT: (ENDURECIDO) 54
5.3 RUGOSIDADE RA: (RECOZIDO PVD) 56
5.4 RUGOSIDADE RT: (RECOZIDO PVD) 57
5.5 POTÊNCIA CONSUMIDA: (MÁXIMA) 59
5.6 VIBRAÇÃO: (MÁXIMA) 61
5.7 EMISSÃO ACÚSTICA: (MÁXIMA) 63
5.8 DESGASTE POR METRO USINADO 65
5.9 DESGASTE E AVARIA DA FERRAMENTA 67
5.10 ANÁLISE DOS CAVACOS 71
5.10.1 Análise macro dos Cavacos 71
5.10.2 Análise micro dos Cavacos 74
6 CONCLUSÕES 76
REFERÊNCIAS 78

1 INTRODUÇÃO

A usinagem de aços, endurecidos (temperado e revenido) pelo processo de torneamento tem se tornado uma realidade no setor industrial devido as vantagens que a usinagem destes aços nestas condições proporcionam. Entre estas vantagens destacam-se a eliminação do processo de retificação, maior produtividade, possibilidade de usinagem a seco, entre outros. Porém, a maior desvantagem está no alto desgaste das ferramentas de corte. Assim, as ferramentas fabricadas de nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN) são as primeiramente recomendadas para este tipo de operação.

Com os avanços tecnológicos na área de materiais para ferramentas e técnicas de deposição de revestimentos, a ferramenta de metal duro passa a ser uma boa alternativa para a usinagem de materiais duros, desde que recebam revestimento adequado. Essas ferramentas revestidas podem ter um custo de até 80 vezes menor que o PCBN. Neste trabalho foi analisado o desempenho de ferramentas de metal duro revestidas por CVD com recobrimento de Ti(C,N) + Al_2O_3 e por PVD com recobrimento de Ti-Al-Si-N.

Pouco se conhece sobre o torneamento do aço SAE 4340 endurecido, um aço de elevada temperabilidade e boa forjabilidade de grande uso industrial. Devido às suas características ele é aplicado para fabricação de virabrequins para aviões, tratores, eixos com elevada solicitação mecânica e veículos em geral. Na indústria aeronáutica é muito utilizado devido sua grande resistência e tenacidade que são fundamentais em projetos aeronáuticos para diversas aplicações, desde peças até ferramentais que são utilizados para construção e montagem das aeronaves (TORRES, 2002).

De acordo com Sreejith e Ngoi (2000), os gastos com fluidos refrigerantes podem representar até 20% dos custos de produção. Portanto o não uso de fluidos refrigerantes, ou seja, a usinagem a seco traria grandes benefícios de redução de custo além de não agredir o meio ambiente.

As exigências de aços extremamente duros estão aumentando continuamente, criando sempre novos desafios para operações de usinagem e colocando demandas muito altas para ferramentas de corte de alto desempenho. A tecnologia em ferramentas revestidas também continua a desenvolver novos materiais estimulada com os desenvolvimentos em filmes finos e tecnologias de deposição de revestimento (SETTINERI et al, 2008).

O revestimento de ferramentas de metal duro é bastante importante, pois pode garantir desempenho superior na usinagem, além de propiciar um custo mais acessível a esses materiais. O metal duro permite que as ferramentas deste material possam receber o processo

PVD (Physical Vapour Deposition) e também o CVD (Chemical Vapour Deposition) que utiliza temperaturas elevadas, não implicando em alterações metalúrgicas no metal duro (MACHADO et al, 2011).

Com base nestas informações, neste trabalho busca se analisar a usinabilidade do aço AISI 4340 endurecidos (temperado e revenido), no processo de torneamento a seco com ferramentas de metal duro recobertas pelos processos CVD e PVD variando-se a velocidade de corte e o avanço, comparando com a usinagem na condição recozida deste material, com o intuito de buscar melhores condições de usinagem, além de analisar a influência do desgaste da ferramenta com as variáveis do processo, como na qualidade superficial das peças, rugosidade (Ra e Rt), a potência consumida, a emissão acústica e as vibrações produzidas durante a usinagem.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar a usinabilidade do aço AISI 4340 na condição recozida e na condição endurecida (temperado e revenido), no processo de torneamento a seco com ferramentas de metal duro recobertas pelos processos CVD (*Chemical Vapour Deposition*) e PVD (*Physical Vapour Deposition*). Objetiva ainda analisar os efeitos da variação da velocidade de corte e do avanço no processo. Para isso foram analisadas as variáveis de saída do processo: desgaste das ferramentas, tipos e formas dos cavacos gerados, qualidade superficial das peças (rugosidade média e rugosidade total), a potência consumida, emissão acústica e as vibrações produzidas durante a usinagem.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇOS

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, visto que, a rigor os aços comerciais não são ligas binárias: de fato, apesar dos seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação (CHIAVERINI, 1988).

Aço é uma liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação (CHIAVERINI,1988).

Os aços são definidos como ligas ferro-carbono, no qual, pode conter também apreciáveis concentrações de outros elementos. A variação na composição dos elementos, bem como, no tratamento térmico realizado, dá origem a milhares de ligas diferentes (CALLISTER Jr; RETHWISCH, 2013).

Estas ligas podem ser classificadas como aço comum ou como aços especiais. O comum, também conhecido como aço ao carbono, contêm concentrações residuais de impurezas, além do carbono e de uma pequena quantidade de manganês, como pode ser observado na sua composição química: manganês (0,3 a 0,6%), enxofre (máximo de 0,05%), silício (0,1 a 0,3%), carbono (0,08 a 2%), fósforo (máximo de 0,04%), e ferro. Já no caso dos aços especiais (aços-ligas), os elementos são adicionados com uma concentração específica, de forma intencional, para conferir uma determinada característica ao material (ROMEIRO, 1977; CALLISTER Jr; RETHWISCH, 2013). Estes elementos que são adicionados, teem como objetivo proporcionar ao material as seguintes vantagens: aumentar a usinabilidade, conferir dureza a quente, aumentar a temperabilidade, conferir resistência ao desgaste, alterar as propriedades mecânicas, conferir resistência a oxidação, entre outros (ROMEIRO, 1977).

Para Callister Jr e Rethwisch, (2013), o aço também pode ser classificado de acordo com o teor de carbono, visto que as propriedades mecânicas dele são sensíveis à concentração deste elemento químico. Portanto, este material pode ser classificado como:

- Aço com baixo teor de carbono: Este aço apresenta aproximadamente menos que 0,25%p C e não respondem a tratamentos térmicos direcionados para formar martensita.

- Aço com médio teor de carbono: Com concentração de carbono variando de 0,25 a 0,60%p, as ligas desta classe, podem ser tratadas termicamente por meio da austenitização, tempera e revenimento.

- Aço com elevado teor de carbono: Estes aços são mais duros e resistentes, com concentração de carbono variando de 0,60 a l,4%p, e normalmente são usados em uma condição endurecida e revenida.

3.1.1 Aço AISI 4340

Dada a grande variedade de tipos de aços, foram criados sistemas para sua classificação, os quais periodicamente são submetidos a revisões. Uma das classificações mais generalizadas e que, inclusive, serviu de base para o sistema adotado no Brasil, ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) é a que considera a composição química dos aços e, dentre os sistemas conhecidos, são muito usados os da AISI (*American Iron and Steel Institute*) e da SAE (*Society of Automotive Engineers*) (CHIAVERINI,1988).

O aço AISI 4340 é um material de engenharia de grande importância na fabricação de componentes que exigem uma boa combinação de resistência mecânica e tenacidade. Ele é muito empregado na indústria automobilística e aeronáutica na produção de engrenagens de transmissão de energia, semi-eixos, eixos principais, acoplamentos, trens de pouso, entre outros (SURESH; BASAVARAJAPPA; SAMUEL, 2012; EL RAYES; EL-DANAF; ALMAJID, 2015; SHARMA; PANDEY, 2016).

De acordo com Chiaverini (1988), o aço AISI 4340 faz parte do grupo dos aços super-resistentes, desenvolvidos inicialmente para o emprego em componentes de aviões e mísseis. Este grupo tem como característica teores de carbono relativamente baixos, no qual, a presença simultânea de vários elementos de liga aumenta a temperabilidade do aço, mesmo que em pequenas proporções.

Este aço é de médio carbono, tratável termicamente, com alta resistência e baixa liga, resistente à fadiga em elevadas temperaturas, aplicado em estruturas críticas, como vasos de pressão em usinas nucleares e componentes de construção mecânica (BHATTACHARYA et al., 2011). No entanto, eles são de baixa soldabilidade e usinabilidade (FAVORIT, 2016).

Na Tabela 1 é apresentado a composição química deste aço de acordo com a ABNT NBR NM 87:1996, a qual cita que o teor de enxofre e fósforo deve ser de no máximo 0,035%.

Tabela 1: Composição química do aço ABNT 4340.

ABNT/SAE	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
4340	0,38- 0,43	0,60- 0,80	0,15- 0,35	1,65- 2,00	0,70- 0,90	0,20- 0,30

Fonte: Adaptado de ABNT NBR NM 87 (1996).

Na Tabela 2 é apresentado as propriedades mecânicas características do aço AISI/SAE 4340 sujeito a determinadas condições de tratamento térmico.

Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço AISI/SAE 4340.

Propriedades	Sistema Métrico
Resistência a Tração	745 MPa
Limite de Escoamento	470 MPa
Módulo volumétrico (típico para aços)	140 GPa
Módulo de cisalhamento (típico para aços)	80 GPa
Módulo de elasticidade	190-210 GPa
Coeficiente de Poisson	0.27-0.30
Alongamento à ruptura	22%
Redução de Área	50%
Dureza, Brinell	217
Dureza, Knoop (convertido da dureza Brinell)	240
Dureza, Rockwell B (convertido da dureza Brinell)	95
Dureza, Rockwell C (convertido da dureza Brinell. Valor abaixo da faixa HRC padrão, apenas para fins de comparação)	17
Dureza, Vickers (convertido da dureza Brinell)	228
Usinabilidade (recozido e estirado. Baseado em usinabilidade 100 para o aço AISI 1212.)	50

Fonte: Adaptado de AZoM - The A to Z of Materials (2014).

3.2 TRATAMENTO TÉRMICO

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas (CHIAVERINI, 1988).

De acordo com Chiaverini (1988), os principais objetivos do tratamento térmico são: remoção de tensões, aumento ou diminuição da dureza, aumento da resistência mecânica, melhora da ductibilidade, melhora da usinabilidade, melhora da resistência ao desgaste, melhora das propriedades de corte, melhora da resistência à corrosão, melhora da resistência ao calor e modificação das propriedades elétricas e magnéticas. Em geral, a melhora de uma ou mais propriedades, mediante um tratamento térmico, é conseguida com prejuízo de outras. Por exemplo, o aumento da ductibilidade provoca simultaneamente queda nos valores de dureza e resistência à tração.

Para Silva e Mei (1988), os principais tratamentos térmicos são:

- Recozimento;
- Normalização;
- Têmpera;
- Revenimento;
- Solubilização;
- Envelhecimento.

Neste trabalho iremos dar enfoque aos seguintes processos de tratamento térmico: Endurecimento (têmpera e revenimento) e o processo de recozimento. Pois, são esses processos que foram utilizados nos nossos corpos de prova em questão.

3.2.1 Recozimento

O recozimento consiste no aquecimento do aço até acima da zona crítica, seguido de um esfriamento lento (dentro do forno, por exemplo). Habitualmente se visa com esse tratamento restituir ao material suas propriedades normais que foram alteradas por um tratamento mecânico ou térmico anterior, ou ainda refinar texturas brutas de fusão (COLPAERT, 1974).

Este tratamento é utilizado para deixar o aço menos duro, portanto, com maior ductibilidade e menor resistência mecânica. No recozimento, diminui se o limite de

escoamento e o limite de resistência do aço, aumentando-se então o alongamento e a estricção, propriedades geralmente medidas durante o ensaio de tração. O tratamento consiste em se austenitizar o aço em uma temperatura adequada e esfriá-lo lentamente (no próprio forno de aquecimento desligado). Obtém-se, então, ferrita + perlita (aço hipoeutetóide, ou seja, com < 0,8% C), perlita (aço eutetóide) ou perlita + cementita (aço hipereutetóide). Este tratamento é também útil para melhorar a usinabilidade do aço, para refinar o grão em relação ao aço em estado bruto de fusão e para homogeneização química (SOUZA, 2011).

3.2.2 Endurecimento

O processo de tratamento térmico de endurecimento é formado pelo processo de têmpera e posteriormente pelo processo de revenimento.

A têmpera consiste, em regra, no aquecimento da peça até acima da zona crítica, seguido de um esfriamento rápido em água, óleo, etc. Seu escopo é, em geral, aumentar a dureza do aço e tornar mais elevado seu limite de escoamento e sua resistência à tração, à compressão e ao desgaste. A resistência elétrica também se eleva. Em consequência da têmpera diminuem, porém, a resistência ao impacto, o alongamento, a estrição e a ductilidade. (COLPAERT, 1974).

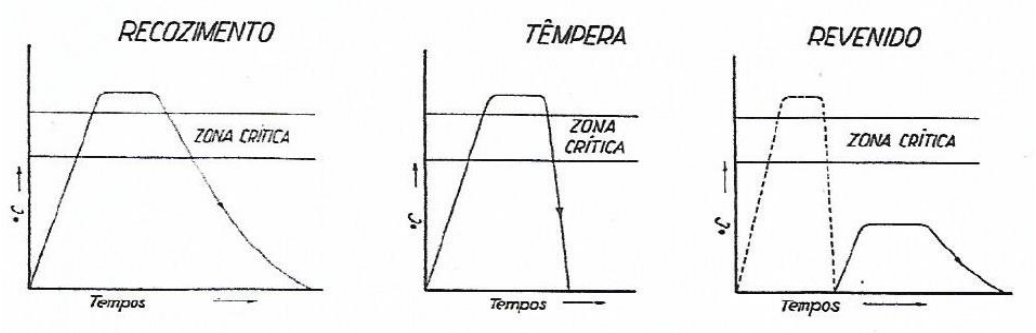
Quanto mais rápido for o resfriamento do aço aquecido até o campo de austenita, mais o material endurece. Quando o resfriamento é rápido (em água, por exemplo), a estrutura resultante é a martensita, que tem a estrutura tetragonal de corpo centrado e é uma fase extremamente dura. No entanto, a martensita introduz tensões internas significativas no material, que podem ocasionar fissuras na superfície do aço (SOUZA, 2011).

De acordo com Souza (2011), a martensita obtida pela têmpera não favorece a utilização do aço porque ele se torna excessivamente duro, com comportamento mecânico frágil e quase sem nenhuma tenacidade. Portanto, após a têmpera, faz-se outro tratamento térmico para corrigir algumas propriedades mecânicas que é o revenimento. Ele aumenta no aço a ductilidade e a tenacidade, sem afetar muito a resistência mecânica e a dureza alcançadas pela têmpera. Outra finalidade do revenimento é a de diminuir as tensões internas produzidas pela têmpera.

O processo de tratamento térmico de revenimento consiste em reaquecer a peça temperada até uma temperatura conveniente, abaixo da zona crítica, e esfriá-la novamente em um processo de esfriamento mais lento do que a têmpera.

Na Figura 1 a seguir estão representadas as curvas de tratamento térmico com a zona crítica e as diferenças entre os três processos, recozimento, têmpera e revenido, em função da temperatura e do tempo.

Figura 1: Representação esquemática do recozimento, têmpera e revenido.



Fonte: Colpaert (1974)

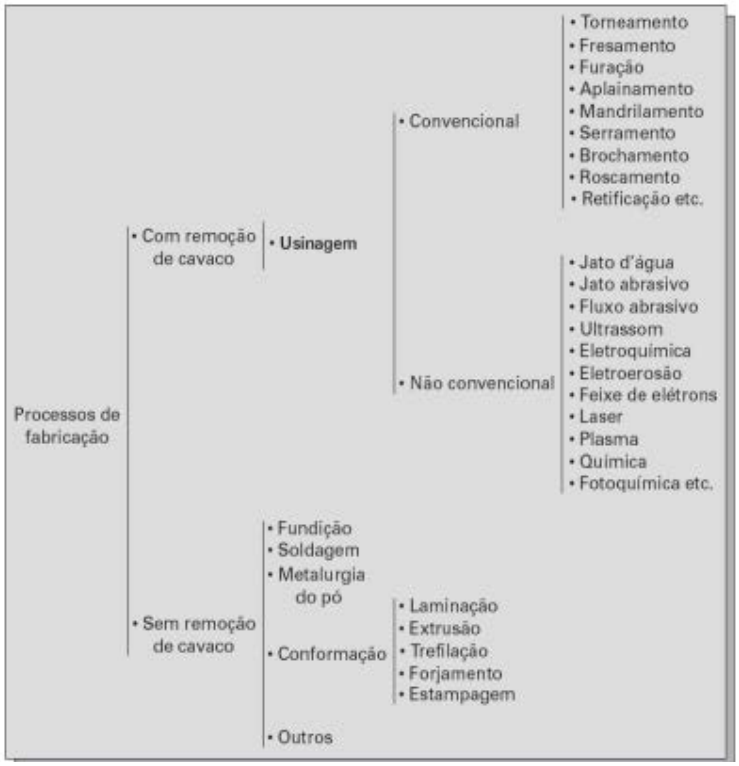
3.3 PROCESSO DE USINAGEM

A usinagem é o processo de fabricação mais utilizado do mundo e transforma em cavacos aproximadamente 10% em massa do total da produção de produtos metálicos fabricados, se considerarmos que os cavacos são lascas de material que são removidas, pode-se identificar a Idade da Pedra Lascada como origem da usinagem. É a transformação da matéria-prima em produto por meio dessa remoção de material na forma de cavacos que caracteriza o processo de usinagem (SANTOS; SALES, 2007).

De acordo com Machado et al. (2011), a usinagem é definida como um processo de fabricação que produz cavaco, caracterizado por sua forma geométrica irregular, ao conferir forma, dimensões e acabamento à peça.

O processo de usinagem consiste em conferir forma, dimensão e acabamento a uma peça através da remoção de material (cavaco), no qual, estes três fatores podem ser combinados ou não (FERRARESI, 2013). É apresentada na Figura 2 a classificação dos processos de fabricação, com destaque para os principais processos de usinagem. Dentre estes processos, o torneamento, o fresamento, a furação e a retificação.

Figura 2: Classificação dos processos de fabricação.



Fonte: Machado et al. (2011).

3.3.1 Usinagem de Aços Endurecidos

Por definição, aço endurecido é aquele que possui dureza superior a 45 HRC, com microestrutura formada principalmente por martensita e carbonetos livres. Por causa da sua dureza, estes materiais eram usinados apenas em processos abrasivos. Entretanto, devido ao desenvolvimento de máquinas e ferramentas com capacidade de suportar as duras condições tribológicas, presentes durante a formação do cavaco, e as altas forças de corte, estes materiais são usinados em processos de fresamento e torneamento (MACHADO et al., 2011).

Para Santos e Sales (2007), um dos problemas típicos da usinagem dos aços endurecidos está relacionado à integridade superficial das peças. Observa-se a modificação da superfície devido à ação termomecânica intensa, concentrada e rápida da ferramenta de corte. As alterações das superfícies ocorrem por causa das transformações de fases e, eventualmente, interações químicas.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013), devido a esta procura por usinar peças endurecidas através do torneamento e/ou fresamento, tem aumentado as exigências em relação às características mecânicas, térmicas e químicas da ferramenta.

Portanto, as ferramentas de metal duro recobertas com $Ti(C,N)/Al_2O_3$ ou com Ti-Al-Si-N, pelos processos de CVD (*Chemical Vapour Deposition*) e PVD (*Physical Vapour Deposition*), respectivamente, são alguns dos exemplos de ferramentas que podem ser utilizadas. Em que para usinar estes aços endurecidos com estas ferramentas, não deve ser utilizado fluido de corte, como consequência, a temperatura na região de corte aumenta e com isso a resistência mecânica diminui, portanto, facilita o processo (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

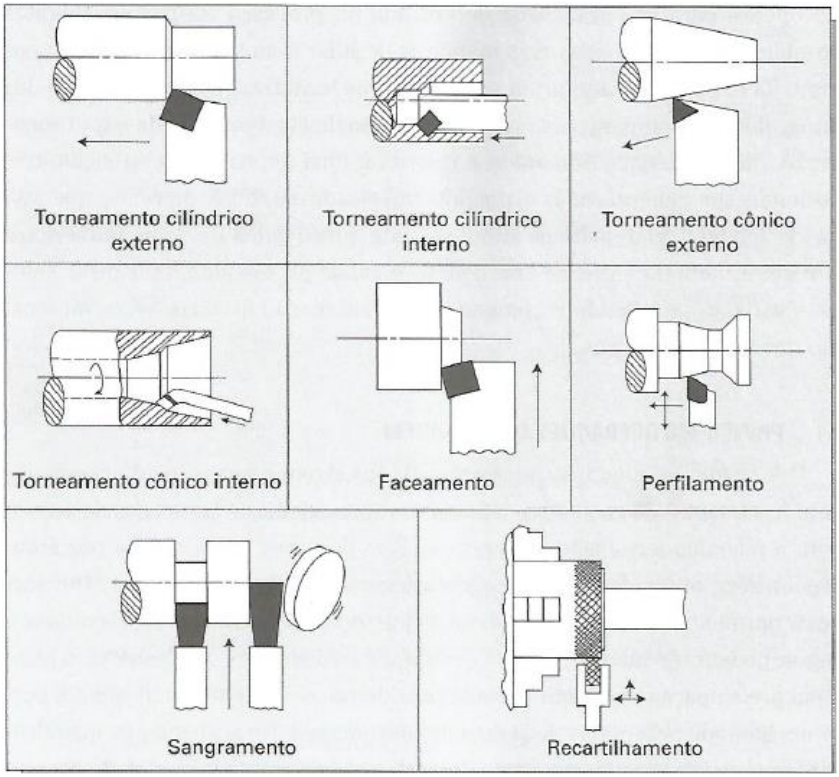
3.3.2 Torneamento

Ferraresi (2013) define o torneamento como um processo mecânico de usinagem, destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. Quanto à forma da trajetória, o torneamento pode ser retilíneo ou curvilíneo.

Machado et al. (2011) dizem que o torneamento é um processo convencional de usinagem em que ocorre remoção de material denominado cavaco, por cisalhamento, utilizando uma ou mais ferramentas com uma única aresta de corte e geometria definida. Esse processo tem como finalidade o desbaste ou o acabamento, determinados pela potência da máquina ferramenta, e visa obter superfícies de revolução. O movimento de rotação da peça em torno do eixo principal de rotação da máquina, denominado movimento de corte, é simultâneo ao movimento de avanço longitudinal e/ou transversal realizado pela ferramenta, ou seja, para obtenção da superfície desejada deve-se providenciar um movimento relativo apropriado entre a peça e a ferramenta adequada. A combinação dos movimentos de corte e de avanço resulta no chamado movimento efetivo.

A Figura 3 mostra as principais operações realizadas no torno. Nesses casos, a peça gira em torno de seu eixo enquanto a ferramenta de corte realiza os movimentos de avanço longitudinal e/ou transversal (MACHADO et al, 2011).

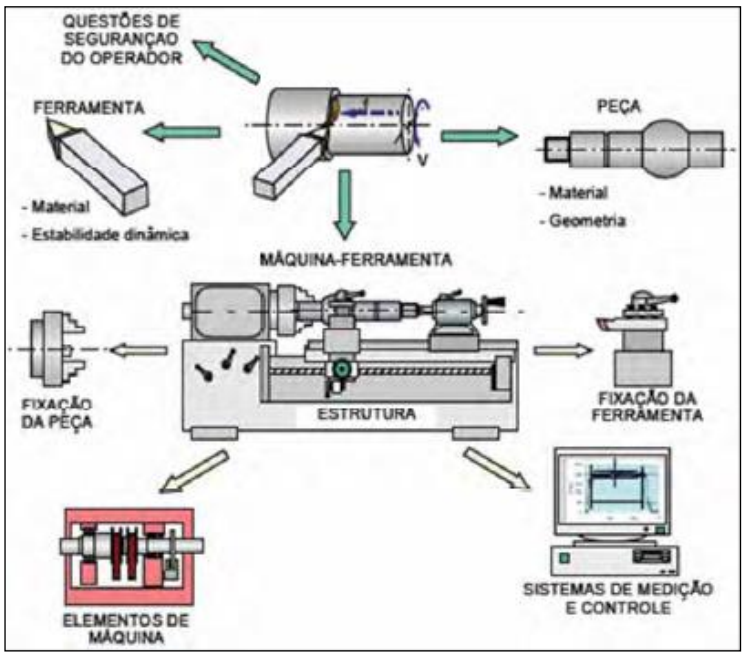
Figura 3: Principais operações executadas no torno.



Fonte: Machado et al. (2011)

Na Figura 4 destacam-se os fatores limitantes durante o processo de torneamento que devem ser levados em consideração (DIÓGENES, 2011).

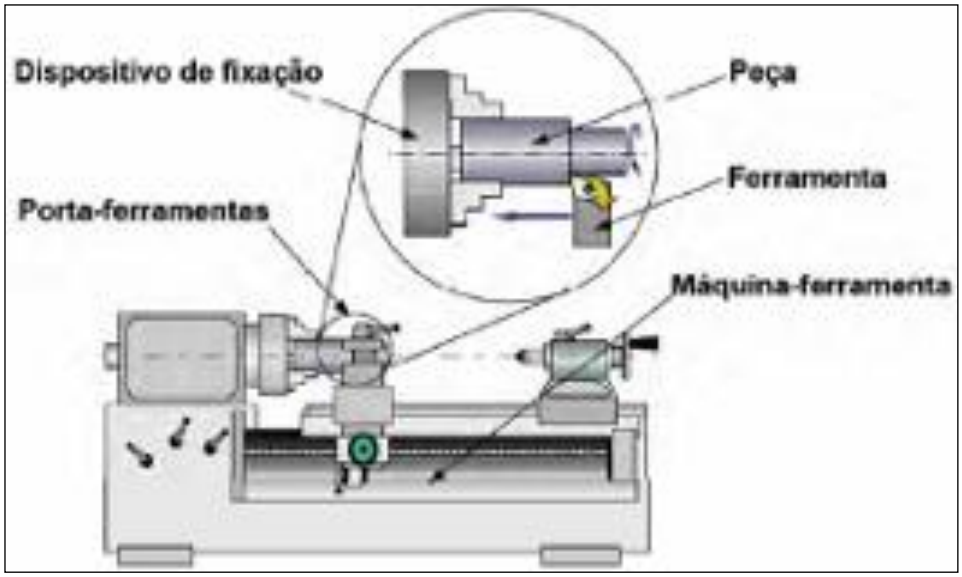
Figura 4: Limitantes do processo de usinagem por torneamento.



Fonte: Diógenes (2011).

Na Figura 5, são indicadas as grandezas relevantes ao processo de usinagem por torneamento (DIÓGENES, 2011).

Figura 5: Grandezas relevantes ao processo de usinagem por torneamento.



Fonte: Diógenes (2011).

3.3.3 Parâmetros de Corte para o Processo de Torneamento

O processo de torneamento é feito através de um torno, uma máquina simples cuja operação de corte requer o ajuste de três parâmetros: avanço (f), velocidade de corte (Vc) e profundidade de corte (ap). Segundo Amorim (2002), estes parâmetros podem ser definidos da seguinte forma:

- Velocidade de corte (Vc): é a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, expressa normalmente em [m/min];

- Avanço (f): é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça;

- Profundidade de corte (ap): é a profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e velocidade da ferramenta.

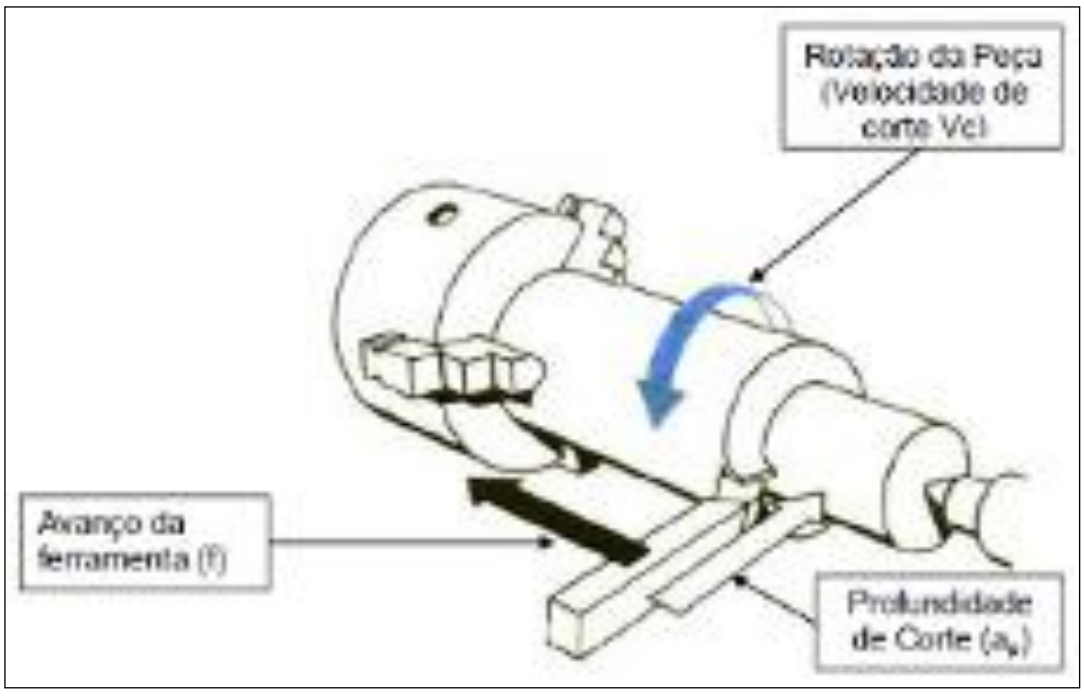
Máquinas e ferramentas comandadas por computador são chamadas de CNC (comando numérico computadorizado). Atualmente, é praticamente impossível imaginar a

indústria, principalmente os setores mecânico e metalúrgico, sem a presença de máquinas-ferramenta CNC (COSTA, 2006).

Segundo Costa (2006), a possibilidade de fabricar peças com geometrias complexas, com maior precisão e com um acabamento mais satisfatório são as vantagens das máquinas ferramentas tipo CNC. Fabricação de peças com as mesmas caracteristicas e redução de mão de obra são alguns dos benefícios trazidos pela utilização dessas máquinas. Porém o uso destas trouxe alguns malefícios como a necessidade de elevados investimentos em maquinário, capacitação de profissionais para utilização efetiva da nova tecnologia ocasionando o desligamento da mão de obra não especializada.

Os tornos com comando numérico diferem-se basicamente dos tornos convencionais, uma vez que não necessitam de acessórios que proporcionem o controle dos movimentos da máquina, tais como gabaritos, cames, limites, etc. e até mesmo a interferência direta do operador. Esses movimentos são comandados por dados de entrada, que determinam os movimentos a serem executados, proporcionando ao equipamento e à peça uma condição bastante favorável, quando comparado com torno convencional, além de que, são maiores as garantias de uniformidade de qualidade de peça para peça e de lote para lote (SOUZA, 2011). Figura 6 são indicados os movimentos do processo de torneamento (BANDINI, 2012).

Figura 6: Representação dos movimentos no processo de torneamento.



Fonte: Bandini (2012).

3.3.4 Fluido de Corte

Fluidos de corte podem ser caracterizados como qualquer espécie de fluido que é inserido em um processo de usinagem de modo a auxiliar nas operações de corte, tornando-se um elemento integrante do ciclo de produção (RUNGE e DUARTE, 1990).

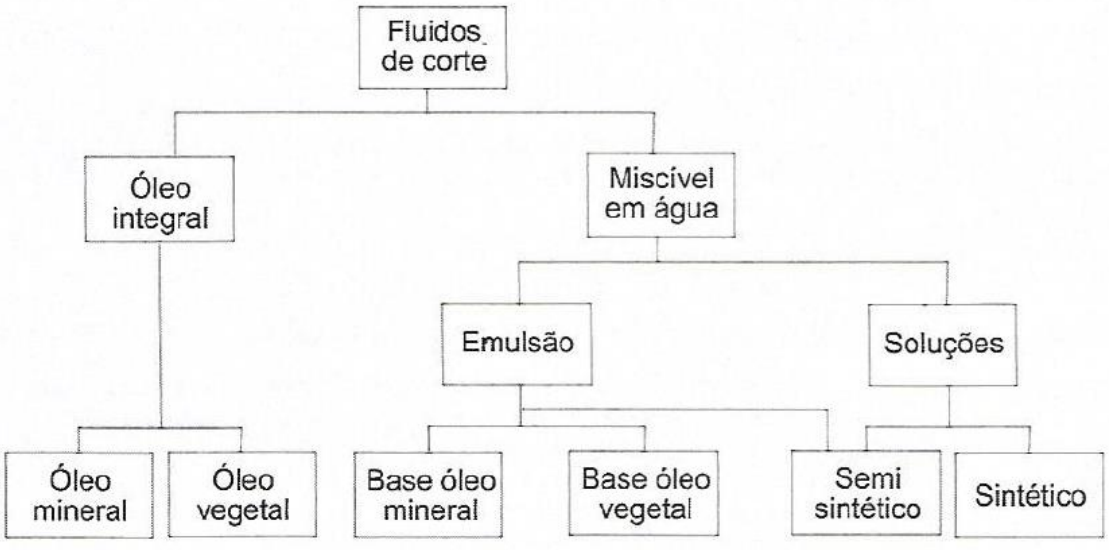
De acrodo com Machado et al (2011), as principais funções dos fluidos de corte são:

- Lubrificação a baixas velocidades de corte;
- Diminuir o desgaste da ferramenta de corte;
- Refrigeração a altas velocidades de corte;
- Remoção dos cavacos da zona de corte;
- Proteção da máquina ferramenta e da peça contra a oxidação.

Quando utilizados os fluidos corretos e de maneira correta, estes agentes arrefecedores proporcionam uma maior vida operacional à ferramenta, redução das forças de corte, proteção da máquina ferramenta contra corrosão, implicando em uma maior produtividade (SOKOVIC e MIJANOVIC, 2001).

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2013), Os diversos tipos de fluidos de corte podem ser classificados conforme mostra a Figura 7.

Figura 7: Classificação dos fluidos de corte.



Fonte: Diniz et al (2013).

Contudo, a utilização de fluidos de corte vem se tornando complexa por estar relacionada a problemas econômicos, ambientais e de saúde. Há um elevado custo de

manutenção e tratamentos, implicando em gastos que podem chegar até a 20% do custo total de produção. Além disso, o descarte, manuseio e transporte incorretos podem causar sérios danos ecológicos. E, ainda, podem ocorrer problemas de saúde, seja pelo contato com a pele ou pela inalação e ingestão de gotículas dos fluidos, causando problemas nos aparelhos respiratório e digestivo (HOWELL et al., 2006).

Devido aos fatores apresentados, esforços têm sido realizados para que a utilização dos fluidos de corte seja minimizada ou até eliminada. Sendo assim utilizando o processo de usinagem a seco.

Na usinagem a seco, devido à remoção de fluido de corte durante os processos, é exigido das ferramentas de corte com um melhor desempenho em altas temperaturas, para poder sustentar taxas de alimentação que satisfaçam elevadas taxas de produção (MEENA; EL MANSORI, 2011).

Quanto às condições de corte, é realizado o aumento do avanço e a diminuição da velocidade de corte para tornar o processo mais adequado, pois com isso, se mantém o volume de cavaco removido por unidade de tempo e a quantidade de calor gerado por unidade de tempo será aproximadamente o mesmo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

3.3.5 Mecanismo de Formação de Cavaco.

A formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte, entre outros fatores. Assim, estão envolvidos com o processo de formação de cavaco aspectos econômicos e de qualidade da peça, segurança do operador, utilização adequada da máquina-ferramenta, etc (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Para Machado et al. (2011), a formação do cavaco pode ser dividida em quatro evento, evidenciados a seguir:

- Recalque inicial: devido à penetração da cunha de cortante no material da peça, uma pequena porção deste (ainda unido à peça) é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta.

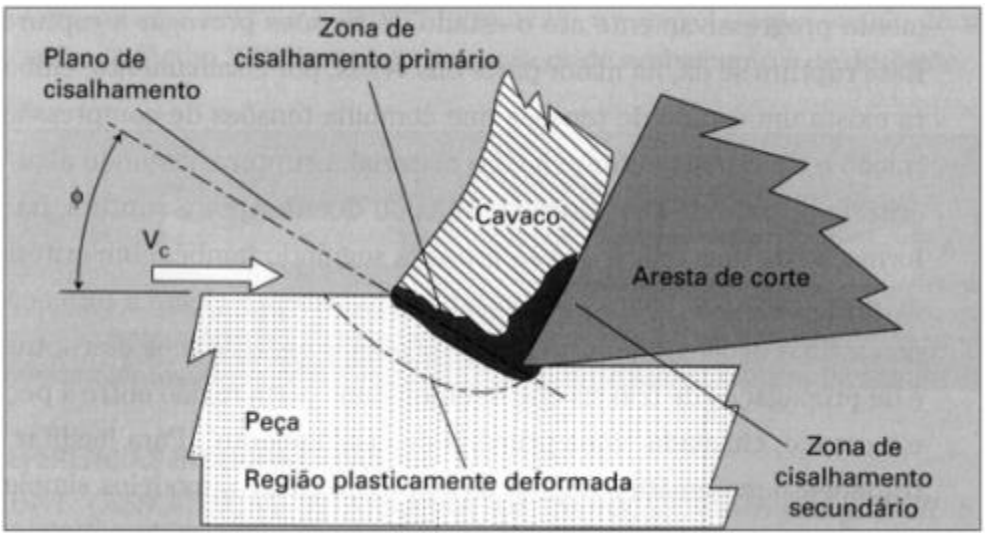
- Deformação e ruptura: o material pressionado sofre, de início, uma deformação elástica, e , em seguida, uma deformação plástica, que aumenta progressivamente até o estado de tensões provocar ruptura. Essa ruptura se da na maior parte das vezes por cisalhamento. Na Figura 8 é ilustrada a esquematização do plano ou zona de cisalhamento primário definida

pelo ângulo ϕ (denominado ângulo de cisalhamento) formado entre a direção da velocidade de corte (v_c) e o plano de cisalhamento.

- Deslizamento das lamelas: continuando a penetração da ferramenta na peça há uma ruptura parcial ou completa, que irá depender da extensão da propagação da trinca, na região de cisalhamento. E o que determinará se o material rompido continuará unido ao cavaco recém-formado serão as propriedades do material e as condições de velocidade, avanço e de corte, dando origem aos cavacos contínuos ou descontínuos.

- Saída do cavaco: é onde se inicia o escorregamento do cavaco devido ao movimento relativo ferramenta-peça. Enquanto isso ocorre, uma nova porção de material está se formando e passando pelos mesmos processos.

Figura 8: Mecanismo de formação de cavacos.



Fonte: Machado et al. (2011).

Conclui se que o fenomeno de formação de cavaco é periódico. Essa periodicidade foi comprovada experimentalmente por meio da medida da frequência e amplitude de variação da intensidade da força de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Em materiais dúcteis, esses quatro eventos são bem pronunciados, porque eles apresentam uma grande zona plástica e, portanto, se deformam bastante antes de ocorrer a ruptura. Enquanto que, em materiais frágeis, com zona plástica bem pequena, o primeiro e o segundo evento são bem curtos, no terceiro a ruptura do cavaco é total e o último evento é praticamente inexistente, pois o cavaco de pequena dimensão é extraído rapidamente da região de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

3.3.5.1 Tipos e Formas de Cavaco

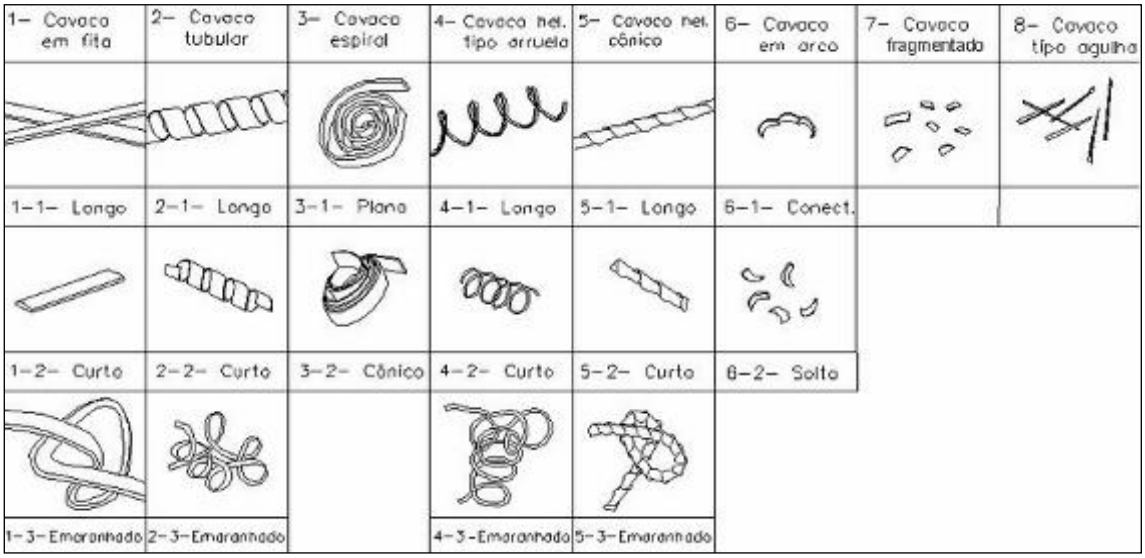
Existem diversas classificações para os cavacos, uma das mais didáticas é aquela que os classificam em tipos e formas (Ferraresi, 2013). Os três principais tipos são: Cavaco contínuo, cavaco de cisalhamento e cavaco de ruptura.

O primeiro tipo de cavaco é constituído de lamelas justapostas em uma disposição contínua, no qual, não é nítida a distinção destas lamelas. Este tipo de cavaco é formado na usinagem de materiais dúcteis (aços, por exemplo). Os cavacos de cisalhamento são constituídos de lamelas justapostas bem distintas. E por fim, os cavacos de ruptura são constituídos de fragmentos que foram arrancados da peça usinada. Este tipo de cavaco é característico da usinagem de materiais frágeis. A ação do atrito neste caso é menor porque a superfície de contato entre a superfície de saída do cavaco e o próprio cavaco é reduzida (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Na usinagem de aços endurecidos pode haver um quarto tipo de cavaco, denominado cavaco segmentado ou "dente de serra". Isso ocorre devido a grandes tensões de compressão que aparecem na ferramenta e na peça quando são utilizadas ferramentas com ângulo de saída negativo. Esta alta tensão promove a formação de trincas ao invés de deformação plástica (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Quanto à sua forma os cavacos podem ser classificados em: em fita, helicoidais, em espiral, em lascas ou pedaços. A norma ISO 3685 (1987) define uma classificação mais detalhada dos cavacos quanto à forma, conforme Figura 9 (SANTO; SALES, 2007).

Figura 9: Classificação dos cavacos de acordo com a norma ISO 3685 (1987).

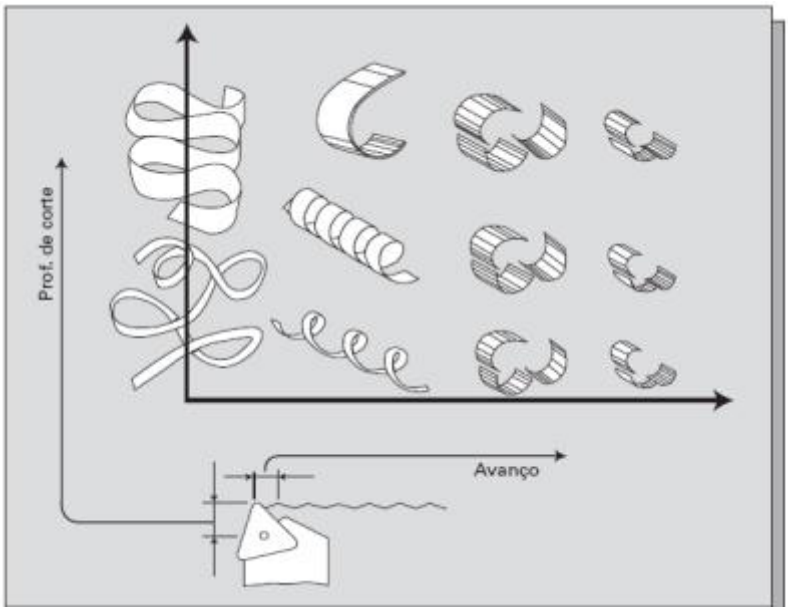


Fonte: ISO 3685 (1987).

O material da peça é o que mais influencia a forma e o tipo do cavaco. No entanto, um aumento na velocidade de corte, uma redução no avanço ou um aumento no ângulo de saída tendem a produzir cavacos em fitas (contínuos). Dentre estes parâmetros, o avanço é o mais influente, seguida da profundidade de corte, a afetar a forma do cavaco (MACHADO et al., 2011).

O efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos pode ser visto na Figura 10.

Figura 10: Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos.



Fonte: Machado et al. (2011).

Para Diógenes (2011), os tipos de cavaco e suas respectivas características ao processo de usinagem estão listadas a seguir:

- Cavacos helicoidais: considerado o tipo mais apropriado de cavaco. A formação ocorre sempre em altas velocidades de corte, caracterizando alta remoção de material;

- Cavaco tipo espiral: também considerados um tipo de cavaco favorável, ocorre principalmente quando existe a presença de quebra-cavaco na ferramenta de corte;

- Cavaco tipo fita: de forma geral, a formação desse tipo de cavaco pode ser considerada a mais problemática, pois além de apresentar aresta de corte bastante afiada, apresenta certa tendência a causar paradas no processo produtivo, enrolando-se na peça, na ferramenta ou na placa do torno e em alguns casos a formação desse tipo de cavaco pode causar a quebra da ferramenta de corte;

- Cavaco em lascas ou pedaços: ocorre devido a irregularidades no material, ângulo efetivo de corte pequeno, velocidades de corte pequenas, altas profundidades de corte, sendo mais aplicável quando não há muito espaço para o processo de usinagem.

3.3.6 Materiais para Ferramenta

Para obter maior eficiência no processo de usinagem é necessário determinar qual é o material ideal a ser utilizado como ferramenta de corte. De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013), a seleção deste material depende de diversos fatores como: material a ser usinado, processo de usinagem, condição da máquina operatriz, forma e dimensões da ferramenta, custo do material da ferramenta, condições de usinagem e condições da operação.

No entanto, independente do material utilizado para ferramenta de corte, é desejável que ele tenha as seguintes propriedades: alta dureza; alta resistência ao desgaste abrasivo; alta resistência ao cisalhamento; alta resistência ao choque térmico; ser inerte quimicamente; resistência a fadiga; alta tenacidade a fratura; alta resistência à compressão; alta resistência ao impacto; e, boas propriedades térmicas e mecânicas em temperaturas elevadas. No qual, dependendo da aplicação, algumas destas propriedades são reunidas. Pois, todas as características não se encontram reunidas em um único material (MACHADO et al, 2011).

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2013), os materiais para ferramenta de corte podem ser classificados de acordo com as suas características químicas e de processamento, apresentados a seguir, em ordem crescente em relação a sua dureza a quente e resistência ao desgaste por abrasão:

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

3.3.6.1 Metal Duro.

O metal duro é o material para ferramenta mais utilizado na indústria moderna, pois este produto combina dureza à temperatura ambiente, resistência ao desgaste, dureza a quente e tenacidade. No qual, esta combinação se torna possível de se obter devido à variação em sua composição (FERRARESI, 2013). Ele é um produto da metalurgia do pó, sinterizado com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto), resultando em um corpo com alta dureza e resistência a compressão (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A norma ISO 513 (2004) apresentou uma classificação de grupos de ferramentas de corte para os processos de usinagem. A seguir a Figura 11 demostra isso.

Figura 11: Classificação dos metais duros segundo a Norma ISO 513 (2004).

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Metais duros			
P	Azul	**Aços:** Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	a ↑	b ↓
M	Amarelo	**Aço Inoxidável:** aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	a ↑	b ↓
K	Vermelho	**Ferro fundido:** Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	a ↑	b ↓
N	Verde	**Metais não ferrosos:** Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	a ↑	b ↓
S	Marrom	**Superligas e titânio:** Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	a ↑	b ↓
H	Cinza	**Materiais duros:** Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	a ↑	b ↓

a – Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta.
b – Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.

Fonte: Machado et al. (2011).

O revestimento de ferramentas de metal duro ganhou uma importância, pois pode garantir um desempenho relativamente superior à ferramenta sem revestimento. Entre todo o metal duro utilizado na indústria, os revestidos representam, atualmente, mais de 95%, com tendência a crescimento contínuo. Outro fator que contribui muito para o crescimento da aplicação de metal duro revestido é o maior domínio das técnicas de revestimento, bem como um custo mais acessível (MACHADO et al, 2011).

Os dois processos de revestimento que serão tratados neste trabalho serão o CVD (*Chemical Vapour Deposition*) e PVD (*Physical Vapour Deposition*), sendo o CVD com recobrimento de Ti(C,N) + Al_2O_3 e o PVD com recobrimento de Ti-Al-Si-N. Ambos serão detalhados a seguir.

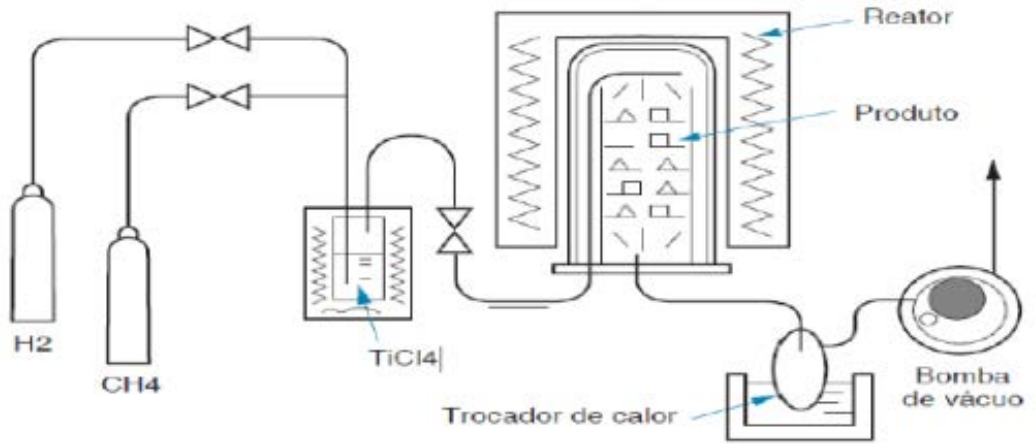
3.3.6.2 Revestimento pelo processo CVD (*Chemical Vapour Deposition*).

CVD (*Chemical Vapour Deposition*), que em português significa Deposição Química a Vapor é um processo de revestimento muito empregado na indútria, pois há maior domínio da técnica de revestimento em relação a outras técnicas o que contribue para o menor custo do processo. A classificação da ferramenta utilizada nesse trabalho é a TH 1500 (fornecida pela SECO ®).

Esse processo atinge temperaturas na faixa de 850 à 1050 °C através do qual gases são fornecidos em uma câmara onde ocorre a reação química do elemento a ser depositado com o substrato que resulta na formação do revestimento sobre a superfície da ferramenta. Na Figura 12 é ilustrado esquematicamente todo esse processo de revestimento.

Normalmente são aplicadas duas camadas: Ti(C,N) + Al_2O_3 (Carbonitreto de Titânio + Óxido de Alumínio). O Ti(C,N), carbonitreto de titânio, que garante uma elevada dureza, é caracterizado por ser a primeira camada pois garante maior aderência do revestimento no substrato e de novos revestimentos sobre ele. O Al_2O_3, óxido de alumínio, que apresenta uma alta dureza à quente, garante um boa inércia química, é resistente ao desgaste e sua principal característica é a redução da condutividade térmica, garantindo assim uma “barreira térmica”.

Figura 12: Esquema do processo de deposição química a vapor CVD.



Fonte: Da Costa (2016).

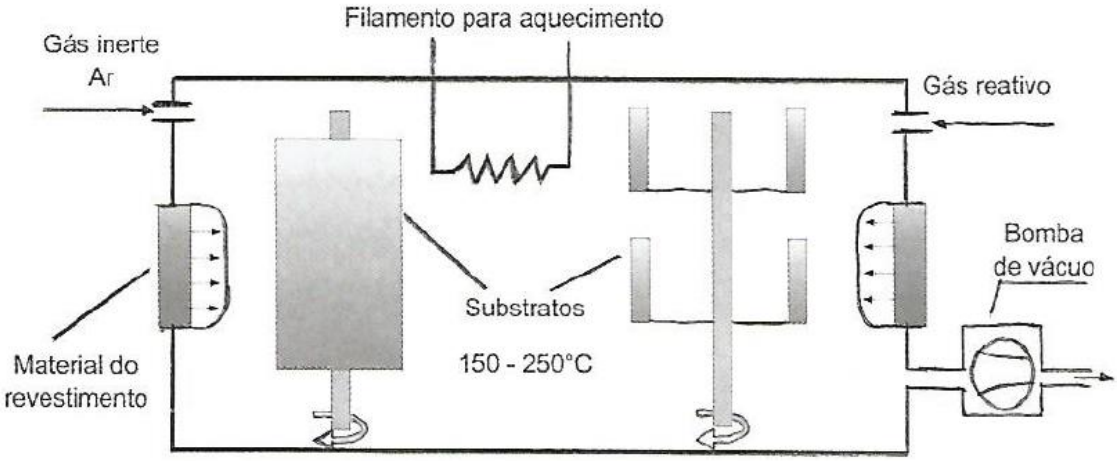
3.3.6.3 Revestimento pelo processo PVD (*Physical Vapour Deposition*).

PVD (*Physical Vapour Deposition*), que em português significa Deposição Física a Vapor também é um processo de revestimento muito empregado na indútria, pois seu custo benefício é vantajoso já que o maior domínio das técnicas de revestimento contribuem para o menor custo do processo. A classificação da ferramenta utilizada nesse trabalho é a TH 1000 (fornecida pela SECO).

Esse processo atinge temperaturas na faixa de 400 à 600 °C através do qual o aquecimento e injeção do gás inerte ionizado, permite a evaporação do material sólido que reage com os gases reativos e depositando-se sobre o substrato que está carregado eletricamente, favorecendo assim a deposição. A Figura 13 demonstra esquematicamente todo esse processo de revestimento.

O recobrimento é realizado através de uma camada de: Ti-Al-Si-N (Nitreto de Titânio Alumínio Silício). O Ti-Al-Si-N, Nitreto de Titânio Alumínio Silício, é caracterizado por ser termicamente estável à temperaturas elevadas e também por apresentar uma boa resistência ao desgaste.

Figura 13: Esquema do processo de deposição física a vapor PVD.



Fonte: Santos e Sales. (2007).

3.3.6.4 Comparação entre os processos CVD e PVD.

Conforme evidenciado na Figura 14, no processo CVD necessita-se de uma maior temperatura para ocorrer a deposição, praticamente o dobro. O processo PVD tem uma grande vantagem pois seu revestimento apresenta uma espessura bem pequena (cerca de 4µm) possibilitando assim a deposição em arestas de corte com ângulos mais agudos. Isso amplia sua área de trabalho, sendo aplicado nos processos de fresamento, roscamento, furação, etc... Já o processo CVD é o contrário, o mesmo apresenta uma espessura de revestimento maior (cerca de até 12µm) caracterizado também pelo fato de poder apresentar várias camadas de revestimento. Sendo assim, o processo CVD necessita de arestas de corte arredondadas e desse maneira é utilizado nos processos de Torneamento e mandrilhamento.

Nota se também que o processo PVD garante uma melhor resistência a propagação de trinca no substrato, enquanto o processo CVD diminui essa propriedade, o que causa problemas para a aplicação de ferramentas revestidas pelo processo CVD em cortes interrompidos. A causa dessa redução de tenacidade está na tensão residual de tração deixada pelo método CVD, enquanto, no método PVD, a tensão residual é de compressão, igual à conseguida no substrato após a retificação (QUINTO et al., 1988).

Figura 14: Comparação de ferramentas revestidas pelos processos CVD e PVD.

Tabela 7.8 Comparação de ferramentas revestidas pelos processos CVD e PVD.

	CVD – Deposição química de vapor	PVD – Deposição física de vapor
Temperatura de revestimento	Aproximadamente 1.000 °C	Aproximadamente 500 °C
Tenacidade	Reduzida	Não é afetada
Aresta de corte	Arredondamento requerido	Pode ser quina viva
Espessura do revestimento	Até 12 μm	Até 4 μm
Camadas	Multicamadas TiC - TiN, TiN – TiCN – TiN, TiC – Al_2C_3	TiN, TiCN, TiNAl
Principais aplicações	Torneamento e mandrilamento	Fresamento, roscamento e furação
Vantagens	Maior resistência ao desgaste Maior resistência à craterização Grande vida da ferramenta	Substitui ferramentas sem revestimento: com mesma tenacidade, mesma configuração de aresta e mesma precisão Reduz APC Maior vida na ferramenta

Fonte: Machado et al. (2011).

3.3.7 Desgaste e Avaria da Ferramenta

Devido aos parâmetros iniciais e durante o processo de usinagem, a ferramenta sofrerá uma determinada carga mecânica e térmica, podendo assim acarretar desgastes e avarias na mesma.

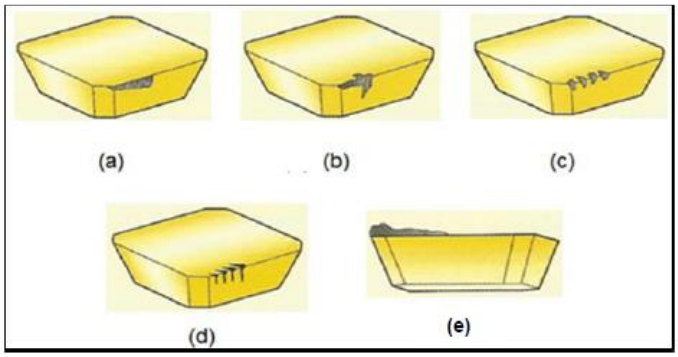
Diversos são os tipos de desgastes e avarias que acontecem em uma ferramenta de usinagem. Antes de defini-los é importante diferenciá-los. Desgaste é a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte. As demais ocorrências são denominadas de avarias (DINIZ et al., 2013).

Desgaste é o fenômeno progressivo nas superfícies de saída e de folga da ferramenta em função da ação de cortar, que muda a forma e, portanto a geometria original da ferramenta. São resultantes de vários mecanismos distintos, dependendo da natureza do material usinado e das condições de usinagem, da operação de usinagem, das condições de corte, da geometria da ferramenta e do emprego e da eficiência da aplicação de fluido de corte ou não (ALVES, 2015).

Podemos classificar os mecanismos de desgaste das ferramentas de corte, principalmente, como: Abrasão, Difusão, Oxidação, Fadiga e Aderência.

Como evidenciado na Figura 15, como consequência desses mecanismos podem surgir desgastes e avarias como: Desgaste de flanco (a), Entalhe (b), Lascamento (c), Trinca(d), Aresta postiça (e), Desgaste de cratera, Quebras e Deformação plástica.

Figura 15: Principais tipos de desgaste e avaria da ferramenta.



Fonte: Soares. (2016).

A Tabela 3 nos traz as possíveis causas e ações para minimização de avarias e desgastes da ferramenta de corte.

Tabela 3: Principais tipos de desgaste e avaria da ferramenta.

Tipo de desgaste e/ou avaria	**Possíveis causas**	**Ações para minimização**
Desgaste de flanco	• Velocidade de corte muito alta ou muito baixa (se a causa for a presença de APC) • Resistência ao desgaste insuficiente da ferramenta • Abrasão • Aresta postiça de corte	• Redução da velocidade de corte • Seleção de classe de ferramenta mais resistente ao desgaste • Aumento da velocidade de corte se o desgaste for causado pela APC
Desgaste de entalhe	• Oxidação	• Seleção de fluido de corte com agentes oxidantes • Redução da velocidade de corte
Desgaste de cratera	• Difusão	• Seleção de classe da ferramenta que possua cobertura de óxido de alumínio
Deformação plástica	• Altas temperaturas combinadas com altas pressões na região de corte	• Seleção de classe de ferramenta com maior dureza a quente • Redução da velocidade de corte
Trincas de origem mecânica	• Variação excessiva de esforço na aresta de corte	• Seleção de uma classe de ferramenta mais tenaz • Redução do avanço • Suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça • Aumento da estabilidade
Trincas de origem térmica	• Excessiva variação de temperatura	• Seleção de classe de ferramenta mais tenaz • Aplicação de fluido de corte em abundância ou não-aplicação
Lascamento	• Classe da ferramenta muito frágil • Geometria da ferramenta muito fraca • Choques da ferramenta com a peça	• Seleção de classe de ferramenta mais tenaz • Aumento do ângulo de ponta, raio de ponta e/ou do ângulo de cunha (chanframento de aresta) • Suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça

Fonte: Diniz et al. (2013).

3.4 USINABILIDADE

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), a usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão. Em outras palavras, pode-se entender usinabilidade como o grau de dificuldade de se usinar um determinado material.

É preciso conhecer o quanto essa usinabilidade é melhor e, quando se atribui valores, ela possui um significado mais complexo. Partindo do conceito de usinabilidade como sendo a facilidade de usinar um material, em primeiro lugar devem ser considerados os parâmetros que favorecem mais ou menos a usinagem. Entre esses podem ser citados: Tipo e forma do cavaco, Máxima taxa de remoção do material, Força e potência de usinagem, Temperatura de corte, Vida de ferramenta, Integridade superficial da peça usinada, Propriedades físicas ou mecânicas dos materiais, Formação de rebarbas e Estabilidade química e metalúrgica do material da peça (SANTOS; SALES, 2007).

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013), o método mais aceito para mensurar a usinabilidade consiste no acompanhamento da usinagem do material a ser analisado comparado à usinagem de um material padrão. A usinagem deve ocorrer até o fim da vida da ferramenta ou até um determinado valor de desgaste da mesma.

O fator metalúrgico dos aços predominante com respeito à usinabilidade é, obviamente, a dureza. Aços de baixo carbono com baixa dureza e alta ductilidade têm tendência à formação da aresta postiça de corte, com consequente redução da vida da ferramenta e deteriorização do acabamento superficial. Uma maior porcentagem de carbono melhora a usinabilidade devido ao aumento da dureza e diminuição da ductilidade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

3.5 ACABAMENTO SUPERFICIAL

Há diversos fatores que influenciam o acabamento superficial de uma peça como, o raio de ponta da aresta de corte, tolerâncias de fabricação da ferramenta, desgastes ou formação de arestas postiça na ferramenta, precisão da máquina, escoamento do cavaco, parâmetros de corte, etc. Com isso, sendo uma textura primária formada por sulcos ou marcas formadas pela ferramenta de corte (NETO, 2012).

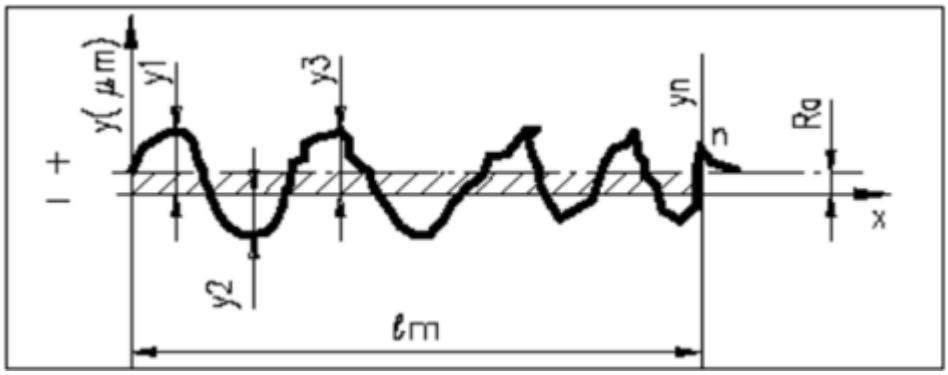
A maior parte dos estudos de usinagem que objetivam a análise da qualidade das peças produzidas analisam as imperfeições e a topografia deixada nestas peças. Esta topografia das peças produzidas é denominada de rugosidade e é caracterizada como erros micro geométricos, sendo um resultado do processo de usinagem (AGOSTINHO *et al*, 1981).

As superfícies de peças, quando observadas de perto, em detalhes mostram que apresentam, sempre após um tipo de usinagem, irregularidades. Estas por si causam imperfeições ou marcas deixadas pela ferramenta de corte que atuam sobre tal superfície da peça. Partindo disso vê-se a importância do estudo do acabamento superficial na medida da necessidade de precisão, que aumenta com a funcionalidade das peças (PALMA, 2006)

3.5.1 Rugosidade Média (Ra)

A rugosidade média (Ra) é o parâmetro mais difundido para determinação da rugosidade. Representa uma média dos valores absolutos das ordenadas (Figura 16) em um comprimento da amostragem. Os efeitos ocasionais não influenciam na medida de Ra, sendo assim, somente ela não é suficiente na identificação de algumas características da superfície.

Figura 16: Parâmetros de rugosidade Ra.

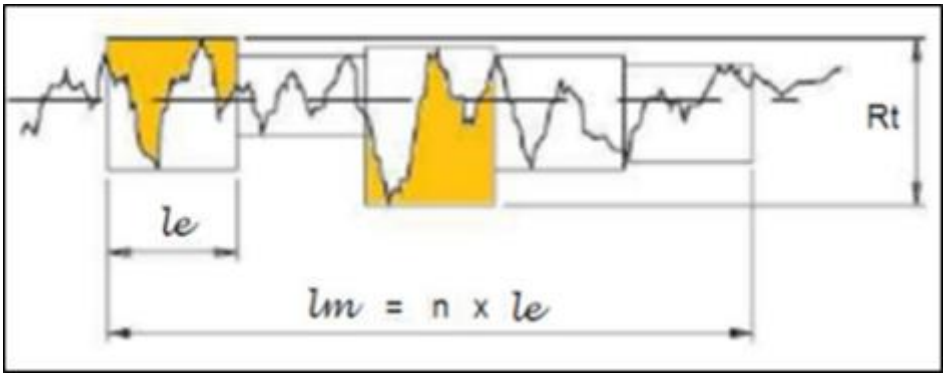


Fonte: Soares. (2016).

3.5.2 Rugosidade Total (RT)

A rugosidade total Rt representa (Figura 17) a soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação (MACHADO et al., 2011). Portanto, este parâmetro é influenciado diretamente por qualquer irregularidade ou defeito presente em uma superfície (MACHADO et al., 2011).

Figura 17: Parâmetros de rugosidade Rt.



Fonte: Soares. (2016).

3.6 POTÊNCIA DE USINAGEM

O conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte nos processos de usinagem é de fundamental importância, pois eles afetam a potência necessária para o corte (a qual é utilizada par o dimensionamento do motor da máquina-ferramenta), a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta. Uma máquina-ferramenta consome potência para girar seu eixo-árvore e executar o movimento de corte e para promover o movimento de avanço. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Para Santos *et al*., (2007) as potências de usinagem resultam dos produtos das componentes de força e de velocidade, sendo elas:

- Potência de corte (Nc): É o produto entre a força de corte (Fc) e a velocidade de corte (Vc);

- Potência de avanço (Nf): É o produto entre a força de avanço (Ff) e a velocidade de avanço (Vf);

- Potência efetiva de corte (Ne): É a soma da potência de corte (Nc) com a potência de avanço (Nf).

O sensor de potência mede a potência consumida pelo motor ou a variação de frequência do motor, onde sua medição consiste em medir a corrente e a tensão do motor. Devido à fácil instalação em equipamentos, os sensores de potência são usados em grande escala no monitoramento de equipamentos de usinagem (JEMIELNIAK, 1999).

3.7 EMISSÃO ACÚSTICA

Emissão acústica é a propagação de uma onda vibracional na rede dos materiais cristalinos, devido ao rearranjo da estrutura interna do material que foi deformado (WILLIANS, 1968). Estes sinais são captados por meio de um sensor piezelétrico que transformam sinais mecânicos em sinais elétricos.

A emissão acústica é um conjunto de ondas elásticas transientes formadas devido à rápida liberação de energia a partir de uma fonte, localizada ou não, quando esta é submetida ao estresse (GUO; AMMULA, 2005). A emissão acústica é um método indireto para detectar o desgaste, pois, a faixa de frequência do sinal é maior do que os ruídos ambientais e vibrações da máquina, além de não interferir na operação de corte (LI, 2002).

A análise de emissões acústicas é uma ferramenta de grande importância para detecção de falhas em equipamentos, estudos de fenômenos, desgaste de ferramentas entre outros. Uma das principais vantagens do uso dela como ferramenta advém do fato de ser um ensaio não destrutivo, e que pode facilmente ser aplicado em um sistema, sem ter que fazer grandes adaptações nele (MAIA, 2009).

3.8 VIBRAÇÃO

Vibração é definida como sendo o movimento dinâmico em torno de sua posição estática (SOUTO, 2004).

A vibração possui efeitos adversos no processo de usinagem, como na contribuição para o degaste rápido da ferramenta, na baixa qualidade superficial e na limitação da produtividade. Dessa maneira, é necessário controlar essas trepidações para aumentar a produtividade e reduzir os custos. Para isso é necessário compreender a interação que ocorre entre a ferramenta e a peça de trabalho a fim de prever o comportamento da vibração e selecionar os parâmetros de usinagem apropriados (DESHPANDE; FOFANA, 2001).

Para Kalpakjian e Schmid (2009), as trepidações são proporcionais às forças, de corte, largura do corte e profundidade, bem como à dureza do material. Devido a estas forças, os tipos de cavaco também influenciam nestas vibrações, porque na formação de cavacos contínuos a força de corte é estável e, portanto, elas geralmente não causam trepidações. O mesmo pode não ocorrer com cavacos descontínuos ou serrilhados, porque a variação da força resultante durante a formação periódica do cavaco pode causar vibrações.

Vibrações excessivas comprometem a qualidade da superfície usinada, diminui a vida da ferramenta, acelera o seu lascamento e ainda pode danificar rolamentos do eixo-árvore e ainda aumentar o consumo de energia da máquina (KING, 1985).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Estudo da Usinagem na Unesp-Guaratinguetá, utilizando um centro de torneamento CNC marca Romi modelo GL 240M (Figura 18) com motor principal de 15 kW de potência. Durante o torneamento dos corpos de prova foram coletados dados de potência, vibração e emissão acústicas, com o auxílio de um sistema de aquisição de dados desenvolvido, o qual coletou dados do processo em tempo real (Figura 19).

Figura 18: Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M.



Fonte: Autoria própria.

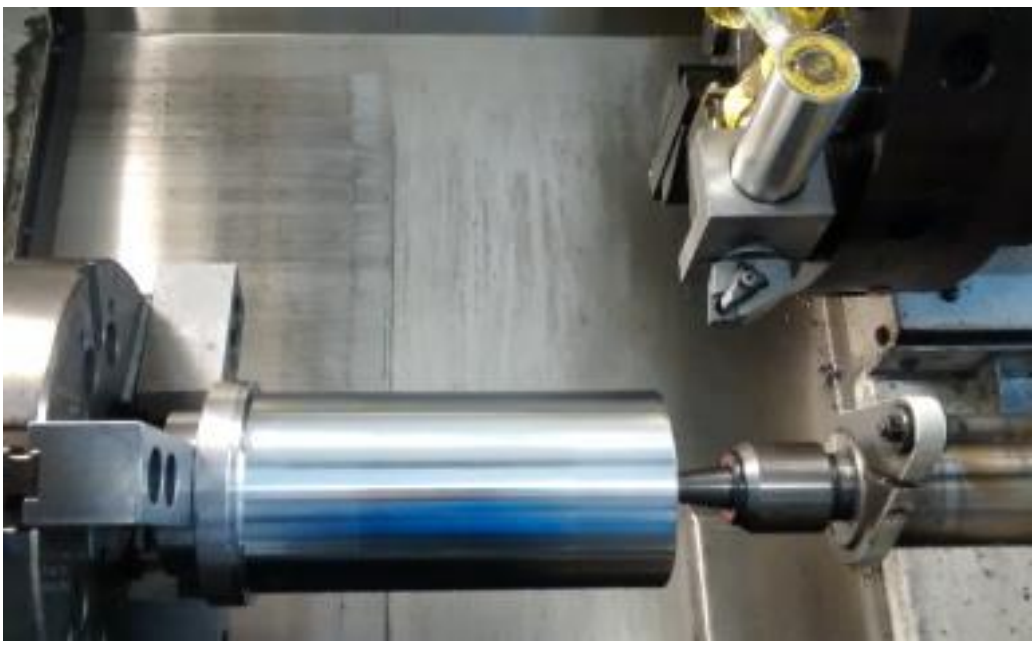
Figura 19: Sistema de aquisição de dados.



Fonte: Autoria própria.

Foi utilizado como material para o corpo de prova o aço AISI 4340 cujas dimensões foram de 110 [mm] de diâmetro e 300 [mm] de comprimento para o aço recozido (201 HB) e 100 [mm] de diâmetro e 300 [mm] de comprimento para o aço temperado e revenido (55-56 HRC), demonstrado conforme a Figura 20.

Figura 20: Corpo de prova do aço AISI 4340.



Fonte: Autoria própria.

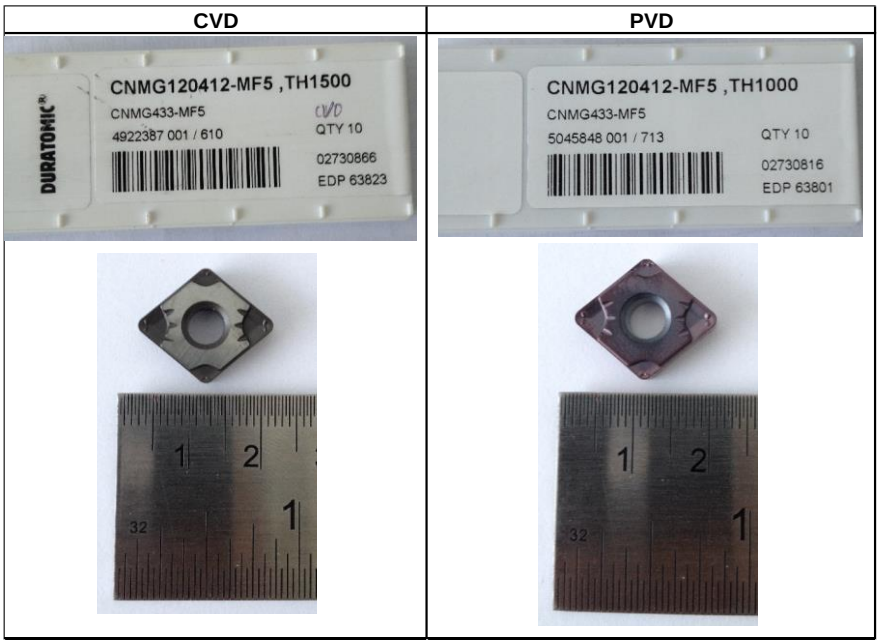
Tabela 4: Composição Química do CDP

Composição Química do CDP	
Elemento	**%**
C	0,38 - 0,43
Mn	0,60 - 0,80
Si	0,15 - 0,30
Cr	0,80 - 1,10
Ni	1,65 - 2,00
Mo	0,20 - 0,30

Fonte: Adaptado do catálogo de especificação técnica (2017).

As ferramentas utilizadas, cedidas pela SECO TOOLS ®, foram de metal duro revestidas através do procedimento CVD (TH 1500) com recobrimento de Ti(C,N) + Al_2O_3 (Carbonitreto de Titânio + Óxido de Alumínio) e de metal duro revestidas pelo procedimento PVD (TH 1000) com recobrimento de Ti-Al-Si-N (Nitreto de Titânio Alumínio Silício). Na Figura 21 são ilustradas as ferramentas utilizadas.

Figura 21: Ferramentas utilizadas.



Fonte: Autoria própria.

Foram realizados ensaios à seco, ou seja, sem fluido de corte durante o processo de usinagem.

Para a aquisição da potência consumida do motor do centro de usinagem foram usados sensores de potência marca LEM modelo AT 100 B10. Na Figura 22 é ilustrado o sensor para medição da potência.

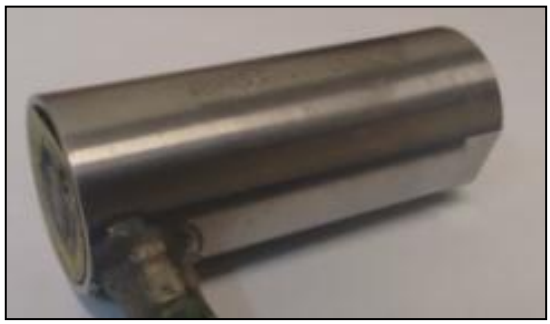
Figura 22: Sensor de potência marca LEM modelo AT 100 B10.



Fonte: Soares (2016).

Para a aquisição dos valores de vibração foi utilizado um sensor piezelétrico (acelerômetro) e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS, marca Vibro Control, modelo TV100. Na Figura 23 é ilustrado o sensor piezelétrico para aquisição dos valores de vibração.

Figura 23: Módulo de vibração modelo TV100.



Fonte: Soares (2016).

Foi utilizado um sistema de captação de emissão acústica da marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, com sensor R15A e amplificador de sinal 1272-1000 com saída retificada em RMS (valor quadrático médio). Na Figura 24 é ilustrado o sistema de captação de emissão acústica.

Figura 24: Sistema de captação de emissão acústica da marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION ®.



Fonte: Soares (2016).

Após os processos de usinagem foram determinados os desgaste e avarias que as ferramentas sofreram utilizando um microscópio óptico da marca Zeiss (Figura 25). Esse mesmo microscópio foi utilizado para analisar os tipos e formas dos cavacos gerados em cada processo.

Figura 25: Microscópio óptico Zeiss.



Fonte: Autoria própria.

Os tipos de cavacos gerados foram classifcados como: Contínuos, descontínuos, parcialmente contínuos ou segmentados. E suas formas foram classificadas de acordo com: fita, helicoidal, espiral ou lascas.

Para a avaliação da qualidade superficial das peças através da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca Mahr modelo Marsurf M300 (Figura 26), com raio de ponta de 2 μm. Para a rugosidade os parâmetros analisados foram a rugosidade média (R_a) e a rugosidade total (R_t). O comprimento de amostragem adotado (*cut-off*) foi de 0,8 [mm].

Figura 26: Rugosímetro marca Mahr modelo Marsurf M300.



Fonte: Soares (2016).

Foram realizados ensaios de torneamento utilizando:

- Dois materiais em condições diferentes: Aço AISI 4340 endurecido (temperado e revenido) e aço AISI 4340 recozido;

- Duas diferentes ferramentas de corte do tipo CNMG 120412, de metal duro revestida pelo processo CVD (*Chemical Vapour Deposition*) e PVD (*Physical Vapour Deposition*), sendo o CVD com recobrimento de Ti(C,N) + Al_2O_3 e o PVD com recobrimento de Ti-Al-Si-N;

- Duas velocidades de corte(Vc): 150 [m/min.] e 200 [m/min.];

- Dois avanços(f): 0,1 [mm/rot.] e 0,2 [mm/rot.];

- A profundidade de corte (ap) foi de 0,25 [mm].

O planejamento experimental utilizado foi o fatorial completo com duas repetições. A análise dos resultados foi baseada em análises estatísticas através de análise de variânica.

Após o ensaio dos materiais e coleta dos dados, os mesmos foram trabalhados e processados com a ajuda do software MATLAB e posteriormente para as análises estatísticas foi utilizado o programa MINITAB.

Através do programa MINITAB, foram extraídos dois principais gráficos estatísticos: “Principais Efeitos” e “Interação”, com os mesmos avaliamos a influência de cada parâmetro na nossa amostragem assim como verificamos a significância de cada uma através de sua variação.

Para determinado parâmetro ser significativo ele tem que apresentar *P-Value* ou valor-p (também chamado de nível descritivo ou probabilidade de significância) menor ou igual a 5% (0,05).

O valor-p representa a chance ou a probabilidade do efeito observado entre os tratamentos serem devidos ao acaso e não aos fatores que estão sendo estudados. Isso significa a probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema que aquela observada em uma amostra, sob a hipótese nula.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

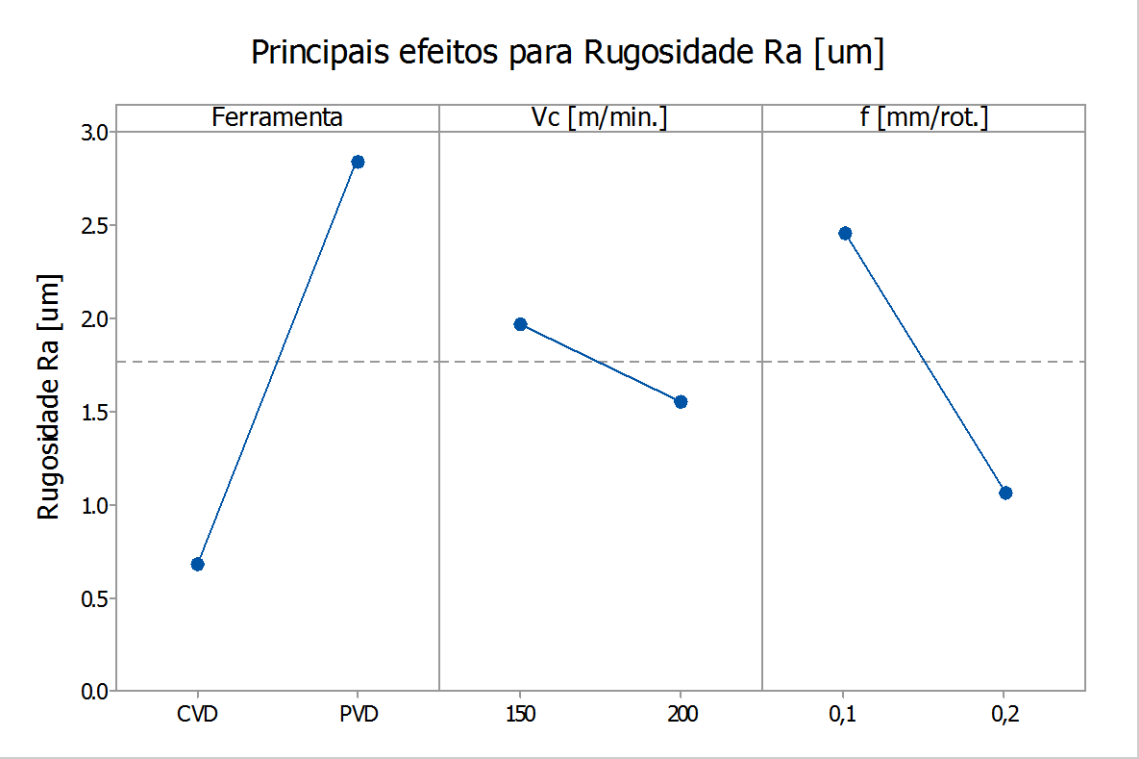
Na utilização da ferramenta de corte recoberta pelo processo CVD na usinagem do material recozido, não foi possível medir os elevados valores da rugosidade, devido à alta vibração (vibração crítica) apresentada durante o processo.

Assim para o tratamento dos dados da rugosidade Ra e Rt tivemos que retirar alguns parâmetros, conforme será evidenciado a seguir.

5.1 - RUGOSIDADE RA: (ENDURECIDO)

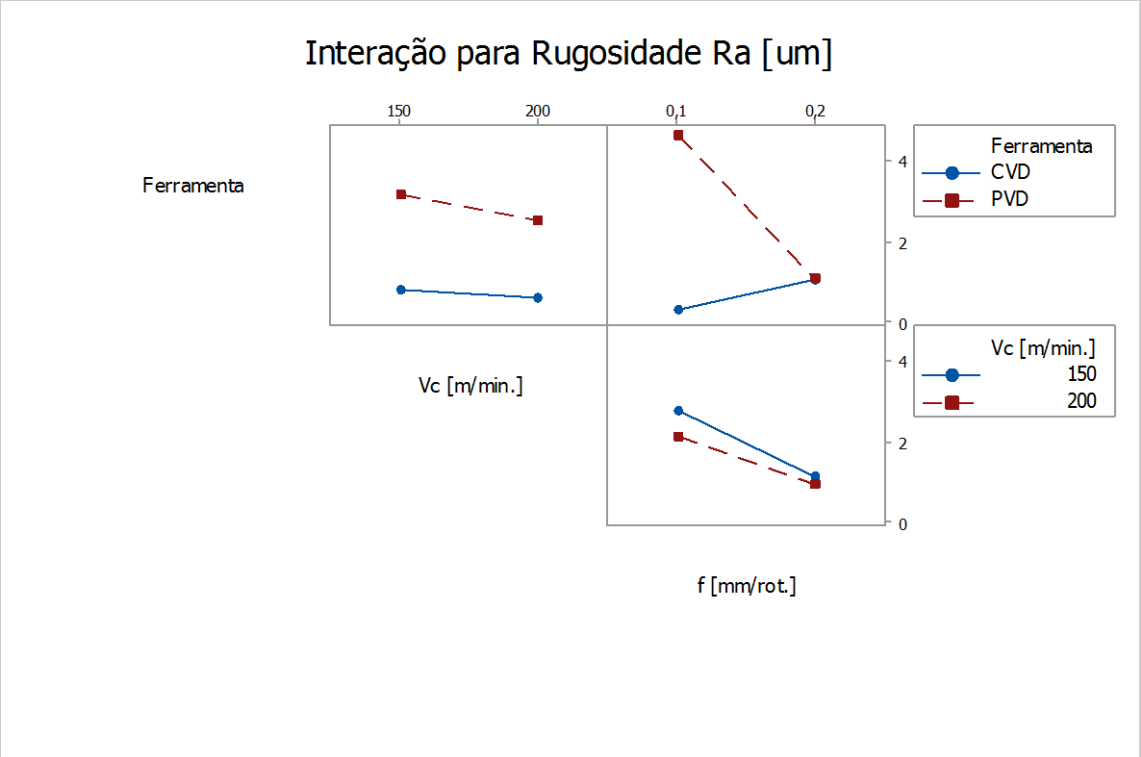
Nesse caso o material recozido não entrou na análise, devido à vibração crítica utilizando a ferramenta recoberta pelo processo CVD. Assim foram utilizados como parâmetros a ferramenta, a velocidade de corte e o avanço, no material endurecido para verificar a rugosidade Ra.

Figura 27: Principais efeitos para Rugosidade Ra, material Endurecido.



Fonte: Autoria própria.

Figura 28: Interação para Rugosidade Ra, material Endurecido.



Fonte: Autoria própria.

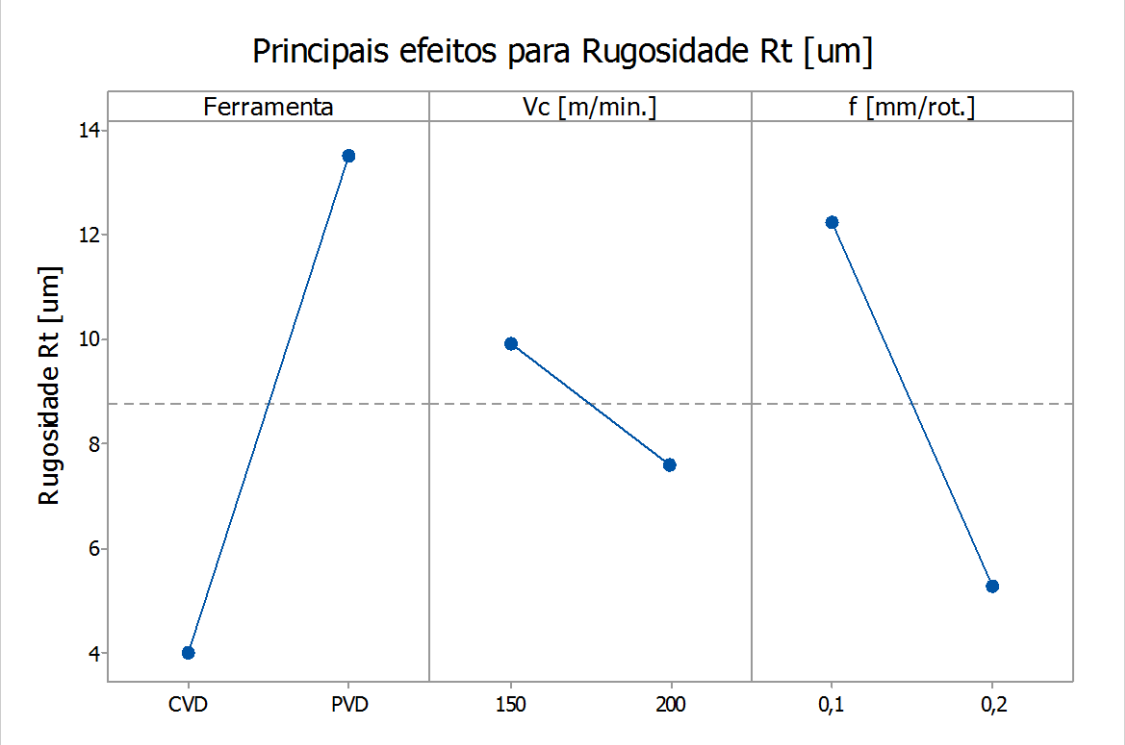
Características apresentadas:

- Para o material endurecido, a ferramenta revestida por CVD foi bem melhor que a revestida por PVD;
- A velocidade de corte (Vc) de 200 [m/min] apresentou um resultado ligeiramente melhor que a velocidade de corte (Vc) de 150 [m/min];
- O avanço (f) de 0,2 [mm/rot.] foi melhor;
- A ferramenta, o avanço e a velocidade de corte foram significativos. Sendo os P-Value respectivamente de: 0,000, 0,029 e 0,000.

5.2 - RUGOSIDADE RT: (ENDURECIDO)

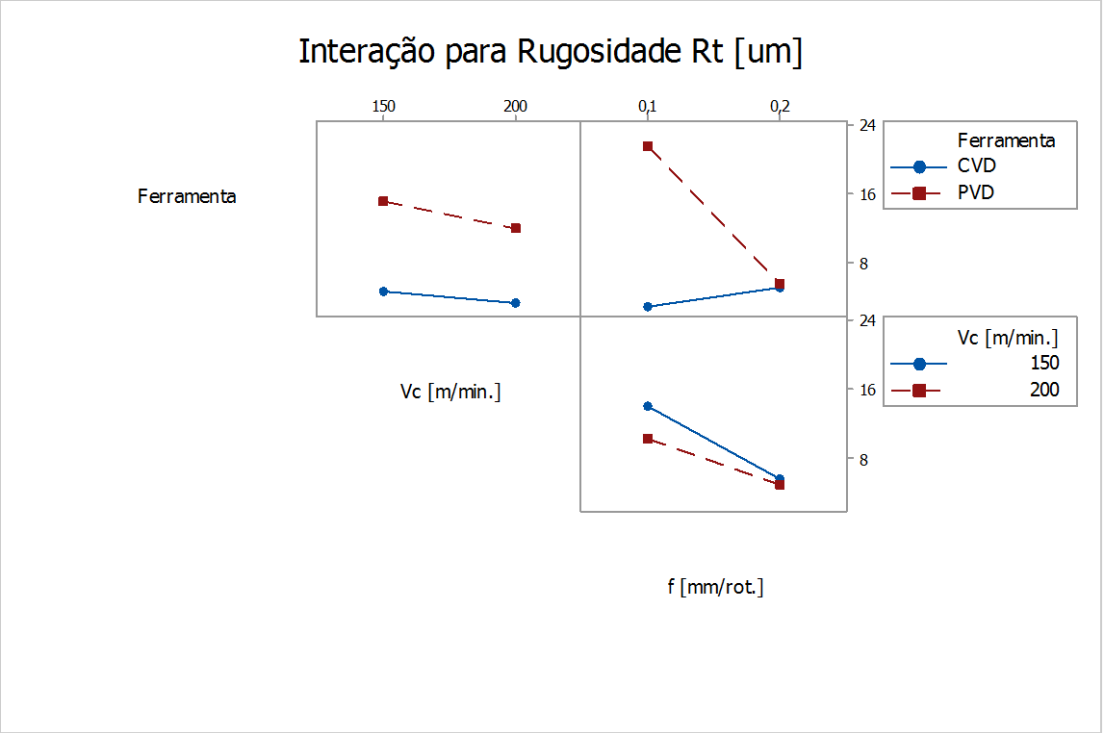
Nesse caso o material recozido não entrou na análise, devido à vibração crítica utilizando a ferramenta recoberta pelo processo CVD. Assim foram utilizados como parâmetros a ferramenta, a velocidade de corte e o avanço, no material endurecido para verificar a rugosidade Rt.

Figura 29: Principais efeitos para Rugosidade Rt, material Endurecido.



Fonte: Autoria própria.

Figura 30: Interação para Rugosidade Rt, material Endurecido.



Fonte: Autoria própria.

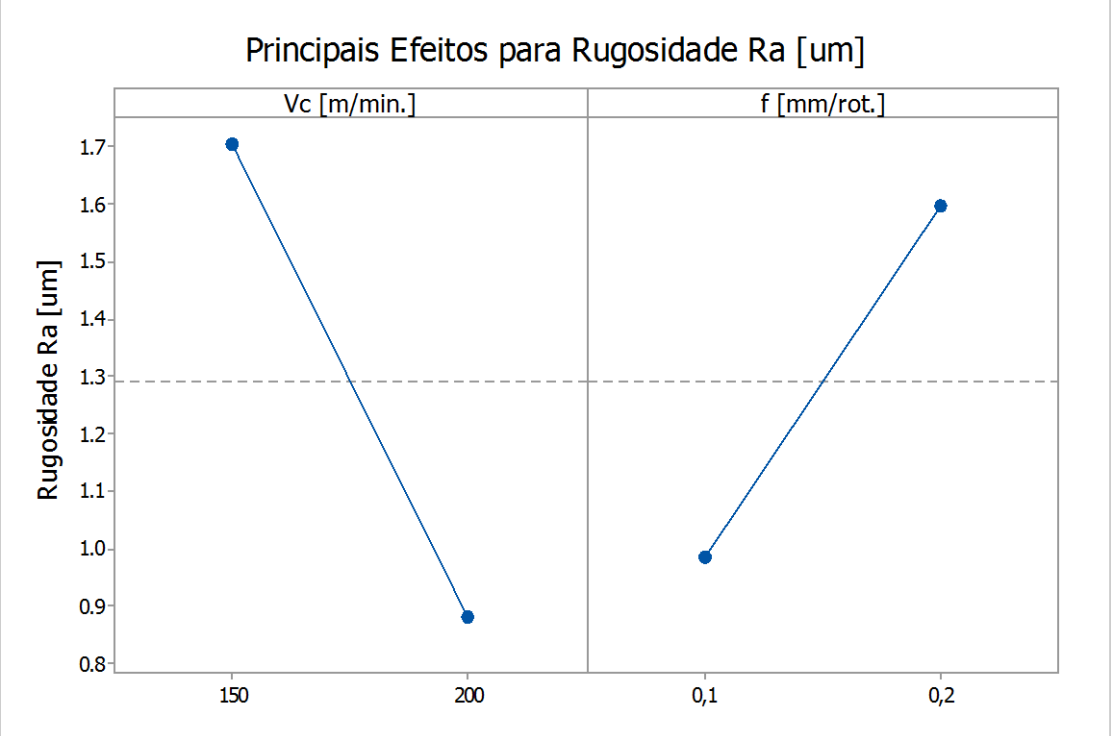
Características apresentadas:

- A rugosidade Rt apresentou basicamente as mesmas características do que a rugosidade Ra;
- Para o material endurecido, a ferramenta revestida por CVD foi bem melhor que a revestida por PVD;
- A velocidade de corte (Vc) de 200 [m/min] apresentou um resultado ligeiramente melhor que a velocidade de corte (Vc) de 150 [m/min];
- O avanço (f) de 0,2 [mm/rot.] foi melhor;
- A ferramenta, o avanço e a velocidade de corte foram significativos. Sendo os P-Value respectivamente de: 0,000, 0,000 e 0,000.

5.3 - RUGOSIDADE RA: (RECOZIDO PVD)

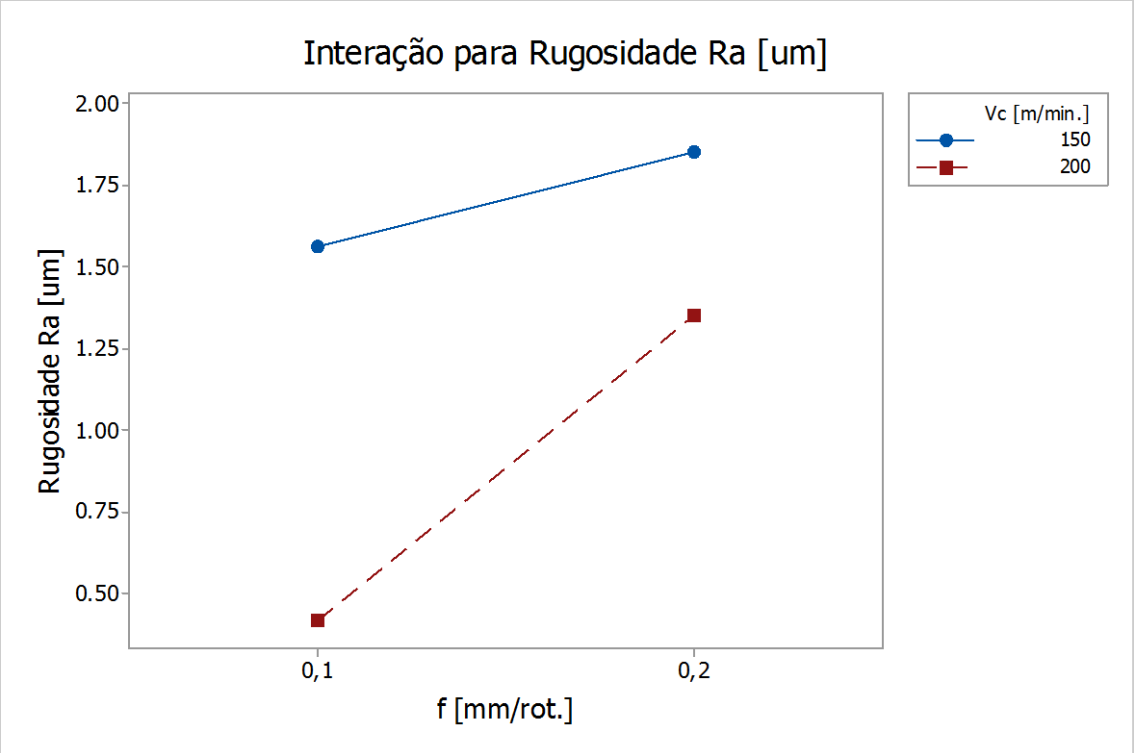
Nesse caso como o material recozido usinado com ferramenta recoberta pelo processo CVD não foi possível medir a rugosidade. Assim foi utilizado como parâmetros a Ferramenta e a velocidade de corte no material recozido e com ferramenta recoberta pelo processo PVD para verificar a rugosidade Ra.

Figura 31: Principais efeitos para Rugosidade Ra, material Recozido, ferramenta PVD.



Fonte: Autoria própria.

Figura 32: Interação para Rugosidade Ra, material Recozido, ferramenta PVD.



Fonte: Autoria própria.

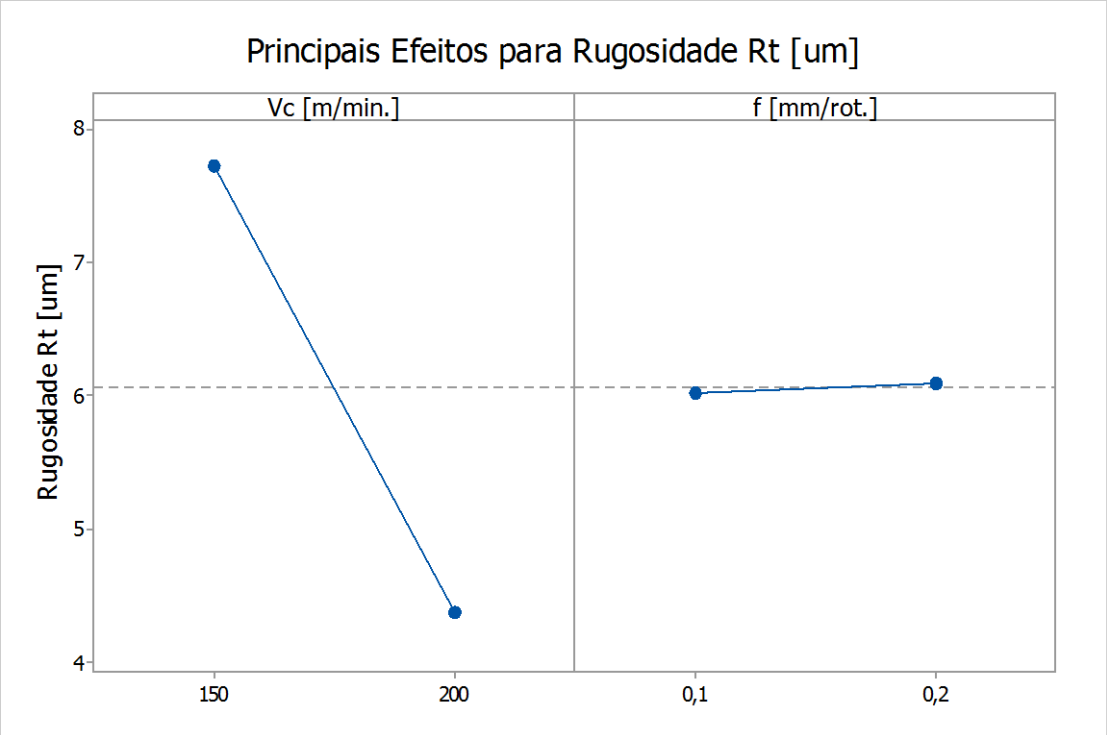
Características apresentadas:

- Para o material recozido, a velocidade de corte (Vc) de 200 [m/min] apresentou um resultado bem melhor que a velocidade de corte (Vc) de 150 [m/min];
- O avanço (f) de 0,1 [mm/rot.] foi consideravelmente melhor;
- A velocidade de corte foi o único parâmetro significativo nesse caso. Com um P-Value de: 0,038.

5.4 - RUGOSIDADE RT: (RECOZIDO PVD)

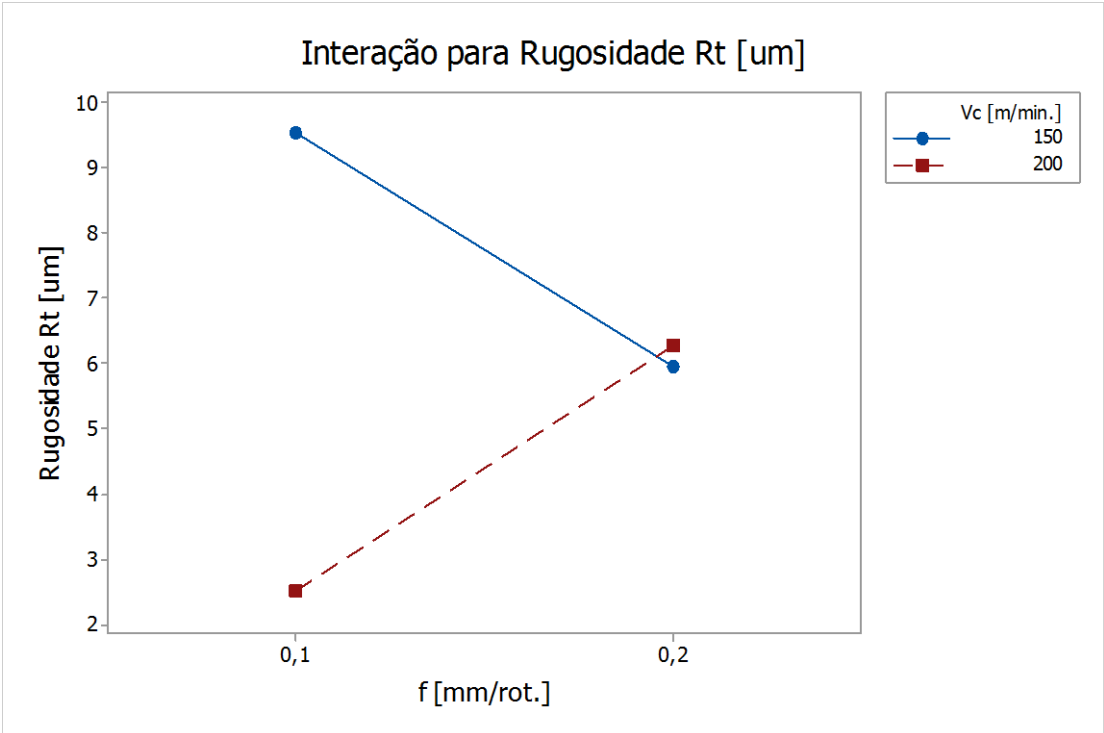
Nesse caso como o material recozido usinado com ferramenta recoberta pelo processo CVD não foi possível medir a rugosidade. Assim foi utilizada como parâmetros a ferramenta e a velocidade de corte no material recozido e com ferramenta recoberta pelo processo PVD para verificar a rugosidade Rt.

Figura 33: Principais efeitos para Rugosidade Rt, material Recozido, ferramenta PVD.



Fonte: Autoria própria.

Figura 34: Interação para Rugosidade Rt, material Recozido, ferramenta PVD.



Fonte: Autoria própria.

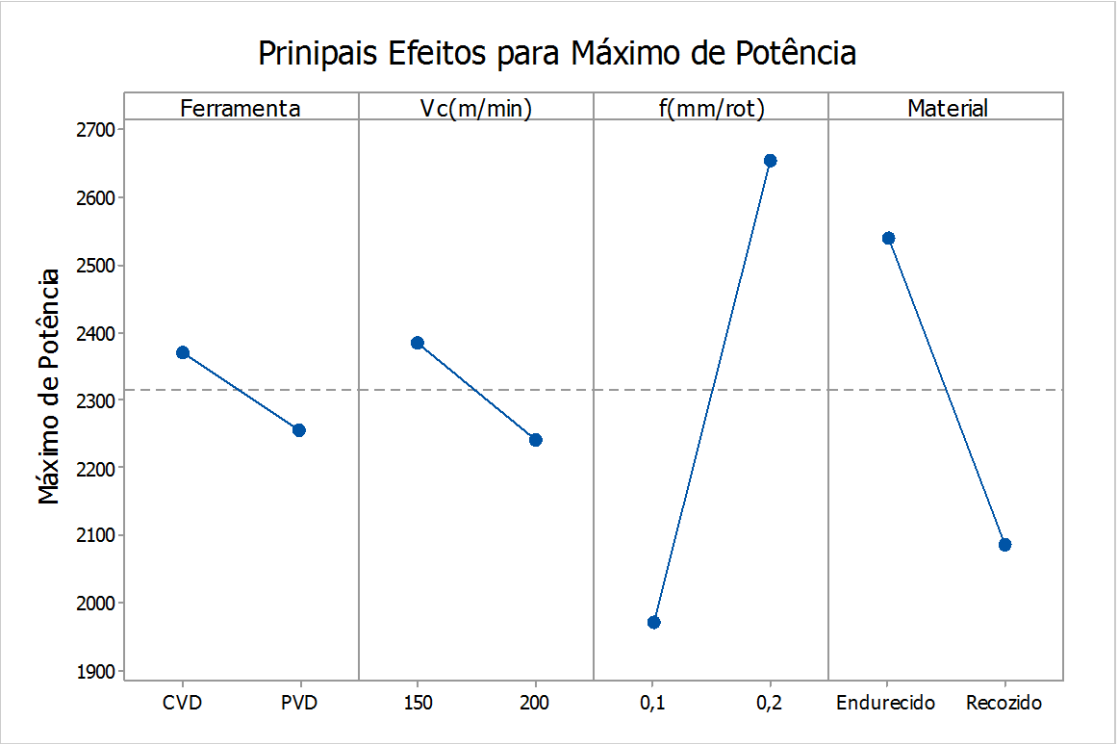
Características apresentadas:

- Para o material recozido, a velocidade de corte (Vc) de 200 [m/min] apresentou um resultado bem melhor que a velocidade de corte (Vc) de 150 [m/min];
- O avanço (f) de 0,1 [mm/rot.] junto com a (Vc) de 200 [m/min] apresentaram uma boa rugosidade;
- Nesse caso tanto a velocidade de corte quanto o avanço não foram significativos. Sendo os P-Value respectivamente de: 0,055 e 0,967.

5.5 - POTÊNCIA CONSUMIDA: (MÁXIMA)

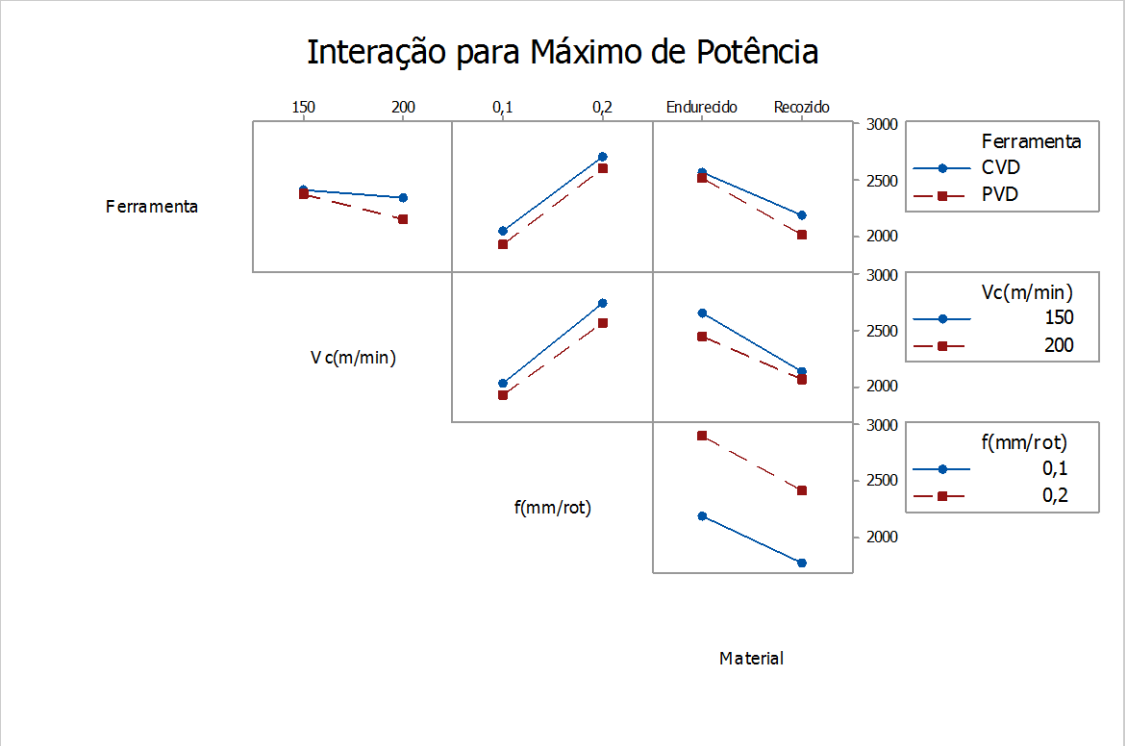
No caso da potência, todos os parâmetros foram utilizados. Ferramenta, velocidade de corte, avanço e material. Assim pode se retirar boas conclusões dos máximos de potência consumida e a influência de cada parâmetro pode ser verificada.

Figura 35: Principais efeitos para Máximo de Potência consumida.



Fonte: Autoria própria.

Figura 36: Interação para Máximo de Potência consumida.



Fonte: Autoria própria.

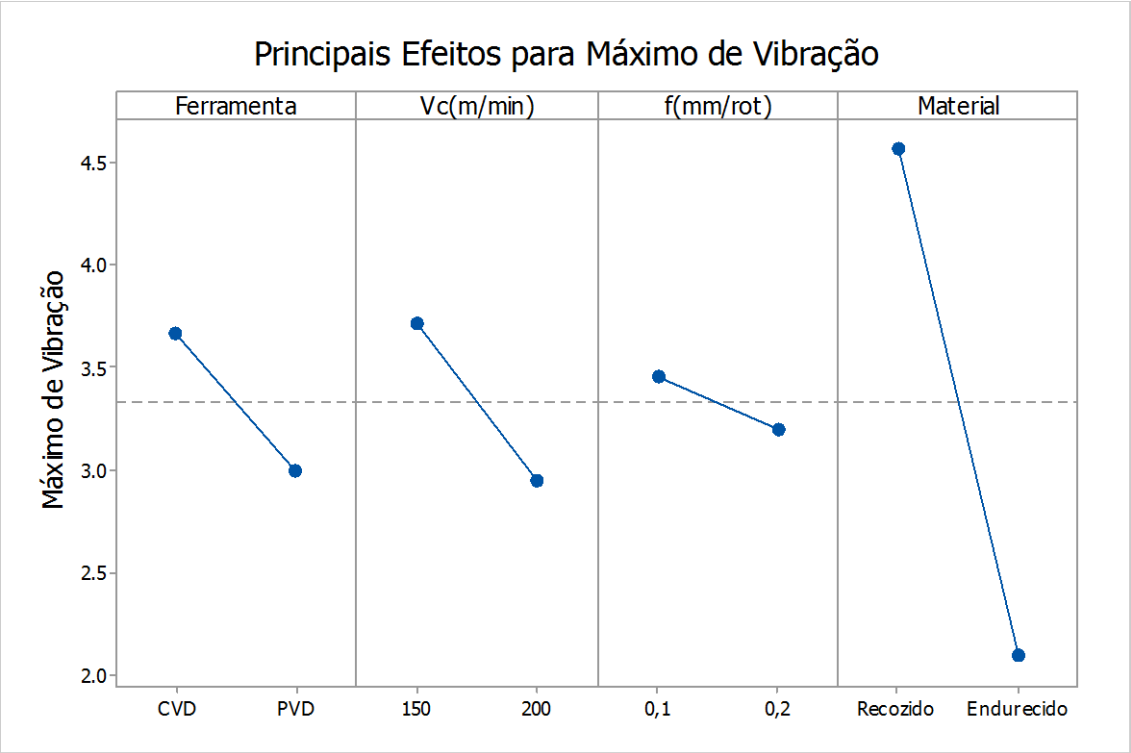
Características apresentadas:

- A ferramenta revestida pelo processo PVD foi ligeiramente melhor que a ferramenta revestida pelo processo CVD;
- A velocidade de corte (Vc) de 200 [m/min] apresentou um resultado ligeiramente melhor que a velocidade de corte (Vc) de 150 [m/min];
- O avanço (f) de 0,1 [mm/rot.] foi muito melhor que o avanço (f) de 0,2 [mm/rot.];
- O material recozido foi bem melhor que o endurecido;
- Todos os parâmetros foram significativos: Ferramenta, Velocidade de corte, Avanço e Material. Sendo os P-Value de: 0,000 para todos.

5.6 - VIBRAÇÃO: (MÁXIMA)

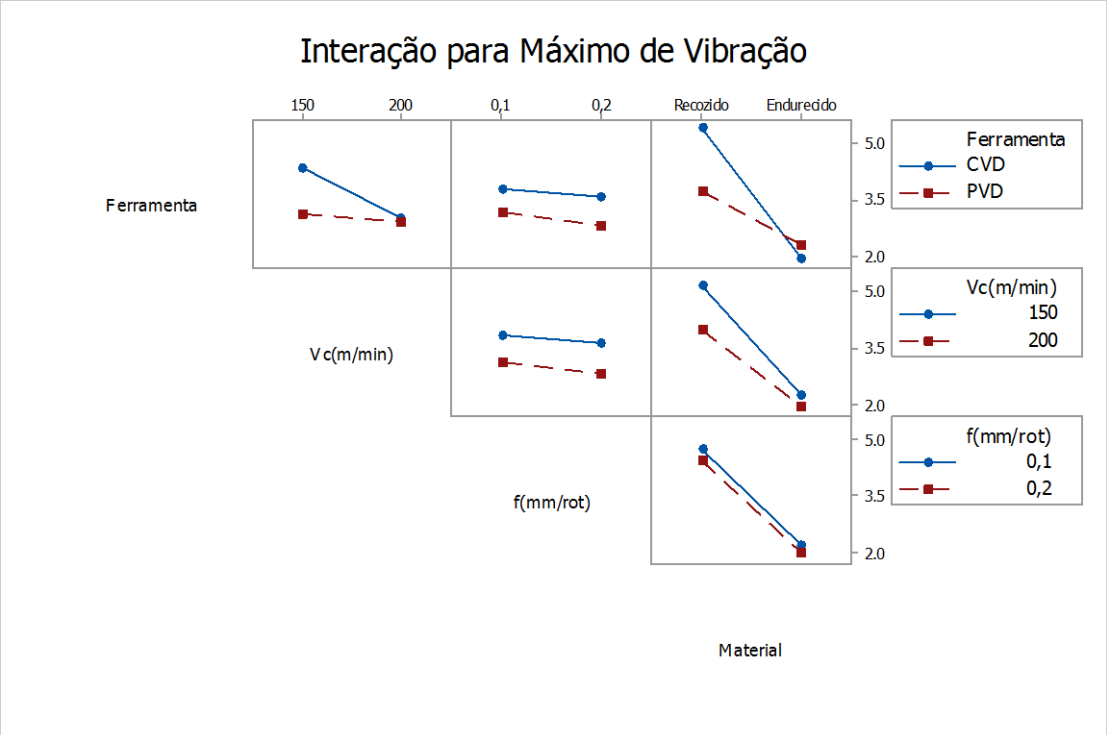
No caso da vibração, todos os parâmetros foram utilizados. Ferramenta, velocidade de corte, avanço e material. Assim pode se retirar boas conclusões dos Máximos de vibração e a influência de cada parâmetro pode ser verificada.

Figura 37: Principais efeitos para Máximo de Vibração.



Fonte: Autoria própria.

Figura 38: Interação para Máximo de Vibração.



Fonte: Autoria própria.

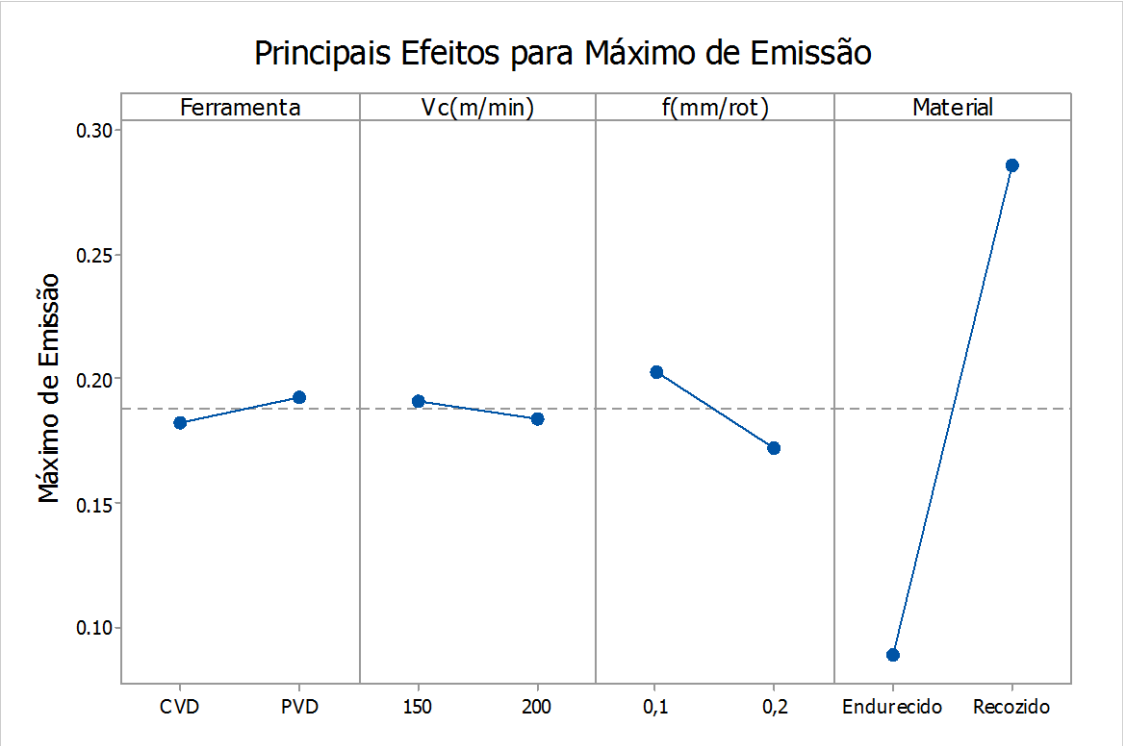
Características apresentadas:

- A ferramenta revestida pelo processo PVD foi ligeiramente melhor que a ferramenta revestida pelo processo CVD;
- A velocidade de corte (Vc) de 200 [m/min] apresentou um resultado melhor que a velocidade de corte (Vc) de 150 [m/min];
- O avanço (f) de 0,2 [mm/rot.] foi um pouco melhor que o avanço (f) de 0,1 [mm/rot.];
- O material endurecido foi bem melhor que o recozido;
- Neste caso apenas o avanço não foi significativo, tendo um P-Value de: 0,055. Já todos os outros parâmetros foram significativos: Ferramenta (P-Value: 0,000), Velocidade de corte (P-Value: 0,000) e Material (P-Value: 0,000).

5.7 - EMISSÃO ACÚSTICA: (MÁXIMA)

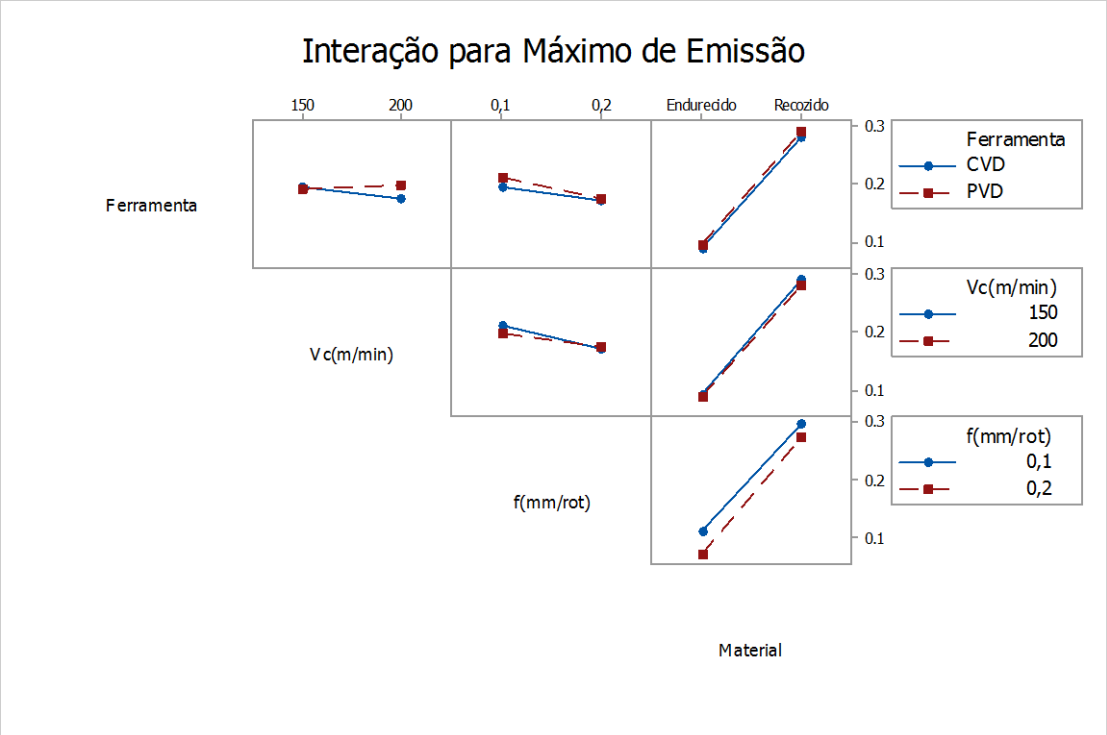
No caso da emissão, todos os parâmetros foram utilizados. Ferramenta, Velocidade de corte, Avanço e Material. Assim pode se retirar boas conclusões dos Máximos de emissão acústica e a influência de cada parâmetro pode ser verificada.

Figura 39: Principais efeitos para Máximo de Emissão acústica.



Fonte: Autoria própria.

Figura 40: Interação para Máximo de Emissão acústica.



Fonte: Autoria própria.

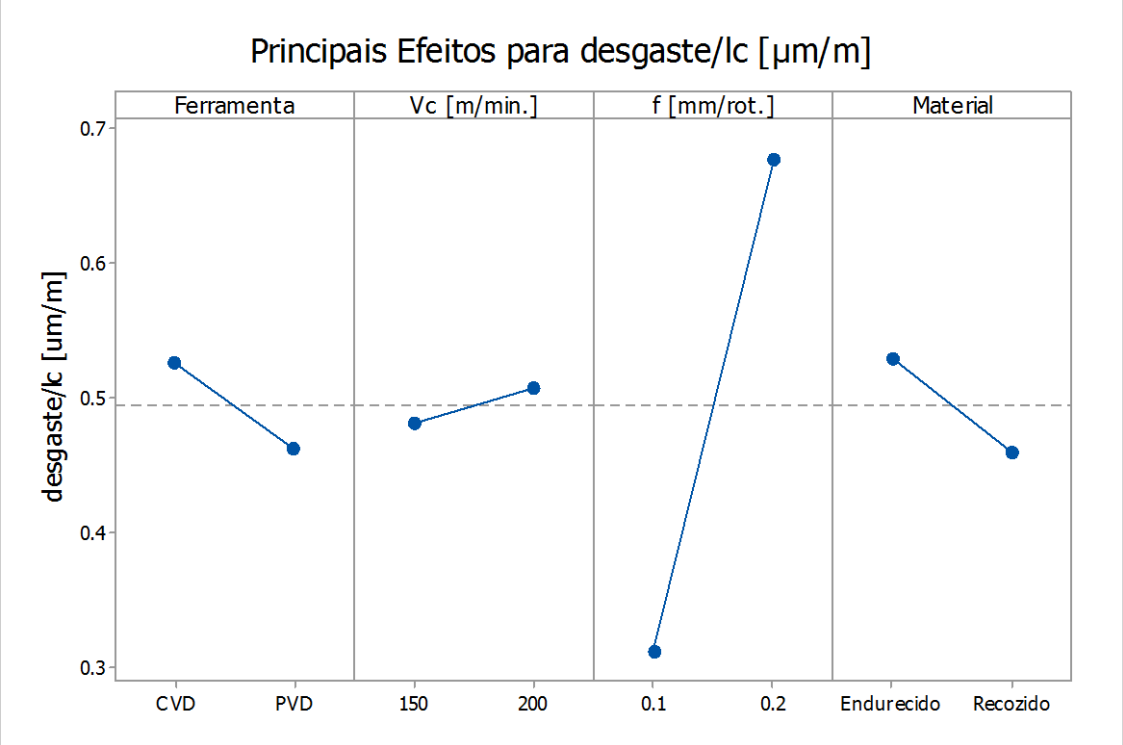
Características apresentadas:

- A ferramenta revestida pelo processo CVD foi um pouco melhor que a ferramenta revestida pelo processo PVD;
- A velocidade de corte (Vc) de 200 [m/min] apresentou um resultado um pouco melhor que a velocidade de corte (Vc) de 150 [m/min];
- O avanço (f) de 0,2 [mm/rot.] foi melhor que o avanço (f) de 0,1 [mm/rot.];
- O material endurecido foi bem melhor que o recozido;
- O material foi o único parâmetro significativo com P-Value de: 0,000. Já os outros parâmetros não foram significativos e apresentaram os seguintes P-Value: Ferramenta 0,564, Velocidade de corte 0,693 e Avanço 0,069.

5.8 - DESGASTE POR METRO USINADO:

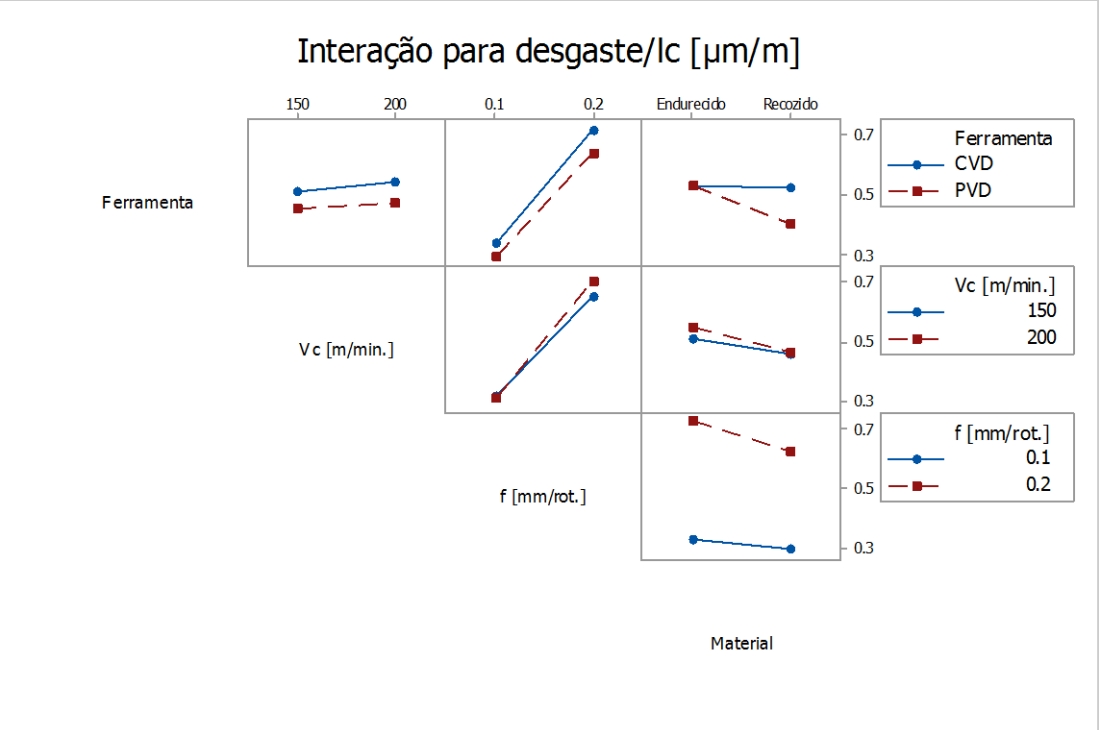
Nesse caso foram utilizados todos os parâmetros também. O que diferencia dos outros é que nesse, analisamos a influência dos parâmetros no desgaste das ferramentas dividido pelo comprimento de corte (Lc). Assim podemos ter conclusões bem fundadas do desgaste [µm] da ferramenta em função do seu comprimento efetivo de corte [m].

Figura 41: Principais efeitos para Desgaste/Lc.



Fonte: Autoria própria.

Figura 42: Interação para Desgaste/Lc.



Fonte: Autoria própria.

Características apresentadas:

- A ferramenta revestida pelo processo PVD foi melhor que a ferramenta revestida pelo processo CVD, portanto PVD apresentou menor desgaste;
- A velocidade de corte (Vc) de 150 [m/min] apresentou um resultado um pouco melhor que a velocidade de corte (Vc) de 200 [m/min];
- O avanço (f) de 0,1 [mm/rot.] foi bem melhor que o avanço (f) de 0,2 [mm/rot.], portanto o avanço (f) de 0,1 [mm/rot.] foi fundamental para um menor desgaste da ferramenta.
- O material recozido foi ligeiramente melhor que o endurecido;
- O avanço foi o único parâmetro significativo com P-Value de: 0,000. Já os outros parâmetros não foram significativos e apresentaram os seguintes P-Value: Ferramenta 0,090, Velocidade de corte 0,481 e Material 0,066.

5.9 - DESGASTE E AVARIA DA FERRAMENTA

Foi montado uma tabela com a medição em [µm] dos desgastes das ferramentas utilizadas, junto com o comprimento efetivo de corte em [m] e a divisão desses parâmetros. Demonstrando o desgaste da ferramenta por metro usinado. Nesse caso foram duas ferramentas de CVD que usinaram o material endurecido conforme evidenciado na Tabela 5 abaixo.

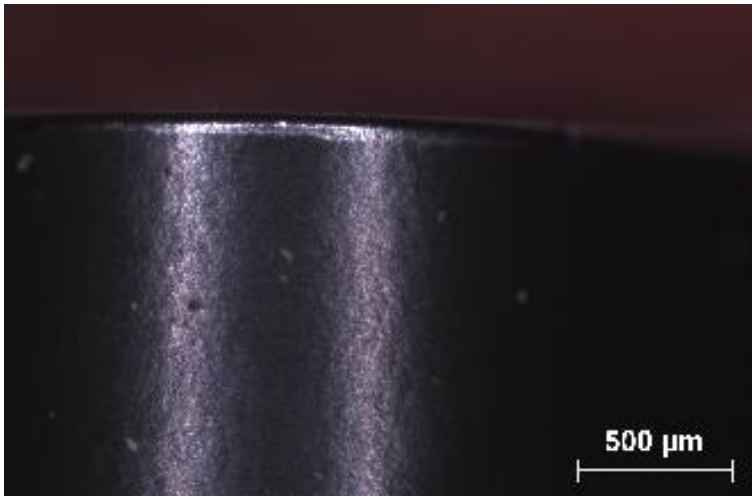
Tabela 5: Desgaste da ferramenta CVD usinando material endurecido.

MATERIAL ENDURECIDO - FERRAMENTA CVD				
	f = 0,1 [mm/rot.]		**f = 0,2 [mm/rot.]**	
Vc = 150[m/min.]	desg. [µm]: 42,46	desg. [µm]: 43,92	desg. [µm]: 46,85	desg. [µm]: 45,39
	Lc [m] : 144,51	Lc [m] : 141,62	Lc [m] : 66,115	Lc [m] : 65,392
	desg./Lc: 0,2938	***desg./Lc: 0,3101***	***desg./Lc: 0,7086***	***desg./Lc: 0,6941***
Vc = 200[m/min.]	desg. [µm]: 48,32	desg. [µm]: 45,39	desg. [µm]: 57,10	desg. [µm]: 51,24
	Lc [m] : 132,23	Lc [m] : 130,78	Lc [m] : 72,257	Lc [m] : 70,811
	desg./Lc: 0,3654	***desg./Lc: 0,3470***	***desg./Lc: 0,7902***	***desg./Lc: 0,7236***

Fonte: Autoria própria.

Segue uma foto (Figura 43) demonstrando a ferramenta utilizada, nesse caso foi o Ensaio n° 51, Ferramenta CVD, aresta 4 da pastilha, material endurecido, avanço (f) = 0,2 [mm/rot.] e velocidade de corte (Vc) = 150[m/min.]

Figura 43: Exemplo do desgaste da ferramenta, Ensaio n° 51.



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 6 são ilustradas as medidas de desgastes [µm] das ferramentas utilizadas, junto com o comprimento efetivo de corte em [m] e a divisão desses parâmetros. Demonstrando o desgaste da ferramenta por metro usinado. Nesse caso foram duas ferramentas de PVD que usinaram o material endurecido conforme evidenciado na Tabela 6 abaixo.

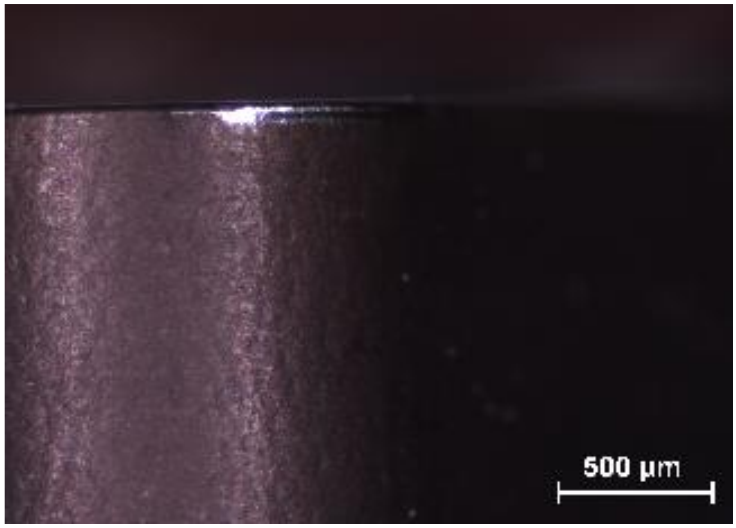
Tabela 6: Desgaste da ferramenta PVD usinando material endurecido.

MATERIAL ENDURECIDO - FERRAMENTA PVD				
	f = 0,1 [mm/rot.]		**f = 0,2 [mm/rot.]**	
Vc = 150[m/min.]	desg. [µm]: 45,39	desg. [µm]: 51,24	desg. [µm]: 33,67	desg. [µm]: 60,03
	Lc [m] : 131,51	Lc [m] : 130,06	Lc [m] : 71,534	Lc [m] : 70,089
	desg./Lc: 0,3451	***desg./Lc: 0,3940***	***desg./Lc: 0,4707***	***desg./Lc: 0,8565***
Vc = 200[m/min.]	desg. [µm]: 41,00	desg. [µm]: 42,46	desg. [µm]: 45,39	desg. [µm]: 57,10
	Lc [m] : 143,07	Lc [m] : 140,18	Lc [m] : 65,754	Lc [m] : 65,031
	desg./Lc: 0,2866	***desg./Lc: 0,3029***	***desg./Lc: 0,6903***	***desg./Lc: 0,8780***

Fonte: Autoria própria.

Segue uma foto (Figura 44) demonstrando a ferramenta utilizada, nesse caso foi o Ensaio n° 45, Ferramenta PVD, aresta 2 da pastilha, material endurecido, avanço (f) = 0,2 [mm/rot.] e velocidade de corte (Vc) = 200[m/min.]

Figura 44: Exemplo do desgaste da ferramenta, Ensaio n° 45.



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 7 são ilustradas as medidas de desgastes [µm] das ferramentas utilizadas, junto com o comprimento efetivo de corte em [m] e a divisão desses parâmetros. Demonstrando o desgaste da ferramenta por metro usinado. Nesse caso foram duas ferramentas de CVD que usinaram o material recozido conforme evidenciado na Tabela 7 abaixo.

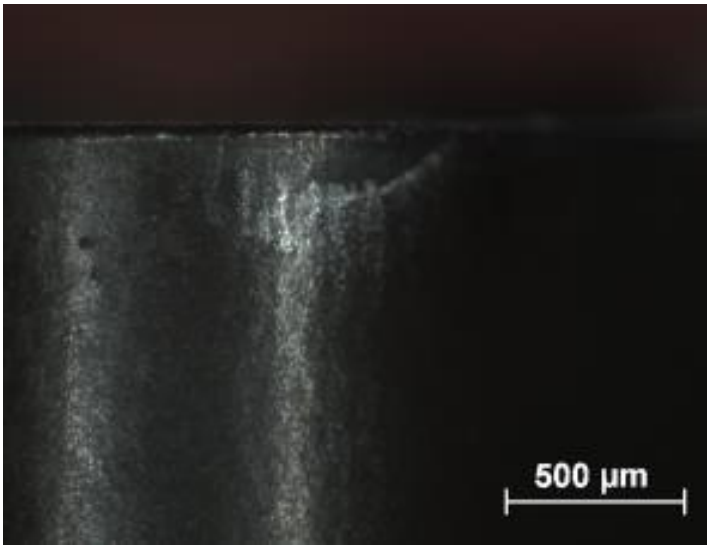
Tabela 7: Desgaste da ferramenta CVD usinando material recozido.

MATERIAL RECOZIDO - FERRAMENTA CVD				
	f = 0,1 [mm/rot.]		**f = 0,2 [mm/rot.]**	
Vc = 150[m/min.]	desg. [µm]: 42,46	desg. [µm]: 42,46	desg. [µm]: 42,46	desg. [µm]: 46,85
	Lc [m] : 127,86	Lc [m] : 126,12	Lc [m] : 63,93	Lc [m] : 63,06
	desg./Lc: 0,3321	***desg./Lc: 0,3367***	***desg./Lc: 0,6641***	***desg./Lc: 0,7430***
Vc = 200[m/min.]	desg. [µm]: 49,78	desg. [µm]: 38,07	desg. [µm]: 38,07	desg. [µm]: 51,24
	Lc [m] : 127,86	Lc [m] : 126,12	Lc [m] : 63,93	Lc [m] : 63,06
	desg./Lc: 0,3893	***desg./Lc: 0,3019***	***desg./Lc: 0,5955***	***desg./Lc: 0,8126***

Fonte: Autoria própria.

Segue uma foto (Figura 45) demonstrando a ferramenta utilizada, nesse caso foi o Ensaio n° 08, Ferramenta CVD, aresta 4 da pastilha, material recozido, avanço (f) = 0,2 [mm/rot.] e velocidade de corte (Vc) = 200[m/min.].

Figura 45: Exemplo do desgaste da ferramenta, Ensaio n° 08.



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 8 são ilustradas as medidas de desgastes [µm] das ferramentas utilizadas, junto com o comprimento efetivo de corte em [m] e a divisão desses parâmetros. Demonstrando o desgaste da ferramenta por metro usinado. Nesse caso foram duas ferramentas de PVD que usinaram o material recozido conforme evidenciado na Tabela 8 abaixo.

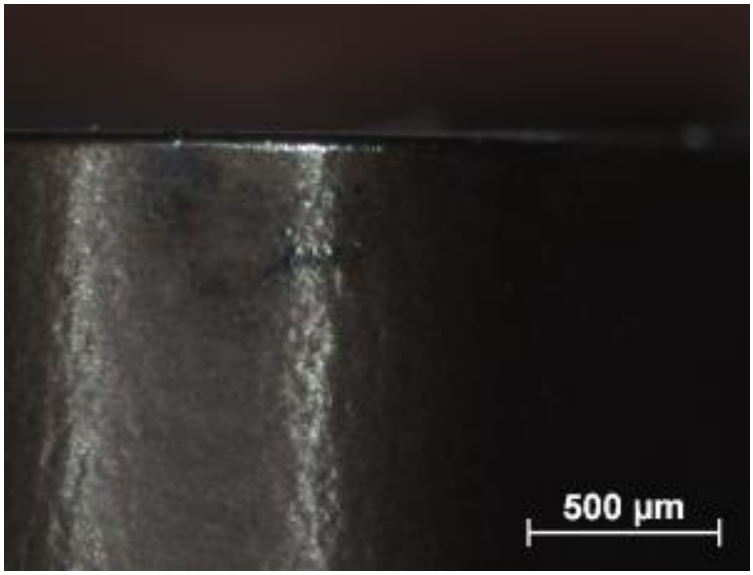
Tabela 8: Desgaste da ferramenta PVD usinando material recozido.

MATERIAL RECOZIDO - FERRAMENTA PVD				
	f = 0,1 [mm/rot.]		**f = 0,2 [mm/rot.]**	
Vc = 150[m/min.]	desg. [µm]: 30,75	desg, [µm]: 30,75	desg. [µm]: 30,75	desg. [µm]: 35,14
	Lc [m] : 124,96	Lc [m] : 124,38	Lc [m] : 62,48	Lc [m] : 62,19
	desg./Lc: 0,2461	***desg./Lc: 0,2472***	***desg./Lc: 0,4922***	***desg./Lc: 0,5651***
Vc = 200[m/min.]	desg. [µm]: 29,28	desg. [µm]: 32,21	desg. [µm]: 27,82	desg. [µm]: 42,46
	Lc [m] : 124,96	Lc [m] : 124,38	Lc [m] : 62,48	Lc [m] : 62,19
	desg./Lc: 0,2343	***desg./Lc: 0,2590***	***desg./Lc: 0,4453***	***desg./Lc: 0,6828***

Fonte: Autoria própria.

Segue uma foto (Figura 46) demonstrando a ferramenta utilizada, nesse caso foi o Ensaio n° 13, Ferramenta PVD, aresta 1 da pastilha, material recozido, avanço (f) = 0,1 [mm/rot.] e velocidade de corte (Vc) = 150[m/min.].

Figura 46: Exemplo do desgaste da ferramenta, Ensaio n° 13.



Fonte: Autoria própria.

5.10 - ANÁLISE DOS CAVACOS

5.10-1 - Análise macro dos Cavacos

Os cavacos foram coletados de cada processo de usinagem e organizados de acordo com as Tabelas 9, 10, 11 e 12. Nessas Tabelas podemos verificar os tipos e formas dos cavacos, sendo caracterizados principalmente pela forma Helicoidal tipo arruela (Curto, longo e emaranhado) e lascas.

Tabela 9: Foto macro dos cavacos, material Endurecido, ferramenta CVD.

MATERIAL ENDURECIDO - FERRAMENTA CVD				
	f = 0,1 [mm/rot.]		f = 0,2 [mm/rot.]	
Vc = 150[m/min.]				
Vc = 200[m/min.]				

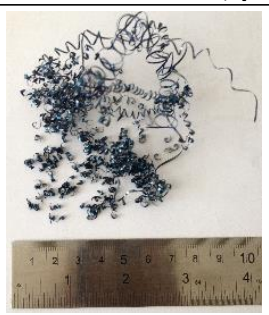
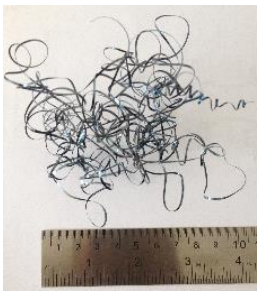
Fonte: Autoria própria.

Tabela 10: Foto macro dos cavacos, material Endurecido, ferramenta PVD.

MATERIAL ENDURECIDO - FERRAMENTA PVD				
	f = 0,1 [mm/rot.]		f = 0,2 [mm/rot.]	
Vc = 150[m/min.]				
Vc = 200[m/min.]				

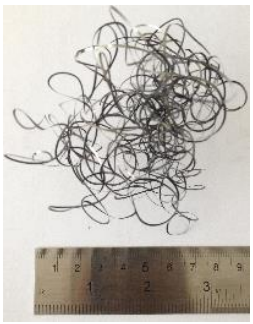
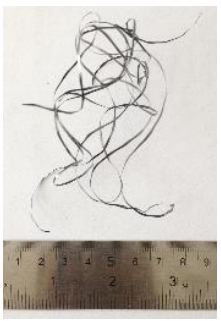
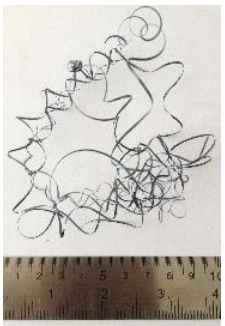
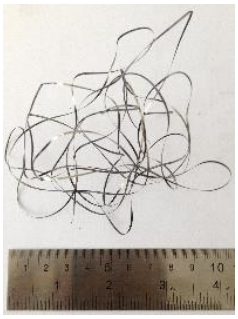
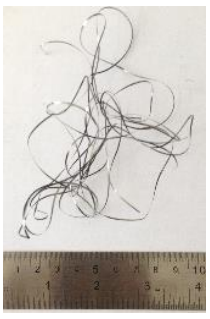
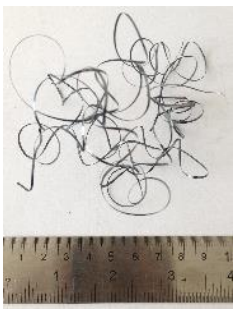
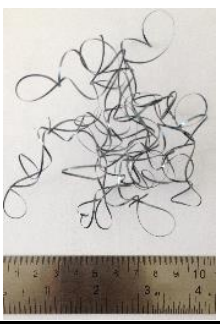
Fonte: Autoria própria.

Tabela 11: Foto macro dos cavacos, material Recozido, ferramenta CVD.

MATERIAL RECOZIDO - FERRAMENTA CVD				
	f = 0,1 [mm/rot.]		f = 0,2 [mm/rot.]	
Vc = 150[m/min.]				
Vc = 200[m/min.]				

Fonte: Autoria própria.

Tabela 12: Foto macro dos cavacos, material Recozido, ferramenta PVD.

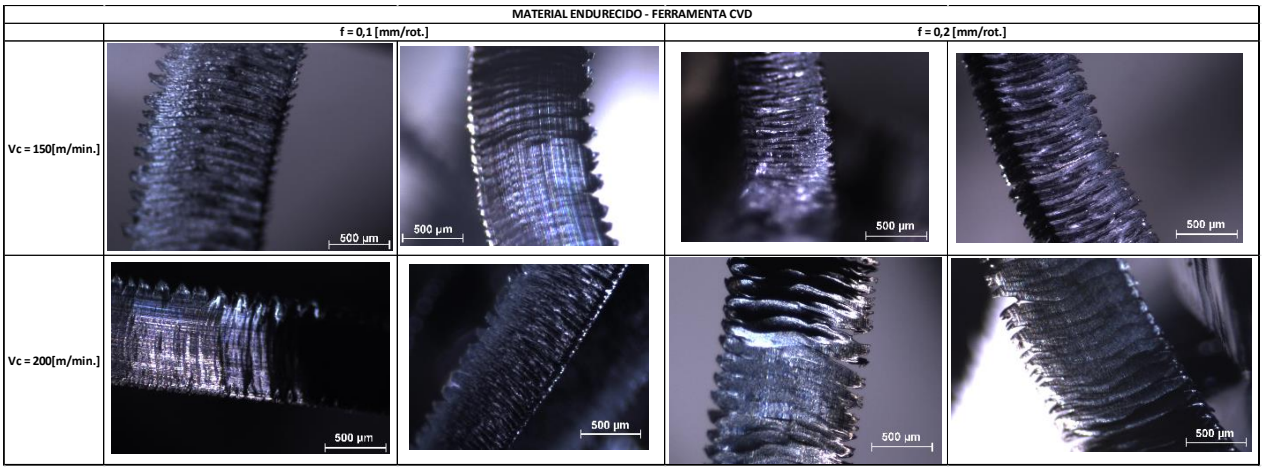
MATERIAL RECOZIDO - FERRAMENTA PVD				
	f = 0,1 [mm/rot.]		f = 0,2 [mm/rot.]	
Vc = 150[m/min.]				
Vc = 200[m/min.]				

Fonte: Autoria própria.

5.10-2 - Análise micro dos Cavacos

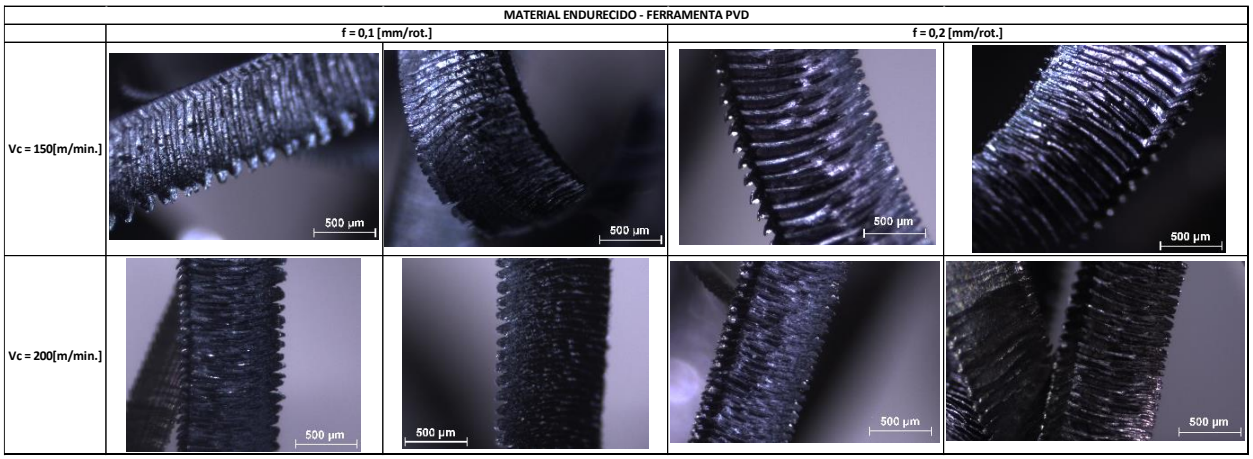
Também foram tiradas fotos com a ajuda da lupa óptica Zeiss para verificarmos a característica dos cavacos e todos apresentaram as características do tipo cisalhado, conforme demonstrado nas Tabelas 13, 14, 15 e 16.

Tabela 13: Foto micro dos cavacos, material Endurecido, ferramenta CVD.



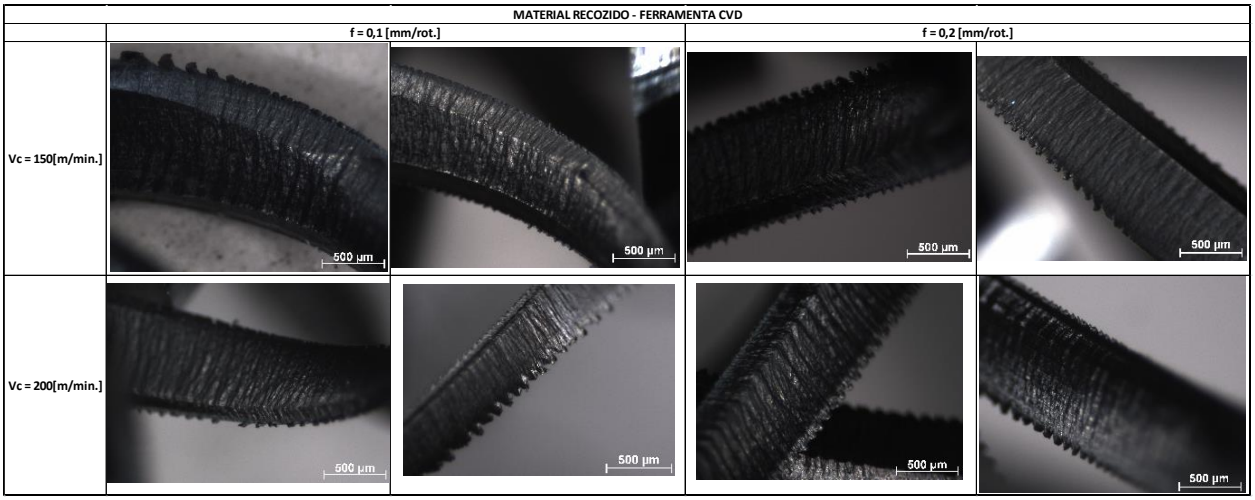
Fonte: Autoria própria.

Tabela 14: Foto micro dos cavacos, material Endurecido, ferramenta PVD.



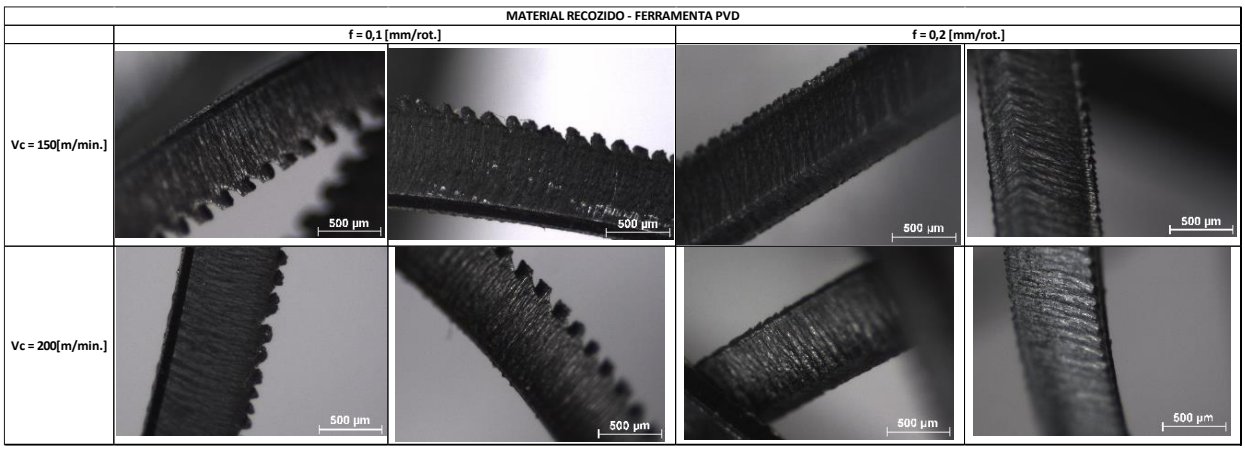
Fonte: Autoria própria.

Tabela 15: Foto micro dos cavacos, material Recozido, ferramenta CVD.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 16: Foto micro dos cavacos, material Recozido, ferramenta PVD.



Fonte: Autoria própria.

6 CONCLUSÕES

Como a utilização da ferramenta CVD para o material recozido apresentou valores de rugosidade elevados (não possíveis de serem medidos) devido à alta vibração apresentada. Assim nosso estudo teve algumas modificações, porém tivemos ótimos resultados e coerentes.

A ferramenta PVD permite uma menor potência, uma menor rugosidade para o material recozido, uma menor vibração, e um menor desgaste da ferramenta. A ferramenta CVD permite uma menor rugosidade para o material endurecido e uma menor emissão acústica. Portanto em vista disso, a ferramenta PVD teve melhor desempenho que a ferramenta CVD, com exceção da usinagem do material endurecido que é mais aconselhável a utilização da ferramenta CVD.

A velocidade de corte de 200 [m/min.] apresentou melhores condições que a velocidade de corte de 150 [m/min.] em todos os aspectos estudados, com exceção do desgaste da ferramenta onde a Vc de 150 [m/min.] apresentou uma melhor condição. Porém analisando o fato, ainda assim a velocidade de corte de 200 [m/min.] é mais recomendável.

O avanço de 0,1 [mm/rot.] apresentou melhores condições que o avanço de 0,2 [mm/rot.] se levarmos em conta a menor potência e principalmente o menor desgaste da ferramenta. Já o avanço de 0,2 [mm/rot.] é indicado para a usinagem do material endurecido.

Em relação ao material, cada um apresentou suas características próprias. O material recozido é fundamental para uma menor potência e um menor desgaste da ferramenta; Já o material endurecido se saiu melhor para uma menor vibração e menor emissão acústica. Porém o que devemos salientar principalmente é que para a usinagem do material recozido devemos utilizar a ferramenta PVD e para o endurecido devemos utilizar a ferramenta CVD, pois a usinagem do material recozido com a ferramenta CVD nem conseguimos medir a rugosidade devido sua vibração crítica.

Para uma melhor Rugosidade Ra e Rt com material endurecido, os melhores parâmetros são: ferramenta CVD, Velocidade de corte (Vc) = 200 [m/min.] e avanço (f) = 0,2 [mm/rot.];

Para uma melhor Rugosidade Ra e Rt com material recozido e PVD, os melhores parâmetros são: Velocidade de corte (Vc) = 200 [m/min.] e avanço (f) = 0,1 [mm/rot.];

Para uma menor Potência máxima consumida, os melhores parâmetros são: ferramenta PVD, Velocidade de corte (Vc) = 200 [m/min.], avanço (f) = 0,1 [mm/rot.] e material Recozido;

Para uma menor vibração, os melhores parâmetros são: ferramenta PVD, Velocidade de corte (Vc) = 200 [m/min.], avanço (f) = 0,2 [mm/rot.] e material Endurecido;

Para uma menor emissão acústica, os melhores parâmetros são: ferramenta CVD, Velocidade de corte (Vc) = 200 [m/min.], avanço (f) = 0,2 [mm/rot.] e material Endurecido;

Para um menor desgaste da ferramenta, os melhores parâmetros são: ferramenta PVD, Velocidade de corte (Vc) = 150 [m/min.], avanço (f) = 0,1 [mm/rot.] e material Recozido;

Portanto para usinar um material Recozido o mais favorável será: Ferramenta PVD, Velocidade de corte (Vc) = 200 [m/min.] e avanço (f) = 0,1 [mm/rot.]. *"OBS.: Não é aconselhável usar o CVD para usinar o material Recozido.".*

Portanto para usinar um material Endurecido o mais favorável será: Ferramenta CVD, Velocidade de corte (Vc) = 200 [m/min.] e avanço (f) = 0,2 [mm/rot.].

As ferramentas não apresentaram avarias. Em geral os cavacos caracterizam o tipo Cisalhado e as principais formas dos cavacos foram: Helicoidal tipo arruela (Curto, longo e emaranhado) e lascas.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerância, ajuste, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.

ALVES, M.C.S. **Projeto de pesquisa**: usinabilidade do aço ABNT 4340 utilizando ferramenta de AL_2O_3 com MgO_2. Guaratinguetá, 2015.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 87**: aço carbono e ligados para construção mecânica: designação e composição química. Rio de Janeiro, 1996.

AZOM. **AISI 4340 alloy steel** (UNS G43400). Materials science and engineering information | AZoM, 2014. Disponível em: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleD=6772#3>. Acesso em: 10 set.2017.

BANDINI, C. M. D. **Influência da geometria de corte no torneamento do eucalipto**. 2012. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Faculdade de Engenharia do Campus de Itapeva, Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2012.

BHATTACHARYA, S. Microstructural evolution of AISI 4340 steel during direct metal deposition process. **Materials science and engineering A**, v. 528, n. 6, p. 2309-2318, 2011.

CALLISTER JÚNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais**: uma introdução. 8.ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos- LTC, 2013. 817p.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 6.ed. São Paulo: ABM, 1988. 576 p.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1974. 412 p.

COSTA, A. F. **Análise comparativa de ferramentas revestidas por PVD e CVD no torneamento do Aço ABNT 8620**. 2016. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

COSTA, É. S. **Processos de usinagem**. Divinópolis: CEFET-MG, 2006. 85 p.

DESHPANDE, N.; FOFANA, M. S. Nonlinear regenerative chatter in turning. **Robotics and computer integrated manufacturing,** Pérgamo, v. 17, n. 1-2, p. 107-112, 2001.

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

DIÓGENES, A. C. **Estudo da usinagem por torneamento de ligas de alumínio**. 2011, 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

EL RAYES, M. M.; EL DANAF, E. A.; ALMAJID, A. A. Ultrasonic characterization of heat treatment effects on SAE-1040 and 4340 steels. **Journal of materials processing technology**, Amsterdam, v. 216, p. 188-198, 2015.

FAVORIT. **Placas SAE 4340**. Disponível em: <http://www.favorit.com.br/produtos/placas-1045-4140-8620-8640-4340/placas-sae-4340> Acesso em: 02 jul. 2017.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2013. 751 p.

GUO, Y. B.; AMMULA, S. C. Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining. **International journal of machine tools and manufacture,** Amsterdam, v. 45, n. 14, p. 1622-1627, 2005.

HOWELL, J.K.; LUCKE, W.E.; WHITE, E.M. **Health and safety aspects in the use of metalworking fluids**. United States of America: Taylor e Francis Group, LLC, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 513(E):** classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges: designation of main groups and groups of application. Geneva, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3685**: tool-life testing with single-point turning tools. Geneva, 1987.

JEMIELNIAK, K. Commercial tool condition monitoring systems. **International journal of advanced manufacturing technology,** London, v. 15, p. 711-721. 1999.

KALPAKJIAN, S; SCHMID, S. **Manufacturing, engineering and technology**. Singapore: Pearson Education, 2009.

KING, D. A. **Vibrations at surfaces**. Windermere, United Kingdom: Editora, 1985.

LI, X. A. Acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. **International journal of machine tools and manufacture**, Oxford, v. 42, n. 2, p. 157-165, 2002.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2.ed. São Paulo: Blucher, 2011. 397p.

MAIA, L. H. A. **Influência das condições de corte do fresamento do aço baixa liga nos sinais vibracionais e de emissão acústica**. 2009. 198f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MEENA, A.; EL MANSORI, M. Study of dry and minimum quantity lubrication drilling of novel austempered ductile iron (ADI) for automotive applications. **Wear,** Philadelphia, v. 271, n. 9-10, p. 2412–2416, 2011.

MIYAHARA, N. M. B. **Análise comparativa do desempenho de ferramentas no torneamento do alumínio 2024**. 2015. 116f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

PALMA, E. S. **Tolerância de acabamento**: rugosidade. PUC/MG, 2006. 20p. Apostila de metrologia.

QUINTO, D. T. Mechanical properties, structure and performance of chemical vapor deposited and physically vapor deposited coated carbide tools. **Materials science and engineering,** London, n. A105/106, p. 443-452, 1988.

ROMEIRO, S. B. B. **Química na siderurgia**. Porto Alegre: UFRGS, 1977.

RUNGE, P.R. F.; DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas indústrias**: produção, manutenção e controle Triboconcept. Cotia: Edições Técnicas, p. 71-171, 1990.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, 2007. 478p.

SETTINERI, L. et al. Evaluation of wear resistance of AlSiTiN and AlSiCrN nanocomposite coatings for cutting tools. **CIRP annals:** manufacturing technology, Amsterdam, v. 57, p. 575-578, 2008.

SILVA, A. L. C; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 2.ed. Sumaré: Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988. p. 528.

SILVA NETO, J. C. S. **Metrologia e controle dimensional**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2012. 239p.

SHARMA, V.; PANDEY, P. M. Optimization of machining and vibration parameters for residual stresses minimization in ultrasonic assisted turning of 4340 hardened steel. **Ultrasonics**, Amsterdam, v. 70, p. 172-182, 2016.

SOARES, L. R. L. **Fresamento do aço SAE 4340 temperado e revenido utilizando ferramenta de metal duro recobertas.** 2016. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guartinguetá, 2016.

SOKOVIC, M.; MIJANOVIC, K. Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. **Journal of Materials Processing Technology,** Poland, v.109, p. 181-189, 2001.

SOUTO, U. B. Avaliação do perfil de rugosidade através do sinal de emissão acústica. In: 14° POSMEC - SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 2004, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, 2004.

SOUZA, A. J. **Processos de fabricação por usinagem:** parte 1. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.

SREEJITH, P.S.; NGOI, B. K. A. Dry machining: machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology,** Amsterdam, v.101, p. 287-291, 2000.

SURESH, R.; BASAVARAJAPPA, S.; SAMUEL, G. L. Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool. **Measurement**: Journal of the International Measurement Confederation, London, v. 45, n. 7, p. 1872-1884, 2012.

TORRES, M.A.S.; VOORWALD, H.J.C. An evaluation of shot peening, residual stress and estress relaxation on the fatique life of AISI 4340 steel. **International Journal of Fatigue,** Oxford, v. 24, n. 42, p. 877-886, 2002.

WILLIANS, J. A. The action of the lubrificants in metal cutting. **Journal Mechanical Engineering Science,** London, v. 19, n. 5, p. 202-212, 1968.