

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

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CAIO CAZÉ DE OLIVEIRA PINHEIRO

**INFLUÊNCIA DA USINAGEM NAS CARACTERÍSTICAS
MICROESTRUTURAIS DE REVESTIMENTO OBTIDOS POR
ASPERSÃO TÉRMICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RIO DE JANEIRO

OUTUBRO DE 2021

CAIO CAZÉ DE OLIVEIRA PINHEIRO

**INFLUÊNCIA DA USINAGEM NAS CARACTERÍSTICAS
MICROESTRUTURAIS DE REVESTIMENTO OBTIDOS POR
ASPERSÃO TÉRMICA**

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

Prof. Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa

RIO DE JANEIRO

OUTUBRO DE 2021

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

P654 Pinheiro, Caio Cazé de Oliveira
Influência da usinagem nas características microestruturais de revestimento obtidos por aspersão térmica / Caio Cazé de Oliveira Pinheiro – 2021.
111f.: il. color., enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2021.
Bibliografia: f. 108-111
Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa

1. Engenharia mecânica. 2. Aspersão térmica.
3. Revestimentos. 4. Microestrutura. I. Costa, Hector Reynaldo Meneses (Orient.). II. Título.

CDD 620.1

AGRADECIMENTOS

Ao meu professor orientador Hector Reynaldo Meneses Costa e a professora Tatiane de Campos Chuvas, por todo direcionamento, conhecimento, ajuda, paciência e atenção que me foi fornecido;

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

Aos técnicos de laboratório, em especial ao Brenno Tavares Duarte, por todo apoio técnico e intelectual nas partes práticas e teóricas desse estudo;

Ao doutorando Diogo Barbato, pelas suas orientações, conhecimentos transmitidos e empenho a ajudar ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho;

À empresa VGK que disponibilizou o material e apoio técnico necessários;

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

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

RESUMO

PINHEIRO, Caio. **Influência da usinagem das características microestruturais de revestimento obtidos por aspersão térmica**. 111 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.

O desenvolvimento da tecnologia de aspersão térmica baseia-se na necessidade de se aumentar a vida útil de sistemas e peças, em face o elevado custo de componentes de reposição aliado as vantagens de se recuperar peças as quais se elimina a substituição. E com isto deseja-se elevar o desempenho dos sistemas mecânicos em uso, melhorando suas propriedades mecânicas (como sua dureza superficial, por exemplo). E para resistir a acréscimos nas solicitações térmicas e mecânicas é exigido da ciência dos materiais o desenvolvimento de ligas específicas para resistir às mais diversas condições de serviço. O torneamento de materiais endurecidos é comumente realizado utilizando ferramentas de PCBN. No entanto, os custos relativamente elevados associados a essas ferramentas deixaram um espaço para procurar materiais de ferramenta com custos menores, que operem em um intervalo de tempo aceitável (ex. cerâmica). Neste contexto, este estudo busca avaliar o desempenho de insertos de cerâmica no torneamento de uma amostra revestida e endurecida por uma camada de liga inox martensítica 13% Cr por meio da avaliação das forças de usinagem e rugosidade da superfície usinada. Para isso, foram variadas as velocidades de corte na condição de corte a seco e condições das ferramentas de corte (novas e desgastadas). Realizou-se dois passes de retirada de material para cada velocidade de corte aplicada. Na análise dos resultados obtidos, verificou-se que o aumento da velocidade de corte (v_c) gerou uma diminuição nas componentes da força em função da diminuição da resistência ao cisalhamento do material (aumento da temperatura).

Palavras-chave: Torneamento de materiais endurecidos. Inseto cerâmico. Aspersão térmica.

ABSTRACT

PINHEIRO, Caio. **Machining influence of microstructural characteristics of coating obtained by thermal spray**. 111 Pages. Trabalho de Conclusão de Curso – Federal Center of Technological Education - Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2020.

The development of thermal spray technology is based on the need to increase the useful life of systems and parts, given the high cost of replacement components combined with the advantages of recovering parts which eliminate replacement. And with this, the aim is to increase the performance of the mechanical systems in use, improving their mechanical properties (such as their surface hardness, for example). And to resist increases in thermal and mechanical demands, materials science is required to develop specific alloys to withstand the most diverse service conditions. Turning hardened materials is commonly performed using PCBN tools. However, the relatively high costs associated with these tools have left room to look for lower cost tool materials that operate within an acceptable time frame (eg ceramics). In this context, this study seeks to evaluate the performance of ceramic inserts in the turning of a sample coated and hardened by a 13% Cr martensitic stainless alloy layer by evaluating the machining forces and roughness of the machined surface. For this, cutting speeds in the dry cutting condition and cutting tools conditions (new and worn) were varied. Two material removal passes were performed for each cutting speed applied. In the analysis of the obtained results, it was verified that the increase in the cutting speed (v_c) generated a decrease in the strength components as a function of the decrease in the shear strength of the material (increase in temperature).

Keywords: Turning of hardened materials. Ceramic insert. Thermal spray.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de aplicação do processo de aspersão térmica.....	17
Figura 2 - Classificação dos processos de aspersão térmica.	17
Figura 3 - Velocidade média de impacto das partículas conforme os processos	18
Figura 4 - Esquema de uma instalação para AT de arco elétrico Fonte: Pawlowski (1995).....	19
Figura 5 - Esquema do processo de aspersão térmica a arco elétrico.....	20
Figura 6 - Grau de limpeza utilizando diversas classes de sal [Fonte: Pictorial surface preparation standards for painting steel surfaces (1967).....	25
Figura 7 - Morfologia de panquecas de alumínio depositadas Fonte: Cortés (1998).....	30
Figura 8 - Camada típica depositada pelo processo de aspersão térmica Fonte: Cortés (1998).32	
Figura 9 - Perfis de velocidade e temperatura (K) de acordo com a distância da tocha até o substrato Fonte: Pawlowski (2008).....	32
Figura 10 - Esquema de partículas aspergidas fazendo analogia com a tensão superficial de fluidos. Fonte: Cortés (1998).....	33
Figura 11 - Esquema de ancoragem mecânica das panquecas na superfície rugosa do substrato Fonte: Gimenes (2004).....	35
Figura 12 - Ângulo para ferramentas de torneamento Fonte: ASM (1994).....	38
Figura 13 - Comparação das características dos processos de torneamento duro e retificação. Fonte: Klocke (2005)	41
Figura 14 - Relação entre tenacidade e dureza dos materiais aplicados como ferramentas de corte Fonte: Mitsubishi (2018).....	44
Figura 15 - Dureza a quente dos principais materiais de ferramentas aplicados no torneamento duro Fonte: adaptado de Klocke (2011).....	45
Figura 16 - Rugosidade versus tolerância ISO IT para o torneamento de materiais endurecido Fonte: Byrne (2003).....	45
Figura 17 - Divisão e subdivisão dos grupos de materiais cerâmicos Fonte: Campos (2015)....	46
Figura 18 - Ângulos da ferramenta de corte: plano de medida e plano de referência Fonte: Klocke (2005).....	48
Figura 19 - Ângulos da ferramenta de corte: ângulos no plano de medida Fonte: Klocke (2005).	48
Figura 20 - Ângulos de uma ferramenta de corte: (a) α_0 (folga), β_0 (cunha) e γ_0 (saída) (b) λ_0 (inclinação) e (c) χ_r (posição), ϵ_r (ponta) e $\chi'r$ (posição secundário) Fonte: Ferraresi (2011). ...	49
Figura 21 - Perfil filetado deixado pela ferramenta na peça torneada Fonte: Noordin (2007). 50	
Figura 22 - Caracterização da aresta de corte arredondada Fonte: Denkena e Bassett, (2011).	50
Figura 23 - Efeito do ângulo de saída efetivo na transição da macro para microgeometria da ferramenta Fonte: Denkena e Biermann (2014).....	51
Figura 24 - Componentes da força de usinagem Fonte: Ferraresi (2011).....	52
Figura 25 - Dependência das componentes da força de usinagem: (a) avanço; (b) profundidade de corte; (c) velocidade de corte e (d) ângulo de posição Fonte: Klocke (2011).....	53
Figura 26 - Ilustração dos vetores direcionais de velocidade de corte e avanço.....	56
Figura 27 - Deformação plástica na usinagem Fonte: Astakhov (2011).....	57
Figura 28 - Representação esquemática da superfície de um metal Fonte: Astakhov (2010)...	59

Figura 29 - Esquema de medição de Ra Fonte: Molde injeção plásticos (2021).....	61
Figura 30 – Listagem de aplicações típicas de rugosidade Ra Fonte: Molde injeção plásticos (2021)	63
Figura 31 - Classificação geral de acabamentos superficiais Fonte: Molde injeção plásticos (2021)	64
Figura 32 - Representação esquemática da obtenção do parâmetro Rz Fonte: Molde injeção plásticos (2021)	66
Figura 33 - Representação esquemática do parâmetro Rq Fonte: Molde injeção plásticos (2021)	67
Figura 34 - Representação esquemática do parâmetro Rt Fonte: Molde injeção plásticos (2021)	68
Figura 35 – Fotografia do corpo de prova com substrato de aço SAE1020 aspergido termicamente Fonte: Autor	69
Figura 36 - Inserto cerâmico TNGA160404 Fonte: NTK (2021)	70
Figura 37 - Porta-ferramenta MTJNR 2020 K16 Fonte: Sandvik Coromant (2021).....	70
Figura 38 - Condições de uso indicados pelo fabricante do inserto Fonte: NTK (2021)	71
Figura 39 - Faixa de parâmetros de usinagem indicados pelo fabricante do inserto Fonte: NTK (2021)	71
Figura 40 - Dimensionamento do inserto Fonte: NTK (2021)	72
Figura 41 - Cotas referentes ao dimensionamento do inserto Fonte: NTK (2021)	72
Figura 42 - Composição química e propriedades físicas do inserto utilizado da classe HC2 Fonte: NTK (2021).....	72
Figura 43 - Gráfico comparativo de Velocidade de Corte x Avanço de insertos do fabricante NKT Fonte: NTK (2021)	73
Figura 44 - Torno MS 205 da Indústrias Nardini S/A.....	74
Figura 45 – Acoplamento do relógio comparador para realizar o alinhamento do corpo de prova Fonte: Autor.....	76
Figura 46 - Dinamômetro Kistler modelo 9257 BA Fonte: Autor	77
Figura 49 - Esquema representativo da aquisição dos sinais de força de usinagem utilizados neste estudo Fonte: adaptado de POLLY (2019).....	78
Figura 50 - Painel do rugosímetro em funcionamento Fonte: Autor.....	79
Figura 52 - Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210P Fonte: Autor	80
Figura 53 - Gráfico das forças de corte - Passe 1 500 RPM $v_c = 119,38$ m/min/ $a_p = 0,2$ mm. Fonte: Microsoft Excel.....	82
Figura 54 - Gráfico das forças de corte - Passe 2 500 RPM $v_c = 119,38$ m/min/ $a_p = 0,2$ mm. Fonte: Microsoft Excel.....	82
Figura 55 - Média das componentes da força de usinagem 500 RPM e Desvio Padrão $v_c = 119,38$ m/min Fonte: Microsoft Excel.....	83
Figura 56 - Gráfico das forças de corte - Passe 1 800 RPM $v_c = 191,01$ m/min/ $a_p = 0,2$ mm. Fonte: Microsoft Excel.....	84
Figura 57 - Gráfico das forças de corte - Passe 2 800 RPM $v_c = 191,01$ m/min/ $a_p = 0,2$ mm Fonte: Microsoft Excel.....	85
Figura 58 - Média das componentes da força de usinagem 800 RPM e Desvio Padrão $v_c = 191,01$ m/min Fonte: Microsoft Excel.....	86

Figura 59 - Gráfico das forças de corte - Passe 1 1000 RPM $vc = 238,76$ m/min/ $ap = 0,2$ mm Fonte: Microsoft Excel.....	87
Figura 60 - Gráfico das forças de corte - Passe 2 1000 RPM $vc = 238,76$ m/min/ $ap = 0,2$ mm Fonte: Microsoft Excel.....	87
Figura 61 - Média das componentes da força de usinagem 1000 RPM e Desvio Padrão $vc = 238,76$ m/min Fonte: Microsoft Excel.....	88
Figura 62 - Gráfico das forças de corte - Passe 1 1250 RPM $vc = 298,45$ m/min/ $ap = 0,2$ mm Fonte: Microsoft Excel.....	89
Figura 63 - Gráfico das forças de corte - Passe 2 1250 RPM $vc = 298,45$ m/min/ $ap = 0,2$ mm Fonte: Microsoft Excel.....	89
Figura 64 - Média das componentes da força de usinagem 1250 RPM e Desvio Padrão $vc = 238,76$ m/min Fonte: Microsoft Excel.....	90
Figura 65 - Gráfico das forças de corte - Passe 1 1600 RPM $vc = 382,02$ m/min/ $ap = 0,2$ mm Fonte: Microsoft Excel.....	91
Figura 66 - Gráfico das forças de corte - Passe 2 1600 RPM $vc = 382,02$ m/min/ $ap = 0,2$ mm Fonte: Microsoft Excel.....	92
Figura 67 - Média das componentes da força de usinagem 1600 RPM e Desvio Padrão $vc = 382,02$ m/min Fonte: Microsoft Excel.....	93
Figura 68 - Gráfico das forças de corte - Passe 1 2500 RPM $vc = 596,90$ m/min/ $ap = 0,2$ mm Fonte: Microsoft Excel.....	94
Figura 69 - Gráfico das forças de corte - Passe 2 2500 RPM $vc = 596,90$ m/min/ $ap = 0,2$ mm Fonte: Microsoft Excel.....	94
Figura 70 - Média das componentes da força de usinagem 2500 RPM e Desvio Padrão $vc = 596,9$ m/min Fonte: Microsoft Excel.....	95
Figura 71 - Média das Forças Passivas e Desvio Padrão Fonte: Microsoft Excel	96
Figura 72 - Média das Forças de Avanço e Desvio Padrão Fonte: Microsoft Excel.....	97
Figura 73 - Média das Forças de Corte e Desvio Padrão Fonte: Microsoft Excel.....	98
Figura 74 – Valores das médias de Ra obtidos com as variações de velocidades de corte no passe 1 e passe 2 Fonte: Microsoft Excel.....	100
Figura 75 - Fotografia amplificada 2500 RPM ($vc = 596,9$ m/min) Passe 2 Fonte: Autor	102
Figura 76 - Fotografia amplificada 1600 RPM ($vc = 382,02$ m/min) Passe 2 Fonte: Autor	102
Figura 77 - Fotografia amplificada 1250 RPM ($vc = 298,45$ m/min) Passe 2 Fonte: Autor	103
Figura 78 - Fotografia amplificada 1000 RPM ($vc = 238,76$ m/min) Passe 2 Fonte: Autor	103
Figura 79 - Fotografia amplificada 800 RPM ($vc = 191,01$ m/min) Passe 2 Fonte: Autor	104
Figura 80 - Fotografia amplificada 500 RPM ($vc = 119,38$ m/min) Passe 2 Fonte: Autor	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperaturas das fontes de calor.....	18
Tabela 2 - Principais parâmetros de controle dos processos de AT.....	21
Tabela 3 - Comparação das características de processos de AT.....	22
Tabela 4 - Comparação das características de processos de AT.....	22
Tabela 5 - Vantagens relacionadas aos processos de aspersão térmica. Fonte: modificado de CORTÉS (1998).....	23
Tabela 6 - Desvantagens relacionadas aos processos de aspersão térmica Fonte: modificado de CORTÉS (1998).....	23
Tabela 7 - Características de abrasivos usados para jateamento Fonte: adaptado de Menezes (2007).....	26
Tabela 8 - Condições usuais de jateamento para obtenção de rugosidade adequada Fonte: adaptado de Lima (2002).....	28
Tabela 11 - Lista de materiais selantes Fonte: Cortés (1998).....	39
Tabela 9 - Comprimento de amostragem de acordo da distância entre os sulcos Fonte: Molde injeção plásticos (2021).....	65
Tabela 10 - Tabela com determinação do comprimento de amostragem para perfis aperiódicos baseados no parâmetro Ra, Rz ou Rmáx. Molde injeção plásticos (2021).....	65
Tabela 13 - Parâmetros utilizados durante o torneamento cilíndrico deste estudo Fonte: Autor.....	75
Tabela 14 - Dados de rugosidades adquiridos durante o processo de usinagem do corpo de prova. Fonte: Autor.....	99
Tabela 15 - Valores dos parâmetros das rugosidades superficiais nas condições de polido e retificado.....	100

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 MOTIVAÇÃO	13
1.2 JUSTIFICATIVA	13
1.3 OBJETIVO	14
1.4 METODOLOGIA E TRABALHO REALIZADO	14
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA	16
2.1.1 <i>Aspersão Térmica Por Arco Elétrico (ASP)</i>	18
2.1.2 <i>Preparação Da Superfície</i>	24
2.1.2.1 Limpeza	24
2.1.2.2 Rugosidade da superfície	27
2.1.2.3 Camada de ligação	28
2.1.2.4 Pré aquecimento do substrato	29
2.1.3 <i>Principais Características E Propriedades Dos Revestimentos Depositados Por Aspersão Térmica (AT)</i>	31
2.1.3.1 Macroestrutura	31
2.1.3.2 Porosidade	33
2.1.3.3 Micro trincas	34
2.1.3.3 Aderência	34
2.1.3.4 Microestrutura	35
2.1.3.5 Formação de óxidos	36
2.1.4 <i>Acabamento Das Camadas Depositadas</i>	37
2.1.4.1 Usinagem	37
2.1.4.2 Selagem	38
2.2. TORNEAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS (TME)	39
2.2.1 <i>Ferramentas De Corte</i>	43
2.2.1.1 Ferramentas de corte de material cerâmico	46
2.2.1.2 Geometria da ferramenta de corte	47
2.2.2 <i>Forças De Usinagem</i>	51
2.2.3 <i>Grandezas Físicas E Parâmetros De Usinagem</i>	55
2.3. RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA	57
2.3.1 <i>Parâmetros De Rugosidade</i>	61
2.3.1.1 Rugosidade média (Ra)	61
2.3.1.2 Rugosidade média (Rz)	66
2.3.1.3 Desvio médio quadrático (Rq)	67
2.3.1.4 Profundidade total da rugosidade (Rt)	68
3. MATERIAIS E MÉTODOS	69
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CORPO DE PROVA	69
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA FERRAMENTA DE CORTE	70
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE TORNEAMENTO	74
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DOS SINAIS DAS COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM	76
3.5 CARACTERIZAÇÃO DA AQUISIÇÃO DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE	79

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
4.1	COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM.....	81
4.1.1	<i>Resultados Das Componentes Da Força De Usinagem – 500 RPM.....</i>	<i>82</i>
4.1.2	<i>Resultados Das Componentes Da Força De Usinagem – 800 RPM.....</i>	<i>84</i>
4.1.3	<i>Resultados Das Componentes Da Força De Usinagem – 1000 RPM.....</i>	<i>86</i>
4.1.4	<i>Resultados Das Componentes Da Força De Usinagem – 1250 RPM.....</i>	<i>89</i>
4.1.5	<i>Resultados Das Componentes Da Força De Usinagem – 1600 RPM.....</i>	<i>91</i>
4.1.6	<i>Resultados Das Componentes Da Força De Usinagem – 2500 RPM.....</i>	<i>93</i>
4.1.7	<i>Resultados Das Médias Das Forças Passivas E Desvio Padrão</i>	<i>96</i>
4.1.8	<i>Resultados Das Médias Das Forças de Avanço E Desvio Padrão</i>	<i>97</i>
4.1.9	<i>Resultados Das Médias Das Forças de Corte E Desvio Padrão</i>	<i>98</i>
4.2	RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE	99
4.2.1	<i>Resultados Comparativos Dos Valores De Ra</i>	<i>100</i>
4.3	<i>Macrografias Das Superfícies</i>	<i>102</i>
5	CONCLUSÕES.....	106
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de revestimentos protetores, com finalidades de engenharia, inicialmente era requerida para proteção de conjuntos e componentes mecânicos contra a corrosão. E devido ao avanço de pesquisas no desenvolvimento de novos materiais, atualmente, os revestimentos são utilizados também para elevar a resistência ao desgaste, a corrosão, isolamento térmico e elétrico e contra incompatibilidades químicas e biológicas e recentemente está sendo utilizado aplicando revestimentos para implantes (MACHADO, 2009).

Tradicionalmente, quando o processo de fabricação é por usinagem, existe uma tendência natural em realizar o corte em ligas de aço ou ferros fundidos. No entanto, atualmente muitos outros materiais são encontrados em chão de fábrica, instalações marítimas, entre outras, como aços inoxidáveis, endurecidos, ligas e superligas ferrosas e não ferrosas (p. ex. titânio) resistentes ao calor (DINIZ et al., 2010). Esses materiais apresentam características muito diferentes das ligas tradicionais e são bastante representativos no contexto de “materiais de difícil usinagem”, bem como outros os quais foram endurecidos. Assim, é comum que as empresas classifiquem a usinabilidade dos materiais de acordo com indicativos de usiná-los a um menor custo (DE VOS, 2014).

O presente trabalho busca realizar uma compreensão assertiva sobre o processo de usinagem em um material que teve sua camada externa endurecida via processo de aspersão a arco elétrico, procedimento este de grande eficiência e baixo custo, o qual vem sendo amplamente utilizado mundialmente no campo industrial da engenharia em geral. A usinagem deste tipo de material possui alto nível de complexidade por se tratar de um processo que apresenta altos esforços atingidos pela máquina-ferramenta e ter alta dificuldade de se apresentar ao final uma boa qualidade da superfície usinada pelos aspectos de rugosidade (LIMA, 2001). Tendo este contexto em vista, estudos sobre o tema de usinabilidade de materiais endurecidos tornam-se de grande importância. Neste trabalho realizou-se variações nos parâmetros do processo de usinagem para que pudessem ser comparados com a qualidade da rugosidade final atingida, para que desta

maneira se obtenha resultados condizentes e satisfatórios que contribuam para maiores avanços neste segmento.

1.1 MOTIVAÇÃO

O torneamento de materiais endurecidos apresenta grande dificuldade técnica para ser executado devido aos grandes esforços sofridos pela máquina-ferramenta, pelos insertos e desgaste do inserto e do material a ser usinado (LIMA, 2001). Desta forma, torna-se atrativo o estudo sobre tal procedimento a fim de se buscar obter resultados satisfatórios com a utilização de parâmetros e procedimentos analisados anteriormente de maneira teórica, visando a maior aquisição de informações práticas deste tipo de procedimento.

1.2 JUSTIFICATIVA

Existem algumas considerações importantes que justificam a realização deste trabalho:

- a) A notoriedade alcançada pelo torneamento de materiais endurecidos com a evolução das máquinas operatrizes e das ferramentas de corte, permitindo substituir o processo de retificação na usinagem, reduzindo tempo e custo de produção.
- b) A influência do torneamento de peças endurecidas por aspensão térmica deve ser testada, já que durante a sua usinagem podem ocorrer danos a estrutura superficial da peça, o que pode gerar diversas consequências, como a diminuição da resistência à fadiga, da resistência à corrosão, entre outros.
- c) Buscar estabelecer uma conexão entre os dados obtidos das componentes da força de usinagem e a rugosidade final obtida ao fim do processo.

1.3 OBJETIVO

Este trabalho busca avaliar a eficácia das ferramentas de material cerâmico utilizadas no processo de usinagem de um corpo de prova que possui como substrato o aço 1020 e foi revestido via aspersão térmica a arco elétrico por uma camada de aproximadamente 1,5 mm de espessura composta por uma liga inox martensítica 13% Cr. Sua superfície possui dureza (46 ± 1) HRC. O processo utilizado foi o torneamento cilíndrico (sem lubrificação). Tais análises serão realizadas relacionando-se os parâmetros das forças de usinagem e da rugosidade superficial obtida ao final do processo.

1.4 METODOLOGIA E TRABALHO REALIZADO

O presente trabalho é baseado em experimentações práticas sobre os estudos teóricos realizados referentes as forças de usinagem e rugosidade final atingida em um material que foi endurecido via aspersão térmica pela aplicação de uma camada composta de uma liga inox martensítica 13% Cr e posteriormente usinado por torneamento cilíndrico. As forças de usinagem foram obtidas via dinamômetro com sensor piezoelétrico e seus sinais obtidos com auxílio de uma placa condicionadora de sinais e tratados com um software específico da área. Os parâmetros variados foram as velocidades de corte e o estado da ferramenta (nova e desgastada). Manteve-se o avanço fixo no menor valor possível disponível pela máquina-ferramenta. Desde modo, buscou-se a obtenção de resultados os quais ofereceriam as melhores condições para aquisição de uma rugosidade final de melhor qualidade. Obteve-se os parâmetros da rugosidade final diretamente do equipamento utilizado (rugosímetro).

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso foi dividido em basicamente sete partes abaixo descritas:

Capítulo 1: Introdução. Apresentação da proposta do trabalho de maneira sucinta, com diferentes abordagens do tema.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica. De maneira lógica, são exibidos os aspectos do processo de aspensão térmica, do processo de usinagem de materiais endurecidos, dos componentes utilizados e os demais temas pertinentes a este trabalho.

Capítulo 3: Materiais e métodos. Descrição da metodologia utilizada para atingir os objetivos propostos.

Capítulo 4: Resultados e Discussão. Neste capítulo são expostos os resultados levantados durante os ensaios realizados neste trabalho, seguindo os métodos descritos e uma síntese sobre os mesmos.

Capítulo 5: Conclusões. As principais conclusões que se pode chegar com a realização deste trabalho são apresentadas, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 6: Referências bibliográficas: Lista as bibliografias que foram citadas ao longo do trabalho bem como revisão do referencial teórico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos relacionados ao processo de aspersão térmica, usinagem e qualidade da rugosidade da superfície usinada, bem como as variações pertinentes sobre cada um desses tópicos.

2.1. PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA

De forma simplificada a aspersão térmica consiste em um grupo de processos por meio dos quais se deposita, sobre uma superfície previamente preparada, camadas de materiais metálicos ou não metálicos.

Para os processos de aplicação de aspersão térmica, os materiais depositados são levados a um estado fundido ou semifundido através de uma fonte de calor gerado no bico de uma pistola apropriada. E logo após a fusão, o material na fase de solidificação (na forma de partículas) é acelerado por gases sob pressão contra o substrato que será revestido. A colisão contra a superfície as partículas deformam-se e aderem ao material base e na sequência sobre as partículas já depositadas formando camadas. E estas camadas são constituídas por pequenas partículas deformadas na forma de panquecas em direção paralela ao substrato formando lamelas (AWS, 1985). Então de acordo com esta definição qualquer material que não se decomponha quando fundido pode ser utilizado como revestimento.

De acordo com os processos de aplicação de revestimentos protetores podemos classificar os processos de aplicação em três grandes grupos (MENEZES, 2007):

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

É fundamental que sejam analisadas as mudanças superficiais causadas por um ambiente ou por uma condição de trabalho, para determinar a seleção do material para o revestimento e seu processo de aplicação. É importante garantir elevada aderência, baixa porosidade, facilidade de deposição e custo adequado comparado com outras técnicas de proteção de materiais (MENEZES, 2007).

Para a aplicação é necessário que se tenha o material de aporte, uma fonte de energia para fundir ou fundir parcialmente as partículas e transferir energia cinética e mais ainda um tipo de bico para direcionar a aplicação, conforme mostra Figura 1.

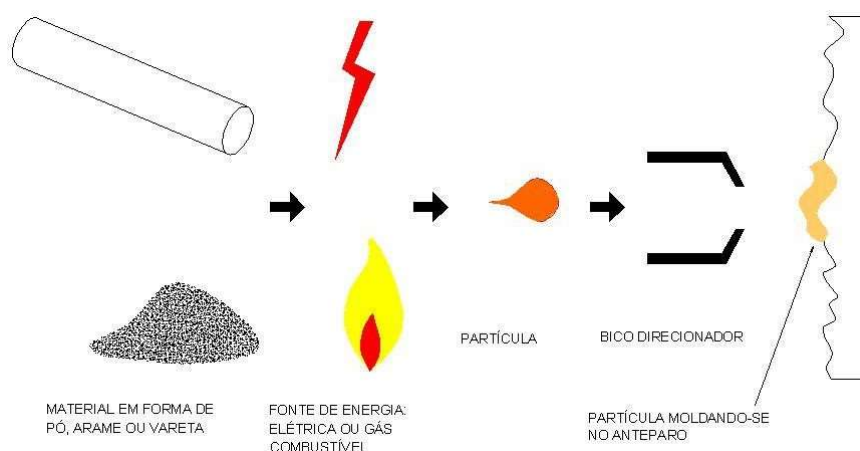


Figura 1 - Esquema de aplicação do processo de aspersão térmica

Fonte: Menezes (2007)

A classificação dos processos de aspersão térmica distingue-se em dois grupos: um que usa a chama e outro que utiliza a energia elétrica como fonte de energia. Essa distinção é representada na Figura 2.

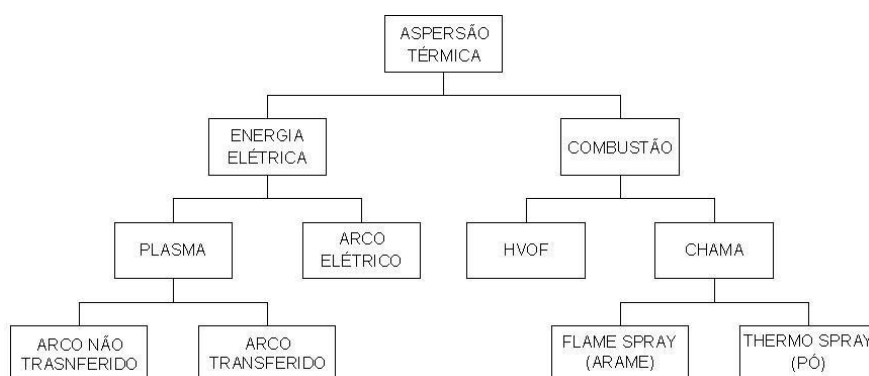


Figura 2 - Classificação dos processos de aspersão térmica.

Fonte: Pawlowski (1995)

O material do revestimento, o método de aquecimento e o método de aceleração das partículas são variações básicas dos processos de aspersão térmica. Na Tabela 1 temos poder calorífero dos gases combustíveis utilizados e na Figura 3 a velocidade de impacto das partículas conforme seus métodos de aplicação.

Tabela 1 - Temperaturas das fontes de calor

Fonte: adaptado de ASM (1994)

Fonte	Temperatura (°C)
Propano + Oxigênio	2526
Gás Natural + Oxigênio	2538
Hidrogênio + Oxigênio	2660
Propileno + Oxigênio	2843
Acetileno + Oxigênio	3087
Arco Plasma	2200 – 28000

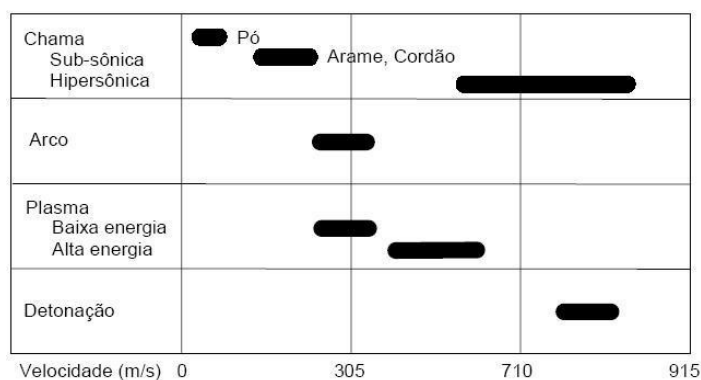


Figura 3 - Velocidade média de impacto das partículas conforme os processos

Fonte: Menezes (2007)

2.1.1 Aspersão Térmica Por Arco Elétrico (ASP)

O processo de AT conhecido como ASP (Arc Spray Process – Processo de aspersão a arco), também é conhecido como processo arco arame. Este processo utiliza um arco elétrico como fonte de calor para fundir dois arames, de material de deposição, que chegam até o bico da pistola, para se encontrar em um ponto em que é formada uma névoa de gás atomizante. Até o ponto de encontro os arames estão isolados um do outro e o arco é obtido por diferença de potencial, na faixa de 18 a 40 volts (PAWLOWSKI, 1995), que funde as pontas dos arames eletrodos. E um jato de gás é dirigido através da

zona do arco, destaca o material fundido e projeta as partículas atomizadas sobre o substrato com velocidades em torno de 240 m/s (THORPE, 1993).

Com a finalidade de reduzir a oxidação para aplicações especiais, gases inertes podem ser usados para substituir o ar comprimido como, por exemplo, argônio e hélio. Como a temperatura do arco varia de 4000 a 6000°C sendo muito maior que o ponto de fusão do material aspergido (THORPE, 1993), algum superaquecimento e volatilização podem ocorrer, particularmente na aplicação de zinco e alumínio. A alta temperatura das partículas pode produzir áreas de reação química ou difusão ou ambas, após o impacto com o substrato. E estas interações são similares a pequenas soldas a ponto de conferir ao revestimento excelente resistência a adesão e coesão.

Na Figura 4 são mostrados os componentes normais de um equipamento a arco elétrico como:

- Fonte de voltagem constante, retificador de corrente DC/suprimento de energia.
- Suprimento de ar comprimido.
- Alimentador de arame consistindo de um motor de alimentação elétrica ou acionado a ar, roda motriz e dispositivo tensionador da roda motriz.
- Pistola de arco elétrico consistindo do corpo da pistola, bocal de ar e capa de ar.
- Mangueiras e cabos.

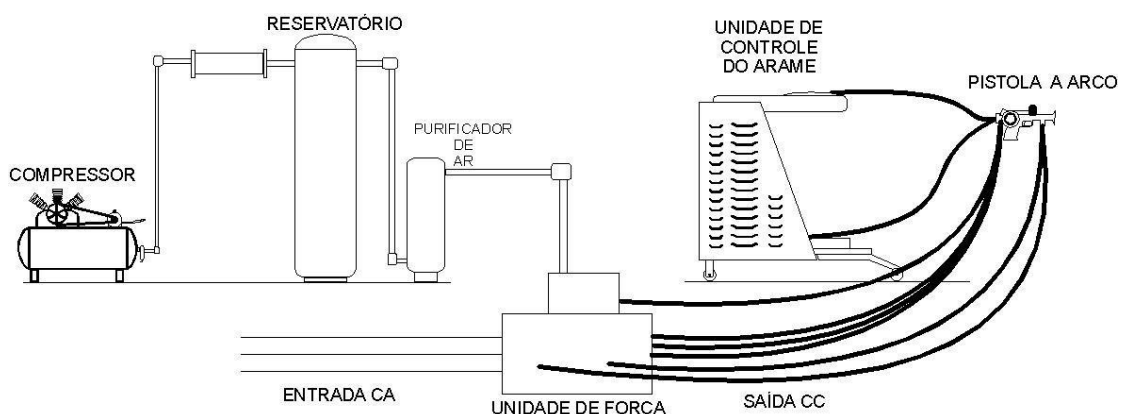


Figura 4 - Esquema de uma instalação para AT de arco elétrico

Fonte: Pawlowski (1995)

Esta técnica difere de outras técnicas de AT nas quais não há fonte externa de calor, tais como chama de gás ou plasma induzido eletricamente. O aquecimento e a fusão ocorrem quando os arames (material de aporte) carregados eletricamente com cargas opostas: um arame é o positivo (ânodo) e o outro o negativo (cátodo). A Figura 5 mostra que estes arames são alimentados conjuntamente e um arco controlado é gerado em sua interseção. Um fator limitante para esta técnica é o fato de os materiais aplicados terem de ser eletricamente condutores (LIMA, C. C., TREVISAN, R., 2002).

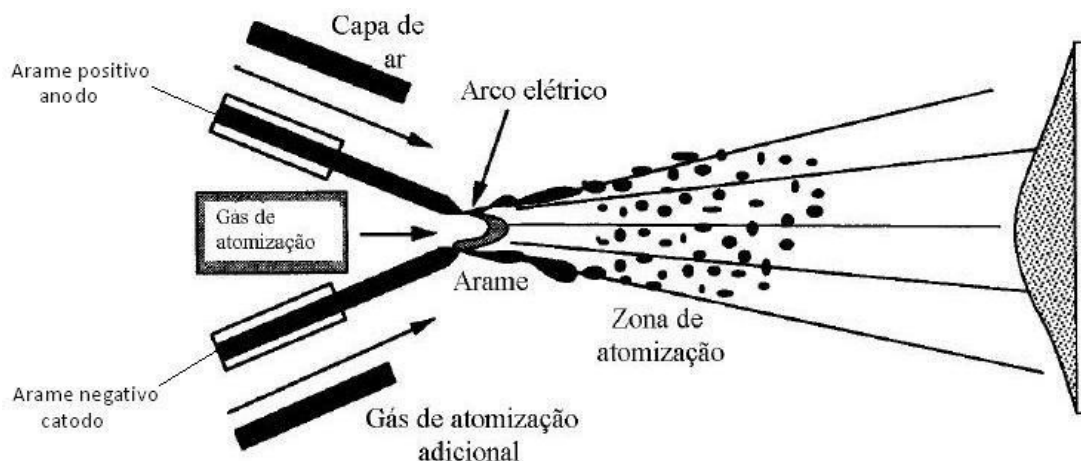


Figura 5 - Esquema do processo de aspersão térmica a arco elétrico

Fonte: modificado de Berndt, Bernecki (2004)

O gás de atomização adicional faz com que as partículas não se aglomerem em seu trajeto até o substrato, formando camadas de revestimento mais homogêneo. Por não haver uma chama, ou seja, ausência de gases de combustão tocando o substrato seu aquecimento é menor quando o revestimento é aplicado pela técnica ASP. O material dos arames pode ser puro ou ligas de arames sólidos e recentemente este processo teve um avanço com o desenvolvimento de arames tubulares com enchimento metálico (BERNDT, C. C., BERNECKI, T., 2004).

Propriedades do revestimento através do processo a arco elétrico (PAWLOWSKI, 2008):

- Distância de aplicação de 50 a 170 mm.
- Alimentação de arame de 50 a 1000 g/min.
- Diâmetro mais comum do arame de 1.6 a 5.0 mm.
- Com uma corrente de 280 A a temperatura do arco pode atingir até 5800°C.

- Potência elétrica de 5 a 10 kW.
- Diferença de potencial entre os arames de 20 a 40 volts.
- Pressão do gás de atomização de 0.2 a 0.7 MPa.
- Fluxo de gás de atomização de 20 a 1300 l/min.
- Velocidade das partículas, dos arames fundidos, pode atingir até 150 m/s.

O processo de AT a arco elétrico tem como características principais (PAWLOWSKI, 2008):

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

As Tabelas 2 , 3 e 4 mostram de forma resumida informações sobre os processos de aspersão térmica., possibilitando assim um comparativo entre os diversos tipos de processo de aspersão térmica.

Tabela 2 - Principais parâmetros de controle dos processos de AT

Fonte: modificado de CORTÉS (1998)

Processos	Parâmetros	Processos	Parâmetros
Chama convencional FS	Pré-aquecimento	HVOF modelo DJ Metco	Pressão de oxigênio
	Distância		Fluxo de oxigênio
	Fluxo de oxigênio		Fluxo de nitrogênio
	Fluxo de acetileno		Pressão de propano
	Pressão de ar		Fluxo de propano
	Fluxo de ar		Distância
Arco Elétrico ASP	Pressão de ar primário	HVOF modelo TAFE	Pressão de oxigênio
	Pressão de ar secundário		Fluxo de oxigênio
	Diferença de potencial entre os arames		Fluxo de querosene
	Corrente		Pressão de querosene
	Limpeza		Fluxo de água de refrigeração
	Pré-aquecimento		Distância

Tabela 3 - Comparação das características de processos de AT**Fonte: modificado de CORTÉS (1998)**

Características						
Processos	Vazão de gases (m ³ /h)	Temperatura média da chama na saída (°C)	Atmosfera em torno das partículas	Velocidade de impacto das partículas (m/s)	Aderência relativa (1 a 10)	Coesão interlamelar
Chama (Pó)	11	2200	CO, CO ₂ , H ₂ O	30	3	Baixa
Chama (Arame)	71	2800	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	180	4	Média
Arco (Arame)	71	5500	N ₂ , O ₂	240	6	Alta
Plasma	4.2	5500	N ₂ , Ar, H ₂ , H ₂ O	240	6	Alta
Detonação	11	3900	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	910	8	Muito Alta
HVOF	28 - 57	3100	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	610 - 1060	8	Muito Alta
Plasma de alta energia	17 - 28	8300	N ₂ , Ar, H ₂ , H ₂ O	240 - 1220	8	Muito Alta
Plasma a vácuo	8.4	8300	Ar, He	240 - 610	9	Muito Alta

Tabela 4 - Comparação das características de processos de AT**Fonte: modificado de CORTÉS (1998)**

Características					
Processos	Teor de óxidos (%)	Custo relativo (1 a 10)	Taxa de deposição (kg/h)	Potência (kW)	Energia para fusão (kW/kg)
Chama (Pó)	6	3	7	25 - 75	11 - 22
Chama (Arame)	4	3	9	50 - 100	11 - 22
Arco (Arame)	0.5 - 3	1	16	4 - 6	0.2 - 0.4
Plasma	0.5 - 1	5	5	30 - 80	13 - 22
Detonação	0.1	10	1	100 - 270	220
HVOF	0.2	5	14	100 - 270	22 - 200
Plasma de alta energia	0.1	4	23	100 - 250	9 - 13
Plasma a vácuo	ppm	10	10	50 - 100	11 - 22

A Tabela 5 e 6 mostram as principais vantagens e desvantagens, respectivamente, para os processos de aspersão térmica.

Tabela 5 - Vantagens relacionadas aos processos de aspersão térmica.
Fonte: modificado de CORTÉS (1998)

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

Tabela 6 - Desvantagens relacionadas aos processos de aspersão térmica
Fonte: modificado de CORTÉS (1998)

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

2.1.2 Preparação Da Superfície

Uma etapa fundamental conjunta ao processo de aspersão térmica é a etapa de preparação da superfície. É ela que garante a qualidade de adesão do revestimento, pelo principal mecanismo, a ancoragem mecânica. O procedimento para preparar o substrato tem a finalidade de deixar a superfície ativa permitindo que as partículas propelidas tenham, no momento do impacto, a máxima potencialização de aderência. Esta ativação da superfície é mediante a quatro etapas:

- Limpeza
- Rugosidade da superfície
- Camada de ligação
- Pré-aquecimento

2.1.2.1 Limpeza

O primeiro passo na preparação do substrato para a AT é manter isenta de qualquer tipo de contaminante como, por exemplo, ferrugem, crosta de óxido de ferro, graxa, óleos e umidade presente na superfície para que não impeça o contato do material aspergido com a superfície.

A superfície dos materiais metálicos quando expostas ao ar atmosférico mesmo em um intervalo de tempo muito pequeno adquire um filme de óxido e sobre esta película agrega-se água, óleos, poeiras recebendo o nome de superfície real este conjunto de camadas. Então após a limpeza não se pode demorar para aplicação do revestimento ou tem que se prever um modo de proteção da superfície impedindo a exposição a contaminantes (PAWLOWSKI, 2008). Para caracterização do tipo de limpeza necessária, padrões e métodos contidos em normas como a ABNT NBR 6405, a ISO 8501-1 e a norma sueca SIS 055900/67 auxiliam nesta obtenção, prevendo a inspeção da superfície através de padrões comparáveis visualmente como mostra a Figura 6.

Graus de Corrosão	Graus de Limpeza			
	Sa1	Sa2	Sa2 1/2	Sa3
A				
B				
C				
D				

Figura 6 - Grau de limpeza utilizando diversas classes de sal [
Fonte: Pictorial surface preparation standards for painting steel surfaces (1967)

A limpeza pode ser realizada de forma mecânica ou química. O processo de limpeza mecânica consiste na premissa de abrasão em que camadas da superfície serão removidas através da interação com um material de maior dureza e este processo pode ser realizado lixamento, escovação ou jato abrasivo. O jato abrasivo é um processo no qual partículas de um material duro são lançadas contra a superfície (através de ar comprimido) e muitas vezes é utilizado para obter a limpeza e também a rugosidade necessária.

Para a seleção do material abrasivo deve se evitar aqueles esféricos ou com cantos arredondados, eles devem ter cantos vivos que irá favorecer a formação de irregularidades na superfície que posteriormente serão pontos de ancoragem do revestimento. Os abrasivos devem estar limpos e secos e sem contaminantes, podendo ser reutilizados desde que no mínimo 80% do volume de material mantenha granulometria original (MENEZES, 2007). A Tabela 7 resume algumas características dos abrasivos para jateamento. Vale ressaltar que no Brasil é proibido a utilização de areia como material abrasivo, pois causa sérios danos a trabalhadores expostos a poeira resultante do processo.

Tabela 7 - Características de abrasivos usados para jateamento
Fonte: adaptado de Menezes (2007)

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

O ângulo de jato abrasivo deve estar compreendido entre os ângulos de 75° a 90°. A distância do bocal a superfície pode variar de 10 a 30 cm de acordo com o tamanho e o tipo de abrasivo usado, a abertura do bocal e a capacidade do equipamento. Com relação ao tempo, deve-se ficar atento, pois jateamento excessivo pode resultar em textura de superfície inadequada, sendo o controle realizado por inspeção visual. (MENEZES, 2007).

Um engano pode ser cometido quando se pensa que apenas o jateamento abrasivo é suficiente para a limpeza de uma superfície. Compostos orgânicos (como óleos e graxas) quando estão presentes na superfície podem não ser removidos com o jato de abrasivos. Além disto, podem fazer com que o abrasivo se acumule na superfície, aumentando assim ainda mais a contaminação. Dito isto, se faz necessário que antes do jateamento abrasivo, a superfície passe por um processo de limpeza química.

A limpeza química é dividida em 3 categorias: a detergência, o desengraxe e a decapagem ácida. (LIMA, 2002)

- A detergência (ou limpeza alcalina) é um dos meios mais eficientes para a remoção de graxas, óleos pó e partículas de metais.

- A limpeza desengraxante remove impurezas através de vapor quente e é um bom agente quanto a óleos e graxas com grau de contaminação leve.
- A decapagem é um modo eficaz de remoção de camadas de óxidos, hidróxidos e sulfetos.

Outra forma de limpeza também pode ser empregada como a limpeza ultrasônica, destinada a expelir contaminantes impregnados em locais confinados.

2.1.2.2 Rugosidade da superfície

O próximo processo realizado após a limpeza do substrato é prepará-la para apresentar uma rugosidade apropriada para proporcionar uma adesão que garanta a qualidade do revestimento. A introdução da rugosidade correta fará com que esta não interfira na rugosidade final do revestimento aspergido.

Uma superfície rugosa tem mais área superficial de que uma superfície polida então as partículas terão mais área de contato (zona ativa) para se aderirem ao substrato, pois terá mais pontos de ancoramento mecânico. Isto eliminará os planos preferenciais de cisalhamento que existem nas camadas depositadas em virtude da sua estrutura típica lamelar. Desenvolvem-se nestas camadas grandes tensões paralelas à base que são responsáveis pela sua baixa resistência à tração. Verifica-se este fato realizando-se testes de aderência. (GIMENES, 1998)

A rugosidade superficial mais adequada para a maioria dos revestimentos é aquela que apresenta Ra numa faixa de 2.5 a 13 μm . Entretanto se a espessura do revestimento é pequena, a faixa de rugosidade necessária estará na faixa de 1.3 μm . A força de adesão, normalmente, aumenta com a rugosidade da superfície, contudo para Ra superior a 10 μm , esta melhora decresce. A melhor adesão está associada com a rugosidade comparada a $\frac{3}{4}$ do diâmetro das partículas do revestimento (LIMA E TREVISAN, 2002).

A obtenção desta rugosidade ocorre através de jateamento abrasivo ou usinagem. O jateamento abrasivo é a técnica mais utilizada para se obter a rugosidade adequada. Como já mencionado anteriormente, a correta escolha do abrasivo é de fundamental

importância, pois se evitando abrasivos esféricos não se tem uma superfície com textura martelada, o que não é vantajoso para o processo de aspersão térmica. Abrasivos duros e pontiagudos podem penetrar e ficar incrustados em um substrato mole. A Tabela 8 mostra condições usuais de jateamento abrasivo.

Tabela 8 - Condições usuais de jateamento para obtenção de rugosidade adequada
Fonte: adaptado de Lima (2002)

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

O jateamento abrasivo pode ser conseguido através de dois tipos de equipamentos: um que usa pressão e outro a sucção. A rugosidade obtida por uma máquina que usa a pressão é conseguida com 2.5 vezes menos pressão que a máquina que utiliza sucção. (PAWLOWSKI, 1995)

2.1.2.3 Camada de ligação

Há necessidade de aplicar camadas de ligação em substratos que possuem a sua superfície com elevada dureza para terem suas características superficiais alteradas, ou são elevadamente dúcteis, pois qualquer mudança superficial implicaria em sua deformação. Segundo (LIMA E TREVISAN, 2002), os materiais de ligação são aqueles que têm afinidade para formar com o material do substrato uma forte ligação interatômica, física ou de difusão. Geralmente são finas e responsáveis por produzir uma superfície rugosa para a adesão do revestimento.

Camadas de ligação são aplicadas, normalmente, em aços endurecidos por tratamento de tempera e superligas. Tem seu uso requerido também onde o jateamento abrasivo ou a usinagem não podem ser utilizados. Apesar da camada de ligação simplificar o processo de aspensão térmica, eliminando a necessidade de preparação da superfície através de jato abrasivo ou usinagem, fortes indicações apontam favoravelmente para uma preparação combinada, a fim de se obter a máxima adesão necessária. A preparação combinada consiste em uma usinagem grosseira do substrato seguido de jateamento abrasivo, após a aplicação de camada de ligação.

2.1.2.4 Pré aquecimento do substrato

O pré-aquecimento é importante e deve estar no escopo de trabalho da preparação do substrato para a AT, tendo como objetivo proporcionar a queima e volatilização de graxas, óleos e da umidade que ficam retidos na superfície do metal. Entretanto, expor o substrato a altas temperaturas por tempos prolongados podem resultar na produção de espessas camadas de óxidos. O aquecimento pode ser realizado pela chama redutora da própria pistola de AT, por um equipamento independente ou se o tamanho da peça permitir, também pode ser feito via indução. As temperaturas recomendadas para o substrato estão na faixa de 90 a 150°C. (THORPE, 1993)

O pré-aquecimento favorece a redução das tensões internas, influenciando na aderência do revestimento. Com a superfície aquecida, gera-se uma dilatação, que após ser realizado a aspensão e cessado o pré-aquecimento, a contração do substrato reforçará mais ainda o ancoramento mecânico (CORTÉS, 1998). A Figura 7 mostra imagens obtidas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de panquecas de alumínio depositadas, em um só passe, com e sem pré-aquecimento.

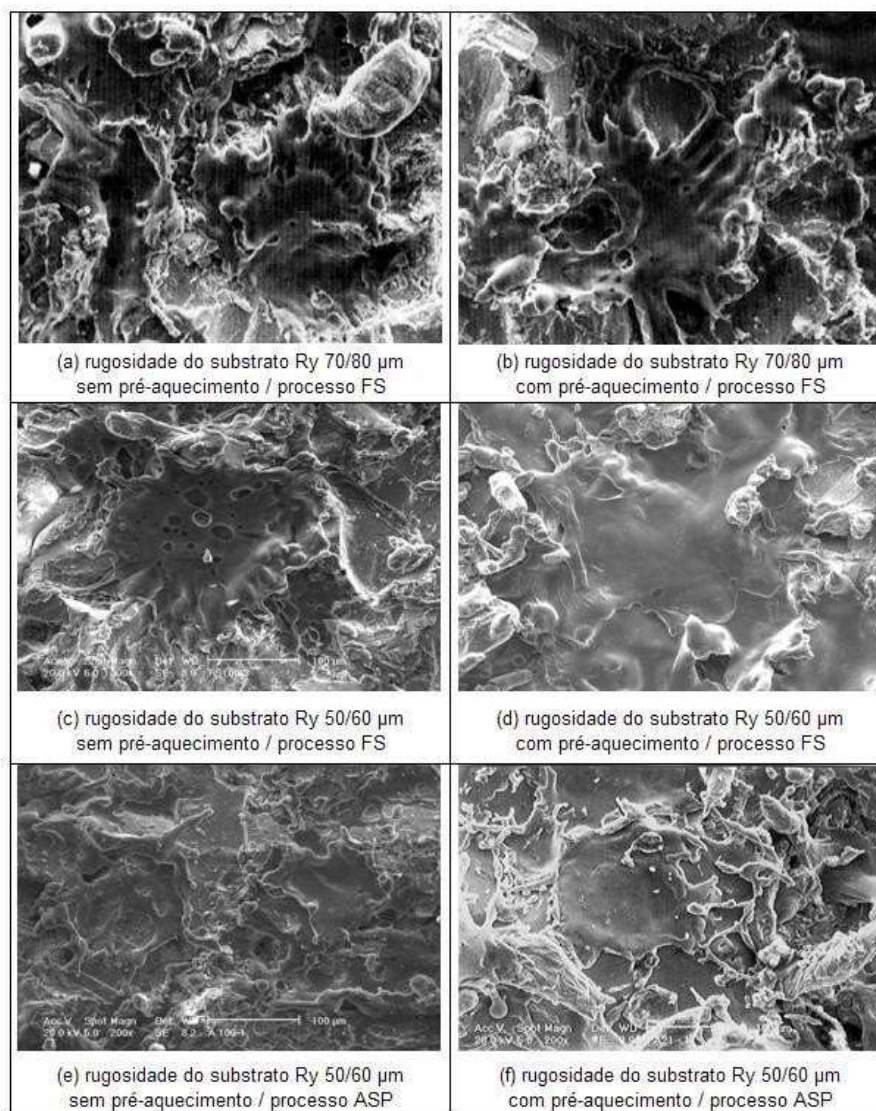


Figura 7 - Morfologia de panquecas de alumínio depositadas
Fonte: Paredes (2003)

Pode-se afirmar que a menor rugosidade e o pré-aquecimento do substrato melhoram significativamente o efeito molhamento, permitindo a atuação mais contundente do mecanismo de ancoramento mecânico da partícula no substrato, verificando-se (PAREDES, 2003):

- a) partícula depositada sem forma de panqueca e com muitos salpicos.
- b) mostra a panqueca mais homogênea, com poros e menos salpicos.
- c) apresenta pequenos poros no centro da panqueca e salpicos ao seu redor.
- d) panqueca totalmente homogênea, sem poros e sem salpicos.
- e) partícula depositada sem aspecto de panqueca, com pequenas áreas cobertas com alumínio e muitos salpicos.

- f) panqueca mais homogênea, sem poros, menos salpicos e houve uma maior acomodação da panqueca a textura do substrato.

A partícula sem pré-aquecimento não produz o efeito molhamento homogêneo e ainda apresenta muitos salpicos, o que reduz a aderência. No substrato com o pré-aquecimento, o fenômeno molhamento foi favorecido, formando uma panqueca homogênea, porém com alguns salpicos (não prejudicando a aderência neste caso).

2.1.3 Principais Características E Propriedades Dos Revestimentos Depositados Por Aspersão Térmica (AT)

O processo de AT e o procedimento de aplicação conferem ao revestimento propriedades e ciclo de vida que diferem entre si. Esta variação dificulta a comparação de resultados e características, pois uma série de variáveis estão envolvidas como, por exemplo, o material do revestimento, a distribuição dos tamanhos de partículas a serem aspergidas, a velocidade de solidificação, a velocidade do fluxo e a pressão e tipo de gás. Além disso, as características do substrato influenciam na qualidade do revestimento como material, temperatura, rugosidade e limpeza (THORPE, 1993).

2.1.3.1 Macroestrutura

A macroestrutura, também conhecida como lenticular ou lamelar dos revestimentos aspergidos, recebem este nome porque quando o material do revestimento é propelido formando depósitos de sucessivas camadas de gotículas líquidas que, devido a energia cinética que lhe são conferidas no momento do impacto, se achatam e se solidificam a uma velocidade extremamente alta e se ancoram mecanicamente no substrato. Uma estrutura típica de revestimentos aspergidos é constituída de lamelas do material depositado, permeando sobre esta inclusões de óxidos, micro trincas, partículas sólidas e porosidade, sendo estes considerados como imperfeições ou defeitos contidos em uma camada de revestimento (PAWLOWSKI, 1995). A Figura 8 exemplifica uma estrutura de revestimento típica.

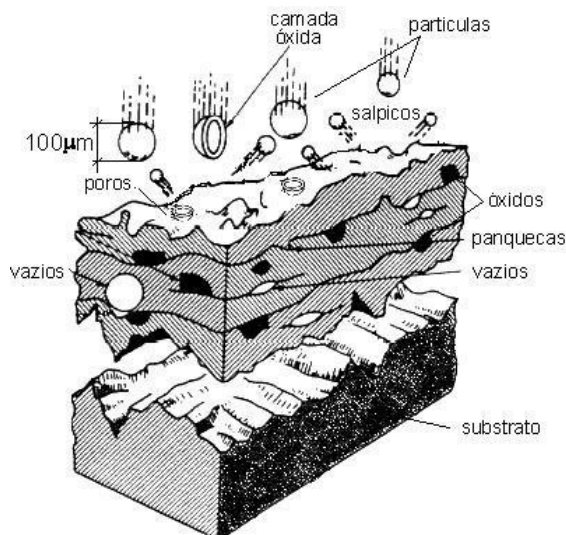


Figura 8 - Camada típica depositada pelo processo de aspersão térmica
Fonte: Pawlowski (1995)

No impacto com o substrato ou com o próprio revestimento, as partículas aspergidas podem estar totais ou parcialmente líquidas. Isto porque na prática, um mesmo jato resulta em uma ampla faixa de distribuição de velocidades e temperaturas, conforme mostra a Figura 9. No impacto, as partículas sólidas irão rebater ou serão aprisionadas, formando ligações fracas com o resto do revestimento. Este é um dos motivos do porque os parâmetros de aspersão, para a maioria dos métodos de deposição, devem ser otimizados de tal forma que a grande maioria das partículas seja fundida no jato (PAWLOWSKI, 1995).

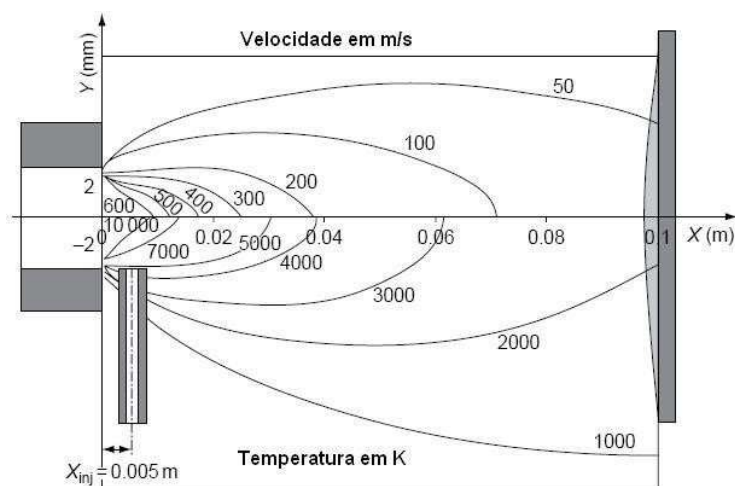


Figura 9 - Perfis de velocidade e temperatura (K) de acordo com a distância da tocha até o substrato
Fonte: Pawlowski (2008)

2.1.3.2 Porosidade

A porosidade consiste em cavidades isoladas e de poros interconectados. É importante ressaltar que, através da AT, obtêm-se revestimentos com porosidade variável, normalmente considerada inerente a estes processos. Ela afeta diretamente propriedades físicas como condutividade elétrica e térmica, diminui a coesão das camadas e sua aderência ao substrato (THORPE, 1993).

A quantidade de poros nos revestimentos aspergidos termicamente depende do material e das condições de aspersão de cada processo como, por exemplo, a temperatura da chama ou do arco elétrico, gás de transporte, a velocidade das partículas, a distância da pistola e substrato e a qualidade do substrato a ser aspergido. Resultados experimentais apontam para dois tipos de porosidade associados aos revestimentos (CORTÉS, 1998):

- i. Poros grosseiros, muitas estão presentes devido ao incompleto preenchimento dos interstícios entre as partículas previamente depositadas, tendo mais frequência de aparecimento proveniente de uma falta de fusão das partículas no momento do impacto, ou falta de energia cinética para conseguir se deformar. Conforme mostra a Figura 10, um ângulo alfa (α) pequeno gera uma maior dificuldade para o total preenchimento do espaço quando outra partícula colidir com o anteparo, o que não ocorre quando o ângulo alfa é superior a 90° , pois o caminho para ocupar todos os espaços torna se mais facilitado.
- ii. Poros extremamente finos encontrados nos revestimentos aspergidos têm sido interpretados como um contato incompleto entre as lamelas durante a formação da camada de revestimento.



Figura 10 - Esquema de partículas aspergidas fazendo analogia com a tensão superficial de fluidos. Fonte: Cortés (1998).

A porosidade que expõem o substrato é conhecida como permeabilidade. É extremamente prejudicial às propriedades do revestimento, bem como também em manter a integridade do substrato, pois se o revestimento é uma barreira contra a corrosão e a permeabilidade possibilita o contato com o meio corrosivo com o substrato, todo trabalho protetivo através do revestimento será perdido. Em geral, é considerado que camadas com mais de 300 μm de espessura evitam o contato do meio corrosivo com o substrato.

2.1.3.3 Micro trincas

Micro trincas somente são aceitáveis somente em revestimentos cerâmicos e se localizam perpendicularmente as lamelas depositadas, fazendo com que o material aumente sua capacidade de deformação e a resistência a fadiga. São formadas devido a tensões produzidas pela restrição a contração térmica de lamelas vizinhas durante a solidificação. É incomum ocorrer em materiais metálicos, pois estes apresentam a característica de escoar plasticamente acomodando as deformações térmicas. Para alguns autores a presença de um certo grau de porosidade e micro trincas são benéficos, pois inibem o crescimento e propagação de trincas maiores nos revestimentos (LIMA E TREVISAN, 2002).

2.1.3.3 Aderência

A aderência é um requisito fundamental para um bom revestimento, pois de nada adiantaria ter um revestimento de boa qualidade, com espessura de camada adequada, livre de porosidade e não se possuir aderência no substrato. Então atribui-se aderência entre a camada e o substrato e fornece coesão das partículas depositadas que dependem da resistência mecânica de um revestimento. As lamelas do revestimento ancoram-se mecanicamente à rugosidade da superfície do substrato devido a solidificação das partículas, impondo uma força de contração (GIMENES, 2004), conforme pode-se ver na Figura 11.

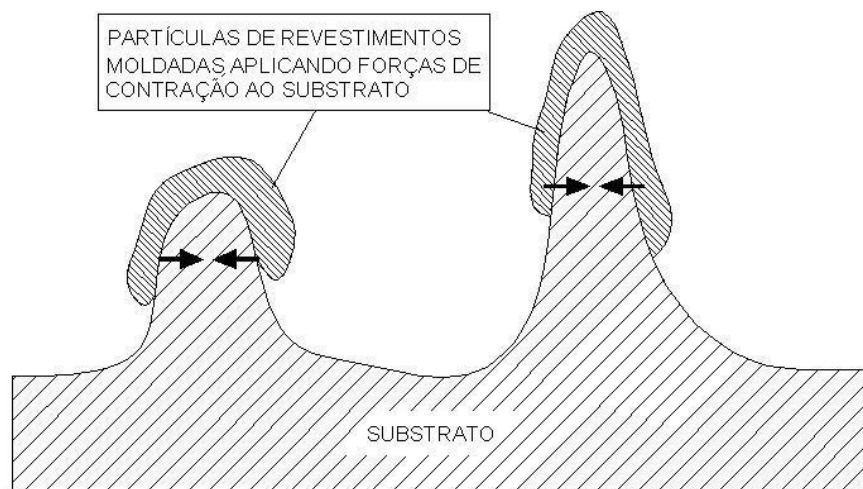


Figura 11 - Esquema de ancoragem mecânica das panquecas na superfície rugosa do substrato
Fonte: Gimenes (2004)

A análise da aderência do revestimento normalmente considera três mecanismos fundamentais, de acordo com a natureza das forças atuantes: ancoramento mecânico, químico-metalúrgico e físico. A aderência é uma combinação destes mecanismos, que podem atuar juntos ou isoladamente. No momento do impacto das partículas, elas são aquecidas e aceleradas contra o substrato fazendo com que se achatem numa forma lenticular, resfriando-se rapidamente e ancorando-se mecanicamente nas irregularidades da superfície.

A existência de aderência químico-metalúrgica pode ocorrer devido a microssoldagem podendo haver fusão localizada e difusão atômica com formação de soluções sólidas, mas tudo isto irá depender do material se metálico ou cerâmico e do calor transferido pela partícula ao substrato. A microssoldagem, também conhecida como zonas ativas, é a região de contato entre as lamelas e podem ser, normalmente, de 20 a 30% da área total da lamela (LIMA E TREVISAN, 2002).

2.1.3.4 Microestrutura

Assim como em outros materiais de engenharia, muitas das propriedades dos revestimentos dependem de sua microestrutura. Então para o entendimento das propriedades dos revestimentos é necessário interpretar como sua microestrutura é

formada (CORTÉS, 1998). A microestrutura dos revestimentos aspergidos e suas propriedades dependem muito dos fenômenos que ocorrem com as partículas durante seu trajeto até o substrato.

2.1.3.5 Formação de óxidos

A formação de óxidos nos processos de AT está relacionado com a atmosfera pela qual as partículas transferidas são depositadas, e também se estas partículas estão fundidas ou superaquecidas. Então, como as partículas estão com altas temperaturas, o contato do ar ambiente faz com que as partículas fiquem cobertas por filmes de óxidos.

Inclusões de óxidos em revestimento metálicos são diferenciadas por apresentar fases escuras e alongadas que podem ser observadas na seção transversal do revestimento, paralelas ao substrato. Estas inclusões podem aumentar a dureza do revestimento o tornando quebradiço. A porcentagem do teor de óxido vai influenciar na qualidade do revestimento, podendo diminuir a sua força coesiva do revestimento no substrato e interlamelar. Para minimizar as inclusões de óxidos nos revestimentos foi-se elencado alguns parâmetros (BERNDT e BERNECKI, 2004)

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

2.1.4 Acabamento Das Camadas Depositadas

A necessidade de acabamento superficial depois da aspersão do revestimento irá depender muito da sua finalidade, ou seja, se o uso do revestimento foi para recuperar ou beneficiar o componente mecânico, para que ele volte a desempenhar sua função. Um trabalho posterior de usinagem ou retificação será indispensável, pois a superfície aspergida deixa uma rugosidade muito grosseira. Entretanto, se aplicação do revestimento foi para proteger contra corrosão, não há exigência de acabamento superficial, somente uma selagem (THORPE, 1993)

As camadas depositadas por AT podem ser acabadas de muitas maneiras., como por exemplo, lixamento, polimento, retificação feita em máquina de alta precisão ou a selagem. Os fatores que vão orientar a escolha do método de acabamento são:

- Tipo de material a ser acabado.
- Forma da peça.
- Grau de acabamento (rugosidade) e tolerância dimensionais.
- Tipo de equipamento disponível.
- Meio onde será exposta a camada depositada.
- Custo inerente aos processos.

Em geral, nas camadas depositadas por AT, o acabamento é tanto melhor quanto mais uniforme for o depósito e quanto menor for o tamanho das partículas componentes da camada. Embora algumas técnicas de acabamento já estejam consolidadas, alguns cuidados devem ser tomados para garantir a integridade do revestimento, pois pode se causar arrancamento de partículas deixando porosidade superficial e trincamento devido a tensões térmicas.

2.1.4.1 Usinagem

Como a estrutura da camada de revestimento obtida por AT é lamelar, a remoção de material ocorre de forma particulada e granular. Esta estrutura lamelar e porosa, com

partículas bem definidas e inclusões de óxidos, gera camadas de condutibilidade térmica mais baixa do que a dos materiais sob outras formas. Isto dificulta que o calor gerado pelo trabalho de usinagem seja dissipado. Os materiais temperáveis, resistentes à abrasão e além de camadas de óxidos deixam o revestimento bem mais difícil de se usinar (GIMENES, 2004).

2.1.4.1.1 Torneamento

A utilização de máquinas com alta rigidez, ferramentas de materiais mais duros e técnicas especiais permitem o torneamento de revestimentos aspergidos. As ferramentas mais utilizadas para usinagem de revestimentos são os carbonetos e a Figura 12 traz os ângulos recomendados para uma ferramenta de carboneto típico e uma de aço rápido.

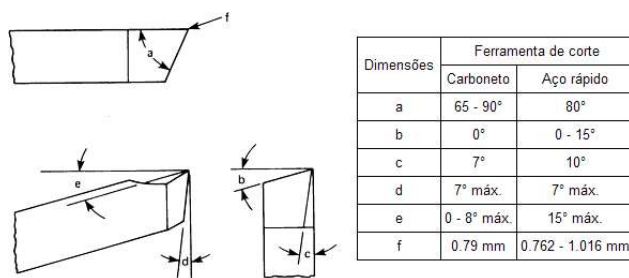


Figura 12 - Ângulo para ferramentas de torneamento
Fonte: ASM (1994).

2.1.4.2 Selagem

Os revestimentos aspergidos podem apresentar porosidade abaixo de 1%, mas seus valores mais comuns de porosidade estão entre 1 e 15% (BERNDT e BERNECKI, 2004). Como em alguns casos é possível reduzir os níveis de porosidade, mas não o eliminar, utiliza-se a selagem, que é um dos tratamentos realizados após a AT com a intenção de realizar uma vedação dos poros reduzindo a área exposta, minimizando a corrosão. Os selantes são classificados de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 - Lista de materiais selantes
Fonte: Cortés (1998)

Não secáveis	Secáveis ao ar	Catalíticos
Ceras	Tintas, borracha colorada	Resina epóxi
Óleos	Fenólicos secáveis ao ar	Poliésteres
Graxas	Fenólicos epóxi	Poliuretanos
Recozidos (baking)	Vinís	Outros
Fenólicos recozidos	Poliésteres	Silicatos de sódio
Fenólicos epóxi	Resinas silicone	Etil silicatos
Resinas epóxi afinadas	Óleo de linhaça	Metacrilatos anaeróbicos
Poliésteres	Piches (coal tars)	
Poliamidas	Poliuretanos	

A utilização da selagem pode ser justificada pelos seguintes motivos:

- Aumentar a vida útil de revestimentos de alumínio e zinco resistentes à corrosão.
- Vedação dos poros em componentes hidráulicos sujeitos a variações intermitentes de pressão.
- Melhorar a usinabilidade das camadas
- Manter as constantes dielétricas de camadas de cerâmica.

Em geral, a função dos selantes é a de prolongar o valor protetivo do revestimento metálico aspergido, protegendo-a contra incrustações de sujeira ou penetração de umidade ou agente corrosivo nos poros, assim como também na rugosidade superficial da camada.

2.2 TORNEAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS (TME)

Grande parte das peças utilizadas em elementos mecânicos necessita de tratamento térmico ou aspersão térmica para melhorar suas propriedades mecânicas. Algumas dessas peças também precisam ser usinadas após o tratamento/aspersão para

garantir características como bom acabamento superficial, baixa rugosidade, precisão dimensional e precisão geométrica (ROSA, 2017).

Embora a usinabilidade dependa das condições de usinagem (operação de corte, parâmetros de corte, características da ferramenta, condições de refrigeração, rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça-dispositivo de fixação), ela é comumente conhecida como uma propriedade exclusiva do material. Assim, cinco propriedades básicas do material influenciam a usinabilidade: dureza/resistência mecânica, ductilidade, condutividade térmica, abrasividade e encruamento (DINIZ et al., 2010). No caso dos materiais endurecidos, como o material de estudo desse presente trabalho, existe a tendência ao aumento das componentes da força de usinagem devido ao aumento da resistência mecânica do material (TÖNSHOFF et al., 2000; GUNN, 1997).

O torneamento de materiais endurecidos TME (também denominado “torneamento duro”) envolve a usinagem de materiais com dureza superior a 45 HRC, onde as pressões específicas de corte são altas (podendo gerar ou não altas forças de corte dependendo dos parâmetros de corte utilizados) e é necessária a aplicação de uma ferramenta com alta dureza e resistência a altas temperaturas. Em fabricação por usinagem, qualquer aumento na produtividade e diminuição dos custos envolvidos no processo é bem-vindo. Desse modo, com o torneamento duro, elimina-se o risco de geração de distorções durante a etapa de tratamento térmico e retrabalho, e o controle da integridade da peça usinada torna-se mais fácil em comparação à retificação (ROSA, 2017).

O TME apresenta diversas vantagens em comparação com a metodologia tradicional baseada em operações de acabamento após tratamento térmico de peças, como o processo de retificação (DAVIM, 2008). Como vantagens do torneamento duro sobre a retificação pode-se citar principalmente a alta flexibilidade e a redução de tempo no ciclo de trabalho. Outra vantagem que pode ser destacada no torneamento duro refere-se à flexibilidade do processo que possibilita a alteração na forma geométrica da peça sem que seja necessário modificar a geometria do rebolo. Com relação a peças com geometrias complexas, o próprio comando numérico (CNC) da máquina ferramenta, de forma simples, pode gerar trajetórias da ferramenta em superfícies tangentes, raios côncavos e

convexos, tornando-se economicamente viável até mesmo na fabricação de um só componente (DAVIM, 2008).

No caso, a retificação necessita de um montante muito grande de energia por unidade de volume de material removido. A maior parte dessa energia é convertida em calor, que por sua vez, fica concentrado nas camadas superficiais do material. Isso tem como resultado um rápido aumento de temperatura na camada subsuperficial da peça, o que depende dos parâmetros utilizados (tipo de fluido refrigerante, método de refrigeração, tipo de rebolo, velocidade de corte e profundidade de corte) (DINIZ et al., 2010). Klocke et al., (2005), discutiram os resultados de pesquisas e de aplicações industriais do TME em comparação à retificação (ROSA, 2017). Os resultados estão sintetizados na Figura 13.

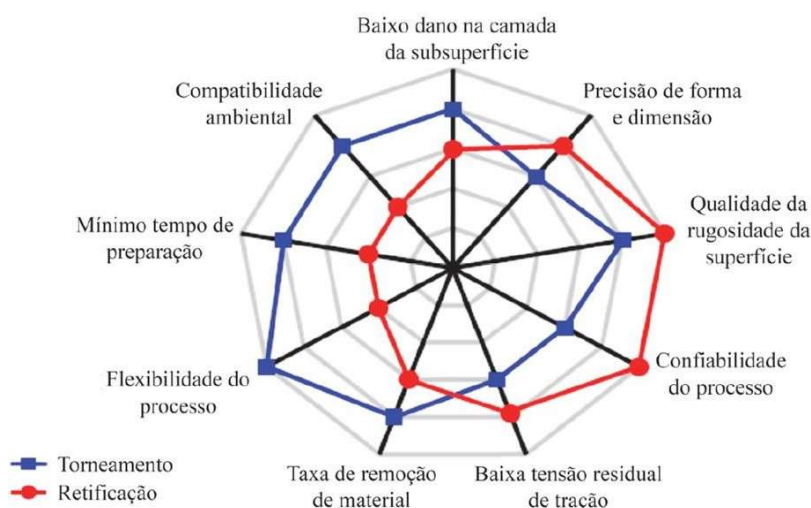


Figura 13 - Comparação das características dos processos de torneamento duro e retificação.
Fonte: Klocke (2005)

Boing, (2016), cita que nos requisitos de confiabilidade do processo, qualidade da superfície, precisão de forma/dimensões e geração de tensões residuais de tração, o processo de retificação foi avaliado como de melhor desempenho. Desse modo, torna-se claro que as questões relativas à integridade da superfície são as principais restrições do torneamento duro e, conseqüentemente, os principais pontos motivadores para aprimoramento da técnica (ROSA, 2017).

Outro ponto crítico no torneamento duro é a rigidez da máquina-ferramenta, pois está intimamente relacionada ao nível de tolerância padrão ISO IT. Assim, para o TME de alta precisão, a máquina-ferramenta deve possuir bases de cimento polimérico e eixo-

árvore com transmissão direta de movimento e mancais hidrostáticos. Além disso, o sistema deve minimizar todas as saliências, extensões de ferramentas e peças, bem como eliminar os calços e espaçadores (ASTAKHOV, 2011).

Nakayama et al., (1988) e Astakhov, (2011), mencionam a importância da discussão dos fenômenos físicos e mecânicos envolvidos no torneamento duro, tanto para a compreensão científica dos fenômenos como para a aplicação industrial. Os autores comentam que o TME é muito diferente do convencional, na qual muitos dos conhecimentos teóricos clássicos não podem ser aplicados. Basicamente, essa diferença está relacionada aos mecanismos de formação de cavacos e ao comportamento das componentes da força de usinagem. Em materiais com dureza elevada (próxima a 60 HRC), há o predomínio da nucleação e propagação da trinca (fratura), seguido de elevada deformação plástica nos segmentos entre lamelas. Já na região de transição entre cavacos contínuos e segmentados (dentes de serra), não se pode descartar a presença de outro mecanismo, como o cisalhamento adiabático. Além disso, materiais com diferentes microestruturas (como o AISI 420 C endurecido) podem ter diferentes regiões de transição em função da fragilidade gerada pela presença de carbonetos (ex. Cr_3C_2) e demais propriedades específicas de cada classe de material (ROSA, 2017).

No TME, a pressão específica de corte gerada durante a remoção de material é mais elevada que a da usinagem convencional. Nakayama et al., 1988 cita que os materiais de alta dureza desgastam a ferramenta de forma mais rápida e as forças de usinagem são maiores, principalmente a força de avanço (ROSA, 2017).

A característica mais frequentemente investigada nos processos de usinagem dura, principalmente devido à disputa contínua entre torneamento duro e retificação, é a rugosidade da superfície usinada (DAVIM, 2008). Segundo Astakhov, 2011, além dos fatores que tradicionalmente afetam a rugosidade (ou seja, o avanço f e o raio de ponta r_ϵ), deve ser dada especial atenção à deterioração da ponta da ferramenta na usinagem dura, devido ao fato de que são observadas taxas de desgaste aceleradas, especialmente quando a classe da ferramenta não é corretamente selecionada, prejudicando assim o acabamento da peça (ROSA, 2017).

Vale ressaltar que no torneamento de materiais endurecidos, o tipo de cavaco geralmente formado é denominado segmentado, cisalhado, ou dente de serra devido à forma de sua seção transversal que apresenta um perfil serrilhado (FERRARESI, 2011).

2.2.1 Ferramentas De Corte

Diniz et al. (2010), mencionam que a escolha da ferramenta de corte mais apropriada para a usinagem de um material (no caso, o torneamento duro do SAE 2010 aspergido termicamente via arco elétrico) em uma máquina-ferramenta em condições adequadas de operação depende basicamente do material e da geometria da mesma, das condições de corte e do custo.

O processo de usinagem consiste na remoção de material, utilizando como ferramenta um material de maior dureza e mecanicamente mais resistente que a peça. As principais propriedades desejáveis em um material para ferramenta de corte podem ser listadas abaixo (MACHADO et al., 2015):

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

Geralmente, uma maior dureza a quente da ferramenta leva a uma maior resistência ao desgaste, porém diminui a tenacidade (resistência ao choque). Assim, dependendo das condições de corte e das propriedades da peça usinada, diferentes combinações de dureza e resistência ao choque são requeridas.

Como, em geral, dureza e tenacidade são duas propriedades antagônicas (alta dureza se associa a baixa tenacidade e vice-versa), o balanço destas propriedades nos materiais de ferramentas de corte se tornou um desafio para o fabricante. A Figura 14 mostra o comportamento de cada material em relação a estas propriedades. A conciliação

destas propriedades foi conseguida com a produção de ferramentas com diferentes composições químicas, refinamento de grãos, controle dos processos de fabricação e do tratamento térmico, o que lhes confere graus compatíveis de pureza e qualidade (ROSA, 2017).

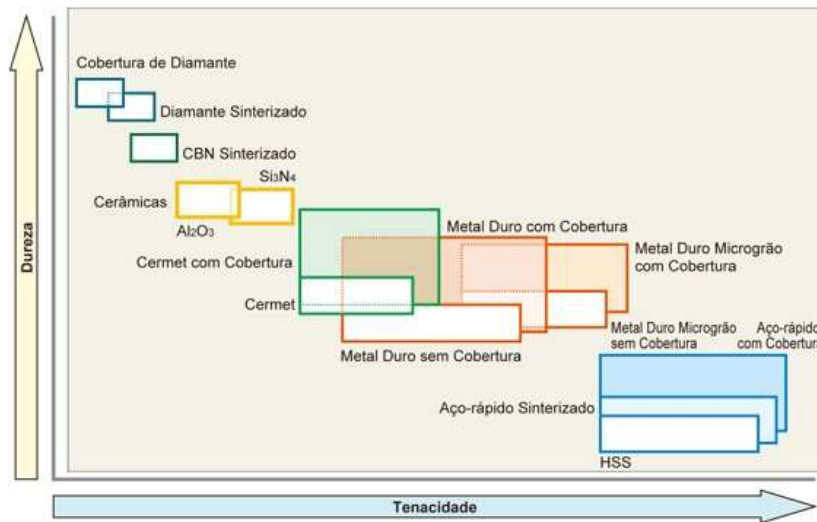


Figura 14 - Relação entre tenacidade e dureza dos materiais aplicados como ferramentas de corte
Fonte: Mitsubishi (2018).

No torneamento duro, a pressão específica de corte gerada costuma ser alta. Assim, por convenção, é necessário que o material da ferramenta de corte tenha alta dureza a quente e alta resistência ao desgaste (BARTARYA e CHOUDHURY, 2012). Assim, as ferramentas de corte tipicamente utilizadas são de PCBN e cerâmica, as quais possuem propriedades adequadas para suportar as condições do processo, impostas tanto pela dureza e resistência mecânica. Neste segmento, o desenvolvimento de novas classes e, principalmente, o refino de grão das ferramentas de metal-duro, associado a novas tecnologias de revestimentos, conferem a estas ferramentas propriedades compatíveis com a aplicação, e ainda apresentam um menor valor agregado (BOING, 2016; e SAHOO, 2013). Porém, as ferramentas de corte de metal-duro se comparadas com os materiais comumente utilizados (PCBN e cerâmica), apresentam menor dureza a quente (Figura 15) e maior resistência ao choque (DINIZ et al., 2013; KLOCKE, 2011).

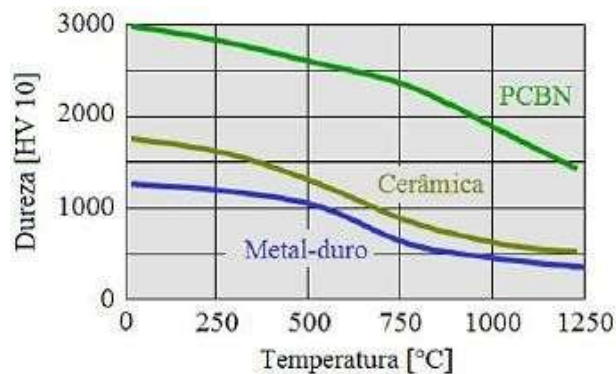


Figura 15 - Dureza a quente dos principais materiais de ferramentas aplicados no torneamento duro
 Fonte: adaptado de Klocke (2011).

Boing, (2016), cita que diversas pesquisas evidenciam a aplicação de ferramentas de PCBN e cerâmica no torneamento duro em diferentes tipos de materiais aplicados na indústria, tais como aços de construção mecânica (AISI 4340), aços para rolamentos (AISI 52100), aços-ferramentas (AISI D2) e ferros fundidos brancos (ROSA, 2017). Em tais materiais, o torneamento duro de alta precisão, realizado em condições específicas, é capaz de atingir valores de rugosidade total (R_t) em torno de $1 \mu\text{m}$ e tolerância padrão ISO, conforme a Figura 16.

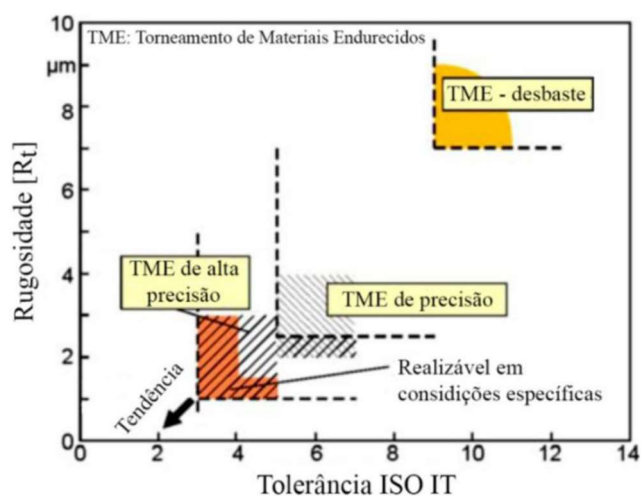


Figura 16 - Rugosidade versus tolerância ISO IT para o torneamento de materiais endurecidos
 Fonte: Byrne (2003).

A capacidade de obtenção de alta precisão no processo de torneamento duro baseia-se na aplicação de ferramentas de PCBN e cerâmica. Apesar dessas ferramentas possuírem ótimo desempenho na operação específica, o processo de fabricação das mesmas ainda é dispendioso, limitando sua gama de aplicações (BOING, 2016).

2.2.1.1 Ferramentas de corte de material cerâmico

O material cerâmico é citado na literatura como ferramenta de corte em usinagem desde a década de 1950, quando as primeiras ferramentas foram aplicadas. No entanto, a cerâmica passou a ser um material bastante utilizado somente na década de 1980, depois dos desenvolvimentos conseguidos no campo das propriedades da cerâmica (DINIZ et al., 2013).

As ferramentas de cerâmica possibilitam velocidades de corte elevadas, a ponto de serem empregadas somente quando as máquinas-ferramentas oferecem condições de alta rigidez, alta rotação e elevada potência. A característica fundamental do material cerâmico é a sua resistência ao amolecimento pelo calor gerado em altas temperaturas, além da sua elevada dureza, alta resistência à formação de cratera e baixa condutividade térmica (FERRARESI, 2011).

Segundo Diniz et al., 2013, as ferramentas cerâmicas são classificadas em dois grupos em função das propriedades de sua matriz: (i) à base de óxido de alumínio (Al_2O_3); (ii) à base de nitreto de silício (Si_3N_4). Estes grupos contêm divisões em decorrência da adição de elementos de liga, que lhes conferem características distintas, como é mostrado na Figura 17.

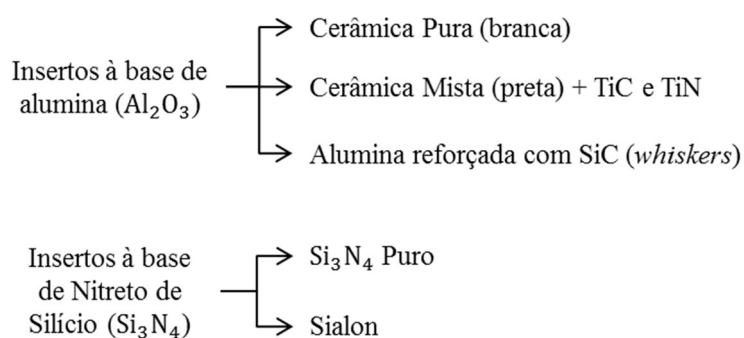


Figura 17 - Divisão e subdivisão dos grupos de materiais cerâmicos
Fonte: Campos (2015)

As ferramentas de corte de cerâmica mista apresentam uma estrutura de grãos muito finos devido à adição de TiC (e/ou TiN) que limita o crescimento dos grãos de óxido de alumínio (Al_2O_3), promovendo melhores tenacidade e condutividade térmica,

além de aumentar consideravelmente a sua dureza e a sua resistência ao desgaste. Com essas ferramentas, tem-se conseguido excelentes resultados no torneamento de aços endurecidos (MACHADO et al., 2015; KLOCKE, 2011). Ferramenta de PCBN é um composto formado de grãos de nitreto cúbico de boro (CBN) em uma matriz ligante (cerâmica ou metálica), classificado como material contendo alto e baixo teor de CBN. Ferramentas com alto teor CBN contêm aproximadamente 80-95% de CBN, com um ligante do tipo metálico e ferramentas com baixo teor podem conter de 40-70% de CBN, a maioria com matriz ligante à base de cerâmica. Quanto às suas propriedades, apresentam alta dureza e alta resistência à compressão, à flexão e ao desgaste, boa estabilidade química e boa resistência ao choque térmico (KLOCKE, 2011).

Em contrapartida os insertos de material cerâmico apresentam baixa tenacidade, sendo requerida atenção especial em sua utilização, necessitando cuidados nas escolhas da geometria da ferramenta e do tipo de suporte dos insertos, e na entrada e saída da ferramenta de corte em relação à peça. Além destes fatores, vale destacar que não é recomendado o uso de fluidos de corte com ferramentas de cerâmica, devido ao choque térmico provocado pelo fluido, podendo levar a quebra da ferramenta (KLOCKE, 2011).

2.2.1.2 Geometria da ferramenta de corte

A geometria da ferramenta de corte exerce grande influência no desempenho da usinagem. Os fatores relacionados com formação e saída do cavaco, força de corte, desgaste da ferramenta, e qualidade da superfície usinada são diretamente influenciadas por essa geometria. Por isso se deve conhecer as dimensões, os ângulos e os materiais necessários para sua fabricação a fim de obter um resultado satisfatório durante a operação de corte, adaptando tal geometria aos materiais da peça e da ferramenta (MACHADO et al., 2015).

Segundo Diniz et al., 2013, os principais ângulos de uma ferramenta de corte com geometria definida são: ângulo de folga (α), ângulo de cunha (β), ângulo de saída (γ), ângulo de ponta (ϵ_r), ângulo de posição principal (χ_r), ângulo de posição secundário (χ_r') e ângulo de inclinação (λ). As Figuras 18 e 19 ilustram os principais ângulos da

ferramenta de corte. No caso, $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$ (complementares) e $\chi_r + \epsilon_r + \chi_r' = 180^\circ$ (suplementares).

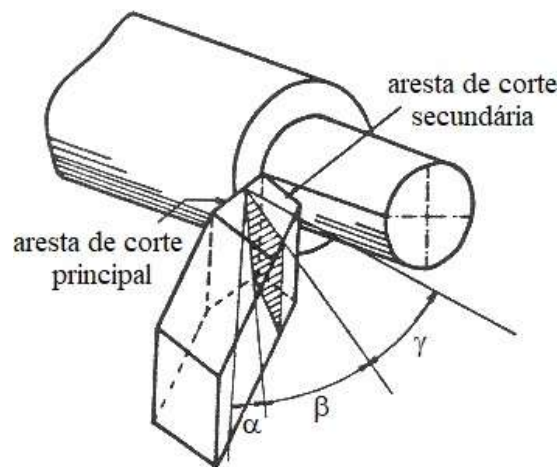


Figura 18 - Ângulos da ferramenta de corte: plano de medida e plano de referência
Fonte: Klocke (2005).

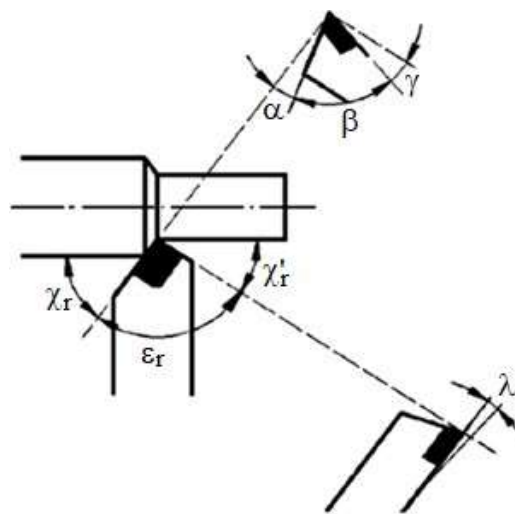


Figura 19 - Ângulos da ferramenta de corte: ângulos no plano de medida
Fonte: Klocke (2005).

Diferentes geometrias de ferramenta de corte podem ser especificadas dependendo dos materiais da ferramenta e da peça, da geometria da peça e das condições de corte. Os principais ângulos de uma ferramenta para torneamento estão apresentados na Figura 20.

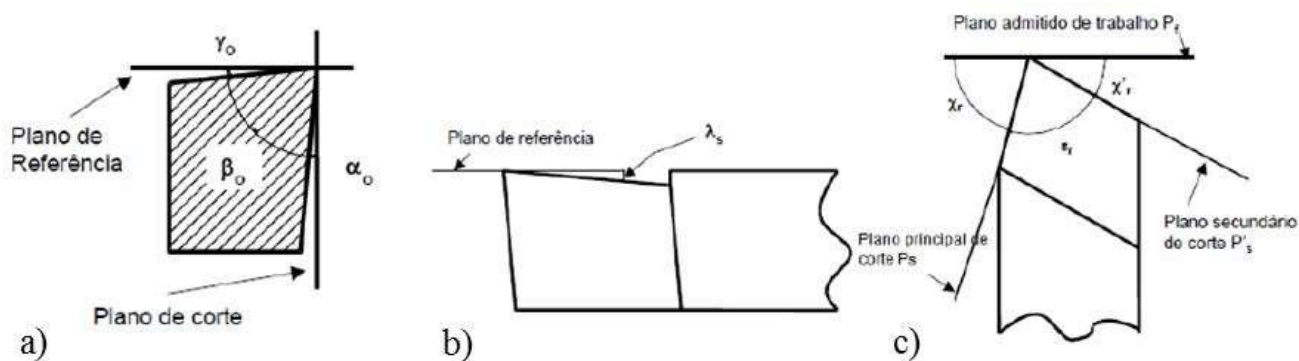


Figura 20 - Ângulos de uma ferramenta de corte: (a) α_0 (folga), β_0 (cunha) e γ_0 (saída) (b) λ_0 (inclinação) e (c) χ_r (posição), ϵ_r (ponta) e χ'_r (posição secundário)
Fonte: Ferraresi (2011).

- O ângulo de folga (α_0) tem a função de evitar o atrito entre a peça e a ferramenta. Assim, a marca de desgaste de flanco é consideravelmente influenciada por esse ângulo;
- O ângulo de cunha (β_0) é responsável pelo corte do material e propicia resistência mecânica à ferramenta e dissipação do calor;
- O ângulo de saída (γ_0) influencia a formação do cavaco, a força e a potência de corte. No caso, quanto maior for γ_0 , menor será o trabalho de dobramento do cavaco. Assim, emprega-se valor negativo de γ_0 para usinagem de materiais duros (pois a cunha necessita maior resistência mecânica, pois $\alpha_0 + \beta_0 + \gamma_0 = 90^\circ$);
- O ângulo de inclinação (λ_0) controla a direção de saída do cavaco e protege a aresta de corte contra impactos. Uma diminuição do ângulo λ_0 aumenta a estabilidade da aresta; entretanto, aumenta a força passiva e direciona o cavaco para a superfície já usinada (o que pode eventualmente prejudicar o acabamento);
- O ângulo de posição (χ_r) distribui as tensões de corte, influencia na geometria do cavaco e afeta a intensidade das forças de avanço e passiva. Quanto maior χ_r , maior a vida da ferramenta, pois, com o mesmo avanço (f), o comprimento de contato do cavaco na aresta aumenta e a espessura do cavaco (h) diminui. Com isso, a força de usinagem é distribuída em uma aresta mais longa e a vida da ferramenta é prolongada;

- O ângulo de ponta (ϵ_r) garante boa estabilidade da ferramenta e dissipação do calor. Com relação à ponta da ferramenta (aresta e cunha), seu formato é responsável pela topografia da superfície.

A Figura 21 mostra alguns dos pontos já mencionados a fim de melhor representar o processo.

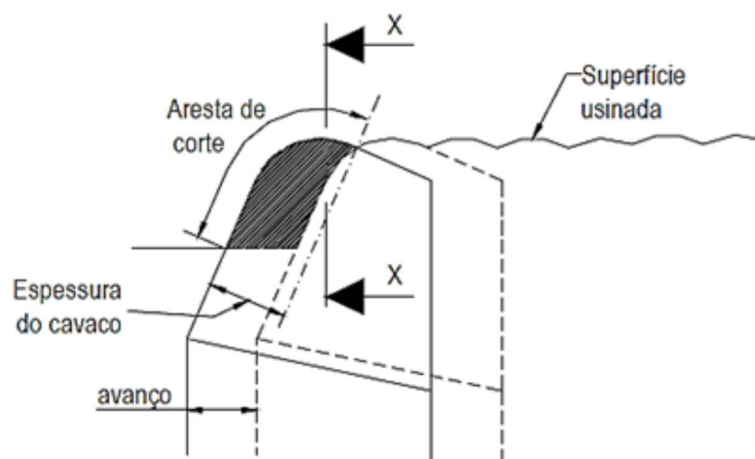


Figura 21 - Perfil filetado deixado pela ferramenta na peça torneada
Fonte: Noordin (2007).

A escolha do raio de ponta de uma ferramenta depende dos valores de avanço (f) e profundidade de corte (ap). Raios de ponta (re) grandes levam a uma melhora na qualidade da superfície usinada e na estabilidade da aresta cortante, enquanto raios pequenos tendem a gerar menos vibrações (menor força passiva). A Figura 22 mostra a amplificação de um raio de ponta de um inserto genérico (DENKENA, 2011).

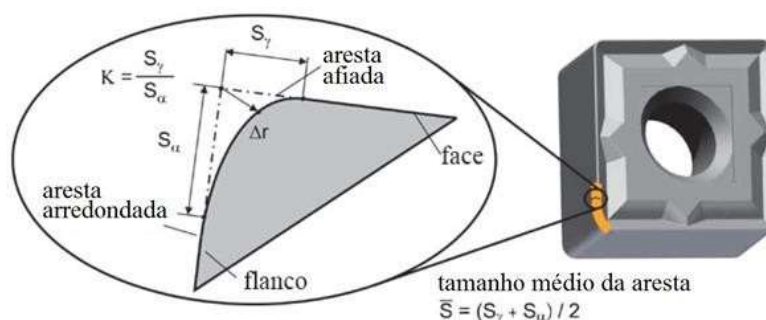


Figura 22 - Caracterização da aresta de corte arredondada
Fonte: Denkena e Bassett, (2011).

A geometria da ferramenta de corte é classificada em macrogeometria e microgeometria. A macrogeometria está relacionada ao tamanho, formato e ângulos da

ferramenta ou inserto; já a microgeometria refere-se às características da aresta de corte. A geometria da aresta de corte apresenta grande influência na vida da ferramenta no processo de torneamento, principalmente em pequenas espessuras de cavaco, como é o caso do torneamento de materiais endurecidos (ROSA, 2017). Uma forma apropriada da aresta de corte aumenta a resistência ao desgaste, a vida da ferramenta e a confiabilidade do processo (DENKENA e BIERMANN, 2011). A Figura 23 mostra um detalhamento da geometria, com enfoque nos ângulos de saída.

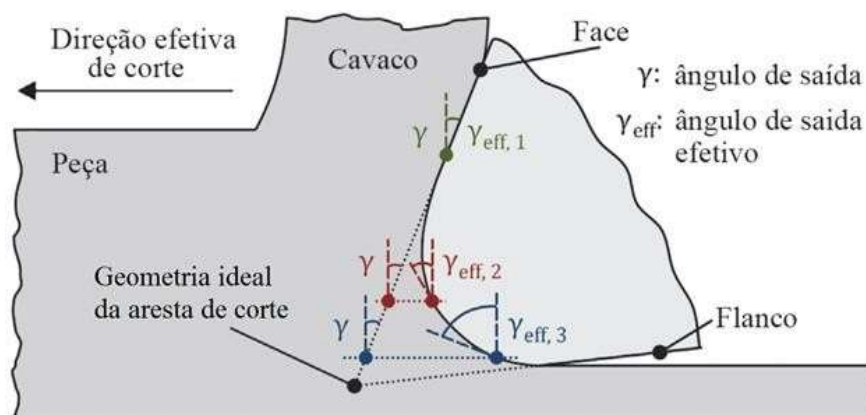


Figura 23 - Efeito do ângulo de saída efetivo na transição da macro para microgeometria da ferramenta

Fonte: Denkena e Biermann (2014)

2.2.2 Forças De Usinagem

O conhecimento da força de usinagem (F_u), que é a força total que atua sobre a aresta de corte da ferramenta, é de extrema importância, pois possibilita estimar a potência necessária para o corte, avaliar as forças atuantes nos componentes mecânicos da máquina-ferramenta, estabelecer uma correlação com o desgaste das ferramentas e relacionar com a rugosidade da superfície final, sendo que todas essas variáveis podem impactar no custo de produção (MACHADO, et al., 2009).

As componentes dispostas nos eixos ortogonais da força de usinagem (Figura 24) são as forças de corte (F_c), de avanço (F_f) e passiva (F_p). F_c é a projeção da força de

usinagem sobre o plano de trabalho na direção de corte. F_f é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho na direção do avanço. F_p é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho (MACHADO et al., 2009).

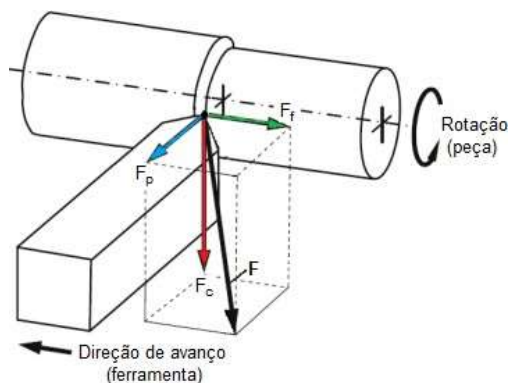


Figura 24 - Componentes da força de usinagem
Fonte: Ferraresi (2011).

Onde:

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

Assim, verifica-se que a força de usinagem se configura como principal fator no cálculo da potência necessária a usinagem e depende do material a ser usinado, área da seção de corte, espessura de corte, geometria da ferramenta e ângulo de posição, estado de afiação da ferramenta, material da ferramenta, lubrificação e velocidade de corte definida para a operação. (BORBA, 2015).

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

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

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

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

Onde:

- A – área da seção de corte (mm^2)
- b – comprimento de corte (mm)
- h – espessura de corte (mm)
- a_p – profundidade de corte (mm)
- f – avanço (mm/rot)

A alteração das variáveis de entrada do processo de usinagem (parâmetros de corte, meio lubrificante, ferramenta de corte) influenciam as componentes da força de usinagem (ROSA, 2017). Na Figura 25 tem-se a dependência destas componentes em função dos parâmetros de corte (v_c, f, a_p) e do ângulo de posição da ferramenta (χ_r).

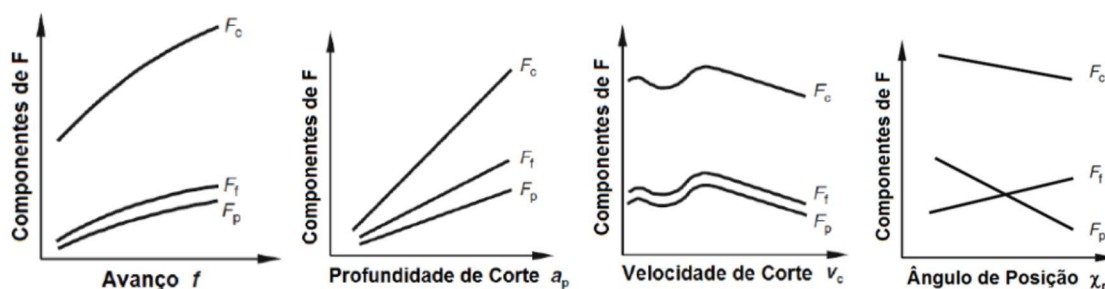


Figura 25 - Dependência das componentes da força de usinagem: (a) avanço; (b) profundidade de corte; (c) velocidade de corte e (d) ângulo de posição

Fonte: Klocke (2011).

Segundo Diniz et al., (2010), o aumento do avanço (f) gera um incremento das forças pelo crescimento da área da seção de corte; porém, tem-se uma diminuição da pressão específica de corte (K_s). Isto ocorre, pois com o crescimento de f , a velocidade de avanço (v_f) aumenta e, conseqüentemente, o coeficiente de atrito diminui (o corte torna-se mais dinâmico, gerando uma diminuição nas forças (Figura 25a). O aumento da profundidade de corte (ap) praticamente não altera o valor de K_s , a não ser para pequenos valores, pois o crescimento de ap só faz aumentar o comprimento de contato ferramenta-peça, sem que haja um aumento nas velocidades envolvidas. Com isso, pode-se concluir que o crescimento das forças é diretamente proporcional ao de ap (Figura 25b); já quando f aumenta, as forças não crescem na mesma proporção, já que ocorre uma diminuição do valor de K_s . A diminuição das forças com o aumento da velocidade de corte (Figura 25c) acima da velocidade crítica se dá devido à redução da resistência do material em alta temperatura (ROSA, 2017).

Sharman et al., (2006), verificaram que as forças para ferramenta nova e desgastada não tiveram uma diminuição de suas componentes em função do aumento do avanço, o que causaria aumento da temperatura e redução das propriedades mecânicas da peça. Os autores atrelam isto ao fato de que foram observadas maiores profundidades de deformação com maior avanço, o que também produziu forças mais elevadas. Com relação à velocidade de corte também não se verificou uma redução nos valores devido ao seu aumento.

Conforme relatado por Nakayama et al., (1988), um dos fatores que difere o torneamento duro do convencional é justamente o comportamento das componentes F_c , F_f e F_p . Apesar da elevada dureza e conseqüente resistência mecânica, em função dos parâmetros de usinagem normalmente utilizados para o TME de precisão ($v_c \approx 100-200$ m/min, $f \approx 0,05 - 0,15$ mm/volta, $ap \approx 0,1 - 0,5$ mm), as amplitudes dessas componentes não são necessariamente altas. Porém, segundo Klocke, (2011) e Sandvik, (2015), a pressão específica de corte (K_s), essa sim é elevada, podendo atingir valores entre 3500 e 5000 N/mm² (ROSA, 2017).

Na usinagem de materiais endurecidos, as forças tendem a diminuir conforme v_c aumenta. Isto ocorre devido à redução da resistência do material a altas temperaturas, resultando em um tipo de amolecimento térmico do material da peça, o que facilita o

corte, reduzindo as forças de usinagem do processo (EBRAHIMI e MOSHKARSAR, 2009; KLOCKE, 2011; MACHADO et al., 2015).

O ângulo da ferramenta que tem maior influência sob as componentes de força de usinagem é o ângulo de saída (γ). A redução de γ tende a aumentar a área de contato cavaco-ferramenta, impondo maior restrição ao escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída, resultando no aumento da força. Também vale ressaltar que ângulos de folga (α) pequenos (menores que 3°) aumentam o atrito na interface ferramenta-peça, afetando a força de usinagem proporcionalmente (TRENT e WRIGHT, 2000).

2.2.3 Grandezas Físicas E Parâmetros De Usinagem

A velocidade de corte é definida como a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte segundo a direção e o sentido de corte. Para os processos onde ocorre simultaneidade dos movimentos de corte e de avanço, a velocidade de corte é dada pela equação 4 descrita abaixo:

$$v_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad (4)$$

Onde:

- v_c = Velocidade de corte [m/min]
- D = Diâmetro do corpo de prova [mm]
- n = Rotações da máquina [rpm]

Outra grandeza de igual importância para realização da operação de torneamento é a velocidade de avanço. Esta é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte em relação à peça, segundo a direção e o sentido de avanço. A Equação 5 demonstra seu método de cálculo:

$$v_f = a \cdot n \quad (5)$$

Onde:

- v_f = Velocidade de avanço [mm/min]
- f = Avanço (mm/rev) [mm/revolução]
- n = Número de rotações por minuto [rpm]

A velocidade efetiva de corte é definida como a velocidade instantânea no ponto de referência da aresta cortante da ferramenta em relação à peça medido segundo a direção e o sentido efetivo de corte. Essa se descreve como a soma vetorial das velocidades de corte e de avanço, como demonstrado na equação 6:

$$v_e = v_c + v_f \quad (6)$$

Onde:

V_e = Vetor velocidade efetiva de corte

V_c = Vetor velocidade de corte

V_f = Vetor velocidade de avanço

A Figura 26 mostra as direções e sentidos correspondentes as velocidades demonstradas a pouco.

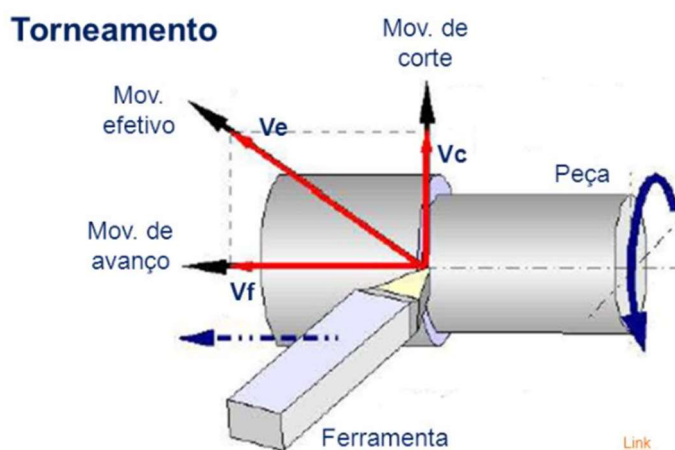


Figura 26 - Ilustração dos vetores direcionais de velocidade de corte e avanço.

Outro parâmetro de corte utilizado durante a operação de torneamento é a profundidade de corte. Este é de grande importância para assertividade na rugosidade final desejada para a superfície, nível de desgaste das ferramentas aplicadas e no tempo final para finalização do processo (FERNANDES, 2018), pois implica na quantidade de

passes de retirada de material que precisam ser aplicados. A equação 7 abaixo demonstra o método de obtenção de seus valores teóricos:

$$ap = \frac{D_1 - D_2}{2} \quad (7)$$

Onde: ap = Profundidade de corte
 D_1 = Diâmetro inicial da peça
 D_2 = Diâmetro da peça após o passe no torneamento

2.3 RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA

Os processos de remoção de material, como a usinagem, introduzem mudanças estruturais na superfície da peça que ocorre devido à ação das forças de corte e atrito da ferramenta (Figura 27). Essa deformação plástica resultará no trabalho da camada superficial, acarretando no aumento da dureza e da resistência à tração (ASTAKHOV, 2011).



Figura 27 - Deformação plástica na usinagem
Fonte: Astakhov (2011).

O acabamento da superfície usinada é subdividido em: alterações de textura (ondulações, marcas, falhas e rugosidade) e em alterações subsuperficiais ou de integridade que podem ser originadas de fatores mecânicos ou fatores metalúrgicos. O nível de rugosidade para uma determinada aplicação precisa ser especificado para se obter

um compromisso entre a funcionalidade do componente e o seu custo efetivo (ASTAKHOV, 2010). Shao et al. (2007), complementam, dizendo que o alto grau de encruamento do material contribui para uma maior abrasão e acelera o desgaste da ferramenta (ROSA, 2017).

A influência do acabamento da superfície usinada depende de maneira particular do processo de fabricação utilizado e do regime da operação, ou seja, depende também de todo sistema de usinagem que inclui: processo, operação de corte, parâmetros de corte, ferramenta de corte, suporte, método de refrigeração, tipo de lubrificante etc. Segundo Astakhov (2010), a superfície resultante do processo de usinagem possui grande importância no desempenho e confiança de um produto. Qualquer alteração superficial (mecânica, metalúrgica e química) pode limitar a qualidade do componente. Portanto, o comportamento de um material depende, entre outros fatores, de sua superfície de contato e do ambiente em que trabalhará.

Alguns defeitos podem ser causados ou produzidos durante a produção de uma peça e podem ser classificados como os que o material já possui e aqueles impostos durante a fabricação (ASTAKHOV, 2010):

- Transformações metalúrgicas: mudanças microestruturais causadas por altas temperaturas e altas pressões de contato.
- Tensões residuais: tensões trativas ou compressivas causadas por forças, deformações e temperaturas envolvidas no processo.
- Deformação plástica: alteração severa da forma geométrica da superfície devido ao atrito da ferramenta durante a usinagem.

Segundo Santos e Sales (2007), todos os processos de usinagem que promovem a remoção do cavaco por cisalhamento do material geram uma superfície danificada na peça. Esses processos geram alterações nas características do material da peça, na superfície ou na camada subsuperficial, reduzindo a resistência à fadiga da peça. Esse fato passou a ser investigado a partir de 1960 devido a falhas prematuras em componentes, as quais não eram causadas por erros de projeto, de fabricação ou de matéria-prima. Boing (2016), cita que essa investigação se torna fundamental, principalmente quando tais componentes são aplicados em áreas críticas da Engenharia, como nas indústrias aeronáutica, automobilística e biomédica (ROSA, 2017).

A Figura 28 mostra uma representação esquemática dos itens que compõem a textura e a integridade de uma superfície. No caso, a textura representa os aspectos geométricos da superfície (rugosidade, ondulações, marcas e falhas), enquanto a integridade aborda fatores mecânicos (deformação plástica, alteração de microdureza, micro ou macro trincas e tensões residuais), metalúrgicos (recristalização e transformações metalúrgicas) e químicos (adsorção, oxidação) da camada limite (ROSA, 2017).

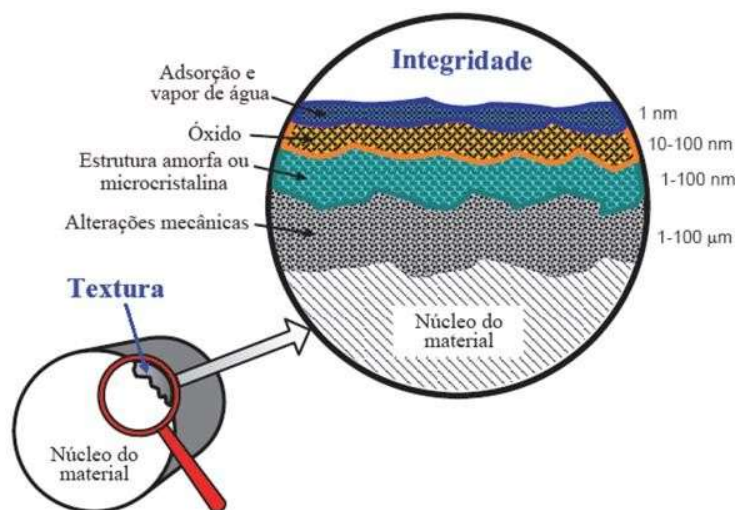


Figura 28 - Representação esquemática da superfície de um metal
Fonte: Astakhov (2010).

Quando a superfície de uma peça é alterada mecanicamente pela usinagem, ocorre deformação plástica das camadas superficiais. Dependendo do processo envolvido na geração desta superfície, uma zona de material endurecido por trabalho irá ocupar a base das camadas adicionais, acima da qual estará uma estrutura amorfa ou microcristalina que é o resultado do fluxo da superfície durante a usinagem. Uma camada de óxido é formada logo acima, devido ao oxigênio disponível no ambiente e aos mecanismos de oxidação. Uma camada de adsorção ocupa a região mais externa e é formada pelo vapor d'água e hidrocarbonetos do ambiente que foram condensados e absorvidos pela superfície (ASTAKHOV, 2010).

Outeiro (2012), menciona que o acabamento é muito importante quando se trata do desempenho do componente, sendo dependente de uma grande quantidade de parâmetros de usinagem. O maior problema da indústria é saber qual combinação de

parâmetros gera o melhor acabamento no componente usinado. Tradicionalmente, a textura da superfície usinada é o principal fator para verificar o acabamento do componente; entretanto, a integridade tornou-se um importante fator para ser controlado durante o processamento de materiais, podendo aumentar ou diminuir a vida do componente e sua capacidade de resistir a ciclos de carga térmica e mecânica em serviço. Uma trinca por fadiga, de maneira geral, é nucleada na superfície da peça e então se propaga para dentro do material. Ao se estender, a trinca gera uma diminuição da seção resistente que, devido ao carregamento, acaba falhando (ROSA, 2017).

A grande maioria dos desenhos de peças em um ambiente fabril contém apenas informação sobre a rugosidade (textura superficial), raramente informações sobre a integridade e sobre as propriedades da matéria-prima (barra, tarugo ou blank), exceto em casos muito específicos onde, por exemplo, as propriedades físicas, químicas, mecânicas e metalúrgicas como propriedades da camada superficial como nível e profundidade de trabalho a frio, profundidade e distribuição das tensões residuais superficiais são fornecidos para a fabricação. Assim, como resultado, a seleção de um processo de fabricação é focada nas dimensões finais, na forma geométrica e na rugosidade, aliados ao menor custo de fabricação. Entretanto, a primeira questão que um engenheiro deve resolver em termos de acabamento (textura e integridade) é que tipo de superfície vai cumprir melhor a função técnica da peça. Existem muitos fatores que influenciam essa decisão como brilho, aderência, atrito etc. Uma vez tomada a decisão com relação a superfície, deve-se escolher a operação de usinagem mais apropriada para gerá-la (ASTAKHOV, 2010).

Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar o processo de usinagem, além de estabelecer especificações de acordo com a aplicação da superfície usinada. Podem-se citar algumas aplicações onde uma baixa rugosidade é essencial, como superfícies de mancais, superfícies que servirão de escoamento de fluidos e gases e superfícies para pintura (MACHADO et al., 2015). Como mencionado, a rugosidade tem grande importância no processo de usinagem, sendo necessário estabelecer parâmetros que permitam caracterizá-la. Assim, foram adotadas normas técnicas capazes de quantificar a rugosidade da superfície usinada (ROSA, 2017).

2.3.1 Parâmetros De Rugosidade

Para se determinar a qualidade de uma superfície, são utilizados os parâmetros de rugosidade. Estes são valores obtidos por meio de medição através do instrumento denominado rugosímetro. A avaliação dos parâmetros de rugosidade pode ser feita de acordo com a ABNT NBR 6405. Alguns destes parâmetros serão explicitados a seguir.

2.3.1.1 Rugosidade média (Ra)

Rugosidade média (Ra) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m). Esta grandeza pode ser representada como sendo a altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas entre o perfil de rugosidade e a linha média, tendo por comprimento, o percurso de medição (l_m) (MOLDE INJEÇÃO PLÁSTICOS, 2021). A Figura 29 traz uma esquematização do funcionamento do parâmetro Ra.

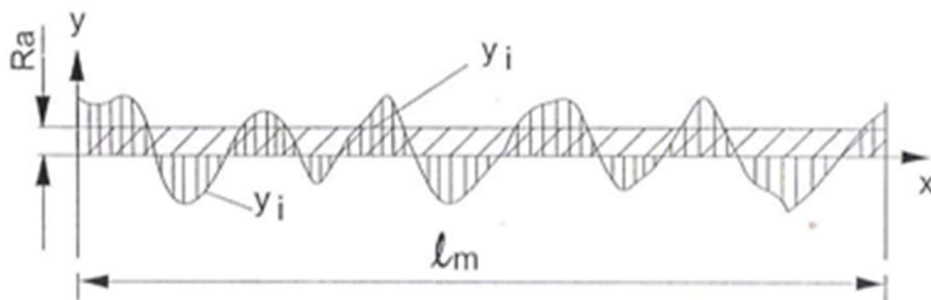


Figura 29 - Esquema de medição de Ra
Fonte: Molde injeção plásticos (2021)

O valor de Ra pode ser expresso em um (sistema métrico) ou μ inch (sistema inglês) e a resolução dos rugosímetros é geralmente de 0,1 μ m (10 μ inch) ou 0,01 μ m (1 μ inch). Outros nomes deste parâmetro são os seguintes: Roughness Average (Ra), Center Line Average (CLA) ou Arithmetical Average (AA).

Ra é o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo, sendo aplicável à maioria dos processos de fabricação. Devido a sua grande utilização, quase a totalidade dos equipamentos apresenta este parâmetro (de forma analógica ou digital eletrônica). Os riscos superficiais inerentes ao processo, não alteram substancialmente o seu valor e para a maioria das superfícies, o valor da rugosidade neste parâmetro está de acordo com a curva de Gauss que caracteriza a distribuição de amplitude (MOLDE INJEÇÃO PLÁSTICOS, 2021)

O Ra aumenta com o desgaste severo da ferramenta e também é sensível a mudanças na condição de lubrificação ou da peça. De acordo com Machado et al., (2015), o parâmetro Ra pode ser calculado teoricamente. Porém, o valor calculado é apenas indicativo, uma vez que os resultados reais são influenciados também por diversos outros fatores como vibração (flutuações das forças de usinagem) e desgastes da ferramenta.

Valor de Ra em um comprimento de amostragem representa a média da rugosidade, por isso, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando tal defeito. O valor de Ra não define a forma das irregularidades do perfil, dessa forma poderemos ter um mesmo valor de Ra para superfícies originadas por processos de usinagem diferentes (MOLDE INJEÇÃO PLÁSTICOS, 2021).

A Figura 30 abaixo apresenta uma relação com alguns valores de rugosidade no parâmetro Ra e a descrição do tipo de peças que geralmente têm esse grau de acabamento.

- Ra = 0,01** - blocos padrão, réguas triangulares de alta precisão, guias de aparelhos de medida de alta precisão
- Ra = 0,02** - aparelhos de precisão, superfícies de medida em micrômetros e calibres de precisão
- Ra = 0,03** - calibradores, elementos de válvulas de alta pressão hidráulica
- Ra = 0,04** - agulhas de rolamentos, superacabamento de camisa de bloco de motor
- Ra = 0,05** - pistas de rolamentos, peças de aparelhos de controle de alta precisão
- Ra = 0,06** - válvulas giratórias de alta pressão, camisas de blocos de motores
- Ra = 0,08** - agulhas de rolamentos de grandes dimensões, colos de virabrequim
- Ra = 0,10** - acentos cônicos de válvulas, eixos montados sobre mancais de bronze, teflon, velocidades média, superfícies de came de baixas velocidades
- Ra = 0,15** - rolamentos de dimensões médias, colos de rotores de turbina e redutores
- Ra = 0,20** - mancais de bronze, nylon, cones de tubos sincronizadores de caixas de câmbio de automóveis
- Ra = 0,30** - flancos de engrenagens, guias de mesas de máquinas-ferramentas
- Ra = 0,40** - pistas de acento de agulhas de cruzetas em cardã, superfície de guia de elementos de precisão
- Ra = 0,60** - válvulas de esferas, tambores de freio
- Ra = 1,50** - assentos de rolamentos em eixos com carga pequena, eixos e furos para engrenagens, cabeças de pistão, face de união de caixa de engrenagens
- Ra = 2,00** - superfícies usinadas em geral, eixos, chavetas e alojamento de rolamentos
- Ra = 3,00** - superfícies usinadas em geral, superfícies de referência, de apoio, etc
- Ra = 4,00** - superfícies desbastadas por operação de usinagem
- Ra = 5 a 15** - superfícies fundidas, superfícies estampadas
- Ra = valores maiores que 15** - peças fundidas, forjadas e laminadas

Figura 30 – Listagem de aplicações típicas de rugosidade Ra
 Fonte: Molde injeção plásticos (2021)

A Figura 31 classifica os acabamentos superficiais geralmente encontrados na indústria mecânica em 12 grupos e os organiza de acordo com o grau de rugosidade e o processo de usinagem que pode ser usado em sua obtenção. Permite também visualizar uma relação aproximada entre a simbologia de triângulos, as classes e os valores de Ra (μm).

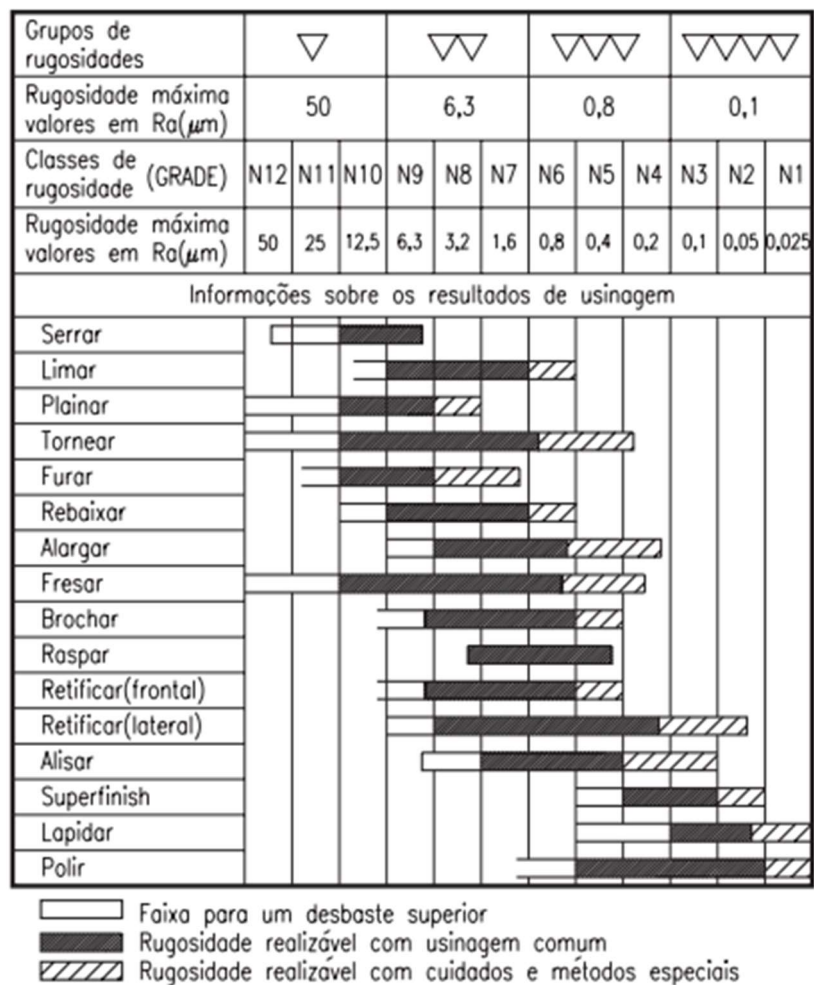


Figura 31 - Classificação geral de acabamentos superficiais
Fonte: Molde injeção plásticos (2021)

Existem duas situações diferentes na seleção do valor de cutoff necessário para efetuar uma medição de rugosidade: quando o perfil da peça é periódico e quando é aperiódico. Quando o perfil é periódico (torneamento, aplainamento, etc.), o valor de cutoff depende da distância entre os sulcos deixados pelo avanço da ferramenta no processo de usinagem, conforme a Tabela 10 mostra a seguir.

Tabela 10 - Comprimento de amostragem de acordo da distância entre os sulcos
Fonte: Molde injeção plásticos (2021)

Distância entre sulcos (mm)	l_e (mm)	l_m (mm)
de 0,01 até 0,032	0,08	0,4
de 0,032 até 0,1	0,25	1,25
de 0,1 até 0,32	0,8	4
de 0,32 até 1	2,5	12,5
de 1 até 3,2	8	40

Esta classificação resulta da exigência de que o comprimento de onda limite seja no mínimo 2,5 vezes maior que a distância entre sulcos e de no máximo 8 vezes. Essa distância pode ser determinada a partir de um gráfico preliminar da superfície ou por meio de medição sobre a peça (MOLDE INJEÇÃO PLÁSTICOS, 2021)

Quando o perfil é aperiódico, o valor de cutoff tem relação com o grau de rugosidade média R_a a ser avaliado. Estes perfis onde não se consegue ver a periodicidade da ondulação, normalmente são resultantes de esmerilhamento, retificação, fresagens de contorno e frontal sem inclinação, alargamento, deformação, etc. Para definir o valor aproximado da rugosidade, usa-se inicialmente um valor de cutoff também aproximado (geralmente usa-se o valor 0,8 mm), conforme é mostrado na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11 - Tabela com determinação do comprimento de amostragem para perfis aperiódicos baseados no parâmetro R_a , R_z ou $R_{máx}$.
Molde injeção plásticos (2021)

Rugosidade R_a (m)	Rugosidade R_z ou $R_{máx}$ (m)	l_e (mm)	l_m (mm)
até 0,1	até 0,5	0,25	1,25
de 0,1 até 2,0	de 0,5 até 10,0	0,80	4,00
de 2,0 até 10,0	de 10,0 até 50	2,50	12,50
acima de 10,0	acima de 50,0	8,00	40,00

A rugosidade superficial mais adequada para a maioria dos revestimentos é aquela que apresenta R_a numa faixa de 2.5 a 13 μm , entretanto se a espessura do revestimento é pequena, a faixa de rugosidade necessária estará na faixa de 1.3 μm . E a força de adesão, normalmente, aumenta com a rugosidade da superfície, contudo para R_a superior a 10 μm esta melhora decresce. E a melhor adesão está associada com a rugosidade comparada a $\frac{3}{4}$ do diâmetro das partículas do revestimento (MOLDE INJEÇÃO PLÁSTICOS, 2021).

2.3.1.2 Rugosidade média (R_z)

É a média aritmética dos 5 valores da rugosidade parcial Z_i . A rugosidade parcial Z_i é definida como a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maiores afastamentos (acima e abaixo da linha média) existentes dentro de um comprimento de amostragem l_e (MOLDE INJEÇÃO PLÁSTICOS, 2021). A Figura 32 abaixo representa graficamente este valor sendo a altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, dentro do comprimento de amostragem l_e .

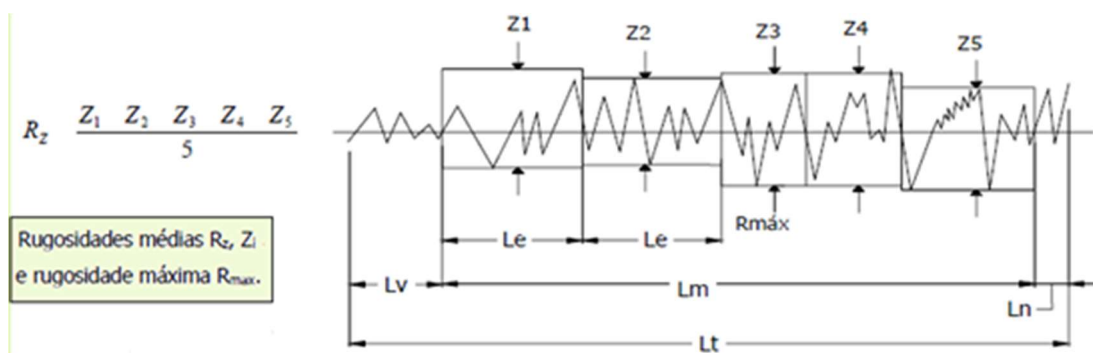


Figura 32 - Representação esquemática da obtenção do parâmetro R_z
Fonte: Molde injeção plásticos (2021)

O parâmetro R_z pode ser usado nos casos em que pontos isolados não influenciam na função da peça a ser controlada (superfícies de apoio e de deslizamento, ajustes prensados, etc.) e também em superfícies onde o perfil é periódico e conhecido.

Como vantagens deste parâmetro, pode-se mencionar que o mesmo informa sobre a distribuição média da superfície vertical, possui fácil obtenção em equipamentos que fornecem gráficos, define muito bem a superfície (em perfis periódicos) e riscos isolados serão considerados apenas parcialmente, de acordo com o número de pontos isolados.

2.3.1.3 Desvio médio quadrático (Rq)

Está definido como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média dentro do percurso de medição l_m . Analogamente ao parâmetro R_a , pode-se dizer que é similar, aos valores y das ordenadas, elevados ao quadrado, e depois extraída a raiz quadrada da média (MOLDE INJEÇÃO PLÁSTICOS, 2021). A Figura 33 traz um demonstrativo de funcionamento de R_q .

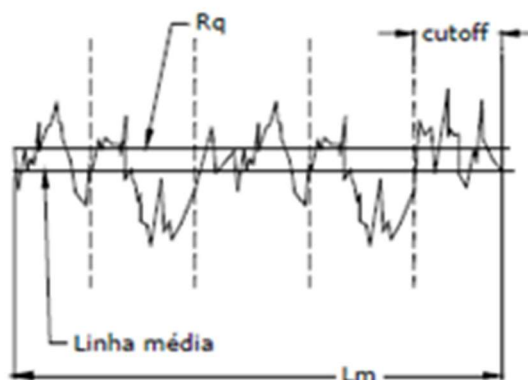


Figura 33 - Representação esquemática do parâmetro R_q
Fonte: Molde injeção plásticos (2021)

A equação 8 abaixo demonstra brevemente como é realizado o cálculo deste parâmetro.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int y^2 dx} \quad (8)$$

É mais frequentemente utilizado em superfícies onde o acabamento apresenta os riscos de usinagem bem orientados (torneamento, fresagem, etc.) e superfícies onde o parâmetro R_a apresenta pouca resolução. Comparado com R_a , este parâmetro tem o efeito

de dar peso extra para altos valores (é cerca de 11% maior que Ra e esta diferença passa a ser importante em muitos casos). Para superfícies onde a detecção de picos ou vales se torna importante e mesmo quando estes aparecem ao acaso, evidenciando-os mais que o Ra, pois eleva ao quadrado o erro, acentuando-o (MOLDE INJEÇÃO PLÁSTICOS, 2021).

2.3.1.4 Profundidade total da rugosidade (R_t)

A profundidade total da rugosidade R_t está definida como a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo dentro do comprimento total de avaliação (cinco cut-off) (MOLDE INJEÇÃO PLÁSTICOS, 2021). Na Figura 34, corresponde à distância vertical formada pelo pico mais alto (que está localizado no trecho Z1) e o vale mais profundo (que está localizado no trecho Z3).

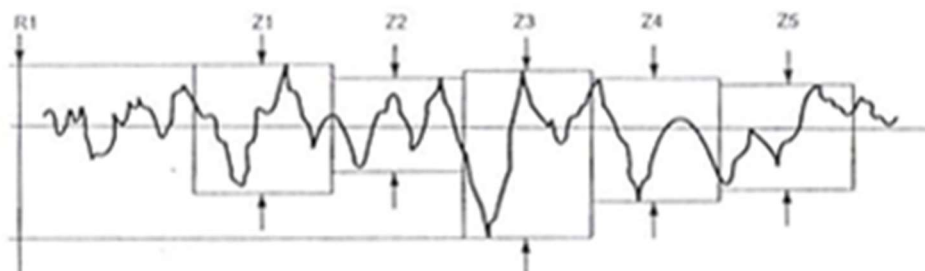


Figura 34 - Representação esquemática do parâmetro R_t
Fonte: Molde injeção plásticos (2021)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

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

Os procedimentos deste estudo estão baseados no comportamento das ferramentas de corte na usinagem por torneamento através de:

- ❖ Análise comparativa das condições de corte a seco realizando a variação das velocidades de corte a cada passe;
- ❖ Análise da rugosidade gerada a cada passe;
- ❖ Monitoramento dos esforços cortantes durante o torneamento;
- ❖ Estudo comparativo entre os dados obtidos das forças de corte e rugosidade final atingida.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

O corpo de prova utilizado neste trabalho possui formato cilíndrico como é mostrado na Figura 35, com diâmetro de $D = 76$ mm e comprimento de $L = 370$ mm. O material do substrato é o aço SAE 1020 endurecido a aproximadamente 46 HRC por uma camada aspergida termicamente por arco elétrico com aproximadamente $p = 1,5$ mm de profundidade, composta de uma liga inox martensítica 13% Cr. Suas extremidades já foram adaptadas para o melhor encaixe na castanha do torno, a fim de se evitar possíveis colisões, desalinhamentos ou atritos que poderiam prejudicar os resultados dos ensaios. Além disso, o corpo de prova apresenta uma relação $L/D = 4,86 \geq 10$ para evitar vibrações e flexões do mesmo.



Figura 35 – Fotografia do corpo de prova com substrato de aço SAE1020 aspergido termicamente
Fonte: Autor

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA FERRAMENTA DE CORTE

Aplicou-se o inserto de cerâmica modelo TNGA160404 classe HC2 do fabricante NTK como é mostrado na Figura 36. O porta-ferramenta utilizado foi o modelo MTJNR 2020 K16 (ângulo de posição = 93°) da fabricante Sandvik Coromant, exemplificado na Figura 37.



Figura 36 - Inserto cerâmico TNGA160404
Fonte: NTK (2021)



Figura 37 - Porta-ferramenta MTJNR 2020 K16
Fonte: Sandvik Coromant (2021)

Referente a classe do inserto utilizado, tais tipos de cerâmica consistem de óxido de alumínio e carbeto de titânio ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) adequadamente proporcionados sinterizados sob pressão. Os produtos resultantes são estáveis sobre uma vasta gama de condições de usinagem. O HC2 é uma cerâmica de uso genérico. Possuem faixa de trabalho de até 65 HRC.

De acordo com o catálogo do fabricante (NTK), o inserto utilizado nesse estudo é recomendado para uso em diversas situações, porém todas se enquadram na escala de material endurecido. A Figura 38 contém algumas condições recomendadas pelo fabricante para aplicação do inserto, como exemplo o uso preferencial para acabamento (Finish) e sem lubrificação durante o torneamento (Dry).

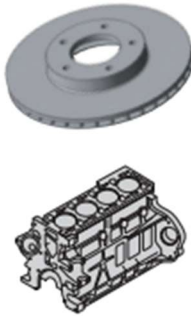
Work	Grade	Rough	Semi-Finish	Finish	Insert Shapes			Dry	Wet	
					Circle	Triangle	Star			
Cast iron 	Ceramic	SX1	●			●	○	●	○	
		SP2		●			●		●	○
		SX9	●					●	●	
		HW2 / HC1			●	●			●	
	HC2			○	●	●		●	○	
	CBN	B20	●							●
		B16	●							●

Figura 38 - Condições de uso indicados pelo fabricante do inserto
Fonte: NTK (2021)

A Figura 39 mostra a faixa dos parâmetros recomendados pelo fabricante do inserto a serem aplicados durante seu uso. Durante a realização deste estudo buscou-se a utilização nas proximidades e dentro destas faixas recomendadas, o que possibilitou um amplo campo comparativo dos dados obtidos com a teoria estudada, além de um melhor resultado de acabamento superficial. O avanço utilizado neste estudo foi menor do que o recomendado pelo fabricante.

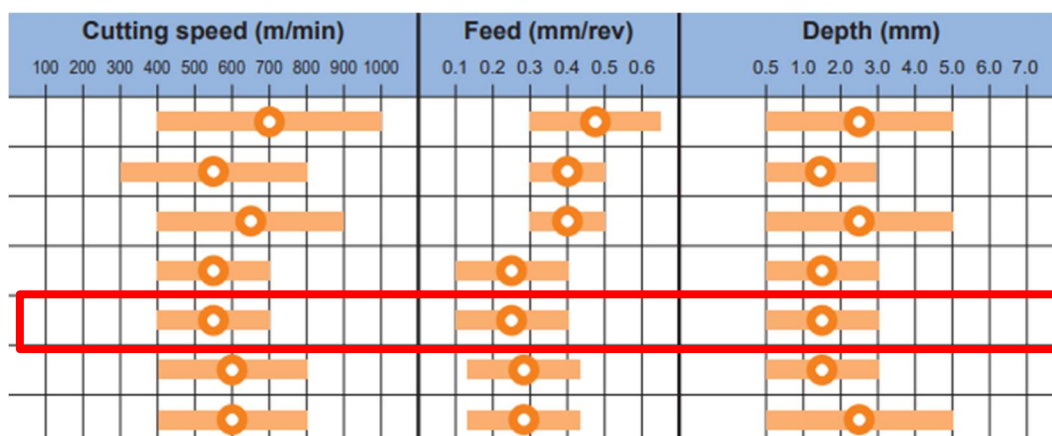


Figura 39 - Faixa de parâmetros de usinagem indicados pelo fabricante do inserto
Fonte: NTK (2021)

A Figura 40 mostra o dimensionamento do inserto utilizado neste estudo. Já a Figura 41 mostra um desenho técnico sobre as cotas deste dimensionamento.


Shape	Item-No.	Dimensions			Ceramics										
		IC	S	R	Silicon-nitride				Alumina		Whisker				
					SX1	SX9	SX8	SP2	HC1/HW2	HC2	HC4/ZC4	HC6	HC7/ZC7	WA1	
	IC, T, R TNGA 160404 160408 160412			0.4											
		9.525	4.76	0.8	●	●	●	●	●	●					
				1.2	●	●		●							

Figura 40 - Dimensionamento do inserto

Fonte: NTK (2021)

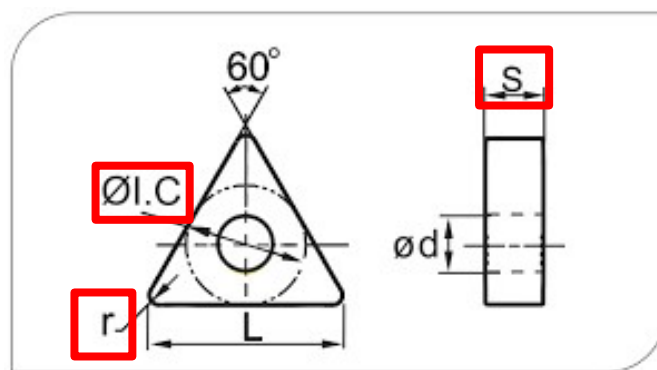


Figura 41 - Cotas referentes ao dimensionamento do inserto

Fonte: NTK (2021)

- Raio de ponta (R) – 0,4 mm
- Espessura (S) – 4,76 mm
- Raio interno (I.C.) – 9,525 mm

A Figura 42 mostra a base da composição química da classe HC2 do inserto utilizado, sua aplicação recomendada e suas grandezas físicas gerais.

HC2	Al ₂ O ₃ + TiC	• Semi-finishing and finishing of cast iron • Machining of hardened materials	4.3	94.5	800	420	7.8	21
NTK Grade	Components	Applications	Physical characteristics					
			Density	Hardness	Bending strength	Young's modulus	Thermal expansion coefficient	Heat conductivity
			g/cm ³	HRA	MPa	GPa	X10 ⁻⁶ /K	W/m-K

Figura 42 - Composição química e propriedades físicas do inserto utilizado da classe HC2

Fonte: NTK (2021)

- Composição química – Al₂O₃ + TiC
- Densidade – 4,3 g/cm³
- Dureza – 94,5 HRA

- Tensão de escoamento – 800 Mpa
- Módulo de Young – 410 GPa
- Coeficiente de expansão térmica $-7,8 \times 10^{-4}/K$
- Condutividade térmica – 21 W/m-K

A Figura 43 mostra um comparativo entre diversos tipos de insertos do fabricante NTK entre velocidade de corte e avanço recomendado para cada uma de suas respectivas classes e tipos de aplicações. Verifica-se com esta imagem a recomendação para o inserto utilizado neste presente estudo a utilização de maiores velocidades de corte e menores avanços aplicados a fim de se obter as melhores condições de superfície final atingida e maior longevidade da ferramenta de corte.

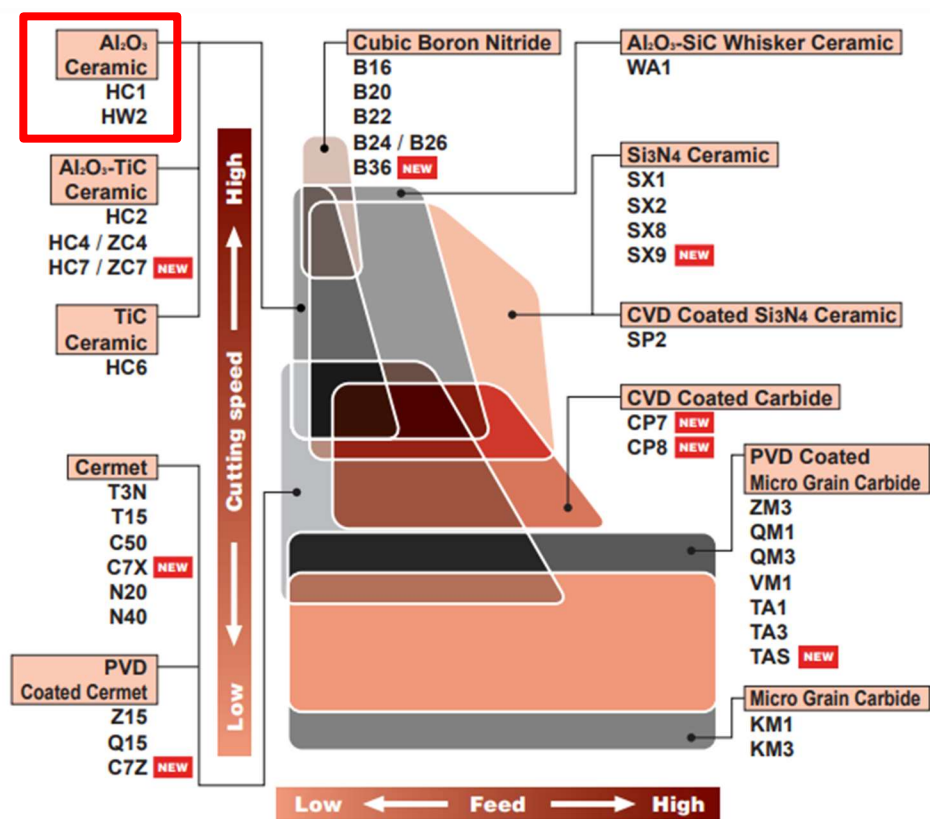


Figura 43 - Gráfico comparativo de Velocidade de Corte x Avanço de insertos do fabricante NTK
Fonte: NTK (2021)

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE TORNEAMENTO

Realizou-se os ensaios de torneamento cilíndrico no corpo de prova do aço SAE 1020 endurecido com uma camada aspergida contendo um revestimento composto de uma liga inox martensítica 13% Cr com os insertos de cerâmica TNGA160404 classe HC2 da NTK.

Aplicou-se dois passes de retirada de material em cada uma das 6 divisões realizada no corpo de prova. Utilizou-se uma aresta nova do inserto para cada passe realizado, a fim de manter este parâmetro (desgaste da ferramenta) fixado e sem interferência no processo. A profundidade de cada passe aplicado foi de $ap = 0,2$ mm/diâmetro, totalizando a profundidade máxima atingida de $ap = 0,4$ mm. Não foi aplicado nenhum método de lubrificação durante o processo, pois isto poderia causar uma redução brusca da temperatura do inserto cerâmico aplicado levando assim a sua fragilização e posterior quebra durante a usinagem (POLLY, 2019).

A máquina-ferramenta utilizada nas operações foi o torno MS 205 da Indústrias Nardini S/A (Figura 44) disponível no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS – CEFET/RJ). O torno possui rotação máxima de 2500 rpm e potência máxima de 23,5 kVA.



Figura 44 - Torno MS 205 da Indústrias Nardini S/A.

Como já mencionado, subdividiu-se o corpo de prova em 6 sessões de igual tamanho, cada uma com o comprimento aproximado de 56,77 mm. Em cada uma delas, dois passes com a profundidade de $ap = 0,2$ mm/diâmetro cada foram aplicados, variando-se a rotação da máquina em cada subdivisão (consequentemente alterando a velocidade de corte pela relação direta existente) para se verificar nesse estudo as respectivas variações apresentadas. Os parâmetros de corte utilizados em cada divisão constam na Tabela 12 abaixo.

Tabela 12 - Parâmetros utilizados durante o torneamento cilíndrico deste estudo

Fonte: Autor

	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Condição 5	Condição 6
RPM	500	800	1000	1250	1600	2500
Velocidade de corte (m/min)	119	191	239	298	382	597
Velocidade de avanço (m/min)	26.5	42.4	53	66.25	84.8	132.5
Profundidade total (mm)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Avanço (mm/rev)	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053

O avanço foi mantido constante igual $f = 0,053$ mm/rev. Este valor foi escolhido pois como este presente estudo visa a melhor qualidade da superfície final a ser atingida, é recomendado o uso de avanços com baixos valores (ROSA, 2017). Por este motivo, optou-se por manter o avanço em um dos valores mínimos disponíveis pelo torno.

Ao se iniciar o processo de torneamento, acoplou-se devidamente o corpo de prova na “castanha” e no cabeçote do torno MS 205. Utilizou-se um relógio comparador como instrumentos de alinhamento entre o corpo de prova e o torno, como ilustrado na Figura 45.

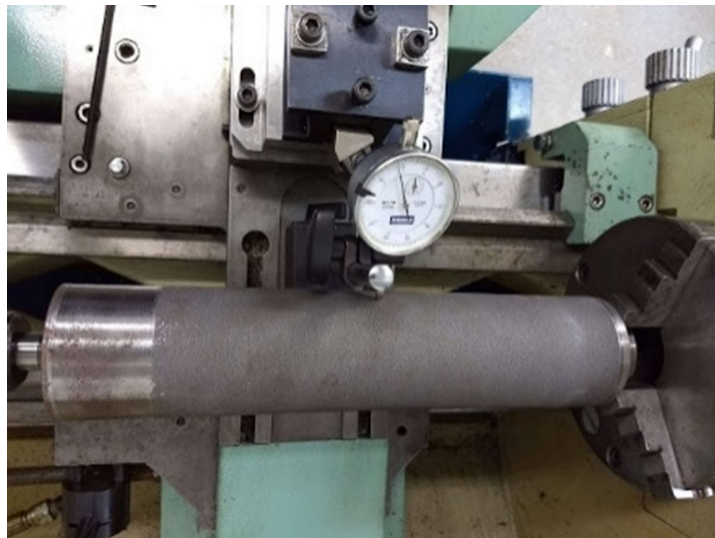


Figura 45 – Acoplamento do relógio comparador para realizar o alinhamento do corpo de prova
Fonte: Autor

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

O equipamento utilizado para aquisição dos dados de força foi um dinamômetro piezelétrico (conhecido também por plataforma piezelétrica) Kistler modelo 9257 BA (Figura 46), que permite a aquisição das três componentes ortogonais da força de usinagem.



Figura 46 - Dinamômetro Kistler modelo 9257 BA
Fonte: Autor

Além do dinamômetro, o sistema de monitoramento e aquisição de sinais de força é composto por um condicionador de sinais, uma placa de aquisição de dados e um software específico. O condicionamento de sinais (amplificação e filtragem) foi feito utilizando um condicionador Kistler modelo 5233 A, mostrado na Figura 47.



Figura 47 - Condicionador de sinais Kistler modelo 5233 A
Fonte: Autor

O sinal analógico de saída do amplificador de carga é captado por uma placa de aquisição de dados National Instruments modelo NI USB-6221 (Figura 48), instalada em

um microcomputador dedicado. Essa placa permite adquirir até 100 mil pontos por segundo (100 kS/s) em até oito entradas analógicas diferenciais com 16 bits de resolução.

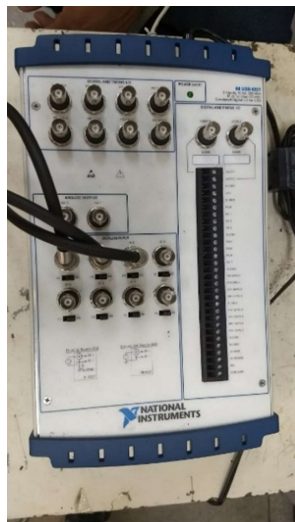


Figura 48 - Placa de aquisição de dados National Instruments modelo NI USB-6221
Fonte: Autor

Em seguida, os sinais digitais gerados nos eixos X, Y e Z são processados através de um software específico da área. A análise e o pós-processamento dos dados das forças de usinagem foram feitos utilizando o software *Microsoft Excel*. A Figura 49 abaixo traz uma esquematização do processo de aquisição de dados mencionado acima.

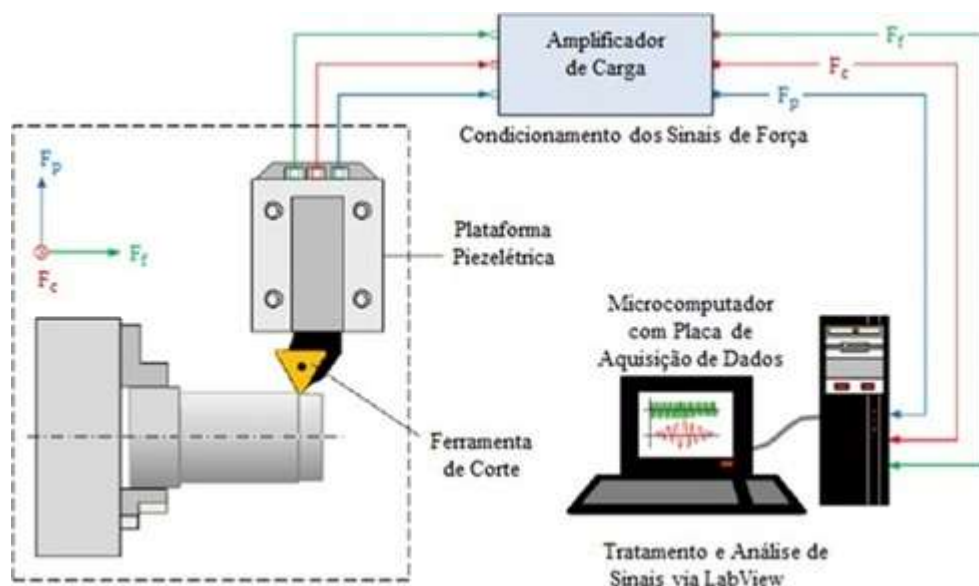


Figura 47 - Esquema representativo da aquisição dos sinais de força de usinagem utilizados neste estudo
Fonte: adaptado de POLLY (2019)

3.5 CARACTERIZAÇÃO DA AQUISIÇÃO DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

Para medição das rugosidades geradas na superfície usinada foi utilizado o rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210P (Figura 53 e 54). A resolução do rugosímetro é de $0,01 \mu\text{m}$ e a agulha do apalpador possui raio de ponta de $5 \mu\text{m}$, com força de medição de 4 mN . O curso máximo é de $12,5 \text{ mm}$ e a velocidade de medição de $0,50 \text{ mm/s}$.

Realizou-se medições prévias no corpo de prova para determinação dos parâmetros a serem selecionados para o uso do rugosímetro. Determinou-se o uso o cutoff em $2,5$ e percurso de medição (l_m) de $12,5 \text{ mm}$. Realizou-se quatro medições de rugosidade em cada uma das seis condições estudadas, onde em cada uma delas foram salvos os valores fornecidos de R_a , R_z , R_q e R_t . A Figura 50 abaixo mostra o painel do rugosímetro em funcionamento para fins demonstrativos.



Figura 48 - Painel do rugosímetro em funcionamento
Fonte: Autor

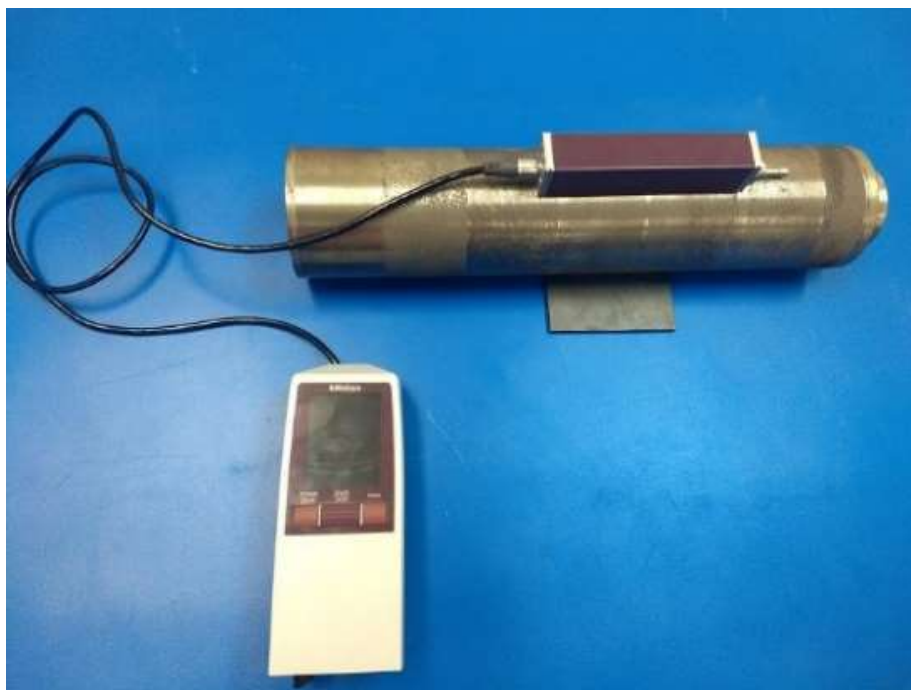


Figura 51 - Rugosímetro Mitutoyo sob corpo de prova
Fonte: Autor



Figura 492 - Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210P
Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisou-se os resultados obtidos no estudo com o SAE 1020 com revestimento de liga inox martensítica (13% Cr e 46 HRC) para verificar a influência da variação nas velocidades de corte com o avanço fixo ($f = 0,053$ mm/ver) e profundidade de corte ($ap = 0,2$ mm) mantida fixa nos dois passes de retirada de material, utilizando-se os insertos de cerâmica NTK TNGA160404 classe HC2 nas variações das componentes ortogonais da força de usinagem, rugosidade final e no aspecto macro no acabamento da superfície final alcançada.

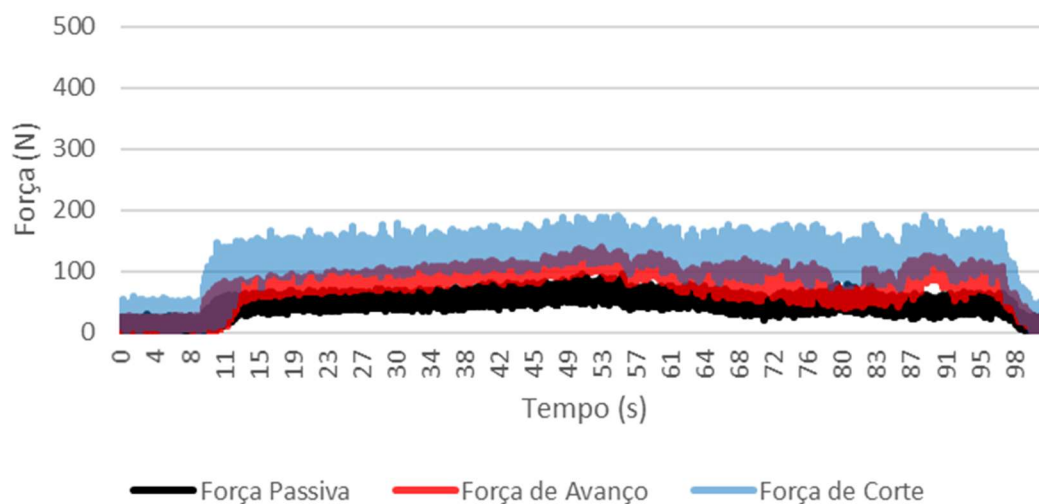
4.1 COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM

Nas figuras mostradas a seguir contém os gráficos com o comportamento das três componentes da força de usinagem (força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p)) na coordenada Y e o tempo (em segundos) de usinagem na coordenada X. Além destes, também são exibidas as diferenças entre as médias de cada componente de usinagem entre o passe 1 e o passe 2, a fim de se verificar o acréscimo ou decréscimo sofrido devido aos fatores envolvidos. Uma análise prévia de cada resultado obtido será debatida ao final da exibição de cada resultado, possibilitando assim a construção das conclusões sobre este estudo.

No comparativo gráfico das médias das componentes da força de usinagem, foi adicionado uma pequena faixa na cor vermelha com o intuito de demonstrar o desvio padrão (para mais e para menos) calculado para cada condição, a fim de garantir uma melhor análise dos resultados apresentados.

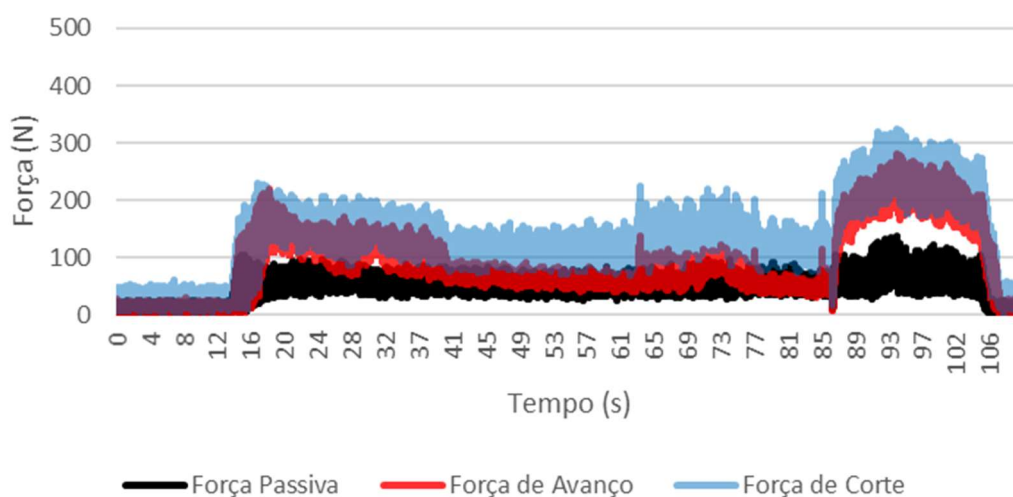
4.1.1 Resultados Das Componentes Da Força De Usinagem – 500 RPM

Na Figura 53 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 1 ($ap = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $vc = 119,38$ m/min (500 RPM).



**Figura 50 - Gráfico das forças de corte - Passe 1 | 500 RPM | $vc = 119,38$ m/min/ $ap = 0,2$ mm.
Fonte: Microsoft Excel**

Na Figura 54 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 2 ($ap = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $vc = 119,38$ m/min (500 RPM).



**Figura 51 - Gráfico das forças de corte - Passe 2 | 500 RPM | $vc = 119,38$ m/min/ $ap = 0,2$ mm.
Fonte: Microsoft Excel**

Utilizando-se a rotação de 500 RPM ($v_c = 119,38$ m/min), se torna perceptível uma maior variação e intensidade das componentes das forças de usinagem durante o passe 2 ($a_p = 0,2$ mm). Durante o passe 1, as forças comportam-se de maneira mais homogênea e de menor intensidade durante todo o desbaste de material. Já no passe 2 com a ponta da ferramenta já desgastada, as componentes apresentam maiores valores e determinados picos, principalmente ao final do processo. No início do processo há uma elevação nos valores das componentes das forças, seguida de uma notória diminuição das mesmas passado alguns segundos. Este fato pode ser justificado pelo aumento da temperatura do processo, o que favorece a elevação da dureza a quente do inserto cerâmico e causa um amolecimento do material que está sendo removido (EBRAHIMI E MOSHKARSAR, 2009; KLOCKE, 2011; MACHADO et al., 2015). Ao final do processo, há novamente a elevação das componentes da força de usinagem (com valores ainda maiores do que no início). Este fato pode ser devido ao desgaste apresentado pela ferramenta, podendo ocasionar um maior grau de encruamento do material, o que exige maiores esforços para a remoção do material. (KLOCKE, 2005).

A Figura 55 mostra o resultado comparativo entre as médias das componentes de usinagem referente aos dois passes aplicados utilizando-se $v_c = 119,81$ m/min. Uma faixa (cor vermelha) foi adicionada exibindo o desvio padrão apresentado.

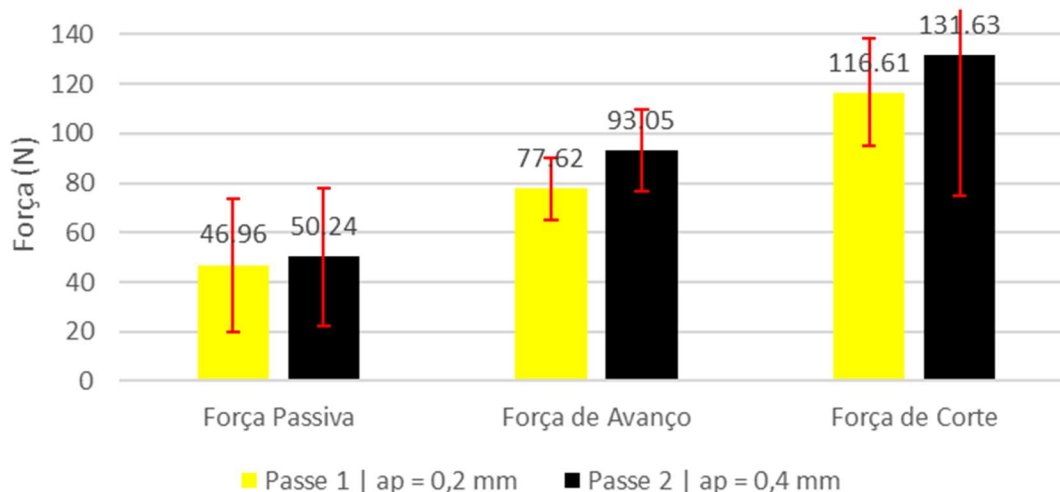


Figura 52 - Média das componentes da força de usinagem 500 RPM e Desvio Padrão | $v_c = 119,38$ m/min

Fonte: Microsoft Excel

Analisando a média das componentes das forças de usinagem e as comparando entre o passe 1 e o passe 2, utilizando-se a rotação de 500 RPM ($v_c = 119,38$ m/min), é

possível notar que neste caso houve um acréscimo nas três componentes de forma relativamente igualitária, fato considerado esperado de acordo com a literatura. A F_p (força passiva) foi a componente que apresentou uma menor variação comparado as demais forças, pois esta não possui como principal função a retirada de material, e sim fornecer precisão dimensional ao resultado final da usinagem (KLOCKE, 2005). A F_c (força de corte) apresenta valores mais elevados pois esta é a componente que mais reflete o esforço da ferramenta para cisalhar o material que está sendo usinado e promover a sua remoção da amostra MACHADO et al., 2015).

Observa-se um desvio padrão mais acentuado na força de corte (F_c) durante o passe 2, mostrando uma maior discrepância do comportamento dessa componente comprando-se a média obtida. Essa maior oscilação demonstra uma maior dificuldade para promover a remoção de material nesta condição.

4.1.2 Resultados Das Componentes Da Força De Usinagem – 800 RPM

Na Figura 56 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 1 ($a_p = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $vc = 191,01$ m/min (800 RPM).

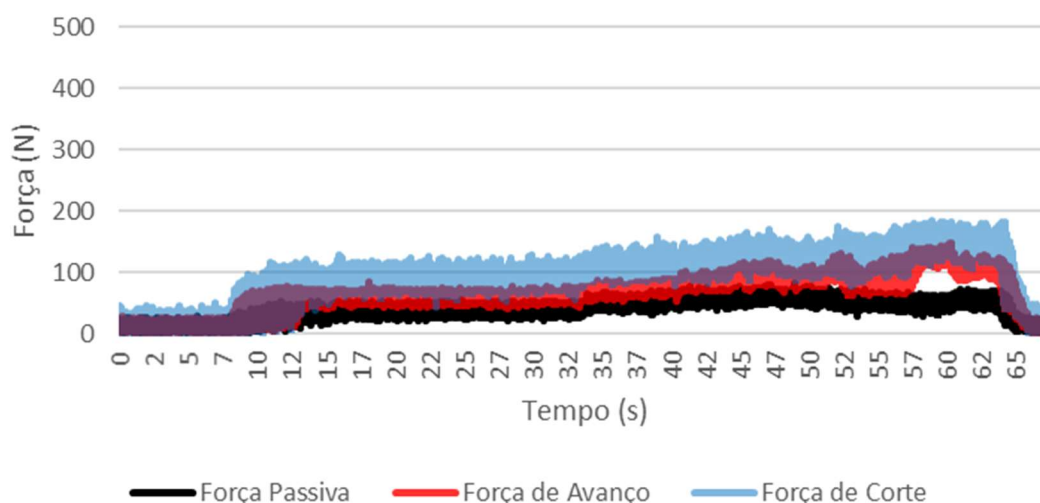


Figura 53 - Gráfico das forças de corte - Passe 1 | 800 RPM | $vc = 191,01$ m/min/ $a_p = 0,2$ mm.
Fonte: Microsoft Excel

Na Figura 57 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 2 ($ap = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $vc = 191,01$ m/min (800 RPM).

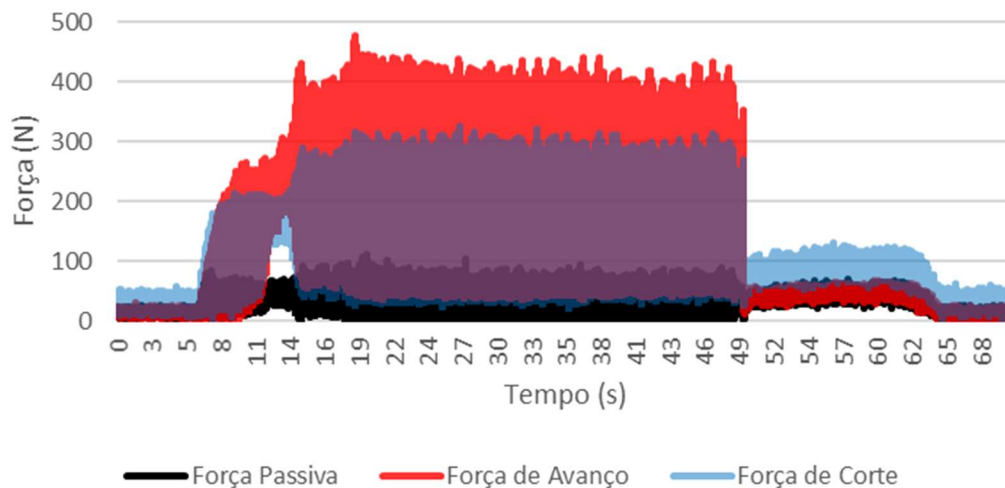


Figura 54 - Gráfico das forças de corte - Passe 2 | 800 RPM | $vc = 191,01$ m/min/ $ap = 0,2$ mm
Fonte: Microsoft Excel

Quando se utilizou a rotação de 800 RPM ($vc = 191,01$ m/min), as componentes das forças de corte sofreram um acréscimo significativo durante o passe 2 quando comparado ao passe 1, sendo esta a velocidade de corte a qual apresentou os maiores valores das componentes da força de usinagem deste estudo. Nota-se também que a F_f (força de avanço) possui maiores valores durante quase todo o processo. Tal fato pode ser explicado por uma possível combinação de fatores, sendo estes o desgaste da ferramenta (fato já mencionado anteriormente) e a faixa de velocidade de corte (vc)/rotação utilizada (acarretando na combinação de baixas temperaturas e maior taxa de avanço da ferramenta). Possivelmente quando aplicou-se esta condição de vc , ocorreu um mau desempenho do inserto pelas condições tribológicas do processo. Este fato pode ser melhor evidenciado na marca próxima de 49 segundos, onde é verificada uma queda brusca do valor das forças de usinagem. Esta queda brusca representa a quebra da ponta do inserto cerâmico durante o processo (fato este evidenciado no momento da operação).

A Figura 58 mostra o resultado comparativo entre as médias das componentes de usinagem referente aos dois passes aplicados utilizando-se $vc = 191,01$ m/min. Uma faixa (cor vermelha) foi adicionada exibindo desvio o padrão apresentado.

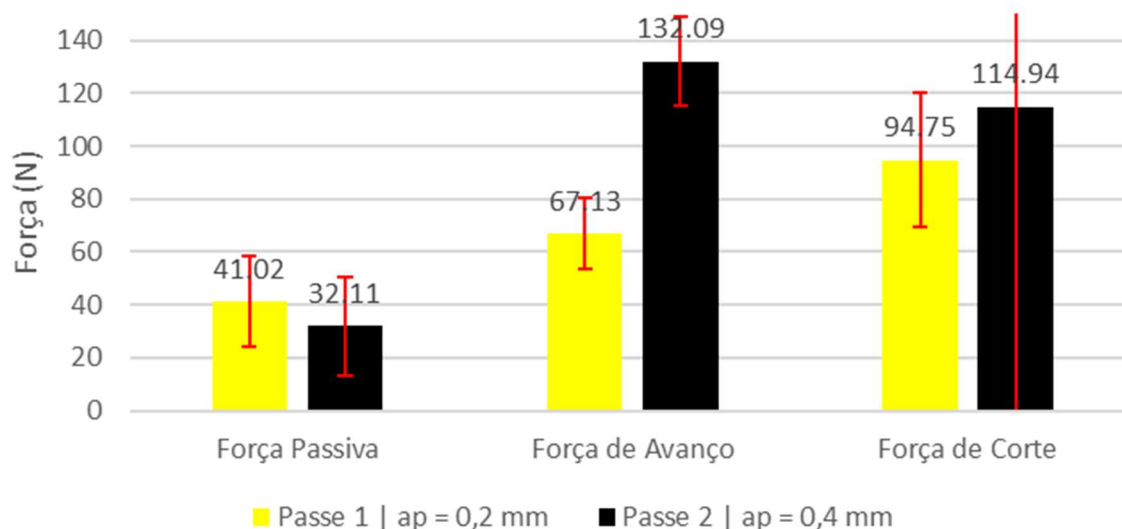


Figura 55 - Média das componentes da força de usinagem 800 RPM e Desvio Padrão | $v_c = 191,01$ m/min

Fonte: Microsoft Excel

Relativo às médias das componentes da força de usinagem, é notório uma leve redução quanto aos valores da F_p (força passiva) durante o segundo passe. Um maior acréscimo é notado na F_f (força de avanço) quando comparado a F_c (força de corte). Tal fato pode ser explicado pela combinação mencionada anteriormente, a qual dificulta o processo de avanço nesta direção para retirada de material, gerando maiores esforços nesta direção.

Há a presença de um alto desvio padrão da força de corte (F_c) no passe 2. Este fato evidencia que esta componente da F_u foi a mais afetada pelos esforços sofridos ao longo do processo, contendo maiores variações no comportamento quando comparado a média calculada.

4.1.3 Resultados Das Componentes Da Força De Usinagem – 1000 RPM

Na Figura 59 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 1 ($a_p = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $v_c = 238,76$ m/min (1000 RPM).

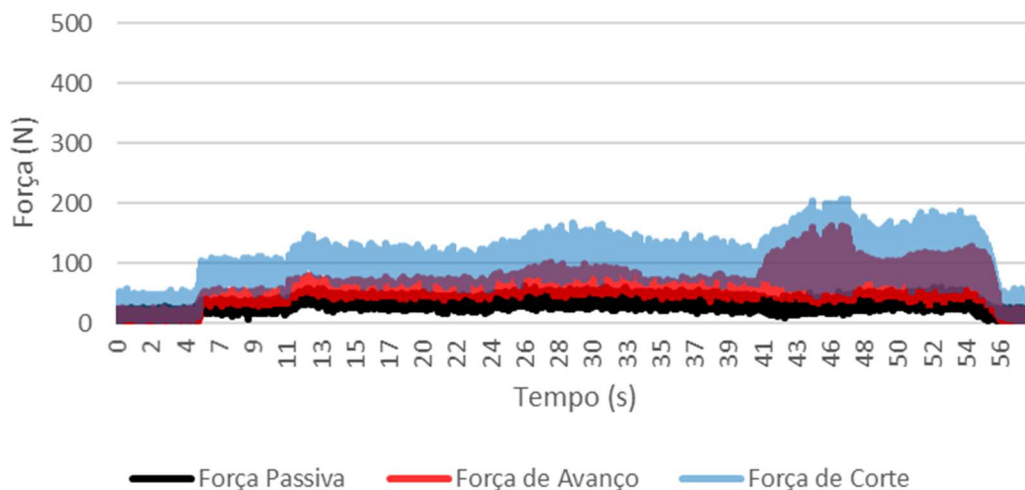


Figura 56 - Gráfico das forças de corte - Passe 1 | 1000 RPM | $vc = 238,76$ m/min/ $ap = 0,2$ mm
Fonte: Microsoft Excel

Na Figura 60 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 2 ($ap = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $vc = 238,76$ m/min (1000 RPM).

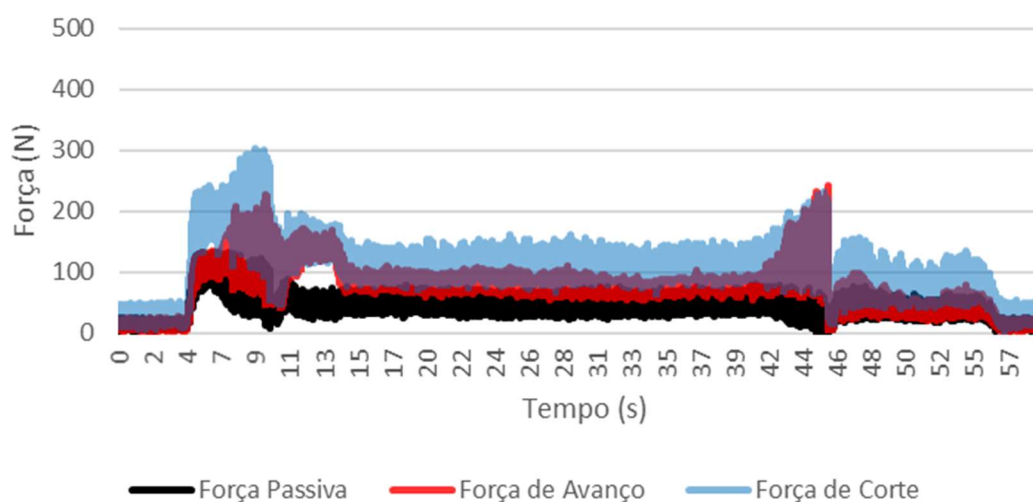


Figura 57 - Gráfico das forças de corte - Passe 2 | 1000 RPM | $vc = 238,76$ m/min/ $ap = 0,2$ mm
Fonte: Microsoft Excel

Quando se utilizou a rotação de 1000 RPM ($vc = 238,76$ m/min), durante o passe 1, nota-se uma elevação de todas as componentes (com destaque a força de avanço) ao final do processo (41 segundos). Tal fato possivelmente ocorreu pelo desgaste natural sofrido pela ponta da ferramenta, o que contribui para um maior grau de encruamento do

material, dificultado sua remoção. No início do processo durante o passe 2, há uma maior resistência ao corte, representada por picos nas componentes da força de usinagem no geral. Em seguida, estas se estabilizam possivelmente devido ao aumento da temperatura do inserto cerâmico, o que facilita o desbaste em insertos deste tipo de material [EBRAHIMI E MOSHKARSAR, 2009; KLOCKE, 2011; MACHADO et al., 2015]. Ao final do processo há a elevação das componentes das forças seguido de um vale, indicando uma possível dificuldade encontrada para a remoção de cavaco.

A Figura 61 mostra o resultado comparativo entre as médias das componentes de usinagem referente aos dois passes aplicados utilizando-se $vc = 238,76$ m/min. Uma faixa (cor vermelha) foi adicionada exibindo o desvio padrão apresentado.

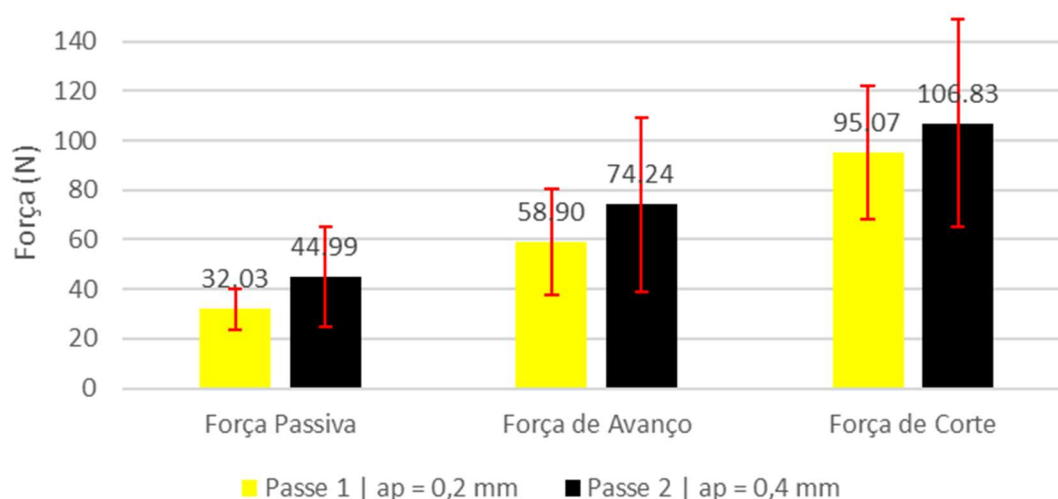


Figura 58 - Média das componentes da força de usinagem 1000 RPM e Desvio Padrão | $vc = 238,76$ m/min
Fonte: Microsoft Excel

Relativo as médias das forças de usinagem utilizando a rotação de 1000 RPM ($vc = 238,76$ m/min), há um leve acréscimo nas três componentes durante o passe 2, devido ao encruamento sofrido durante o passe 1 e ao desgaste da ferramenta.

Neste caso, há a presença de baixos valores de desvio padrão, evidenciando um comportamento mais homogêneo e estável das componentes da F_u durante o processo.

4.1.4 Resultados Das Componentes Da Força De Usinagem – 1250 RPM

Na Figura 62 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 1 ($ap = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $vc = 298,45$ m/min (1250 RPM).

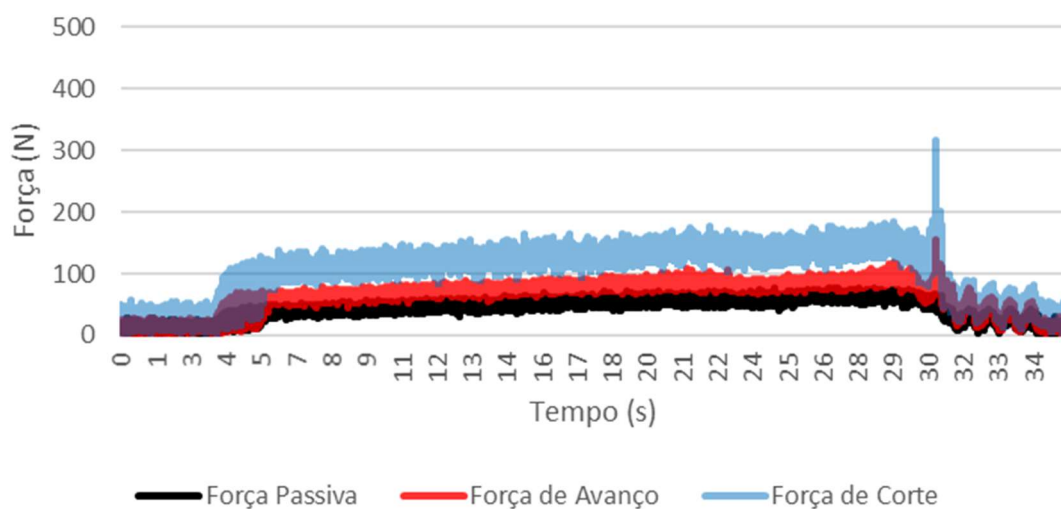


Figura 59 - Gráfico das forças de corte - Passe 1 | 1250 RPM | $vc = 298,45$ m/min/ $ap = 0,2$ mm
Fonte: Microsoft Excel

Na Figura 63 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 1 ($ap = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $vc = 298,45$ m/min (1250 RPM).

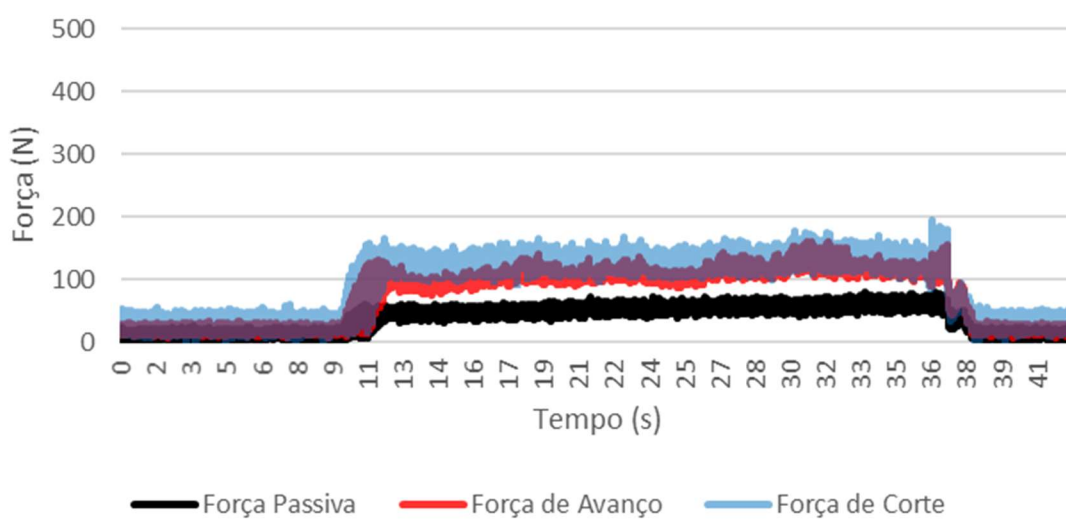


Figura 60 - Gráfico das forças de corte - Passe 2 | 1250 RPM | $vc = 298,45$ m/min/ $ap = 0,2$ mm
Fonte: Microsoft Excel

Quando se foi utilizado a rotação de 1250 RPM, a velocidade de corte ($v_c = 298,45$ m/min) se aproximou da faixa recomendada pelo fabricante como se mostrou na Figura 32. Nota-se uma faixa bastante igualitária e estável quanto aos valores das componentes da força de corte nos dois passes aplicados. No passe 1 (próximo a marca de 30 segundos) houve um pico na F_c (força de corte) seguido de um comportamento oscilatório das componentes. Isto possivelmente ocorreu por um lascamento na ponta da ferramenta de corte. Como o material cerâmico possui uma dureza elevada e menor tenacidade, há a possibilidade de quebra da ferramenta devido a sua fragilidade. Quando este fenômeno ocorre, há uma elevação nos valores da F_u seguido de uma oscilação com um padrão relativamente estabelecido, pelo avanço da ferramenta realizado a remoção do material com uma quebra em sua aresta de corte.

A Figura 64 mostra o resultado comparativo entre as médias das componentes de usinagem referente aos dois passes aplicados utilizando-se $v_c = 298,45$ m/min. Uma faixa (cor vermelha) foi adicionada exibindo o desvio padrão apresentado.

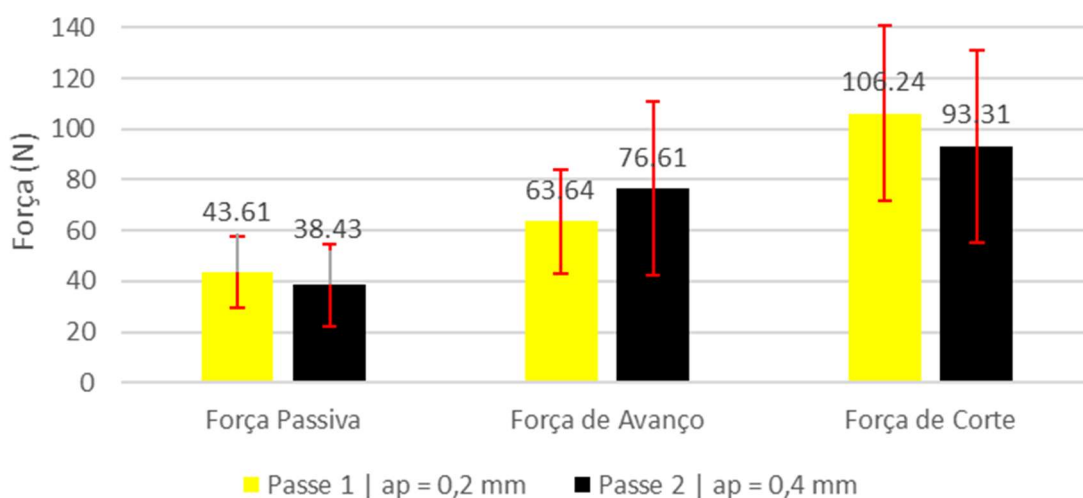


Figura 61 - Média das componentes da força de usinagem 1250 RPM e Desvio Padrão | $v_c = 238,76$ m/min

Fonte: Microsoft Excel

Relativo as médias das forças de usinagem utilizando a rotação de 1250 RPM ($v_c = 298,45$ m/min), observou-se uma redução da F_p (força passiva) e F_c (força de corte) e um acréscimo na F_f (força de avanço) entre os passes 1 e 2. Fato este que pode ser justificado pelo lascamento ocorrido na ponta da ferramenta, pois gera um menor contato da ferramenta de corte e a amostra.

Verifica-se novamente baixos valores do desvio padrão nesta condição, evidenciando um comportamento mais estável das componentes da F_u .

4.1.5 Resultados Das Componentes Da Força De Usinagem – 1600 RPM

Na Figura 65 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 1 ($a_p = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $vc = 382,02$ m/min (1600 RPM).

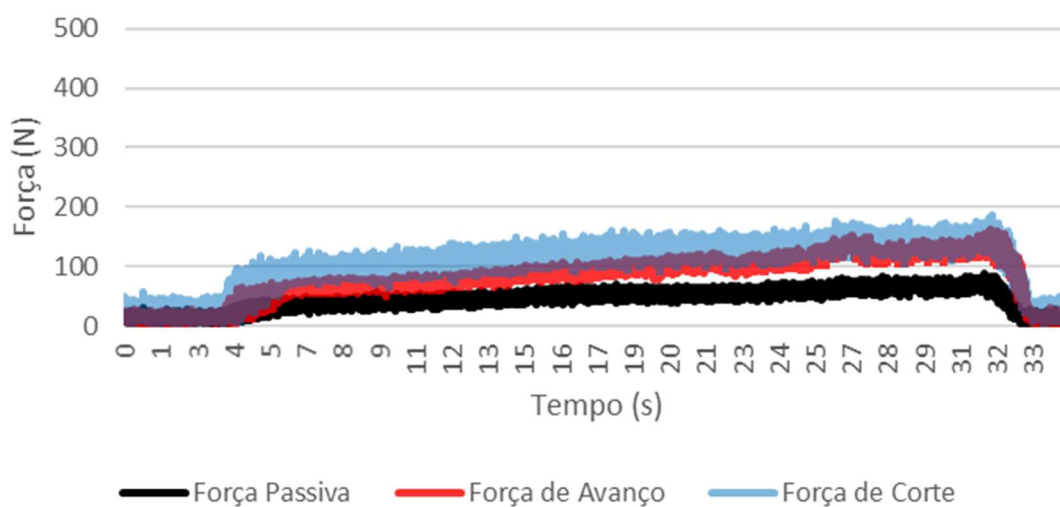


Figura 62 - Gráfico das forças de corte - Passe 1 | 1600 RPM | $vc = 382,02$ m/min/ $a_p = 0,2$ mm
Fonte: Microsoft Excel

Na Figura 66 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 2 ($a_p = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $vc = 382,02$ m/min (1600 RPM).

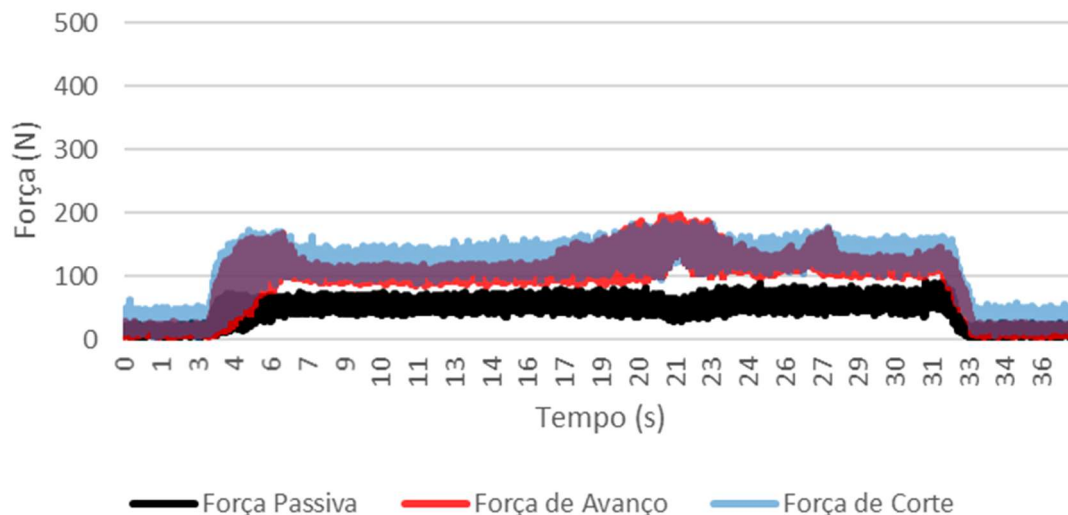


Figura 63 - Gráfico das forças de corte - Passe 2 | 1600 RPM | $v_c = 382,02$ m/min/ $a_p = 0,2$ mm
Fonte: Microsoft Excel

Quando utilizado a rotação de 1600 RPM, com velocidade de corte de $v_c = 382,02$ m/min, nota-se valores estáveis e reduzidos das componentes da força de usinagem. Durante o passe 1, há uma elevação relativamente estável e linear destes valores. No passe 2, durante o tempo de 20 segundos, percebe-se uma leve elevação dos valores apresentados, em especial sobre a F_f (força de avanço) que chega a ultrapassar a F_c (força de corte). Isto ocorreu possivelmente por um maior grau de encruamento devido ao passe anterior e ao desgaste sofrido pela ferramenta, o qual foi reduzido pelas maiores temperaturas atingidas a fim de promover a retirada de material neste trecho. Além disto, utilizando uma velocidade de avanço (v_f) e de corte (v_c) mais elevadas, a componente F_f (força de avanço) sofreu maior resistência nesta direção.

A Figura 67 mostra o resultado comparativo entre as médias das componentes de usinagem referente aos dois passes aplicados utilizando-se $v_c = 382,02$ m/min. Uma faixa (cor vermelha) foi adicionada exibindo o desvio padrão apresentado.

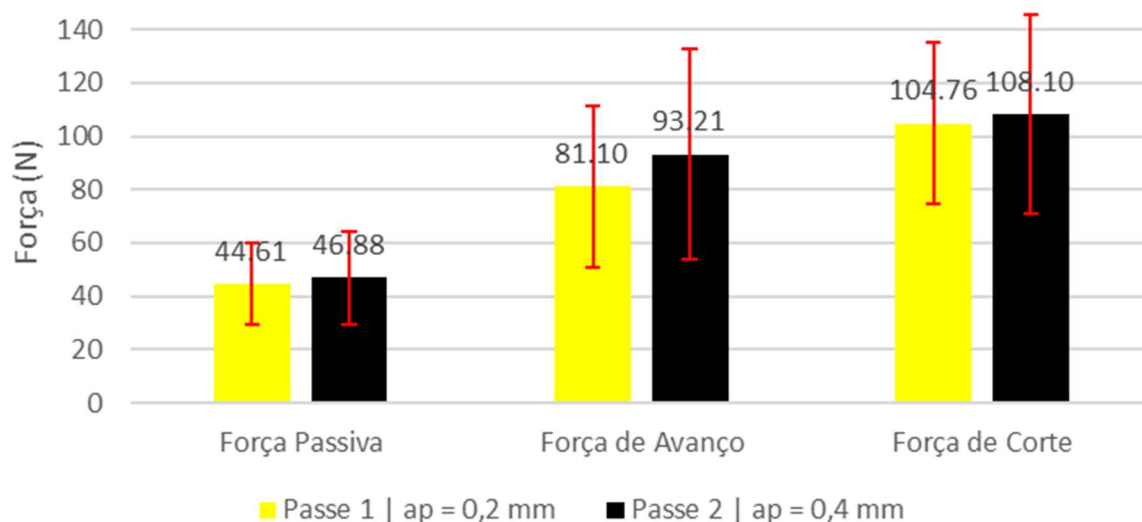


Figura 64 - Média das componentes da força de usinagem 1600 RPM e Desvio Padrão | $v_c = 382,02$ m/min

Fonte: Microsoft Excel

Relativo às médias das forças de usinagem utilizando a rotação de 1600 RPM ($v_c = 382,02$ m/min), nota-se uma pequena elevação das três componentes quando realizado o passe 2, devido ao encruamento causado pelo passe anterior. Os valores finais atingidos são considerados baixos e estáveis, mostrando desta maneira que esta se dá como uma boa faixa de trabalho para este inserto cerâmico do ponto de vista das componentes da força de usinagem.

Há novamente a ocorrência de baixos valores de desvio padrão apresentados nesta condição, evidenciando um comportamento com poucas variações quando comparado a média calculada ao longo do processo.

4.1.6 Resultados Das Componentes Da Força De Usinagem – 2500 RPM

Na Figura 68 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 1 ($a_p = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $v_c = 596,9$ m/min (2500 RPM).

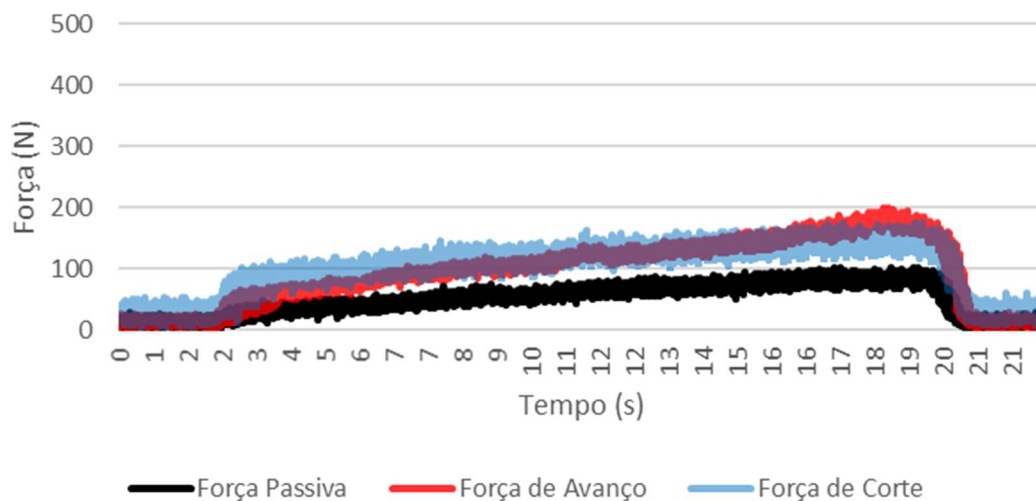


Figura 65 - Gráfico das forças de corte - Passe 1 | 2500 RPM | $v_c = 596,90$ m/min/ $a_p = 0,2$ mm
Fonte: Microsoft Excel

Na Figura 69 está sendo mostrado o gráfico referente ao comportamento das componentes da força de usinagem (F_p , F_f e F_c) no passe 2 ($a_p = 0,2$ mm) quando utilizado a velocidade de corte de $v_c = 596,9$ m/min (2500 RPM).

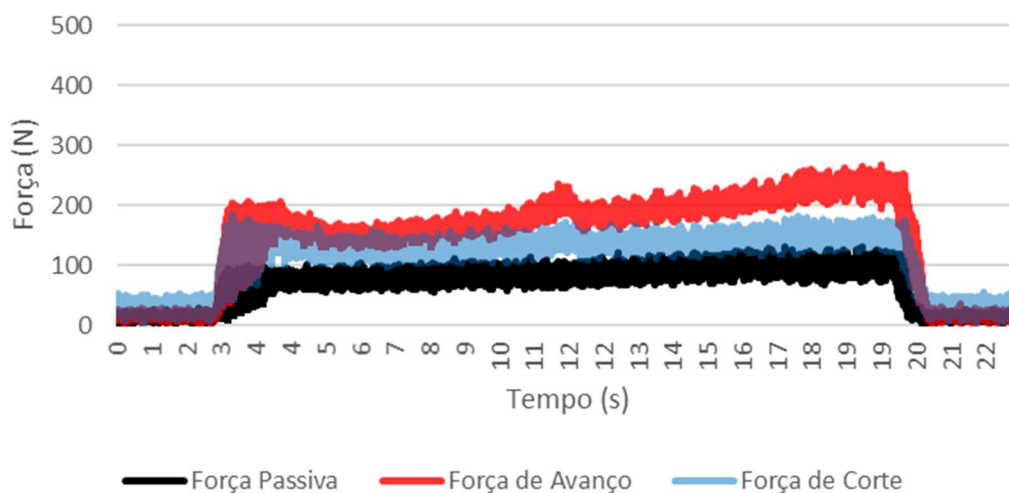


Figura 66 - Gráfico das forças de corte - Passe 2 | 2500 RPM | $v_c = 596,90$ m/min/ $a_p = 0,2$ mm
Fonte: Microsoft Excel

Aplicou-se a rotação de 2500 RPM (capacidade máxima de rotação do torno utilizado neste estudo), gerando a velocidade de corte de $v_c = 382,02$ m/min. Verifica-se um comportamento estabilizado e homogêneo das componentes da força de usinagem, em ambos os passes, tendo sido mais linearmente crescente durante o passe 1. Durante o passe 1, a F_f (força de avanço) ultrapassa a F_c (força de corte) somente ao final do processo. Durante o passe 2, tal fato ocorre durante todo o experimento. Isso possivelmente ocorreu devido a alta velocidade de avanço (v_f) aplicada juntamente com

o desgaste da ferramenta. Com esta alta velocidade de avanço, a F_f (força de avanço) enfrenta maior resistência nesta direção. Além disso, nota-se valores mais elevados das três componentes da força durante o passe 2, quando comparado ao restante dos resultados obtidos. Porém, mesmo com tal comprovação, é notório um comportamento considerado estável e linear das componentes, do início ao final do processo. Isto evidencia o bom desempenho do inserto cerâmico quando utilizado em altas velocidades de cortes em materiais endurecidos, pois como já mencionado anteriormente, essas velocidades elevadas aumentam a temperatura da zona que está sendo usinada, causando desta maneira o amolecimento do material que está sendo retirado e o aumento da dureza a quente do inserto aplicado.

A Figura 70 mostra o resultado comparativo entre as médias das componentes de usinagem referente aos dois passes aplicados utilizando-se $v_c = 596,9$ m/min. Uma faixa (cor vermelha) foi adicionada exibindo o desvio padrão apresentado.

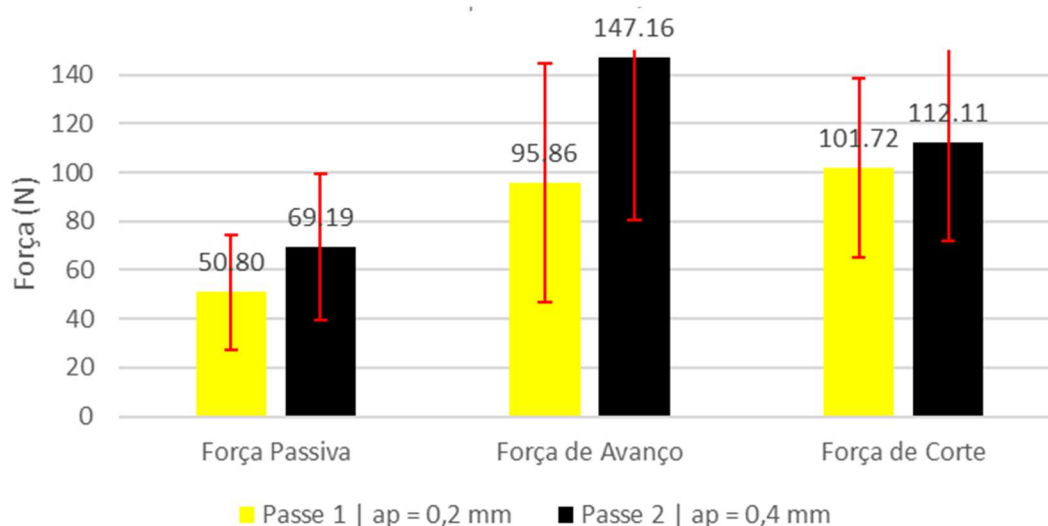


Figura 67 - Média das componentes da força de usinagem 2500 RPM e Desvio Padrão | $v_c = 596,9$ m/min

Fonte: Microsoft Excel

Observando-se as médias das componentes da força de usinagem, verifica-se um acréscimo dos seus valores durante o passe 2, em especial a F_f (força de avanço), a qual apresentou a maior diferença nesse quesito (justificativa já apresentada anteriormente).

Altos valores de desvios padrão são notados na F_f e F_c , evidenciando um comportamento mais instável e com maiores variações nos valores das componentes quando comparados a média calculada ao longo do processo.

4.1.7 Resultados Das Médias Das Forças Passivas E Desvio Padrão

Diante dos resultados apresentados, formulou-se também um comparativo entre as médias de cada uma das componentes da força de usinagem com as devidas rotações aplicadas em cada um dos passes.

Na Figura 71 está sendo representado o comparativo das médias das Forças Passivas (F_p) utilizando-se as variações aplicadas de velocidade e condição da ferramenta de corte. As faixas representam o desvio padrão referente as forças em cada velocidade de corte aplicada.

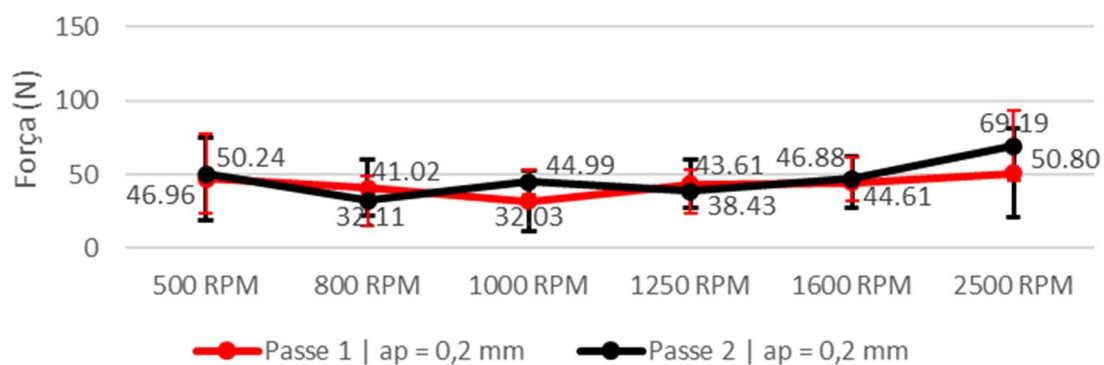


Figura 68 - Média das Forças Passivas e Desvio Padrão
Fonte: Microsoft Excel

É notório valores das médias da força passiva (F_p) mais inferiores quando comparado as demais médias das componentes da força de usinagem. Isto pois esta componente da força de usinagem não possui como atribuição principal a remoção de material, mas sim de fornecer precisão dimensional durante o processo (KURT, 2015).

Verifica-se valores menores da média da força passiva no passe 2 quando comparado aos valores do passe 1 somente quando utilizado a rotação de 800 RPM ($v_c = 191,01$ m/min) e 1250 RPM ($v_c = 298,45$ m/min).

4.1.8 Resultados Das Médias Das Forças de Avanço E Desvio Padrão

Na Figura 72 está sendo representado o comparativo das médias das Forças de Avanço (F_f) utilizando-se as variações aplicadas de velocidade e condição da ferramenta de corte. As faixas representam o desvio padrão referente as forças em cada velocidade de corte aplicada.

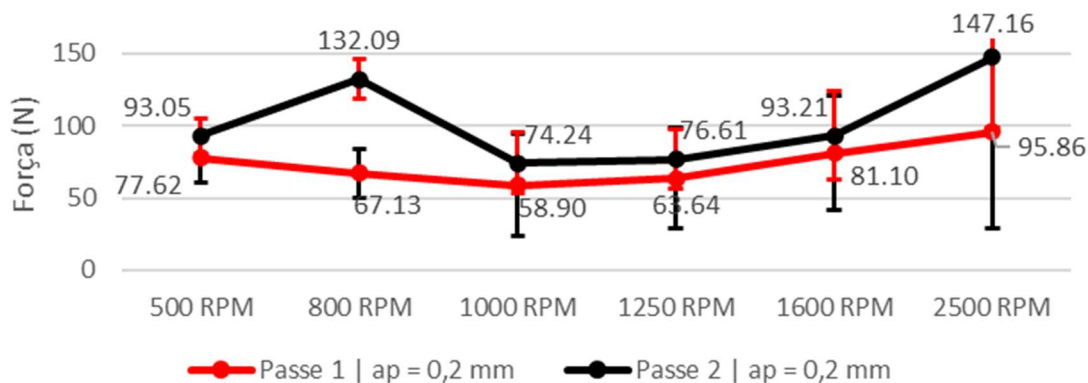


Figura 69 - Média das Forças de Avanço e Desvio Padrão
Fonte: Microsoft Excel

Quando são analisadas as médias das forças de avanço (F_f), verifica-se valores mais elevados e representativos. Isto porque esta componente da força de usinagem é uma das principais responsáveis pela remoção de material durante o processo, junto com a força de corte (DINIZ, 2010). É perceptível valores mais altos desta componente no passe 2 quando utilizado as rotações de 800 RPM ($v_c = 191,01$ m/min) e 2500 RPM ($v_c = 596,9$ m/min). Pelo padrão apresentado pelo gráfico é possível notar facilmente um comportamento não esperado quando utilizou-se a rotação de 800 RPM. Com exceção deste caso, é notório um comportamento relativamente linear das médias da força de avanço apresentadas. A elevação os valores a partir da zona central do gráfico pode ser justificado por um maior grau de encruamento do material causado pelo passe 1 (quando analisado os valores do passe 2), a elevação da velocidade de avanço (v_f) com o aumento das rotações aplicadas e ao desgaste da ferramenta, havendo a necessidade de estudos mais profundos para maior assertividade dentre as hipóteses.

4.1.9 Resultados Das Médias Das Forças de Corte E Desvio Padrão

Na Figura 73 está sendo representado o comparativo das médias das Forças de Corte (F_c) utilizando-se as variações aplicadas de velocidade e condição da ferramenta de corte. As faixas representam o desvio padrão referente as forças em cada velocidade de corte aplicada.

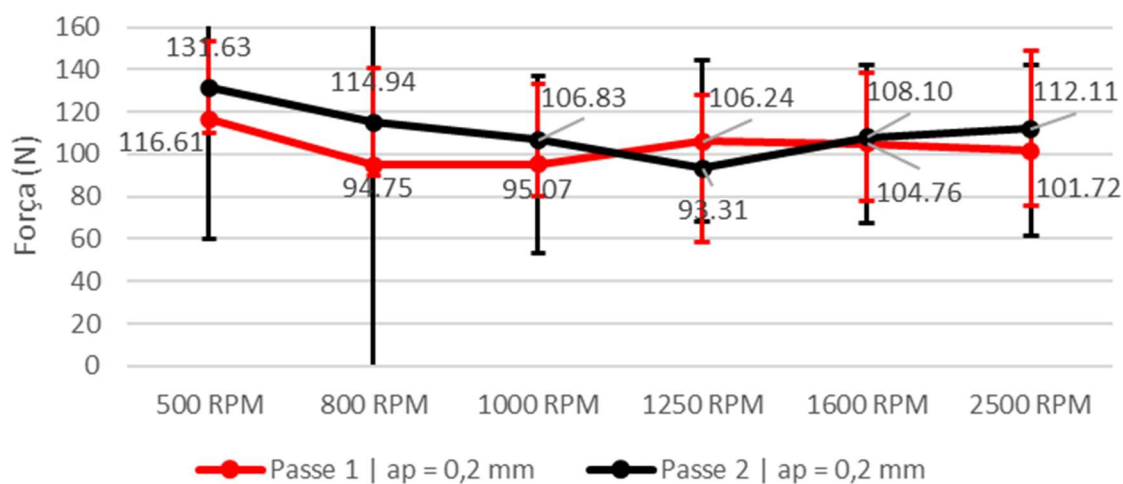


Figura 70 - Média das Forças de Corte e Desvio Padrão
Fonte: Microsoft Excel

Verificando-se os valores das médias das forças de corte (F_c), percebe-se a presença de valores mais elevados deste estudo, distribuídos de maneira constante e sem muitas variações ou discrepâncias. Tais resultados mostram conforto e bom desempenho do inserto cerâmico utilizado para realizar o processo de usinagem em um material endurecido. Somente quando utilizado a rotação de 1250 RPM ($v_c = 298,45$ m/min), a média desta componente apresentou valores maiores no passe 1 quando comparado ao passe 2, tendo todo o restante apresentado maiores valores durante o passe 2, sendo isto justificado pelo encruamento do material ocasionado durante o passe 1. Também é notório que os maiores valores são apresentados quando utilizou-se as menores velocidades de corte, havendo uma redução gradual dos valores das componentes ao longo do processo. Este fato evidencia que há menores esforços para realizar a remoção do material com o aumento das velocidades empregadas, devido ao aumento da temperatura envolvida no processo, fato este esperado de acordo com a literatura verificada.

4.2 RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE

Após a finalização de cada passe de retirada de material, realizou-se quatro registros das rugosidades da superfície do corpo de prova com o auxílio do rugosímetro *Mitutoyo*. Registrou-se os valores de Ra (rugosidade média), Rq (desvio médio quadrático), Rz (rugosidade média parcial) e Rt (rugosidade total). Os dados estão representados na Tabela 13 abaixo.

Tabela 13 - Dados de rugosidades adquiridos durante o processo de usinagem do corpo de prova.
Fonte: Autor

AMOSTRA 2	PASSE 1 $a_p = 0,2 \text{ mm}$				AMOSTRA 2	PASSE 2 $a_p = 0,4 \text{ mm}$			
	Ra	Rq	Rz	Rt		Ra	Rq	Rz	Rt
500 RPM $vc = 119,38 \text{ m/min}$	3.29	4.112	25.022	39.651	500 RPM $vc = 119,38 \text{ m/min}$	3.617	5.07	28.584	28.508
	3.674	5.026	29.437	55.299		4.724	6.46	32.999	36.54
	4.094	5.115	24.31	35.504		4.616	6.114	27.872	33.489
	3.795	5.325	30.091	40.741		5.219	7.017	33.653	41.02
800 RPM $vc = 191,01 \text{ m/min}$	3.005	4.584	29.358	30.905	800 RPM $vc = 191,01 \text{ m/min}$	5.111	7.036	32.92	41.469
	2.614	4.05	26.63	41.914		5.342	7.659	30.192	46.795
	3.389	5.269	31.52	49.596		5.797	7.812	35.082	44.28
	2.842	3.996	25.82	32.264		5.652	7.482	29.382	44.66
1000 RPM $vc = 238,76 \text{ m/min}$	2.236	3.576	24.253	37.994	1000 RPM $vc = 238,76 \text{ m/min}$	2.75	4.091	22.691	35.595
	2.795	4.391	27.636	43.507		3.375	5.167	26.074	30.667
	1.878	2.737	18.772	24.219		2.904	3.668	17.21	19.95
	2.22	3.233	21.806	39.758		3.951	5.612	20.244	27.091
1250 RPM $vc = 298,45 \text{ m/min}$	3.28	4.627	30.928	38.511	1250 RPM $vc = 298,45 \text{ m/min}$	3.311	4.658	29.366	30.422
	3.259	4.54	26.723	37.798		3.889	5.617	25.161	29.985
	2.475	3.633	24.59	40.072		4.475	6.333	23.028	40.422
	2.958	4.084	27.166	37.467		3.743	5.018	25.604	28.575
1600 RPM $vc = 382,02 \text{ m/min}$	2.801	4.09	26.382	36.839	1600 RPM $vc = 382,02 \text{ m/min}$	5.079	6.903	27.944	40.969
	3.396	5.231	33.487	53.369		8.11	9.875	35.049	49.107
	4.205	5.782	31.93	47.088		6.163	8.115	33.492	42.859
	3.693	5.399	34.123	55.11		6.455	8.797	35.685	48.407
2500 RPM $vc = 596,90 \text{ m/min}$	3.403	4.994	27.961	46.867	2500 RPM $vc = 596,90 \text{ m/min}$	3.319	5.184	30.523	34.064
	2.229	3.267	22.263	36.107		2.885	3.865	24.825	23.764
	2.325	3.275	22.233	31.981		2.757	4.131	24.795	26.854
	3.225	4.467	24.229	32.788		2.009	3.035	26.791	23.218

A Tabela 14 mostra os valores do corpo de prova após sua superfície ter passado pelo processo de retificação e polimento, tendo assim atingido condições consideradas ótimas quanto ao seu acabamento superficial.

Tabela 14 - Valores dos parâmetros das rugosidades superficiais nas condições de polido e retificado.

Médias	Polida	Retificada
Ra	0,21	1,676
Rt	6,075	13,944
Rz	3,548	7,268

4.2.1 Resultados Comparativos Dos Valores De Ra

Na Figura 74 está sendo mostrado um comparativo dos valores das médias de Ra (rugosidade média) apresentados no passe 1 e no passe 2 obtidos com as variações das velocidades de corte. São mostradas também duas linhas para fins comparativos com o estado polido (linha amarela) e retificado (linha vermelha).

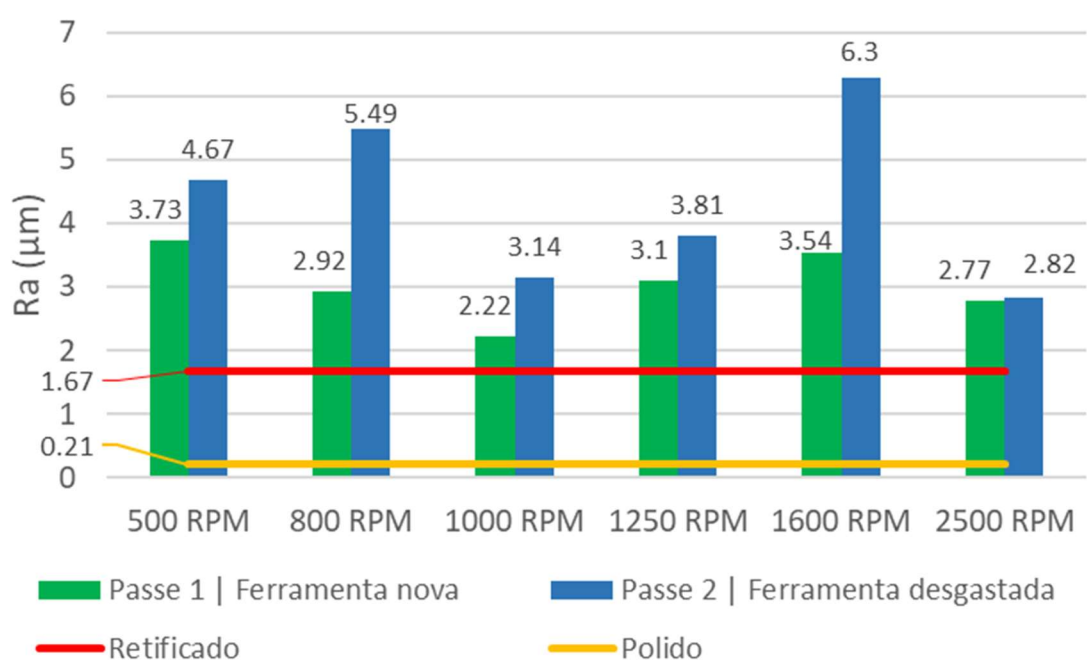


Figura 71 – Valores das médias de Ra obtidos com as variações de velocidades de corte no passe 1 e passe 2

Fonte: Microsoft Excel

Optou-se pela escolha de Ra como parâmetro comparativo deste trabalho pois é o parâmetro mais utilizado como avaliador de rugosidades em suas diversas aplicações e fornece resultados mais equilibrados e precisos em aplicações de certa generalidade (MACHADO, 2009), possibilitando desta forma uma melhor e mais fácil análise/compreensão dos resultados obtidos neste trabalho.

Além disto, como se trata de uma média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento e dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média dentro do percurso de medição, este parâmetro fornece uma boa garantia sobre a superfície geral que está sendo analisada, mesmo que não aponte tão precisamente seus picos e vales (SHAW, 1986)

Comparando-se os resultados obtidos, é possível notar que a condição que mais se aproxima dos valores dos parâmetros dos estados polido/retificado (considerados condições de superfície ideal) foi quando utilizou-se 1000 RPM ($v_c = 238,76$ m/min) no Passe 1 ($a_p = 0,2$ mm) e 2500 RPM ($v_c = 596,90$ m/min) no Passe 2 ($a_p = 0,2$ mm).

A condição utilizando 1600 RPM ($v_c = 382,02$ m/min) apresentou os maiores valores de rugosidade ao final do passe 2 ($a_p = 0,2$ mm), a tornando a mais desfavorável dentre as demais nesse estudo. O aumento do desgaste de flanco possivelmente atuou na modificação da microgeometria da ferramenta. Essa alteração, associada ao perfil da aresta de corte chanfrada e arredonda, pode ter provocado à modificação do fluxo de material, favorecendo o efeito de sulcamento. Este efeito faz com que o material à frente da aresta de corte seja severamente deformado e pressionado contra a superfície recém-formada, podendo modificar a rugosidade da superfície usinada (SHAW, 2005).

Também é notório a presença de maiores valores de Ra quando aplicou-se as menores rotações deste estudo. Tal fato evidencia a relação direta existente entre baixas velocidades de corte e baixas temperaturas envolvidas no processo com a qualidade da superfície final atingida.

4.3 Macrografias Das Superfícies

Registros fotográficos amplificados dos resultados finais (passe 2 | ferramenta desgastada) das superfícies usinadas foram registrados para fins comparativos além dos dados obtidos pelas componentes da força de usinagem e rugosidade final atingida. Estes são mostrados nas figuras abaixo.

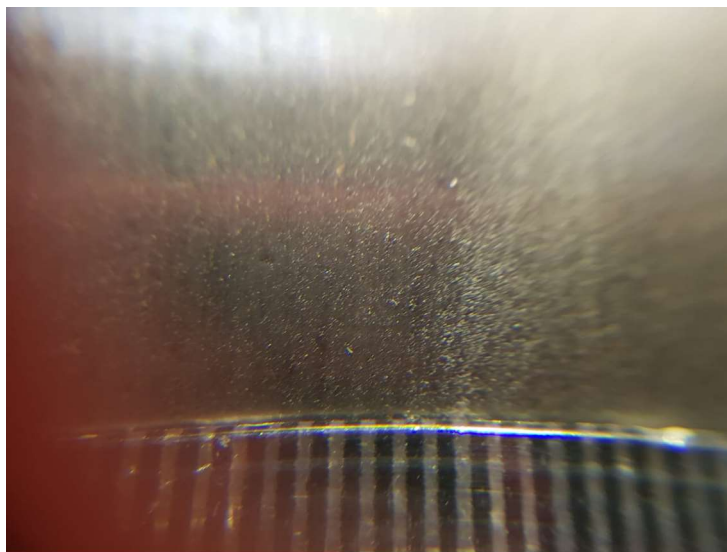


Figura 72 - Fotografia amplificada 2500 RPM ($v_c = 596,9$ m/min) | Passe 2
Fonte: Autor

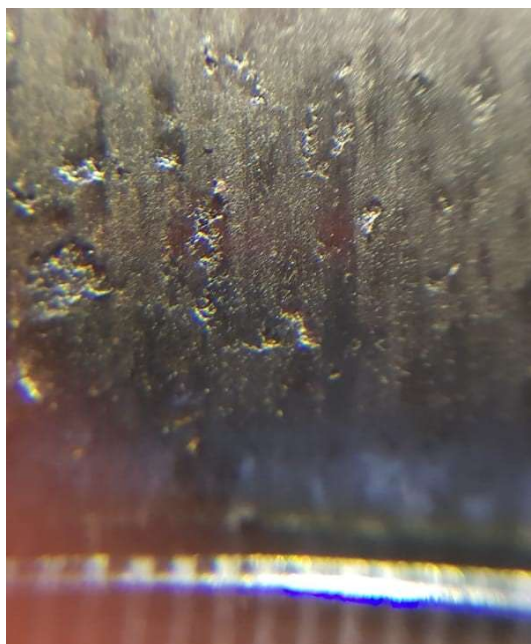


Figura 73 - Fotografia amplificada 1600 RPM ($v_c = 382,02$ m/min) | Passe 2
Fonte: Autor

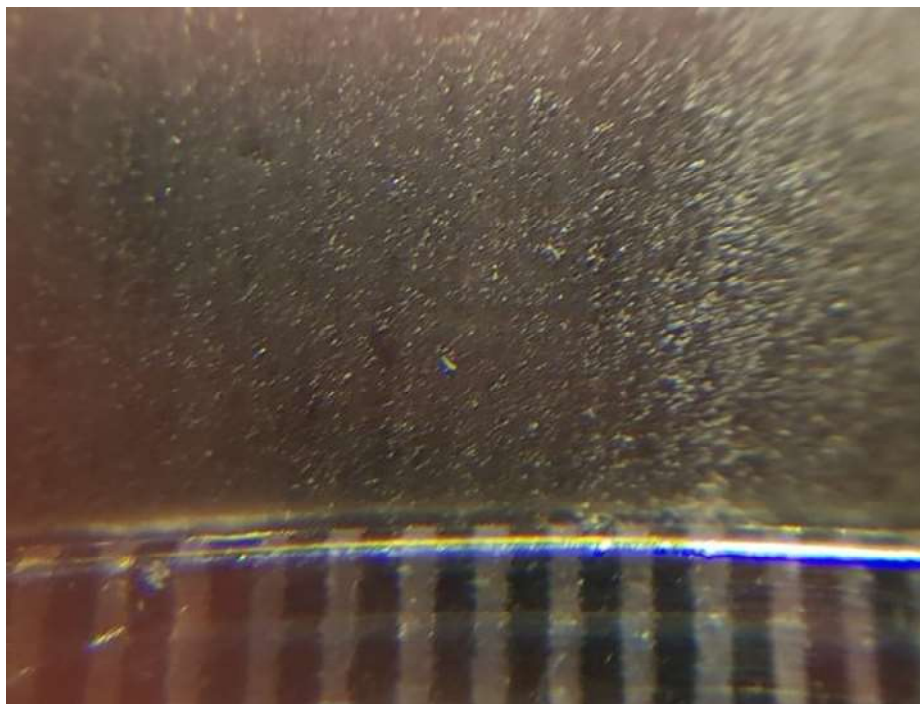


Figura 74 - Fotografia ampliada 1250 RPM ($v_c = 298,45$ m/min) | Passe 2
Fonte: Autor



Figura 75 - Fotografia ampliada 1000 RPM ($v_c = 238,76$ m/min) | Passe 2
Fonte: Autor

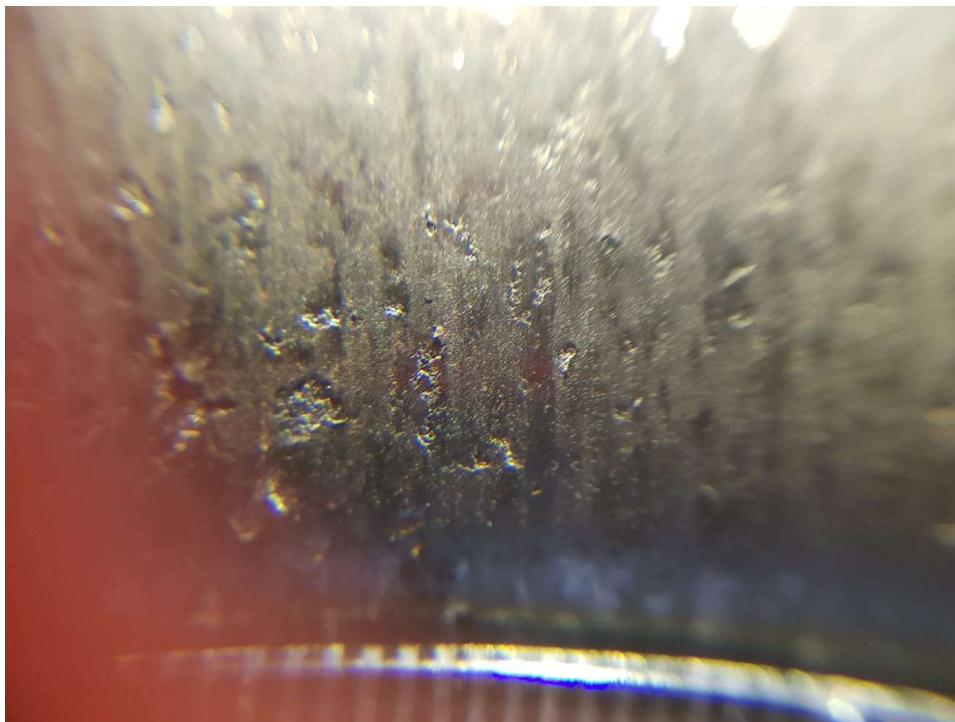


Figura 76 - Fotografia ampliada 800 RPM ($v_c = 191,01$ m/min) | Passe 2
Fonte: Autor

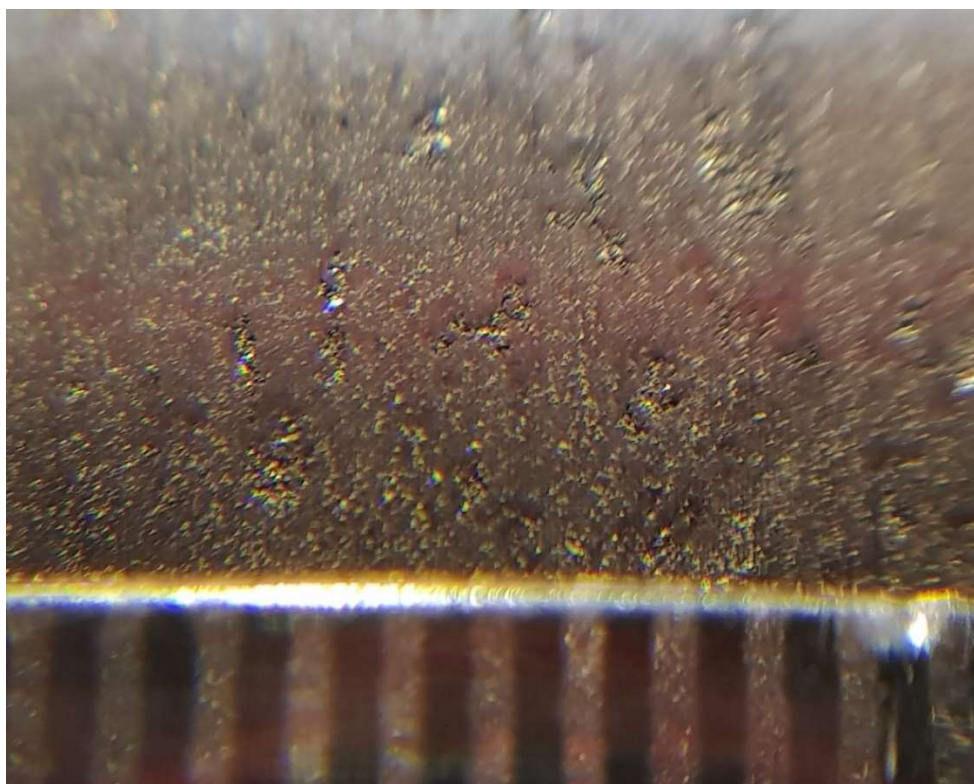


Figura 77 - Fotografia ampliada 500 RPM ($v_c = 119,38$ m/min) | Passe 2
Fonte: Autor

Pelos registros fotográficos acima, é possível verificar a expressiva melhor qualidade da integridade da superfície em dois dos casos que apresentou os menores valores de Ra (2500 RPM e 1000 RPM) e também um bom comportamento das forças de usinagem durante os dois passes de retiradas de material. Também é notório a baixa qualidade da superfície usinada no caso considerado de menor desempenho deste estudo em termos de Ra (1600 RPM).

5 CONCLUSÕES

Após a obtenção e análise dos resultados obtidos do processo de torneamento a seco do aço SAE 1020 com uma camada aspergida termicamente de liga inox martensítica 13% Cr 46 HRC utilizando ferramentas de cerâmica, pode-se listar as devidas conclusões abaixo:

- Com aumento da velocidade de corte (v_c), ocorreu um comportamento mais estável e uniforme das componentes da força de usinagem nos casos estudados, não havendo a geração de muitos picos ou vales ao longo do processo. Este fato se justifica pelo aumento da temperatura na elevação da abrasão entre a ferramenta de corte e o material, junto com o aumento da velocidade de avanço ao longo dos passes. Desta forma, há a um acréscimo considerável da dureza a quente do inserto e amolecimento do material usinado, facilitando assim o cisalhamento do material a ser removido.
- Utilizando-se a rotação de 2500 RPM ($v_c = 596,90$ m/min) no passe 2 (ferramenta desgastada) e a rotação 1000 RPM ($v_c = 238,76$ m/min) no passe 1 (ferramenta nova), obteve-se os baixos valores de Ra (rugosidade média). Além disto, utilizando-se estas velocidades de corte, obteve-se valores das componentes da força de usinagem considerados baixos e de comportamento estável ao longo do processo, tornando estes parâmetros os de melhores desempenhos deste estudo.
- Durante o passe 2 (ferramenta desgastada), utilizando-se a velocidade de corte de $v_c = 191,01$ m/min (800 RPM), observou-se a quebra da ponta do inserto cerâmico. Concluiu-se com este ponto que essa faixa de trabalho não é ideal para utilização deste inserto cerâmico, ocorrendo um alto desgaste e perda da capacidade de corte da ferramenta. Tal fato é evidenciado também pelas maiores componentes da força de usinagem apresentadas neste estudo. Essas combinações fazem com que essa condição estudada seja considerada a menos ideal desse estudo.
- Com exceção do caso em que se aplicou a rotação de 1600 RPM ($v_c = 382,02$ m/min), houve um bom desempenho do inserto cerâmico a partir do uso da rotação de 1000 RPM ($v_c = 238,76$ m/min). Concluiu-se desta maneira ótima utilização de ferramenta cerâmica para processos que necessitem envolver altas velocidades de corte, altas

temperaturas e baixo tempo de usinagem (devido a relação direta entre a rotação da máquina e a velocidade de avanço).

- A presença da relação direta entre a velocidade de corte aplicada e a qualidade da superfície final atingida. Se fez evidente que quando aplicado uma ferramenta cerâmica, velocidades de corte mais elevadas favorecem a remoção do cavaco e impactam positivamente na melhor qualidade da superfície final atingida.
- De acordo com a elevação das componentes da F_u e valores de Ra no passe 2 comparado ao passe 1, conclui-se há presença de um bom grau de encruamento do material aspergido, ocasionado pela deformação plástica da estrutura lamelar depositada. Esta deformação ocasiona em maiores esforços para realizar o cisalhamento e remoção do material aspergido, levando a uma piora da qualidade final da superfície final atingida.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. 18p. Rio de Janeiro, 2002.

ASTAKHOV, V. P. **Machining Of Hard Materials: Definitions and Industrial Applications**. In: Davim, J. D., *Machining of Hard Materials*. p. 211, 2011. Springer-Verlag: London.

AMERICAN WELDING SOCIETY, AWS International Inc. *Thermal Spraying: Practice, Theory, and Applications*. p 77. USA. 1985.

AMERICAN WELDING SOCIETY, AWS International Inc. *Thermal spraying safety. Safety and health fat*. p 20. USA. 1997.

BARTARYA, G.; CHOUDHURY, S. K. State of the Art in Hard Turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 53, p. 1-14, 2012.

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

BOING, D.; **Transição da Aplicação de Metal-duro Revestido e do PCBN no Torneamento de Aços Endurecidos em Função da Dureza e do Teor de Carbonetos**. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, 287p, 2016.

BONIARDI, M.; CASAROLI, A. **Stainless Steel. Lucefin Divisione**, 235 p, London. 2014.

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

BORDINASSI, E. C. **Contribuição ao Estudo da Integridade Superficial de um Aço Inoxidável Super-duplex após Usinagem**. Tese de doutorado em Engenharia, POLI-USP, São Paulo, SP, 221p., 2006. RUGOSIDADE.

BYRNE, G.; DORNFELD, D.; DENKENA, B. *Advancing Cutting Technology*. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 52, n. 2, p. 483-507, 2003.

CHIAVERINI, V., **Tecnologia mecânica – Processos de Fabricação Vol. II**, 2ª Ed., São Paulo, Brasil, Ed. McGraw Hill, 1986.

CHOW, Y. K.; EVANS, C. J. White Layers and Thermal Modeling of Hard Turned Surfaces. Int. **Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 19, p. 1863-1881, London, 1999.

DAVIM, J. P.; **Surface Integrity in Machining**, London, Springer-Verlag, 2008.

DE VOS, P. **Como Lidar com os Materiais de Difícil Usinagem**. Usinagem Brasil. Disponível em: < <http://www.usinagem-brasil.com.br/8987-como-lidar-com-os-materiais-de-dificil-usinagem/pa-1/> > Acesso em: 26 de agosto de 2021.

DELIJAICOV, S. **Modelagem das Tensões Residuais no Processo de Torneamento Duro de um Aço DIN 100 CrMn6 e suas Correlações com o Esforço de Corte**. São Paulo, Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 176p. 2004.

DENKENA, B.; BIERMANN, D. Cutting Edge Geometries. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 63, p. 631– 653, 2014.

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

DINIZ, A. E.; NORITOMI, P. Y. Influência dos parâmetros de corte na rugosidade de peças torneadas. Departamento de Engenharia de Fabricação, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 2002.

EBRAHIMI, A.; MOSHKARSAR, M.M. Evaluation of Machinability in Turning of Microalloyed and Quenched-Tempered Steels: Tool Wear, Statistical Analysis, Chip Morphology, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 910-921, 2009.

FERNANDES, S, F, P. **Análise Experimental das Forças de Usinagem em Torneamento de Aço Inoxidável Super Duplex**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro, 2018.

FERRARESI, D.; **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, São Paulo: Blücher, 14ª Edição, 751p, 2011.

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

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

GRIFFITHS B. **Manufacturing Surface Technology**. London, Penton Press, 231p, 2001.

GUNN, R. N. **Duplex Stainless Steel: Microstructure, Properties and Applications**. 1° ed. Cambridge: Abington Publishing, 205p. 1997.

KLOCKE, F.; BRINKSMIEIER, E.; WEINERT, K. Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. **CIRP Annals- Manufacturing Technology**, v. 54, p. 22-45, 2005.

KISTLER Control Unit for Dynamometers with Built-In Charge Amplifier Type 5233A... Instruction Manual, disponível em: < <https://www.kistler.com/?type=669&fid=72291&model=document&callee=frontend> > Acesso em: 05 de setembro de 2021.

KURT, A., YALÇIN, B. E YILMAZ, N. The cutting tool stresses in finish turning of hardened steel with mixed ceramic tool, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 80, p. 315-325, 2015.

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

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

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

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

Mitsubishi, Efeitos das Condições de Corte para o Torneamento. Disponível em: < http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/turning_function_side.html > Acesso em 03 de setembro de 2021.

MOLDE INJEÇÃO PLÁSTICOS. Parâmetros de avaliação da rugosidade - acabamento superficial - Molde Injeção Plásticos. Molde Injeção Plásticos. Disponível em: < <http://moldesinjecaoplasticos.com.br/parametros-de-avaliacao-da-rugosidade-acabamento-superficial/> > Acesso em: 27 de agosto de 2021.

Nakayama, K.; Arai, M.; Kanda, T. Machining characteristics of hard materials. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 37, p. 89-92, 1988.

NOORDIN, M. Y.; VENKATESH, V. C.; SHARIF, S. Dry turning of tempered martensitic stainless tool steel using coated cermet and coated carbide tools. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 185, p. 83–90, 2007.

NTK - NTK web.site. Ngkntk.com.br. Disponível em: < http://www.ngkntk.com.br/f_corte/default.html >. Acesso em: 4 setembro de 2021.

OUTEIRO, J. C. Optimization of machining parameters for improved surface integrity of AISI H13 tool steel. **MUGV Machines Et Usinage À Grande Vitesse**. 2012.

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

PICTORIAL SURFACE PREPARATION STANDARDS FOR PAITING STEEL SURFACES. **SIS 055900/67**. Suíça, 1967.

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

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

SANDVIK COROMANT. STEEL TURNING ENDURANCE, Disponível em: <<http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/campaigns/cutting-steel-inserts/assets/white-paper-eng.pdf>>. Acesso em: 25 de agosto de 2021.

SHAO, H.; LIU, L.; QU, H. L. **Machinability Study on 3%Co–12%Cr Stainless Steel in Milling**. **Wear**, v. 263, p. 736–744, 2007.

SHARMAN, A. R. C.; HUGHES, J. I.; RIDGWAY, K. An Analysis of the residual Stresses Generated in Inconel 718 When Turning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 173, p. 359-367, 2006.

SHAW, M. C. **Metal cutting Principles**. USA: Oxford University, 594p, 1986.

THORPE, M. L. **Thermal spray – industry in transition**. **Advanced Materials & Process**, v.5, p.50-61, 1993.

TÖNSHOFF, H.K.; ARENDT, C.; AMOR, R. Cutting of hardened steel. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 49, p. 547-566, 2000.

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