



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA USINABILIDADE DO TITÂNIO E SUAS LIGAS**

**JOLSYLHA DOS REIS ALVES**

São Luís

2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA USINABILIDADE DO TITÂNIO E SUAS LIGAS**

**Jolsylha dos Reis Alves**

**Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

São Luís

2015

**JOLSYLHA DOS REIS ALVES**

**ESTUDO DA USINABILIDADE DO TITÂNIO E SUAS LIGAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Orientador: Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues**

Aprovada em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2015.

BANCA EXAMINADORA

---

**Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues.**

(Universidade Estadual do Maranhão – UEMA)

---

**Prof.<sup>a</sup> Ma. Danúbia Soares Pires.**

(Instituto Federal do Maranhão – IFMA/Campos Monte Castelo)

---

**Prof. Me. Flávio Nunes Pereira.**

(Universidade Estadual do Maranhão – UEMA)

*Dedico esse trabalho a todas as pessoas que acreditam no meu potencial, em especial ao meu esposo e a minha família, pessoas dignas e honradas que sempre a meu lado, próximos ou distantes, nutriram minhas esperanças de dias melhores.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço acima de tudo a Deus, meu refúgio e fortaleza, que me ilumina e me guia, pelo seu infinito amor e misericórdia, por ter me dado toda força necessária, coragem, perseverança e capacidade para chegar até aqui e nunca desistir, mesmo em meio às grandes dificuldades que tive que enfrentar ao longo desta caminhada. Pois mesmo não sendo merecedora, Ele se mantém fiel. Sou grata por tudo que tem feito e ainda vai fazer em minha vida. E a Ele toda honra, glória, louvor e o meu amor.

Ao meu professor Dr. Jean Robert P. Rodrigues, por ter contribuído para minha formação. Por sua paciência e atenção, sempre se mostrando disposto a me orientar, esclarecendo minhas dúvidas e mostrando meios para enriquecer meu trabalho, desempenhando um excelente papel de professor e orientador.

Ao meu esposo Eng. Mecânico Ramon Aleson Soares Queiroz por me ajudar nessa caminhada e por sempre está pronto a me ajudar na elaboração desse trabalho, dando apoio, ajudando a esclarecer dúvidas e corrigindo meus erros. Obrigado pelo incentivo e orientação, pelas orações em meu favor, por sempre me ajudar em meio as dificuldades, por ser um esposo presente em minha vida que sempre me amou e por sua infinita paciência e compreensão.

À minha querida família, especialmente a minha mãe Maria Barros dos Reis Alves, ao meu pai Raimundo Ferreira Alves e meu irmão Hermano dos Reis Alves, por terem me ensinado a andar pelo caminho correto, que me levará a vida. Por acreditarem em mim e não terem medido esforços para me educar e me ajudar no que fosse preciso. Meu muito obrigado por contribuírem para que possa ter um futuro promissor. Resumo dizendo que vocês são presentes de Deus e são essenciais para minha vida!

A todos meus amigos pelo apoio, incentivo e companheirismo.

A Universidade Estadual do Maranhão e ao seu corpo docente, pois através dos mesmos recebi conhecimento necessário ao longo dessa caminhada acadêmica.

Obrigado a todos que mesmo não mencionados aqui, contribuíram para minha formação e realização desse trabalho.

*“Por isso não tema, pois estou com você; não tenha medo, pois sou o seu Deus. Eu o fortalecerei e o ajudarei; eu o segurarei com a minha mão direita vitoriosa”.*

*Isaías 41.10*

## RESUMO

Este trabalho consiste em estudar a usinabilidade do titânio. Diversos benefícios são associados ao seu uso, tais como elevadas temperaturas de fusão, alta dureza a quente, excelentes propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão, ótima razão resistência/peso e biocompatibilidade. Este trabalho visa fornecer uma visão clara das ferramentas indicadas para a usinagem, os principais métodos e técnicas, os fluidos de corte empregados, os desgastes encontrados nas ferramentas de corte e os critérios de vida da mesma. Além disso, este trabalho aborda desde o histórico do desenvolvimento do titânio, explicando sobre sua abundância e obtenção, características principais, classificações, importância e aplicações até um estudo criterioso sobre os efeitos da usinagem do titânio nos parâmetros do processo (acabamento superficial, forças de corte, temperaturas de corte e etc.), o que é de fundamental importância quando se deseja uma excelente operação de usinagem de pequena, média ou grande escala.

**Palavras-chave:** Usinabilidade, Parâmetros do processo, Titânio, Elementos de liga.

## **ABSTRACT**

This work is to study the machinability of titanium. Several benefits are associated with its use, such as high melting temperatures, high hot hardness, excellent mechanical properties, high corrosion resistance, good reason resistance / weight and biocompatibility. This work aims to provide a clear overview of the tools suitable for machining, the main methods and techniques, cutting fluids used, burnouts found on cutting tools and criteria for the life-cycle of the tools. Furthermore, this work covers everything from the development history of titanium, explaining about it's abundance and obtaining, main characteristics, classifications, applications and importance to a careful study on the effects of this titanium in machining process parameters (surface finish, cutting forces, cutting temperatures and etc.), which is crucial when you want an excellent machining operation of small, medium or large scale.

**Keywords:** Machinability, Process Parameters, Titanium, Alloy Elements.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Efeitos esquemáticos ilustrando elementos de liga sobre a estrutura e algumas propriedades selecionadas	22
Figura 3.2 – Aplicações do Titânio	25
Figura 3.3 – (a) Classificação e composição das ligas de titânio distribuídas em relação pseudobinário diagrama de fase isomorfo. (b) Diagrama de fase isomorfo pseudobinário relacionando a curva martensítica (Mi/MF) com os campos de fase $\alpha+\beta$	29
Figura 3.4 – Síntese da classificação das ligas de titânio e suas características	30
Figura 3.5 – Tipos dos diagramas binários de fase das ligas de titânio	31
Figura 3.6 – Influência da temperatura sobre a dureza a quente de alguns materiais de ferramenta	36
Figura 3.7 – Decomposição da Força de Usinagem	39
Figura 3.8 – Forças de usinagem e suas decomposições no plano de cisalhamento, na superfície de saída e nas direções de corte e avanço	40
Figura 3.9 – Efeito da taxa de alimentação na força de corte na velocidade de corte de $75 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$	41
Figura 3.10 – Zonas de geração de calor em usinagem	43
Figura 3.11 – Temperaturas máximas da interface cavaco-ferramenta em função da velocidade de corte	44
Figura 3.12: Distribuição de carga térmica na usinagem de titânio-base, Ti-6Al-4V e Ck 45 (AISI 1045) de aço	48
Figura 3.13 – Influência da velocidade de corte em que a temperatura de corte na usinagem de titânio e suas ligas	48
Figura 3.14 – Regiões de desgaste em uma ferramenta de corte	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comparação do preço entre materiais	24
Tabela 3.2 – Distribuição do consumo anual de titânio	24
Tabela 3.3 – Os pontos de amolecimento de materiais para ferramentas	36
Tabela 3.4 – Tipos de fluidos de corte utilizados na usinagem	51

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

TiO<sub>2</sub> – Rutilo

TiCl<sub>4</sub> – Tetracloreto de titânio

FeTiO<sub>3</sub> – Ilmenite

Ti c.p. – Titânio comercialmente puro

Ti-6Al-4V – Liga de titânio alumínio vanádio

Nb – Nióbio

Zr – Zircônio

Ta – Tântalo

GPa – Gigapascal

HSS – High Speed Steel – Aço Rápido

PDC – Polycrystalline Diamond – Diamante Policristalino

CBN – Cubic Nitride Boron – Nitreto de Boro Cúbico

Mpa – Megapascal

ASTM - “American Society of Testing and Materials”

Fc – Força de corte

Ff – Força de avanço

Fp - Força passiva

Fu – Força de usinagem

Ft – Força tangencial

FN – Força de compressão

Vc – Velocidade de corte

LAM – Usinagem assistida à laser

USM – Usinagem ultrassônica

EDM – Usinagem por descarga elétrica

APC – Aresta Postiça de Corte

TM – Temperatura média de corte

DOC – Profundidade de corte

Ft/min – pés por minuto

m/min – Metro por minuto

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
2.1	OBJETIVOS GERAIS	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2.3	JUSTIFICATIVA	16
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
3.1	GENERALIDADES	18
3.2	HISTÓRICOS, ABUNDÂNCIA	18
3.2.1	Alto Custo Do Titânio	21
3.3	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	21
3.4	IMPORTÂNCIA E APLICAÇÃO	23
3.5	CLASSIFICAÇÃO E PROPRIEDADES	27
3.5.1	Liga alfa ( $\alpha$ )	27
3.5.2	Liga beta ( $\beta$ )	28
3.5.3	Liga alfa+beta ( $\alpha+\beta$ )	29
3.6	CARACTERÍSTICAS QUE INFLUENCIAM A USINABILIDADE	31
3.7	MATERIAIS DE FERRAMENTAS PARA USINAGEM EM LIGAS DE TITÂNIO	33
3.8	EFEITO DA USINAGEM DO TITÂNIO E SUAS LIGAS NOS PARÂMETROS DO PROCESSO	37
3.8.1	Força De Usinagem	38
3.8.2	Temperatura De Corte	42
3.8.3	Desgastes Das Ferramentas De Corte	49
3.8.4	Fluidos De Corte Aplicado Na Usinagem Do Titânio	51
3.9	ACABAMENTO DA SUPERFÍCIE USINADA	53
<b>4.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>54</b>
<b>5.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>56</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O Titânio é um elemento metálico bem conhecido por sua boa performance em relação a resistência a corrosão, sendo quase tão resistente quanto a platina, também possui grande resistência mecânica, além de baixa condutividade térmica e elétrica, ser leve, forte e de fácil fabricação. Tem baixa densidade em relação ao aço, algo em torno de 40%, porém é mais pesado que o alumínio em 60%, sendo duas vezes mais resistente que ele. E quando puro é bem dúctil e fácil de trabalhar, tem o ponto de fusão alto sendo bem útil como um metal refratário. Portanto tais características fazem com que o titânio seja muito resistente contra os tipos usuais de fadiga (Lins, 2005).

Devido a propriedades excepcionais, densidade de 4,5 g/cm<sup>3</sup>; elevada tenacidade; elevado ponto de fusão (1670°C); grande resistência à corrosão (equivalente à da platina); elevada resistência mecânica (comparável à do aço); estabilidade térmica; grande capacidade de dispersão e elevada brancura, o titânio é utilizado em uma diversidade de aplicações industriais, desde a fabricação de turbinas para aviões supersônicos até próteses dentárias, sendo especialmente indicado para usos em materiais que se mostrem resistentes a situações adversas, como tubulações em água do mar e em diversos artefatos da indústria aeroespacial. Por essas e outras razões, o titânio é considerado um metal de importância estratégica (Pereira, 2008).

O fato de que o titânio é algumas vezes considerado um material de difícil usinagem por métodos tradicionais pode ser explicado parcialmente por suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, como por exemplo: o titânio é considerado um mau condutor de calor, possui forte reatividade química, baixo módulo de elasticidade. As propriedades de fadiga do titânio são fortemente influenciadas por uma tendência ao dano nas superfícies, características de encruamento do titânio são tais que as ligas de titânio não apresentam acúmulo de material nas bordas (Infomet, 2015).

A tecnologia de usinagem do titânio e suas ligas basicamente é muito semelhante à de outros tipos de ligas metálicas. Para que a usinagem seja eficiente é necessário conhecer os parâmetros relativos à ferramenta de corte usada numa

determinada operação de usinagem na qual influenciam sobre o acabamento da peça. Entre estes parâmetros importantes estão: Vida útil da ferramenta; Forças atuantes; Requisitos de potência; Ferramentas e fluidos de corte (Infomet, 2015).

Já as superfícies de ligas de titânio podem ser facilmente danificadas em operações normais de usinagem. Em geral esses danos surgem sob a forma de microtrincas, acúmulos de material em arestas, deformação plástica, zonas termicamente afetadas e tensões residuais. Em condições de serviço esses danos podem causar deterioração da resistência à fadiga e à corrosão sob tensão (Infomet, 2015).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVOS GERAIS**

A finalidade deste trabalho é mostrar de uma forma clara e objetiva o estudo sobre a usinabilidade do titânio e suas ligas com dados nas suas características, importância e aplicações.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Verificar e classificar o titânio assim como suas ligas nos processos de usinagem, como também analisar os seus efeitos nos parâmetros dos processos de usinabilidade como: força de corte, temperatura de corte, desgaste da ferramenta de corte e acabamento superficial das peças.

### **2.3 JUSTIFICATIVA**

Devido ao crescente avanço da tecnologia de materiais, a pesquisa em novas técnicas de processamento de ligas de alto desempenho torna-se cada vez mais constante. Dentre tais ligas estão as de titânio. Diversos benefícios são associados ao seu uso, tais como elevadas temperaturas de fusão, alta dureza a quente, excelentes propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão, ótima razão resistência/peso e biocompatibilidade. Além disso, as ligas de titânio apresentam em geral resistência mecânica comparável à dos aços, com cerca de 50% de sua densidade e resistência mecânica 400% superior às ligas de alumínio, com densidade apenas 50% superior (Antoniali, 2009).

A partir da década de 1950, estas vantajosas propriedades conduziram a uma ampla e crescente aplicação das ligas de titânio pela indústria aeroespacial, mesmo que sua obtenção tenha um custo relativamente alto. O preço elevado das

ligas de titânio é consequência da complexidade de extração do material, das dificuldades de fundição e da sua baixíssima usinabilidade além, é claro, da atual demanda de mercado. Entretanto, a produção destas ligas continua a crescer ano a ano, sendo que a maior parte dos componentes fabricados a partir delas é usinada, devido principalmente às inúmeras exigências de projeto da indústria aeroespacial que, geralmente, não são atendidas por processos de conformação plástica (Ribeiro, 2003).

A utilização das ligas de titânio se dá em diversos componentes fabricados pela indústria aeroespacial, sendo sua principal aplicação nas turbinas a gás (Antoniali, 2009). Nesta situação, a temperatura de operação é superior a 500°C, o que impede a utilização de outros materiais além das superligas de titânio ou níquel (Ezugwu et al., 2003).

Embora as ligas de titânio sejam extensivamente utilizadas pela indústria aeroespacial, vale salientar que graças à sua excelente biocompatibilidade, boa parte das suas aplicações está associada à indústria biomédica. A crescente utilização das ligas de titânio como biomateriais pode ser atribuída à sua excelente resistência à corrosão, ao seu baixo módulo de elasticidade, à sua atoxidade e, principalmente, à ausência de reação alérgica quando em contato com tecidos vivos (Antoniali, 2009).

Em grande medida, a usinagem de titânio e ligas de titânio que obedece a critérios também são aplicadas aos materiais metálicos comuns. Em comparação com os aços de alta resistência. No entanto, algumas restrições têm de ser reconhecido, que são devidas as únicas propriedades físicas e químicas de titânio, que o seu método para trabalhar tem de ser estrategicamente planejado, tanto no que se refere a seu custo quanto sua usinagem.

Processamento bem-sucedido de titânio e suas ligas exige máquinas de alta qualidade e ferramentas de corte com vibração mínima, configurações rígidas, e fiel observância de práticas recomendadas de usinagem, observando os parâmetros como vida útil da ferramenta, forças de corte, aplicações dos fluidos e desgastes da ferramenta de corte. Tais parâmetros que influenciam no acabamento final da peça trabalhada de acordo com Froes (2015).

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 GENERALIDADES

De acordo com Diniz e Coppini (2013), a usinabilidade geralmente é avaliada de acordo com alguns critérios: vida da ferramenta, força de usinagem, qualidade superficial da peça e forma dos cavacos. Outro importante fator de influência são os elementos de liga do material, tratamento térmico realizado e processo de fabricação do material (forjado, fundido, etc.). Para avaliar a usinabilidade também existem outros critérios importantes, tais como o estado metalúrgico da peça, dureza, composição química, condutividade térmica, propriedades mecânicas e de eventual encruamento.

#### 3.2 HISTÓRICO, ABUNDÂNCIA

Em 1791, o reverendo britânico William Gregor, mineralogista e químico descobriu o titânio. Ele examinou a areia magnética do rio local, Helford, em Vale Menachan em Cornwall, Inglaterra, e isolando "areia preta", agora conhecido como "ilmenite". Ao remover o ferro com um ímã e tratar a areia com ácido clorídrico produziu um óxido impuro de um novo elemento. Nomeou "Mechanite", após a localização. Quatro anos mais tarde, o químico Berlim Martin Heinrich Klaproth isolando independentemente óxido de titânio a partir de um mineral húngaro, agora conhecido como "rutilo". A mitologia grega forneceu-lhe um novo nome dos filhos de Uranos e Gaia, os titãs. Os titãs foram totalmente odiados por seu pai e assim detidos em cativeiro por ele na crosta terrestre, semelhante ao duro para extrair minério, portanto, ele nomeou-o Titânio. (Leyens & Peters, 2003)

Demorou mais de 100 anos antes de Matthew Albert Hunter de Rensselaer Polytechnic Institute em Troy, Nova Iorque, foi capaz de isolar o metal em 1910 por aquecimento tetracloreto de titânio ( $TiCl_4$ ) com sódio a temperatura de 700-800°C em ambiente com gás argônio em uma bomba de aço. Finalmente, Wilhelm Justin Kroll de Luxemburgo é reconhecido como pai da indústria de titânio. Dentro 1932, ele

produziu quantidades significativas de titânio através da combinação de  $TiCl_4$  com cálcio. No início da II Guerra Mundial, ele fugiu para os Estados Unidos. Nos EUA Bureau of Mines, ele demonstrou que o titânio poderia ser extraído comercialmente reduzindo  $TiCl_4$ , alterando o agente de redução de cálcio de magnésio (Leyens & Peters, 2003).

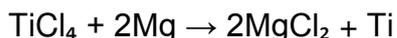
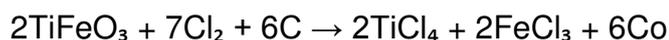
Hoje, este ainda é o método mais utilizado é conhecido como o "processo de Kroll". Após a Segunda Guerra Mundial, ligas à base de titânio foram logo consideradas materiais-chave para motores de aeronaves. Em 1948, a DuPont Company foi o primeiro a produzir titânio comercialmente. Hoje a área aeroespacial ainda é o consumidor principal de titânio e suas ligas, mas outros mercados, como arquitetura, processamento químico, medicina, geração de energia, marinha e *offshore*, esporte e lazer, e transporte estão ganhando maior aceitação (Leyens & Peters, 2003).

O Titânio não é realmente uma substância rara como é classificada, como o nono mais abundante elemento é o quarto de metal estrutural mais abundante na crosta da Terra excedido apenas por alumínio, ferro e magnésio. Infelizmente, raramente é encontrado em altas concentrações e nunca encontrado em estado puro. Assim, a dificuldade no processamento do metal torna caro. Ainda hoje é produzida apenas em um processo em lotes, e não existe processo contínuo como para outros metais estruturais. Titânio geralmente ocorre em areias minerais que contêm ilmenite ( $FeTiO_3$ ), encontrado nas montanhas Ilmen da Rússia, ou rutilo ( $TiO_2$ ), a partir das areias da praia na Austrália, Índia e México. O dióxido de titânio é um pigmento branco usado em pintura, papel e plástico, e consome a maior parte da produção mundial. Além da Rússia, Austrália, Índia e México, depósitos minerais viáveis incluem locais nos Estados Unidos, Canadá, África do Sul, Serra Leoa, Ucrânia, Noruega e Malásia (Leyens & Peters, 2003).

Segundo Everhart (1954), o titânio é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre. Contudo, esta abundância não significa que sua exploração seja economicamente viável. Os minerais devem estar concentrados em grandes depósitos para assim proporcionar uma extração rentável. Além disso, a complexidade do processo de produção deste metal ainda é relativamente elevada (Betner, 1985; Collings, 1984).

Atualmente, os processos de produção mais utilizados são:

a) no processo Kroll (pirometalúrgico), o  $(\text{TiCl}_4)$  é obtido pela ação do cloro e carbono sobre a ilmenita e depois reduzido pelo uso de magnésio metálico. Este método foi desenvolvido a partir de 1946 pelo metalurgista William J. Kroll e ainda hoje é um dos processos mais utilizados.



b) no processo Hunter emprega-se o sódio metálico como redutor. Porém, mais oneroso que o processo Kroll.

c) no processo Dow-Howmet ocorre uma redução eletrolítica, a qual gera um produto conhecido por titânio esponja ou metal esponja que sofre várias operações de fusão para ser convertido em titânio metálico (Betner, 1985; Collings, 1984).

Mundialmente, existem várias pesquisas sendo desenvolvidas para gerar um novo modo de explorar e produzir o titânio na tentativa de baratear substancialmente um dos mais nobres metais da indústria. As mais importantes e recentes são:

- Na Rússia, engenheiros do Instituto de Metalurgia de Baikov – desenvolveram uma forma de extrair o titânio do rutilo separando-o do quartzo presente na areia (Scientific Annoucement, 2007);
- Na Austrália, empresa CSIRO e Light Metals Flagship – desenvolvem esforços para a redução de custos de produção do metal extraído da areia (Science, 2007);
- Nos Estados Unidos, as empresas Altair Nanotechnologies e Titanium Metals Corporation, uma das maiores fornecedoras mundiais de titânio, uniram-se para utilizar um novo processo criado pelos professores George Zheng Chen, Derek Fray e Tom W. Farthing da Universidade de Cambridge. O processo, chamado "Fray-Farthing-Chen (FFC) Cambridge Process" é utilizado para extrair metais e ligas de seus óxidos sólidos por meio da eletrólise em sais fundidos. Ao contrário do método pirometalúrgico, o FFC que é um método eletrolítico permite uma extração muito mais econômica. Esta nova técnica pode ser resumida pela reação (Chen; Fray & Farthing, 2001):

$\text{TiO}_2$  (sólido, catodo)  $\rightarrow$  eletrólise de solução salina  $\rightarrow$  Ti (catodo) +  $\text{O}_2$  (anodo)

Segundo Gerdemann (2001), a indústria acreditava que após a Segunda Guerra Mundial o titânio se tornaria popular como o alumínio. Entretanto, este fato nunca ocorreu, pois, a sua extração continua muito onerosa. A energia necessária para a produção de uma tonelada deste metal chega a ser em torno de 16 vezes maior do que é preciso para se obter a mesma quantidade de aço. Nenhum, dos novos processos pesquisados resultou na redução dos custos, o que impediu o crescimento do titânio no mercado.

### 3.2.1 Alto Custo Do Titânio

Como muito se sabe, o principal fator limitante uso mais extensivo de titânio é o seu custo. Com um custo significativamente mais elevado do que as ligas de alumínio e aço, titânio utilização deve ser justificada para cada aplicação. Há vários fatores que contribuem para isso. É necessária alta energia para a separação do metal do minério. Lingote de fusão também é energia intensiva; além disso a sua reatividade elevada requer derretendo em uma atmosfera inerte utilizando uma retorta de cobre arrefecido a água ou forno, dependendo da técnica de fusão. Usinagem também é custo muito elevado, da ordem de 10-100 vezes mais lenta que a usinagem de ligas de alumínio (Froes, 2010).

## 3.3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

Titânio comercialmente puro e de ligas alfa e quase alfa de titânio demonstram geralmente a melhor resistência à corrosão geral. Eles são os mais soldáveis do titânio/ligas de titânio de acordo com Donachie (2000).

O titânio puro tem normalmente uma certa quantidade de oxigênio ligado com ele. A força de titânio CP é afetada pela intersticial (oxigênio e nitrogênio) conteúdo do elemento (Donachie, 2000).

Ligas alfa geralmente têm altas quantidades de alumínio que contribuem para a resistência à oxidação a temperaturas elevadas. (Ligas alfa-beta também contém, como o elemento principal, de alta quantidade de alumínio, mas a razão primária é estabilizar a fase alfa). Veja na Figura 3.1:

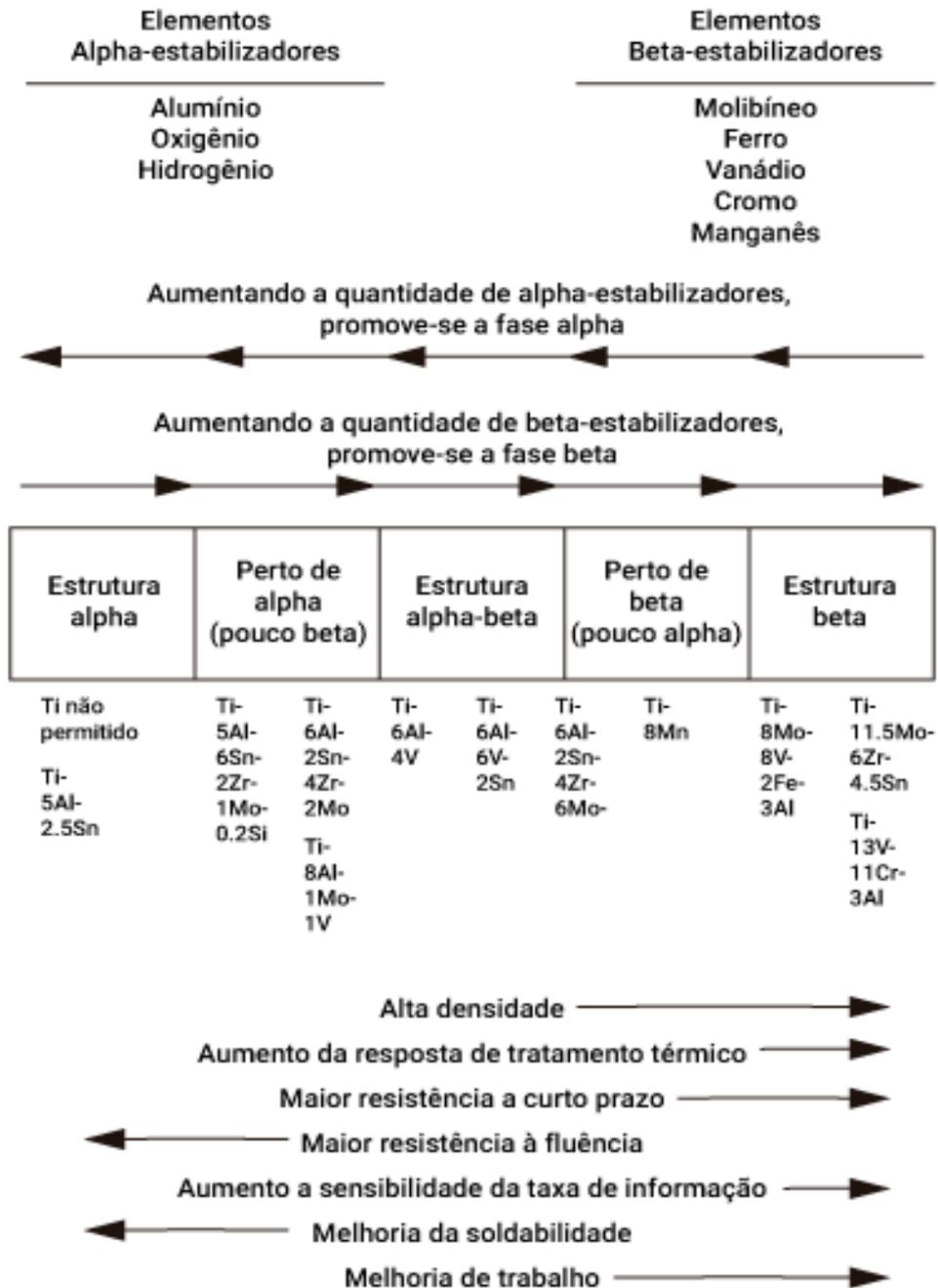


Figura 3.1 – Efeitos esquemáticos ilustrando elementos de liga sobre a estrutura e algumas propriedades selecionadas. (Donachie, 2000)

Ligas alpha não podem ser tratadas termicamente para desenvolver propriedades mecânicas mais elevadas porque elas são ligas monofásicas. A adição de certos elementos de liga ao titânio puro permite que as ligas resultantes sejam tratadas pelo calor ou processadas no intervalo de temperatura em que a liga é de duas fases (alfa e beta). A condição de duas fases permite que a estrutura seja refinada e, por permitir alguma beta para ser retida temporariamente à temperatura mais baixa, permitindo um controle ótimo da microestrutura durante a transformação subsequente quando as ligas são "envelhecidas" após o resfriamento do forjamento ou temperatura de tratamento térmico da solução (Donachie, 2000).

As ligas alfa-beta, quando tratada adequadamente, têm uma excelente combinação de resistência e ductilidade. Eles são mais fortes do que o alfa ou as ligas betas (Donachie, 2000).

As ligas beta são metaestáveis; isto é, elas tendem a transformar a um equilíbrio, ou equilíbrio de estruturas. As ligas beta geram força a partir da resistência intrínseca da estrutura beta e a precipitação de alfa e de outras fases a partir da liga por meio de tratamento térmico após o processamento (Donachie, 2000).

A vantagem mais significativa fornecida por uma estrutura beta é o aumento de formabilidade tais ligas relativas ao cristal hexagonal dos tipos de estrutura (alfa e alfa-beta) (Donachie, 2000).

Aluminetos de titânio diferem dos convencionais em ligas de titânio que são principalmente compostos químicos para melhorar a liga força, formabilidade, e assim por diante. Os Aluminetos têm temperaturas operacionais mais altas do que titânio convencional, mas a custos mais elevados, e geralmente têm menor ductilidade e maleabilidade (Donachie, 2000).

### 3.4 IMPORTÂNCIA E APLICAÇÃO

A seleção do material apropriado para uma determinada aplicação envolve uma avaliação complexa que correlacione os aspectos econômicos, tecnológicos, as propriedades e o desempenho desejado. Portanto, o custo inicial do material pode ser

compensado pelas vantagens pertinentes ao mesmo, dependendo da sua finalidade. Uma lista com os preços do mercado de metais está descrita na Tabela 3.1 para situar a diferença entre os valores do titânio com o aço e o alumínio. (Froes, 2006).

Tabela 3.1 – Comparação do preço entre materiais (Froes, 2006).

	Material (US\$/kg)		
	Aço	Alumínio	Titânio
minério	0,04	0,22	0,48 (rutilo)
metal	0,22	0,22	12,00
lingote	0,33	2,53	20,00
chapa	0,66 - 1,3	2,2 - 11,00	33,00 - 110,00

As propriedades mecânicas e físico-químicas do titânio e suas ligas são considerações importantes que permitem justificar a substituição de outros materiais menos onerosos por este metal. Em razão de suas propriedades, o uso deste metal pode ser dividido em três categorias, Froes (2004): a) excelente relação resistência mecânica/peso; b) alta resistência à corrosão; c) biocompatibilidade. O emprego do titânio e suas ligas estão disseminados entre as mais diferentes aplicações de vários setores do mercado mundial. Na Tabela 3.2 observam-se os valores consumidos de titânio, nas diversas formas disponíveis, em relação à área de utilização.

Tabela 3.2 – Distribuição do consumo anual de titânio pelo mercado de aplicação (Association Titane, 2006)

Mercado de Aplicação	Consumo (t)
Indústria Química e ligada à geração de Energia	20000 - 25000
Aeroespacial Civil	14000 - 19000
Aeroespacial Militar	3000 - 4000
Esporte e Lazer	3000
Construção civil e Arquitetura	500
Médica e Odontológica	800
Outras	1000
<b>TOTAL</b>	<b>42300 - 53300</b>

Na relação resistência mecânica/peso as ligas de titânio podem ser empregadas em componentes das turbinas, partes estruturais das aeronaves e dos veículos blindados de combate (tanques de guerra), em que a faixa de temperatura permanece acima de 150°C e abaixo de 500°C (Almeida, 2007).

A característica de resistência à corrosão favorece o uso das ligas para fabricação de componentes navais, dutos e trocadores de calor para indústria química, *risers* (equipamento que permite a circulação dos fluidos nos serviços de sondagem) nas plataformas de exploração petrolífera, entre outros (Salama, 2000).

Além da resistência à corrosão, a biocompatibilidade é outra propriedade do titânio e suas ligas que possibilita a aplicação deste material na manufatura de implantes cirúrgicos, especialmente ortopédicos e ortodônticos (Almeida, 2007).

Com finalidade didática procurou-se representar na Figura 3.2 um panorama das aplicações do titânio nas diferentes áreas do mercado global.



Figura 3.2 – Aplicações do Titânio (Almeida, 2007).

O interesse e a evolução da utilização de implantes para recuperação de indivíduos lesionados intensificaram-se durante o período das grandes guerras mundiais. Tal fato impulsionou as pesquisas de materiais biocompatíveis (Luckey, 1981) que implicaram na realização de testes em animais a partir de 1940 pelos pesquisadores Williams (Williams, 1977) e Leventhall (Leventhall, 1951). Somente no ano de 1965 culminou o primeiro implante dentário em um ser humano, desenvolvido por Bränemark (Bränemark, 2001).

Atualmente, a liga Ti-6Al-4V e o Ti. c.p. são os materiais mais usados na produção de próteses e dispositivos médicos e odontológicos, por apresentam uma boa combinação de propriedades (baixo módulo elástico, resistência à corrosão e biocompatibilidade) (Davidson, 1994).

Como mencionado anteriormente, recentes pesquisas sugerem a substituição do vanádio e do alumínio, presentes na liga Ti-6Al-4V, por outros elementos como nióbio (Nb), zircônio (Zr) e tântalo (Ta), estabilizadores da fase  $\beta$ . Estas ligas, quando submetidas a esforços cíclicos de impacto e atrito, como também à ação do meio fisiológico do corpo, podem sofrer uma modificação do potencial elétrico dos elementos que as compõe. Essa alteração, do alumínio e do vanádio, propicia a formação de óxidos nocivos que podem causar reações adversas ao homem, o que seria evitado com a presença do Nb, Ta e Zr (Geetha, 2004).

Outro fator que justifica a utilização do nióbio é a redução do módulo de elasticidade. A liga Ti-6Al-4V apresenta um módulo de elasticidade aproximadamente de 120GPa, nas ligas  $\beta$  Ti-15Mo-5Al-3Zr e Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr esses valores caem para 60 e 80GPa, respectivamente, que são mais próximos ao dos ossos, os quais variam entre 17 a 30GPa. Essas propriedades proporcionariam melhor compatibilidade química e mecânica e dessa forma estenderiam o período de permanência do implante, sem que houvesse necessidade da revisão cirúrgica do mesmo. Entretanto, o custo da produção destas ligas é ainda superior aos implantes de Ti-6Al-4V e exerce grande peso na seleção do material, especialmente quando comparados ao valor comercial dos implantes mais empregados que custam cerca de U\$ 2,5 mil para as ligas Ti-6Al-4V e U\$ 700 para as próteses confeccionadas em aço inoxidável austenítico AISI-SAE 316 L (Com Ciência, 2007; Jaimes, 2007).

### 3.5 CLASSIFICAÇÃO E PROPRIEDADES.

Conforme citado anteriormente, existem duas abordagens diferentes para classificação deste material. A primeira é relativa às fases presentes na microestrutura e a segunda considera a curva de transformação martensítica (Mi/Ms). Ambas considerações foram sintetizadas e estão descritas a seguir em função da fase predominante na microestrutura e suas propriedades.

#### 3.5.1 Liga alfa ( $\alpha$ )

A microestrutura e as propriedades das ligas monofásicas alfa ( $\alpha$ ) e do Ti c.p. não podem ser alteradas pelo tratamento térmico. Essas modificações, como aumento de dureza e resistência mecânica, somente são atingidas pelo processo de deformação plástica e ou mecânica (mecanismo de encruamento e recozimento). Outro mecanismo que pode ser aplicado nestas ligas é o endurecimento por solução sólida. Neste caso, elementos de liga (soluto) são adicionados no solvente (titânio), visando à formação de soluções sólidas substitucionais ou intersticiais. O efeito dessa interação gera uma restrição no movimento das discordâncias e consequentemente a liga é endurecida (Reed Hill, 1992; Dieter, 1986).

O alumínio é o elemento estabilizador mais importante e a sua inclusão favorece o aumento da temperatura de transformação alfa-beta. Contudo, seu teor deve ser mantido abaixo de 7% para evitar a fragilização em baixa temperatura, devido à formação da fase  $Ti_3Al$  (aluminetos de titânio). Devido ao resfriamento rápido, a transformação martensítica é uma característica dessas ligas (Reed Hill, 1992; Dieter, 1986).

As propriedades da liga alfa são: resistência à deformação (superior das ligas beta), razoável ductibilidade, boa tenacidade, média resistência mecânica, alta resistência à corrosão e excelentes propriedades mecânicas em temperaturas criogênicas (Reed Hill, 1992; Dieter, 1986).

### 3.5.2 Liga beta ( $\beta$ )

A liga ( $\beta$ ) pode ser obtida com a adição de elementos estabilizadores desta fase. As propriedades desta liga são inerentes à fase beta retida após resfriamento ao ar, o que as caracterizam por apresentar boa combinação de resistência mecânica, alta forjabilidade, média conformabilidade e baixo módulo de elasticidade. Entretanto, em virtude dos altos teores de elemento de liga utilizados para sua produção, fator este que eleva muito o custo, sua aplicação é bastante limitada (Froes, 1985; Bania, 1994).

Apesar do alto custo, estudos mais recentes sobre biocompatibilidade indicam o uso das ligas Ti-13Nb-13Zr (TNZ) e Ti-35Nb-7Zr-5Ta (TNZT) em substituição das ligas Ti-6Al-4V (alfa+beta), especialmente para aplicações biológicas (Schneider, 2001; Niinomi, 1998).

A porcentagem dos estabilizadores da fase beta (betagênicos) configuram a classificação de metaestável ou estável para as ligas de titânio deste tipo, conforme pode ser observado na Figura 3.3. Enquanto metaestável são inadequadas ao trabalho em temperaturas baixas, pois podem precipitar, transformando-se parcialmente em fases binárias (alfa+beta) e tornarem-se propensas à fratura de acordo com Donachie Jr. (1988). O tratamento de solubilização e envelhecimento (estabilização), nestas ligas, permite atingir melhores valores de resistência mecânica com adequada ductilidade.

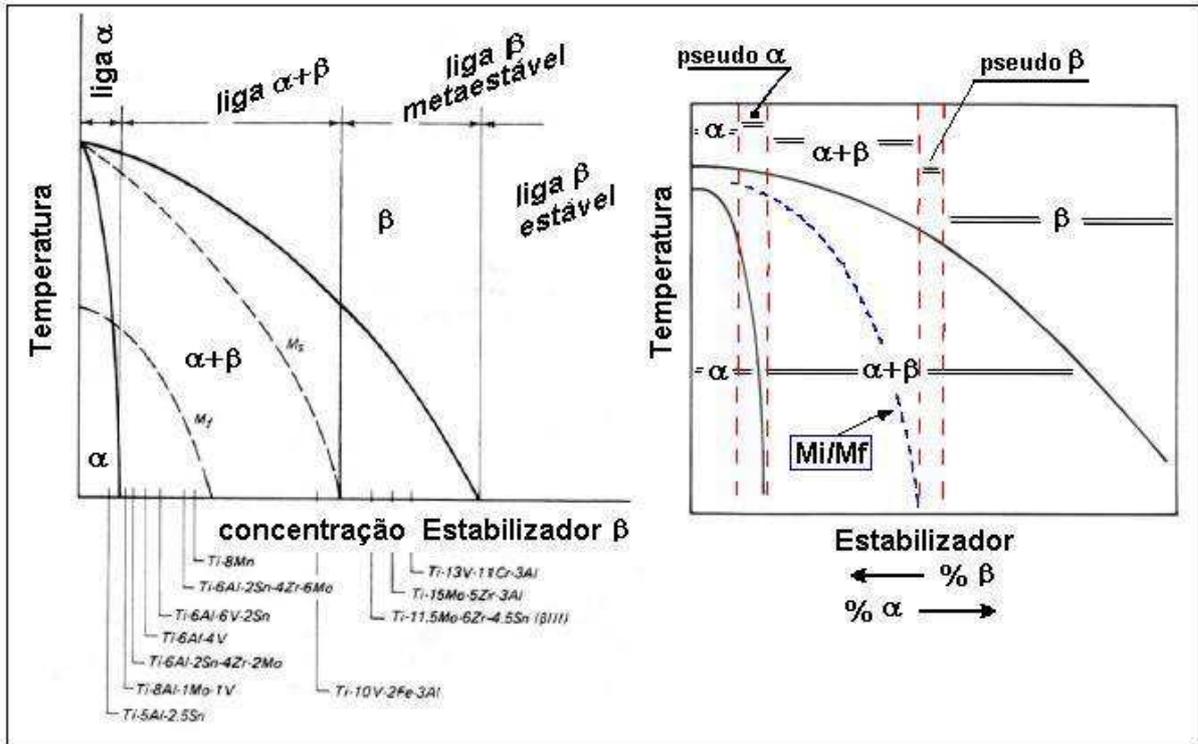


Figura 3.3 – (a) Classificação e composição das ligas de titânio distribuídas em relação pseudobinário diagrama de fase isomorfo. (b) Diagrama de fase isomorfo pseudobinário relacionando a curva martensítica (Mi/Mf) com os campos de fase  $\alpha + \beta$  (Almeida, 2007).

### 3.5.3 Liga alfa+beta ( $\alpha+\beta$ )

Uma parcela de aproximadamente 70% da produção mundial das ligas de titânio está dirigida a confecção das ligas ( $\alpha+\beta$ ), graças as suas propriedades. Entre estas ligas, a mais importante é a liga Ti-6Al-4V que abarca um vasto campo de aplicações, especialmente nos setores aeroespaciais e médicos (Donachie Jr., 1988; Flower, 1990).

Estes tipos de liga são caracterizados pela presença de ambos estabilizadores ( $\alpha$  e  $\beta$ ) que propiciam uma grande variação de microestruturas bifásicas. O resfriamento rápido pode induzir a formação de estruturas martensíticas ( $\alpha'$  e  $\alpha''$ ), ou a retenção da fase  $\beta$  na forma metaestável, o que altera as propriedades da liga (Donachie Jr., 1988; Flower, 1990).

A aplicação do correto tratamento (solubilização, envelhecimento e outros) e diferentes faixas de temperatura permitem obter diversos níveis de resistência mecânica. Suas principais propriedades são: excelente relação resistência/peso,

razoável soldabilidade, boa conformabilidade e resistência à corrosão (Donachie Jr., 1988; Flower, 1990).

O quadro representado na Figura 3.4 resume as principais características delineadas no texto referente à classificação das ligas de titânio e na Figura 3.5 verifica-se um diagrama geral com a classificação dos diagramas binários de fase, os tipos e as diferentes porcentagens de estabilizadores das ligas de titânio.

- Elemento X é estabilizador da fase Ti- $\beta$  (transformação isomorfa: Ti- $\beta$ ->Ti- $\alpha$ );
- Elemento X é estabilizador da fase Ti- $\beta$  (transformação eutetóide: Ti- $\beta$ ->Ti- $\alpha$ +Ti- $\gamma$ );
- Elemento X é estabilizador da fase Ti- $\alpha$  (transformação isomórfica: Ti- $\beta$ ->Ti- $\alpha$ );
- Elemento X é estabilizador da fase Ti- $\alpha$  (transformação peritetóide: Ti- $\beta$ +Ti- $\gamma$ ->Ti- $\alpha$ )

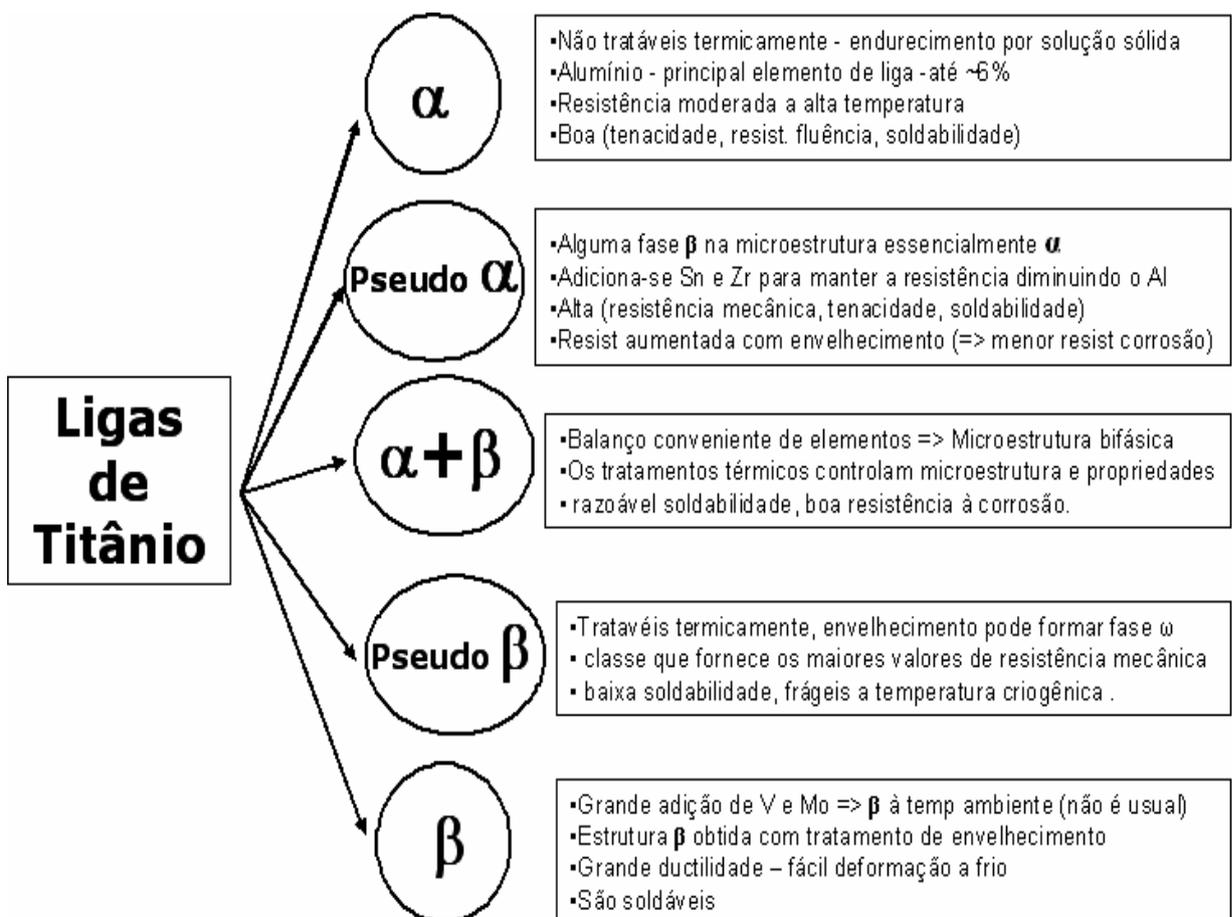


Figura 3.4 – Síntese da classificação das ligas de titânio e suas características. (Almeida, 2007)

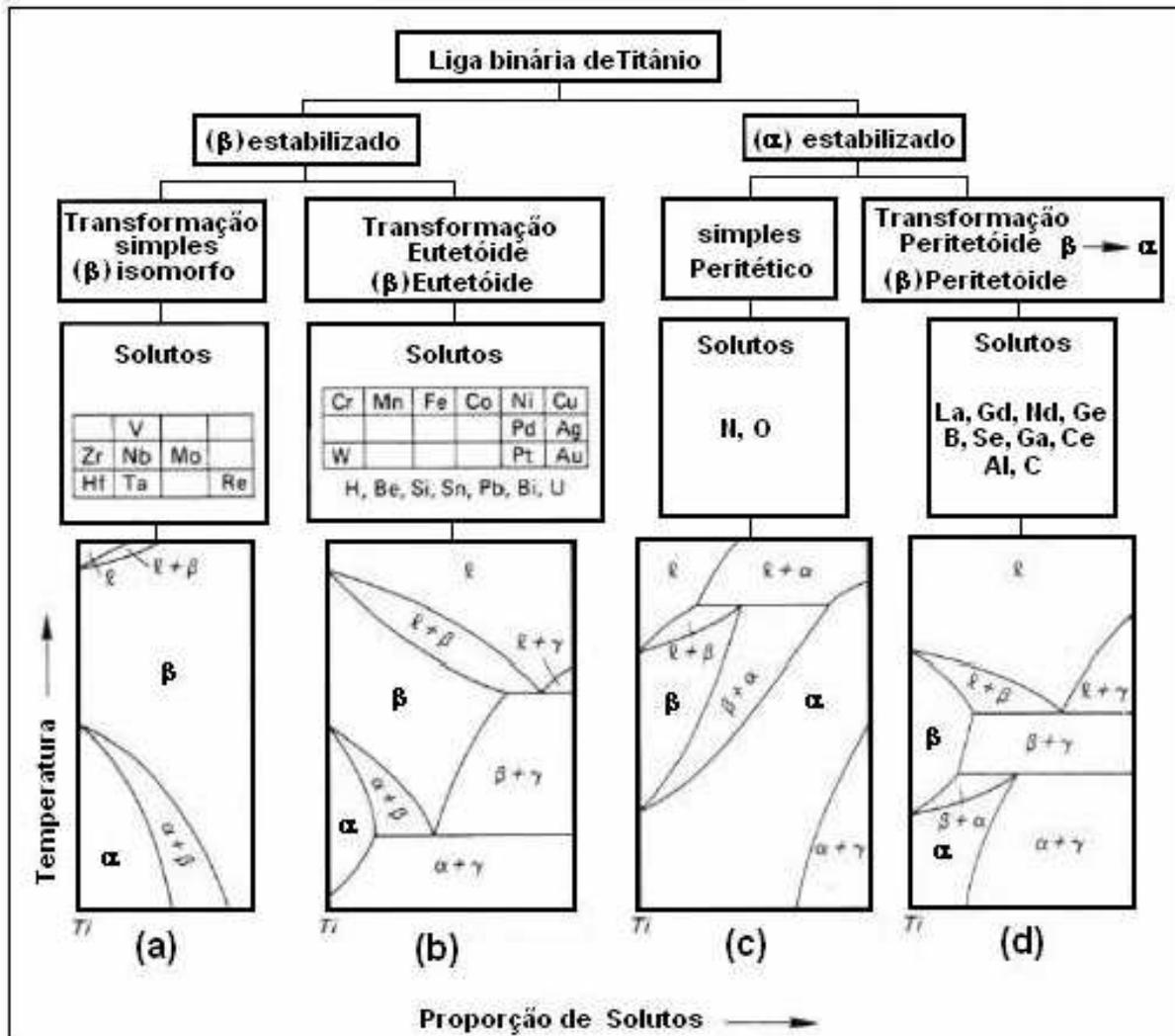


Figura 3.5 –Tipos dos diagramas binários de fase das ligas de titânio (Molcanovah,1965).

### 3.6 CARACTERÍSTICAS QUE INFLUENCIAM A USINABILIDADE

O fato de que o titânio, por vezes, é classificado como de difícil usinagem por meio de métodos tradicionais, em parte, podem ser explicados pelas propriedades mecânicas do metal de características físicas e químicas. Por exemplo (Jobshop, 2015):

- O titânio é um mau condutor de calor. O calor, gerado pela ação de corte, não se dissipa rapidamente. Portanto, a maior parte do calor é concentrada na ponta e a face de ferramenta.
- Titânio tem uma forte tendência de liga ou reatividade química com os materiais de ferramentas de corte às temperaturas de funcionamento da ferramenta.

Isto faz escoriação, soldadura, e manchando juntamente com a destruição rápida da ferramenta de corte.

- Titânio tem um nível relativamente baixo módulo de elasticidade, tendo assim uma maior "elasticidade" do que o aço. O trabalho tem uma tendência a afastar-se da ferramenta de corte, a menos cortes pesados são mantidos ou cópia de segurança adequada é empregue. Partes delgadas tendem a desviar sob pressões de ferramentas, causando vibração, ferramenta de fricção, e problemas de tolerância. A rigidez de todo o sistema é, portanto, muito importante, como é o uso de ferramentas de corte afiados, em forma adequada.

- Propriedades de fadiga do titânio são fortemente influenciados por uma tendência para a superfície dano, se forem utilizadas determinadas técnicas de usinagem. Deve ser tomado cuidado para evitar a perda da integridade da superfície, especialmente durante a moagem. (Esta característica é descrita em maior detalhe abaixo).

- Características de encruamento do titânio são as ligas de titânio que demonstram uma total ausência de "aresta postiça." Por causa da falta de uma massa fixa de metais (aresta postiça) à frente da ferramenta de corte, um ângulo elevado de corte é formado. Isto faz com que um cavaco ao entrar em contato com uma área relativamente pequena sobre a ferramenta de corte resulta em cargas de rolamento elevadas por unidade de área. A força de rolamento elevada, combinada com o atrito desenvolvido pelo cavaco quando ele desce sobre a superfície de rolamento, resulta num grande aumento no calor sobre a ferramenta de corte. Além disso, a combinação de forças de rolamento elevada produz crateramento perto da aresta de corte, resultando em colapso da ferramenta de forma rápida.

Com respeito às propriedades de fadiga do titânio, observou brevemente na lista acima, os seguintes detalhes são de interesse. Tal como indicado, a perda da integridade da superfície deve ser evitada. Se esta precaução não é observada, uma perda dramática de comportamento mecânico (tal como fadiga) pode resultar. Mesmo práticas de moagem adequados utilizando parâmetros convencionais (velocidade das rodas, baixa alimentação, etc.) pode resultar em resistência à fadiga apreciavelmente mais baixos devido a danos na superfície. As propriedades básicas de fadiga de muitas ligas de titânio contam com uma tensão de superfície de compressão favorável induzida pela ação da ferramenta durante a usinagem. Eletromecânico remoção de

material, produzindo uma superfície livre de tensão, podem causar um débito a partir das propriedades de resistência à fadiga de criação habituais. (Estes resultados são semelhantes quando os processos mecânicos, tais como moagem estão envolvidos, embora as razões são diferentes.) (Jobshop, 2015).

### 3.7 MATERIAIS DE FERRAMENTAS PARA USINAGEM EM LIGAS DE TITÂNIO

O sistema compreende de usinagem, da ferramenta de corte, a peça de trabalho e de máquinas-ferramenta. A ferramenta de corte é a mais crítica em termos de produtividade de usinagem, portanto, seleção do material da ferramenta de corte à direita para uma aplicação específica é de crucial importância. Outros fatores que contribuem para o desenvolvimento contínuo de materiais para ferramentas de corte é o desenvolvimento de novos materiais (geralmente com a diminuição da usinabilidade) e o aumento do uso de automatizadas e controladas numericamente máquinas-ferramentas relacionadas com os sistemas que requerem um maior grau de confiabilidade e previsibilidade de ferramentas de corte empregada. Em relação ao custo da ferramenta, o material da ferramenta mais barata não é sempre considerado o mais econômico, nem é a ferramenta mais cara o melhor para uma operação de usinagem específica. O melhor material da ferramenta é aquele que vai maximizar a eficiência e assegurar a precisão com o menor custo, em outras palavras, o que irá satisfazer as exigências de um material da peça específica (Okeke, 1999).

Sabe-se que os materiais para ferramentas de corte encontram severos choques térmicos e mecânicos quando usinam em ligas de titânio. A combinação de alta temperatura, altas tensões, forte reatividade química de titânio, o processo de formação de cisalhamento catastrófico (irregulares) e cavacos gerado perto da influência de ponta a taxa/desgaste e, conseqüentemente, a vida da ferramenta. O desgaste de flanco, o desgaste do nariz, desgaste cratera, chanfrar, desbastar e falha catastrófica são os modos de falha típicos observados na usinagem de ligas de titânio. Ferramenta de aço de alta velocidade (HSS), com e sem revestimento cimentado carbonetos, ferramentas de cerâmica e materiais ultraduros, como diamante policristalino e ferramentas de nitreto de boro cúbico são os materiais para

ferramentas de corte disponíveis comercialmente para usinagem de materiais de difícil usinagem (Da Silva, 2006).

Ferramentas de aço de alta velocidade (HSS) foram amplamente utilizados em estudos anteriores sobre os processos de usinagem de titânio com velocidades de corte baixas por causa de suas limitações e menor custo em relação aos carbonetos. Embora eles ainda estão a ser utilizados para usinagem de ligas de titânio em condições de baixa velocidades de corte, a sua aplicação tornaram-se reduzido desde ferramentas de metal duro provaram sua superioridade em todos os processos de usinagem de ligas de titânio em relação aos materiais de ferramentas concorrentes. Grau em linha reta sem revestimento de metal duro (WC-Co) ferramentas são os mais adequados para a usinagem de ligas de titânio devido ao seu melhor desempenho em termos de desgaste da ferramenta e menor custo em relação a outros materiais para ferramentas disponíveis no mercado. Desempenho inferior de ferramentas de metal duro revestido (em termos de vida útil da ferramenta) tem sido relatada em muitos estudos em comparação com ferramentas não revestidas grau de metal duro na usinagem de ligas de titânio. Desenvolvimentos recentes na tecnologia de revestimento parecem demonstrar única melhoria insignificante em ligas de titânio usinagem. No entanto, a evolução dos materiais avançados de ferramentas de corte, tais como a família dos super-abrasivo, incluindo ferramentas de PCD e CBN, expandiram a aplicação dessas ferramentas para a usinagem de alta velocidade de materiais duros como aços endurecidos e ligas de titânio, apesar de seu alto custo. Alguns estudos no mundo têm relatado a superioridade de ferramentas de PCD em termos de taxa de desgaste e, conseqüentemente, maior tempo de vida, quando a usinagem de ligas de titânio. Estudos recentes relataram que as ferramentas de CBN podem ser utilizadas para a usinagem de ligas de titânio com velocidades de corte mais elevadas, apesar da elevada reatividade de ligas de titânio com os materiais das ferramentas. Embora tenham sido usadas ferramentas cerâmicas para usinagem de ligas de titânio em vários estudos, eles não são recomendados para usinagem de ligas de titânio por causa de seu mau desempenho devido a taxas de desgaste excessivo, como resultado da baixa condutividade térmica, relativamente baixa tenacidade à fratura e alta reatividade com ligas de titânio (Da Silva, 2006).

O processo de seleção da ferramenta de corte deve estar de acordo com a especificação do material a ser cortado e parâmetros de corte. Desde ferramentas

utilizadas para usinagem de titânio geralmente apresentam desgaste acelerado, devido a tensões térmicas e mecânicas extremas perto da borda de corte, uma ferramenta de corte ideal para usinagem de titânio deve possuir os seguintes requisitos de corte (Ezugwu; Wang, 1997; Trent; Wright, 2000):

i) Dureza a quente para manter a borda afiada e consistente a temperatura elevada e capacidade de suportar o elevado estresse envolvido durante a usinagem;

ii) Elevada resistência ao desgaste por abrasão, a fim de evitar a alteração da geometria da ferramenta causada pelo atrito peça-ferramenta;

iii) Inércia química para minimizar a tendência para reagir com titânio e estabilidade química para evitar a formação de uma aresta postiça;

iv) Boa condutividade térmica para minimizar gradientes térmicos e choques térmicos;

v) Uma elevada resistência à fratura, a qual permite a inserção de absorver as forças e cargas de choque durante a usinagem. Se uma inserção não é suficientemente resistente, carga de choque, em seguida, induzida sozinha pode causar a ruptura precoce da aresta de corte durante a usinagem;

vi) Boa resistência à fadiga para suportar o processo de segmentação de cavacos;

vii) Elevada compressão, resistência à tração e resistência ao cisalhamento;

Szeszulski et al. (1990) consideram a resistência ao desgaste, inércia química e resistência dos principais fatores que afetam o desempenho de ferramentas de corte na usinagem de ligas aeroespaciais. A redução da dureza a quente em condições de temperatura elevada conduzir ao enfraquecimento da força de ligação inter-partícula e a consequente aceleração do desgaste da ferramenta. Tabela 3.3 (Kramer, 1987) mostra a temperatura de amolecimento dos materiais disponíveis comercialmente ferramenta de corte, enquanto a Figura 3.6 ilustra a influência da temperatura sobre a dureza de alguns materiais de ferramentas de corte utilizadas para a usinagem de ligas aeroespaciais (Almond, 1981).

Tabela 3.3 – Os pontos de amolecimento de materiais para ferramentas (Kramer, 1987).

Material da ferramenta	Temperatura de amolecimento (°C)
Aço rápido	600
Carboneto cimentado (WC)	1100
Óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ )	1400
Nitreto de boro cúbico (CBN)	1500
Diamante	1500

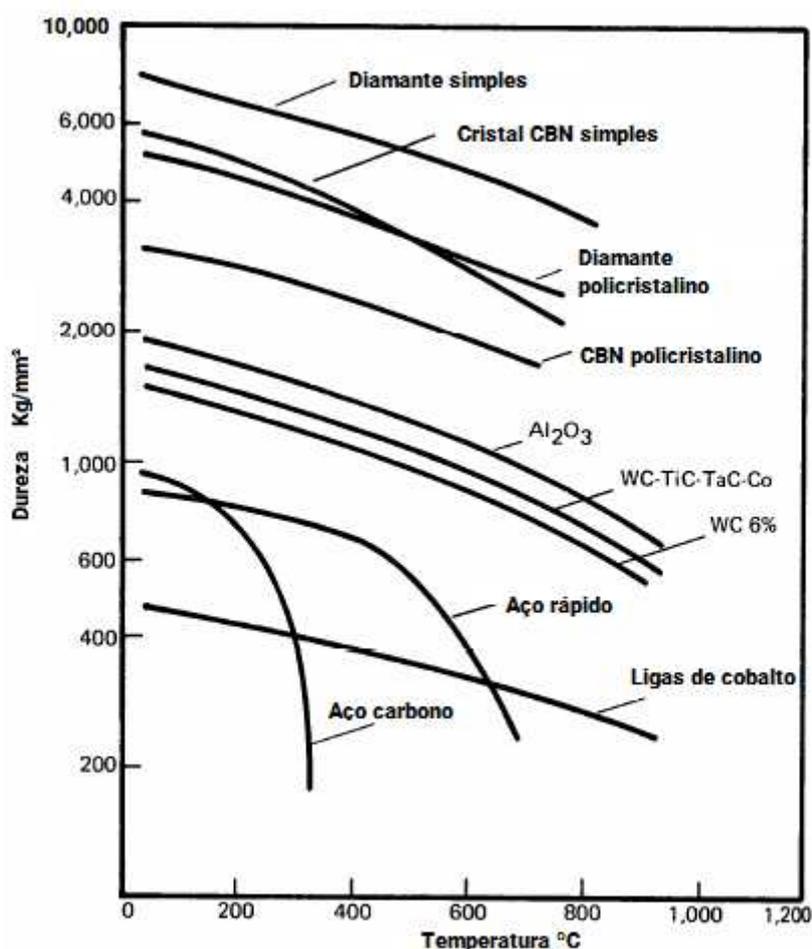


Figura 3.6 – Influência da temperatura sobre a dureza a quente de alguns materiais de ferramenta (Almond, 1981).

### 3.8 EFEITO DA USINAGEM DO TITÂNIO E SUAS LIGAS NOS PARÂMETROS DO PROCESSO

Muitas das características do material e do projeto componente de titânio o torna caro para máquina. Uma quantidade considerável de estoque deve ser removida a partir de formas primárias, tais como peças forjadas, placas, barras, etc. Em alguns exemplos, tanto quanto 50 a 90% do peso da forma primária acaba como cavacos (A complexidade de algumas peças acabadas, como anteparo, dificulta o uso de métodos *near-net-shape* que minimizem formação de cavacos). Máxima eficiência de usinagem para ligas de titânio é necessário para minimizar os custos de remoção de material.

Historicamente, o titânio tem sido entendido como um material que é difícil de maquinar. Devido à crescente aceitação de titânio em muitas indústrias, juntamente com a experiência adquirida pelos fabricantes progressistas, uma ampla base de conhecimento de usinagem de titânio agora existe. Os fabricantes sabem agora que, com procedimentos adequados, titânio podem ser fabricados usando técnicas mais difíceis do que as utilizadas para usinagem de aço inoxidável 316.

Histórias sobre os problemas encontrados na usinagem de titânio têm geralmente originadas nas lojas que trabalham com ligas de aeronaves. O fato é que os graus comercialmente puros de titânio (ASTM B, os tipos 1, 2, 3 e 4) com uma resistência à tração de 241 a 552 MPa (35 a 80 ksi) máquina muito mais fácil do que as ligas de aeronaves (ie ASTM B, grau 5: Ti-6Al-4V).

Com maior teor de liga e dureza, a usinabilidade de ligas de titânio por métodos de fabricação de cavacos tradicionais geralmente diminui. (Isto é verdade para a maioria dos outros metais.) Em um nível de dureza superior a 38 RC (350 BHN) maior dificuldade em operações como a batida de perfuração, moagem e brochar pode ser esperado. Em geral, no entanto, se as características particulares de titânio são tidas em conta, a usinagem de titânio e suas ligas não deve apresentar problemas indevidos.

Usinagem de ligas de titânio exige forças apenas ligeiramente mais elevados do que aqueles necessários para aços em máquinas de corte, mas essas

ligas possuem características metalúrgicas que os tornam um pouco mais difícil do que em máquinas de aço de dureza equivalente. As ligas beta são as ligas mais difíceis do titânio. Quando as condições de usinagem são selecionadas adequadamente para uma sequência de composição da liga e processamento específico, as taxas de produção razoáveis de usinagem podem ser alcançadas em níveis aceitáveis de custo.

Deve ser tomado cuidado para evitar a perda da integridade da superfície, especialmente durante a moagem; de outro modo uma perda dramática no comportamento mecânico tal como a fadiga pode resultar. Até à data, técnicas como a maquinação de alta velocidade não melhoraram a usinabilidade do titânio. A descoberta parece exigir o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas.

A tecnologia de suporte a usinagem de ligas de titânio, basicamente, é muito semelhante ao de outros sistemas de liga. Usinagem de metais eficiente requer acesso aos dados relativos aos parâmetros de usinagem de uma ferramenta de corte para o material de trabalho para a operação dada. Os parâmetros importantes incluem:

- Forças de corte;
- Temperatura de corte;
- Desgaste da ferramenta;
- Fluidos de Corte.

### 3.8.1 Força De Usinagem

Segundo Ferraresi, (1990) o conhecimento da força de usinagem  $F_u$  ou de suas componentes: força de corte  $F_c$ , força de avanço  $F_f$  e da força passiva  $F_p$ , é a base:

- Para o projeto de uma máquina ferramenta (dimensionamento das estruturas, acionamentos, fixações, etc.);
- Para a determinação das condições de corte em condições de trabalho;

- Para a avaliação da precisão de uma máquina ferramenta, em certas condições de trabalho (deformação da ferramenta, máquina e peça);
- Para a explicação de mecanismos de desgaste.

A força de usinagem é também um critério para a determinação da usinabilidade de um material de peça. Os componentes da força de usinagem ( $F_c$ ,  $F_f$  e  $F_p$ ) diminuem com o aumento da velocidade de corte  $V_c$  devido à diminuição da resistência do material com o aumento da temperatura (Ferraresi, Stemmer & König, 1990).

A força de usinagem é por ventura uma soma vetorial ( $F_u = F_f(x) + F_p(y) + F_c(z)$ ) de todas as forças que são propiciadas durante o processo de usinagem, ela depende diretamente das forças de avanço ( $F_f$ ), passiva ( $F_p$ ) e de corte ( $F_c$ ), as quais atuam consideravelmente na ferramenta de corte, nas direções de avanço, ortogonal ao plano de trabalho e de corte, respectivamente. A decomposição da força de usinagem está ilustrada na Figura 3.7 (Sánchez & Trent, 2002).

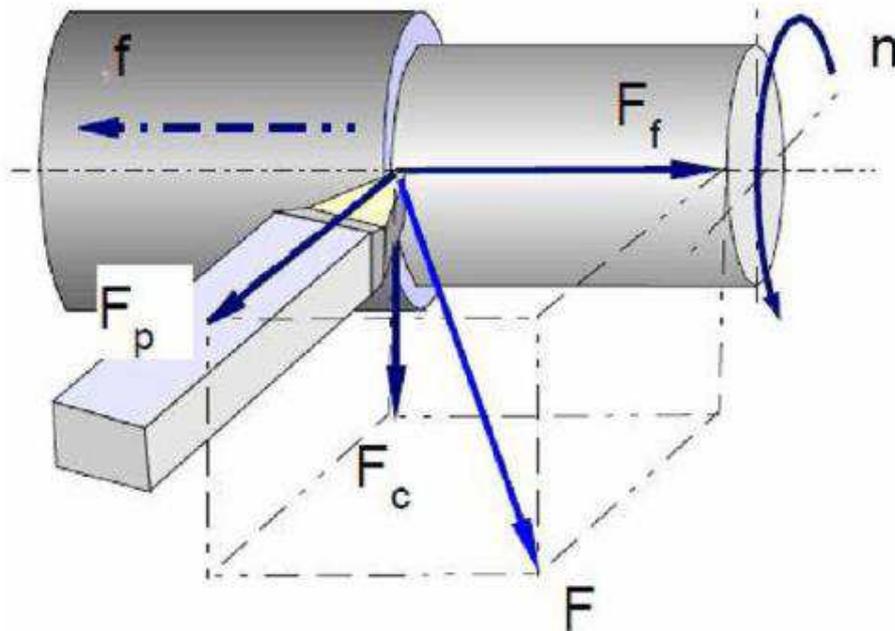


Figura 3.7 – Decomposição da Força de Usinagem (Stoeterau, 2007).

De acordo com Ferraresi (1977), à proporção que a ferramenta se movimenta em direção a peça que irá ser usinada, uma parte do material da peça sofre tensão até que as tensões de cisalhamento se tornem grandes o suficiente para provocar um deslizamento, que acontece na região de cisalhamento, entre a parte tensionada do material e a peça. Para melhor compreensão das forças de usinagem ( $F_u$ ), a Figura 3.8 ilustra as mesmas atuando sobre a cunha cortante e sua decomposição em diversas direções.

Desta forma, a força de corte ( $F_c$ ), a projeção da força principal de corte que atua na superfície de saída da ferramenta na sua direção tangencial ( $F_t$ ), a força de compressão ( $F_N$ ), a projeção da força principal de corte sobre o plano de cisalhamento na sua direção tangencial ( $F_s$ ), a projeção principal de corte sobre o plano de cisalhamento na sua direção normal ( $F_{Nz}$ ), a força de ( $F_f$ ), o ângulo de cunha da ferramenta ( $\beta$ ), a razão entre as forças tangencial e normal sobre a superfície de saída da ferramenta e o ângulo de folga da ferramenta ( $\alpha$ ) podem ser vistos na Figura 3.8.

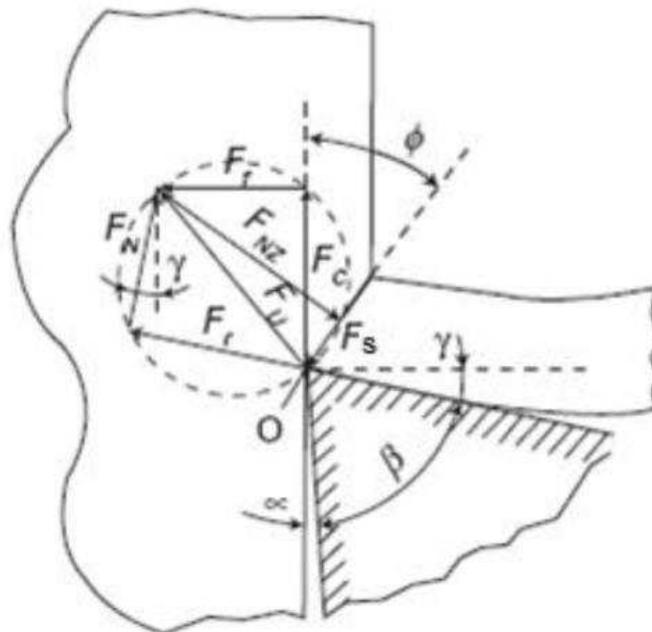


Figura 3.8 – Forças de usinagem e suas decomposições no plano de cisalhamento, na superfície de saída e nas direções de corte e avanço (Ferraresi, 1977).

Os fatores que regem as forças de corte durante a usinagem de ligas de titânio têm sido amplamente relatados na literatura (Rashid, 2011; Sun et al., 2009; Ezugwu, 2005; Wyen, 2010; Antonialli et al., 2009). De acordo com Ezugwu (2003), a utilização de corte nas ferramentas com arestas maçantes ou em pó indevidamente aumenta as forças de corte. Como mostrado na Figura. 3.9, as forças de corte dinâmicas sob diferentes velocidades de corte, as taxas de alimentação e profundidade de corte foram medidas durante viragem seca de Ti-6Al-4V liga de titânio (Sun; Brandt; Dargusch, 2009).

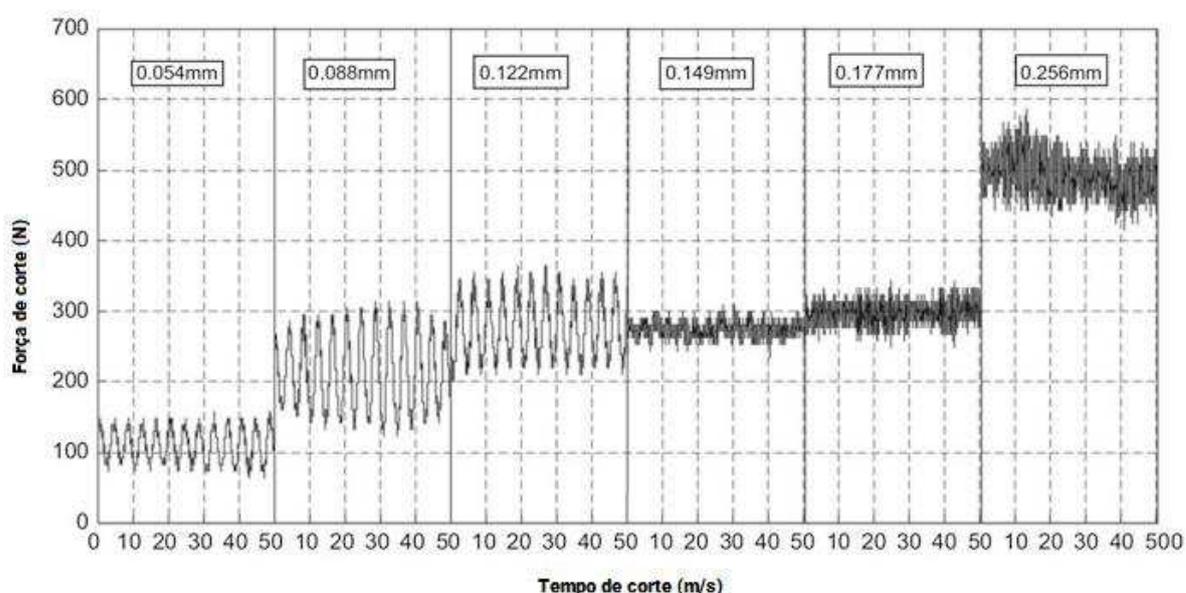


Figura 3.9 – Efeito da taxa de alimentação na força de corte na velocidade de corte de  $75 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$  Ezugwu (2003)

A variação da amplitude da força cíclica de alta frequência foi associada com a formação de cavacos que foi segmentada e aumentada com o aumento profundidade de taxa de corte e alimentação, e diminuiu com o aumento da velocidade de corte. Para determinar o efeito da ferramenta entrar em ângulo vibração da ferramenta e, assim, sobre a vida da ferramenta durante a moagem em liga de titânio, uma análise de vibração à base da força de corte foi apresentada.

Em Antonialli et al. (2009) verificou-se que as forças de corte são amplamente afetadas direcionais pôr a ferramenta de introdução de ângulos

utilizados. Os efeitos do raio de corte em corte forças na viragem ortogonal de liga de titânio Ti-6Al-4V sob diferentes níveis de velocidade de corte e a taxa de alimentação é relatado em Wyen (2010). Assinalou-se que o efeito da velocidade de corte na força de corte não é linear e depende da aresta de corte raio utilizado.

Para o corte de redução de forças, as operações de moagem são mais preferidas do que durante a moagem das ligas de titânio diz Coromant (1994). Além disso, para reduzir os custos de usinagem, muitos métodos alternativos como a usinagem assistida por laser (LAM) (Dandekar et al., 2010; Yang et al., 2009; Germain et al., 2007; Sun, 2007; Zitoune et al., 2013), processos de usinagem ultrassônico (USM) e de usinagem descarga elétrica (EDM) (Wansheng et al., 2002; Singh, 2006; Singh, 2007; Hasçalık, 2007) e, conseqüentemente, de usinagem são híbridos propostos. Como relatado em Ezugwu (2003), e LAM híbrido pode reduzir as forças de corte e proporcionar melhorias substanciais na usinabilidade de ligas de titânio.

### 3.8.2 Temperatura De Corte

A temperatura de corte é uma informação de grande importância na usinagem, pois contribui diretamente para o desgaste das ferramentas de corte. Conhecer esta temperatura é ter um dado bastante relevante em mãos. E, devido a este fato, existem várias maneiras para tentar estimá-la.

De acordo com Trent (2000), o calor gerado afeta três zonas distintas. Estas três zonas estão mostradas na Figura 3.10.

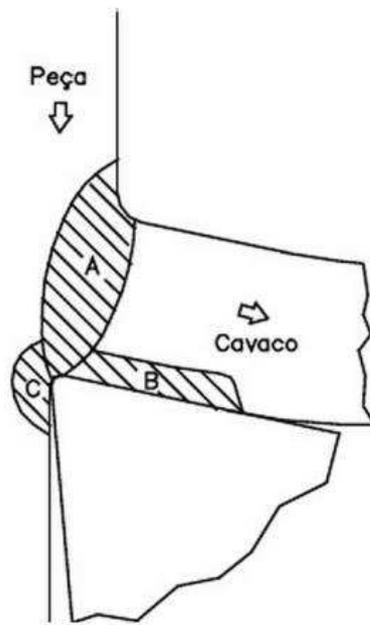


Figura 3.10 – Zonas de geração de calor em usinagem (Machado, 2009).

- A – Zona de Cisalhamento Primária;
- B e C – Zona de Cisalhamento Secundária;
- D – Interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta.

É importante esclarecer que a geração de calor na região C da Figura 3.10 somente apresentará um diferencial na temperatura quando a aresta de corte já estiver desgastada ou se o ângulo de folga for pequeno.

A temperatura da interface cavaco-ferramenta aumenta com a velocidade de corte. Haverá, portanto um limite prático na velocidade de corte para cada par ferramenta-peça. As altas temperaturas nas ferramentas de corte não só aceleram os mecanismos de desgaste termicamente ativados, mas também reduzem o limite de escoamento dessas ferramentas. Assim a temperatura na zona de fluxo, e, portanto, a temperatura da ferramenta depende da quantidade realizado para cisalhar o material e da quantidade de material que passa pela zona de fluxo, e isto varia com o material da peça (Trent, 2000).

Observa-se na Figura 3.11, a relação entre a temperatura e velocidade de corte para as ligas de titânio, dentre outros. O gráfico mostra a temperatura máxima da interface cavaco-ferramenta (e, portanto, a temperatura máxima na superfície de saída da ferramenta) na usinagem de vários materiais com ferramentas de corte, em função da velocidade de corte.

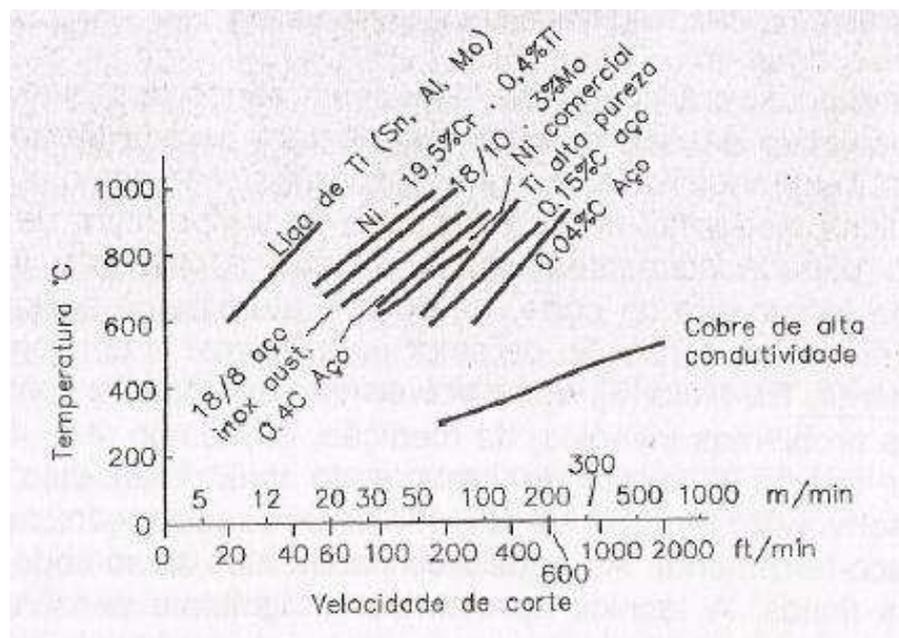


Figura 3.11 – Temperaturas máximas da interface cavaco-ferramenta em função da velocidade de corte (Trent, 2000).

Sabe-se que uma variação nos parâmetros de corte contribui significativamente na alteração de temperatura de corte. A seguir, é mostrado o efeito desses parâmetros na temperatura (Trent, 2000).

- **Velocidade de Corte:** Com o aumento da velocidade de corte, conseqüentemente temos um aumento na temperatura de corte, pois aumenta a geração de calor. Esse aumento de temperatura acelera juntamente com o aumento do desgaste da ferramenta, o que faz aumentar o atrito entre a peça e a ferramenta, e isso resulta num aumento da força de corte.

• **Avanço:** O efeito do avanço é analisado paralelamente com a velocidade de corte. Para pequenos valores de avanço e baixas velocidades de corte, em geral, há a presença da APC, e quando esta se faz presente, a principal fonte de calor está afastada da superfície da ferramenta, entretanto, com o aumento da velocidade de corte, a aresta postiça de corte perde estabilidade e a temperatura da ferramenta volta a aumentar significativamente com o aumento da velocidade.

• **Profundidade de Corte:** Com o aumento da profundidade de corte, assim como o avanço, temos uma alteração nas áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, e isso resulta num aumento da força de corte. A quantidade de calor gerado é consequência da força de corte. Conclui-se que o aumento da profundidade de corte implica num aumento da temperatura.

• **Ângulo de Folga:** As evidências indicam que as interações entre o efeito do ângulo de folga  $\alpha$ , a velocidade de corte e o avanço podem ser muito significativas, trazendo resultados. Efeito dos parâmetros de corte em temperatura gerada durante a usinagem.

A Temperatura influencia a ação de corte em vários aspectos importantes, incluindo (Beddoes; Bibby, 1999):

- Alteração as propriedades da superfície maquinada;
- Causar alterações dimensionais para o material de trabalho e afetando adversamente precisão dimensional do componente usinado;
- Afetar adversamente a resistência, dureza e resistência ao desgaste da ferramenta de corte. Ótimos para a redução da temperatura de corte.

Trent, (2000) diz que a força e a condutividade térmica dos materiais de trabalho e ferramentas influenciam a temperatura máxima durante a usinagem. Aumentar a taxa de alimentação, velocidade e profundidade de corte, tem influência com efeito significativo na temperatura de corte, de acordo com a relação dada pela equação a seguir:

$$TM \propto Va \times fb \times DOCC$$

Em que  $T_M$  é a temperatura de corte média,  $V$  é a velocidade de corte,  $f$  é o avanço,  $DOC$  é a profundidade de corte e  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes ( $a > b > c$ ).

Redução na dureza e resistência ao desgaste da ferramenta com o aumento da temperatura é o principal fator que afeta negativamente a vida útil da ferramenta. Um aumento na taxa de remoção de metal leva a um aumento proporcional de temperatura na ferramenta de corte. Isso tem uma influência direta sobre o desgaste da ferramenta e vida útil da ferramenta. A temperatura da ferramenta pode não ser um problema crítico durante a usinagem de baixa resistência e baixo ponto de fusão, tais como materiais de alumínio e de magnésio. No entanto, quando os materiais de elevada resistência ferrosos e outros, tais como ligas de ferro fundido, aço, níquel e titânio são usinadas, a temperatura aumenta com a velocidade e a força da ferramenta diminui, conduzindo a um desgaste mais rápido e falha da ferramenta consequentemente (Trent; Wright, 2000).

Apesar de usinagem a grande velocidade é desejável, para uma produtividade mais elevada, a ferramenta de desgaste rápido devido à alta temperatura gerado na zona de corte irá estabelecer um limite para a velocidade de corte, é prático para cada par de material de trabalho-ferramenta. Materiais de trabalho diferentes, durante a usinagem, gerar diferentes valores e padrões de calor. Por exemplo, o ponto de temperatura máxima durante a usinagem de ligas de titânio situa-se na inclinação da face da ferramenta e na face de flanco para a usinagem de ligas de níquel (Jawaid, 1982).

Na usinagem de materiais com alta resistência, grandes forças são necessárias devido às tensões mais elevadas sobre o plano de corte, levando a grande quantidade de geração de calor na zona de corte. As grandes forças se combinam com as altas temperaturas de corte gerados também vai acelerar o fracasso da aresta de corte durante a usinagem. Um aumento na velocidade de corte aumenta a temperatura de corte (Ghosh; Mallik, 1986; Boothroyd; Knight, 1989), consequentemente, incentivar de amolecimento do material de trabalho (Trent; Wright, 2000).

Algumas considerações a respeito de parâmetros metalúrgicos que influenciam a temperatura durante a usinagem foram enumeradas por Trent (1988):

- O ponto de fusão do elemento principal do material de trabalho. Quanto maior for a fusão, maior será a temperatura na interface do material de ferramenta de obra para qualquer velocidade de corte;
- Elementos que reforçam um metal de liga promove aumento da temperatura na interface da ferramenta de trabalho a qualquer taxa de remoção de metal;
- Introdução de fases em que o material de trabalho facilmente pode formar camadas cisalhadas na interface. Eles atuam reduzindo a temperatura.

A compreensão do processo de geração de calor e comportamento da temperatura em usinagem de ligas de titânio desempenha um papel importante na distribuição da temperatura da ferramenta de corte. As altas temperaturas geradas perto da borda de corte da ferramenta são as principais razões para o desgaste rápido da ferramenta comumente observada (Trent; Wright, 2000).

Em comparação com o aço, a capacidade de calor do titânio e suas ligas é muito reduzida. A consequência é que uma consideravelmente maior parte do calor que é gerado durante o corte entra na ferramenta porque não podem ser removidos com o fluxo de cavacos rápido ou capa no material devido ao trabalho, a baixa condutividade térmica de ligas de titânio, cerca de 37% e 86% mais baixo do que a condutividade térmica da liga Inconel 718 e AISI 1045 aço, respectivamente (Mantle; Aspinwall, 1998).

Cerca de 80% e 50% do calor gerado é absorvida na ferramenta quando há usinagem de titânio-base, Ti-6Al-4V, liga e Ck 45 (AISI 1045), respectivamente de aço (Konig, 1979), tal como ilustrado na Figura 3.12. Na usinagem de uma liga de titânio em uma velocidade de corte com cerca de 30 m/min<sup>-1</sup> a temperatura desenvolvida na vanguarda de uma ferramenta de carbeto é cerca de 704°C, enquanto que para o aço a temperatura é de cerca de 538°C (Zlatin; Field, 1973).

A influência da velocidade de corte da temperatura gerado na usinagem do titânio c.p. e várias ligas de titânio com metal duro (grau K10) foi investigada por Motonishi et al. (1987) conforme Figura 3.13. Aumento de velocidade de corte resultou em maior temperatura de corte. A temperatura de corte da liga de Ti-6Al-4V foi de cerca de 200°C maior do que o titânio puro, S45C.

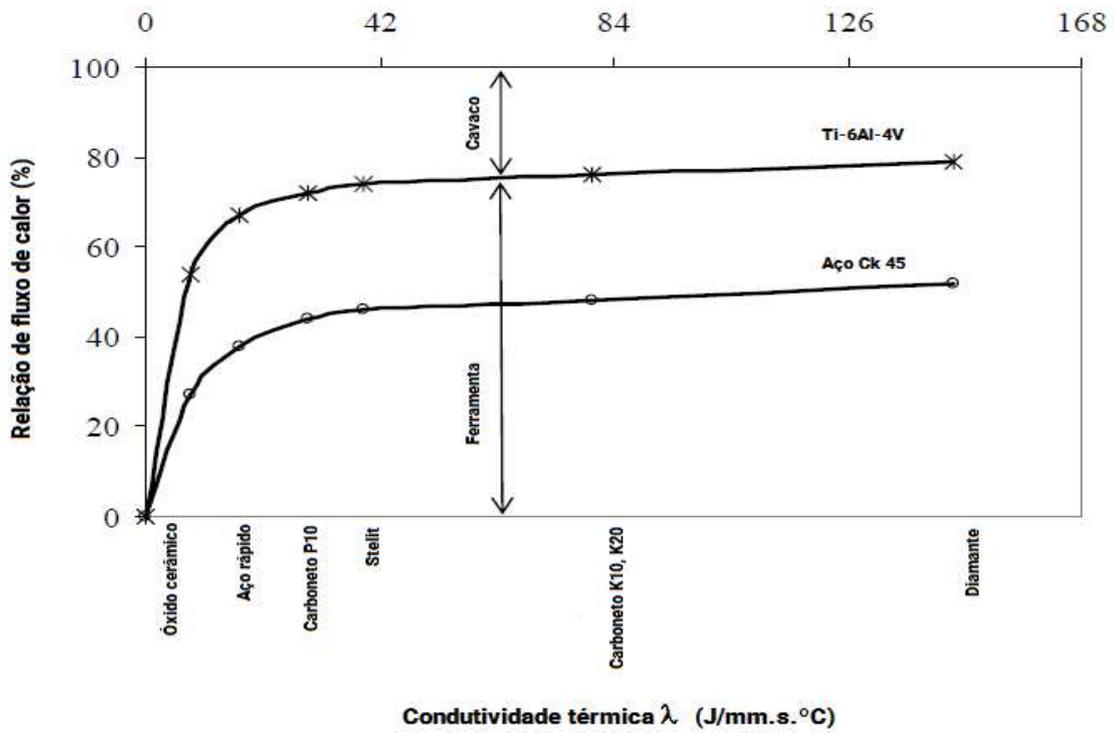


Fig. 3.12 – Distribuição de carga térmica na usinagem de titânio-base, Ti-6Al-4V e Ck 45 (AISI 1045) de aço [adaptado de Konig (1979) ].

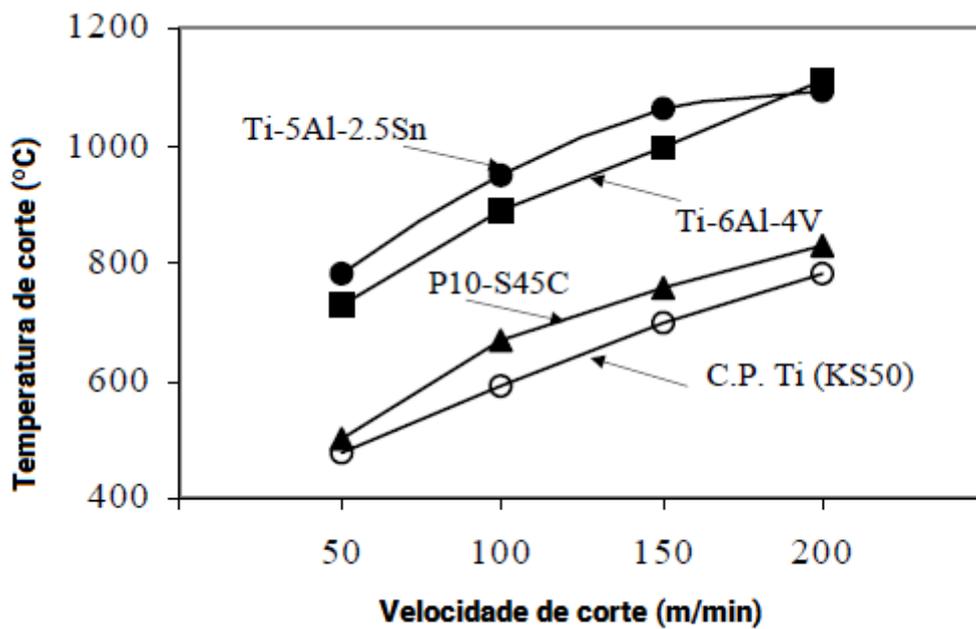


Figura 3.13 – Influência da velocidade de corte em que a temperatura de corte na usinagem de titânio e suas ligas, [adaptado de Motonishi et al. (1987) ].

### 3.8.3 Desgastes Das Ferramentas De Corte

Durante a usinagem, tal como o material da peça é trabalhado, o corte da ferramenta degrada causando uma distância gradualmente alterando assim a forma da ferramenta, afetando, conseqüentemente, a dimensão, a tolerância e a qualidade da peça usinada e redução da eficiência do corte no processo de usinagem. No corte do metal, o desgaste progressivo ocorre tanto na aresta e nas faces de apuramento da ferramenta de corte. O tipo de desgaste depende da geometria da ferramenta, da ferramenta em si e do material da peça, além das suas propriedades físicas, mecânicas e químicas, bem como os parâmetros de corte e o ambiente de usinagem empregado. Figura 3.14 mostra os modos de falha de ferramentas em um diagrama típico (Dearnley; Trent, 1985):

- a) Desgaste de flanco
- b) Crateramento
- c) Entalhamento
- d) Lascamento da borda

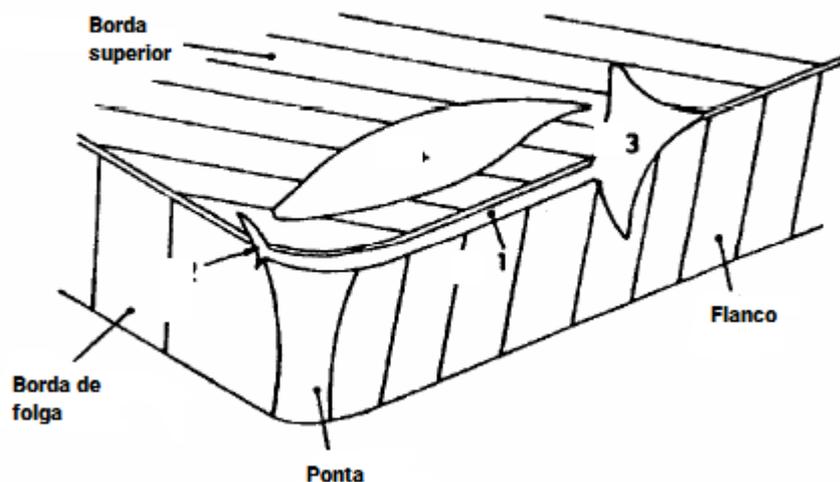


Figura 3.14 – Regiões de desgaste em uma ferramenta de corte (Dearnley; Trent, 1985).

a) O desgaste de flanco ocorre na face de flanco da ferramenta, como as fricções da superfície recém-formados contra a face de afastamento da ferramenta causando desgaste adesivo e/ou abrasivo que é reforçada pelo aumento da temperatura durante a usinagem. A ação de fricção faz com que a perda de ângulo de relevo sobre a face de afastamento da ferramenta, resultando assim no desgaste. Em geral, a taxa de desgaste de flanco é elevada no começo do corte, mas diminui à medida que a área de desgaste atinge um valor crítico. (Dearnley; Trent, 1985)

b) O desgaste face inclinada (cratera) está geralmente associada com altas temperaturas geradas na interface cavaco-ferramenta e ocorre sobre a face inclinada da ferramenta, devido a uma combinação de difusão e adesão como o cavaco se move sobre a face de ataque da ferramenta. A profundidade máxima da cratera ocorre geralmente perto do ponto médio do comprimento de contato entre o cavaco e a face inclinada, em que se crê que a temperatura seja num máximo. Craterizações excessiva altera a geometria da aresta de corte e pode afetar negativamente a formação de cavacos e enfraquecer a ferramenta por causa da diminuição da sua força de rendimento (Ab Sandvik Coromant, 1994).

c) Entalhamento ou formação de ranhura ocorre como resultado de desgaste por deslizamento na usinagem de materiais de trabalho que têm suas superfícies tensas endurecidas pelos cortes anteriores ou trabalhos endurecidos devido a efeitos de refrigeração e/ou temperatura flutuante. Ao chanfrar a borda é um grande problema na usinagem de titânio e ligas de alumínio (endurecimento por precipitação de  $\gamma'$  fase) (Richards; Aspinwall, 1989).

d) Lascamento da borda de corte é o processo de arrancar de pequenos a pedaços de partículas de ferramentas na borda de corte da ferramenta. As partículas arrancadas podem ser fragmentos pequenos ou grandes. Ao contrário de desgaste, lascamento não é um processo gradual. Ela ocorre em forma aleatória e imprevisível e altera a geometria da ponta da ferramenta. O lascamento está associado a choques mecânicos devido ao impacto, particularmente em corte interrompido. Desgaste excessivo para a ferramenta como o desgaste de flanco, o desgaste da cratera e entalhe vai aumentar as forças de corte e enfraquecer a ferramenta. A presença de fissuras térmicas geradas no corte interrompido devido ao ciclo térmico, também pode levar à geração de lascamento e falha súbita da ferramenta de corte. As altas taxas de alimentação e profundidade de corte também podem causar lascamento. Foi

observada na usinagem com materiais para ferramentas com tenacidade à fratura inadequada, tais como ferramentas de cerâmica e graus de acabamento de carboneto de tungstênio contendo peso, menos de 3% de cobalto (Shaw, 1984).

### 3.8.4 Fluidos De Corte Aplicado Na Usinagem Do Titânio

Fluidos de corte são utilizados na usinagem de titânio para aumentar a vida da ferramenta, melhorar o acabamento da superfície, minimizar soldagem, e reduzir as tensões residuais na peça de trabalho. Uma lista de fluidos de corte e o código com correspondentes números pelos quais eles são referenciados aparece na Tabela 3.4. Solúveis em emulsões óleo-água, solúvel em água, ceras, agentes de refrigeração e químicas são geralmente utilizados nas velocidades de corte mais elevadas (23 a 30,5 m/min, ou de 75 a 100 pés/min, e mais elevadas), onde o arrefecimento é importante (Froes, 2015).

Tabela 3.4 – Tipos de fluidos de corte utilizados na usinagem (Froes, 2015)

<b>Nº do código*</b>	<b>Tipo de fluido de corte</b>
1	Emulsão de óleo-água (1:10)
2	Ceras solúveis em água
3	Refrigerantes químicos (sintéticos, hidróxidos de bário)
4	Óleo altamente clorado
5	Óleo sulfurado
6	Óleo clorado
7	Óleo sulfoclorado
8	Inibidores de ferrugem (tais como o nitreto de amina)
9	Óleos solúveis pesados (tais como o clorado, bário fulforado, aditivos de alta pressão)

\*Os números dos códigos são usados em tabelas de dados de usinagem

Óleos de Baixa viscosidade sulfurados e clorados e óleos sulfoclorados são utilizados no corte de inferior velocidade (inferior a 23 m/min, ou 75 ft/min) para reduzir fricção ferramenta-cavaco e para minimizar a soldagem a ferramenta. Óleos de corte ou óleo mineral ou óleos minerais têm a base de petróleo/banha. Todos os fluidos de corte têm sido identificados para utilização em tabelas de usinagem subsequentes. Para muitas operações de usinagem convencional sobre materiais, é possível especificar o fluido de corte usando designações de classe, como óleo solúvel, óleo sulfurado, e óleo sulfoclorado. Contudo, para algumas das ligas de difícil usinagem, designações de classe, por vezes, são inadequadas. Muitos fluidos que melhorem a usinabilidade são complexas, muitas vezes proprietárias, e às vezes contêm compostos ativos não identificáveis (Froes, 2015).

Aplicação de inundação através de vários bicos para cobrir a ferramenta de corte e a área de corte imediato pode ser usado para fluidos à base de óleo; desta forma evitando que o cavaco, bloqueie assim o fluxo de fluido para a zona de calor máximo. Óleos clorados são usados em alguns casos no titânio e suas ligas. No entanto, eles são geralmente evitados se satisfazer a fluidos não clorados para requisitos de usinagem. Resíduos de cloro residual a partir destes fluidos pode levar a tensão-corrosão, craqueamento de peças em ligas de titânio durante subsequente recozimento ou em serviço. (Resíduos de Cloreto pode causar corrosão sob tensão, a temperaturas superiores 205°C ou 400°F, em ligas de titânio, mas não necessariamente em titânio comercialmente puro). Se fluidos clorados são usados em titânio, os resíduos devem ser removidos imediatamente com um desengordurante não clorado tal como metil-etilcetona ou por limpeza ácida. Fundamentalmente, é sempre uma boa prática para remover completamente todo o fluido de corte e resíduos de lubrificantes de peças de trabalho, especialmente antes de quaisquer operações de aquecimento. Além disso, devido a isso deve-se considerar as dificuldades de lavar montagens complexas. Muitas lojas têm de usinagem bem definida e procedimentos de limpeza relacionados com o uso de fluidos de corte clorados para as ligas de titânio (Froes, 2015).

### 3.9 ACABAMENTO DA SUPERFÍCIE USINADA

As superfícies de ligas de titânio podem ser facilmente danificadas em operações normais de usinagem. Em geral esses danos surgem sob a forma de microtrincas, acúmulos de material em arestas, deformação plástica, zonas termicamente afetadas e tensões residuais. Em condições de serviço esses danos podem causar deterioração da resistência à fadiga e à corrosão sob tensão. Pequenas variações de parâmetros não causam efeitos nocivos consideráveis, porém práticas convencionais abusivas modificam sensivelmente a camada superficial do componente de liga de titânio que está sendo usinado. (Infomet, 2015)

Neste caso a dureza poderia ser afetada, mas não a resistência à fadiga de alto ciclo, ao contrário do esmerilhamento abusivo, que pode levar a resistência à fadiga tornar-se até 4 vezes menor. Contudo, no caso de outros tipos de processo de usinagem, como o torneamento e a fresagem de acabamento, a queda de resistência à fadiga não é tão acentuada, devido à existência de tensões residuais superficiais compressivas. Caso não existam essas tensões favoráveis, pode ser feito jateamento com partículas de areia ou vidro nessas superfícies de modo a criar esse tipo de tensão benéfica. (Infomet, 2015)

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar dos desenvolvimentos recentes e uso extensivo de ligas de titânio, a usinagem de ligas de titânio ainda permanece como uma das principais preocupações industrial: vida útil curta, baixas taxas de remoção de metal, maior força de corte e temperatura, e pobre qualidade de superfície.

Para melhorar a usinabilidade de ligas de titânio, atenções especiais devem ser pagas para estratégias de usinagem e ferramentas de corte. Existem muitos tipos de ferramentas de corte empregadas para usinagem de ligas de titânio. As ferramentas de carboneto ainda estão mais comumente utilizadas. O uso de ferramentas revestidas não mostra uma melhoria considerável na usinabilidade de ligas de titânio.

Na verdade, a tendência de ligas de titânio para reagir com a maioria dos materiais para ferramentas de corte é o principal fator de desgaste da ferramenta, o que dificulta a usinabilidade das ligas de titânio. Desgaste da ferramenta ocorre principalmente no lado da ferramenta de flanco em ferramentas de ambos revestidos e não revestidos em ligas de titânio.

A temperatura de corte, alta pressão na interface da ferramenta, aresta postiça e formação da interação química entre o titânio e a ferramenta são os principais fatores de desgaste da ferramenta. Mas a resistência à corrosão, força e peso leve do titânio contribuem para a sua aceitação em um número crescente de aplicações de consumo.

## 5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Estudar o efeito das ligas na usinabilidade do titânio;
- ✓ Avaliar a influência dos parâmetros na formação de cavacos na usinagem do titânio;
- ✓ Estudar a integridade superficial para outros processos de usinagem, como por exemplo: retificação, fresamento e furação.
- ✓ Estudar os processos de usinagem do titânio afim de se achar uma forma mais viável economicamente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, I.A., **Otimização do Processo de Usinagem de Titânio com Laser Pulsado de Neodímio**. 2007. Tese (Doutorado) – Tecnologia Nuclear Materiais – IPEN, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

ALMOND, E.A., **Towards Improved Tests Based on Fundamental Properties, Proceedings of the International Conference on Improved Performance of Tool Materials**, The National Laboratory and the Metals Society, Teddington, Middlesex, April 28-29, 1981, pp. 161-169.

ANTONIALLI, A.I.S., 2009, “**Uma Contribuição ao Fresamento Frontal da Liga de Titânio Ti-6Al-4V**”, 137 f. Tese (Doutorado) – UNICAMP, Campinas.

ASPINWALL, D.; DEWES, R.; MANTLE, A. and NG, E., **HSM takes off in the Aerospace Sector**, pp. 1-4. Available at: <[www.delcam.com/info/articles/hsm\\_rollsroyce.htm](http://www.delcam.com/info/articles/hsm_rollsroyce.htm)>. Accessed in 7th. May 2003.

ASSOCIATION T., **Pesquisa De Mercado Mundial Realizado Pela Secretaria De Finanças E Da Indústria Da França**. Disponível em: < <http://www.titane.asso.fr>> Acesso em: 25 novembro 2006.

BANIA, P.J., **Beta Titanium Alloys and their role in the Titanium Industry**, Journal of Metals, v.46(7), p. 16-19, 1994.

BEDDOES, J. and BIBBY, M.J., **Principles of Metal Manufacturing Processes**, Arnold – Hodder Headline Group, London, Great Britain, 1999, p. 326.

BOOTHROYD, G. and KNIGHT, W.A, **Fundamentals of Machining and Machine Tools**, Second Edition, Marcel Dekker, INC, New York, U.S.A., 1989, p. 542, ISBN: 0-8247- 7852-9.

BRÄNEMARK, R.; RYDEVIK, B.; MYERS, R. R. **Osseointegration In Skeletal Reconstruction And Rehabilitation: A Review**. Journal of Rehabilitation Research and Development, v.38 (2), p. 175-181, 2001.

COM CIÊNCIA – Revista Eletrônica de Jornalismo científico SBPC Artigo: **Implantes De Aço Inoxidável Cada Vez Mais Resistente À Corrosão**. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/200407/noticias/2/quimica.htm>> Acesso em: 10 janeiro 2007.

COPPINI, N. L. et al. **Medida Da Resistência À Usinagem Em Titânio**. AISI 316. 2013.

COROMANT, S. **Modern Metal Cutting: A Practical Handbook**: Sandvik Coromant, Sweden, 1994.

DANDEKAR, C. R.; SHIN, Y. C.; BARNES, J. **Machinability Improvement Of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) Via LAM And Hybrid Machining**. Int J Mach Tools Manuf., 2010.

DAVIDSON, J. A.; MISHRA, A. K.; KOVASC, P.; POGGIE, R. A. New surface-hardened, low-modulus, corrosion-resistant Ti-13Nb-13Zr alloy for total hip arthroplasty. **Bio-Medical Materials and Engineering**, v.4, p.231-243, 1994.

DEARNLEY, P. A. and TRENT, E. M., **Wear Mechanisms of Coated and Uncoated Carbides**, Trans ASME, Journal of Eng. Materials and Technology, Vol. 107, January 1985, pp. 68-82.

DIETER, G. **Mechanical Metallurgy**, McGraw-Hill, 3rd ed., 1986.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia Da Usinagem Dos Materiais**. 3° ed. São Paulo: Artliber Editora, 2003.

DONACHIE JR., M. J. **Titanium: A Technical Guide**; ASM International, Metals Park, Ohio, USA, 1988.

EZUGWU, E. O. **Key Improvements In The Machining Of Difficult-To-Cut Aerospace Superalloys**. Int J Mach Tools Manuf., 2003.

EZUGWU, E. O.; BOONEY, J.; Yamane Y., “**An Overview of the Machinability of Aeroengine Alloys**”, Journal of Material Processing Technology, Vol. 134, pp. 233-253, 2003.

EZUGWU, E.O. and WANG, Z. M., **Titanium Alloys and Their Machinability – A Review**, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier Science S.A., Vol. 68, 1997, pp. 262-274.

FERRARESI, D. “**Fundamentos de Usinagem dos Metais**”. Editora: Edgard Blücher LTDA., São Carlos 1970.

FLOWER, H. M. **Micro Structural Development In Relation To Hot Working Of Titanium Alloys**. Materials Science and Technology, v.6, p.1082-1092, 1990.

FROES, F. H.; EYLON, D.; BOMBERGER, H. B. **Titanium Technology: Present Status and Future Trends**, The Titanium Development Association, 1985.

FROES F. H. **Titanium Alloys: Handbook of Advanced Materials**, James K. Wessel, Wiley Interscience Ed., p. 271, 2004.

FROES F. H. **Getting Better: Big Boost For Titanium MIM Prospects**. Metal Powder Report, v.61 (11), p. 20-23, 2006.

GEETHA, M.; SINGH, A. K.; GOGIA, A. K.; ASOKAMANI, R. Effect of thermomechanical processing on evolution of various phases in Ti–Nb–Zr alloys **Journal of Alloys and Compounds**, v. 384, p. 131-144, 2004.

GERMAIN G, MOREL F, LEBRUN JL, MOREL A. **Machinability and surface integrity for a bearing steel and a titanium alloy in laser assisted machining**. Lasers Eng., 2007.

GHOSH, A. and MALLIK, A. K., **Manufacturing Science, Ellis Horwood Series in Mechanical Engineering**, Chichester, England, 1986, p. 433.

HASÇALIK, A.; CAYDAS, U. **Electrical Discharge Machining Of Titanium Alloy (Ti–6Al–4V)**. Appl Surf Sci., 2007.

INFOMET, “**Metais e Ligas**”. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=94> Acessado em 23/10/2015.

JAIMES, R. F. V. V.; AFONSO, M. L. C. A.; AGOSTINHO, S. M. L; BARBOSA, C. A. **Evolução Temporal Da Interface Aço Inoxidável P558/Solução De Cloreto De Sódio Por Espectroscopia De Impedância Eletroquímica**, REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v.60(1), p. 63-68, 2007.

JAWAID, A., **Syalon Ceramics in Metal Cutting**, p. 149. Ph.D. Thesis, University of Warwick, Coventry, Great Britain, 1982.

JOBSHOP, “**Machining Titanium and Its Alloys**”. Disponível em: <http://www.jobshop.com/techinfo/papers/machiningtitanium.shtml>. Acessado em 23/10/2015.

KONIG, W., **Applied Research on the Machinability of Titanium and its Alloys**, Proc. 47th Meeting of AGARD – Structural and Materials Panel, Florence, 26-28 September 1978. AGARD – CP256, London, Great Britain, 1979, pp. 1.1 – 1.10.

KRAMER, B. M., **On Tool Materials for High Speed Machining**, Journal of Engineering for Industry, Vol 109, May 1987, pp. 87-91.

LEVENTHALL, G. S. Titanium, a metal for Surgery, **Journal of Bone and Joint Surgery**, v.33(A), p. 473, 1951.

LEYENS, C. and PETERS, M., **Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications**, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN: 3-527-30534-3, pp 1-2, 2003.

LINS, F.; “**Titânio e Suas Ligas**”. Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda – UFF/VR, Rio de Janeiro. 2005. Apostila.

LUCKEY, H. A. **Titanium Alloys in Surgical Implants**, 3M Orthopedic Products, RMI Company, Arizona, 1981.

MACHADO, A. R. and WALLBANK, J., **Machining of Titanium and its Alloys**, **Proceedings of the Inst. Of Mech. Engineers**, Vol. 204, Part. B: Journal Engineering Manufacture, 1990, pp. 53-60.

MOTONISHI, S.; HARA, Y.; ISODA, S.; ITOH, H.; TSUMORI, Y. and TERADA, Y. **Study on Machining of Titanium and its Alloys**, Kobelco Technology Review, No. 2, August 1987, pp. 28-31.

NIINOMI, M. **Mechanical Properties Of Biomedical Titanium Alloys**. Materials Science and Engineering A, v.243, p. 231-236, 1998.

OKEKE, C. I. **Threading and Turning of Aerospace Materials with Coated Carbide Inserts**, 1999, p. 247. Ph.D. Thesis, South Bank University London, London, Great Britain.

PEREIRA, A. M. R. **Apostila de Materiais – Titânio**. São Paulo, ISDOM INSTITUTO SUPERIOR DE D. DENIS. 2008.

RAHMAN, M.; WONG, Y. S.; ZAREENA, A. R., “**An Overview Of The Machinability Of Aeroengine Alloys**”, Journal of Material Processing Technology, 2003. Vol. 134, pp. 233-253.

RASHID, R. R.; SUN, S.; WANG, G.; DARGUSCH, M. **Machinability Of A Near Beta Titanium Alloy**. Proc Inst Mech Eng Part B J Eng. Manuf., 2011.

REED HILL, R. E.; ABBASCHIAN, R. **Physical Metallurgy Principles**. 3rd ed. PWS-Kent Co., 1992.

RIBEIRO, M. V.; MOREIRA, M. R. V.; FERREIRA, J. R. **Optimization Of Titanium Alloy (6Al-4V) Machining**. Journal of Materials Processing Technology, v 143/144C, p. 453-458, 2003.

RICHARDS, N. and ASPINWALL, D. **Use of Ceramic Tools for Machining Nickel Based Alloys**, International Journal of Machine Tools & Manufacturing, Elsevier Science B.V., Vol. 29, No. 4, 1989, pp. 575-588.

SALAMA, M. M.; MURALI, J.; JOOSTEN, M.W. Titanium drilling risers – application and qualification. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v.122 (1), p.47-51, 2000.

SCHENEIDER, S.G. **Obtenção e caracterização da liga Ti-13Nb-13Zr para aplicação como biomaterial**. São Paulo, 2001. Tese de Doutorado em Tecnologia Nuclear. Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares (IPEN), 2001.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**, Clarendon Press – Oxford, England, 1984.

SINGH, R.; KHAMBA, J. S. **Ultrasonic Machining Of Titanium And Its Alloys: A Review**. J Mater Process Technol, 2006.

SINGH, R.; KHAMBA, J. S. **Investigation For Ultrasonic Machining Of Titanium And Its Alloys**. J Mater Process Technol, 2007.

SINGH, R.; KHAMBA, J. S. **Taguchi Technique For Modeling Material Removal Rate In Ultrasonic Machining Of Titanium**. Mater Sci Eng., 2007.

SUN S, BRANDT M. **Laser-assisted machining of titanium alloys**. **Industrial lasers report**, IRIS Swinburne University of Technology, Melbourne, 2007.

SUN S, BRANDT M, DARGUSCH M. **Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys**. Int J Mach Tools Manuf., 2009.

SZESZULSKI, K. J.; THANGARAJ, A. R. and WEINNMANN, K. J., **On The Cutting Performance of Whisker-Reinforced Ceramics Machining Inconel**, Winter Annual Meeting of ASME, Fundamental Issues in Machining ASME, Dallas, TX, USA, 1990, pp. 97-13.

TRENT, E. M. and WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**, Butterworth-Heinemann, Fourth Edition, 2000, Woburn, USA.

WANSHENG, Z.; ZHENLONG, W.; SHICHUN, D.; GUANXIN, C.; HONGYU, W. **Ultrasonic And Electric Discharge Machining To Deep And Small Hole On Titanium Alloy**. J Mater Process Technol, 2002.

WILLIAMS, D. F. **Titanium As A Metal For Implantation – Part.1: Physical Properties**, Journal of Medical Engineering and technology, v.1, p. 195-198, 1977.

WYEN, C. F.; WEGENER, K. **Influence Of Cutting Edge Radius On Cutting Forces In Machining Titanium**. CIRP Ann Manuf Technol, 2010.

YANG, J. H. N.; BRANDT, M.; SUN, S. J. **Numerical And Experimental Investigation Of The Heat-Affected Zone In A Laser-Assisted Machining Of Ti-6Al-4V Alloy Process**. Mater Sci Forum, 2009.

ZITOUNE, R.; KRISHNARAJ, V.; DAVIM, J. P. **Laser Assisted Machining Of Titanium Alloys**. Mater Sci Forum, 2013.

ZLATIN, N. and FIELD, M. **Procedures and Precautions in Machining Titanium Alloys**, Titanium Science and Technology, Titanium D73/12249, Vol. 1, 1973, pp. 489-504.