

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE PÓS-GRADUAÇÃO

CASSIANA SANTOS DE MATTOS
TATIANA OLIVEIRA VAREJÃO

**USINAGEM DA LIGA DE INCONEL 625 PARA A
INDÚSTRIA DE PETRÓLEO DO ESTADO DO
ESPÍRITO SANTO**

VITÓRIA
2009

**CASSIANA SANTOS DE MATTOS
TATIANA OLIVEIRA VAREJÃO**

**USINAGEM DA LIGA DE INCONEL 625 PARA A INDÚSTRIA
DE PETRÓLEO DO ESTADO DO
ESPÍRITO SANTO**

Projeto de Pós Graduação apresentado ao Programa
de Pós Graduação em Lato Seno da Universidade
Federal do Espírito Santo, como requisito parcial
para obtenção do Grau Pós Graduação lato Sensu.
Orientador: Professor Flávio José da Silva

VITÓRIA
2009

CASSIANA SANTOS DE MATTOS
TATIANA OLIVEIRA VAREJÃO

**USINAGEM DA LIGA DE INCONEL 625 PARA A INDÚSTRIA
DE PETRÓLEO DO ESTADO DO
ESPÍRITO SANTO**

Projeto de Pós Graduação apresentado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau pós Graduação Lato Sensu.

Aprovado em ____de março de 2009.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Flávio José da Silva
Orientador

Prof. Temísitocles de Souza Luz
Examinador

AGRADECIMENTOS

Cassiana e Tatiana agradecem à:

Primeiramente a Deus, que nos abençoou nessa caminhada árdua.

Aos nossos pais, filha e familiares pelo grande apoio, que nunca nos deixou desistir mesmo nas horas mais difíceis.

Ao professor Flávio Jose da Silva, pela orientação e atenção durante o decorrer do trabalho.

Ao colegiado Acadêmico que participou que lecionou durante a duração das aulas.

Ao coordenador geral Professor Temístocles de Sousa Luz.

E a todos os colegas de classe que nos acompanhou nessa difícil jornada.

MOTIVAÇÃO

Motivadas com o crescimento da indústria do petróleo no estado do Espírito Santo, com o curso do PROMINP, que é voltado para a indústria do petróleo e com a necessidade de uso de materiais resistentes ao desgaste e corrosão, surgiu o interesse no estudo da usinagem da liga de inconel 625 e suas normas.

RESUMO

O crescimento da indústria de petróleo no estado do Espírito Santo tem trazido grandes desafios para as indústrias do setor metal-mecânico do estado. Um deles é a usinagem da liga de níquel Inconel 625. Usualmente chamadas de superligas, as ligas a base de níquel são conhecidas pela sua baixa usinabilidade devido à alta dureza, alta resistência mecânica em alta temperatura, afinidade para reagir com materiais da ferramenta e baixa condutividade térmica. Este trabalho procura enfocar a usinagem no Espírito Santo dentro de empresas ligadas a Petrobras, além de enfocar as dificuldades, aplicações e características encontradas no Inconel 625.

Palavras-chave: Usinagem. Superliga a base de níquel.

ABSTRACT

The growth of the oil industry in the state of the Espírito Santo has brought great challenges to the industries of metal-mechanical sector of the state. One it's the machining of nickel-based alloy Inconel 625. Usually called superalloys, the nickel-based alloys are known for their low machinability due to high hardness, high mechanical strength at high temperature, affinity for materials react with the tool and low thermal conductivity. Focus on cutting demand in the Holy Spirit within the leagues companies Petrobras, and focus on the problems, applications and features found in Inconel 625.

Keywords: Machining. Nickel-based Superalloys .

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo na furação.....	14
Figura 2.2	Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo , no torneamento.....	15
Figura 2.3	Cunha de corte da ferramenta de tornemaento [3].....	17
Figura 2.4	Arestas de corte e superfícies da cunha de corte de uma ferramenta de torneamento [3].....	17
Figura 2.5	Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte [1].....	21
Figura 2.6	Parâmetros utilizados para medir desgaste em ferramentas de corte (ISO 3685, 1977).....	22
Figura 3.1	Resistência de temperatura.....	28
Figura 3.2	Propriedade mecânica das ligas de alumínio.....	29
Figura 3.3	Tabela com as principais características do Inconel.....	31
Figura 4.1	Foto de plataforma Petrobrás.....	35
Figura 4.2	Foto aérea da empresa Flexibrás/Technip.....	36
Figura 4.3	Monocones.....	38
Figura 4.4	Foto do pátio da empresa Prysmian.....	39
Figura 4.5	Foto da empresa Usinagem Capixaba.	40

LISTA DE SÍMBOLOS

Vc	Velocidade de corte
n	Rotação
rpm	Revoluções por minuto
Vf	Velocidade de avanço
f	Avanço
Ve	Velocidade efetiva de corte
Pfe	Plano de trabalho
ap	Profundidade de corte
PVD	<i>Physical Vapor deposition</i>
VBb	Desgaste de flanco médio
VBc	Desgaste de entalhe
VBbmáx	Desgaste de flanco máximo
TCP	<i>Topologically close packed</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
LabTecMec	Laboratório de Tecnologia Mecânica

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	10
1.1 – Objetivo.....	10
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 – Usinabilidade.....	12
2.2 – Usinagem.....	12
2.3 – MOVIMENTOS E GRANDEZAS NOS PROCESSOS DE USINAGEM.....	13
2.3.1 – Conceitos Gerais de Usinagem.....	13
2.4 - GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE.....	16
2.4.1 Definições.....	16
2.5 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O MATERIAL DA FERRAMENTA.....	18
2.5.1 – Ferramentas de metal duro.....	18
2.5.1.1 - Ferramentas de metal duro revestidas.....	19
2.5.2 – Ferramentas de materiais cerâmicos.....	20
2.5.3 Desgaste nas Ferramentas de Corte.....	21
2.5.4 Mecanismos de desgaste.....	23
2.5.4.1 Desgaste difusivo.....	23
2.5.4.2 Desgaste por aderência e arrastamento (<i>Attrition</i>).....	23
2.5.4.3 Desgaste abrasivo.....	23
2.5.5 - Vida da Ferramenta.....	24
2.5.6 - Fluidos de Corte.....	24
2.6 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O MATERIAL DA PEÇA.....	25
2.6.1 – SUPERLIGAS RESISTENTES AO CALOR.....	25
2.6.2 – NÍQUEL E LIGAS DE NÍQUEL.....	25
2.6.2.1 - Principais características das ligas de níquel.....	26
2.6.2.1.1 - Níquel comercialmente duro.....	28
2.6.2.1.2 - Ligas Binárias:.....	28
2.6.2.1.3 - Ligas Ternárias:.....	28
2.6.2.1.4 - Ligas Complexas.....	29
2.6.2.1.5 - Super ligas.....	29

2.6.3 - CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DA SUPERLIGA	
INCONEL 625.....	30
2.6.4 - MICROESTRUTURA DO INCONEL 625.....	31
3 – METODOLOGIA.....	33
3.1 PRINCIPAIS QUESTIONAMENTOS PESQUISADOS.....	33
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
4.1 – PETROBRÁS.....	35
4.2 – FLEXIBRÁS/TECHNIP.....	37
4.3 – PRYSMIAN.....	38
4.4 – USINAGEM CAPIXABA.....	39
5 – CONCLUSÕES.....	41
6 – SUGESTÕES DE TRABALHO.....	42
7 – REFERÊNCIAS.....	43

CAPÍTULO I

1 – INTRODUÇÃO

O crescimento da indústria de petróleo no estado do Espírito Santo tem trazido grandes desafios para as indústrias do setor metal-mecânico do estado. Um deles é a usinagem da liga de níquel Inconel 625. Usualmente chamadas de superligas, as ligas a base de níquel são conhecidas pela sua baixa usinabilidade devido à alta dureza, alta resistência mecânica em alta temperatura, afinidade para reagir com materiais da ferramenta e baixa condutividade térmica.

As aplicações destas ligas vêm aumentando em função da crescente demanda de materiais que resistam a processos e ambientes considerados agressivos, onde a utilização dos materiais metálicos tradicionais, como por exemplo, o aço e o ferro fundido são inadequados [1]. Uma das aplicações é na confecção de peças utilizadas na exploração de petróleo em plataformas off shore, devido sua alta resistência a ambientes agressivos em termos de corrosão.

1.1 – Objetivo

Fazer uma revisão geral do assunto “Usinagem do Inconel 625” e contextualizar essa usinagem no estado do Espírito Santo, realizando visitas às empresas para ver como está a situação da usinagem, ver como as empresas efetuam este tipo de trabalho e observar como as empresas clientes, como a Petrobrás, exigem de qualidade em termos de normas. E para chegar a esse objetivo, o trabalho foi dividido da seguinte maneira:

No capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados a esse trabalho. Foi dada grande ênfase às características das ligas a base de níquel, principalmente o Inconel 625. Focam-se as principais características das superligas e também melhor entendimento sobre o Inconel 625.

No capítulo 3 apresenta-se a metodologia utilizada neste trabalho.

No capítulo 4 mostra os principais resultados obtidos com a pesquisa sobre a usinagem do inconel no estado do Espírito Santo, normas que regem a usinagem, principais características do material, fornecedores entre outras informações.

No capítulo 5, têm-se as principais conclusões dos dados apresentados durante o decorrer dessa monografia.

No capítulo 6 apresentam-se sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as referências citadas e consultadas durante o desenvolvimento do trabalho.

CAPÍTULO II

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão focados assuntos relativos à usinagem, como a geometria da ferramenta, conceitos gerais de usinagem, material de ferramenta, desgaste da ferramenta, vida da ferramenta e considerações de superligas resistentes ao calor, entre outros. No capítulo que se estende será focado assuntos relativos à usinagem, como por exemplo, a geometria da ferramenta, conceitos gerais de usinagem entre outros, focando mais nas superligas a base de níquel.

2.1 – Usinabilidade

O termo usinabilidade compreende todas as propriedades de um material que têm influência sobre o processo de usinagem, no qual 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.

2.2 – Usinagem

No processo de Usinagem uma quantidade de material é removida com auxílio de uma ferramenta de corte produzindo o cavaco, obtendo-se assim uma peça com formas e dimensões desejadas.

De um modo geral, as principais operações de usinagem podem ser classificadas em:

- Torneamento;
- Aplainamento;
- Fresamento;

- Furação;
- Brochamento;
- Retificação.

Os conceitos a seguir são referentes a um ponto genérico da aresta de corte, dito como ponto de referência, fixado na parte da aresta cortante próximo à ponta da ferramenta [2].

2.3 – MOVIMENTOS E GRANDEZAS NOS PROCESSOS DE USINAGEM

O movimento relativo entre ferramenta e peça é o princípio fundamental para a ocorrência do processo de usinagem. Portanto, a definição de grandezas envolvidas neste processo é de importância vital para o seu estudo.

Os conceitos a seguir são referentes a um ponto genérico da aresta de corte, dito como ponto de referência, fixado na parte da aresta cortante próximo à ponta da ferramenta [2].

2.3.1 – Conceitos Gerais de Usinagem

Movimento de corte: corresponde ao movimento principal produzido com o objetivo de provocar um deslocamento relativo entre a peça e a ferramenta, forçando o material da peça sobre a face da ferramenta.

Movimento de avanço: é o movimento produzido manualmente ou pela máquina, com objetivo de provocar um deslocamento relativo adicional entre a peça e a ferramenta, o qual, somado ao movimento de corte, leva a remoção repetida de ou contínua de cavacos e a geração de uma superfície usinada com as características geométricas desejadas.

Movimento efetivo: movimento resultante dos movimentos de corte e avanço, realizados ao mesmo tempo.

Na figura 2.1 ilustra as direções dos movimentos de corte, avanço e efetivo na furação.

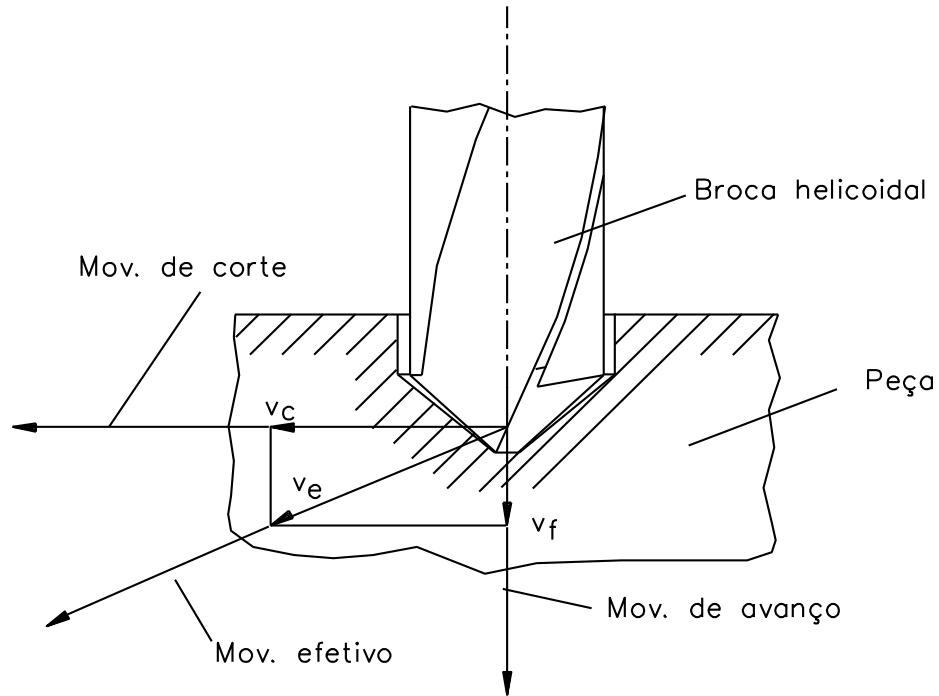


Figura 2.1 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo na furação.

Velocidade de corte (V_c): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte.

$$V_c = \pi \cdot \varphi \cdot n / 1000 \text{ [m/min]} \quad (1.1)$$

Sendo que,

φ = diâmetro da peça ou da ferramenta em mm;

n = número de rotações por minuto (rpm).

V_c = velocidade de corte em mm

Velocidade de avanço (V_f) : velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de avanço.

$$V_f = f \cdot n \text{ [m/min]} \quad (1.2)$$

Sendo que,

f = avanço em mm/ volta;

n = número de rotações por minuto.

Velocidade efetiva de corte (v_e): velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido efetivo do corte.

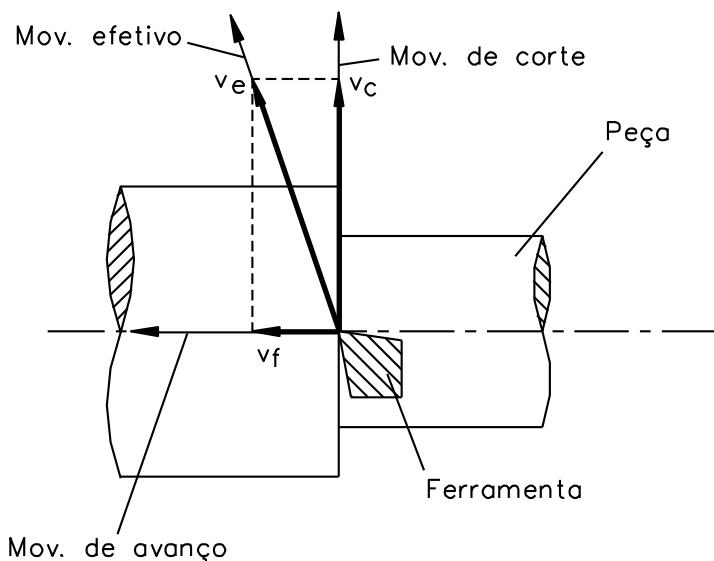


Figura 2.2 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo, no torneamento.

Plano de trabalho (P_{fe}): é o plano que contém as direções de corte e de avanço, passando pelo ponto de referência da aresta cortante.

Avanço (f): é o percurso de avanço em cada volta (mm/volta) ou em cada curso da ferramenta (mm/golpe). Também definida como velocidade instantânea do ponto de referência do gume, segundo a direção e sentido de avanço.

Profundidade ou Largura de usinagem (ou de corte) (a_p): é a profundidade de penetração da aresta principal de corte, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho, dado em milímetros (mm).

Além do movimento ideal entre a peça e a ferramenta, para que a usinagem seja perfeita, a ferramenta tem que ter uma geometria adequada, gerando uma usinagem com força adequada, acabamento bom, cavaco quebrado, temperatura baixa e a vida da ferramenta boa. Para isso, será feito uma breve revisão sobre geometria das ferramentas de corte.

2.4 - GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE

A ação de corte é em grande parte determinada pela geometria da ferramenta, portanto, é muito importante definir a ferramenta através dos ângulos da cunha cortante. Para cada par material de ferramenta / material de peça têm uma geometria de corte apropriada ou ótima.

A geometria da ferramenta influência na:

- Formação do cavaco
- Saída do cavaco
- Forças de corte
- Desgaste da ferramenta
- Qualidade final do trabalho

2.4.1 Definições

Cunha de corte: é a cunha formada pelas superfícies de saída e de folga da ferramenta.

Superfície de saída (A_y): é a superfície de saída sobre a qual o cavaco se desliza.

Superfície de folga: é a superfície da cunha de corte, que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem.

Arestas de corte: são as arestas da cunha de corte formada pelas superfícies de saída e de folga. Deve-se distinguir a aresta principal de corte S e a aresta secundária de corte S' .

- **aresta principal de corte (S):** é a aresta de corte cuja cunha de corte indica a direção de avanço.

- **aresta secundária de corte (S'):** é a aresta de corte cuja cunha de corte, indica a direção contrária a direção de avanço.

Ponta de corte: parte da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte.

As figuras 2.3 e 2.4 ajudam a compreender as definições acima citadas.

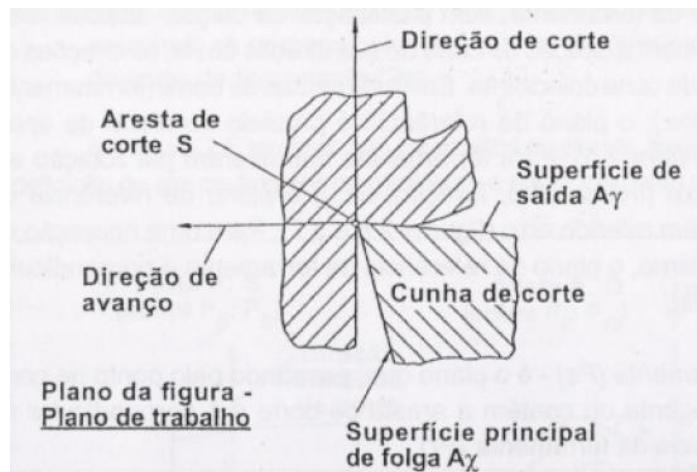


Figura 2.3 - Cunha de corte da ferramenta de torneamento [3].

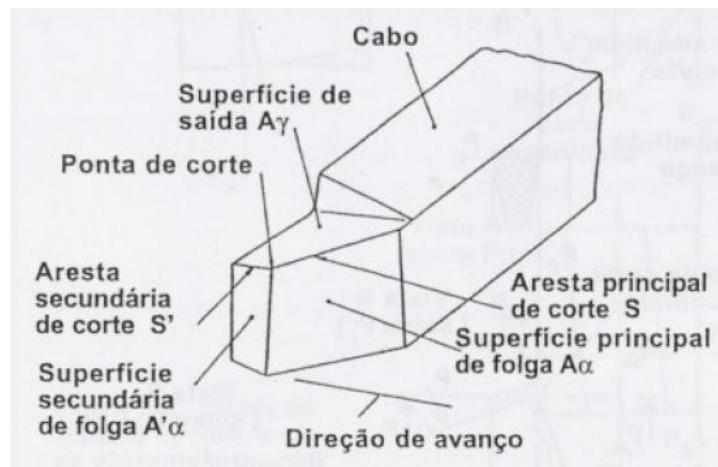


Figura 2.4 - Areás de corte e superfícies da cunha de corte de uma ferramenta de torneamento [3].

Ajustados os movimentos e escolhida a geometria da ferramenta, serão feitas considerações sobre o material da ferramenta e o material da peça.

2.5 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O MATERIAL DA FERRAMENTA

Das muitas variáveis que afetam qualquer processo de usinagem, a ferramenta de corte, mesmo tendo custo relativamente pequeno, é o mais crítico [4].

O material da ferramenta tem forte influência sobre o processo de corte, logo, devem-se saber quais as características dos materiais das ferramentas disponíveis no mercado e escolher aquela que melhor se adapta ao seu processo. Os fatores a seguir devem ser criteriosamente observados antes da escolha da ferramenta [3]:

- a) material a ser usinado;
- b) processo de usinagem;
- c) condição da máquina operatriz (potência, gama de velocidades, estado de conservação, etc.);
- d) forma e dimensões da ferramenta;
- e) custo do material da ferramenta;
- f) condições de usinagem.

As principais propriedades que um material de ferramenta deve apresentar são:

- alta dureza;
- tenacidade suficiente para evitar falha por fatura;
- alta resistência ao desgaste, alta resistência à compressão;
- alta resistência ao cisalhamento;
- boas propriedades mecânicas e térmicas a temperaturas elevadas;
- alta resistência ao choque térmico;
- alta resistência ao impacto e ser inerte quimicamente [2].

2.5.1 – Ferramentas de metal duro

O metal Duro (carbonetos Sinterizados) surgiu em 1927 com o nome de widia (wie diamant – como diamante), com uma composição inicial de 81% de W, 6% de C e 13% de Co, apresentando as principais características:

- Elevada dureza;
- Elevada resistência à compressão;
- Elevada resistência ao desgaste;
- Possibilidade de obter propriedade distintas nos metais duros pela mudança específica dos carbonetos e das proporções do ligamento (em geral Co);
- Controle sobre distribuição da estrutura.

O metal duro é um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de materiais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto) formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão. As partículas duras são carbonetos de tungstênio, usualmente em combinação com outros carbonetos, como carbonetos de titânio, tântalo e nióbio [3].

As principais propriedades que se espera de um metal duro, quando aplicados em ferramentas de corte são: dureza, tanto à temperatura ambiente como a elevadas temperaturas, e a resistência à ruptura transversal, ou seja, tenacidade [5].

A ISO padronizou o metal duro segundo as classes, P para usinagem de aços e materiais dúcteis em geral e apresenta elevado teor de TiC +TaC, classe M, para usinagem de aços inoxidáveis com adições de TiC, TaCe /ou NbC ao WC+Co, classe K, para usinagem de ferros fundidos, contém WC+Co, classe N, para os metais e ligas não ferrosas, classe S, para superligas ou ligas resistentes ao calor e classe H, para os aços endurecidos [2].

2.5.1.1 - Ferramentas de metal duro revestidas

A principal finalidade do revestimento é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça, sendo que o núcleo da pastilha permanece com a tenacidade do metal duro mais simples (WC+Co). Assim, em muitos casos, consegue-se, aumentar consideravelmente a vida da ferramenta e diminuir-se os esforços de corte [3].

O número de camadas de cobertura também é uma variável, pois, existem pastilhas com quantidades variadas de cobertura, sendo que cada uma tem a sua função específica e a associação de camadas permite oferecer um produto com inúmeras vantagens [2].

2.5.2 – Ferramentas de materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos, também chamados de óxidos metálicos, possibilitam elevadas velocidades de corte, ao ponto de a rigidez e a potência da máquina operatriz ser um fator limitador no uso destas ferramentas. As características principais deste material são:

- Alta dureza a quente (1600°C);
- Não reação química com o aço;
- Longa vida da ferramenta;
- Alta velocidade de corte;
- Não formação de gumes postiços;
- 1/3 da densidade do aço;
- Alta resistência à compressão;
- Baixa condutividade térmica;

Em comparação ao metal duro, as cerâmicas possuem maior dureza a quente, maior resistência à oxidação e menor afinidade química com o material da peça, em contrapartida, o metal duro apresenta maior tenacidade e maior resistência ao choque térmico [2].

As cerâmicas podem ser divididas em dois grandes grupos: cerâmica a base de Al_2O_3 e cerâmica a base de Si_3N_4 . Porém neste trabalho a ferramenta cerâmica usada é a base de Al_2O_3 , reforçada com TiC (Cerâmica mista). Além de melhorar a tenacidade e a condutividade térmica, aumenta consideravelmente a dureza e a resistência ao desgaste da ferramenta [2].

O aumento da tenacidade, das cerâmicas a base de Al_2O_3 , reforçada com SiC , se deve ao fato de as trincas, ao se propagarem, encontram-se com os SiC, que permanecem

íntegros, sem se quebrarem, porém, há a separação destes carbonetos da matriz de Al_2O_3 , o que absorve grande quantidade de energia de fratura e inibe a propagação da trinca. Devido a grande resistência dos SiC, a trinca não atravessa sua estrutura, tendo portanto que desviar-se, o que também consome energia [2].

2.5.3 Desgaste nas Ferramentas de Corte

Nos processos de usinagem, a destruição da ferramenta de corte é inevitável, ainda que, as propriedades mecânicas da peça de trabalho sejam relativamente inferiores.

Segundo a norma ISO 3685 (1977)[2] desgaste em ferramentas é a “mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material”.

A figura 2.5 apresenta as principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte [2].

Três formas de desgaste podem ser identificadas nesta figura:

- I. Desgaste de cratera (área A da Figura 2.3);
- II. Desgaste de flanco (área B da Figura 2.3);
- III. Desgaste de entalhe (áreas C e D da Figura 2.3)

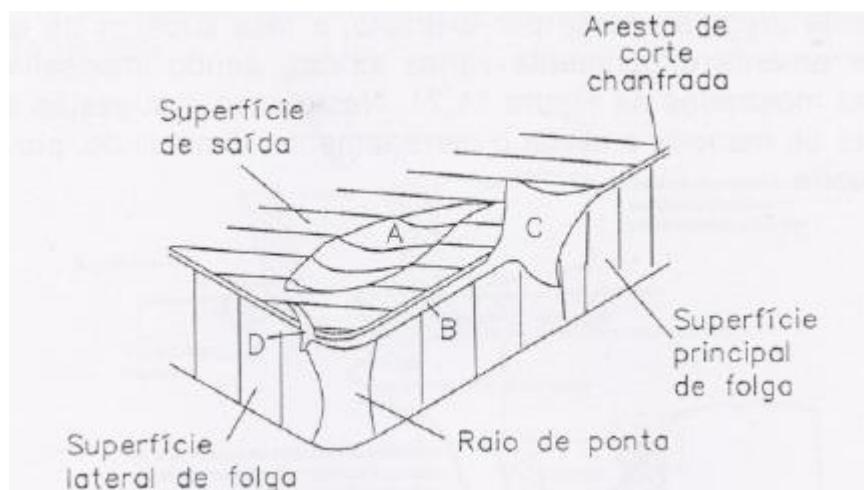


Figura 2.5 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte [1].

A norma ISO 3685 (1997) recomenda os seguintes critérios de fim de vida para ferramentas de aço-rápido, metal duro e cerâmica em operação de desbaste:

- Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3\text{mm}$;

- Desgaste de flanco máximo, $VB_B\text{máx} = 0,6\text{mm}$;
- Profundidade de cratera, $KT = 0,06 + 0,3fc$, onde fc é o avanço de corte em mm/rev ;
- Desgaste de entalhe, VC_N e $VC_N = 1,0\text{mm}$;
- Falha catastrófica.

Na figura 2.6 mostra os parâmetros utilizados para medir o desgaste de corte.

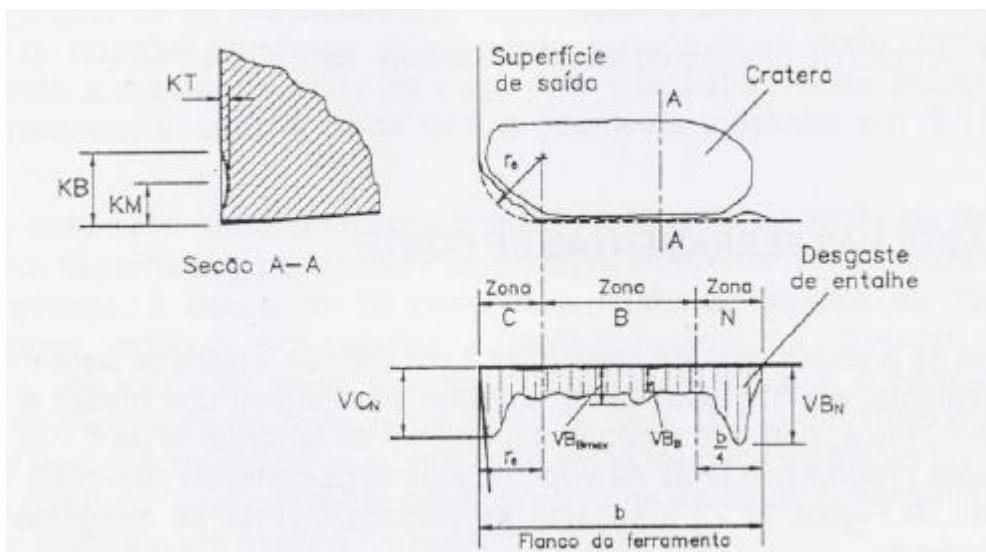


Figura 2.6 Parâmetros utilizados para medir desgaste em ferramentas de corte (ISO 3685, 1977)

Estas três formas de desgaste se desenvolvem na usinagem das ligas de níquel. Porém a predominância de cada tipo de desgaste vai depender da liga de níquel usinada, do material da ferramenta e das condições de corte [2].

Para as ferramentas de metal duro os desgastes de flanco e de entalhe são predominantes podendo também ocorrer desgaste de cratera na usinagem das ligas a base de níquel. Vários mecanismos de desgastes podem estar presentes, mas abrasão é o mais importante [2].

Nas ferramentas de cerâmica o desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte pode ser responsável pela rejeição da ferramenta de corte à velocidades baixas. Às altas velocidades de corte, o desgaste de flanco compete com o desgaste de entalhe dependendo do tipo de cerâmica usado. No processo de desgaste, *attrition* pode

prevalecer à velocidade de corte baixa enquanto que à alta velocidade a difusão também está presente.

2.5.4 Mecanismos de desgaste

Serão abordados apenas os mecanismos de maior influência na usinagem das ligas a base de níquel citados pela literatura.

2.5.4.1 Desgaste difusivo

Este mecanismo envolve a transferência de átomos de um material para outro e é fortemente dependente da temperatura, do tempo e da solubilidade dos outros elementos envolvidos [2].

Só é concebível a existência da difusão se existir o íntimo contato entre as duas superfícies envolvidas, neste caso entre o cavaco e a ferramenta e entre a peça e a ferramenta [2].

Pode ocorrer desgaste por difusão na usinagem de aço cin ferramenta de metal duro em altas velocidades de corte.

2.5.4.2 Desgaste por aderência e arrastamento (*Attrition*)

Este mecanismo ocorre, geralmente, a baixas velocidades de corte. Com a adesão de material na ferramenta, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface [2].

2.5.4.3 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo acontece quando material é removido ou deslocado da superfície por partículas duras que podem estar soltas, entre duas superfícies com movimento relativo, ou emergindo de uma das superfícies, neste caso pertencentes a ela [2].

Se por um lado a empresa que contrata o serviço de usinagem querendo ter uma peça de qualidade

2.5.5 - Vida da Ferramenta

Vida da ferramenta é o tempo que a mesma trabalha efetivamente, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido [3]. Como visto anteriormente a norma ISO 3685 (1997) recomenda alguns critérios, para se determinar o fim de vida de uma ferramenta, baseados na intensidade do desgaste sofrido por ela. Atingido esse tempo a ferramenta deve ser reafiada ou substituída.

A vida da ferramenta pode ser expressa de várias maneiras, através de:

- Tempo total de trabalho (fresamento).
- Percurso de corte (Km)
- Percurso de avanço (mm).
- Volume de material removido.
- Número de peças produzidas.
- Velocidade de corte para um determinado tempo de vida.
- Ou conforme for mais conveniente [2].

Os principais parâmetros que devem ser considerados no que diz respeito ao desgaste e consequentemente à vida da ferramenta são: seleção do material da ferramenta, geometria da ferramenta, método de usinagem, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte [6].

2.5.6 - Fluidos de Corte

Os fluidos de corte têm grande influência no desempenho das ferramentas na usinagem das ligas de níquel. Podem-se obter vidas de ferramentas bem maiores quando se usa fluidos de corte, pois, eles reduzem a temperatura na área do corte e reduzem também o processo de fadiga causado pelo contato irregular dos cavacos, a altas temperaturas, na ferramenta de corte. Porém a uso de fluidos a altas pressões pode causar menor área de

contato entre o cavaco e a ferramenta e consequentemente um aumento das tensões na aresta de corte [4].

2.6 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O MATERIAL DA PEÇA

Neste tópico serão abordadas as características das ligas de níquel, especificamente o Inconel.

2.6.1 – SUPERLIGAS RESISTENTES AO CALOR

As aplicações das superligas a base de níquel vêm aumentando em função da crescente demanda de materiais que resistam a processos e ambientes considerados agressivos, onde a utilização dos materiais metálicos tradicionais, como, por exemplo, o aço e o ferro fundido são inadequados. Dentro das aplicações das superligas, pode-se citar a utilização de revestimentos depositados através de fusão e imediata solidificação de eletrodos metálicos, ou seja, aplicação de revestimentos metálicos em uma superfície para que esta obtenha algumas das características da superliga depositada [1].

As superligas são usualmente ligas a base de níquel, cobalto ou titânio, com características mecânicas, químicas e térmicas que preenchem os requisitos necessários às indústrias petroquímicas, aeroespaciais e biomédicas, tais como: alta resistência à corrosão em meios agressivos (ex. prospecção de petróleo em águas profundas), baixa perda de resistência sob altas temperaturas (ex. componentes para turbina a gás) e aplicações de risco e de ordem médica (ex. componentes para próteses médicas) [1].

São conhecidas como algumas das superligas mais difíceis de serem usinadas e, consequentemente, de se conseguir uma produção satisfatória e de se obter a qualidade especificada.

2.6.2 – NÍQUEL E LIGAS DE NÍQUEL

Generalidades:

Metal dúctil e tenaz devido a sua estrutura FCC;

Temperatura de fusão de 1453°C, densidade de 8902 kg/cm³, módulo de elasticidade 204GPa;

Pode ser encontrado sob diversas formas: barra, chapa, tudo, ou produtos de fundição;

Usado principalmente como elemento de liga em aços, apenas 13% é usado em ligas baseadas em níquel;

Ligas de níquel possuem a capacidade de suportar condições muito severas em termos de corrosão, temperatura elevada, elevadas tensões de serviço, ou uma combinação destes fatores.

2.6.2.1 - Principais características das ligas de níquel

- Resistência a quente;
- Resistência à corrosão;
- Reduzida variação dimensional;
- Ligas de efeito de memória (Ni-Ti);
- Ligas com elevada resistência elétrica (para aquecimento).

Exemplo de aplicação:

- Turbinas de avião;
- Turbinas de vapor;
- Centrais nucleares;
- Instalações químicas e petroquímicas.

O níquel possui elevada capacidade de dissolução de elementos:

A estrutura das ligas de níquel é formada por uma matriz austenítica com os diversos elementos de ligação em solução sólida - Cr, Mo, W, Al, Ti, V, Mn

W, Mo, Ta, Al - forte endurecimento por solução sólida;

Fe, Co, Ti, Cr e V - endurecimento menos pronunciados.

Devido a este fato, há potencial para a formação de precipitados (incluindo carbonetos)

Carbonetos de Cr, Mo, W - benéficos quando dispersos na matriz ou nas juntas de grão em pequenas quantidades;

Precipitação excessiva de carbonetos nas juntas de grão pode levar a fragilidade.

O níquel é ligado para melhorar as suas já boas propriedades de :

- Resistência à corrosão;
- Resistência a temperaturas elevadas

Mantém as propriedades de ductilidade e tenacidade inerentes à sua matriz austenística.

Normalmente, dividem-se as ligas de níquel em 5 grandes grupos:

- Níquel comercialmente puro;
- Ligas binárias;
- Ligas ternárias;
- Ligas complexas;
- Super ligas

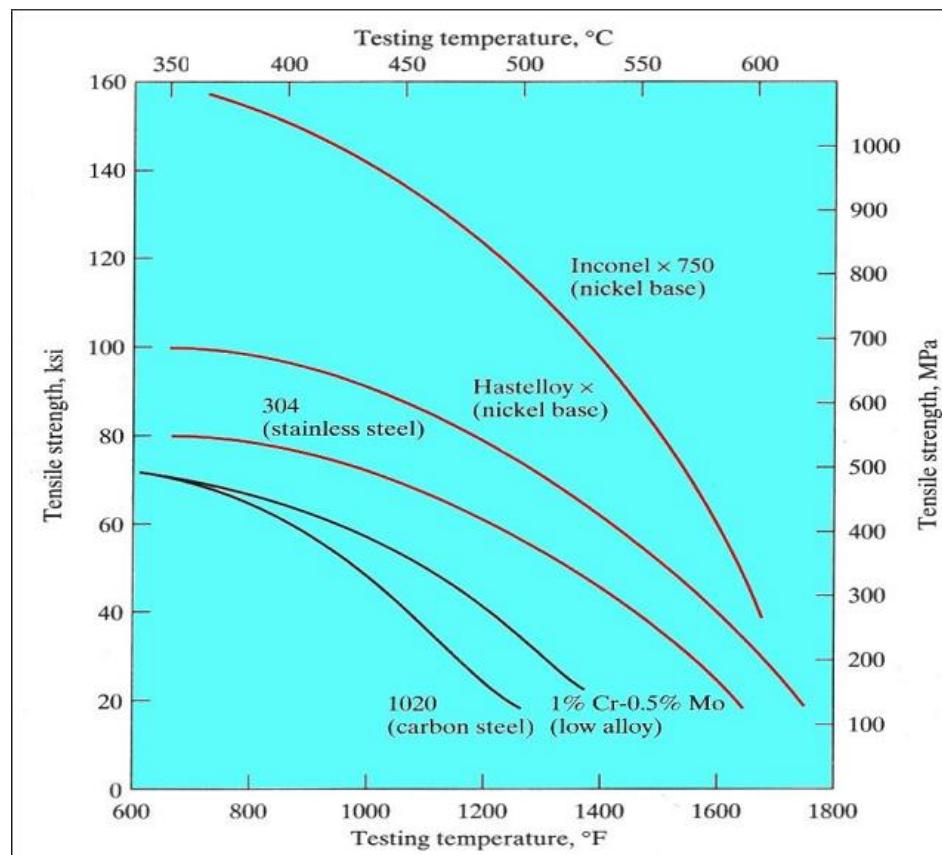


Figura 3.1 Resistência de temperatura

2.6.2.1.1 - Níquel comercialmente duro

Níquel 200 e níquel 201, 99,5% Ni- resistencia à corrosão;

Duraníquel 301, 94% Ni - 4% Al e até 1% Ti (e outros)- endurecimento por precipitação de Ni₃(AlTi), maior resistencia mecânica

2.6.2.1.2 - Ligas Binárias:

Ni-Cu(Al, Fe,Ti) [Monel]

Endurecimento por envelhaecimento -maior resistencia e dureza;

Maior resistência à corrosão

Ni-Mo[Hastelloy B2]-resistência à corrosão

2.6.2.1.3 - Ligas Ternárias:

Ni-Cr-Fe [Inconel 600, Incoloy 800] - resistência a temperaturas elevadas

Ni-Cr-Mo [Hastelloy C-276, Hastelloy C-22, Inconel 625] - resistentes à corrosão alveolar. Aplicação em meios aquosos.

2.6.2.1.4 - Ligas Complexas

Ni-Cr-Mo-Cu [Hastelloy G-3, Inconel 617, 625, e 718, Incoloy 825]- aplicação envolvendo ácido sulfúrico/ fosfórico.

2.6.2.1.5 - Super ligas

Desenvolvidas para aplicação especiais onde se exige grande resistência mecânica a temperaturas elevadas - resistência à fluência

Endurecimento por solução sólida: Cr, Co, Fe, Mo, W, Ni

Endurecimento por precipitação: composto intermetálico Ni₃(Al,Ti), coerente com a matriz - resistência a quente (teor de Al até 5% de Ti até 1%)

Nome	UNS	Composição	Condição	Propriedades mecânicas				Aplicações/Características
				Rot. (MPa)	Ced.(MPa)	Ext.Rot(%)		
Ni puro	N02200	99.9Ni	Recozido	350	112	45	Revestimentos ou componentes para resistência a corrosão	
				665	560	4		
Monel 400	N04400	31.5Cu	Recozido	546	273	37	Válvulas, bombas e permutadores de calor	
Monel K500	N05500	29.5Cu,2.7Al, 1.0Fe,0.6Ti	Envelhecido	1050	770	30	Veios, molas e pás de turbina	
Inconel 600	N06600	15.5Cr, 8Fe	Carbonetos dispersos	560	203	49	Equipamentos para tratamento térmico	
Inconel 625	N06625	21.5Cr,2.5Fe, 9Mo, 3.6Nb	Deformado a frio	896	483	50		
Inconel X750	N07750	15.5Cr, 7Fe, 2.5Ti	Envelhecido	1241	827	25		
Hastelloy B-2	N10665	28Mo	Carbonetos dispersos	950	520	55	Componentes estruturais resistentes à corrosão e	
Hastelloy C276	N10276	16Cr, 16Mo, 6Fe, 4W		792	531	60	processamento químico	
Incoloy 800	N08800	46Fe, 21Cr	Carbonetos dispersos	623	287	37	Permutadores de calor	
Incoloy 825	N08825	21.5Cr,30Fe, 3Mo, 2.2Cu		690	310	45		

Figura 3.2 propriedade mecânica das ligas de alumínio

Uma liga de níquel-crómio-molibdénio com excelente resistência à corrosão numa vasta gama de meios corrosivos, sendo especialmente resistente à corrosão alveolar e a

corrosão nas fissuras. É uma escolha favorável para aplicações em água salgada. As aplicações incluem as indústrias naval e aeroespacial, processamento químico, reatores nucleares e equipamento de controlo de poluição.

2.6.3 - CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DA SUPERLIGA INCONEL 625

A superliga a base de níquel Inconel 625 possui uma estrutura CFC, austenítica até o seu ponto de fusão. Sua densidade é de 8,44 g/cm³ (21°C). O módulo de elasticidade a tração e a torção são respectivamente 208 e 81 GPa, ambos a 21°C. Esta liga possui alto percentual de elementos químicos na forma de solução sólida em sua matriz Ni-Cr-Mo [1].

A baixa usinabilidade de uma liga de níquel ocorre devido a alguns fatores [1]:

- A maior parte da resistência do material é mantida durante a usinagem devido a sua alta resistência aos efeitos térmicos;
- Encruamento ocorre rapidamente a partir dos esforços aplicados sobre o material durante a usinagem;
- Alto desgaste abrasivo da ferramenta devido à presença de diversos carbonetos na liga;
- Altas taxas de difusão no par ferramenta-peça devido às altas temperaturas presentes na região de corte. As temperaturas podem chegar até 1000°C durante o corte de uma superliga a base de níquel;
- Soldagem por fricção da liga de níquel na superfície de saída e de folga da ferramenta de corte, devido à alta adesão da liga além das baixas velocidades empregadas para a usinagem. Tensões acima de 3450 MPa, podem ser geradas, na região do corte de uma superliga a base de níquel;
- Alta ductilidade sob uma dureza média (250-350HV), levando à dificuldade de formação do cavaco;
- Baixa condutividade térmica, tornando a superliga refratária. Esta característica prejudica o desempenho da ferramenta uma vez que o calor gerado no processo de usinagem não será extraído da maneira convencional pelo cavaco ou pelo fluido refrigerante, caso este seja empregado no processo.

- Resistência de corrosão excelente de tipos diferentes dos meios em ambientes da oxidação e da redução;
- Excelente do desempenho da corrosão do ácido inorgânico, tal como o ácido nítrico, o ácido fosfórico, o ácido sulfúrico, o ácido clorídrico e a mistura do ácido sulfúrico e do ácido clorídrico.

Composição química aproximada (%)	Ni >58 Cr 20-23 Mo 8-10 Nb 3.15-4.15 Fe 5				
Densidade (g/cm³)	8.44	Ponto de fusão (°C)	1350		
Coeficiente de dilatação	12.8 μ m/m °C a 21 - 93°C				
Normas	BS 3076 NA21				
Tratamentos térmicos	Tempera de mola	Alívio da tensão a 260 - 370 °C - 30-60 mins			
Tracção aprox.	Recozido	800 - 1000 N/mm ²			
	Tempera de mola	1300 - 1600 N/mm ²			
Módulo de rigidez	79.0 kN/mm ²				
Módulo de Young	205.8 kN/mm ²				
Temperatura de trabalho aproximada	-200 a +340 °C	Têmpera de mola + tensão aliviada, molas podem trabalhar até 200 °C			

Figura 3.3 Tabela com as principais características do Inconel

2.6.4 - MICROESTRUTURA DO INCONEL 625

A microestrutura de uma liga à base de níquel, como o Inconel 625, é formada através de uma solução sólida de matriz reforçada, contendo diversos tipos de carbonetos além de fase secundária após transformações.

As fases que constituem o Inconel 625 são:

- Liga matriz - gama: É a solução sólida CFC com um altíssimo percentual de elemento de liga;

- Fase – Gama primária: Esta fase surge pela precipitação de altas teores de Al e Ti de acordo com a austenita de níquel. Esta é um intermetálico que aumenta a resistência mecânica da liga à medida que a temperatura se eleva;
 - Carbonetos: Carbono é adicionado para reagir com os elementos refratários e reativos resultando na formação de carbonetos primários MC. Durante a exposição a temperaturas elevadas em longos períodos, o MC é decomposto em dois tipos de carbonetos ($M_{23}C_6$ e M_6C) localizados nos contornos de grão, proporcionando um aumento da resistência às tensões, principalmente àquelas de origem tratativa;
 - Contornos de grãos: Uma fina camada de carbonetos e outros elementos químicos em proporções menores formam esta região que resultam no aumento de resistência sob temperaturas médias a elevadas;
-
- Fases TCP – Fases topologicamente empacotadas (*TCP-Topologically Close Packed*): Estas são fases secundárias μ , σ e δ que proporcionam resistência mecânica à liga. Sua estrutura é tetragonal e sua interação ocorre pela afinidade química e geométrica com a matriz CFC da liga.

A fase gama primária tem uma característica singular. Por interação de discordâncias, ela aumenta a rigidez da liga, e sua resistência aumenta com o aumento da temperatura. E a sua inerente ductilidade ajuda a prevenir a fragilização da liga, ao contrário de outras fases que aumentam resistência, porém diminuem a ductilidade como os carbonetos [4].

CAPÍTULO III

3 - METODOLOGIA

Com o objetivo de avaliar o cenário da usinagem do Inconel no estado do Espírito Santo, adotou-se a seguinte metodologia que será apresentada neste capítulo.

Foram selecionadas, como objeto de estudo, quatro empresas que trabalham com a usinagem de materiais. As empresas escolhidas foram: Petrobrás, por ser a principal consumidora de Inconel; Flexibrás/Technip por ser uma das principais fabricantes de componentes de peças para a Petrobrás; Prismian e Usinagem Capixaba que são duas das principais empresas do estado que realizam usinagem.

Foi elaborado um questionário como base, para facilitar a avaliação do objetivo proposto no trabalho.

A seguir serão apresentados os principais questionamentos do trabalho e uma breve descrição das empresas contatadas.

3.1 PRINCIPAIS QUESTIONAMENTOS PESQUISADOS

Os principais questionamentos desse projeto sobre a usinagem do Inconel 625 foram enumerados para melhor entendimento e também com base de formulário.

O questionário se resume em:

- Quais as normas que regem a usinagem de Inconel 625?
- Qual a maior dificuldade para usinagem desse material?
- Em que peças são mais utilizadas o uso de inconel da indústria de petróleo?
- A sua empresa é qualificada para usinar Inconel?
 - Qual a qualificação para usinar?
 - Quais as melhores ferramentas a serem utilizadas na usinagem do inconel

O questionário foi aplicado nas empresas por meio de visita ou por contato por e-mail.

CAPÍTULO IV

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados resultados obtidos nas empresas e um breve histórico de cada uma.

4.1 – PETROBRÁS

A Petrobras é uma sociedade anônima de capital aberto que atua de forma integrada e especializada em segmentos relacionados à indústria de óleo, gás e energia.

A Companhia conta com quatro áreas de negócio (Exploração e Produção, Abastecimento, Gás & Energia e Internacional), duas áreas de apoio (Financeira e Serviços) e unidades corporativas ligadas diretamente ao presidente.

A figura 4.1 mostra uma foto de uma plataforma da empresa Petrobrás.



Figura 4.1 Foto de plataforma Petrobrás

Em contato direto por e-mail com o Engenheiro de Equipamentos da Petrobrás, obteve-se o código de uma das normas de usinagem de Inconel, ASTM B564-06 a – Standard specification for nickel alloy forgings, bem como as informações teóricas do Inconel 625 citadas a seguir:

- **Dificuldades em usinar Inconel**

As características do material da peça (fragilidade, baixa condutividade térmica, presença de carbetas, resistência à alta temperatura e tendência a endurecer ao ser trabalhado) ocasionaram intenso desgaste nas ferramentas, proporcionando um tempo de vida reduzido.

Os tipos de desgaste das ferramentas estão são a combinação de altas temperaturas de corte, fato esse observado pela incandescência dos cavacos, e alta tensão de compressão na superfície de saída, podendo chegar até a 3450Mpa, leva ao desenvolvimento rápido do desgaste de flanco, cratera ou desgaste de entalhe [2]. Sendo estes os principais tipos de desgaste sofridos pelas ferramentas durante os testes.

- **Qualidade do Inconel Empregado na Petrobrás**

As principais características do Inconel usado na Petrobras são:

- Lugar de origem: Shanghai China
- Número modelo: Inconel 625
- Porto: Shanghai
- Quantidade de ordem mínima: 1 Ton

- **Características**

- Resistência de corrosão excelente de tipos diferentes dos meios em ambientes da oxidação e da redução.

- Excelente desempenho da corrosão do ácido inorgânico, tal como o ácido nítrico, o ácido fosfórico, o ácido sulfúrico, o ácido clorídrico e a mistura do ácido sulfúrico e do ácido clorídrico.
- Resistência de corrosão excelente de tipos diferentes do desempenho da mistura do ácido inorgânico.
- Boa resistência de corrosão de uma variedade de concentrações de ácido clorídrico quando a temperatura até 40.

4.2 – FLEXIBRÁS/TECHNIP

Flexibrás/Technip Brasil flexível, está localizada em Vitória, perto da principal petrolífera offshore brasileira, um campo de gás em desenvolvimento.

A empresa produz tubos flexíveis a partir de 2' a 14' ID (diâmetro interno) e até 15.000 psi de pressão final 130 ° C em temperatura, Umbilicais de até 60 funções com mangueiras termoplásticas elétrica e cabos.

A figura 4.2 mostra uma foto aérea da empresa Flexibrás/Technip.

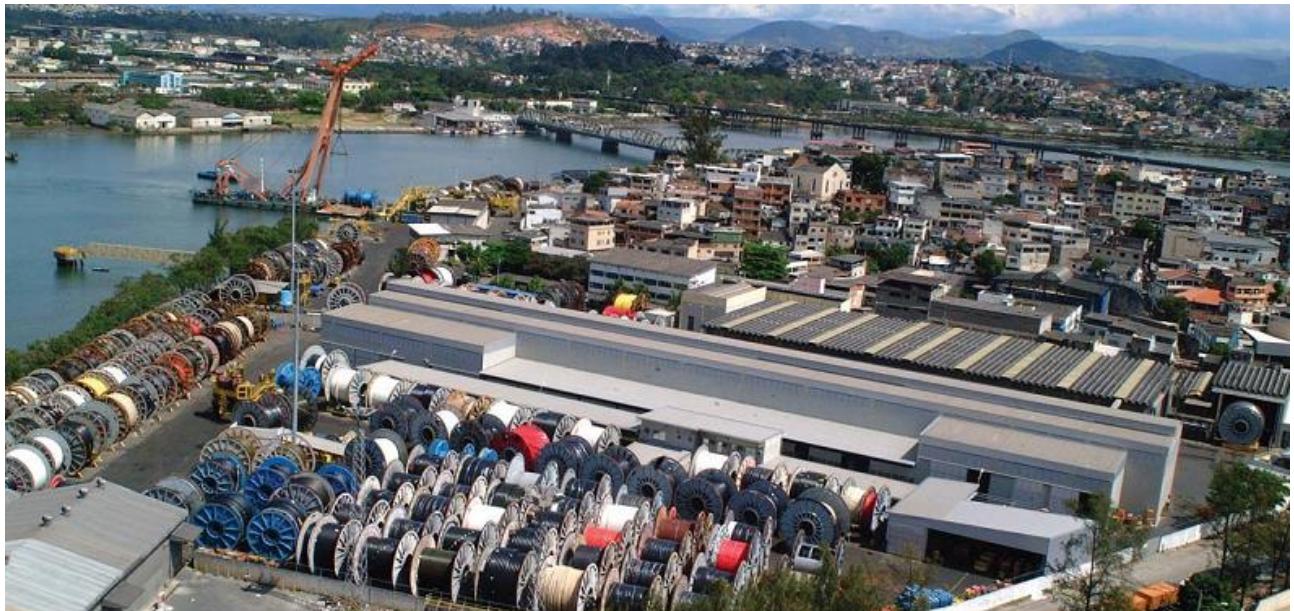


Figura 4.2 Foto aérea da empresa Flexibrás/Technip.

Na visita técnica à Flexibrás/Technip, as respostas aos questionamentos não puderam ser repassadas devido a um sigilo absoluto da empresa. Foi dito, porém que peças, como os monocones, são usinadas a partir do Inconel 625 pela empresa GP, localizada em São Paulo.

A figura 4.3 mostra uma foto dos Monocones da Flexibrás/Technip



Figura 4.3 Monocones

4.3 – PRYSMIAN

A unidade da Prysmian do município de Vila Velha está localizada no bairro de São Torquato.

A unidade, com 21 mil metros quadrados, tem como objetivo a produção de cabos umbilicais, que são os cabos utilizados na interligação das plataformas marítimas de produção de petróleo aos poços produtores, localizados no fundo do mar.

O local conta com máquinas especiais e plataformas giratórias de grande capacidade que servem para o armazenamento dos semi-elaborados e do produto final.

A capacidade de armazenamento da fábrica em Vila Velha é de até 35 bobinas que chegam a 260 toneladas.

A figura 4.4 mostra uma foto da empresa Prysmian.



Figura 4.4 Foto do pátio da empresa Prysmian.

Foi informado, por contato via telefone, que o Engenheiro responsável estava viajando por motivo de estudo para aperfeiçoamento na área de Inconel. Foi dito, também, que seriam obtidas melhores informações na empresa Flexibrás/Technip.

4.4 – USINAGEM CAPIXABA

A usinagem Capixaba LTDA-ME é uma empresa que presta serviços de usinagem e manutenção, localizada em Cariacica no estado do Espírito Santo.

É uma empresa que possui certificação BVQI ISSO 9001:2000.

Quando contactada, a empresa Usinagem Capixaba informou por telefone que atualmente, a pessoa que qualifica técnicos para usinagem do Inconel 625 no estado, trabalha para ela (a empresa), porém informações sobre a usinagem de Inconel seriam melhor respondidas na Flexibrás/Technip.

A foto 4.5 mostra a empresa Usinagem Capixaba.



Figura 4.5 Foto da empresa Usinagem Capixaba.

CAPÍTULO V

5 - CONCLUSÕES

Devido às características, mecânicas, metalúrgicas e térmicas do Inconel 625, o desgaste das ferramentas se dá de forma acentuada em pouco tempo de usinagem, proporcionando uma vida da ferramenta muito curta.

O Inconel 625 é um material realmente difícil de usinar. No estado existem poucas empresas que conseguem fazer esse tipo de trabalho. A dificuldade de usinagem não se dá somente pelo material, mas também por falta de normas requeridas por empresas em relação à qualidade. Das poucas empresas do estado, algumas estão qualificando técnicos operacionais e outras investindo em estudos fora do país, para melhor qualificação desse material.

Em virtude da grande dificuldade de usinagem, por ser uma fatia do mercado onde é um serviço caro e em vista a uma demanda muito grande para usinagem de peças, para empresas que necessitam de grande quantidade, como a Petrobrás, há certa dificuldade de obter informações sobre a usinagem do Inconel 625 existindo, então, sigilo de informações.

CAPÍTULO VI

6 – SUGESTÕES DE TRABALHO

Fica como sugestão para próximos trabalhos, um enfoque maior nas normas de qualificação para usinagem de peças de Inconel e outras superligas, como também uma nova reformulação para adequação e padronização da usinagem de Inconel dentro das empresas de usinagem no estado do Espírito Santo.

CAPÍTULO VII

7 – REFERÊNCIAS

1. Rodrigues, Marcelo Acácio. Hassuri, Amauri. **Investigação sobre o Fresamento da Liga a Base de Níquel-Inconel 625-Depositada em Forma de Revestimento Metálico.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, 2006.
2. Machado, Alisson Rocha Silva, Marcio Bacci da. **Usinagem dos metais.** 8.ed. Uberlândia, abril 2004.
3. Diniz, Anselmo Eduardo. Marcondes, Francisco Carlos. Coppini, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 5.ed. Artliber, 2005.
4. Ezugwu, E.O. Wang, Z.M. Machado, A.R. **The machinability of nickel-based alloys: a review.** Journal of Materials Processing Technology, 1999.
5. Ferraresi, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais.** Edgard Blücher, 1970.
6. Silva, Leonardo Roberto da. Coelho, Reginaldo Teixeira. Catai, Rodrigo Eduardo. **Desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte no torneamento da liga “waspaloy”.** Revista Escola de Minas, abr. jun. 2004.
7. Disponível em: <http://www.multialloy.com.br/br/produtos/ligasesuperligasdeniquel.html>. Acesso em: 02 mai. 2008.
8. Brasil, Sandvik Coromant do. **Fácil de escolher, fácil de usar.** São Paulo: Elanders, 2006.
9. Coromant, AB Sandvik. **Application Guide Heat Resistant Super Alloys.** Sweden, 2006.

10. Brasil, Sandvik Coromant do. **Manual técnico de usinagem: torneamento – fresamento - furação - mandrilamento - sistema de fixação.** São Paulo: Elanders, outubro 2005.