

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DIRCT / DIRGRAD / DECEN

CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

DISCIPLINA PROJETO FINAL II

**ALEXANDRE COLOMBO DE ANDRADE**

**ANDRÉ RIBEIRO DE SOUZA LIMA**

**LEVANTAMENTO DA CURVA DE VIDA DE  
FERRAMENTA DE CORTE NA USINAGEM POR  
TORNEAMENTO DA LIGA DE INCONEL 625**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA**

**2011**

**ALEXANDRE COLOMBO DE ANDRADE**

**ANDRÉ RIBEIRO DE SOUZA LIMA**

**LEVANTAMENTO DA CURVA DE VIDA DE  
FERRAMENTA DE CORTE NA USINAGEM POR  
TORNEAMENTO DA LIGA DE INCONEL 625**

Monografia apresentada à disciplina Projeto Final II, do Curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, como requisito parcial para aprovação.

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

Co-orientador: Prof. Aloísio José Schuitek, Dr.  
Eng.

**CURITIBA**

**2011**

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia de Projeto Final II intitulada “Levantamento da curva de vida de ferramenta de corte na usinagem por torneamento da liga de Inconel 625”, realizada pelos alunos Alexandre Colombo de Andrade e André Ribeiro de Souza Lima, como requisito parcial para aprovação na disciplina Projeto Final II.

Prof. Pedro Luiz Fiad do Amara, Esp. Eng.  
DAMEC, UTFPR  
Orientador

Prof. Daniel Hioki, Dr. Eng.  
DAMEC, UTFPR

Prof. Milton Luiz Polli, Dr. Eng.  
DAMEC, UTFPR

Curitiba, 12 de dezembro de 2011.

## RESUMO

O Inconel é uma liga com alto índice de níquel em sua composição. Esta liga apresenta características bastante particulares como alta resistência à corrosão e dureza bastante elevada. Isso faz com que esse material tenha importante papel no meio industrial, especialmente nas indústrias química, petroquímica e no meio marítimo. Contudo, encontra-se grande dificuldade quanto à usinagem dessa liga, as ferramentas de corte apresentam acentuado desgaste em muito pouco tempo de usinagem. O objetivo do presente projeto foi levantar a curva de fim de vida de uma ferramenta de corte ao usinar por torneamento o Inconel 625. Para isso, foram realizados ensaios com esse material em diferentes velocidades de corte utilizando-se uma ferramenta de metal duro revestido. A metodologia utilizada para a realização dos ensaios foi à proposta pela norma ISO 3685. Com a curva levantada, foi possível avaliar a viabilidade da usinagem da liga Inconel 625 no determinado campo de velocidades. A usinagem por torneamento da liga de Inconel 625, nas condições adotadas, mostrou-se inviável para velocidades superiores a 80 m/min. Uma vez que a vida da ferramenta é inferior a 2 minutos para essas velocidades, tempo mínimo recomendado pela norma ISO 3685. Os principais mecanismos de desgaste devem ser a abrasão e aderência devido ao comportamento da evolução do desgaste observado nas diferentes velocidades de corte. Devido a evidências da presença do mecanismo de desgaste por abrasão, a ferramenta de corte mais indicada seria uma ferramenta cerâmica, uma vez que esta possui um baixo coeficiente de atrito.

**Palavras-chave:** Curva de vida, Inconel 625.

## ABSTRACT

The Inconel is an alloy with high nickel in its composition. This alloy has very particular characteristics such as high corrosion resistance and very high hardness. This makes this material have an important role in the industrial environment, especially in the petrochemical, chemical and marine industries. However, there is great difficulty on the machinability of this alloy, the cutting tools have very fast wear in machining time. The objective of this project was to raise the tool life curve of a carbide tool when machining by turning an Inconel 625 alloy. For this, tests were conducted with this material at different cutting speeds using a coated carbide tool. The methodology used for the tests the one proposed by ISO 3685. With the curve plotted, it was possible to assess the feasibility of machining of Inconel 625 alloy in the given velocity field. The machining of Inconel 625 alloy under the adopted conditions, proved to be impractical for speeds above 80 m/min. Once the tool life is less than 2 minutes for these speeds, minimum time recommended by ISO 3685 standard. The main wear mechanisms should have been the abrasion and adhesion due to the behavior of the wear evolution observed in the different cutting speeds. Due to evidence of the abrasion wear mechanism, the most suitable cutting tool would be a ceramic one, once this toll has a low friction coefficient.

**Keywords:** Tool life curve, Inconel 625.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desgaste de Flanco em função do tempo para ligas com diferentes concentrações de níquel. ....	22
Figura 2 – Progressão Geral do desgaste de flanco VB durante fresamento a 30 m/min .....	23
Figura 3 - Vida da ferramenta em tempo efetivo de corte em função do teor de níquel. ....	24
Figura 4 – Contribuição dos diversos fatores no desgaste da ferramenta em função da ferramenta de corte. ....	27
Figura 5 – Dados geométricos da ferramenta de corte – Pastilha TNMG 16 04 04, .	31
Figura 6 - Dados geométricos do Porta-ferramentas – Fixador MTJNR 2020K 16M1. ....	31
Figura 7 - Desenho esquemático evidenciando desgaste do flanco (VB) e profundidade da cratera (KT). ....	32
Figura 8 – Ferramenta colapsada em 60 segundo com velocidade de corte a 133 m/min utilizando fluido de corte. ....	35
Figura 9 - Curvas tempo (T) VS desgaste do flanco (VB) para diferentes velocidades de corte. ....	36
Figura 10 – v x T curva $VB_b = 0,3 \text{ mm}$ .....	37
Figura 11 – Sequência dos desgastes medidos para a velocidade corte $V_3 = 88,75 \text{ m/min}$ . ....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites percentuais da composição química da liga de Inconel 625.....	13
Tabela 2 – Composição química de ligas utilizada nos ensaios de Marques (2007).	16
Tabela 3 - Composição química do Inconel 625 em % de peso.....	29
Tabela 4–Resultado da espectrometria da liga a ser usinada em % de peso.....	30
Tabela 5 - Combinações indicadas pela norma ISO 3685 para avanço, profundidade de corte e raio de corte. ....	33
Tabela 6 – Velocidades possíveis conforme diâmetro do material de trabalho e rotações disponíveis no torno. Vermelho: limite superior de velocidade; amarelo: velocidades utilizadas no ensaio; rosa: velocidade utilizada na usinagem a seco para obtenção da temperatura; azul: velocidade próxima para avaliar repetibilidade.....	55

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	Tema	10
1.2	Problema	10
1.3	Objetivos	11
1.1	Justificativa	11
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>12</b>
2.1	Introdução	12
2.2	Liga níquel-cromo Inconel 625	12
2.3	Ferramenta de corte	14
2.3.1	Materiais	14
2.4	Fluido de Corte	17
2.5	Parâmetros de corte	19
2.6	Critério de Fim de Vida da Ferramenta	20
2.7	Vida da Ferramenta.	23
2.8	Mecanismos de desgaste	24
<b>3</b>	<b>Materiais e métodos</b>	<b>29</b>
3.1	Descrição da metodologia	29
3.1.1	Material de Trabalho	29
3.1.2	Ferramenta de Corte	30
3.1.3	Critério de Fim de Vida da Ferramenta.	32
3.1.4	Condições de Corte.	33
3.1.5	Fluido de Corte	35
3.1.6	Procedimentos do Teste de Vida da Ferramenta.	36
3.1.7	Medição do desgaste do Flanco (VB).	38
3.1.8	Repetibilidade.	40
3.2	Equipamentos Utilizados:	41
3.3	Justificativa da metodologia	41
3.4	Produtos do projeto	41
3.5	Etapas do projeto	42
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>43</b>
4.1	Análise dos Resultados	46
4.1.1	Vida da ferramenta.	46
4.1.2	Mecanismos de desgaste	47
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>50</b>
	<b>APÊNDICE A – ENSAIO PRÉVIO</b>	<b>52</b>
	Material de trabalho	52
	O material utilizado para esse ensaio prévio foi o Aço SAE 1045.	52
	Ferramenta de Corte	52
	Parâmetros de Corte.	52
	Velocidade de Corte.	52
	Critério de Fim de Vida da Ferramenta.	53
	Medição do desgaste do Flanco (VB).	53
	Resultados do Ensaio Prévio	54

## ANEXO A – TABELA DE VELOCIDADES DISPONÍVEIS

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Tema

Em muitos processos industriais, sente-se necessidade de se utilizar materiais com alta resistência à corrosão, principalmente em indústrias químicas petroquímicas além do meio marítimo. A liga de Inconel 625 apresenta em sua composição química basicamente os seguintes elementos: níquel, cromo, molibdênio, ferro e nióbio, que, combinados, garantem essas características necessárias no meio industrial. O níquel e o cromo oferecem resistência a ambientes oxidantes, enquanto níquel e molibdênio garantem resistência a atmosferas não oxidantes, crateras de corrosão sob fresta são impedidas pelo molibdênio. O nióbio estabiliza a liga durante a soldagem. (ASM v.1, 1995)

A motivação para a execução deste projeto advém da dificuldade que esse material apresenta para usinagem em torneamento combinado com o pequeno campo de pesquisa com a liga de Inconel 625. Essa dificuldade está relacionada às características físico-químicas da liga em questão.

## 1.2 Problema

Atualmente são poucos os estudos realizados quando a usinagem por torneamento da liga de Inconel 625. Essa liga tem dificuldade de ser usinada, pois sua dureza é muito elevada. Essa alta dureza da liga em questão faz com que a vida das ferramentas de corte fique muito reduzida (SPECIAL METALS, 2011). A oportunidade aqui identificada é a realização de ensaios com a liga de Inconel 625 em diferentes velocidades de corte a fim de levantar curvas de vida das ferramentas.

Esse estudo é de grande importância uma vez que a liga de Inconel 625 tem grande utilidade industrial por apresentar a característica de alta resistência em meios corrosivos (SPECIAL METALS, 2011).

### 1.3 Objetivos

Objetivo Geral:

O presente projeto visa o levantamento da curva de vida da ferramenta de corte recomendada pelo fabricante Sandivick ao usinar por torneamento uma liga de Inconel625, a fim de se obter o tempo de vida da ferramenta de corte em diferentes velocidades.

Objetivos Específicos:

- Levantar as curvas de desgaste por tempo de usinagem da ferramenta utilizada nos ensaios, para diferentes velocidades de corte;
- Avaliar a viabilidade da usinagem da liga no campo de velocidades estudado.

### 1.1 Justificativa

A liga de Inconel níquel-cromo 625 é utilizada devido a sua alta resistência mecânica e corrosiva. Esta liga possui características que a tornam uma excelente escolha para aplicações nas indústrias química, petroquímica e em meios marinhos. São elas: livre de ataque local (corrosão em frestas), alta resistência à corrosão sob fadiga, alta resistência à tração e resistência aos íons de cloreto e corrosão sob tensão(SPECIAL METALS, 2011).

Essas características proporcionam um vasto campo de aplicação para a liga de Inconel 625, por exemplo: pás de hélices de motores de barcos, motores de submarinos, dutos de exaustão para embarcações da marinha, revestimento para cabos de comunicação submarinos, entre outros(SPECIAL METALS, 2011).

Com essa ampla área de aplicação do Inconel, fica clara a necessidade de se usinar o material de maneira eficaz. Assim, o estudo da vida de ferramentas de corte na usinagem por torneamento da liga em questão será de grande utilidade industrial, uma vez que os fatores estudados definem também, em grande parte, o custo do trabalho de usinagem realizado na fábrica.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Introdução

A usinagem, quando tratada de modo técnico como processo mecânico de fabricação, envolve uma série de conceitos que devem ser conhecidos. O estudo destes conceitos e critérios possibilita o conhecimento mais profundo do processo, adequando o profissional envolvido na área a cumprir com as diversas etapas da análise do processo: escolha do processo, das máquinas, das ferramentas e parâmetros envolvidos. Estas escolhas iniciais quando reavaliadas podem resultar em otimização do processo (FERRARESI, 1969).

### 2.2 Liga níquel-cromo Inconel 625

Segundo a empresa Special Metals, detentora da patente da liga níquel-cromo Inconel 625, esta é uma liga de níquel-cromo-molibdênio com uma adição de nióbio, que atua com o molibdênio para endurecer a força matriz e, assim, proporcionar a liga de alta resistência sem tratamento térmico. A liga resiste a uma ampla gama de ambientes extremamente corrosivos e é especialmente resistente à corrosão e corrosão sob fresta. Usado em tratamento químico, aeroespacial e naval, equipamentos de controle de poluição, e reatores nucleares (SPECIAL METALS, 2011).

A superliga a base de níquel Inconel 625 possui uma estrutura CFC, austenítica. Sua densidade é de  $8,44 \text{ g/cm}^3$  (21°C). O módulo de elasticidade a tração e a torção são respectivamente 208 e 81 GPa, ambos a 21°C. (Rodrigues e Hassui, 2006)

O Inconel 625 faz parte de uma classe de superligas a base de níquel que se trata de ligas que contêm de 30% a 75% e até 30% de Cr, endurecidas por solução sólida e por precipitação. (Marques, 2007)

Segundo Vale e Hassui (2007), o Inconel 625 é um material altamente resistente ao calor, portanto, a ferramenta e o fluido de corte ficam incumbidos de dissipar a maior parte do calor gerado no processo. Outras características que

devem ser consideradas são a sua propensão ao encruamento e a presença de carbonetos duros que o tornam abrasivos à ferramenta de corte.

Os limites da composição química da liga são especificados na Tabela 1:

**Tabela 1 - Limites percentuais da composição química da liga de Inconel 625**

Níquel.....	58,0 min.
Cromo.....	20,0-20,3
Ferro.....	5,0 máx
Molibdênio.....	8.0-10.0
Nióbio (mais Tântalo).....	3.15-4.15
Carbono.....	0.10 máx
Manganês.....	0.50 máx
Silício.....	0.5 máx
Fósforo.....	0.015máx
Enxofre.....	0.015 máx
Alumínio.....	0.40 máx
Titânio.....	0.40 máx
Cobalto.....	1.0 máx

**Fonte: SpecialMetals, 2011**

A resistência da liga de Inconel 625 é derivada do efeito enrijecedor do molibdênio e nióbio em sua matriz níquel-cromo, assim os tratamentos de endurecimento por precipitação não são necessários. Esta combinação de elementos também é responsável pela resistência a uma ampla gama de ambientes extremamente corrosivos bem como para efeitos de alta temperatura, tais como oxidação e carburação (SPECIAL METALS, 2011).

A composição química com elevado teor de elementos de liga confere excelentes propriedades mecânicas e térmicas às superligas, mas dificultam a realização da usinagem desses materiais. As principais propriedades são alta resistência mecânica a temperaturas elevadas, alta resistência à fluência, alta resistência à fadiga e boa resistência à corrosão. Suas aplicações estão concentradas nas indústrias aeronáutica, marítima, química, petroquímica e em

componentes que trabalham a altas temperaturas, mantendo excelente resistência mecânica (Vale e Hassui, 2007).

Entretanto, não apenas a resistência mecânica/dureza é importante nesse tipo de aplicações. A ductilidade nas condições de serviço também é importante, e a maioria das superligas apresenta boa ductilidade. As superligas em geral apresentam também boa resistência ao impacto, à fadiga de alto e de baixo ciclo e à fadiga térmica.

A de condutividade térmica de superligas de níquel como o Inconel 625 é da ordem de  $10^{-3}$  (W/mm<sup>2</sup>)/(°C/mm), devido à adição de muitos elementos de liga em elevados teores. Se a condutividade térmica fosse mais elevada, as superligas dissipariam mais o calor minimizando gradientes de temperatura e reduziria as tensões térmicas dificultando a ocorrência de falha por fadiga térmica. (Vale e Hassui, 2007).

## **2.3 Ferramenta de corte**

### **2.3.1 Materiais**

#### **2.3.1.1 *Metais duros com múltiplas camadas de revestimentos:***

##### **2.3.1.1.1 Carbonitreto de titânio:**

Estes apresentam revestimentos múltiplos de TiC – Ti(C,N) – TiN. Combinam as boas características de resistência ao desgaste por abrasão das superfícies de saída do TiC com a resistência a oxidação e formação de crateras do TiN. A primeira camada de revestimento rente à ferramenta é o TiC puro, que assegura boa aderência. Aplica-se em seguida a camada de TiN, como este é menos frágil que o TiC e apresenta menores coeficientes de atrito, ocorrem menores forças de usinagem e pode-se utilizar para cortes interrompidos. (STEMMER, 1924)

##### **2.3.1.1.2 Revestimentos de TiC – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:**

O TiC é utilizado em uma camada intermediária pois a aderência do óxido de alumínio não é perfeita em uma base de metal duro. Este tipo de revestimento é

indicado para a usinagem do ferro-fundido, apesar de ser também utilizado em outras aplicações. (STEMMER, 1924)

#### 2.3.1.2 Cerâmica:

As ferramentas de cerâmica têm como componente principal o corndon ( $Al_2O_3$ ), que aparece na ferramenta cerâmica em forma de um pó muito fino. A qualidade da ferramenta cerâmica depende da baixa porosidade associada a pequenos tamanhos de grãos. A cerâmica como ferramenta de corte possui as seguintes qualidades positivas:

- Alta dureza a quente, que se mantém até cerca de  $1600^{\circ}C$ , permitindo altas velocidades de corte (5 a 10 vezes superiores a dos metais duros convencionais).
- Elevada estabilidade química do óxido de alumínio, evitando o fenômeno de oxidação ou difusão como se observa com o metal duro.
- Não há risco de desgaste eletroquímico pois a cerâmica é isolante.
- Alta resistência a compressão.
- Baixo coeficiente de atrito (menor desgaste da ferramenta e melhor acabamento superficial).
- Nenhuma afinidade com o aço, não se formando gume postiço (menor desgaste da ferramenta e melhor acabamento superficial).

As desvantagens que se destacam são:

- Grande fragilidade, necessitando máquinas muito rígidas.

Condutibilidade térmica muito baixa, sensível a variações bruscas de temperatura, por isso não se recomenda fluido de corte.

(STEMMER, 1924)

Segundo a SECO, fornecedora de ferramentas de corte, o material de trabalho selecionado, Inconel 625 é difícil de ser usinado devido à sua dureza, baixa condutividade térmica e, principalmente, a tendência para o endurecimento que este apresenta durante sua usinagem. Encruamento ocorre sempre que uma ferramenta faz um corte. A superfície usinada do componente é ligeiramente deformada durante

o corte, deixando o material de trabalho substancialmente mais duro que o material original. Isso resulta em entalhes e lascamentos durante as passagens subseqüente. O PVD (deposição física de vapor), revestido, reduz este fenômeno e, portanto, é preferível.

Outro material recomendado também pelo fornecedor SECO para a usinagem do Inconel é o nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN – *Polycrystalline Cubic Boron Nitride*). Este é um material sinterizado a elevada pressão/temperatura em uma matriz altamente resistente ao desgaste, atingindo propriedades muito próximas ao diamante. Como o material apresenta uma excelente dureza a quente, elevada resistência a oxidação e boa tenacidade, as pastilhas de PCBN oferecem, uma excelente resistência de aresta e uma vida mais longa, nas operações de usinagem de materiais ferrosos duros.

O fabricante Sandvik recomenda para a usinagem de superligas de níquel como o Inconel 625 a ferramenta de metal duro cujo código é TNMG 16 04 04 da classe GC1115.

Marques (2007) realizou ensaios de usinabilidade a fim de avaliar a influência do teor de Níquel no desgaste da ferramenta. Para algumas composições químicas, é possível realizar uma comparação com o Inconel 625. Estes ensaios foram realizados com ferramentas de metal duro revestido com cobertura CVD de três camadas TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN, (código ISO CNMG 120404-MF), classe HC – M15. A tabela 2 mostra as composições químicas utilizada nos ensaios que se aproximam ao Inconel 625.

**Tabela 2 – Composição química de ligas utilizada nos ensaios de Marques (2007).**

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	N	Fe
50Ni	0,01	0,28	0,44	17,3	50,4	0,03	0,01	0	0	31,1
60Ni	0,01	0,25	0,41	17,4	60,2	0,02	0,01	0	0	21,3

**Fonte Marques (2007)**

A ferramenta utilizada por Rodrigues e Hassui (2007) foi um cabeçote de faceamento de 63 mm de diâmetro com 7 pastilhas de metal duro revestido com AlTiN, código HM 90 F90AP-D63-7-22 fornecida pela empresa Iscar, ao fresar uma

placa de aço ABNT 8630 (300 x 200 x 25,4 mm<sup>3</sup>) revestida com aproximadamente 20 mm de Inconel 625.

As ferramentas utilizadas por Vale e Hassui (2007) ao realizar ensaios de torneamento de uma liga de inconel 713C tinham código WNMG 080408 classes 1005 e 1105 com revestimentos de TiAlN e TiN respectivamente, da fabricante sueca Sandvik.

O *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (2004) afirma que ferramentas de metal duro são amplamente utilizadas na usinagem de ligas a base de níquel a baixas velocidades de corte de 20 a 30 m/min. A ferramenta K20 aparenta ser a melhor para usinar o Inconel 718. Para altas velocidades de corte, até 100 m/min, usinadas a seco, podem ser alcançadas com a utilização de ferramentas revestidas. O revestimento por PVD de (Ti,Al)N é o mais apropriado. Este apresenta alta resistência a oxidação, estabilidade química a alta temperatura, alta dureza a quente e baixa condutividade térmica. Para velocidades de corte muito superiores (de 200 a 700 m/min) deve-se utilizar ferramentas cerâmicas. O Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TiC é o mais estável quimicamente para o Inconel 718, estes tem maior resistência térmica na usinagem a altas velocidades. A usinagem a seco é recomendada para ferramentas cerâmicas.

## **2.4 Fluido de Corte**

O emprego de fluidos de corte tem por finalidade: aumentar a vida da ferramenta, aumentar a eficiência de remoção de material, melhorar o acabamento superficial, reduzir a força e potência de corte além de eliminar o gume postiço. (STEMMER, 1924)

A refrigeração da ferramenta de corte é especialmente importante em altas velocidades de corte. Quando se utiliza ao máximo as possibilidades da ferramenta e a temperatura do gume se aproxima do ponto de amolecimento, pequeno esfriamento pode provocar grande aumento na vida da ferramenta. Assim, existe a possibilidade de praticar velocidades de corte até 40% maiores com o uso de refrigeração intensa, mantendo-se a mesma vida da ferramenta. (STEMMER, 1924)

A lubrificação deve atuar especialmente na zona de contato da peça e do cavaco com a face da ferramenta. A lubrificação evita a geração de calor durante o corte. O aquecimento se deve a dois fatores: o atrito com a peça e com o cavaco (aproximadamente 25% do calor gerado) e trabalho de dobramento do cavaco (responsável por aproximadamente 75% do calor gerado). Verifica-se então que a lubrificação atua sobre uma pequena parcela do calor gerado. Entretanto, a lubrificação diminui o fator de recalque do cavaco o que reduz também o trabalho de dobramento do cavaco. A viscosidade do lubrificante não altera em nada o coeficiente de atrito. (STEMMER, 1924)

Uma explicação do mecanismo de lubrificação é que a superfície do cavaco e da peça não são absolutamente plana, apresentando irregularidades, nas quais o fluido penetra por capilaridade ou outra ação mecânica. Na usinagem, uma separação completa entre as superfícies é impossível. À medida que aumenta a velocidade de corte, o tempo para a entrada do fluido entre as superfícies atritantes se torna insuficiente, por isso o efeito refrigerante é mais importante que o lubrificante para altas velocidades. (STEMMER, 1924)

A revendedora americana HP Alloys recomenda que a liga de Inconel 625 seja usinada a seco, com óleo ou refrigerante a base de água quando o material da ferramenta de corte for metal duro sinterizado.

Rodrigues e Hassui (2006) utilizaram o fluido Vasco 1000, semissintético, com aditivos EP, Da Blaserao fresar o Inconel 625. Neste ensaio de fresamento e foram utilizadas 7 pastilhas código HM 90 F90AP-D63-7-22 fornecida pela empresa Iscar. Estas foram montadas em um cabeçote de faceamento de 63 mm de diâmetro.

Vale e Hassui (2007), utilizaram fluido integral, Castrollocut 5725 e fluido emulsificável, CastrolSynilo 9954.

Marques (2007), ao usinar ligas com concentração de 50% e 60% de níquel (composição completa na Tabela 2), utilizou o fluido de corte Vasco1000, com concentração de diluição de 10%, conforme indicado e fornecido pela Blaser Swisslube. Este fluido de corte é um óleo de base vegetal emulsionável. O ensaio foi realizado com ferramenta de metal duro revestido conforme mencionado no item 1.4.

O *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (2004) afirma que lubrificantes e refrigerantes aumentam a vida da ferramenta de corte pois reduzem as forças de corte, no entanto, devem ser evitados, uma vez que são prejudiciais ao meio ambiente e geram custos extras. Na usinagem a seco, é necessário suprir as vantagens do fluido de corte de outras maneiras. O processo deve assegurar a uma integridade aceitável da superfície. Ferramentas com alta dureza a quente, alta refratividade, baixa adesão e baixa abrasão são necessárias. Revestimentos de óxidos por PVD combinam redução de abrasão a elevadas temperaturas com alta resistência ao calor. Lubrificantes sólidos como revestimentos compostos MoS<sub>2</sub>/titânio ou revestimentos WC/C devem apresentar bons resultados na usinagem do Inconel 718.

## 2.5 Parâmetros de corte

A vida da ferramenta, para uma velocidade de corte, é evidentemente influenciada pelas dimensões do corte. A relação empírica entre a velocidade de corte, para uma vida da ferramenta de  $t$  minutos, e o avanço e a profundidade de corte é expressa usualmente sob a forma:

$$V_t = C / (a_p^x \cdot f^y) \quad \text{Eq.1}$$

Onde:

$V_t$  = velocidade de corte para uma vida de  $t$  minutos [m/min]

$C$  = constante que depende de outras variáveis-máquina, ferramenta e peça. Corresponde a velocidade de corte para uma vida  $T_v$  da ferramenta usinando com um avanço  $f = 1$  mm e profundidade  $a_p = 1$  mm.

$a_p$  = profundidade de corte [mm]

$f$  = avanço por rotação (ou avanço por dente), [mm/rot]

$x$  e  $y$  = expoentes cujos valores médios na prática valem:

Aço:  $x = 0,14$  e  $y = 0,42$

Esta equação permite deduzir dois fatores importantes. Quando se aumenta o avanço ou a profundidade de corte, a velocidade deve ser reduzida para manter a vida da ferramenta constante. Contudo, assim procedendo, a velocidade de corte diminui numa proporção bem menor do que o aumento do avanço ou da profundidade, resultando um volume de material removido consideravelmente maior, para um mesmo tempo de vida da ferramenta. (STEMMER, 1924)

No ensaio realizado por Marques (2007), já mencionado anteriormente, os parâmetros utilizados para usinar os materiais de trabalho com as diferentes concentrações de Níquel foram as seguintes:

- Velocidade de corte:  $VC = 230$  m/min
- Avanço:  $f = 0,1$  mm/ver
- Profundidade de corte:  $ap = 0,6$  mm

Rodrigues e Hassui (2007) utilizaram os seguintes parâmetros de corte ao fresar uma placa de aço revestida com 20 mm de Inconel 625:

- Velocidade de corte:  $VC = 30$  m/min
- Avanço por dente:  $0,065$  mm/dente

Vale e Hassui usinaram uma liga de Inconel 713C com velocidade de corte de 30 a 90 m/min variando de 5 m/min em 5 m/min, velocidade de avanço de 0,16 mm/min e profundidade de corte de 0,4 mm.

## **2.6 Critério de Fim de Vida da Ferramenta**

A norma ISO 3685 sugere dois critérios para a determinação do fim da vida da ferramenta.

O primeiro critério é baseado no desgaste do flanco da ferramenta de corte, quando a largura máxima do desgaste do flanco for:  $VB = 0,3$  mm (representado na Figura 7) pode-se então considerar que a vida da ferramenta chegou ao fim.

No segundo critério, a vida da ferramenta é determinada pela profundidade da cratera  $KT$  (Figura 7). A profundidade  $KT$  é uma função do avanço  $f$ , e seu valor limite para a vida da ferramenta é obtido através da equação 2:

$$KT = 0,06 + 0,3.f$$

**Eq. 2**

Em sua dissertação de mestrado, Marques (2007) utiliza o critério de fim de vida da ferramenta de desgaste do flanco  $VB = 0,3$  mm. Em sua tese, foram levantadas curvas que evidenciam o crescimento do desgaste com o tempo de usinagem para as ligas estudadas (diferentes concentrações de níquel). Estas curvas podem ser observadas na Figura 1.

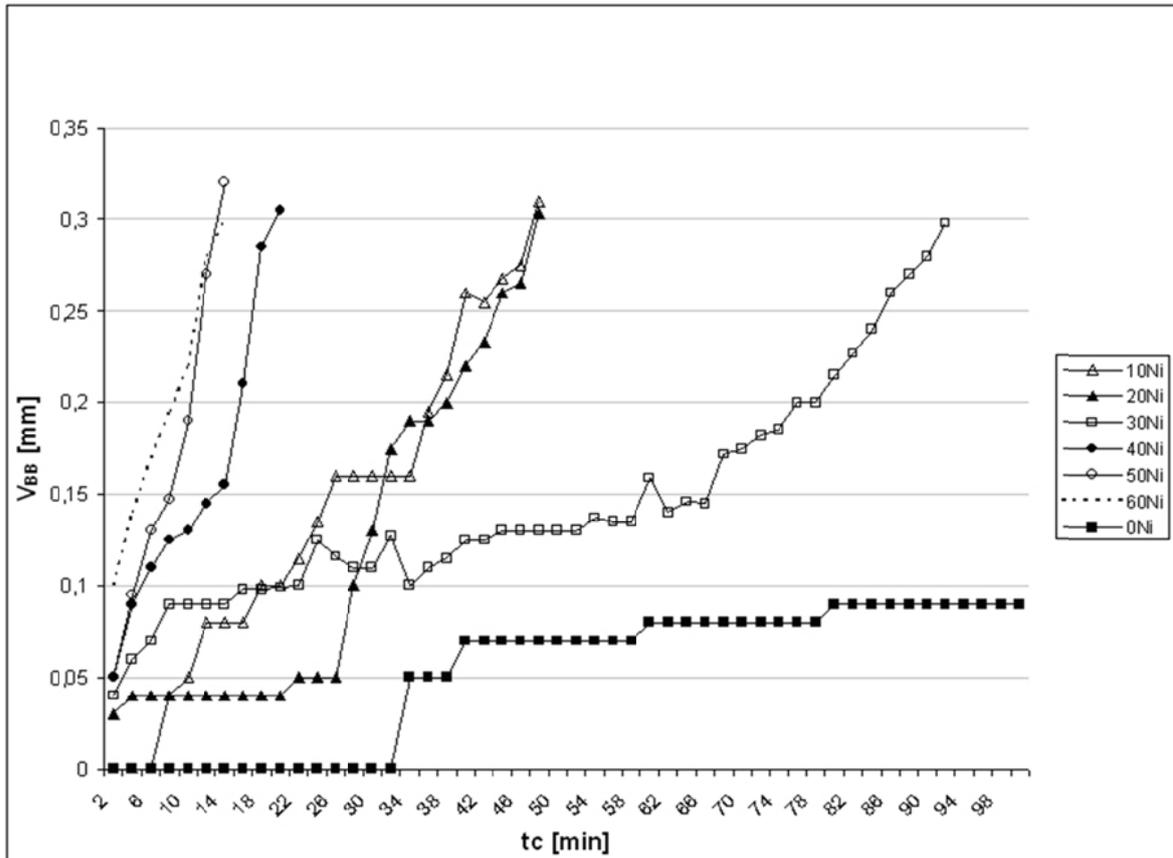
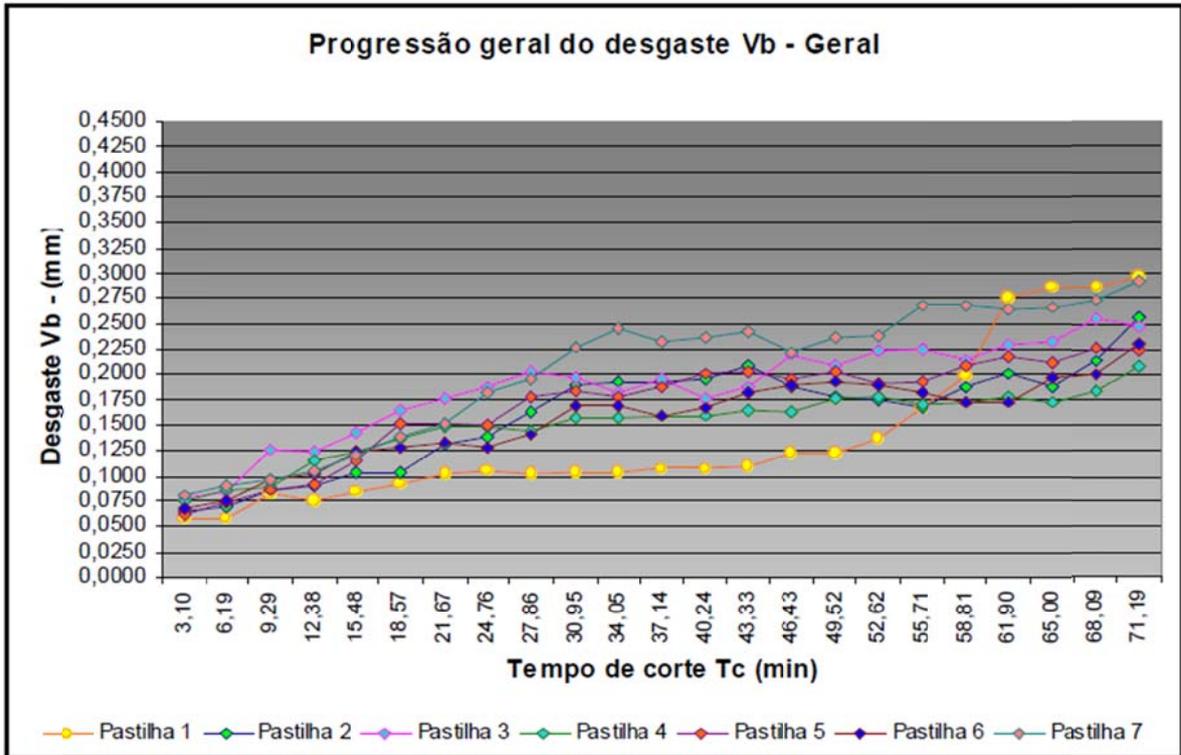


Figura 1 - Desgaste de Flanco em função do tempo para ligas com diferentes concentrações de níquel.

Fonte Marques (2007)

Com esses resultados, Marques (2007) conclui que com o aumento do teor de níquel no material de trabalho, a usinagem fica dificultada, aumentando o desgaste da ferramenta.

O critério de fim de vida da ferramenta de  $VB = 0,3$  mm foi também utilizado por Rodrigues e Hassui (2007) durante o estudo da evolução do desgaste da ferramenta de corte no fresamento da liga de Inconel 625. A Figura 2 mostra a evolução dos desgastes das pastilhas do cabeçote durante a usinagem a 30 m/min. Vale lembrar ainda que o fresamento foi feito de forma concordante, o que implica em impactos na entrada do corte, o que também favorece a uma ruptura da cobertura.

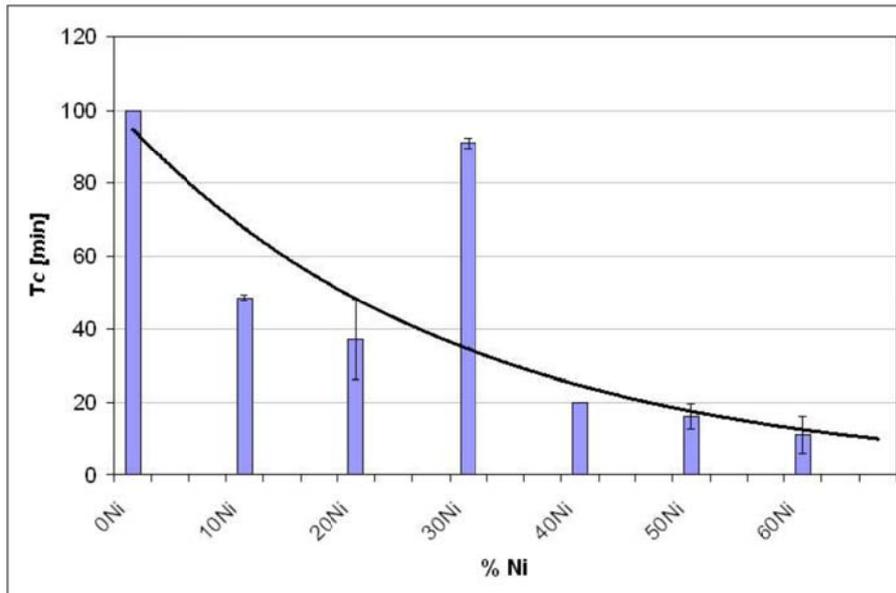


**Figura 2 – Progressão Geral do desgaste de flanco VB durante fresamento a 30 m/min**  
 Fonte Rodrigues e Hassui (2007)

Ao ensaiar uma liga de Inconel 713C, Vale e Hassui (2007) adotaram o critério de fim de vida da ferramenta como desgaste de flanco igual ou maior do que 0,7 mm.

## 2.7 Vida da Ferramenta.

Os ensaios realizados por Marques (2007) tiveram como um dos resultados a curva de vida da ferramenta em função da concentração de níquel no material de trabalho. Esta é apresentada na Figura 3.



**Figura 3 - Vida da ferramenta em tempo efetivo de corte em função do teor de níquel.**  
**Fonte Marques (2007)**

Nos ensaios realizados por Vale e Hassui (2007) Os maiores tempos de vida para a ferramenta da classe GC 1005 e suas respectivas velocidades de corte foram: com fluido integral 160,22s com 75m/min, 138,23s com 30m/min e 125,88s com 70m/min; com fluido emulsificável 169,64s com 30m/min, 143,99 com 90m/min e 138,54s com 50m/min. Os maiores tempos de vida para a ferramenta da classe GC 1105 e suas respectivas velocidades de corte foram: com fluido integral 154,33s com 40m/min, 145,29s com 60m/min e 140,74s com 75m/min; com fluido emulsificável 284,89s com 65m/min, 221,48s com 90m/min e 189,54s com 90m/min.

Vale e Hassui (2007) concluíram que as velocidades de corte perto de 70 m/min apresentaram melhor relação custo-benefício. O TiAlN foi melhor do que o TiN como material de revestimento para tornear o Inconel 713C. Fluido integral e fluido emulsificável apresentaram comportamento similar como fluidos de corte. A maior vida da ferramenta atingida foi por volta de 4 minutos.

## **2.8 Mecanismos de desgaste**

Como fatores principais de desgaste, é possível se citar: deformação plástica, abrasão, adesão, difusão, oxidação do material e correntes elétricas iônicas.

A deformação plástica ocorre quando a dureza a quente do material da ferramenta não é mais suficiente para resistir às pressões de usinagem, o que se verifica especialmente com maiores avanços. (STEMMER, 1924)

Abrasão é o arranchamento de partículas de material, em função do escorregamento sob alta pressão e temperatura entre a peça e a ferramenta. Esta forma de desgaste aumenta com o número de inclusões e partículas duras no aço (ex.: carbonetos e óxidos). A presença de alumínio no aço, formando partículas duras e abrasivas de  $Al_2O_3$ , é especialmente nociva. A resistência à abrasão depende da dureza do material da ferramenta. O aumento da velocidade de corte resulta num aumento considerável da velocidade de desgaste, em virtude do efeito de impacto e da redução da resistência da ferramenta à abrasão em temperaturas de trabalho mais altas. (STEMMER, 1924)

A adesão entre o material da peça e as asperezas superficiais da ferramenta se deve à ação das altas temperaturas e pressões presentes na zona de corte e ao fato de que a superfície inferior do cavaco, recém-arrancada, apresenta-se limpa, sem camadas protetoras de óxidos e, portanto, quimicamente muito ativa. O gume postiço é uma prova da formação dessas adesões, este é formado por partículas com elevado grau de deformação a frio que se soldam na face da ferramenta, dificultando o deslizamento do cavaco, aumentando o coeficiente de atrito na face e provocando um maior recalque do cavaco. O gume postiço ocorre em baixas velocidades de corte. (STEMMER, 1924)

Difusão ocorre em temperaturas mais elevadas, em que as moléculas adquirem certa mobilidade. Nos metais duros, podem ocorrer os seguintes fenômenos em temperaturas na faixa de 700 a 1300°C, na usinagem de peças de aço:

- Difusão do ferro na fase de cobalto no aço, com formação de uma camada de cristais mistos.
- Difusão do carbono, que é retirado dos carbonetos duros e imigra para o aço.
- O aumento da temperatura gera tensões no esqueleto de carbonetos do metal duro. Como o cobalto tem um coeficiente de expansão térmica cerca

de 4 vezes maior do que o esqueleto de carbonetos, o aumento da temperatura provoca a expulsão sob alta pressão do cobalto e a geração de tensões no interior do metal duro. (STEMMER, 1924)

Oxidação, como ocorre no aquecimento de peças a altas temperaturas com a formação de carpetas, pode ser causa de desgaste. A oxidação em baixas temperaturas é normalmente evitada por camadas protetoras de material oxidado. Metais duros iniciam a formação de carpetas em temperaturas usuais de usinagem (700 a 800°C). (STEMMER, 1924)

Correntes elétricas se produzem no contato entre a peça e a ferramenta, durante a usinagem. Essas correntes tem uma resistência baixíssima, da ordem de poucos miliohms, com isso a corrente gerada pode atingir valores da ordem de 5 amperes ou mais. Ensaio realizado pelo Prof. Pitz e seus assistentes na Escola Técnica Superior de Aachen, levaram à conclusão que isolação pura e simples provoca, em alguns casos, uma pequena redução do desgaste da ferramenta. A aplicação de uma corrente de compensação produz geralmente uma redução mais notável do desgaste, no flanco da ferramenta. (STEMMER, 1924)

A Figura 4 esquematiza a participação das diversas causas de desgaste da ferramenta de corte durante a usinagem.

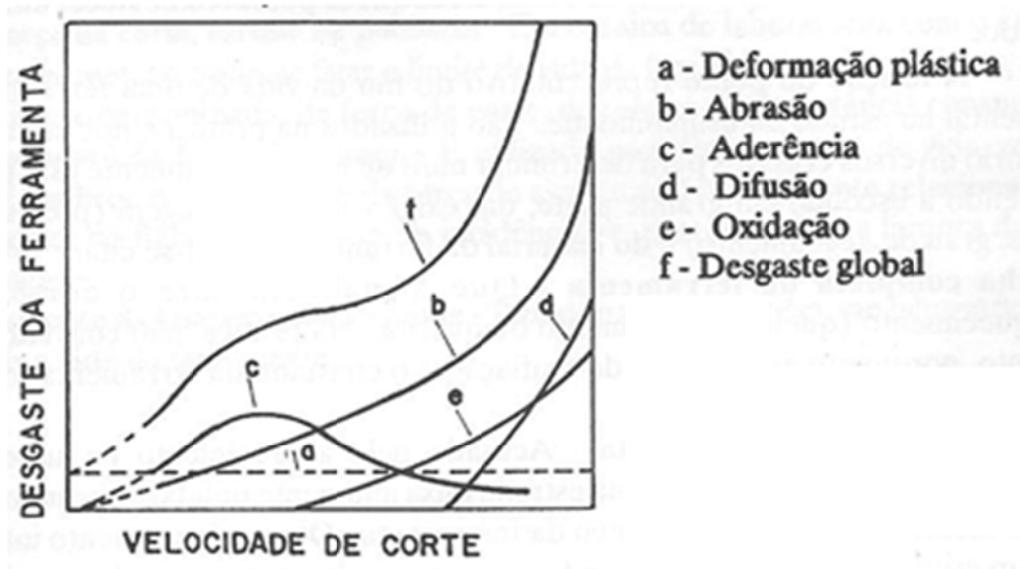


Figura 4 – Contribuição dos diversos fatores no desgaste da ferramenta em função da ferramenta de corte.

Fonte Stemmer (1924)

Para esclarecer qual o mecanismo inicial de desgaste nas ferramentas, Marques (2007), ao ensaiar materiais variando o teor de níquel em suas composições, observou em Microscópio Eletrônico de Varredura os desgastes ao longo da vida das ferramentas. Com isso, conclui que para ligas com alto teor de níquel, desde o início do desgaste, predomina o mecanismo de desgaste de adesão e arrancamento do material da peça junto com partículas da ferramenta (substrato) e cobertura, desgastes de origem abrasiva ou difusão não foram evidenciados.

Rodrigues e Hassui (2007) observaram durante seu trabalho o fenômeno da adesão do Inconel 625 no flanco da ferramenta. A posterior remoção desse material aderido expõe o substrato e pode acelerar o desgaste da ferramenta. Além disso, abrasão ocorre nas superfícies de folga e de saída, nas regiões adjacentes àquelas onde ocorreu a adesão, devido aos carbonetos presentes do material que está escoando sobre a superfície. Outro mecanismo de desgaste observado foi a oxidação, que surgiu devido à presença de oxigênio, calor e água.

Segundo o *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (2004), o principal mecanismo de desgaste observado na usinagem do Inconel 718 é a abrasão. A usinagem induz deformação plástica e geração de calor, as

consequências são transformações metalúrgicas e tensão residual na camada superficial usinada. A distribuição de tensões residuais apresenta uma tensão de tração máxima perto da superfície usinada e depois uma tensão de compressão. A profundidade da camada afetada e as tensões de tração e compressão aumentam quando a velocidade de corte aumenta.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição da metodologia

A Metodologia utilizada nos ensaios de usinagem para avaliar a vida da ferramenta de corte durante o torneamento da liga de Inconel foi desenvolvida segundo descreve a norma ISO 3685.

##### 3.1.1 Material de Trabalho

O material de trabalho estudado é o Inconel625. Foi disponibilizada para a realização dos ensaios uma barra de 44,7 mm de diâmetro e 343,2 mm de comprimento.

A tabela 3 mostra a composição química da liga.

**Tabela 3 - Composição química do Inconel 625 em % de peso.**

		Co	Cr	Mo	Fe	Si	Mn	C	Al	Ti	S	P	Cb + Ta	Ni
INCONEL 625	Min.	-	20.0	8.0	-	-	-	-	-	-	-	-	3.15	Bal.
	Max.	1.0	23.0	10.0	5.0	0.50	0.50	0.10	0.40	0.40	0.015	0.015	4.15	Bal.

**Fonte: Norma ISO 3685**

A liga adquirida para o presente trabalho foi examinada para que fosse certificado que se está trabalhando efetivamente com o Inconel 625. Foi realizada a espectrometria da liga na empresa Spectroscan. A Tabela 4 mostra o resultado desta espectrometria com a composição da liga trabalhada

**Tabela 4–Resultado da espectrometria da liga a ser usinada em % de peso.**

	Co	Cr	Mo	Fe	Si	Mn	C	Al	Ti	S	P	Cb + Ta	Ni
INCONEL 625	-	22.84	8.26	-	0.016	-	0.109	0.31	-	0.125	0.008	3.53	>65

**Fonte: Empresa Spectroscan**

Comparando as tabelas 3 e 4, pode-se concluir que o material trabalhado é o Inconel 625.

A dureza da liga de Inconel 625 utilizada nos experimentos foi medida na máquina Emco Test N4C 025 G3M. O resultado obtido nessa medição foi de 430 Vickers, equivalente a 43,6 HRC.

### 3.1.2 Ferramenta de Corte

Para os ensaios foram utilizadas ferramentas de metal duro com revestimento por PVD (deposição física a vapor) com TiN e TiCN (código ISO TNMG 160404-MF), classe GC1115 (HC) - S20 (S15-S25). A de pastilha de corte utilizada foi à recomendada pelo fabricante Sandvick para a usinagem do Inconel e outras superligas, a base de níquel, resistentes ao calor. A Figura 5 fornece os dados geométricos da pastilha de corte.

As ferramentas de corte foram montadas no porta-ferramentas MTJNR 2020K 16M1 também do fabricante Sandvick. Algumas especificações geométricas deste são apresentadas na Figura 6.

Parâmetro	Valor
Peso	0.0072 Kg
Tamanho do Inserto	16
l	16 mm
s	47.625 mm
iC	9.525 mm
re	0.4 mm

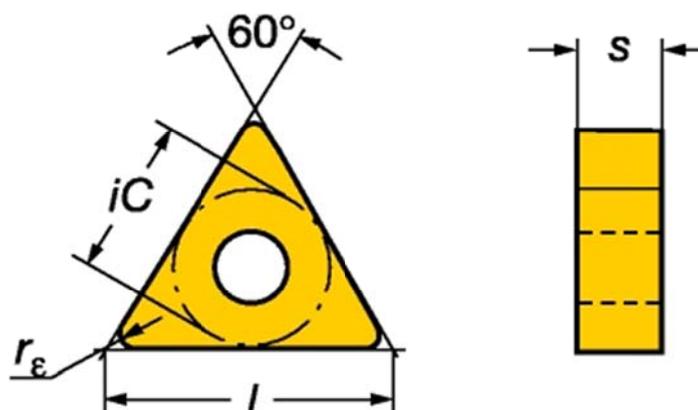


Figura 5 – Dados geométricos da ferramenta de corte – Pastilha TNMG 16 04 04, Classe S GC1005.

Fonte: <http://www.sandvik.com>

Parâmetro	Valor
Peso	0.4 Kg
Tamanho do Inserto	16
b	20 mm
f1	25 mm
h	20 mm
h1	20 mm
l1	125 mm
l3	30.8 mm
Kr	93°

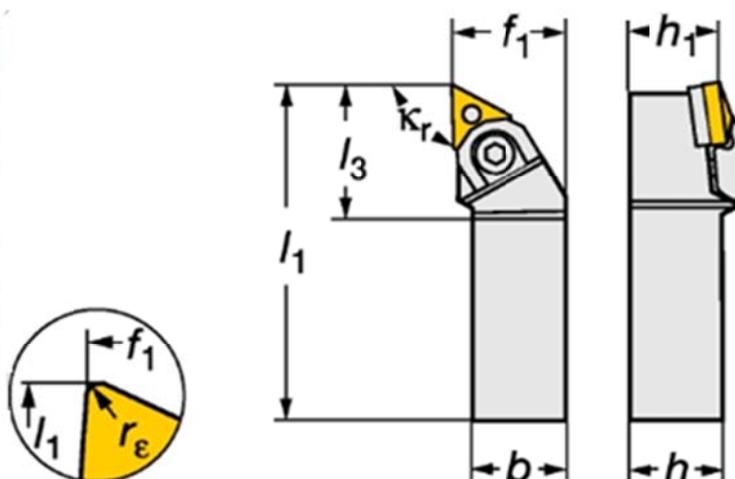


Figura 6 - Dados geométricos do Porta-ferramentas – Fixador MTJNR 2020K 16M1.

Fonte: <http://www.sandvik.com>

### 3.1.3 Critério de Fim de Vida da Ferramenta.

Dentre os critérios propostos pela norma ISO 3685 para a determinação do fim da vida da ferramenta, utilizou-se o critério do desgaste máximo do flanco. Quando a largura máxima do desgaste do flanco for:  $VB = 0,3 \text{ mm}$  (representado na Figura 7) pode-se então considerar que a vida da ferramenta chegou ao fim.

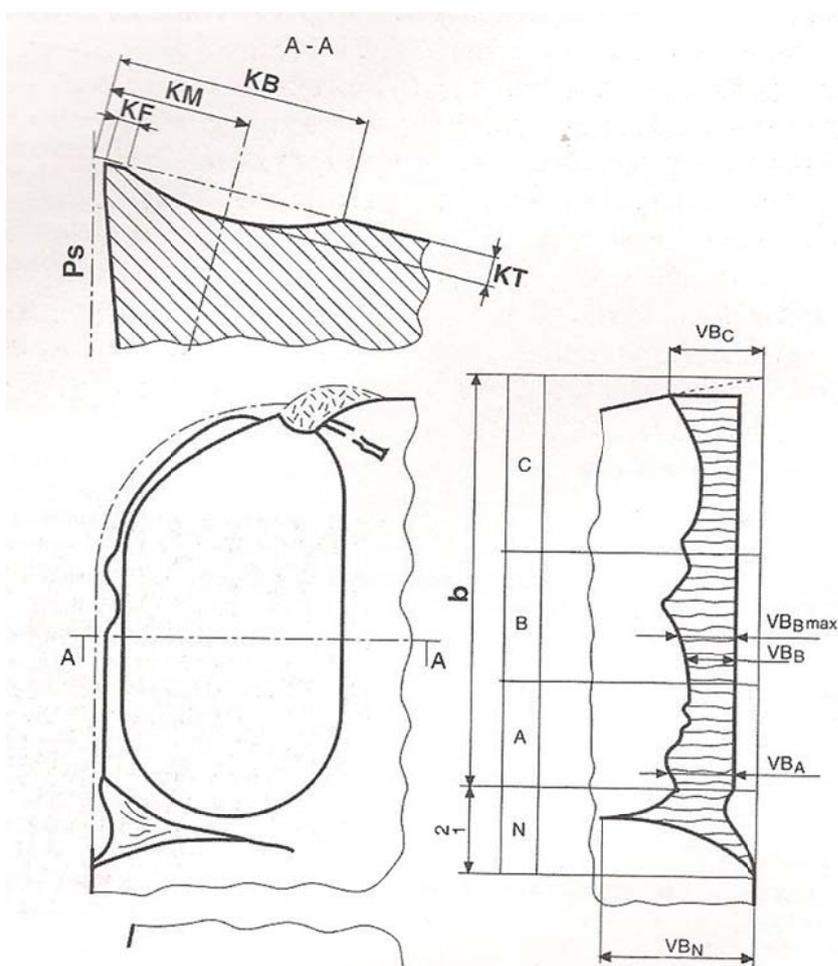


Figura 7 - Desenho esquemático evidenciando desgaste do flanco (VB) e profundidade da cratera (KT).

Fonte: Norma ISO 3685.

### 3.1.4 Condições de Corte.

As condições de corte para o caso de testes como os que foram realizados no presente projeto, em que o avanço ( $f$ ), a profundidade de corte ( $ap$ ) ou o raio de ponta ( $r\epsilon$ ) não são variáveis do teste, deve-se utilizar uma ou mais das combinações listadas na Tabela 5:

**Tabela 5 - Combinações indicadas pela norma ISO 3685 para avanço, profundidade de corte e raio de corte.**

Condições de corte	A	B	C	D
Avanço $f$ , mm/ver	0.1	0,25	0.4	0,63
Profundidade de corte $ap$ , mm	1.0	2.5	2.5	2,5
Raio de ponta $r\epsilon$ , mm	0.4	0.8	0.8	1.2

Fonte: Norma ISO 3685.

Tolerâncias:

- Avanço ( $f$ ): +3 –2 %.
- Profundidade de corte ( $a$ ): 5%.
- Raio de corte ( $r\epsilon$ ): 10%.

Como o raio de corte especificado pelo como  $r\epsilon = 0,4$ , a combinação utilizada foi a da coluna A da tabela 5.

#### 3.1.4.1 Planejamento das Velocidades de Corte

A velocidade de corte é definida de acordo com a superfície do material de trabalho a ser cortado, e não no diâmetro resultante após o término do corte.

A norma ISO 3685 sugere a seleção de quatro velocidades de corte para levantar a curva de vida da ferramenta.

A Velocidade de corte é dependente da rotação e do diâmetro da peça usinada. A relação entre esses parâmetros é dada pela equação 3.

$$VC = (\pi.D.n)/1000 \text{ [m/min]}$$

Eq. 3

Onde:

$V_c$  = Velocidade de Corte.

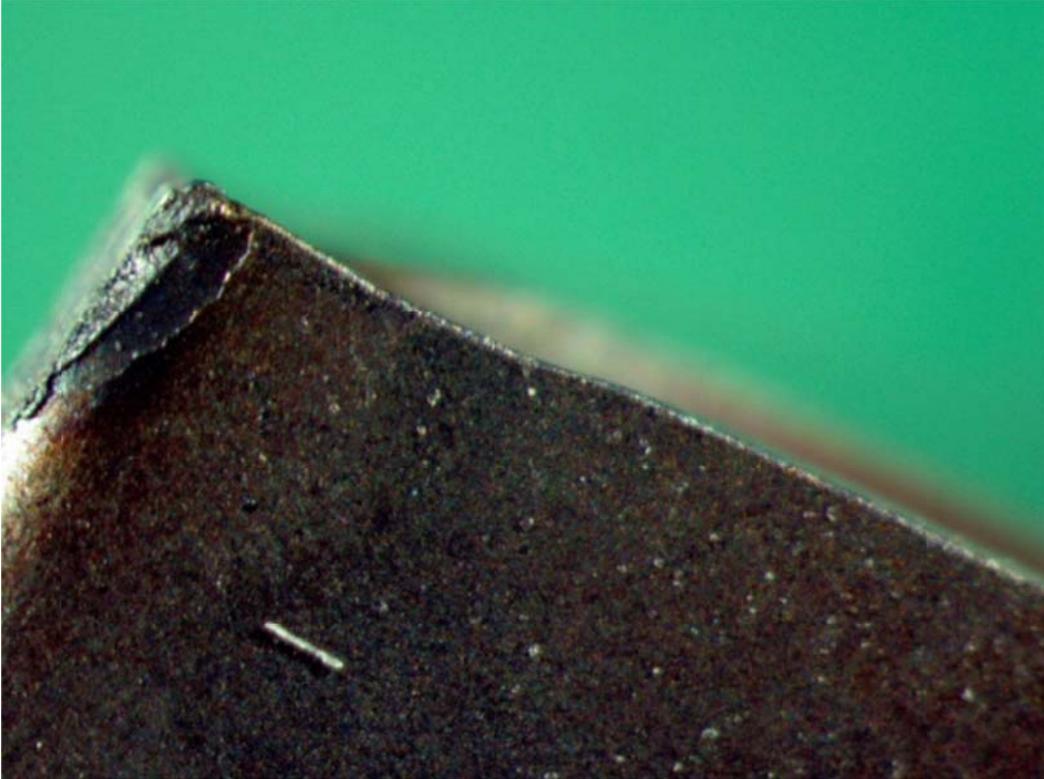
$D$  = diâmetro da peça.

$n$  = rotação do torno.

As velocidades de corte utilizadas para levantar a curva de vida da ferramenta de corte foram selecionadas experimentalmente de forma que estas fossem altas o suficiente para atingir o fim de vida da ferramenta com o material disponível e que fossem baixas o suficiente para aguentar um tempo mínimo de vida de 2 minutos conforme sugere a norma ISO 3685.

A escolha dessas velocidades foi feita com base nas rotações disponíveis do torno e no diâmetro da peça usinada. Para que se fosse possível visualizar todas as possibilidades, elaborou-se a Tabela 6 apresentada no ANEXO A para avaliarmos todas as velocidades disponíveis para se trabalhar.

A princípio utilizou-se uma velocidade de 133 m/min. Nessa velocidade a ferramenta colapsou muito rapidamente ficando impossível o estudo de seu desgaste, com isso pudemos obter um limite superior para as velocidades de corte a serem trabalhadas. A figura 8 mostra a ferramenta colapsada em 60 segundos de usinagem a 133 m/min. Nessas condições, o revestimento da ferramenta foi totalmente desgastado deixando a ponta da ferramenta vulnerável à queima.



**Figura 8 – Ferramenta colapsada em 60 segundo com velocidade de corte a 133 m/min utilizando fluido de corte.**

Com a ideia de obtermos um campo de velocidade com abrangência considerável, foram selecionadas as seguintes velocidades de corte para o estudo:

- $V1 = 58,61$  m/min;
- $V2 = 71,87$  m/min;
- $V3 = 88,75$  m/min;
- $V4 = 107,798$  m/min.

Nessas quatro velocidades o fim de vida da ferramenta de corte foi atingido em um tempo adequado para levantar as curvas “Tempo de corte x Desgaste do Flanco” e “Velocidade de corte x Tempo de fim de vida da ferramenta”.

### **3.1.5 Fluido de Corte**

Foi necessária a utilização de fluido de corte para velocidades mais altas, a partir de 40 m/min aproximadamente. Isso devido ao fato de que no corte a seco

observou-se a queima excessivamente rápida da ponta da ferramenta, resultando numa vida da ferramenta extremamente curta.

Por questões de disponibilidade de fluido para a execução do trabalho, foi utilizado Uma solução de 5% do óleo de corte Biolub.

### 3.1.6 Procedimentos do Teste de Vida da Ferramenta.

O material de trabalho, Inconel, foi usinado pela ferramenta de corte com os parâmetros de corte adequados conforme descrito nos itens acima.

O desgaste da ferramenta foi medido em intervalos adequados e devidamente documentados.

As leituras foram plotadas em um gráfico com o desgaste da ferramenta (ordenadas) por tempo (abscissas).

Medições de desgaste da ferramenta versus tempo, tomados em quatro velocidades de corte diferentes proporcionaram curvas como as mostradas, de forma ilustrativa, na Figura 9.

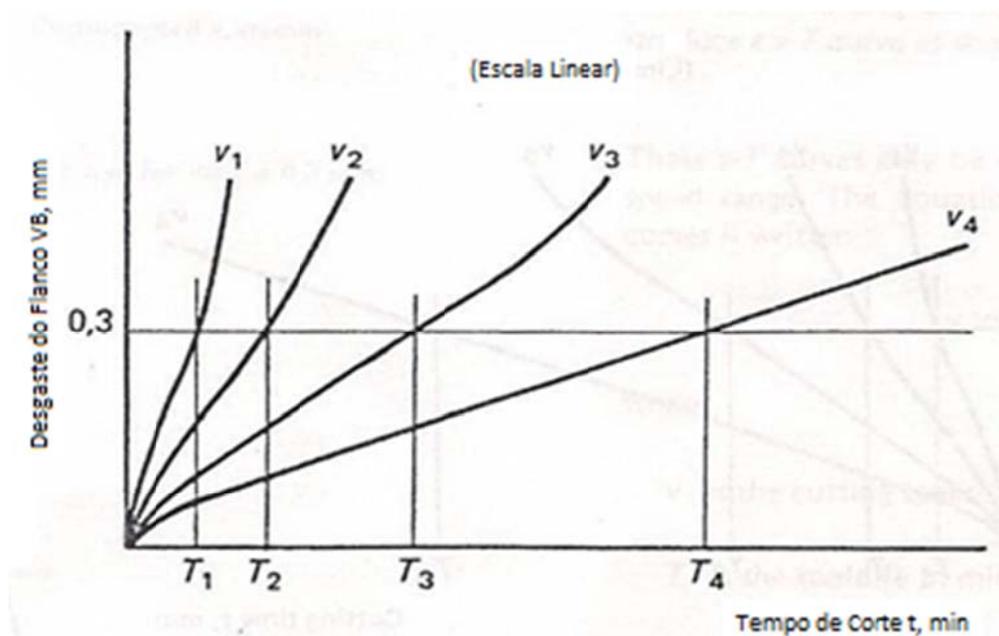


Figura 9 - Curvas tempo (T) VS desgaste do flanco (VB) para diferentes velocidades de corte.

Fonte: Norma ISO 3685.

Plotando as coordenadas  $(v_1, T_1)$ ,  $(v_2, T_2)$ , etc., obtidos da figura 9 acima em um gráfico de velocidades de corte versus vida da ferramenta, tem-se como resultado a curva de vida da ferramenta de corte (v-T) como a ilustrada na figura 10.

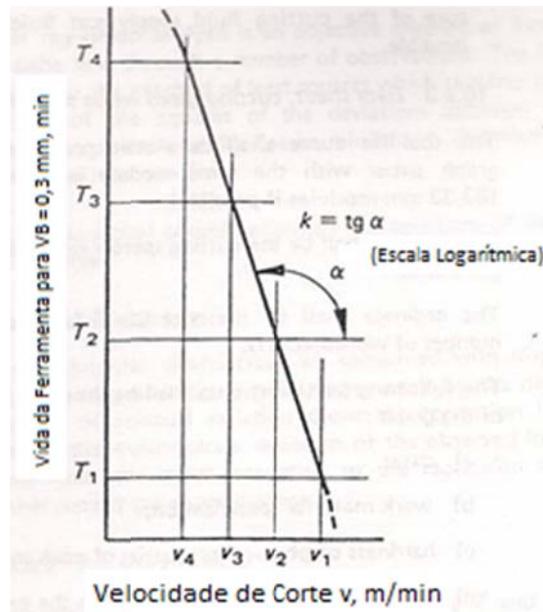


Figura 10 – v x T curva  $VB_b = 0,3 \text{ mm}$   
Fonte: Norma ISO 3685.

Para uma determinada faixa de velocidade, a curva pode ser considerada linear. A equação que as governa nessa faixa, também conhecida como equação de Taylor, é:

$$V * T^{-1/k} = C$$

Eq. 4

Onde:

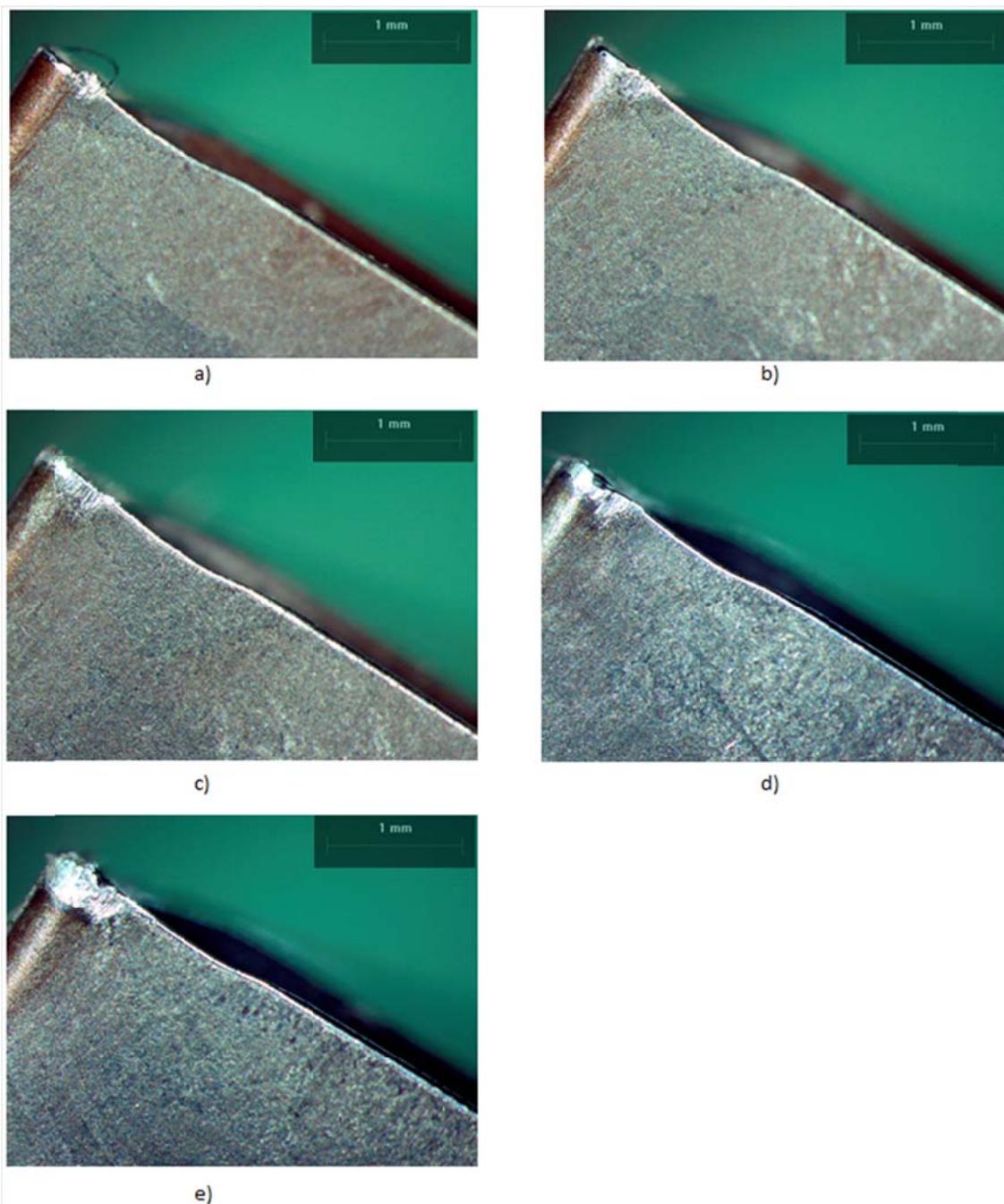
- V é a velocidade de corte em metros por minuto;
- T é a vida da ferramenta em minutos;
- $K = \text{tg } \alpha$  (como mostrado na figura 10) define a inclinação da curva de vida da ferramenta.
- C é uma constante definida matematicamente.

### 3.1.7 Medição do desgaste do Flanco (VB).

O desgaste do Flanco da ferramenta de corte foi medido através da visualização da ferramenta na Lupa Eletrônica Olympus SZX10. O aumento utilizado para a visualização do desgaste foi de 50 vezes.

A Lupa Eletrônica possibilita a visualização da ferramenta com uma ampliação considerável, adquire imagens da ampliação e define a escala da foto. Entretanto, esse equipamento não realiza a medição do desgaste efetivamente. Para retirar as cotas VB foi necessário utilizar o software Image Pro-Plus.

A Figura 11 apresenta a sequência dos desgastes obtidos na velocidade  $V_3 = 88,75$  m/min.

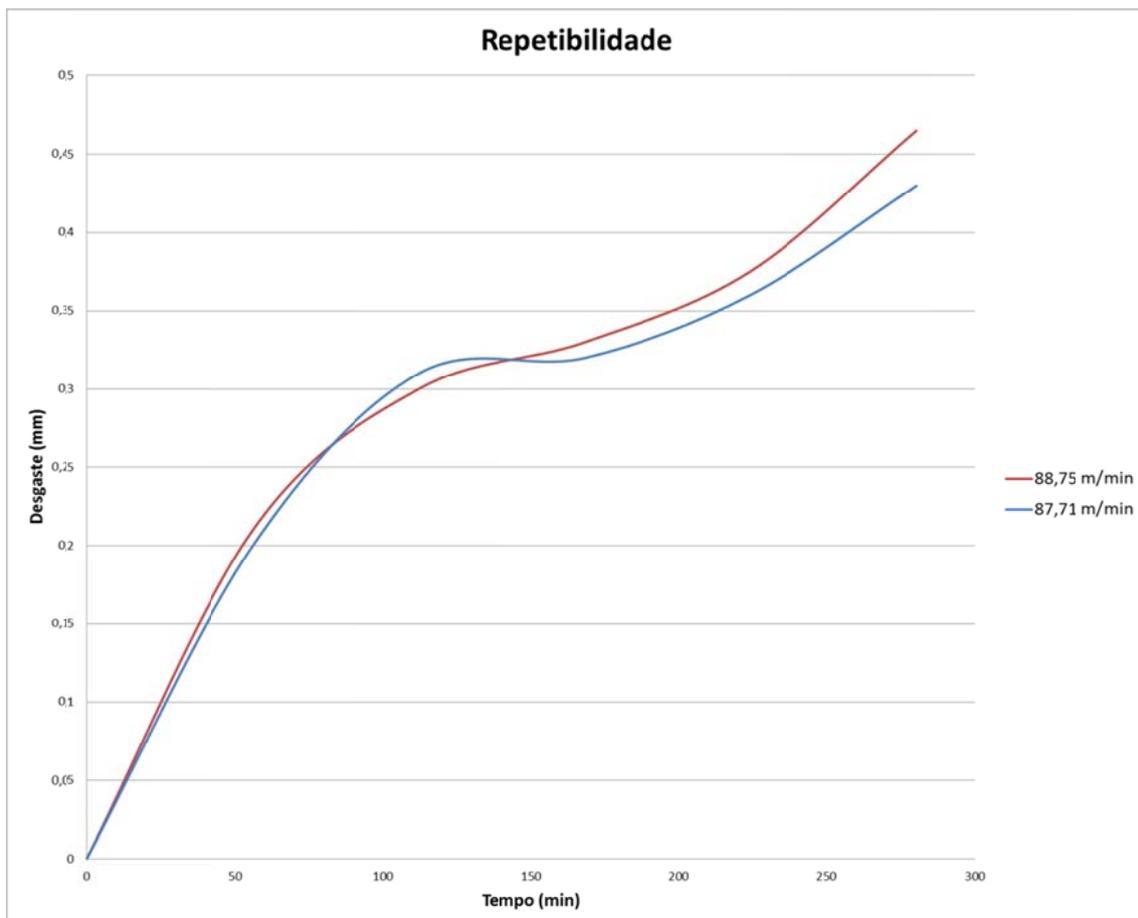


**Figura 11 – Sequência dos desgastes medidos para a velocidade corte  $V_3 = 88,75$  m/min.  
Fonte Autoria própria**

### 3.1.8 Repetibilidade.

Para avaliarmos a repetibilidade do ensaio realizado, usinou-se o material de trabalho com as mesmas condições de corte a uma velocidade de corte de 87,71 m/min. Os resultados obtidos com essa velocidade são agora comparados com os resultados obtidos à velocidade de 88,75 m/min, que foi utilizada no levantamento da curva de vida da ferramenta. As velocidades não são idênticas, porém muito próximas e serão consideradas como parâmetro para definir se o ensaio realizado tem ou não repetibilidade.

No gráfico 1 temos as curvas “Tempo de usinagem X Desgaste do flanco” para as velocidades 87,71 m/min e 88,75 m/min. Calculando-se o erro em relação a essas duas curvas obtivemos:  $E = 4,46\%$ . Com isso é possível inferir que temos um erro aceitável e que o ensaio apresenta repetibilidade considerável.



**Gráfico 1 – Comparação das curvas “Tempo x Desgaste” entre velocidades aproximadas para definir repetibilidade do ensaio.**

### **3.2 Equipamentos Utilizados:**

Para a realização dos ensaios de usinagem foi utilizado um torno mecânico Nardini Mascote MS205. As principais características deste equipamento estão listadas abaixo:

- Altura de pontas: 205 mm;
- Distancia entre pontas: 1000 mm;
- Rotação: 18 velocidades, de 31,5 a 2500 rpm;
- Diâmetro do furo da árvore: 46 mm;
- Numero de roscas: 192;
- Potência do motor principal: 6,3/4 HP.

A Lupa Eletrônica Olympus SZX10 foi utilizada para ampliação e aquisição das imagens com os desgastes da ferramenta.

A máquina de Dureza Emco Test M4C 025 G3M foi utilizada para a realização da medição da dureza da liga de Inconel 625.

### **3.3 Justificativa da metodologia**

A metodologia utilizada foi baseada na norma ISO 3685. Esta é uma norma científica internacional.

Dessa forma, pode-se ter total confiança de que a metodologia descrita pela norma é adequada para a realização do estudo.

### **3.4 Produtos do projeto**

Esse trabalho apresentará como produto curvas de vida da ferramenta de corte TNMG 16 04 04-MF da classe S GC1115 recomendada pelo fabricante Sandvik. Esta foi utilizada na usinagem por torneamento da liga de Inconel 625.

### 3.5 Etapas do projeto

As etapas realizadas no presente trabalho foram:

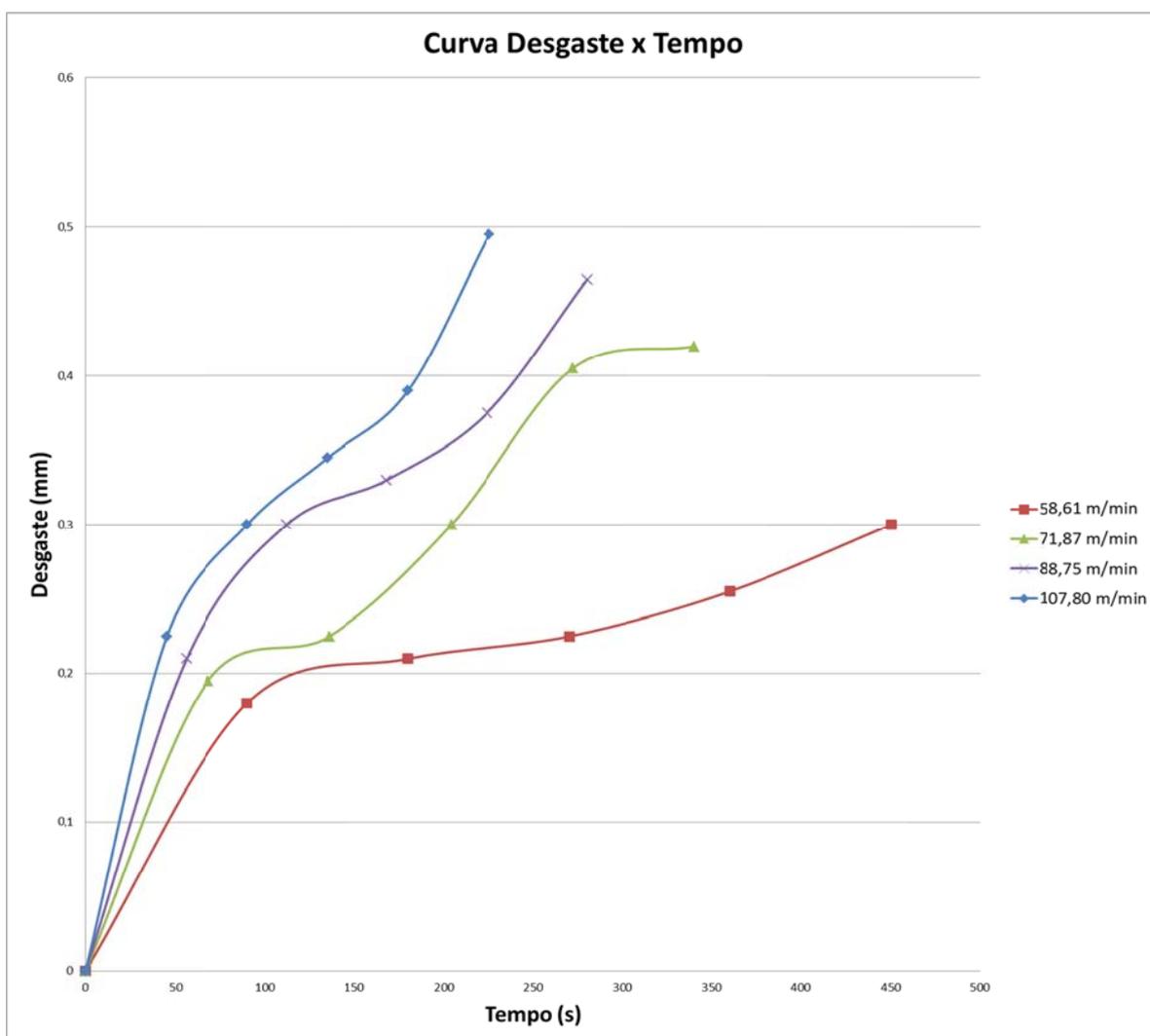
- Levantamento bibliográfico: A primeira ação foi fazer um levantamento de materiais com informações sobre o material pesquisado e as metodologias apropriadas para os ensaios.
- Aquisição dos materiais: Em um segundo momento, foi feito contato com empresas interessadas em fornecer o material de trabalho: Inconel 625.
- Planejamento experimental: preparação das máquinas e amostras para os experimentos, planejamento do tempo.
- Realização de ensaio prévio para familiarização com a metodologia e equipamentos.
- Definição da geometria dos corpos de prova que serão ensaiados.
- Levantamento de parâmetros de usinagem recomendados: Foram experimentadas algumas alternativas de parâmetros a serem utilizados nos ensaios.
- Execução dos ensaios de torneamento: Foram realizados ensaios de torneamento com diferentes velocidades de corte, medindo-se o desgaste das ferramentas.
- Levantamento de curvas de vida: Com os resultados dos ensaios serão levantadas curvas de vida das ferramentas utilizadas.
- Análise dos resultados.

## 4 RESULTADOS

A metodologia prevista na proposta tem como produto final a curva de vida da ferramenta de corte. Para levantar essa curva, é necessário levantar previamente a curva Tempo de corte X Desgaste do flanco da ferramenta, conforme descrito na seção 5.1. Essa curva do ensaio em questão é apresentada no Gráfico 2.

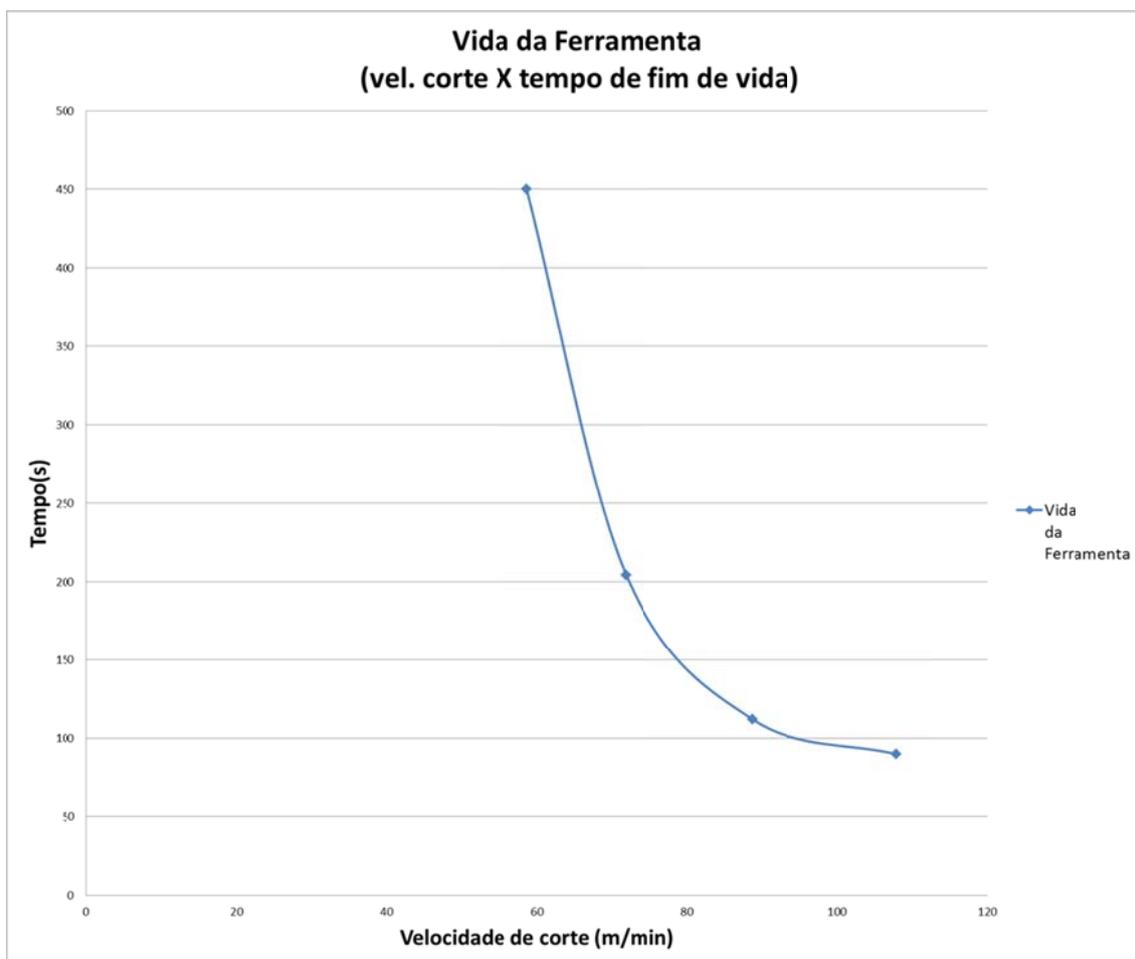
Plotando as coordenadas  $(v_1, T_1)$ ,  $(v_2, T_2)$ , etc., obtidos do Gráfico 2 em um gráfico de velocidades de corte versus vida da ferramenta, teremos como resultado a curva Velocidade de corte X Tempo de fim de vida (curva de vida da ferramenta de corte). Esta curva é apresentada no Gráfico 3.

Foram realizados alguns ensaios a seco. Nestes foi possível determinar que para velocidades de corte superiores a 40 m/min, o corte a seco mostrou-se inviável, uma vez que ocorre a queima da pontada da ferramenta de corte muito rapidamente o que proporciona uma vida demasiadamente pequena para a ferramenta. Segundo STEMMER (1924), isso possivelmente ocorreu, pois a ferramenta foi submetida a suas máximas possibilidades e a temperatura do gume se aproximou do ponto de amolecimento. Nessa situação, a utilização do fluido de corte possibilita uma vida da ferramenta muito superior que a observada no corte a seco, a velocidade de corte pode aumentar cerca de 40% para uma mesma vida da ferramenta.



**Gráfico 2 - Curvas tempo (T) VS desgaste do flanco (VB) para diferentes velocidades de corte.**  
**Fonte Autoria própria**

As curvas apresentadas no Gráfico 2 seguiram um padrão previsível, no qual para velocidades mais altas, o desgaste mostrou-se mais acentuado, atingindo-se o critério de fim de vida  $VB = 0,3$  mm mais rapidamente, enquanto para as velocidades mais baixas o oposto foi observado.



**Gráfico 3 - Curva Velocidade de corte X Tempo de fim de vida (curva de vida da ferramenta de corte)**

## 4.1 Análise dos Resultados

### 4.1.1 Vida da ferramenta.

Com a curva de vida da ferramenta levantada, fica claro que com o aumento da velocidade de corte a vida da ferramenta de corte é reduzida.

A norma ISO 3685 recomenda que a vida mínima de uma ferramenta de corte seja de 2 minutos. Analisando a curva de vida apresentada no Gráfico 3, podemos observar que para velocidades superiores a aproximadamente 80 m/min a vida da ferramenta de corte fica inferior à mínima sugerida pela norma ISO, portanto, a usinagem com essas velocidades não é recomendada para as condições aqui utilizadas.

No ensaio realizado por Marque (2007), a vida da ferramenta de corte ao usinar uma liga com 60% de níquel foi de aproximadamente 10 minutos = 600 segundos. Esse resultado foi atingido para uma velocidade de corte de  $V_c = 230$  m/min. Comparando com a curva apresentada no Gráfico 3, a divergência é gritante.

Essa diferença tão grande nos resultados foi influenciada pelas diferentes condições em que os ensaios foram realizados. Primeiramente, a ferramenta de corte utilizada por Marques (2007) possui revestimento de  $TiC/Al_2O_3/TiN$ , enquanto a ferramenta aqui utilizada foi com revestimento de camadas de  $TiN$  e  $TiCN$ .

Além disso, a profundidade de corte utilizada por Marques (2007) é 0,4 mm menor do que a utilizada no presente trabalho, o que influencia fortemente do desgaste da ferramenta. E, por fim, as composições do material de trabalho também são divergentes, vide tabelas 2 e 4. Todos esses fatores colaboram para que o desgaste na ferramenta utilizada por Marques (2007) seja realmente inferior aos desgastes observados no Gráfico 3.

#### 4.1.2 Mecanismos de desgaste

Os mecanismos de desgaste mais comuns observados no estado da arte para superligas de níquel, que é caso do Inconel 625, são a abrasão e a adesão. A adesão foi observada nos ensaios de Rodrigues e Hassui (2006) e Marques (2007) descritos no capítulo 1 deste trabalho. Já a abrasão foi tida como principal mecanismo de desgaste segundo o *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (2004) que avaliou diversos ensaios com o Inconel 718. A abrasão foi também observada por Rodrigues e Hassui (2006) em seus ensaios.

Por analogia ao estado da arte, é passível de se inferir que os mecanismos de desgastes desenvolvidos durante os ensaios aqui realizados devem ser principalmente a abrasão e a adesão.

Baseado nas curvas apresentadas no Gráfico 3, foi possível levantar a curva representada no Gráfico 4. Realizando uma comparação entre a figura 4 e o Gráfico 4, verificando o comportamento das curvas, é possível afirmar que os mecanismos de desgaste de abrasão e aderência provavelmente foram os principais responsáveis pelo desgaste da ferramenta nos ensaios aqui realizados.

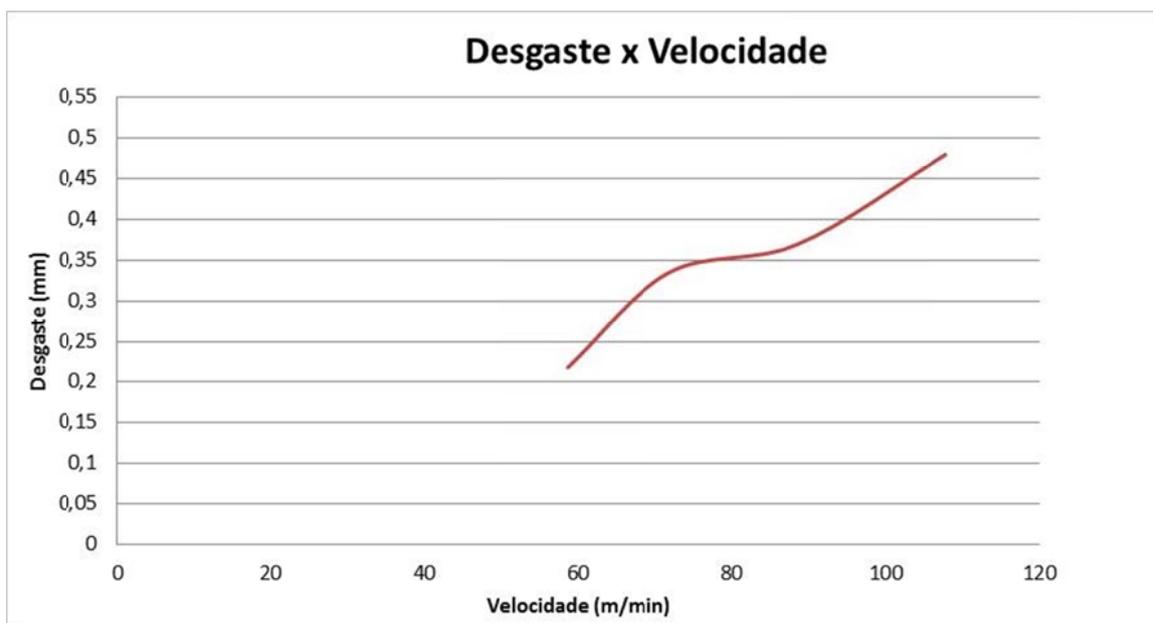


Gráfico 4 – Desgaste da ferramenta em função das velocidades de corte para um mesmo tempo de usinagem.

Seguindo esse raciocínio, a ferramenta de corte mais indicada para se usinar o Inconel 625 seria uma ferramenta cerâmica, uma vez que esse tipo de ferramenta apresenta um baixo coeficiente de atrito, o que diminui o desgaste por abrasão. Além disso, as ferramentas cerâmicas apresentam alta dureza a quente, permitindo altas velocidades de corte, de 5 a 10 vezes superiores a dos metais duros. A difusão também é evitada, pois o óxido de alumínio possui uma elevada estabilidade química. No entanto, esse tipo de ferramenta exige uma excelente rigidez do torno e todos os equipamentos envolvidos na usinagem.

## 5 CONCLUSÃO

Os objetivos específicos listados para este trabalho visam levantar a curva de vida da ferramenta de metal duro especificada ao usinar por torneamento a liga Inconel 625. A curva de vida da ferramenta de corte apresentada no Gráfico 3 apresenta um campo de velocidades considerável e pode ser de grande utilidade para estudos e planejamentos de tempo de usinagem e custos industriais.

Dentro do objetivo de avaliar a viabilidade da usinagem da liga em estudo para diferentes velocidades de corte, uma importante conclusão foi a da necessidade de fluido de corte para velocidades de corte mais elevadas, acima de 40 m/min. O corte a seco nessas condições tornou-se inviável uma vez que a temperatura na região do corte apresentou-se extremamente elevada, gerando cavacos incandescentes e proporcionando a queima da ferramenta em questão de poucos segundos. Ainda na avaliação das velocidades viáveis à usinagem nas condições estabelecidas, ao analisar a curva de vida apresentada no Gráfico 3, podemos observar que para velocidades superiores a aproximadamente 80 m/min a vida da ferramenta de corte fica inferior à mínima sugerida pela norma ISO 3685, que seria de 2 minutos.

Os principais mecanismos de desgaste devem ser a abrasão e aderência devido ao comportamento da evolução do desgaste observado nas diferentes velocidades de corte.

Devido a evidências da presença do mecanismo de desgaste por abrasão, a ferramenta de corte mais indicada seria uma ferramenta cerâmica, uma vez que esta possui um baixo coeficiente de atrito.

## 6 REFERÊNCIAS

ASM – American Society of Metals, Metals Handbook, 10<sup>a</sup>.ed, v. 1 - Properties and Selection, 1995.

FERRARESI, Dino. Usinagem dos Metais. 11<sup>a</sup> São Paulo: EdgardBlücher, 2003. 751p.

HIGH PERFORMANCE ALLOYS. Disponível em: <[www.hpalloy.com](http://www.hpalloy.com)>. Acesso em: 27 mar. 2011.

*International Journal of Machine Tools & Manufacture*. França - Evry: junho, 2003. Elsevier

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3685: tool-life testing with single-point turning tools, 1977.

MARQUES, Daniel Cirillo. **Estudo da influência do teor de níquel na usinabilidade de ligas Fe-Cr-Ni**. 2007. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <[www.unicamp.br/document/?down=vtls000424927](http://www.unicamp.br/document/?down=vtls000424927)>. Acesso em: 14 ago. 2011.

RODRIGUES, Marcelo A.; HASSUI, Amauri. **Análise dos desgastes de ferramentas de metal duro revestidas no fresamento da liga a base de níquel – Inconel 625 – Deposada em forma de revestimento metálico**. 2006. Escola Politécnica da USP. Disponível em: <[www.grima.ufsc.br/cobef4/files/011016043.pdf](http://www.grima.ufsc.br/cobef4/files/011016043.pdf)>. Acesso em: 27 mar. 2011.

SANDVICK. Disponível em: <<http://www.sandvik.com>>. Acesso em 25 set. 2011.

SECO. Disponível em: <[www.secotools.com](http://www.secotools.com)>. Acesso em: 27 mar. 2011.

SPECIAL METALS. Disponível em: <<http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20625.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2011.

STEMMER, Caspar E. Ferramentas de Corte I. 3<sup>a</sup> ed. Florianópolis: DAUFSC, 1993. 249p.

VALE, Raphael Telles da S.; HASSUI, Amauri. **Análise da usinabilidade da liga à base de níquel Inconel 713C no torneamento com ferramentas de metal duro e fluido de corte integral**. 2007. Escola Politécnica da USP. Disponível em: <[www.usp.br/siicusp/Resumos/16Siicusp/5300.pdf](http://www.usp.br/siicusp/Resumos/16Siicusp/5300.pdf)>. Acesso em: 27 mar. 2011.

## APÊNDICE A – ENSAIO PRÉVIO

Aqui será descrito o ensaio prévio que foi feito com aço SAE 1045. O motivo da realização deste ensaio foi a familiarização com os equipamentos e métodos que utilizaremos no estudo do desgaste de ferramenta ao usinar uma liga Inconel 625.

Esse ensaio prévio teve como objetivo evitar erros, perda de tempo e material que possui um custo muito elevado (aproximadamente R\$300,00 por quilo de material). Conforme descrito no capítulo 3, a metodologia utilizada foi a proposta pela norma ISO 3685.

### Material de trabalho

O material utilizado para esse ensaio prévio foi o Aço SAE 1045.

### Ferramenta de Corte

Utilizou-se uma ferramenta de aço rápido para que o desgaste seja observado mais rapidamente.

### Parâmetros de Corte.

Como em nosso ensaio o avanço, a profundidade de corte e o raio de ponta da ferramenta não são variáveis do teste, utilizamos a tabela 5 para definir estes parâmetros. Ao medir o raio de ponta, obtivemos  $r_e = 0,4$  mm. Assim, pela tabela 5, temos: avanço  $f = 0,1$  mm/rev e profundidade de corte  $a_p = 1$  mm.

### Velocidade de Corte.

Para essas condições de corte, a norma ISO 3685 sugere que sejam escolhidas pelo menos 4 velocidades de corte.

As velocidades escolhidas foram:  $V_1=9,1$  m/min ( $n= 50$  rpm,  $D= 58$  mm),  $V_2=23,56$  m/min ( $n= 125$  rpm,  $D= 60$  mm),  $V_3=43,98$  m/min ( $n= 250$  rpm,  $D= 56$  mm) e  $V_4=53,44$  m/min ( $n= 315$  rpm,  $D= 54$  mm).

### Fluido de Corte.

No ensaio prévio, não foi utilizado fluido de corte para que o desgaste da ferramenta fosse mais evidente.

### Critério de Fim de Vida da Ferramenta.

O critério utilizado nesse teste preliminar foi baseado no desgaste do flanco da ferramenta VB representado na figura 7. Este critério determina que quando o desgaste do flanco atinge 0,3 mm a vida da ferramenta chegou ao fim.

### Medição do desgaste do Flanco (VB).

O desgaste do Flanco da ferramenta de corte foi medido através da visualização da ferramenta na Lupa Eletrônica Olympus SZX10. O aumento utilizado para a visualização do desgaste foi de 25 vezes.

Plotando os dados adquiridos em um gráfico com o tempo de corte nas abscissas e o desgaste do flanco nas ordenadas, geramos o Gráfico 5.

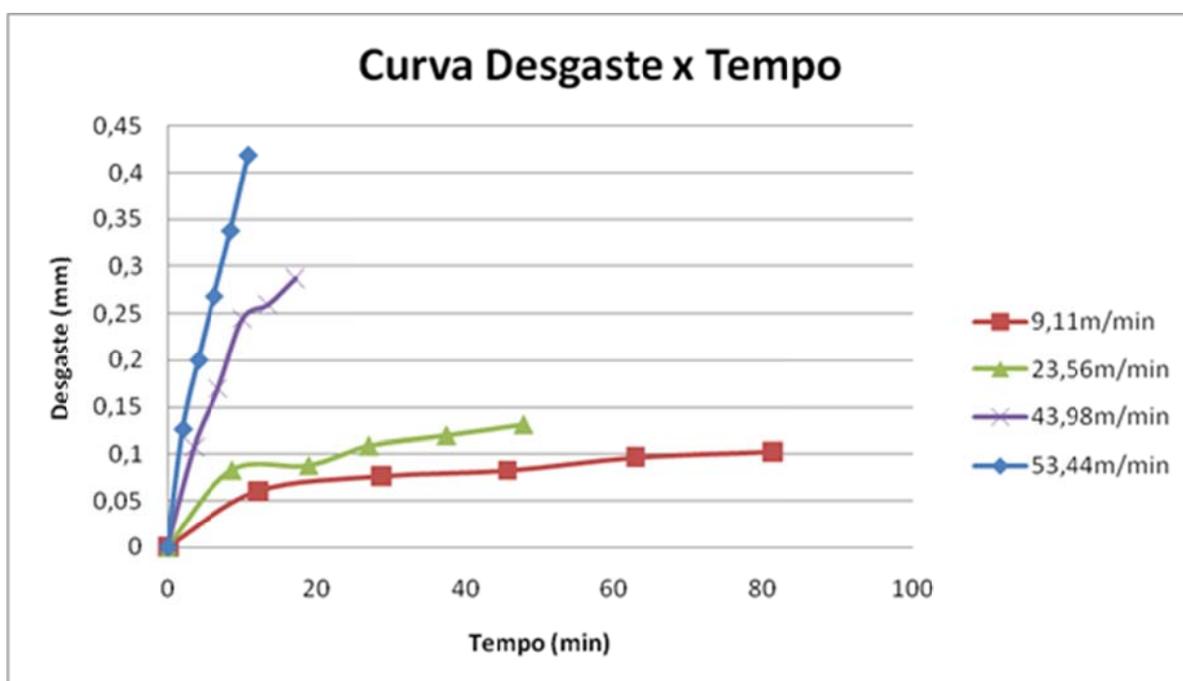


Gráfico 5 – Curvas tempo (T) VS desgaste do flanco (VB) para diferentes velocidades de corte.  
Fonte Autoria própria

### **Resultados do Ensaio Prévio**

A metodologia prevista na proposta tem como produto final a curva de vida da ferramenta de corte. Entretanto com o ensaio prévio realizado não foi possível levantar essa curva. A razão da inviabilidade de se levantar a curva em questão foi a escolha de velocidades de corte baixas. Com isso, para a maioria das velocidades, o desgaste do flanco não atingiu o critério de fim de vida da ferramenta que seria  $VB = 0,3 \text{ mm}$ .

O resultado obtido do ensaio prévio foi então apenas a curva tempo x desgaste do flanco apresentada no Gráfico 5.

## ANEXO A – TABELA DE VELOCIDADES DISPONÍVEIS

A Tabela 6, desenvolvida durante o planejamento do projeto. Apresenta todas as velocidades de corte possíveis de serem utilizadas no ensaio baseando-se no diâmetro da peça e nas rotações disponíveis do torno.

D/rot	NARDINI - MASCOTE							
	1000	800	630	500	400	315	250	200
44,3	139,226	111,3808	87,71241	69,61302	55,69042	43,8562	34,80651	27,84521
43,3	136,0832	108,8666	85,73244	68,04162	54,4333	42,86622	34,02081	27,21665
42,3	132,9404	106,3524	83,75248	66,47022	53,17618	41,87624	33,23511	26,58809
41,3	129,7976	103,8381	81,77251	64,89882	51,91906	40,88626	32,44941	25,95953
40,3	126,6548	101,3239	79,79255	63,32742	50,66194	39,89627	31,66371	25,33097
39,3	123,512	98,80963	77,81259	61,75602	49,40482	38,90629	30,87801	24,70241
38,3	120,3692	96,29539	75,83262	60,18462	48,1477	37,91631	30,09231	24,07385
37,3	117,2264	93,78115	73,85266	58,61322	46,89058	36,92633	29,30661	23,44529
36,3	114,0836	91,26691	71,87269	57,04182	45,63346	35,93635	28,52091	22,81673
35,3	110,9408	88,75267	69,89273	55,47042	44,37634	34,94636	27,73521	22,18817
34,3	107,798	86,23843	67,91277	53,89902	43,11922	33,95638	26,94951	21,55961
33,3	104,6552	83,72419	65,9328	52,32762	41,8621	32,9664	26,16381	20,93105
32,3	101,5124	81,20995	63,95284	50,75622	40,60498	31,97642	25,37811	20,30249
31,3	98,36964	78,69571	61,97287	49,18482	39,34786	30,98644	24,59241	19,67393
30,3	95,22684	76,18147	59,99291	47,61342	38,09074	29,99645	23,80671	19,04537
29,3	92,08404	73,66723	58,01295	46,04202	36,83362	29,00647	23,02101	18,41681
28,3	88,94124	71,15299	56,03298	44,47062	35,5765	28,01649	22,23531	17,78825
27,3	85,79844	68,63875	54,05302	42,89922	34,31938	27,02651	21,44961	17,15969
26,3	82,65564	66,12451	52,07305	41,32782	33,06226	26,03653	20,66391	16,53113
25,3	79,51284	63,61027	50,09309	39,75642	31,80514	25,04654	19,87821	15,90257
24,3	76,37004	61,09603	48,11313	38,18502	30,54802	24,05656	19,09251	15,27401
23,3	73,22724	58,58179	46,13316	36,61362	29,2909	23,06658	18,30681	14,64545
22,3	70,08444	56,06755	44,1532	35,04222	28,03378	22,0766	17,52111	14,01689
21,3	66,94164	53,55331	42,17323	33,47082	26,77666	21,08662	16,73541	13,38833
20,3	63,79884	51,03907	40,19327	31,89942	25,51954	20,09663	15,94971	12,75977

Tabela 6 – Velocidades possíveis conforme diâmetro do material de trabalho e rotações disponíveis no torno. Vermelho: limite superior de velocidade; amarelo: velocidades utilizadas no ensaio; rosa: velocidade utilizada na usinagem a seco para obtenção da temperatura; azul: velocidade próxima para avaliar repetibilidade.