



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DIRCT / DIRGRAD / DECEN

CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

DISCIPLINA PROJETO FINAL II

BRUNO JULIANI DE NIGRO

RICARDO MEDEIROS VILLA

**ENSAIO DE USINABILIDADE EM LIGA INCONEL 625 POR
TORNEAMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

BRUNO JULIANI DE NIGRO

RICARDO MEDEIROS VILLA

ENSAIO DE USINABILIDADE EM LIGA INCONEL 625 POR TORNEAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à disciplina Projeto Final II do Curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial Mecânico.


Orientador: Prof. Pedro Luiz Fiad do Amaral, Eng.

CURITIBA

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa " ENSAIO DE USINABILIDADE EM LIGA INCONEL 625 POR TORNEAMENTO", realizado pelo alunos Bruno Juliani de Nigro e Ricardo Medeiros Villa, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.



Prof. Pedro Luiz Fiad do Amaral
DAMEC, UTFPR
Orientador



Prof. Dr. Daniel Hioki
DAMEC, UTFPR
Avaliador



Prof. Dr. Milton Luiz Polli
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 07 de maio de 2013.

RESUMO

NIGRO, Bruno J.; VILLA, Ricardo M. Ensaio de Usinabilidade em Liga Inconel 625 por Torneamento. Curitiba, 2013. 77 f. Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Mecânica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

A usinabilidade é um importante fator nos processos de usinagem, porém sua avaliação não é simples, já que depende diretamente de diversos fatores e variáveis, como: o par ferramenta/peça, processo utilizado e os parâmetros de corte. Neste trabalho é apresentada uma avaliação da usinabilidade do Inconel 625 pelo processo de torneamento cilíndrico externo. As superligas a base de níquel, como o caso do Inconel 625, caracterizam-se como materiais de difícil usinabilidade por ser uma liga de alta resistência ao calor e alta resistência mecânica com rápido encruamento. O presente trabalho tem por objetivo avaliar a usinagem deste material, simulando a condição de corte real do Inconel 625 depositado. Para isso, a amostra foi submetida a ensaios de vida da ferramenta, analisada para quatro velocidades diferentes conforme a norma ISO 3685, análise da qualidade superficial da peça através da medição de rugosidade e por fim, com um dinamômetro piezelétrico, a força de corte do processo foi medida em seis condições de corte diferentes. Para todos os ensaios a ferramenta de corte utilizada foi a TNMG 16 04 04-MF GC1125. Concluiu-se que para a velocidade de corte de 40 m/min, a ferramenta apresentou o maior tempo de vida, ficando próximo aos 22 minutos. A menor rugosidade foi evidenciada na velocidade de 45 m/min, onde o valor médio obtido foi 1,15 μm . Com os valores das forças de corte, foram obtidas as pressões específicas de corte para cada condição, apresentando valores entre 4082 e 5204 kN/mm^2 .

Palavras-chave: força, usinagem, vida de ferramenta, acabamento.

ABSTRACT

NIGRO, Bruno J.; VILLA, Ricardo M. Ensaio de Usinabilidade em Liga Inconel 625 por Torneamento. Curitiba, 2013. 77 f. Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Mecânica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

The machinability is an important factor in machining processes, but their evaluation is not simple, since it directly depends on many factors and variables, such as the pair tool / workpiece, the process and cutting parameters. This paper presents an evaluation of the machinability of Inconel 625 by the process of turning outer cylindrical. The nickel base superalloys such as Inconel case 625, are characterized as materials difficult to machine to be an alloy of high heat resistance and high mechanical strength with a fast hardening. This study aims to evaluate the machining of this material, simulating the condition of the royal court of Inconel 625 deposit. For this, the sample was subjected to testing tool life analyzed for four different speeds according to ISO 3685, analysis of the quality workpiece surface by measuring the roughness and lastly with a piezoelectric dynamometer, the force of the cutting process was measured at six different cutting conditions. For all tests the cutting tool used was TNMG 16 04 04-MF GC1125. It was concluded that the cutting speed to 40 m / min, the tool had the longest life, remaining next to 22 minutes. The lowest roughness was observed at the speed of 45 m / min, where the average value obtained was 1.15 micrometers. With the values of the cutting forces, the pressures were obtained for each specific cutting condition, with values between 4082 and 5204 kN/mm².

Keywords: force, machining, tool life, surface finishing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Torneamento cilíndrico externo.....	14
Figura 2 - Torneamento cilíndrico interno.....	15
Figura 3 - Identificação dos parâmetros de penetração da ferramenta	16
Figura 4 - Inserto de metal duro.	17
Figura 5 - Porta-ferramenta Sandvik.	17
Figura 6 - Arestas e superfícies constituintes de uma ferramenta de corte conforme norma NBR 6163	24
Figura 7 - Identificação dos planos de referência de uma ferramenta de toronar de acordo com o sistema Ferramenta na Mão.....	25
Figura 8 - Identificação dos ângulos de uma ferramenta de torneamento.	26
Figura 9 - Gráfico Tempo de vida de ferramenta x velocidade de corte	29
Figura 10 - Tipos de desgaste e variáveis de medição em ferramentas de usinagem	30
Figura 11- Desgaste V_b x Tempo de corte T_c	31
Figura 12 - Desgaste para ferramentas variadas.	32
Figura 13 - Força de Usinagem e suas componentes F_f e F_c	33
Figura 14 - Comportamento da Força de corte em função da profundidade de corte e da velocidade de avanço.....	34
Figura 15 – Parâmetro R_a : média aritmética da soma de cada vale e cada pico.....	36
Figura 16 - Rugosidade R_z : distância entre o pico mais alto e o vale mais fundo.....	36
Figura 17 - Tabela relacionando processos de fabricação com a rugosidade R_a	38
Figura 18 - Tubo com Inconel depositado internamente	42
Figura 19 - Coletor de escape em Inconel.	43
Figura 20 – Tubo API 5L com deposição de Inconel 625.	45
Figura 21 – Tampa e cilindro de aço soldado no tubo API 5L.....	46

Figura 22 – Barras soldadas para a furação de centro.	47
Figura 23 – Uso de cegonha para colocação da peça no torno.	48
Figura 24 – Peça presa na máquina	48
Figura 25 - Foto do Centro de Torneamento Romi GL 240.....	49
Figura 26 - Torno Romi Imor S-400 II.....	50
Figura 27 - Foto do porta-ferramenta.	51
Figura 28 - Foto do Inserto <i>Sandvik Coromant</i>	52
Figura 29- Equipamento ótico.	53
Figura 30 – Rugosímetro e dispositivo para medição da rugosidade superficial.....	54
Figura 31 - Dinamômetro e ferramenta montado no torno.	55
Figura 32 - Amplificador de sinais.	56
Figura 33- Condições-limites de corte.....	60
Figura 34 - Curvas tempo (t) vs. desgaste do flanco (<i>VBB</i>) para diferentes velocidades de corte.	61
Figura 35 – Sequência de desgaste da ferramenta para velocidade de corte <i>VC1 = 50 m/min.</i>	62
Figura 36 - Curva de comparação entre ensaios.	63
Figura 37 - Gráficos Desgaste (<i>VBB</i>) x Tempo de vida (<i>TV</i>)	65
Figura 38 - Tempo de vida (<i>TV</i>) vs velocidade de corte (<i>VC</i>).....	66
Figura 39 - Rugosidade média vs desgaste	68
Figura 40 - Rugosidade (média das médias) vs velocidade de corte.....	69
Figura 41 - Rugosidade vs comprimento de corte.....	70
Figura 42 – Resultado gráfico Força de corte x Avanço.....	71
Figura 43 – Linearização da equação de Kienzle.....	72
Figura 44 – Constantes de Kienzle	73
Figura 45 - Cavaco após ensaios de tempo de vida. <i>f = 0,1mm/rev</i> e <i>ap = 0,8mm.</i>	74

Figura 46 - Serrilhado na peça usinada	75
Figura 47 - Classe ferramentas e suas aplicações.....	81
Figura 48 - Formas de cavacos.....	82
Figura 49 - Catálogo <i>Sandvik</i>	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição das ligas Inconel em %.....	40
Tabela 2 - Propriedades do Inconel 625 a 21°C.....	43
Tabela 3 - Composição média do tubo API5L.....	46
Tabela 4 - Principais especificações do Centro de Torneamento Romi 240 GL	50
Tabela 5 - Características técnicas do rugosímetro <i>Supertronic 25</i>	54
Tabela 6 – Condições padronizadas de corte.....	57
Tabela 7 - Valores de avanço e profundidade para ensaio de força	59
Tabela 8 – Resultados obtidos para dois ensaios com a mesma <i>VC</i>	63
Tabela 9 - Resultados obtidos nos ensaios de vida da ferramenta.....	64
Tabela 10 - Valores de rugosidade para cada velocidade de corte ensaiada.....	67
Tabela 11 - Média dos valores de rugosidade.....	68
Tabela 12 - Ra (média das médias).....	68
Tabela 13 – Dados para determinação dos coeficientes de Kienzle	72
Tabela 14 – Pressão específica k_c (N/mm ²) durante usinagem Inconel 625	73
Tabela 15 - Cavaco obtido no ensaio de força. <i>VC = 29 m/min, f = 0,1 mm/rev</i> e <i>ap = 0,8 mm e 1,0 mm</i>	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contexto	11
1.2	Objetivos	13
1.3	Justificativa	13
1.4	Conteúdo do trabalho	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	Torneamento	14
2.1.1	Ferramenta utilizada no torneamento cilíndrico externo	16
2.1.2	Material para Ferramenta	18
2.1.3	Geometria da Ferramenta de Corte	24
2.1.4	Fluído de Corte	26
2.2	Usinabilidade	27
2.2.1	Vida da ferramenta	28
2.2.2	Forças de usinagem	32
2.2.3	Qualidade Superficial	34
2.2.4	Formação de cavacos	38
2.3	Desgaste da Ferramenta	39
2.3.1	Abrasão	39
2.3.2	Adesão	39
2.3.3	Difusão	39
2.3.4	Oxidação	40
2.4	INCONEL	40
2.4.1	Classificação e composição das ligas Inconel	40
2.4.2	Aplicações	42
2.4.3	Propriedades	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	Materiais de trabalho	45
3.1.1	Corpos de Prova	45
3.1.2	Tornos	49
3.1.3	Ferramenta de Corte	50
3.1.4	Fluídos de Corte	52
3.1.5	Equipamento Óptico	52
3.1.6	Rugosímetro	53
3.1.7	Dinamômetro	55
3.2	Metodologia	56
3.2.1	Critério de vida de ferramenta	56
3.2.1.2	Vida da ferramenta	58
3.2.1.3	Repetibilidade	58
3.2.2	Qualidade superficial	59
3.2.3	Força de corte	59
3.2.4	Cavaco	60
3.2.5	Planejamento experimental	60
3.2.5.1	Curva de vida de ferramenta e rugosidade	60
3.2.5.2	Força de usinagem	61

4	RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES	62
4.1	Resultados dos ensaios em função do tempo de vida da ferramenta	62
4.2	Resultados dos ensaios de acabamento superficial	67
4.4	Resultado da análise de cavacos	73
5	Conclusão	76
	REFERÊNCIAS	78
	ANEXO 1 – classificação e aplicação de ferramentas	81
	ANEXO 2 – Formas de cavacos	82
	ANEXO 3 – CATÁLOGO SANDVIK	83
	ANEXO 4 – série geométrica de números preferenciais	84

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

O processo de usinagem consiste em dar formas finais a peças por remoção de material utilizando uma ferramenta de corte, permitindo assim obter peças com as mais variadas formas. Sua utilização pode ser observada tanto em pequenas oficinas como também em empresas de grande porte.

Uma das grandezas mais importantes no processo de usinagem é a usinabilidade que pode ser definida, segundo Ferraresi (1969), como: “uma grandeza tecnológica que expressa por meio de um valor numérico comparativo (índice ou porcentagem) um conjunto de *propriedades de usinagem*, em relação a outro tomado como padrão.”. As propriedades de usinagem são todos os fatores que exercem influência sobre o processo de usinagem. Portanto, trata-se de uma grandeza complexa, pois não é possível medi-la diretamente, como a dureza de um material, por exemplo.

Fabricantes de metais, consumidores e fabricantes de ferramentas dependem do processo de usinagem e possuem interesse na usinabilidade, já que influencia grande e diretamente na produtividade da empresa. Por isso, cada vez mais, aumenta a demanda e o interesse em se estabelecer métodos de ensaio para determinar a usinabilidade, de maneira rápida e com relativa precisão (FERRARESI, 1969).

A usinabilidade de um material depende diretamente das condições de corte, do material a ser utilizado no processo, da ferramenta e o processo utilizado. Os parâmetros de corte são: a velocidade de corte, a profundidade de corte e avanço da ferramenta. O material está intimamente ligado com a usinabilidade, pois é possível usinar desde materiais poliméricos até superligas. Os processos mais comuns de usinagem são: torneamento, furação e fresamento. Dentre estes processos pode-se destacar o torneamento que é o processo de obtenção de superfícies de revolução quaisquer por meio de ferramentas de corte.

O processo de torneamento é utilizado amplamente na indústria, seja ela, automotiva, aeroespacial, naval, petrolífera entre outras. Essas indústrias de alta

tecnologia investem constantemente em pesquisa e desenvolvimento. E o resultado disso é surgimento de máquinas e processos cada vez mais rápidos e otimizados, além de novos materiais tanto de construção quanto ferramentas. Dentre esses novos materiais pode-se citar as superligas.

De forma geral as superligas são constituídas de níquel, cobalto ou titânio e levam esse nome por possuírem propriedades físicas e químicas excepcionais, sendo utilizadas em ambientes que necessitam ao máximo dessas características (SANTOS JR., 2011).

As superligas a base de níquel tem sua utilização cada vez mais crescente nas indústrias petroquímicas (prospecção de petróleo), aeroespacial (turbinas a gás) e biomédica (próteses médicas), pois satisfazem os requisitos necessários para isso, como: alta resistência à ambientes agressivos, alta resistência mecânica a altas temperaturas e estabilidade química, diminuindo o risco de ordem médica (RODRIGUES, 2006).

Nesse conjunto de características encontra-se o Inconel; nome comercial para família de austeníticos a base de níquel-cromo com em superligas de propriedade da *Special Metals Corporation*.

Um exemplo onde boa parte das características do Inconel é utilizada é na indústria de prospecção de petróleo, em que é necessário uma alta resistência e estabilidade química da tubulação que está exposta a um ambiente agressivo e alta resistência mecânica a altas temperaturas geradas pelo atrito gerado pelo escoamento do petróleo bombeado de águas profundas a altas pressões (RODRIGUES, 2006)

Devido à dificuldade que o Inconel apresenta para usinagem e aos poucos dados sobre as condições de corte, a avaliação da usinabilidade do Inconel 625 através do controle dos parâmetros de corte se mostra importante tanto no contexto como na indústria.

1.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é avaliar a usinabilidade da superliga Inconel 625 por torneamento.

Para isso será necessário alcançar objetivos secundários que levarão aos resultados desejados. Esses objetivos são:

- a) Determina o desgaste de flanco VB_B em função do tempo;
- b) Determinar a rugosidade da peça usinada;
- c) Determinar a pressão específica de corte;
- d) Analisar os cavacos produzidos.

1.3 Justificativa

Devida a pouca quantidade de informação sobre os parâmetros de usinagem do Inconel e seu crescente uso na indústria, seja ela petroquímica, de geração de energia ou automobilística de ponta, percebeu-se a necessidade de determinar a usinabilidade desses materiais, para que se possa atender a demanda de peças produzidas por formação de cavaco com qualidade, rapidez e um custo aceitável.

A escolha do torneamento para o ensaio se justifica por ser um processo utilizado amplamente. Outro fator de extrema importância para a escolha foi a característica do corpo de prova doado pela empresa *Aker Solutions*.

1.4 Conteúdo do trabalho

No Capítulo 1 são apresentadas uma breve introdução, os objetivos principais e secundários, e a justificativa do trabalho proposto.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica abordando os temas principais do trabalho como usinagem, torneamento, ferramentas de corte, desgastes e falha de ferramenta e Inconel.

No Capítulo 3 os materiais e métodos que serão utilizados para alcançar os objetivos propostos no trabalho.

No Capítulo 4, os resultados finais são apresentados e discutidos.

No Capítulo 5, é apresentada a conclusão.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Torneamento

O processo de usinagem no qual a peça gira em torno de um eixo principal e uma ou mais ferramentas se deslocam simultaneamente em uma trajetória coplanar ao eixo de rotação produzindo superfícies de revolução é caracterizado como torneamento (FERRARESI, 1969).

Segundo a norma DIN 8589, o torneamento pode ser em:

- torneamento longitudinal;
- torneamento plano ou transversal;
- torneamento helicoidal;
- torneamento de forma;
- torneamento de perfil.

Dentro do torneamento longitudinal, pode-se destacar o torneamento cilíndrico interno e externo.

O torneamento cilíndrico externo consiste, na retirada de material externo do cilindro a ser usinado, com a ferramenta percorrendo seu eixo. No torneamento cilíndrico externo deve-se ficar atento para a relação entre a largura “L” da peça e o diâmetro “D”, conforme mostra a Figura 1.

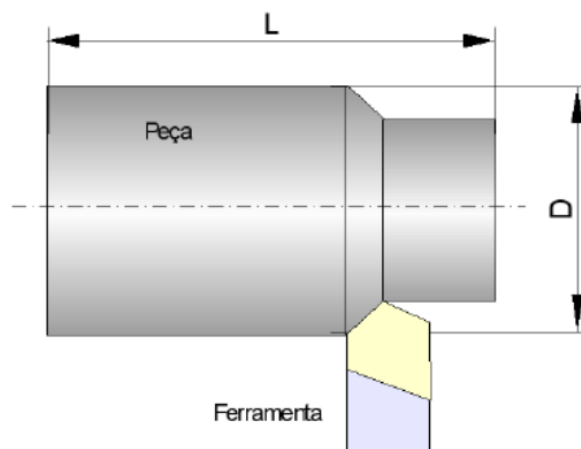


Figura 1 - Torneamento cilíndrico externo.
Fonte: Adaptado de Ferraresi (1969).

Se $L/D \leq 5$ a peça pode ser fixada em balanço, caso contrário faz-se necessário o uso da contra ponta.

A Figura 2 mostra o torneamento cilíndrico interno, utilizado para a usinagem ou acabamento de cavidades internas ao tarugo a ser usinado. Apesar de melhorar o acabamento de furos já existentes a operação de torneamento interno apresenta problemas de refrigeração, saída de cavacos e vibrações, o que pode acarretar em uma perda de qualidade da superfície a ser usinada.

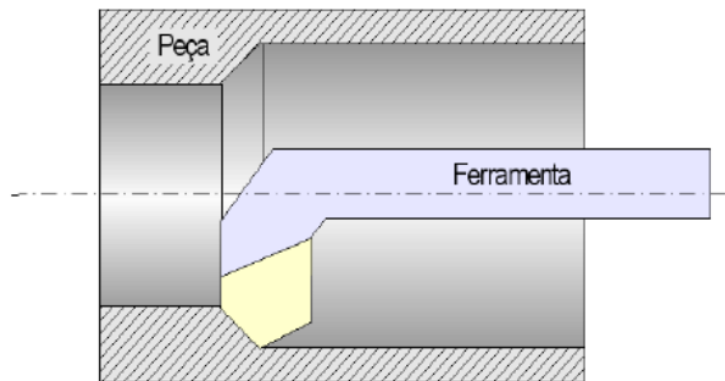


Figura 2 - Torneamento cilíndrico interno.
Fonte: Adaptado de Ferraresi (1969).

As principais variáveis controladas em um processo de torneamento são:

- Velocidade de corte (v_c), dada em m/min , que representa a velocidade instantânea do movimento de corte no ponto selecionado do gume. A velocidade de corte é calculada pela equação (1) mostrada abaixo;

$$V_c = \frac{\pi * D * N}{1000} \quad (m/min) \quad (1)$$

- Velocidade de avanço (v_f), dado em mm/min , representa a velocidade do movimento de avanço do ponto selecionado do gume em relação à peça. A velocidade de avanço é calculada através da equação (2) mostrada abaixo.

$$V_f = f * N \quad (mm/min) \quad (2)$$

- Avanço (f), dado em mm/rot , representa o deslocamento relativo adicional entre a peça e a ferramenta no plano de trabalho (STEMMER, 1987).

A seguir, são listadas as principais grandezas relacionadas a penetração da ferramenta, todas elas dadas em *mm*.

- Profundidade de corte (a_p), é quanto a ferramenta penetra na peça, medido perpendicularmente ao plano de trabalho (STEMMER, 1987);
- Largura nominal de usinagem (b_D) distância entre os extremos do gume da ferramenta em contato com a peça (STEMMER, 1987);
- Penetração de avanço (a_f), é a penetração da ferramenta, medida na direção do avanço (STEMMER, 1987).
- Espessura do cavaco (h) é a espessura do cavaco propriamente dita, dada por $f \times \text{sen}\kappa$ (STEMMER, 1987).
- Largura de corte (b), dada por $f \times \text{sen}\kappa$ (STEMMER, 1987).

A Figura 3 mostra mais claramente alguns dos parâmetros citados acima.

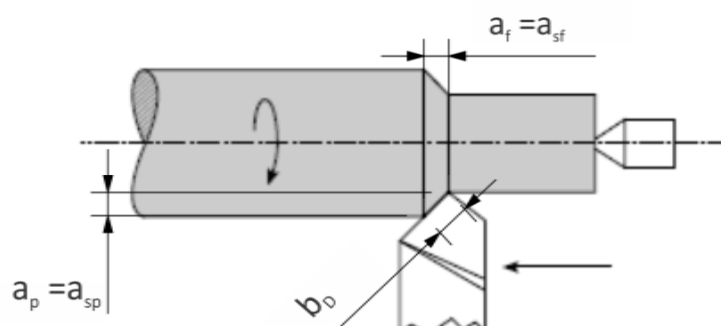


Figura 3 - Identificação dos parâmetros de penetração da ferramenta.
Fonte: Adaptado de Stemmer (1987).

2.1.1 Ferramenta utilizada no torneamento cilíndrico externo

Tendo em vista que o projeto em questão utilizará o torneamento cilíndrico externo, é viável que sejam apresentadas as características da ferramenta utilizada no processo.

As ferramentas para torneamento podem ser apresentadas na forma de insertos ou pastilhas intercambiáveis. Estas pastilhas podem ser fabricadas de

materiais metálicos, cerâmicos ou mistos. As pastilhas mais conhecidas e utilizadas na indústria são as de metal duro de carboneto combinado.

A Figura 4 mostra um exemplo de um inserto de metal-duro.

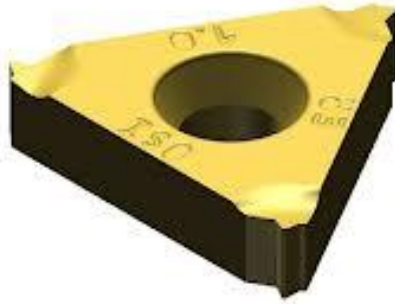


Figura 4 - Inseto de metal duro.

Fonte: www.iscar.com.br Acessado em: 10 out. 2012

Para utilização dessas ferramentas é necessário um porta-ferramenta que será fixado no torno. O porta-ferramentas varia de acordo com a forma da ferramenta e o tipo de usinagem.

A Figura 5 mostra dois porta-ferramentas *Sandvik* para insertos.

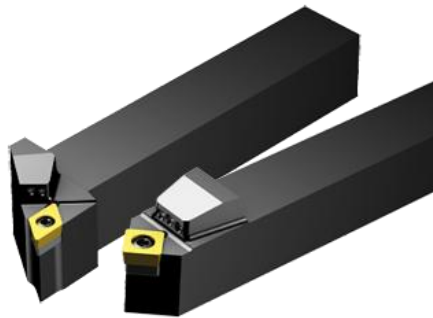


Figura 5 - Porta-ferramenta Sandvik.

Fonte: www.sandvikcoromant.com Acessado em: 10 out. 2012.

O porta-ferramenta vai preso no carro do torno, no caso de tornos revólveres e na torre de ferramentas no CNC.

2.1.2 Material para Ferramenta

Atualmente não existe nenhum material que tenha todas as qualidades ótimas para a usinagem dos materiais, quando algum material apresenta alguma propriedade destacável, ele acaba deixando a desejar em outra. Para tanto, se faz necessário definir quais exigências devem ser tomadas como principais e quais podem ser deixadas em segundo plano. Segundo STEMMER (1987), as exigências básicas a fazer para um material de corte são.

- a) Elevada dureza a frio bem superior à da peça usinada;
- b) Elevada dureza a quente;
- c) Tenacidade para resistir a consideráveis esforços de corte e impactos;
- d) Resistência à abrasão;
- e) Estabilidade química;
- f) Facilidade de obtenção a preços econômicos.

Lembrando que as exigências acima citadas, não devem ser levada em ordem que foram escritas, tendo em vista que como dito anteriormente, cada caso se faz questão uma análise diferente.

Tendo definido quais as prioridades para a usinagem em questão, se faz necessário a escolha do material da ferramenta. Dentre os principais materiais para ferramenta, podemos citar:

- Aço Ferramenta;
- Aço Rápido;
- Metal Duro;
- Cerâmica;
- Diamante;
- Nitreto de boro cúbico cristalino (CBN).

2.1.2.1 Aço Ferramenta

São ferramentas de aço carbono com teores de 0,8 a 1,5% de carbono. Devido a sua baixa dureza a quente (250°C) estas ferramentas devem ser trabalhadas a

baixas velocidades e para a usinagem de materiais moles. Basicamente sua aplicação dá-se para a utilização em ferramentas usadas em pequenas oficinas, ferramentas utilizadas uma única vez ou ferramentas de forma, na usinagem de latão e ligas de alumínio. As principais qualidades que podemos citar a respeito destas ferramentas, incluem-se baixos preços, facilidade de usinagem, tratamento térmico simples além de possuírem uma boa tenacidade (STEMMER, 1987).

2.1.2.2 Aço Rápido

Desenvolvido por Taylor ao final do século XIX, a ferramenta de aço rápido partiu do emprego de tungstênio (wolfrâmio), cromo e vanádio, como elementos básicos de liga, com um teor baixo de Mn, a fim de se evitar a fragilidade, (STEMMER, 1987). Sua principal vantagem em relação aos aços ferramentas é de se manter a dureza a temperaturas em torno de 520 a 600°C. As principais desvantagens dessas ferramentas são os altos preços quando comparados aos aços ferramentas, e o difícil tratamento térmico dos mesmos.

Com o passar do tempo, foram aparecendo novos tipos de ferramentas de aço rápido, sendo em busca de melhores condições de usinagem e que atendessem as mais exigências possíveis. Dentre estas ferramentas, têm-se as ferramentas de aço rápido com cobalto, surgindo em 1921, aumentando a temperatura crítica de trabalho.

Visando sempre melhorar as condições de usinagem, iniciou-se o processo de revestimento de Nitreto de Titânio (TiN) em ferramentas de aço rápido. Aplicados por processo de PVD (*Physical Vapor Deposition*), com temperaturas abaixo de 500°C, o revestimento reduz o desgaste de face e de flanco pelo aumento da dureza, dando também uma aparência dourada às ferramentas. O revestimento protege o metal base contra altas temperaturas devido ao baixo coeficiente de transmissão de calor do TiN. Para os casos de cortes interrompidos também foram detectados melhores resultados (STEMMER, 1987).

Outros tipos de aço rápido são os sinterizados. Obtidos por processos de metalurgia a pó resultam em uma estrutura muito uniforme e fina em toda a seção transversal da ferramenta. (STEMMER, 1987). Segundo Stemmer (1987), apresenta como vantagens:

- Menor deformação durante a têmpera e revenido;
- Menor tendência à formação de trincas e de tensões internas;
- Tenacidade um pouco mais alta;
- Vida mais longa e menor dispersão no tempo de vida das ferramentas.

A maior desvantagem em relação ao aço rápido convencional seria o preço unitário maior.

2.1.2.3 Metal Duro

Os Metais Duros, ou Carbonetos Sinterizados, são materiais sinterizados que contém carbonetos e elementos ligantes, cuja principal função é fazer a ligação dos carbonetos frágeis formando um corpo resistente. Já os carbonetos acabam por fornecerem uma elevada dureza à quente e resistência ao desgaste.

Devido as suas ótimas propriedades, como alta resistência à tração (4200 N/mm^2) e baixo coeficiente de dilatação térmica ($4,4 \times 10^{-6} \text{ mm/mm } ^\circ\text{C}$), o tungstênio (W), fez parte dos primeiros metais duros fabricados. Constituídos basicamente de Carbonetos de Tungstênio (WC) com ligante de Cobalto (Co).

As ferramentas de carboneto de tungstênio foram empregadas a princípio com extraordinário sucesso na usinagem de ferro fundido e materiais não ferrosos, mas com resultados medíocres na maioria dos trabalhos com aço. Verificou-se que ocorria um forte atrito entre a ferramenta de metal duro e o cavaco de aço. O cavaco escorrega com grande pressão e sob elevada resistência provocando grande geração de calor e formando rapidamente uma cratera na superfície de saída da ferramenta que leva a quebra da cunha cortante. (STEMMER, 1987).

Para reduzir então o atrito e possibilitar a usinagem dos aços, foram introduzidos na composição do metal duro dois novos componentes: o Carboneto de Titânio (TiC) e o de Tântalo (TaC).

Com o objetivo de melhor explorar as vantagens de alguns materiais de elevada dureza e estabilidade química, desenvolveram-se os metais duros revestidos. Estes se compõem de uma base de metal duro relativamente tenaz, sobre a qual se aplica uma ou mais camadas finas, duras, resistentes à abrasão e de fina granulometria, de um material composto de carbonetos (por exemplo, TiC,

HfC, ZrC), de nitretos (p. ex., TiN, HfN, ZrN), de carbonitretos (TiCN) ou de óxidos (Al_2O_3).

A norma ISO 513-2003, classifica os metais duros em seis grupos. Eles são classificados pelas letras P (azul), M (amarelo), K (vermelho), N (verde), S (laranja) e H (cinza). Esta classificação é feita de acordo com a aplicação do metal duro baseada em sua composição química e processo de fabricação. A normalização dos metais duros obedece basicamente às aplicações abaixo citadas.

P: P01 – P50: Representa a usinagem de materiais ferrosos que produzem cavacos longos, tais como aços fundidos, aços e ferros maleáveis. Possui em sua composição, elementos como : WC, Co, TiC, TaC e NbC.

M: M01 – M50: Representa a usinagem de materiais de maiores exigências, tais como aços inoxidáveis austeníticos, materiais resistentes ao calor, aço manganês, ferro fundido ligado entre outros. Constituem o os tipos intermediários entre o grupo P e K.

K: K01 – K40: Representa a usinagem de materiais ferrosos que produzem cavacos curtos, tais como ferro fundido e aço endurecido. Sua composição é definida somente por WC + Co.

N: N01 – N30: Representa a usinagem de materiais não ferrosos, tais como alumínio, bronze e latão.

S: S01 – S30: Representa a usinagem de superligas ou ligas resistentes ao calor tais como titânio, Inconel entre outros.

H: H01 – H30: Representa a usinagem de materiais endurecidos tais como aços temperados e ferro fundido coquilhado.

As classes P, M e K referem-se aos metais duros convencionais. Tendo seu campo de aplicação conforme mostrado nas figuras abaixo.

O ANEXO 1 mostra os grupos de ferramentas e suas aplicações.

2.1.2.4 Cerâmica

As ferramentas de cerâmica, tanto na base de óxido de alumínio como outras, tem adquirido importância crescente nos últimos anos, principalmente na usinagem,

com máquinas automáticas de alta velocidade, de peças de aço e ferro fundido. Em condições adequadas é possível usar velocidades de corte de 4 a 5 vezes maiores do que as empregadas com metal duro.

A cerâmica destaca-se das outras ferramentas pelas seguintes características:

- Elevada dureza a quente (aproximadamente até 1600°C);
- Alta resistência à compressão;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Não tem afinidade química com o aço;
- Mantém elevada estabilidade química, mesmo a altas temperaturas.

Como pontos fracos das ferramentas de material cerâmico, temos:

- Fragilidade da ferramenta, dificultando a usinagem interrompida;
- Baixa condutibilidade térmica, sendo sensível a variações bruscas de temperatura.

O componente principal da cerâmica de corte é o coridon (Al_2O_3).

As cerâmicas podem ser classificadas em dois tipos, sendo elas óxidas e não-óxidas. A primeira delas ainda é dividida em cerâmicas puras (apenas Al_2O_3 – de cor branca e frágil), mistas (cerâmica + metal) que se distingue da anterior por apresentar uma cor escura em função de suas propriedades, apresentando maior abrasão e menor sensibilidade ao choque térmico, podendo ser utilizada em cortes interrompidos. O último tipo de cerâmica óxida, é reforçada com *whiskers*, cristais unitários em forma de agulhas com baixo grau de imperfeição no reticulado cristalino e que causam melhoria na tenacidade, composto de 20 a 40% de *whiskers* de carbonetos de silício.

2.1.2.5 Nitreto de Boro Cúbico (CBN)

Depois do diamante, o CBN é o material mais duro que se conhece (à temperatura ambiente), trata-se de um material sintético e que é quimicamente mais estável que o diamante. Sob pressão atmosférica, o CBN é estável até 2000 °C, enquanto no diamante já ocorre grafitação perto dos 800°C. (STEMMER, 1987).

As pastilhas de CBN são fabricadas de forma análoga as de diamante policristalino. Uma camada de 0,5 mm de espessura, de partículas de nitreto de boro cúbico é sintetizada em um processo de alta pressão e altas temperaturas, com a presença de uma fase ligante, efetuando-se simultaneamente a fixação sobre a base de um metal duro. (STEMMER, 1987).

2.1.2.6 Diamante

O Diamante é o material mais duro conhecido. A usinagem de aços e ferros fundidos não é possível de ser realizada com diamante, tendo em vista a sua afinidade do ferro com o carbono. Quando em contato com a peça, o diamante ao aquecer transforma-se em grafite reagindo com o ferro e desgastando precocemente a ferramenta. (STEMMER, 1987)

Como classificação dos diamantes, podemos citar os monocristalinos e os sintéticos policristalinos.

Os diamantes monocristalinos são indicados para a usinagem de metais leves, bronze, cobre, latão, borracha, vidro, plástico entre outros. Por possuírem boas propriedades à quente, são empregados também para dressagem de rebolos, ponta de brocas entre outros. O campo de aplicação dos diamantes monocristalinos, atende as operações de usinagem fina, onde são solicitadas grandes precisões dimensionais e qualidades de superfície.

Em 1973 foi apresentado pela primeira vez uma ferramenta com uma camada de diamante sintético policristalino. A matéria prima são partículas muito finas de diamantes sintéticos, de granulação bem definida. A camada de diamante policristalina é produzida pela sintetização das partículas de diamante com o cobalto, em um processo de alta pressão (6000 a 7000 MPa) e alta temperatura (1400 a 2000°). A camada de aproximadamente 0,5 mm de espessura é geralmente aplicada em uma base de metal duro. (STEMMER, 1987).

Os PCD podem ser usados na usinagem dos mais variados não-metals e também de metais (desde que não sejam ferrosos). Podem ser usados não só para o acabamento como para desbaste. Um dos principais empregos dos PCD é a usinagem de materiais abrasivos, como ligas de alumínio com alto teor de silício (alumínio aeronáutico), já que são extremamente resistentes à abrasão, tem

tenacidade suficiente para resistir a impactos e também não permitem que ocorra a adesão do material que está sendo usinado. (STEMMER, 1987).

2.1.3 Geometria da Ferramenta de Corte

A nomenclatura dos vários elementos geométricos que compõem uma ferramenta de corte está padronizado internacionalmente pela norma ISO – 3002/1 e no Brasil pela NBR 6163. Abaixo a Figura 6 mostra as arestas e superfícies de corte de uma ferramenta de torneamento.

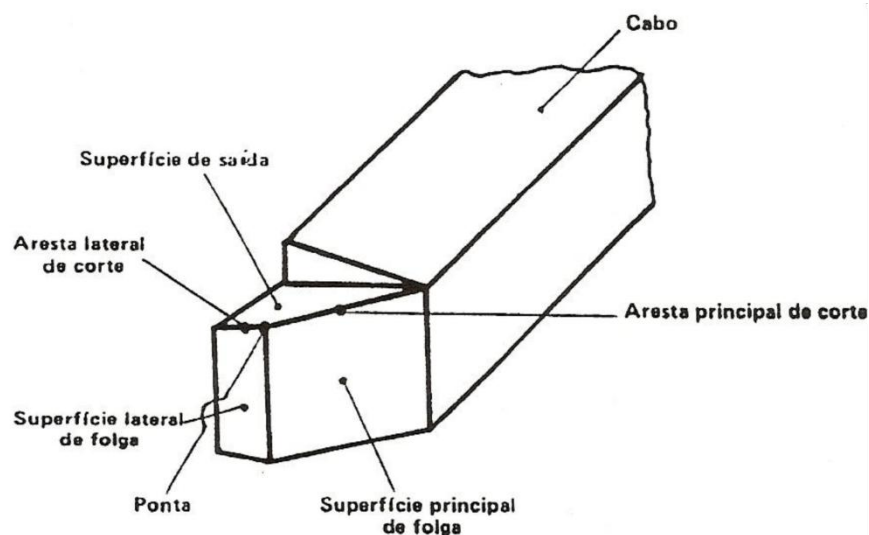
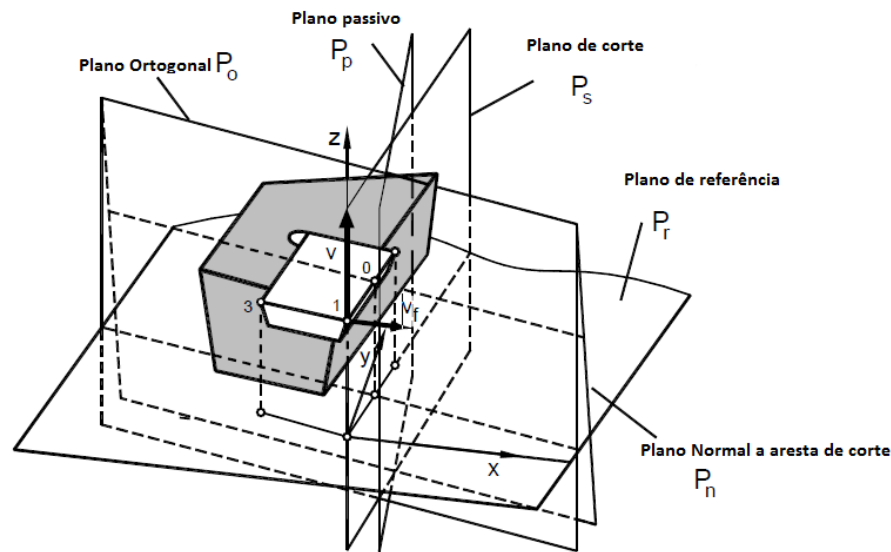


Figura 6 - Arestas e superfícies constituintes de uma ferramenta de corte conforme norma NBR 6163

A fim de definir e especificar os ângulos de uma ferramenta de corte foram estabelecidos sistemas de planos de referência. Um destes sistemas é chamado de Ferramenta na Mão e é utilizado para fabricação e medição de uma ferramenta de corte. A Figura 7 mostra os planos de referência de acordo com o sistema de Ferramenta na Mão.



**Figura 7 - Identificação dos planos de referência de uma ferramenta de torção de acordo com o sistema Ferramenta na Mão.
Fonte: Adaptado da ISO 3002-1.**

Os planos de especificação de ferramentas de corte podem ser definidos, segundo ISO 3002-1, como:

- Plano de referência (P_r): é um plano perpendicular à direção do movimento primário de corte (direção Z);
- Plano passivo (P_p): perpendicular ao plano de referência e ao plano de trabalho que é o plano perpendicular ao de referência e contém a direção de avanço;
- Plano de corte (P_s): perpendicular ao plano de referência e contém a maior aresta de corte;
- Plano ortogonal (P_o): perpendicular à projeção da aresta de corte no plano de referência;
- Plano normal (P_n): perpendicular a aresta de corte.

Os ângulos da ferramenta servem para a determinação da posição e forma do gume, da face e dos flancos e são descritos com auxílio do sistema de Ferramenta na Mão. A Figura 8 mostra os ângulos de uma ferramenta de torno no sistema de Ferramenta de Mão e com as nomenclaturas conforme NBR 6163 (1980).

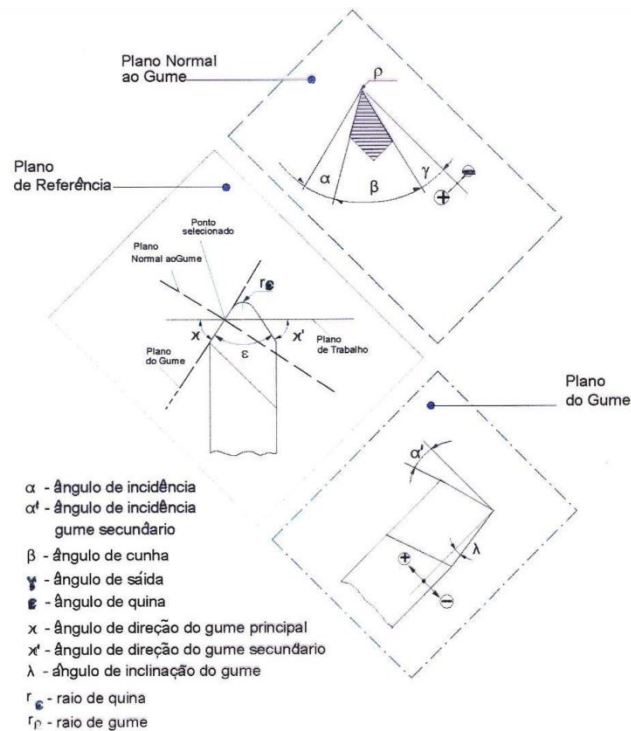


Figura 8 - Identificação dos ângulos de uma ferramenta de torneamento.
Fonte: Adaptado da NBR 6163 (1980).

2.1.4 Flúido de Corte

Segundo Ferraresi (1969), o flúido de corte tem como finalidade conferir ao processo de usinagem algum tipo de melhoria, seja ela econômica ou funcional. A melhoria funcional pode ser verificada pela melhoria na formação do cavaco e pela maior facilidade em expulsá-lo da região de corte. A melhoria econômica é verificada em um menor consumo de energia e em um desgaste menor da ferramenta, acarretando uma economia no custo por peça.

Um flúido de corte deve ser capaz de: refrigerar, lubrificar, limpar a região de corte e prover proteção contra oxidação à peça e à ferramenta. Sendo a lubrificação importante em baixas velocidades de corte para reduzir o atrito e a refrigeração importante para aumentar a dissipação de calor e para diminuir a geração de calor através da lubrificação. (SOUSA, 2006).

Segundo Ferraresi (1969) pode-se classificar os flúidos de corte segundo seu estado físico: sólidos, líquidos e gasosos.

— Sólidos

- Grafite;
 - Bissulfeto de Molibdênio;
- Líquidos
- Óleos de corte puros;
 - Óleos emulsionáveis;
 - Fluídos químicos;
 - Mercúrio;
- Gasosos
- Ar;
 - Dióxido de Carbono.

Os óleos minerais são a base da maioria dos fluídos de corte, recebendo aditivos para que melhoram sua característica. Os aditivos mais utilizados são os antioxidantes e os agentes EP. (SOUSA, 2006).

2.2 Usinabilidade

O termo usinabilidade pode ser descrito como um valor comparativo de propriedades quando comparadas a um padrão. Stemmer (1987) define como a propriedade dos materiais se deixarem trabalhar com ferramentas de corte. Com este termo são descritas todas as dificuldades que um material apresenta na sua usinagem.

A usinabilidade de um material sempre é observada no contexto do processo de fabricação, do material da ferramenta e das condições de corte. Para avaliar este fator são utilizados como critérios: a vida de ferramenta, forças de usinagem, qualidade superficial e formação de cavacos.

Dos critérios apresentados apenas os três primeiros são passíveis de serem expresso numericamente. Segundo Stemmer (1987) por isso acabam sendo mais utilizados nas avaliações, definindo também o custo operacional do processo. A vida da ferramenta tem grande influencia nesse custo. A força e conseqüentemente a potência limitam o volume de material removido por hora-máquina. E a exigência de alta qualidade superficial pode ocasionar rejeição de peças, elevando os custos.

Segundo Sousa (2006), para obter um maior desempenho dos fluídos de corte são necessários alguns cuidados:

- Armazenamento – armazenar em locais adequados com baixa variação de temperatura;
- Purificação – eliminar os contaminantes do fluido como: limalha, partículas de ferrugem e outras sujeiras;
- Controle de odor – por conterem água, as emulsões estão sujeitas a ação de bactérias produzindo odores desagradáveis.

2.2.1 Vida da ferramenta

Para a caracterização da usinabilidade de um material de peça, a vida da ferramenta "T" é o critério de maior importância. A vida "T" é o tempo mínimo durante o qual uma ferramenta resiste do início do corte até a sua utilização total, relacionada a certo critério de fim de vida sob certas condições de usinagem.

A fórmula empírica de Taylor (3) é uma das formas de se calcular o tempo de vida da ferramenta.

$$C_t = v_c \cdot T_v^n \quad (3)$$

Onde,

v_c = velocidade de corte [m/min];

T_v = Tempo de vida da ferramenta [min];

C_t = Constante dependente de máquina-ferramenta-peça. O valor é numericamente igual à velocidade de corte que dá a ferramenta vida de 1 minuto;

$n = 1/tg\alpha$ Constante dependente da máquina-ferramenta-processo.

Outra forma utilizada para a determinação do critério de vida da ferramenta utiliza-se a equação (4) (Equação de Taylor), a qual relaciona o tempo de vida diretamente com a velocidade de corte.

$$T = C_v \cdot v_c^k \quad (4)$$

onde,

T = vida da ferramenta [min];

V_c = velocidade de corte [m/min];

C_v = vida para $V_c = 1$ m/min (constante);

K = coeficiente angular da curva de vida.

Na Figura 9 observa-se o gráfico dilog de vida de uma ferramenta traçada a partir de ensaios realizados em determinado material.

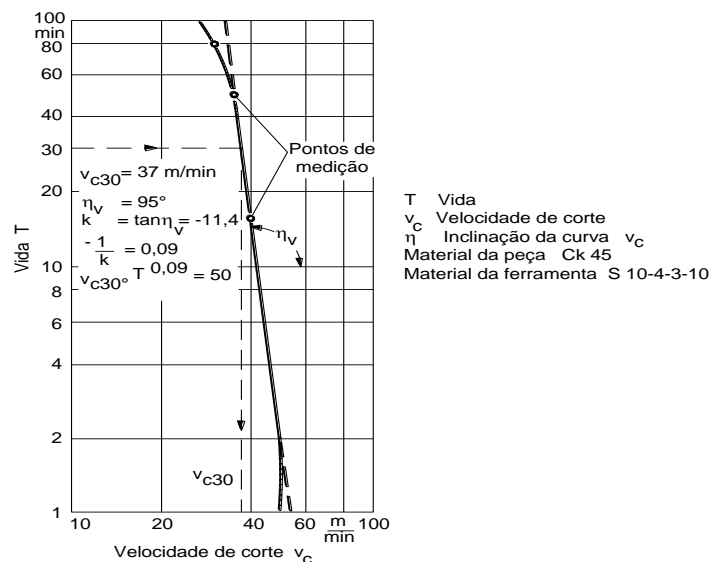


Figura 9 - Gráfico Tempo de vida de ferramenta x velocidade de corte
Fonte: KÖNIG, 1983.

O desgaste das ferramentas de aço rápido, metal duro e cerâmico, é normalizado pela ISO 3685, conforme Figura 10, que utiliza como critério de fim de vida da ferramenta os seguintes parâmetros:

- $KT = 0,06 + 0,3 \times f$ (5)
- $VB_B = 0,3$ mm
- $VB_{max} = 0,6$ mm

No primeiro critério a vida de ferramenta é determinada pela profundidade de cratera K_T que é uma função do avanço f e tem seu valor limite dado pela equação (5).

O segundo critério é em relação ao desgaste de flanco médio, VB_B , que tem como limite o valor de $0,3\text{ mm}$ em largura.

O terceiro critério diz que o desgaste de flanco máximo permitido para uma ferramenta, o VB_{max} é de $0,6\text{ mm}$.

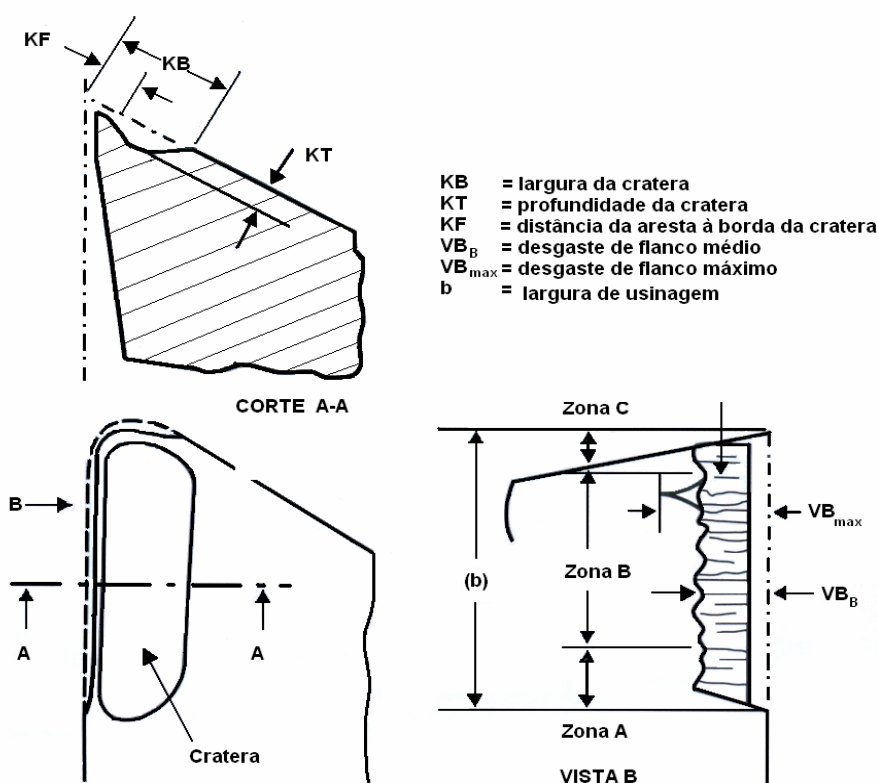
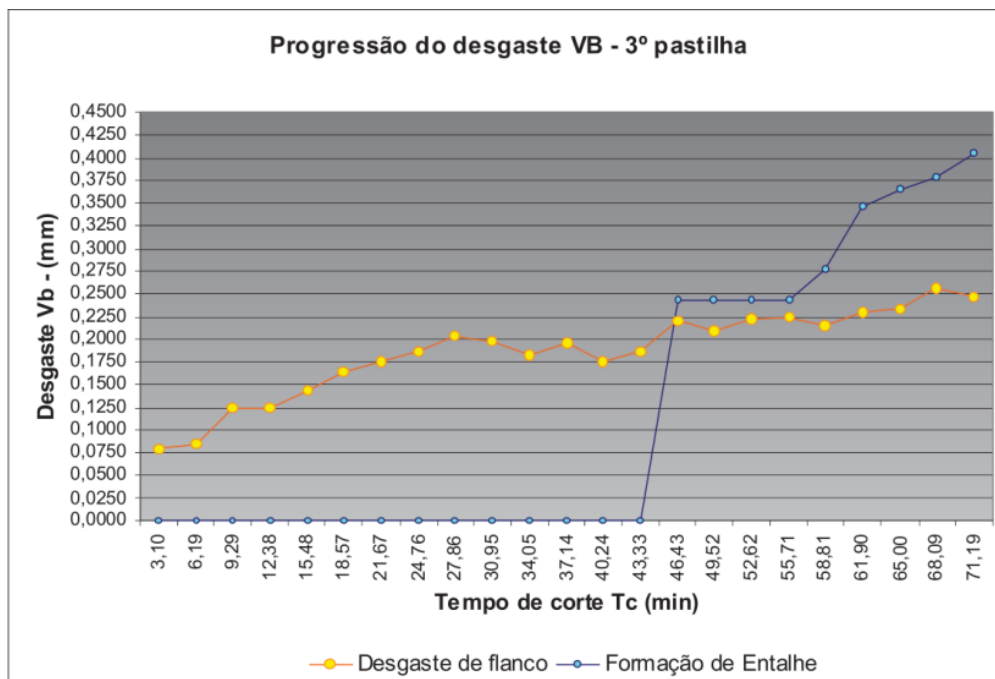


Figura 10 - Tipos de desgaste e variáveis de medição em ferramentas de usinagem (Norma ISO 3685, 1993).

Rodrigues (2006) em sua dissertação de mestrado utiliza como critério de vida de ferramenta o desgaste de flanco médio $VB_B = 0,3\text{ mm}$, os ensaios foram realizado em 20 mm de Inconel 625 depositado sobre uma placa e submetidos a fresamento com velocidade de corte de 30 e 45 m/min , os avanços por dente (f_z) foram $0,1$ e $0,065\text{ mm/dente}$. A Figura 11 mostra o desgaste da pastilha número 3 dentre as 7 usadas por fresa.



**Figura 11- Desgaste Vb x Tempo de corte Tc.
Fonte: Rodrigues, Marcelo A.. 2006.**

Rodrigues (2006) encontrou resultados de tempo de vida de ferramenta variando entre 1,13 minutos até 68,96 minutos. O primeiro resultado foi encontrado utilizando ferramenta sem revestimento e o segundo foi utilizando revestimento de TiAlN.

Já Therezani (2012) em seu trabalho sobre usinabilidade do Inconel 718, utilizou como critério de fim de vida de ferramenta $VB_{max} = 0,5 \text{ mm}$. Apesar do critério não ser normalizado, Therezani obteve curvas de desgaste como esperado, conforme Figura 12.

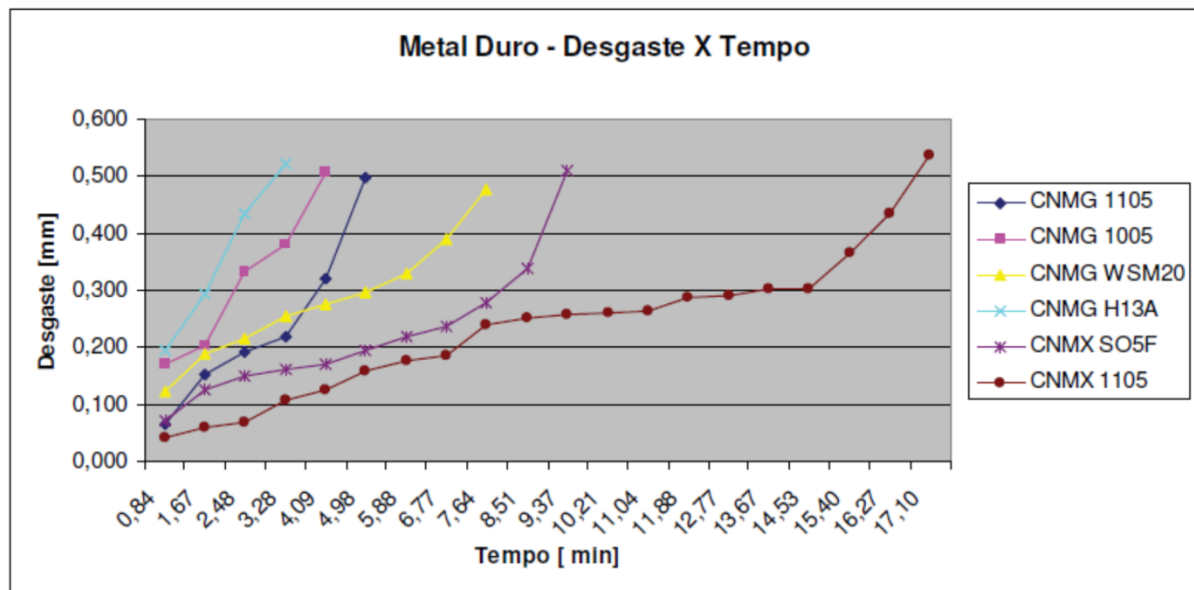


Figura 12 - Desgaste para ferramentas variadas.
Fonte: Therezani, F. Douglas, 2012.

2.2.2 Forças de usinagem

A força de usinagem, que representa a resistência oferecida pelo material da peça de trabalho à penetração do gume da ferramenta, é influenciada por diversos fatores, tais como: material da peça, material da ferramenta, condições de corte, geometria da ferramenta e o próprio processo de usinagem (STEMMER, 1987).

O conhecimento da grandeza e da orientação da força de usinagem F ou de suas componentes é de suma importância para determinação de diversos fatores em usinagem, tais como:

- determinação da condição de corte em condições de trabalho;
- dimensionamento correto de projetos de máquinas-ferramentas;
- para a determinação de procedimentos que ocorrem na região de formação de cavaco e para a explicação de mecanismos de desgaste.

Além disso, a grandeza da força de usinagem é um critério para a usinabilidade de um material - geralmente materiais de difícil usinabilidade apresentam forças de usinagem maiores.

A Figura 13 mostra a força de usinagem e suas componentes, forças de avanço e corte.

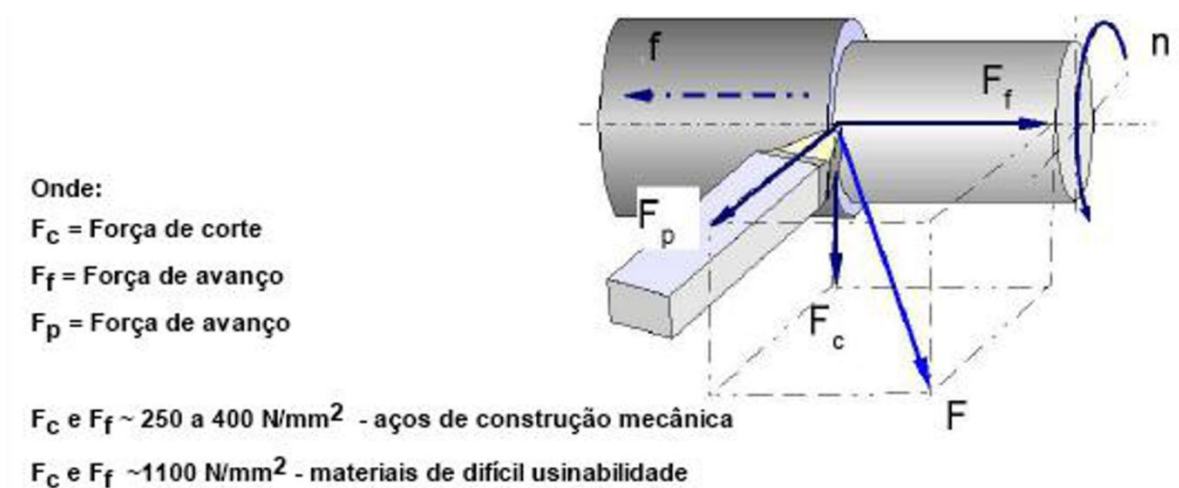


Figura 13 - Força de Usinagem e suas componentes F_f e F_c .
 Fonte: Adaptado de NBR 12545 (2013).

Analicamente, a força de corte pode ser determinada da seguinte forma:

$$F_c = k_c \cdot a_p \cdot f \quad (6)$$

2.2.2.1 Influência das variáveis do processo

Stemmer (1987), afirma que todos os pesquisadores são unânimes em dizer que a velocidade de corte (V_c), dentro das faixas usuais, exerce pouca influência sobre a pressão específica de corte k_c e sobre a força de corte F_c . Apenas em velocidades superiores a 20000 m/min é que esse cenário muda.

As dimensões de corte são os principais fatores de influência na força e na potência da usinagem, a medida que as dimensões do cavaco diminui a pressão específica de corte também diminui, influenciada mais pelo aumento do avanço do que pela profundidade de corte.

A seguir, temos a Figura 14, que relaciona a força de corte em função da profundidade de corte e da velocidade de avanço.

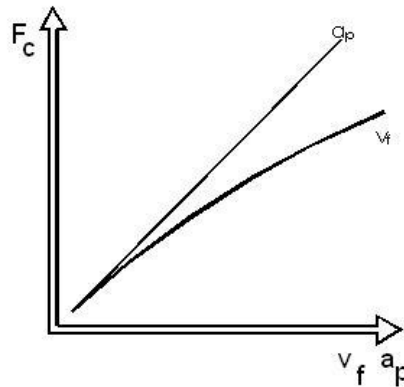


Figura 14 - Comportamento da Força de corte em função da profundidade de corte e da velocidade de avanço

Fonte: Adaptado de König (1983).

Kienzle, visando à aplicação prática em determinar a pressão específica de corte propõe a seguinte equação:

$$F_C = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{1-mc} \quad (7)$$

Onde:

h = espessura do cavaco = $f \cdot \text{sen} \kappa$ [mm];

b = largura de corte = $a_p / \text{sen} \kappa$ [mm];

$k_{c1.1}$ = pressão específica de corte para um cavaco de 1 mm^2 ;

$1 - mc$ = expoente específico para o material a ser usinado.

Rodrigues (2006) ao analisar os resultados das forças de usinagem medida em seus ensaios chegou a algumas conclusões, sendo elas: ao aumentar a velocidade de avanço V_f há um aumento na força de usinagem; ao mudar o fresamento de concordante para discordante também há aumento na força de usinagem, bem como quanto maior o tempo de usinagem com uma mesma ferramenta maior a força envolvida no processo.

2.2.3 Qualidade Superficial

A qualidade superficial em projetos mecânicos, representada principalmente pela rugosidade, consiste em um conjunto de irregularidades igualmente e/ou desigualmente espaçadas, que tendem a formar um padrão característico da

superfície. Estas irregularidades estão presentes em todas as superfícies, por mais perfeita que possa parecer a olho nu, tais características da superfície podem ser provenientes do tipo de processo utilizado na fabricação (AMORIM, 2002).

Segundo Amorim (2002) a importância da rugosidade, justifica-se por fatores como:

- Precisão e tolerância: muito importante em peças com acoplamentos e movimentos relativos, como mancal e eixo.

- Resistência a corrosão: peças com acabamentos superficiais mais grosseiros retêm maior resíduos de líquidos e vapores, o que acaba acelerando o processo de corrosão.

- Resistência à fadiga: peças sob cargas dinâmicas necessitam de uma qualidade superficial maior, já que uma qualidade grosseira pode facilitar a concentração de tensão e por consequência nucleação de trincas.

- Escoamento de fluídos: superfícies com acabamento superior propiciam redução na turbulência de escoamentos. Para elementos que atuam como retentor, quanto melhor o acabamento maior a eficiência dos elementos.

- Lubrificação: caso a profundidade na superfície de um dos acoplamentos seja maior que a espessura do filme lubrificante ocorrerá contato entre elas.

- Transmissão de calor: quanto maior a rugosidade maior a área de contato entre as superfícies aumentando a transmissão de calor.

2.2.3.1 Parâmetros de rugosidade

Vários parâmetros são utilizados para avaliar o acabamento superficial de uma peça, um dos mais utilizados é a rugosidade média (Ra) que consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas em relação a linha média, conforme mostra a Figura 15. Os valores de Ra podem ser expressos em milímetros ou polegadas.

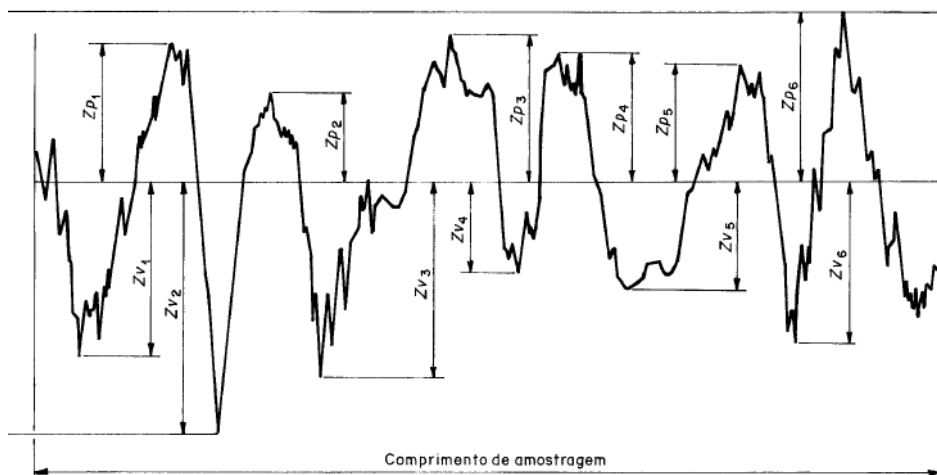


Figura 15 – Parâmetro Ra: média aritmética da soma de cada vale e cada pico.
Fonte: NBR ISO 4287 (2012).

Outro parâmetro utilizado e que possui a vantagem de não sofrer influência de algum ponto isolado na peça é rugosidade de profundidade é a distância vertical entre o pico mais alto e o mais profundo vale dentro de uma amostragem, conhecido como (Rz). A Figura 16 mostra um exemplo de como o parâmetro (Rz) é medido.

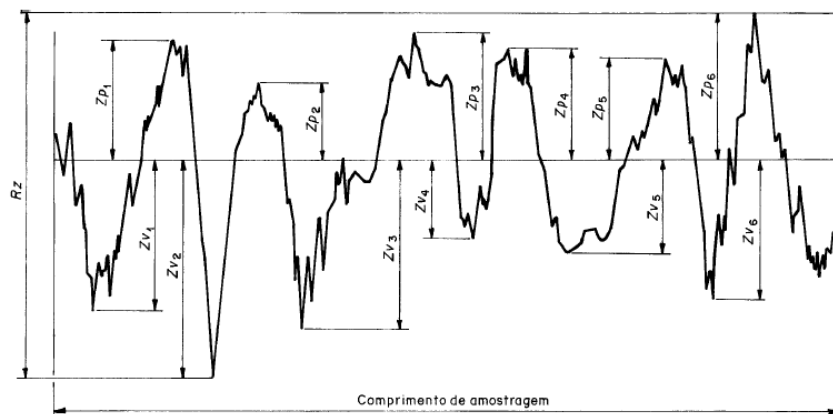


Figura 16 - Rugosidade Rz: distância entre o pico mais alto e o vale mais fundo.
Fonte: NBR ISO 4287 (2012).

2.2.3.2 Fatores de influência

O processo de fabricação tem influência direta na qualidade superficial da peça final, conforme mostrado na Figura 17.

A velocidade de corte (V_c) exerce influência na qualidade superficial final da peça, porém essa influência varia de acordo com o material. No aço, por exemplo,

para velocidades acima de 100 m/min a rugosidade superficial tende a se estabilizar para pequenos valores (FERRARESI, 1969).

Os ângulos da ferramenta de corte também contribuem para o acabamento superficial, são eles:

- Ângulo de saída (γ): com o aumento do ângulo de saída aumenta-se a solicitação da ferramenta ocasionando elevação da temperatura de corte e queda na qualidade de superficial (FERRARESI, 1969).

- Ângulo de folga (α): segundo Amorim (2002) quando menor que 5° acarreta um aumento nas forças de corte, cujo efeito é negativo para o acabamento superficial.

A relação entre o raio de quina (r_ϵ) e o avanço representa um a das mais importantes considerações na obtenção de um bom acabamento superficial. Uma relação igual à 1 gera na peça uma aparência de rosca, já uma relação maior que 10 ocasiona atrito entre a aresta lateral de corte e a peça prejudicando o acabamento, Brierley sugere uma relação igual a 3 para um bom acabamento (FERRARESI, 1969).

		RUGOSIDADE SUPERFICIAL															
R _a	microns (μm)	0,012	0,025	0,05	0,10	0,20	0,40	0,80	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100		
	micro polegadas (μin)	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16	32	63	125	250	500	1000	2000	4000		
Método de produção		Campo de aplicação 1)															
Fundição em areia																	
Corte por maçarico																	
Laminação a quente																	
Jato de areia																	
Serramento																	
Forjamento																	
Aplainamento																	
Fundição em coquilha																	
Furação																	
Extrusão																	
Fresamento																	
Torneamento																	
Fundição de precisão																	
Mandrillamento																	
Laminação a frio																	
Fundição sob pressão																	
Alarg., brochamento																	
Retificação																	
Tamboramento																	
Rodagem																	
Espelhamento																	
Lapidação																	
Polimento																	
Superacabamento																	

1) Código:
 Campo usual de aplicação
 Aplicação menos comum

Valores maiores ou menores que os indicados podem ser obtidos em condições especiais

Figura 17 - Tabela relacionando processos de fabricação com a rugosidade Ra. Fonte: FERRARESI, 1969.

2.2.4 Formação de cavacos

O cavaco é definido como a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular (FERRARESI, 1969).

A forma e o tamanho do cavaco são muito importantes, principalmente para os processos de usinagem onde há pouco espaço para os cavacos (furação, fresamento, etc.) ou em máquinas-ferramentas com pouco espaço de trabalho.

Muitos pesquisadores procuraram estabelecer uma relação entre o grau de recalque R_c e a usinabilidade dos metais. Com isso, verificou-se que com um aumento considerável de R_c ocorre uma queda na qualidade superficial das peças inclusive com o surgimento de trincas na superfície devido ao arrancamento de cavacos. Já aumentando a velocidade de corte e diminuindo o grau de recalque do

material ocorre uma sensível melhora na qualidade superficial da peça (FERRARESI, 1969).

Stemmer (1987) define o grau de recalque como a relação entre a espessura do cavaco e a espessura nominal de usinagem e afirma que quanto maior o grau de recalque maior a dificuldade do material em ser usinado, influenciando na pressão específica de corte.

No ANEXO 2 são mostrados os diversos tipos de cavacos e suas classificações.

2.3 Desgaste da Ferramenta

Como principais mecanismos de desgaste de ferramenta, podemos citar:

2.3.1 Abrasão

É caracterizada pelo arrancamento de partículas finas do material em função do deslizamento entre a peça e a ferramenta devida a altas temperaturas e pressão. Quando se aumenta a velocidade de corte, tem-se um aumento no desgaste, tendo em vista a redução da resistência ao desgaste da ferramenta causada pelo aumento da temperatura. A resistência a abrasão é dependente diretamente da dureza do material da ferramenta (STEMMER, 1987).

2.3.2 Adesão

O mecanismo de desgaste classificado como desgaste por adesão é classificado pela adesão entre o material da peça e as asperezas superficiais da ferramenta decorrentes a altas temperaturas e pressões existentes na zona de corte. Como consequência desse desgaste é a formação de gumes postiços de corte (STEMMER, 1987).

2.3.3 Difusão

O mecanismo de difusão ocorre com temperaturas elevadas, quando as moléculas adquirem uma maior mobilidade. Este critério de desgaste é observado nas ferramentas de metais duros, tendo em vista que nas ferramentas de aço-carbono e aço rápido a temperatura de difusão é mais elevada que a temperatura de amolecimento da ferramenta.

Devido ao elevado coeficiente de dilatação térmica do Cobalto, comparado à estrutura dos Carbonetos, um aumento da temperatura provoca a expulsão do cobalto e a geração de tensões no interior do metal duro (STEMMER, 1987).

2.3.4 Oxidação

A oxidação que ocorre com o aquecimento das peças a altas temperaturas e com a formação de carepas, pode ser uma causa de desgaste. Oxidações a baixas temperaturas podem ser normalmente evitadas por camadas protetoras de material oxidado. Experiências realizadas demonstram que na usinagem com metal duro a altas velocidades, o desgaste é menor em uma atmosfera neutra do que na presença do ar (STEMMER, 1987).

2.4 INCONEL

As ligas a base de níquel são classificadas em grande número de ligas cada uma das quais com diferentes números e quantidades de elementos de liga, sendo o Inconel um grupo importante de ligas a base de níquel.

2.4.1 Classificação e composição das ligas Inconel

A Tabela 1 - Composição das ligas Inconel em % mostra a composição de algumas ligas Inconel, com destaque para o Inconel 625, objeto de estudo deste trabalho.

Tabela 1 - Composição das ligas Inconel em %

Alloy	Composition, %											
	Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C
Inconel 600	76.0	15.5	...	...	...	...	...	...	8.0	0.5	0.2	0.08
Inconel 601	60.5	23.0	...	...	...	...	1.4	...	14.1	0.5	0.2	0.05
Inconel 617	54.0	22.0	12.5	9.0	...	...	1.0	0.3	...	...	...	0.07
Inconel 625	61.0	21.5	...	9.0	...	3.6	0.2	0.2	2.5	0.2	0.2	0.05
Inconel 706	41.5	16.0	...	...	...	2.9	0.2	1.8	40.0	0.2	0.2	0.03
Inconel 718	52.5	19.0	...	3.0	...	5.1	0.5	0.9	18.5	0.2	0.2	0.04

Fonte: ASM Metals Handbook, Volume 1

Segundo Rodrigues (2006) os efeitos causados por alguns dos elementos contidos na liga Inconel 625 são apresentados a seguir.

- Cromo: Aumenta a resistência a oxidação e ao desgaste de componentes que sofram atrito. Sua forte presença na formação de carbonetos diminui a usinabilidade.

- Ferro: Sua presença tende a baixar a resistência à oxidação

- Molibdênio: Metal considerado refratário com ponto de fusão próximo a 3000°C. Aumenta a resistência mecânica e à corrosão sob altas temperaturas, além de formar partículas resistentes a abrasão.

- Nióbio: Outro elemento considerado refratário com ponto de fusão perto dos 2470°C. Quando associado ao alumínio e ao titânio modera o endurecimento da liga, reduz a tendência à trinca causada pelo alumínio e aumenta a soldabilidade.

- Carbono: Elemento intersticial de aumento da resistência do níquel. Possui grande influência na formação de carbonetos.

- Manganês: Reduz a plasticidade e aumenta a endurecibilidade.

- Silício: Aumenta a fundibilidade. Causa fratura a quente da liga.

- Alumínio: Possui o maior potencial de endurecimento da liga, sua presença fragiliza o material gerando tendência a trinca à quente durante a soldagem, ainda é responsável por formação de carbonetos complexos e diminuição da fundibilidade.

- Cobalto: Aumenta a resistência sob altas temperaturas e diminui a usinabilidade.

- Titânio: Modera a capacidade de endurecimento da liga.

Nas ligas a base de níquel, ocorre uma expressiva formação de carbonetos, diferente do que ocorre nas ligas do tipo Fe-C, esses carbonetos prejudicam a usinabilidade pelo aumento da resistência mecânica, da abrasividade junto da diminuição da condutividade térmica da liga.

Segundo a ASM (Volume 1) algumas fases constituintes do Inconel 625, são:

- 1- Matriz Gama (γ): Matriz FCC que contém alto percentual de elementos em solução sólida, como Fe, Cr, Mo entre outros.

2- Gama Primária (γ'): Surge pela precipitação de altas frações de Al e Ti. Essa fase aumenta a resistência a alta-temperatura.

3- Carbonetos: carbono é adicionado para reagir com elementos refratários como Ti e Nb, por exemplo.

2.4.2 Aplicações

As ligas Inconel são materiais resistentes a oxidação e corrosão, geralmente utilizadas em ambientes agressivos, como: tanques de armazenamentos criogênicos e equipamentos para indústria petrolífera.

Na indústria petrolífera seu principal uso é em tubulação para exploração e produção de petróleo (NÚCLEO INOX, 2010), esses tubos são revestidos por Inconel em um processo chamado Cladeamento. (MULTICLAD, 2013).

A Figura 18 mostra um tubo com revestimento interno de Inconel.



Figura 18 - Tubo com Inconel depositado internamente.
Fonte: Núcleo Inox, 2010.

Atualmente, as plataformas da Petrobrás no pré-sal usam o Inconel 625 para substituir os Inox duplex e superduplex. (NÚCLEO INOX, 2010).

Além da excelente resistência a corrosão, o Inconel possui excelente resistência mecânica a altas temperaturas aumentando sua durabilidade, o que o torna a primeira escolha para aplicações na indústria automobilística de ponta (THERAZANI, 2012). A Figura 19 mostra um coletor de escape em Inconel.



Figura 19 - Coletor de escape em Inconel.

Fonte: Lancer Register. Disponível em: <www.lancerregister.com>. Acessado em: 03 abr. 2013.

Pode-se encontrar também aplicações nos motores a jato, corpos e peças de bombas, motores de foguetes e reversores, espaçadores (elemento de combustível nuclear), ferramental de extrusão à quente, entre outros usos populares onde se faça necessário alta resistência e baixo custo de manutenção.

2.4.3 Propriedades

A tabela 2 apresenta uma compilação das propriedades do Inconel 625, segundo ASM (Volume 1), a uma temperatura de referência de 21°C.

Tabela 2 - Propriedades do Inconel 625 a 21°C

Inconel 625 (21°C)	
Propriedade	Valor
Tensão de Escoamento	490 MPa
Módulo de Elasticidade	208 MPa
Densidade	8,44 g/cm ³
Caloria específica	410 J/(kg.K)
Condutividade Térmica	9,8 W/(m.K)

Fonte: ASM Metals Handbook, Volume 1

Outra propriedade importante do Inconel 625 é sua baixa usinabilidade que segundo Rodrigues (2009), deve-se aos seguintes fatores:

1. Devido a sua alta resistência aos efeitos térmicos a maior parte da resistência do material é mantida durante a usinagem;
2. Rápida ocorrência de encruamento devido aos esforços aplicados;
3. Alto desgaste abrasivo devido a elevada presença de carbonetos na liga;
4. Altas taxas de difusão no par ferramenta-peça devido às altas temperaturas presentes na região de corte;
5. Por ser uma liga refratária e apresentar baixa condutividade térmica o desempenho da ferramenta acaba sendo prejudicado pois a extração do calor não se dará da forma convencional, pelo cavaco ou fluido de corte (caso este seja usado).

Machado et al. (1999) chega a considerá-lo como uma das mais baixas usinabilidade entre os materiais usualmente utilizados na indústria metal-mecânica.

Para ferramentas de metal-duro, os modos de falha dominantes são devidos ao severo desgaste de flanco e entalhe ao longo da aresta.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais de trabalho

3.1.1 Corpos de Prova

Para a execução dos ensaios foi utilizado um corpo de prova doado pela companhia *Aker Solutions*, localizada na cidade de Curitiba. A empresa citada produz equipamentos para extração de petróleo em águas profundas, por isso a necessidade de usar o Inconel 625 em seus equipamentos.

A amostra doada consiste em um tubo API 5L de 300 *mm* de comprimento e 224 *mm* de diâmetro, nesse tubo encontra-se depositada uma camada de Inconel 625 com espessura entre 10 *mm* e 12 *mm* em um comprimento de 240 *mm* no tubo.

A Figura 20 mostra o tubo com Inconel 625 depositado.



**Figura 20 – Tubo API 5L com deposição de Inconel 625.
Fonte: Elaborada pelos autores.**

O processo de deposição do Inconel 625 é chamado de cladeamento, uma soldagem de diferentes ligas de metais para, nesse caso, revestir tubos e flanges. O processo de solda utilizado é o TIG, o material a receber a deposição necessita ser aquecido a uma temperatura máxima de 300°C, quando esta temperatura limite é

atingida é necessário parar o processo para que a peça esfrie. Todo o processo de soldagem na *Aker Solutions* segue a norma ASME 9.

Para fins de informação Tabela 3 mostra a composição do aço API 5L.

Tabela 3 - Composição média do tubo API5L.

Composição Máxima (%) Tubo API 5L				
C	Mn	P	S	
0,28	1,25	0,04	0,050	

Fonte: Brastubos. Disponível em www.brastubos.com.br. Acessado em 11/10/2012.

Algumas adaptações na amostra doada foram feitas para que tubo pudesse ser fixado com segurança dentro do torno CNC, uma tampa e um tarugo de aço foram soldados em uma das extremidades do tubo para ser preso pela castanha. Na outra extremidade foram soldadas três barras a fim de promover um local para a fixação da contraponta do torno.

As adaptações são mostradas na Figura 21 e Figura 22.



Figura 21 – Tampa e cilindro de aço soldado no tubo API 5L
Fonte: Elaborada pelos autores.



Figura 22 – Barras soldadas para a furação de centro.
Fonte: Elaborada pelos autores.

Apesar da relação $L/D \leq 5$ ser obedecida, foi necessário o uso da contraponta devido ao alto peso da peça. Devido a esse peso, também, foi necessário o uso de uma “girafa” para colocar a peça na máquina com segurança, conforme mostra a Figura 23.



Figura 23 – Uso de cegonha para colocação da peça no torno.
Fonte: Elaborada pelos autores.

A Figura 24 mostra a peça presa no torno CNC.

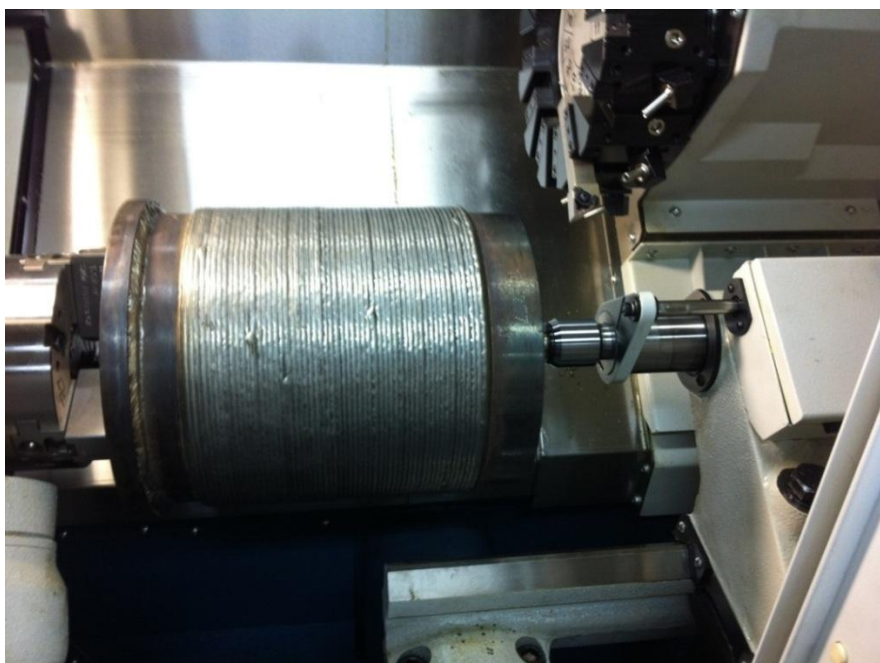


Figura 24 – Peça presa na máquina.
Fonte: Elaborada pelos autores.

3.1.2 Tornos

Para a realização dos ensaios, foi necessária a utilização de dois tornos diferentes. Para o ensaio de tempo de vida da ferramenta, os ensaios foram feitos no Centro de Torneamento Romi GL 240. Devido à impossibilidade de instalar o dinamômetro no torno CNC, os ensaios para determinação dos esforços de usinagem foram feitos no torno de avanço mecânico convencional. As especificações dos dois equipamentos são mostradas a seguir.

O primeiro equipamento utilizado no trabalho foi um Centro de Torneamento Romi GL 240, mostrado na Figura 25.



**Figura 25 - Foto do Centro de Torneamento Romi GL 240.
Fonte: Elaborada pelos autores.**

Segundo o manual do fabricante, o Centro de Torneamento Romi GL 240 tem base monobloco de ferro fundida, especialmente projetada e construída para oferecer alta rigidez e estabilidade em operações de usinagem à plena potência. O equipamento também possui porta-ferramentas para 12 posições acionado por servo motor e controle CNC GE Fanuc Oi-TC com LCD colorido de 10,4”.

Algumas outras especificações do Centro de Torneamento estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Principais especificações do Centro de Torneamento Romi 240 GL

Diâmetro admissível sobre a proteção do eixo Z	420 mm
Diâmetro máximo torneável	240 mm
Comprimento máx. torneável entre pontas	400 mm
Curso transversal do carro (eixo X)	180 mm
Curso longitudinal do carro (eixo Z)	400 mm
Faixas de velocidades	6 a 6000 rpm
Potência	20 cv

Fonte: <http://www.romi.com.br>. Acessado em 9 nov. 2012.

Para os ensaios de força de corte foi utilizado um torno com avanço mecânico convencional da marca Romi modelo Imor S-400 II, mostrado na Figura 26, na com rotações variando entre 63 e 1200 RPM.



Figura 26 - Torno Romi Imor S-400 II
Fonte: Elaborada pelos autores.

3.1.3 Ferramenta de Corte

A ferramenta de corte utilizada para os ensaios de teste foi uma ferramenta de torneamento cilíndrico externo. Para a fixação dos insertos foi utilizado um porta-ferramentas da marca Iscar modelo MTJNL2020-16 com secção de 20x20 mm e ângulo de direção de 93°. O porta-ferramentas é mostrado na Figura 27.



Figura 27 - Foto do porta-ferramenta.
Fonte: Elaborada pelos autores.

Para o torneamento do Inconel 625 foram utilizadas pastilhas da fabricante *Sandvik Coromant* de código TNMG 16 04 04-MF GC1125, mostrado na Figura 28 com as seguintes características, segundo catálogo do fabricante (ANEXO 3) :

- Ferramenta triangular;
- 0° de ângulo de saída;
- Aresta de corte de 27 mm;
- Espessura de 4,76 mm;
- Raio de ponta de 0,4mm;
- Classe S;
- GC1125 – S25 (S20-S30): “Recomenda para superligas resistentes ao calor com baixas velocidades ou cortes levemente intermitentes. Boa resistência contra desgaste tipo entalhe e contra choques térmicos fazem com que essa classe seja adequada para uso em operações semi-difíceis, com tempos de contato curtos.”.

A pastilha de corte utilizada é recomendada pelo fabricante para usinagem do Inconel e de outras ligas resistentes ao calor e com corte levemente intermitente. A escolha dessa ferramenta foi, também, motivada pelo fato de ser utilizada na indústria de equipamentos para extração de petróleo para usinagem deste material.



Figura 28 - Foto do Inserto *Sandvik Coromant*
Fonte: Elaborada pelos autores..

3.1.4 Fluídos de Corte

Para os ensaios de vida da ferramenta no Torno CNC Romi foi utilizado o óleo solúvel *Hydria-EP* do fabricante *Amphora Química*, este óleo tem como características:

- Alto poder de refrigeração;
- Aditivos de extrema-pressão;
- Aditivos anti-ferruginosos;
- Estabilizadores. Inibidores e anti-espumantes.

O óleo foi diluído em 1 parte para 19 de acordo com a recomendação do fabricante.

3.1.5 Equipamento Óptico

Para a visualização dos desgastes de ferramenta VB_B foi usado o microscópio óptico Olympus BX51M com ampliações de 5x, 10x, 20x, 50x, 100x. As imagens foram capturadas por meio de um kit de captura *Cool Snap Pro cf* da *Media Cybernetics* e no *software* Image-Pro Plus, foram realizadas as medições dos desgastes nas amostras.

A Figura 29 mostra o equipamento óptico utilizado durante o ensaio.



Figura 29- Equipamento óptico.
Fonte: Elaborada pelos autores.

3.1.6 Rugosímetro

O rugosímetro utilizado foi o modelo portátil *Supertronic 25* da fabricante *Taylor Hobson* capaz de ler os parâmetros: R_a , R_z , R_t , R_p , R_{mr} , R_{pc} , R_{sm} , R_{z1max} , R_{sk} , R_{da} no sistema métrico e inglês, com indicação digital contra aplicação inadequada, evitando leituras errôneas.

A Tabela 5 apresenta as características técnicas do rugosímetro, segundo o fabricante.

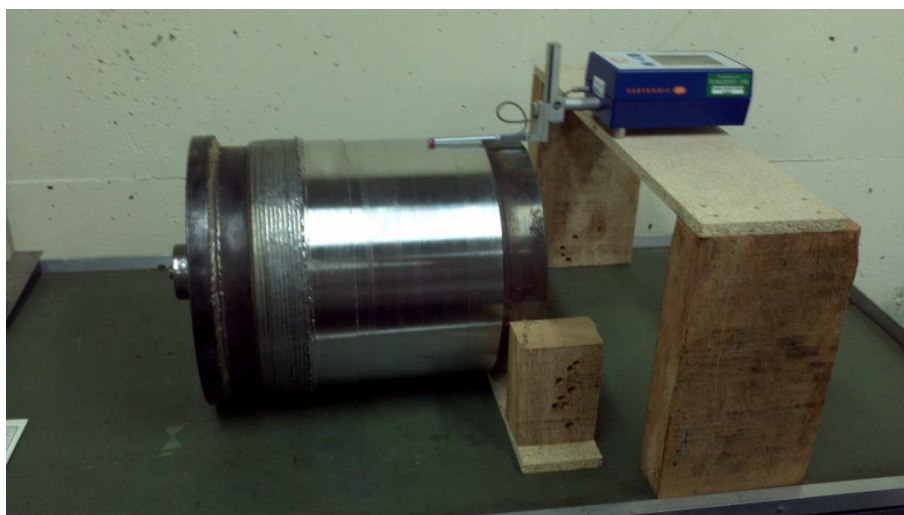
Tabela 5 - Características técnicas do rugosímetro *Supertronic 25*

Deslocamento máximo do apalpador	0,25 – 0,35 mm
<i>Cut-off</i>	0,25; 0,80 e 2,5 mm
Filtros	2CR ou Gaussiano
Campo de medição	300 μ m
Resolução	0,01 μ m
Saída	RS232
Peso	245 g
Dimensões	127x85x60 mm

Fonte: Taylor Hobson

Para as medições realizadas neste trabalho, os seguintes parâmetros foram ajustados: para o *cut-off* foi definido o valor de 0,8 mm e o filtro ajustado para 2 CR.

Devido a grande dimensão da peça de trabalho fez-se necessária a construção de um dispositivo para acomodar o rugosímetro e efetuar as leituras das rugosidades. A Figura 30 mostra o rugosímetro sobre o dispositivo construído para o trabalho.



**Figura 30 – Rugosímetro e dispositivo para medição da rugosidade superficial.
Fonte: Elaborada pelos autores.**

3.1.7 Dinamômetro

Para medição das forças de usinagem foi utilizado um dinamômetro *Kistler* modelo 9265B conectado a um amplificador de sinal também da marca *Kistler* e modelo 5070. O princípio de funcionamento deste dinamômetro é o efeito *piezelétrico* nele é fixada a ferramenta e as forças em X, Y e Z são enviadas ao amplificador.

No período do ensaio de forças, o dinamômetro piezelétrico não estava calibrado podendo acarretar divergências de valores com ensaios futuros.

A Figura 31 mostra o dinamômetro montado no torno.



Figura 31 - Dinamômetro e ferramenta montado no torno.
Fonte: Elaborada pelos autores.

A Figura 32 mostra o amplificador de sinais que é ligado ao dinamômetro.



Figura 32 - Amplificador de sinais.
Fonte: Elaborada pelos autores.

Para leitura dos dados do dinamômetro no computador foram utilizados *software Lab View Pro* e um amplificador de sinais analógico da marca *National Instruments*.

3.2 Metodologia

Para os ensaios de usinabilidade da liga Inconel 625, apresentados neste projeto, foram adotadas como metodologia o critério de vida de ferramenta de acordo com o descrito pela norma ISO 3685 junto com a medição da rugosidade e a determinação da pressão específica de corte segundo Kienzle.

3.2.1 Critério de vida de ferramenta

A norma ISO 3685 estabelece quatro condições de corte para o ensaio de usinabilidade quando apenas a velocidade de corte será a variável do ensaio

A Tabela 6 apresenta os parâmetros padronizados pela ISO 3685.

Tabela 6 – Condições padronizadas de corte.

Condições de corte	A	B	C	D
Avanço f , mm/rev	0,1	0,25	0,4	0,63
Profundidade de corte a_p , mm	1,0	2,5	2,5	2,5
Raio de quina, r_ϵ , mm	0,4	0,8	0,8	1,2

Fonte: ISO 3685

Também é estabelecido pela mesma norma, tolerâncias para os parâmetros citados acima, são elas:

- +3% ou – 2% para o avanço f ;
- 5% para a profundidade a_p ;
- $\pm 0,1 \times r_\epsilon$, para o raio de quina r_ϵ .

Baseado no raio de quina r_ϵ da ferramenta do ensaio e devido à quantidade de material disponível foi utilizada a condição “A” da norma ISO 3685, alterando-se a profundidade de corte (a_p) para 0,8 mm. De acordo com a condição mínima recomendada pela mesma norma: $a_p \geq 2 \times r_\epsilon$.

Visando realizar a simulação da condição real de usinagem da amostra em estudo, em todas as velocidades de corte foram usinados os primeiros 40 mm na região onde o material encontra-se depositado, nesse comprimento então para cada uma das quatro velocidades, o valor da profundidade de corte não se mantém constante e a forma como é realizado o corte é interrompido. Após esses primeiros 40 mm usinados, a ferramenta retorna e avança 0,8mm na profundidade da peça, usinando a região torneada anteriormente e mantendo o valor de a_p constante.

3.2.1.1 Velocidades de corte

A norma ISO 3685 define que a velocidade de corte (m/min) deve ser determinada na superfície da peça a ser usinada e não no diâmetro resultante da operação de torneamento.

Ao menos quatro velocidades de corte devem ser escolhidas, segundo a ISO 3685, para cada condição de corte. A velocidade deve ser escolhida de maneira que

a vida da ferramenta seja o menos de 5 min para usinagem de materiais comuns e de 2 min para materiais de alto valor financeiro, como o Inconel 625 utilizado nesse trabalho.

Para a escolha da velocidade de corte, a norma ISO 3685 sugere a utilização de uma tabela contendo uma série geométrica de números preferenciais, divididos por tipo de ferramentas. Pode-se aumentar ou diminuir essas velocidades multiplicando ou dividindo por 10, respectivamente.

O ANEXO 4 contém a série geométrica de números preferenciais.

De acordo com Machado et al. (1999) que obteve velocidades de corte da ordem de 50 *m/min* para Inconel e baseado na menor velocidade corte (58 *m/min*) dos ensaios de Andrade e Lima (2011) utilizou-se como referência a velocidade de corte de 50 *m/min*.

A partir desse valor e seguindo a série geométrica contida na norma ISO 3685 foram escolhidas as velocidades abaixo:

- 40 *m/min*;
- 45 *m/min*;
- 50 *m/min*;
- 56 *m/min*.

A velocidade de 56 *m/min* foi escolhida a fim de testar os limites sugeridos por Machado et al. (1999).

3.2.1.2 Vida da ferramenta

Dos três parâmetros colocados como critério para o fim de vida da ferramenta pela norma ISO 3685 fora escolhido para esse trabalho o critério do desgaste de flanco médio $VB_B = 0,3mm$. Esse desgaste é medido na parte lateral da ferramenta.

3.2.1.3 Repetibilidade

Para validar o método utilizado no presente trabalho, um ensaio de repetibilidade foi feito. O ensaio consistiu em medir o tempo de vida e o desgaste VB_B para a velocidade de corte de 50 *m/min*.

3.2.2 Qualidade superficial

Após o término dos ensaios com as quatro velocidades de corte escolhidas anteriormente, foram analisadas a qualidade superficial das regiões de corte e tomados os valores da rugosidade.

Para cada região de corte foram realizadas quatro medidas lineares e tomada sua média, após isso novas medições foram feitas a cada 120° e a média desses três valores foram consideradas como resultado.

3.2.3 Força de corte

Devido à impossibilidade de instalar o dinamômetro no torno CNC os ensaios para determinação dos esforços de usinagem foram feitos no torno de avanço mecânico convencional.

Devido ao torno não possuir bomba para refrigeração este ensaio foi feito a seco, baseado nisso e nos resultados de Andrade e Lima (2011) em que para velocidades de corte acima de 40 m/min resultaram em uma baixa vida de ferramenta. De acordo com esses dados e com os valores de rotação disponíveis no torno escolheu-se a velocidade de 29 m/min para o ensaio.

Para a velocidade de corte escolhida foram escolhidos os parâmetros apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores de avanço e profundidade para ensaio de força

Profundidade de corte a_p (mm)	Avanço f (mm/rev)		
0,8	0,1	0,155	0,201
1,0	0,1	0,155	0,201

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os valores acima foram escolhidos dentro dos limites sugeridos pela ISO, conforme mostra a Figura 33.

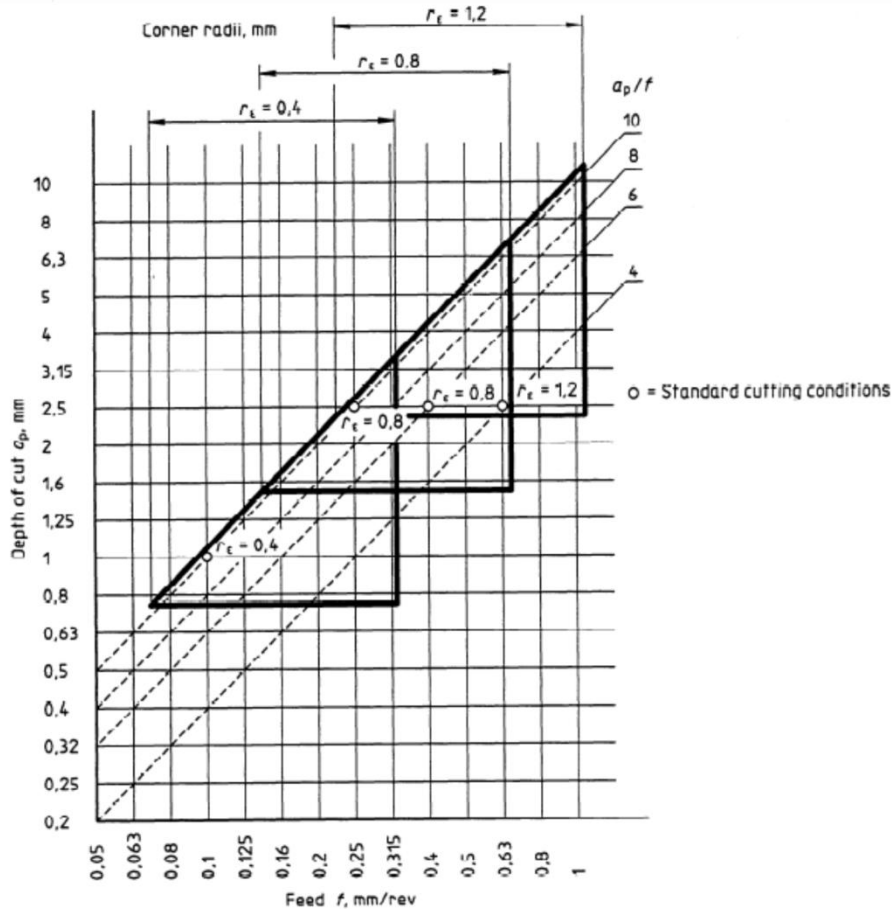


Figura 33- Condições-limites de corte.
Fonte: ISO 3685.

3.2.4 Cavaco

Durante os ensaios foram recolhidas amostras dos cavacos para as diferentes condições de usinagem para análise posterior

3.2.5 Planejamento experimental

3.2.5.1 Curva de vida de ferramenta e rugosidade

Após a preparação da amostra com a soldagem das barras para a fixação no torno foram definidas as condições de corte e as quatro velocidades de corte.

Quando dentro do torno a amostra foi submetida a ensaio e o tempo de operação medido através de cronômetro. A cada 10 mm de usinagem completo a ferramenta era retirada e o inserto medido com microscópio, para determinar o desgaste apresentado. Para a velocidade de 56 m/min o desgaste foi medido a

cada 5 mm a fim de evitar que poucos pontos fossem obtidos para o levantamento da curva de vida.

De posse dos dados de tempo, velocidade de corte, e desgaste para as 4 ferramentas foram levantadas curvas de tempo vs. desgaste VB_B .

A Figura 34 mostra um exemplo das curvas levantadas.

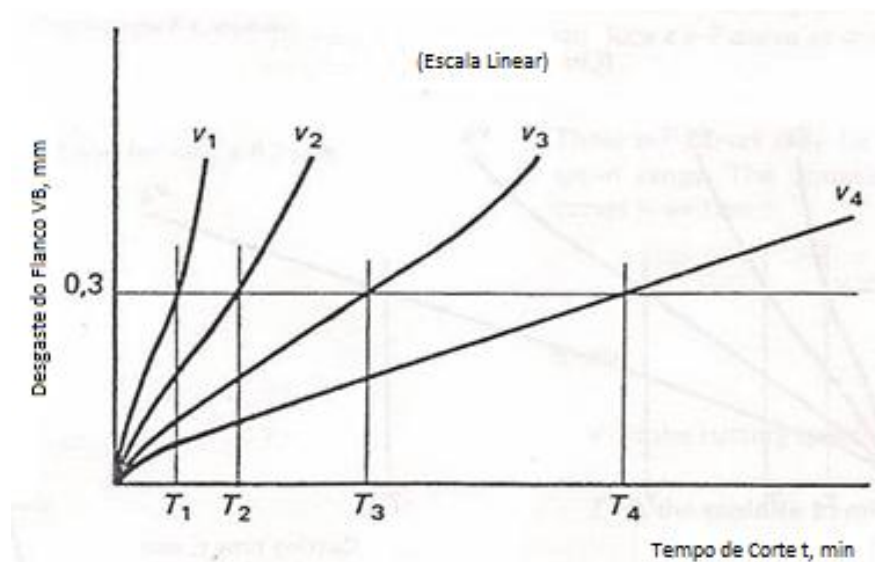


Figura 34 - Curvas tempo (t) vs. desgaste do flanco (VB_B) para diferentes velocidades de corte.

Fonte: ISO 3685.

Também foram plotados gráficos de tempo de vida vs. velocidade de corte para uma vida $VB_B = 0,3mm$.

A curva $v \times t$ pode ser considerada linear pra uma determinada faixa de velocidade. A Equação (3) representa essa faixa de velocidade. A curva pode ser levantada, também, através da linearização da Equação (4).

Ao fim do ensaio de vida de ferramenta será levantado os valores de rugosidade (Ra e Rz) através de um rugosímetro posicionado no dispositivo construído. As medições foram feitas para todas as faixas de velocidades.

3.2.5.2 Força de usinagem

Após a realização dos ensaios para aquisição das forças de usinagem para os seis parâmetros descritos, anteriormente, foram levantados os valores da pressão específica de corte ($k_{c1.1}$) e do expoente de Kienzle (mc) através do método de Kienzle (Equação (7)).

4 RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

4.1 Resultados dos ensaios em função do tempo de vida da ferramenta

Conforme descrito na metodologia do presente projeto, foi utilizado como critério de análise do fim de vida da ferramenta, quando obtido desgaste de flanco médio VB_B superior a $0,3\text{ mm}$.

A Figura 35, apresenta a sequência de medições realizadas a cada 10 mm usinados no comprimento da peça, até que se alcançasse o critério de fim de vida da ferramenta para a velocidade de corte $V_{C1} = 50\text{ m/min}$.

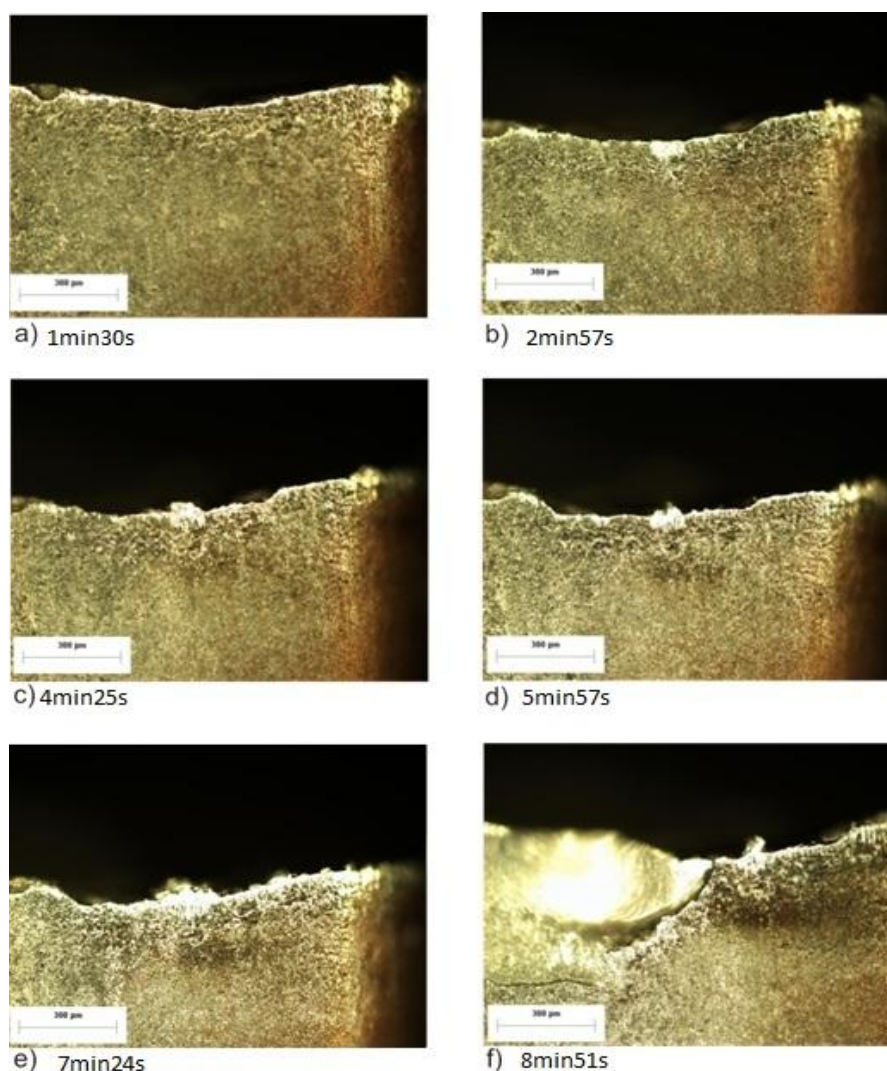


Figura 35 – Sequência de desgaste da ferramenta para velocidade de corte $V_{C1} = 50\text{ m/min}$.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Antes da realização dos outros ensaios, para as três velocidades de corte restantes, foi utilizada a mesma velocidade de corte novamente para avaliar a repetibilidade do teste e aprovação da metodologia utilizada. Para o resultado obtido, foram gerados a Tabela 8, que compara as medições dos desgastes das duas arestas para a mesma velocidade e a Figura 36 “desgaste de flanco médio V_{B_B} ” vs “tempo de vida” para os dois ensaios.

Tabela 8 – Resultados obtidos para dois ensaios com a mesma V_c

$V_{C1a} = 50m/min$		$V_{C1b} = 50m/min$	
Tempo Vida (min)	Desgaste VBB (mm)	Tempo Vida (min)	Desgaste VBB (mm)
00:00	0	00:00	0
01:30	0,056	01:29	0,058
02:57	0,091	02:56	0,079
04:25	0,15	04:23	0,157
05:57	0,167	05:57	0,171
07:24	0,223	07:23	0,238
08:51	0,31	08:50	0,323

Fonte: Elaborada pelos autores.

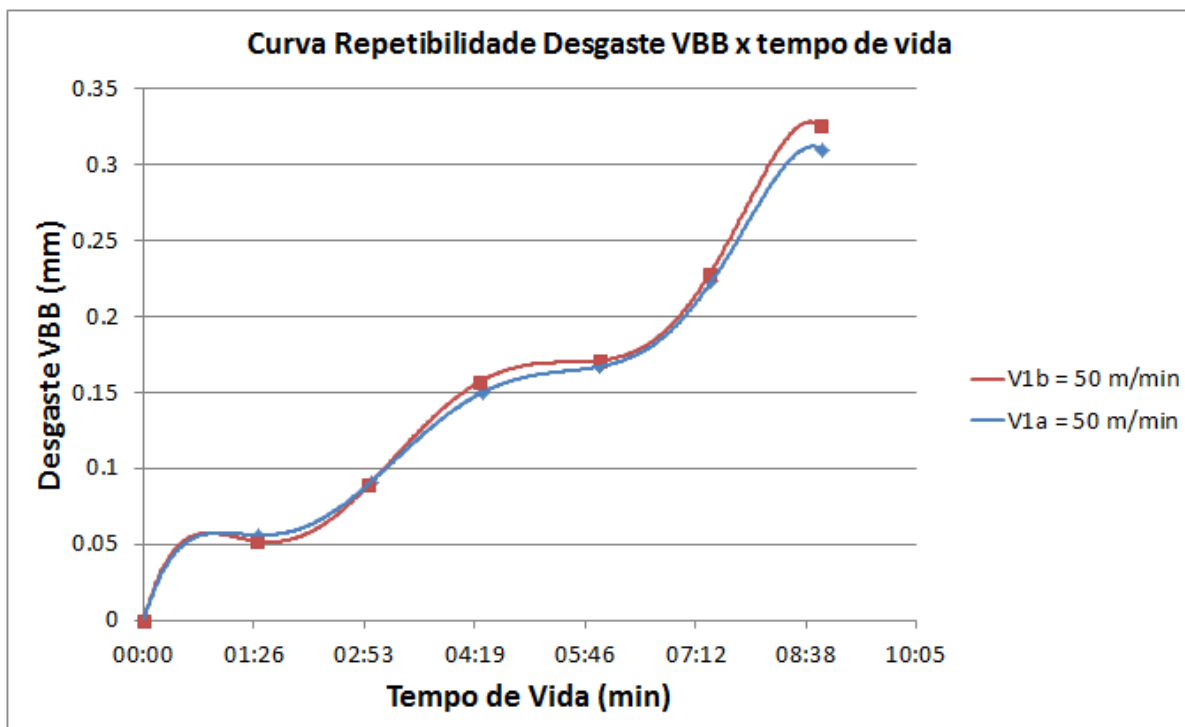


Figura 36 - Curva de comparação entre ensaios.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Analisando os dados do teste de repetibilidade obtidos, evidenciamos uma diferença de 4,02% para o último ensaio, o qual para o processo utilizado apresenta uma repetibilidade satisfatória.

Após a realização de todas as medições, foi elaborada a Tabela 9, a qual apresenta o resultado obtido para o tempo de vida das quatro velocidades de corte utilizadas no trabalho, conforme critérios de medições estabelecidos no Capítulo 3.

Tabela 9 - Resultados obtidos nos ensaios de vida da ferramenta.

$V_{C1} = 50m/min$		$V_{C2} = 40m/min$		$V_{C3} = 45m/min$		$V_{C4} = 56m/min$	
Tempo Vida (min)	Desgaste VBB (mm)	Tempo Vida (min)	Desgaste VBB (mm)	Tempo Vida (min)	Desgaste VBB (mm)	Tempo Vida (min)	Desgaste VBB (mm)
00:00	0	00:00	0	00:00	0	00:00	0
01:30	0,056	01:51	0,058	01:38	0,025	00:40	0,09
02:57	0,091	03:42	0,08	03:16	0,047	01:19	0,14
04:25	0,15	05:33	0,098	04:54	0,056	01:59	0,18
05:57	0,167	07:25	0,11	06:33	0,094	02:38	0,186
07:24	0,223	09:13	0,128	08:11	0,127	03:18	0,198
08:51	0,31	11:02	0,137	09:49	0,131	03:58	0,209
		12:50	0,1467	11:27	0,15	04:37	0,216
		14:39	0,17037	13:05	0,17	05:17	0,221
		16:27	0,20353	14:44	0,241	05:57	0,254
		18:14	0,2378	16:21	0,311	06:36	0,271
		20:04	0,2746			07:16	0,306
		21:53	0,314				

Fonte: Elaborada pelos autores.

Na Figura 37 tem-se as curvas plotadas, referente ao desgaste de flanco VB_B vs tempo de vida, de acordo com a Tabela 9 apresentada, anteriormente.

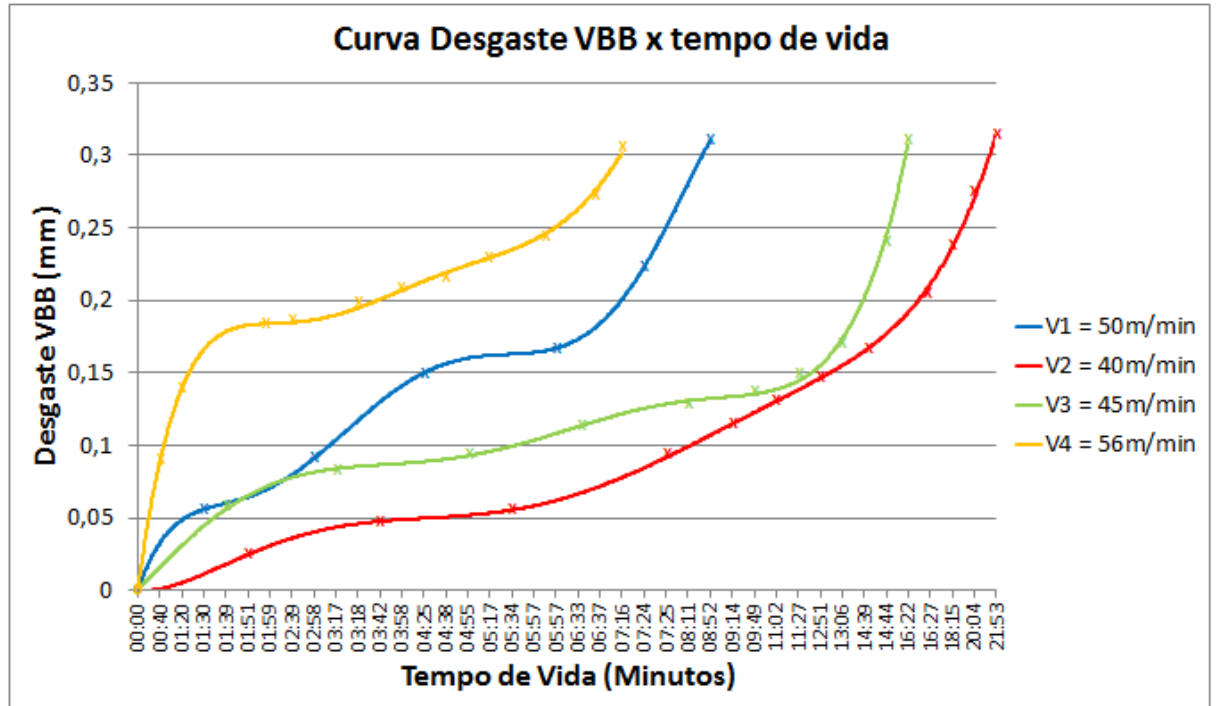


Figura 37 - Gráficos Desgaste (VB_B) x Tempo de vida (T_V)
Fonte: Elaborada pelos autores.

Observa-se primeiramente que um resultado coeso foi obtido, tendo como evidência um maior tempo de vida para a ferramenta para as menores velocidades de corte, alcançando um desgaste mais rapidamente conforme a velocidade aumentava.

Comparando com Andrade e Lima (2011), em que foi alcançado um tempo de vida de 7,5 minutos para uma velocidade corte de $58,56 m/min$, obteve-se um resultado próximo quando comparado a velocidade 4 utilizada neste trabalho ($V_{C4} = 56 m/min$), que apresentou tempo de vida igual a 7,27 minutos. Esta divergência apresentada para um tempo de vida menor para velocidade abaixo da comparada é resultado de que o ensaio do presente trabalho foi realizado em um corpo de prova com material depositado, simulando a condição de corte real para este material, que no caso seria corte interrompido.

Ainda analisando o resultado obtido para o tempo de vida das diferentes velocidades de corte utilizadas, temos resultados plausíveis conforme Machado et al. (1999), que cita que para usinagem de ligas de níquel com ferramentas de metal

duro com revestimento, foram possíveis realizar trabalhos com velocidades de corte da ordem de 50 *m/min*.

De posse dos resultados obtidos foi gerada também a curva de tempo de vida x velocidade de corte em um gráfico di-logarítmico, o qual é mostrado na Figura 38, a partir das equações de Taylor já apresentadas neste trabalho (Equações (3) e (4)).

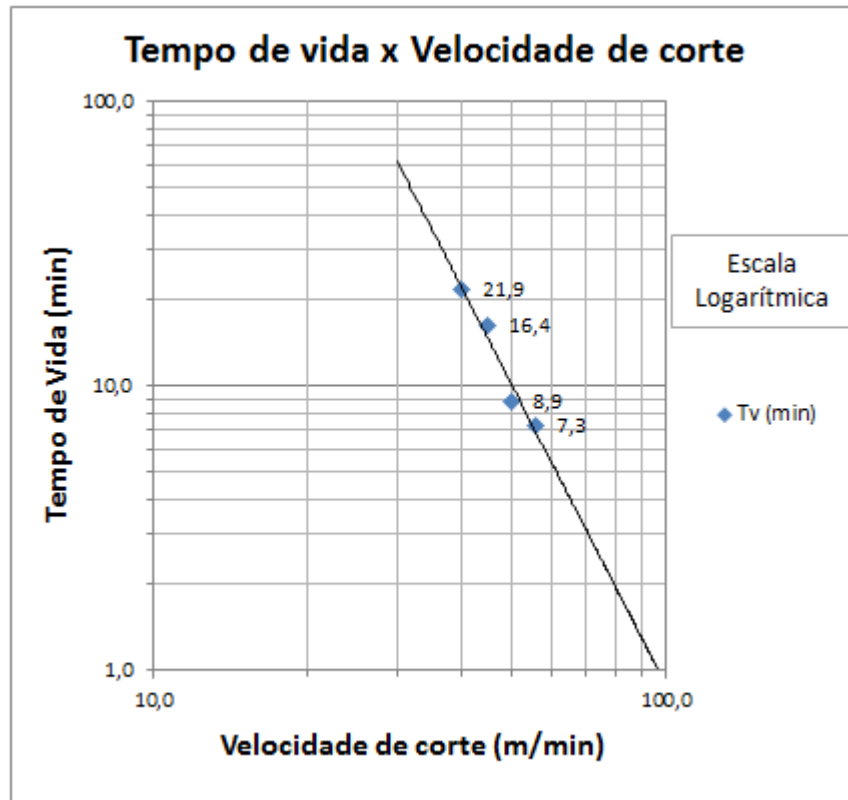


Figura 38 - Tempo de vida (T_v) vs velocidade de corte (V_c).
Fonte: Elaborada pelos autores.

Através do gráfico, retiramos a informação do valor do ângulo de inclinação da curva, $k = 106^\circ$, e a partir deste e com os resultados obtidos experimentalmente, as equações de Taylor referenciadas como Equação (3) e Equação (4), são representadas pelas equações (8) e (9), respectivamente.

$$V_c \cdot T_v^{0,285} = 97 \quad (8)$$

$$T_v = (9E + 06) \cdot V_c^{-3,505} \quad (9)$$

Na equação (8) descrita, verificamos que o termo isolado a direita, com valor 97 *m/min*, refere-se ao valor no qual o gráfico da Figura 38 cruza o eixo horizontal,

este representa a velocidade de corte para a qual a ferramenta apresenta uma vida de 1 minuto. Quando comparado este valor ao encontrado por Andrade e Lima (2011), que determinaram uma vida de 1,5 minuto a uma velocidade de 107 m/min, tem-se uma pequena diferença no valor considerado aceitável, pois a curva da Figura 38 pode ser considerada linear apenas dentro de um determinado intervalo de velocidades. Ressalta-se também que as divergências de valores encontrados nestes ensaios, devem-se ao fato de a ferramenta utilizada por Andrade e Lima (2011) é classificada com a classe GC1025, diferente da utilizada neste trabalho, que conforme já evidenciado, é recomendada pelo fabricante para cortes levemente intermitentes.

Analisando as constantes de (9), encontramos o primeiro valor da ordem de $9E + 06$, referente ao tempo de vida da ferramenta para uma velocidade de corte de 1 m/min , e o valor $k = -3,505$ o coeficiente angular da curva.

4.2 Resultados dos ensaios de acabamento superficial

Abaixo, na Tabela 10, são evidenciados os resultados referentes às medições das rugosidades referentes às últimas quatro medições de desgaste de flanco antes do fim de vida para a respectiva velocidade em uma região da peça.

Tabela 10 - Valores de rugosidade para cada velocidade de corte ensaiada.

V1 = 50m/min			V2 = 40m/min			V3 = 45m/min			V4 = 56m/min		
Desgaste			Desgaste			Desgaste			Desgaste		
VBB (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)	VBB (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)	VBB (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)	VBB (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)
0,15	1,50	9,0	0,20353	1,17	6,4	0,15	1,15	6,1	0,221	1,68	8,9
0,167	1,56	9,1	0,2378	1,24	6,6	0,17	1,16	6,3	0,254	1,68	8,9
0,223	1,57	9,7	0,2746	1,26	6,6	0,241	1,16	6,3	0,271	1,74	10,7
0,31	1,61	9,7	0,314	1,22	6,4	0,311	1,18	6,3	0,306	1,88	9,9

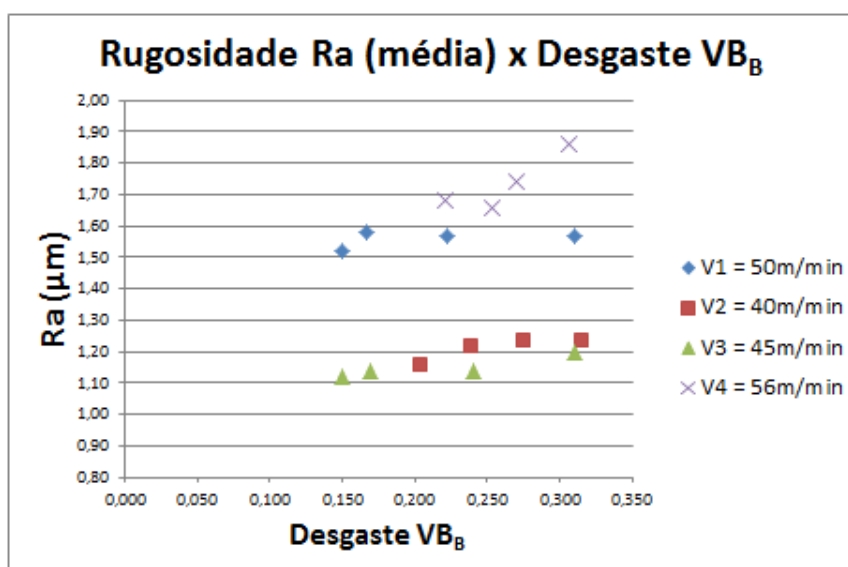
Fonte: Elaborada pelos autores.

Conforme especificado na metodologia do projeto, foram efetuadas três medições para cada uma das últimas quatro medições de desgaste de flanco, sendo estas separadas por um ângulo de 120° , as médias dessas regiões estão evidenciadas na Tabela 11 e na Figura 39.

Tabela 11 - Média dos valores de rugosidade.

V1 = 50m/min			V2 = 40m/min			V3 = 45m/min			V4 = 56m/min		
Desgaste VBB (mm)	Ra médio (μm)	Rz médio (μm)	Desgaste VBB (mm)	Ra médio (μm)	Rz médio (μm)	Desgaste VBB (mm)	Ra médio (μm)	Rz médio (μm)	Desgaste VBB (mm)	Ra médio (μm)	Rz médio (μm)
0,15	1,52	9,2	0,20353	1,16	6,2	0,15	1,12	6,0	0,221	1,68	9,1
0,167	1,58	9,1	0,2378	1,22	6,8	0,17	1,14	6,3	0,254	1,66	8,7
0,223	1,57	9,5	0,2746	1,24	6,7	0,241	1,14	6,2	0,271	1,74	11,4
0,31	1,57	9,8	0,314	1,24	6,0	0,311	1,2	6,3	0,306	1,86	9,8

Fonte: Elaborada pelos autores.

**Figura 39 - Rugosidade média vs desgaste.**

Fonte: Elaborada pelos autores.

Após estas medições, foi realizado o cálculo da média das médias dos valores Ra e elaborada a Tabela 12 e a Figura 40.

Tabela 12 - Ra (média das médias).

Vc (m/min)	Ra (μm)
40	1,22
45	1,15
50	1,56
56	1,74

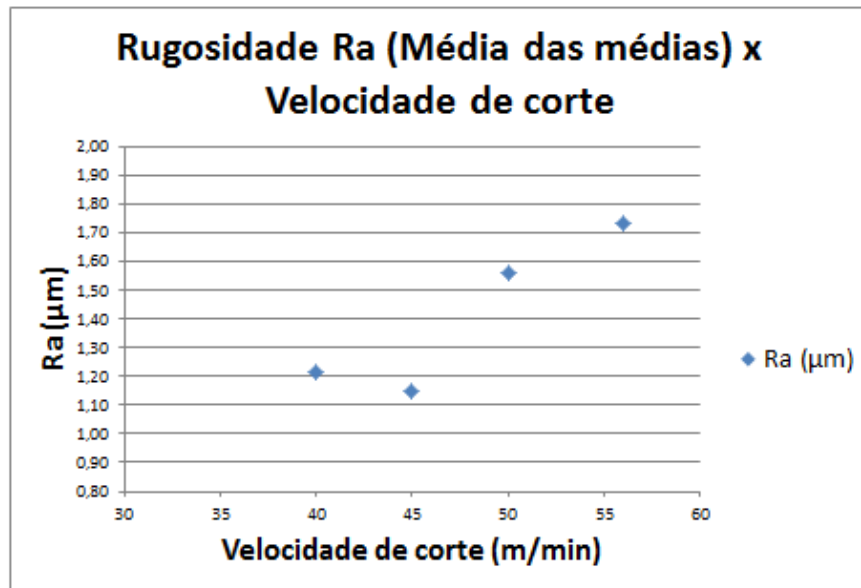


Figura 40 - Rugosidade (média das médias) vs velocidade de corte.
 Fonte: Elaborada pelos autores.

Analisando os resultados de R_a através da Figura 40, observou-se que para as condições de corte realizadas, o valor da rugosidade teve uma pequena diminuição na transição entre as velocidades de 40 e 45 m/min . Porém, contrariando a bibliografia, onde, normalmente o acabamento superficial melhora com o aumento da velocidade de corte (STEMMER, 1987), o que se verificou foi uma redução na qualidade superficial com o aumento da velocidade.

Stemmer (1987) também relata que com o aumento da velocidade, a melhoria é rápida até certa velocidade crítica devido a redução constante das dimensões do gume postiço, a partir daí a melhora no acabamento é reduzida. Em contrapartida Machado et al. (1999), cita que para a usinabilidade de ligas de níquel, com o aumento da velocidade, aumenta-se a temperatura, tem-se um maior desgaste, o que ocasiona uma pior qualidade. Fato observado nos resultados para velocidade de corte superiores a 45 m/min .

Outro fator que também deve ser levado em consideração são as regiões as quais foram realizadas as medidas das rugosidades. Conforme já explicado, estas foram realizadas nos últimos quatro trechos dos ensaios da vida de cada ferramenta, e conforme evidenciado pela Figura 39 (R_a media x desgaste), para as velocidades

maiores quando já se tem um desgaste de flanco mais acentuado, esta região estará sujeita a maiores modo de falha da ferramenta devido à combinação de altas temperaturas com uma maior adesão de material.

O último item analisado referente à rugosidade da peça usinada foi a relação com o comprimento de corte para cada velocidade. Sabe-se que com o aumento deste, o valor da rugosidade tende a aumentar, devido aos desgastes das ferramentas. Santos Jr. (2011) observou que para a usinagem do Inconel 718 a partir de 260 *m* os valores de Ra, tiveram um aumento mais significativo para as maiores velocidades de corte. Este fato foi evidenciado no presente projeto para as velocidades de 40 e 45 *m/min* a partir dos 700*m* de comprimento de corte, enquanto que para as velocidades de 50 e 56 *m/min*. O valor de Ra mostra um aumento após os 300*m*. Tal análise é evidenciada pela Figura 41.

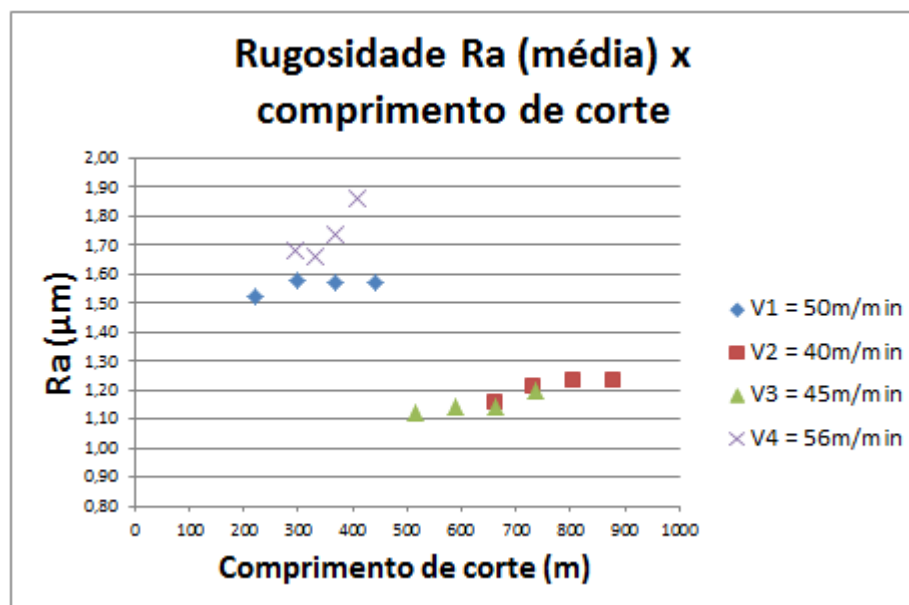


Figura 41 - Rugosidade vs comprimento de corte.
Fonte: Elaborada pelos autores.

4.3 Resultado da análise de forças

Conforme descrito no Capítulo 3, a aquisição das forças foi feita em seis condições de corte, o gráfico da Figura 42 mostra as resultantes das forças para essas condições.

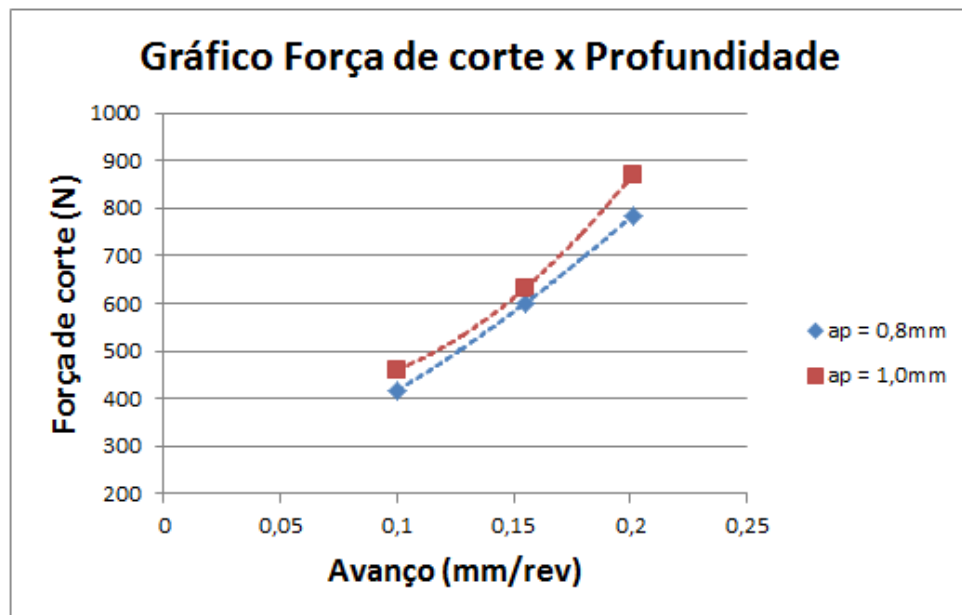


Figura 42 – Resultado gráfico Força de corte x Avanço.
Fonte: Elaborada pelos autores.

Analisando os dados acima, verifica-se que os mesmos seguem um padrão esperado conforme descrito no Capítulo 2 e evidenciado pela Figura 14, que relata um aumento maior na força de corte com um aumento do avanço, do que quando comparado com a profundidade de corte.

Rodrigues (2009), em seus ensaios, obteve valores para força resultante de corte superior a 1400N, porém esse dado serve apenas para fins de informação, já que foi realizado por fresamento e com aplicação de fluido de corte.

O próximo resultado obtido foi a constante da equação de Kienzle (Equação (7)), através da linearização pela aplicação da função logarítmica na mesma, conforme mostra a equação (10):

$$\log\left(\frac{F_c}{b}\right) = (1 - mc) \cdot \log(h) + \log(k_{c11}) \quad (10)$$

A Tabela 13 mostra os dados para determinação dos coeficientes “ k_{c11} ” e “ $1 - m_c$ ”.

Tabela 13 – Dados para determinação dos coeficientes de Kienzle

ap (mm)	Fc (N)	f (mm/rev)	log(Fc/b)	log (h)
0,8	416,32	0,1	2,716	-1,001
0,8	600,73	0,155	2,875	-0,810
0,8	785,15	0,201	2,991	-0,697
1	460,22	0,1	2,662	-1,001
1	632,76	0,155	2,801	-0,810
1	870,88	0,201	2,939	-0,697

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com os valores de $\log(k_{c11})$ e $\log(h)$, foram plotados os três pontos para cada caso e obtida a reta desses pontos. O coeficiente angular das retas representa o valor da constante de Kienzle $(1-m_c)$, e o coeficiente linear o valor de $\log(k_{c11})$. A Figura 43 mostra o gráfico da linearização da equação de Kienzle.

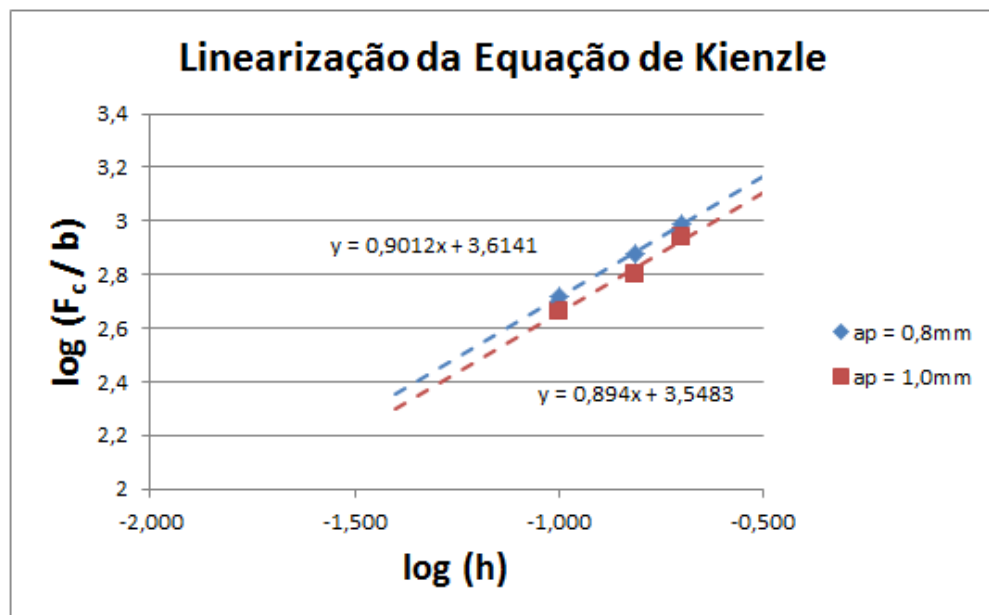


Figura 43 – Linearização da equação de Kienzle.
Fonte: Elaborada pelos autores.

A partir dos dados acima, foram obtidas as constantes da equação para cada ensaio com a variação da profundidade de corte. Esses valores são mostrados na Figura 44 abaixo.

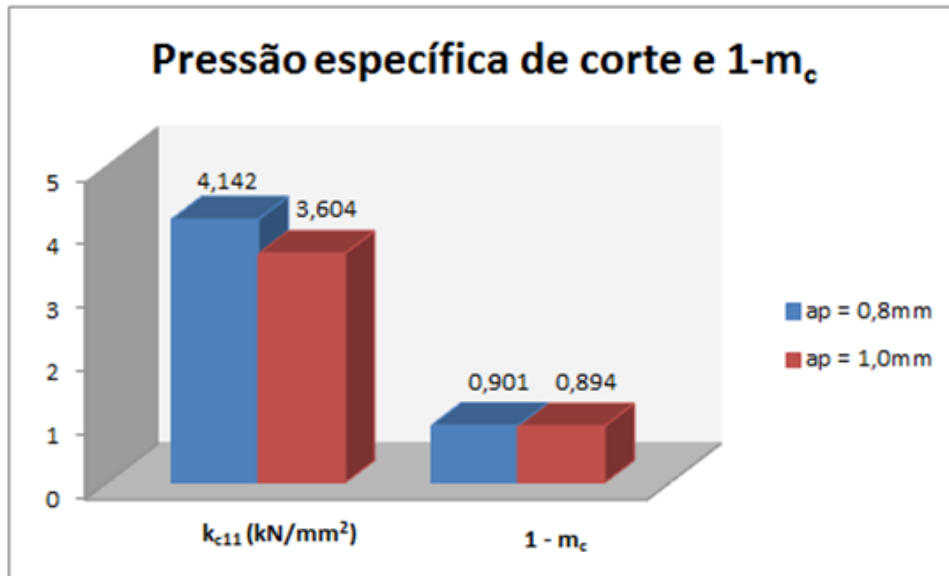


Figura 44 – Constantes de Kienzle

Os valores de pressão específica (k_c), também foram calculados com os valores de força obtidos neste ensaio, a Tabela 14 traz a relação dos valores.

Tabela 14 – Pressão específica k_c (N/mm²) durante usinagem Inconel 625

Profundidade a_p (mm)	Avanço f (mm/rev)		
	0,1	0,155	0,201
0,8	5204,0	4844,6	4882,8
1	4602,2	4082,3	4332,7

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com relação aos resultados obtidos, constatou-se uma proximidade grande na inclinação das retas, acarretando em um erro entre os dois valores de coeficiente angular ($1 - m_c$) menor que 1%. O erro calculado para os valores dos coeficientes lineares ($\log(k_{c11})$), ficou próximo aos 2%. Estes resultados apresentam erros pouco significativos o que mostra uma coerência entre os valores obtidos nos dois ensaios.

4.4 Resultado da análise de cavacos

Os cavacos obtidos para as diferentes velocidades de corte no decorrer do ensaio de tempo de vida são evidenciados a seguir. Também estão evidenciado os cavacos recolhidos durante o ensaio de força de corte, para os diferentes avanços e profundidade de corte.






**Figura 45 - Cavaco após ensaios de tempo de vida. $f = 0,1\text{ mm/rev}$ e $a_p = 0,8\text{ mm}$.
Fonte: Elaborada pelos autores.**

A Figura 45 abrange a forma dos cavacos originados pelo processo de corte nos ensaios de vida das ferramentas. Evidencia-se a forma de cavaco cisalhado em forma de vírgula. Tal formato deve-se ao fato do processo de usinagem dos primeiros passes nos ensaios de vida, ocorrer de forma interrompida.

A Tabela 15 apresenta as formas de cavacos originadas durante os ensaios de medição de força de corte.

Tabela 15 - Cavaco obtido no ensaio de força. $V_c = 29\text{ m/min}$, $f = 0,1\text{ mm/rev}$ e $a_p = 0,8\text{ mm}$ e $1,0\text{ mm}$.

Profundidade a_p (mm)	Avanço f (mm/rev)		
	0,1	0,155	0,201
0,8			
1			

Fonte: Elaborada pelos autores.

A partir das análises dos cavacos e assim como já verificado também por Rodrigues (2006), verifica-se que não há grande mudança na forma do cavaco apenas com a mudança dos parâmetros de corte escolhidos, excluindo-se a comparação entres os cavacos obtidos nos ensaios de vida da ferramenta com os obtidos nos ensaios para medição de força.

O que se observou como uma constante durante os ensaios no presente projeto e com os resultados alcançados por Rodrigues (2006) e Therezani (2012), foi o visível escoamento lateral de material, originando um “*serrilhado*” que também pode ser visto após cada usinagem do material do presente projeto, como mostra a Figura 46.



Figura 46 - Serrilhado na peça usinada.
Fonte: Elaborada pelos autores.

5 CONCLUSÃO

Após a realização dos ensaios descritos na metodologia do projeto, conclui-se que foi alcançado o objetivo principal do mesmo, que se tratou da análise de usinabilidade do Inconel 625.

O primeiro resultado atingido foi a análise do tempo de vida de ferramenta utilizada. Dentro dos objetivos previstos, foram geradas as curvas relacionando tempo de vida das ferramentas com as velocidades empregadas. Constatou-se nesta etapa que assim como citado por Machado et al. (1999), os principais modos de falha ocorrem por desgaste de flanco e cratera. Como principais mecanismos de desgaste observado para este modo de falha, têm-se a abrasão e adesão, decorrentes das altas temperaturas e pressão presentes.

Referente à análise da rugosidade, foi determinada que para velocidades acima de 45 m/min , os valores apresentam resultado de qualidade superficial abaixo ao obtido na velocidade citada. Este fato, já evidenciado no capítulo anterior, devido que na usinagem de ligas de níquel, maiores velocidades acarretam em um aumento da temperatura, o que agrava um maior desgaste no flanco, ocasionando uma pior qualidade superficial, consequência também de vibração observada para as maiores velocidades.

Com a análise dos resultados conclui-se que para o ensaio de força, o mesmo não deve ser considerado como efeito de comparação com os resultados de tempo de vida e rugosidade, tendo em vista que este foi realizado com diferentes parâmetros de usinagem e sem utilização de fluido de corte. O que se pode concluir é que não é recomendável a realização da usinagem do Inconel 625 a seco com ferramenta de metal duro, mesmo que esta seja com revestimento. As ferramentas tiveram seu desgaste prematuro mesmo para velocidade inferior a 40 m/min , conforme sugerido por Andrade e Lima (2011).

A realização da análise de cavacos tem mais a finalidade qualitativa no projeto do que um resultado quantitativo, que possa servir como critério de escolha para a elaboração de um projeto futuro, haja visto que os critérios normalmente envolvidos estão diretamente ligados as condições econômicas de usinagem, seja esta para

uma maior vida da ferramenta, forças de corte ou potencias consumidas e qualidade superficial desejada.

Após as conclusões acima mencionadas, fica como sugestão para trabalhos futuros a unificação dos ensaios realizados, ou seja, realizar a medição da rugosidade de todos os comprimentos de corte usinados, bem como a aquisição das forças para os mesmos percursos. Para tanto, devem ser evitadas velocidades de corte acima de 80 m/min , tendo como referência o gráfico dilog, que apresenta para este ponto um tempo de vida de 2 min , valor este inferior ao recomendado pela norma ISO 3685.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Alexandre C.; Lima, André S.. **Levantamento de curva de vida de ferramenta de corte na usinagem por torneamento da liga Inconel 625**. Curitiba. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

Amorim, H. J. **Estudo da Relação entre Velocidade de Corte, Desgaste de Ferramenta, Rugosidade e Forças de Usinagem em Torneamento com Ferramenta de Metal Duro**. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

ASM – American Society of Metals, Metals Handbook, 5ªed, v.1 – Properties and Selection, 2009.

ASM – American Society of Metals, Metals Handbook, 5ªed, v.16 – Machining, 2009.

ASME – American Society of Mechanical Engineers, Section 9: Welding and Brazing Qualifications, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6163: Geometria de ferramenta de corte, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12545: Conceitos da técnica de usinagem – Força, energia, trabalho e potências, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade, 2002

DINIZ, A. E. et al. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 4ªed, São Paulo: Artliber Editora, 2003.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Carlos: Edgar Blücher, 1969.

GERDAU. **Aços**. Disponível em www.gerdau.com.br . Acessado em 19 jun. 2011.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 3002-1: basic definitions and cutting tool geometry, single point cutting tools, 1982 .

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 3685: tool life testing with single-point turning tools, 1993.

ISCAR MEMBER IMC GROUP. **Ferramentas e Porta ferramentas**. Disponível em: www.iscar.com.br. Acessado em 19 jun. 2011.

KÖNIG, Wilfried; KLOCKE, Fritz. **Fertigungsverfahren**. Düsseldorf: VDI, 1983.

LANCER REGISTER. **Exhaust Manifold**. Disponível em: <www.lacerregister.com> . Acessado em: 03 abr. 2013.

MACHADO, R.A. et al. **The machinability of nickel-based alloys: a review**. Journal of Materials Processing Technology, Londres, Elsevier, 1999.

MULTICLAD. **Aplicações**. Disponível em: <<http://www.multiclad.com.br/3138.html>>. Acessado em 02 abr. 2013

NÚCLEO INOX. **Uso do inox na área offshore**. 2010. Disponível em: <<http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/apresentacoes/oleo-e-gas/flavio-augusto-uso-do-nox-na-area-offshore-novembro-2010.pdf>>. Acessado em: 02 abr. 2013.

REBRAC, **Instrumentos de medição**. Disponível em: <<http://rebrac.com.br/downloads/RUGOSIDADE%20-conceitos-.pdf>>. Acessado em: 01 abr. 2013.

RODRIGUES, Marcelo A. **Investigação sobre o fresamento da liga a base de níquel - INCONEL 625 - depositada em forma de revestimento metálico**. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, 2006.

RODRIGUES, Marcelo A. **Uma contribuição para o estudo das deformações residuais proporcionadas pelo processo de usinagem por fresamento**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, 2009.

SANDVIK COROMANT, **Catálogo Torneamento Geral**. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/pt-pt/TURN_A.pdf&fileName=Ferramentas%20para%20torneamento%20-%20Torneamento%20geral>. Acessado em: 02 fev. 2013.

SANTOS JUNIOR, Tarcísio A.. **Avaliação da Usinagem do Inconel 718**. Guaratinguetá. Trabalho de Conclusão de Curso, 2011.

SCHUITEK, Aloísio J.. **Usinagem**. Notas de aula. Disponível em: <<https://ead.ct.utfpr.edu.br/>>. Acessado em: 26 mar. 2011.

SOUSA, Marcelo do Nascimento. **Aplicação de Modelos Estatísticos para Verificar a Influência dos Elementos Residuais (Cr, Ni e Cu) na Usinabilidade de Aços Corte-Fácil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

SPECIAL METALS CORPORATION, **High Performance Alloys**. Disponível em: <<http://www.specialmetals.com/products/index.php>>. Acessado em: 26 mar. 2011.

STEMMER, Caspar E.. **Ferramentas de Corte I**. Florianópolis: UFSC, 1987.

TAYLOR HOBSON. **Rugosímetro Surtronic 25**. Disponível em <http://www.taylorhobson.com.br/index.php/c_home/produtos/1/0/0>. Acessado em: 01 abr. 2013.

THEREZANI, Douglas F. **Avaliação de diferentes ferramentas no torneamento da liga Inconel 713C**. Campinas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UNICAMP, 2012.

ANEXO 1 – CLASSIFICAÇÃO E APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS

Grupo principal de usinagem			Grupo de aplicação		Direção de aumento da característica		
Letra de identificação	Categoria do material da peça	Cor de identificação	Símbolo	Material da peça	Aplicação e condições de trabalho	No corte	No material da ferramenta
M	Cavaco longo ou curto como metais não ferrosos	Amarelo	M 10	Aço, aço fundido, aço endurecido com manganês, ferro fundido, ferro fundido ligado	Torneamento, velocidades de corte média a alta, pequena seção de cavaco, seção de cavaco pequena à média Torneamento, fresamento. Média velocidade de corte e seção de cavaco. Torneamento, fresamento, aplainamento. Média velocidade de corte, seção média à grande Torneamento e sangramento, especialmente de automáticos	<p>Diagram description: A central box with two horizontal arrows. The top arrow points right and is labeled 'Aumento da v_c'. The bottom arrow points left and is labeled 'Aumento do avanço'. To the right of the box, two vertical arrows point outwards: the left one points left and is labeled 'Resistência ao desgaste', and the right one points right and is labeled 'Tenacidade'.</p>	<p>Diagram description: A central box with two horizontal arrows. The top arrow points right and is labeled 'Aumento da v_c'. The bottom arrow points left and is labeled 'Aumento do avanço'. To the right of the box, two vertical arrows point outwards: the left one points left and is labeled 'Resistência ao desgaste', and the right one points right and is labeled 'Tenacidade'.</p>
			M 20	Aço, aço fundido, aços austeníticos, aço endurecido com manganês, ferro fundido			
			M 30	Aço, aço fundido, aços austeníticos, ferro fundido, ligas de alta resistência ao calor			
			M 40	Aço doce automático, aços de baixa resistência mecânica, metais não-ferrosos e metais leves			
K	Metais ferrosos de cavaco curto, metais não ferrosos e materiais não-metálicos	Vermelho	K 01	Ferro fundido de alta dureza, fundidos com dureza além de 85 Shore, ligas de alumínio com alta quantidade de Silício, aço endurecido, materiais sintéticos de alto desgaste, papel duro, cerâmicas	Torneamento, torneamento externo de acabamento, torneamento interno, fresamento de acabamento, raspamento Torneamento, fresamento, furação, torneamento interno, escariamento e raspamento Torneamento, fresamento, aplainamento, torneamento interno, escariamento e onde é necessária um atenuidade muito alta do metal duro Torneamento, fresamento, aplainamento, fresamento de ranhuras, sobc ondições desfavoráveis, grande de saída possível Torneamento, fresamento, aplainamento, fresamento de ranhuras, sobc ondições desfavoráveis, grande de saída possível	<p>Diagram description: A central box with two horizontal arrows. The top arrow points right and is labeled 'Aumento da v_c'. The bottom arrow points left and is labeled 'Aumento do avanço'. To the right of the box, two vertical arrows point outwards: the left one points left and is labeled 'Resistência ao desgaste', and the right one points right and is labeled 'Tenacidade'.</p>	<p>Diagram description: A central box with two horizontal arrows. The top arrow points right and is labeled 'Aumento da v_c'. The bottom arrow points left and is labeled 'Aumento do avanço'. To the right of the box, two vertical arrows point outwards: the left one points left and is labeled 'Resistência ao desgaste', and the right one points right and is labeled 'Tenacidade'.</p>
			K 10	Ferro fundido com HB > 200, ferro fundido maleável de cavaco curto, aço endurecido, ligas de alumínio silicadas, ligas de cobre, materiais sintéticos, vidro, borracha, papel duro, porcelana, rochas			
			K 20	Ferro fundido com HB < 220, metais não-ferrosos, cobre, liga de cobre e zinco, alumínio			
			K 20	Ferro fundido de baixa dureza, aço de baixa resistência mecânica e madeira estratificada			
			K 20	Madeiras macias e duras, metais não-ferrosos			

Tabela 5 – Grupos de aplicação dos grupos principais de usinagem P, M e K (de acordo com DIN ISO 513) [1]

Figura 47 - Classe ferramentas e suas aplicações.

Fonte: STEMMER, Caspar E.. Ferramentas de Corte I. Florianópolis: UFSC, 1987

ANEXO 2 – FORMAS DE CAVACOS

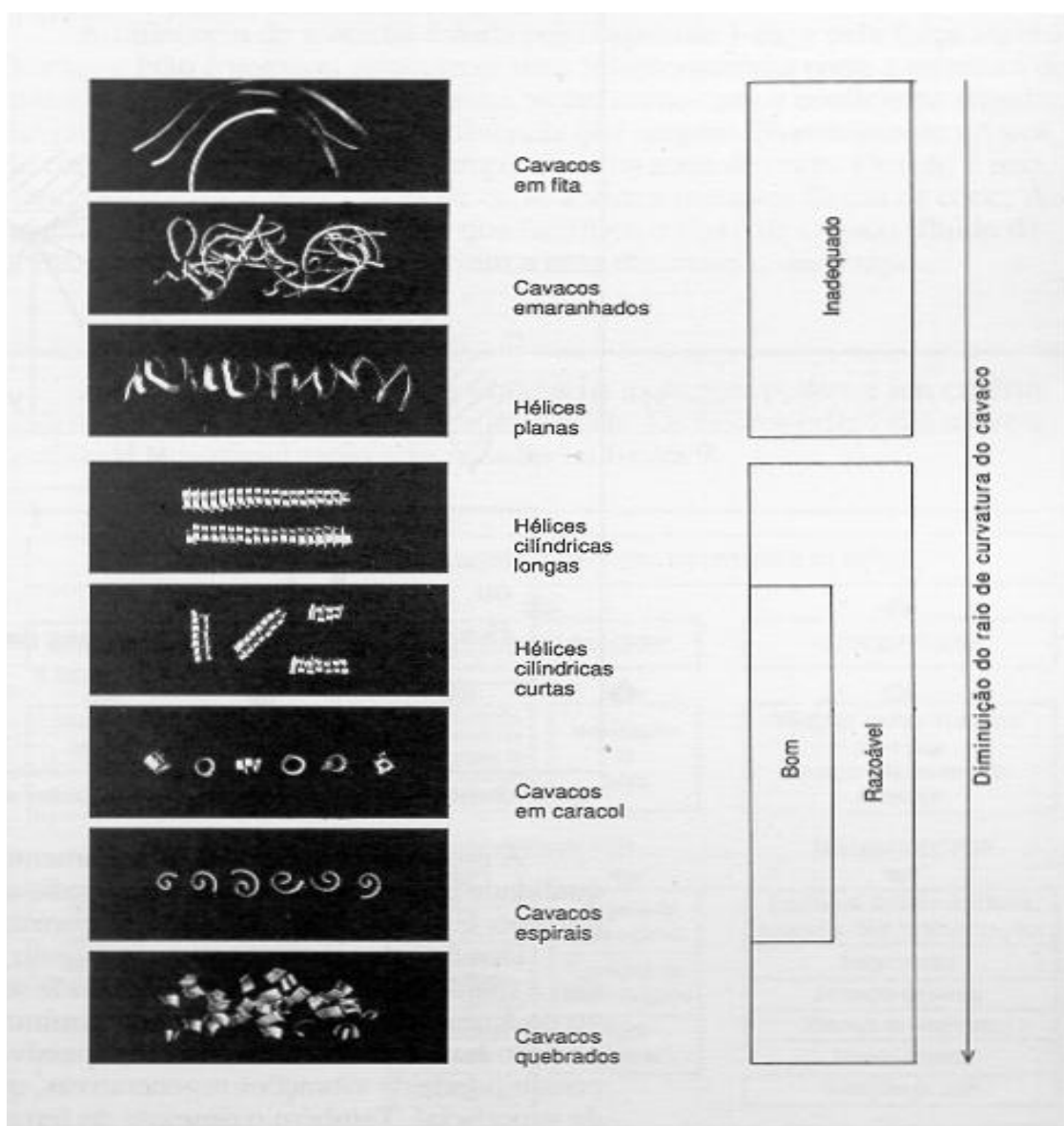


Figura 48 - Formas de cavacos

Fonte: STEMMER, Caspar E.. Ferramentas de Corte I. Florianópolis: UFSC, 1987

ANEXO 4 – SÉRIE GEOMÉTRICA DE NÚMEROS PREFERENCIAIS

Aço-rápido (R40)	Metal duro revestido (R20)	Cerâmica (R10)
1,00	1,00	1,00
1,06		
1,12	1,12	
1,18		
1,25	1,25	1,25
1,32		
1,40	1,40	
1,50		
1,60	1,60	1,60
1,70		
1,80	1,80	
1,90		
2,00	2,00	2,00
2,12		
2,24	2,24	
2,36		
2,50	2,50	2,50
2,65		
2,80	2,80	
3,00		
3,15	3,15	3,15

3,35		
3,55	3,55	
3,75		
4,00	4,00	4,00

4,25		
4,50	4,50	
4,75		
5,00	5,00	5,00

5,30		
5,60	5,60	
6,00		
6,30	6,30	6,30

6,70		
7,10	7,10	
7,50		
8,00	8,00	8,00

8,50		
9,00	9,00	
9,50		
10,00	10,00	10,00

Fonte: ISO 3685

