



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS E TECNOLOGIA

UNESP

**Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá**

**AUTORES: ÉLTON CARLOS BURIAN
RENANN PEREIRA GAMA**

COLABORADOR: JÔNATAS PEREIRA

**O ESTUDO DA USINAGEM EM TORNEAMENTO DA SUPERLIGA À BASE DE
NÍQUEL PYROMET 31V**

Guaratinguetá

2011



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS E TECNOLOGIA

AUTORES: ÉLTON CARLOS BURIAN
RENANN PEREIRA GAMA

COLABORADOR: JÔNATAS PEREIRA

**O ESTUDO DA USINAGEM EM TORNEAMENTO DA SUPERLIGA À BASE DE
NÍQUEL PYROMET 31V**

Monografia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, obtenção de
graduação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá

2011

B95
8e Burian, Elton Carlos
Gama, Renann Pereira
O estudo da usinagem em torneamento da superliga à base de níquel
Pyromet 31v / Elton Carlos Burian, Renann Pereira Gama –
Guaratinguetá: [s.n], 2011.
58 f. : il.

Bibliografia: f. 55-57

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais –
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de
Guaratinguetá, 2011.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

1. Usinagem I. Gama, Renann Pereira II. Título

CDU 621.9

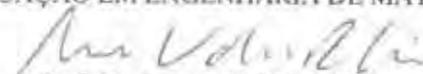
**O ESTUDO DA USINAGEM EM TORNEAMENTO DA SUPERLIGA A BASE DE
NÍQUEL PYROMET 31V**

AUTORES: ÉLTON CARLOS BURIAN
RENANN PEREIRA GAMA

COLABORADOR: JÔNATAS PEREIRA

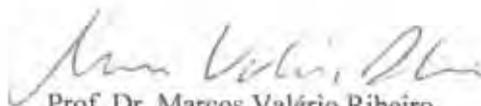
ESTE TRABALHO DE SÍNTESE FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **GRADUADO EM
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS



Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. Marcelino P do Nascimento
UNESP-FEG



Prof. Dr. Carlos Kiyari
UNESP-FEG

Dezembro de 2011



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS E TECNOLOGIA

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao nosso orientador Professor Dr. Marcos Valério Ribeiro, pela compreensão, competência, paciência, pelos conselhos dados e pela oportunidade de realizar este trabalho.

E demais pessoas que contribuíram para a execução deste trabalho.

BURIAN, E. C.; GAMA, R. P. **O estudo da usinagem em torneamento da superliga à base de níquel pyromet 31v**: Proposta de otimização do processo de usinagem da superliga à base de Níquel PYROMET 31V. 2011. 58 f. Trabalho de graduação em engenharia de materiais - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

A busca por materiais com propriedades e características (resistência ao desgaste, a oxidação, a corrosão, etc.) mais elevadas tem impulsionado pesquisas de vários materiais. Dentre os materiais que estão sendo pesquisados com tais propriedades e características estão as super ligas à base de níquel que tem um papel importante nas indústrias aeronáutica, automobilística, marinha, na produção de turbinas a gás e agora também em veículos espaciais, na engenharia de foguetes, aviões experimentais, reatores nucleares, plantas movidas a vapor, indústrias petroquímicas e muitas outras aplicações, pois além de possuírem as características e propriedades já mencionadas também possuem um excelente desempenho à altas temperaturas. A super liga à base de níquel estudada neste trabalho é a super liga Pyromet 31v normalmente utilizada na confecção de válvulas de exaustão em motores comuns e a diesel de alta potência por atender a requisitos como resistência mecânica e à corrosão em temperaturas de aproximadamente 815°C. O objetivo deste trabalho é gerar resultados para demonstrar informações mais específicas a respeito da real influência de recobrimentos, em ferramentas de corte, e dos fluidos de corte, no torneamento e assim promover a otimização da usinagem destas ligas. A super liga Pyromet 31v utilizada passou por torneamento, sendo este realizado com diversos parâmetros de usinagem como velocidades de corte, avanço, profundidade, em condições de Mínima Quantidade de Fluido (MQF), Fluido abundante, ferramentas de corte com recobrimento e sem recobrimento no início de sua vida de trabalho e com desgaste. Após o torneamento foram obtidas várias amostras de cavacos e da peça gerados durante o processo de usinagem, foi medida a rugosidade do material, posteriormente feita análises macroestruturais das ferramentas utilizadas a fim de detectar possíveis desgastes e análises microestruturais das amostras recolhidas sendo que para este último foi utilizado Microscopia Ótica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). Com este trabalho pode-se observar que em geral a aplicação de ferramentas de corte com recobrimento apresentam

maiores comprimentos usinados quando comparados as sem recobrimento. Com respeito à utilização de MQF notamos que esta prática apesar de ecologicamente correta não promoveu comprimentos usinados suficientes de forma a viabilizar a sua aplicação. Nas análises microscópicas dos cavacos foi possível a distinção dos grãos quando utilizadas ferramentas de corte mais novas (grãos equiaxiais) e quando utilizadas ferramentas de corte mais desgastadas (grãos não equiaxiais), também foi facilmente observada as zonas de deformação primária e secundária. Na análise microscópica das amostras da peça usinada foi detectada uma segunda fase já esperada (fase gama) caracterizada através do MEV e do EDS contendo altas frações de Titânio e Níobio.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem. Pyromet 31v. Ferramentas de Corte. Deformação. Caracterização.

Burian, E. C.; GAMA, R. P. **The study of turning machining of nickel base superalloy PYROMET 31V**: Proposal for optimization of the machining of nickel-based superalloy PYROMET 31V. 2011. 58 f. Graduation work in materials engineering - College of Engineering Campus Guaratinguetá, Paulista state University, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

The search for materials with higher properties and characteristics (wear resistance, oxidation, corrosion, etc.) has driven research of various materials. Among the materials that are being studied with such properties and characteristics are super alloys based on nickel which has an important role in the aeronautical, automotive, marine, production of gas turbines and now in space vehicles, rocket engineering , experimental aircraft, nuclear reactors, steam-powered plants, petrochemical and many other applications because besides having all the characteristics and properties mentioned above also have an excellent performance at high temperatures. The super alloy based on nickel studied in this work is the super alloy Pyromet 31v normally used in the manufacture of exhaust valves in common engines and diesel engines of high power by cater requirements such as mechanical strength and corrosion resistance at temperatures of approximately 815 ° C. The objective of this work is to produce results to demonstrate more specific information about the real influence of coatings on cutting tools and cutting fluids in turning and thus promote the optimization of the machining of these alloys. The super alloy Pyromet 31v was processed through turning, being performed with various machining parameters such as cutting speed, feed rate, depth in conditions of Minimum Amount of Fluid (MAF), abundant fluid, cutting tools with coating and without coating in early in his work life and with wear. After turning were obtained several samples of chips and the part generated during the machining process, was measured roughness of the material, subsequently made macrostructural analysis of the tools used order to detect possible wear and microstructural analysis of samples collected being that the latter was used for Optical Microscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). In this work can be seen that in general the application of cutting tools with coating have higher lengths machined when compared with the cutting tools without coating. Regarding the use of MAF we note that this practice despite of ecologically correct not promoted lengths machined sufficient in order to facilitate its implementation. In the microscopic analysis of the chips was possible to distinction the grain when used cutting



tools more new (symmetric grain) and when used more worn cutting tools (grains not symmetric), was also easily observed areas of primary and secondary deformation. In the microscopic analysis of samples the workpiece was detected a second phase as expected (phase gamma) characterized by SEM and EDS containing high fractions of titanium and niobium.

KEYWORDS: Machining. Pyromet 31v. Cutting Tools. Deformation. Characterization.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos do trabalho	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Desenvolvimento e aplicações de ligas à base de níquel.....	14
2.2 Usinagem de ligas à base de níquel	17
2.3 Formação do cavaco	19
2.4 Refrigeração/lubrificação no corte do metal	22
2.5 Revestimentos em ferramentas de corte	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Material.....	25
3.2 Preparação de amostra	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1 Resultados obtidos a partir da usinagem	27
4.1.1 Desgaste da ferramenta.....	27
4.1.2 Comprimento de peça usinada e rugosidade	28
4.2 Análise da influência da aplicação de fluido	30
4.3 Resultados obtidos a partir da preparação dos cavacos.....	34
4.3.1 Análise microestrutural.....	34
4.3.2 Análise dos cavacos formados.....	39
4.4 Resultados obtidos a partir da preparação das amostras laminada a quente e solubilizada.....	44
4.4.1 Análise microestrutural.....	44
4.4.1.1 Amostra Laminada a Quente	45
4.4.1.2 Amostra Solubilizada	48
5 CONCLUSÕES	54
6 REFERÊNCIAS	55



1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais metálicos está intimamente associado aos avanços tecnológicos. A necessidade de materiais mais resistentes ao desgaste, mais tenazes, com maior resistência à corrosão e oxidação, tem sido o impulso para a pesquisa de muitos materiais, com estas características e propriedades. Originalmente, para estes tipos de aplicações, são utilizados os aços inoxidáveis e aços ligados, porém a exigência de temperaturas de operação cada vez maiores, maiores potências e motores mais eficientes, impulsionaram o desenvolvimento das ligas refratárias ou “superligas”.

As ligas à base de níquel têm um papel extremamente importante na indústria aeronáutica, automobilística, marinha, na produção de turbinas a gás e agora também em veículos espaciais, na engenharia de foguetes, aviões experimentais, reatores nucleares, plantas movidas a vapor, indústrias petroquímicas e muitas outras aplicações. Sua vasta utilização nestas áreas deve-se principalmente ao seu desempenho em altas temperaturas, que é dado por algumas de suas características intrínsecas, como: alta resistência mecânica em temperaturas elevadas, alta resistência à fluidez, alta resistência à fadiga e boa resistência à corrosão (EZUGWU et. al., 1999; SILVA et. al., 2001).

Dentre os materiais que atendem ao requisito resistência mecânica e à corrosão em temperaturas de aproximadamente 815°C está a superliga à base de níquel *Pyromet 31V*. Esta liga é comumente utilizada na confecção de válvulas de exaustão em motores comuns e a diesel de alta potência, nas quais é exigida uma grande resistência a sulfetação, à corrosão e boa resistência à fluência.

As ligas de níquel possuem uma composição química com elevado teor de elementos de liga, os quais são responsáveis por suas propriedades mecânicas e térmicas, porém estas características dificultam demasiadamente sua usinagem, levando a ocorrência de alguns problemas durante o processo (SILVA et. al., 2001).

O termo “superligas” descreve uma ampla variedade de ligas à base de níquel, cobalto e ferro, que são desenvolvidas especificamente para aplicações que exigem propriedades químicas e mecânicas excepcionais a elevadas temperaturas.

As ligas de níquel são endurecidas pela precipitação de $Ni_3(Al-Ti)$ fase (gama) e pela solução de elementos refratários na matriz, e a resistência mais alta à temperatura é obtida pelo aumento da fração de volume desta fase. Os materiais avançados incluem 55% de



fase (gama) para as ligas de metalurgia do pó e 70% para as ligas de cristal único (SILVA et. al., 2001).

De acordo com Ezugwu et. al., (2003), as principais dificuldades encontradas na usinagem destas ligas podem ser resumidas como:

- Elevada resistência e dureza à quente, causando deformação na ferramenta durante a usinagem;
- A matriz austenítica de liga de níquel promove um rápido endurecimento, fator de maiores causas do desgaste severo da ferramenta durante o processo;
- Presença de carbeto duros e abrasivos na microestrutura destas ligas leva a excessivos desgastes por abrasão, podendo levar a ferramenta à falha prematura;
- A baixa condutividade térmica destas ligas leva à concentração da temperatura de corte (aproximadamente 1000°C) na ferramenta, causando elevados gradientes térmicos;
- A soldabilidade do material da peça na aresta de corte da ferramenta forma uma aresta postiça de corte, comprometendo a integridade superficial da peça, assim como a ferramenta de corte.

É importante salientar que a alteração na superfície, tal como a tensão residual induzida durante a usinagem, pode resultar em distorções desfavoráveis à peça. Por esta razão, cuidados especiais devem ser tomados para assegurar a vida da ferramenta, a integridade superficial da peça usinada e o controle dos principais parâmetros de usinagem (SILVA et. al., 2001). Portanto, para se obter condições de usinagem satisfatórias, é necessário que se tenha um bom entendimento da microestrutura dos materiais envolvidos, dos efeitos sobre o comportamento das ferramentas de corte e sobre a eficiência dos processos de usinagem empregados (VIGNEAU, 1997).

1.1 Objetivos do trabalho

Os resultados deste trabalho devem demonstrar informações mais específicas a respeito da real influência de recobrimentos, em ferramentas de corte, e dos fluidos de



corte, no torneamento. Assim sendo, espera-se apresentar subsídios para promover a otimização da usinagem destas ligas.

Este plano de trabalho tem três objetivos principais, sendo eles:

- O estudo da influência da técnica de utilização de mínimas quantidades de fluido (MQF), para a otimização dos processos da usinagem por torneamento da liga à base de níquel *Pyromet 3IV*, fazendo uma comparação com as outras técnicas como o corte a seco (usinagem ecológica) e a utilização de fluido abundante;
- O estudo da influência de ferramentas de corte com recobrimento no processo de usinagem de uma liga de níquel *Pyromet 3IV*, relacionado as diferentes velocidades de corte e avanços. Por meio da comparação entre os resultados obtidos na usinagem com ferramentas de corte com e sem revestimento também será possível obter informações que otimizarão muitos processos de usinagem.
- Obtenção e análise da microestrutura do cavaco obtido com a ferramenta de corte no início e no final de sua vida útil. Além disto, obtenção e análise da microestrutura de uma amostra solubilizada e laminada a quente.

As rugosidades obtidas (R_a e R_y), os desgastes apresentados (VB) e suas respectivas progressões em relação ao tempo e ao comprimento de corte alcançado e a morfologia (microscopia) são as variáveis de resposta a serem analisadas.



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante o processamento mecânico de materiais metálicos, tão importantes quanto as propriedades de resistência mecânica e resistência à corrosão, são as propriedades da fabricação, como a soldabilidade e a usinabilidade. Produtos planos, por exemplo, frequentemente, passam por operações de soldagem ou estampagem na fabricação do produto final. Nesse caso, as propriedades de soldabilidade e estampabilidade são essenciais. Produtos não planos como barras, por outro lado, frequentemente, passam por operações de usinagem. De acordo com a escolha certa do material a ser usinado, assim como as ferramentas, fluidos de corte, equipamentos e condições de usinagem, é possível a obtenção de vantagens econômicas consideráveis; além disso, podem ser obtidos grandes aumentos de produtividade (BAKER, 1981; CHANDRASEKARAN, 1994; EZUDWU, 1990). Os custos e o tempo de produção podem ser significativamente reduzidos através da escolha certa dos parâmetros durante o processo.

Indústrias que fabricam componentes de motores com ligas de níquel e também de aços inoxidáveis especiais (válvulas automotivas), ligas de titânio (turbinas aeronáuticas), caracterizam-se por apresentarem um custo elevado na fabricação das peças usinadas, principalmente em relação ao custo hora/máquina. Por este motivo é interessante diminuir os tempos de usinagem das peças e aumentar o uso efetivo das ferramentas, pois o custo/hora nestas indústrias é mais elevado do que nas indústrias convencionais (LÓPEZ DE LACALLE et. al., 1998).

As máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) tiveram como objetivo inicial solucionar a usinagem de peças de grande complexidade e, posteriormente, vieram auxiliar na redução de tempos improdutivos, ou seja, no posicionamento e retirada da ferramenta. Contudo, a utilização destas máquinas só se torna economicamente viável quando for garantido seu emprego eficiente durante o processo de usinagem, ou seja, é necessário extrair das mesmas o máximo rendimento possível para garantir o retorno dos investimentos efetuados. A eficiência do processo de usinagem depende da utilização de dados de corte otimizados, atualizados e adequados às condições reais de trabalho (RIBEIRO, 2003).

2.1 Desenvolvimento e aplicações de ligas à base de níquel

Em torno de 50% das ligas utilizadas na indústria aeronáutica são à base de níquel. Elas apresentam maior resistência em relação ao seu peso, comparativamente ao aço. Ligas à base de níquel são ainda utilizadas para outras aplicações como na indústria naval, reatores nucleares, plantas petroquímicas, equipamentos para processamento de alimentos e dispositivos para controle de poluentes (Ezugwu, 2003).

Ligas resistentes ao calor, com alto ponto de fusão, constituem a maioria dos materiais utilizados na fabricação de componentes de turbinas aeronáuticas. Estas ligas exóticas podem ser agrupadas em quatro grandes categorias: ligas à base de níquel; ligas à base de cobalto; ligas à base de ferro (por exemplo, ligas de alto teor de cromo); e ligas de titânio. A Figura 1 mostra que 2/3 da produção de superligas é consumido pela indústria aeroespacial para a fabricação de turbinas e componentes associados, principalmente nos terminais das turbinas onde se encontram as mais altas temperaturas.

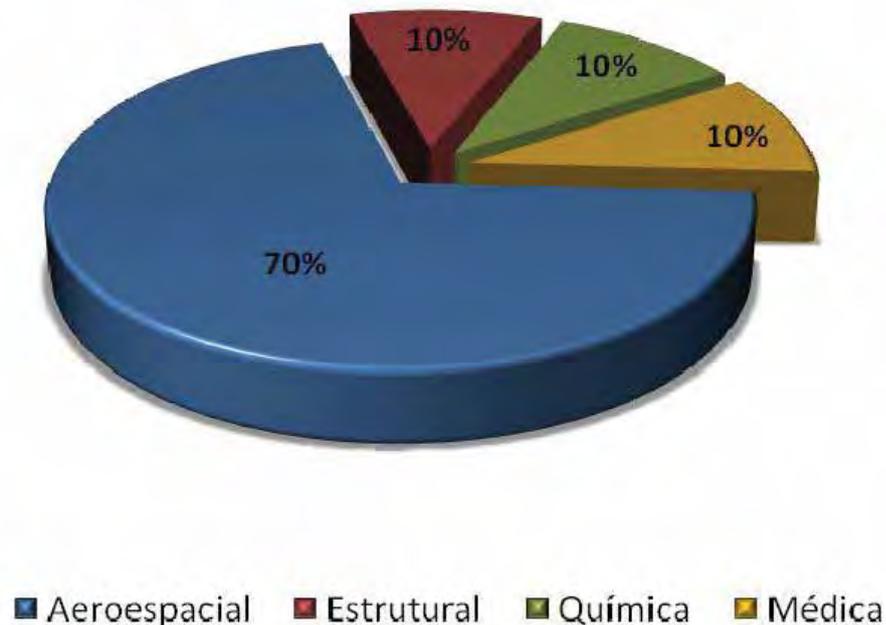


Figura 1 – Consumo de superligas (Seco Technical Guide - Modificada)

As ligas à base de níquel são manufaturadas a partir de forjados (barras, chapas) e fundidos. Ligas à base de níquel forjado atualmente são desenvolvidas com 80% de níquel e 20% de cromo. Sua primeira aplicação, além das resistências elétricas, foi em paletas de turbinas, no início dos anos 40, por sua admirável resistência à oxidação e resistência



mecânica. Essas características da liga à base de níquel foram melhoradas consideravelmente pela adição de uma pequena quantidade de titânio e alumínio em sua composição. A primeira liga à base de níquel nesta concepção foi a Nimonic 80, a qual foi posteriormente modificada para a Nimonic 80A. Mais tarde foi estabelecido que com a adição de 20% de cobalto resultaria em uma outra liga, a Nimonic 90, a qual suportaria em torno de 50 °C a mais em temperatura que a Nimonic 80A. Waspaloy e M-252 são duas importantes ligas à base de níquel forjada, as quais foram desenvolvidas, respectivamente pela Pratt and Whitney e General Electric Company no fim de 1940 (EZUDWU, 2003).

A escolha do material adequado para a aplicação é crucial para o desempenho e confiabilidade de uma válvula de motor. A mudança extrema de temperatura que ocorre nas válvulas da câmara de combustão e na área coletora pode provocar fadiga térmica. A capacidade do material de resistir a estas drásticas variações térmicas é crucial para a vida útil da válvula. Dentre os materiais que atendem ao requisito resistência mecânica e à corrosão em temperaturas de aproximadamente 815°C está a liga à base níquel *Pyromet 3IV*. A Tabela 2 mostra uma lista crescente de materiais que estão sendo utilizados na produção destas válvulas (VALVES TECH, 2009).

Segundo Ezugwu et. al. (1999), os elementos de liga, suas proporções percentuais e a microestrutura das ligas à base de níquel são caracterizadas e reforçadas por alguns elementos que tendem a melhorar sua microestrutura ou fase. As ligas à base de níquel possuem uma matriz constituída de uma fase austenítica, contínua, cúbica de face centrada (CFC) chamada fase gama, que usualmente contém um alto teor de elementos em solução como o cobalto, molibdênio e tungstênio. Alumínio e titânio são adicionados em iguais proporções para precipitar em elevado volume de fase primária gama, que invariavelmente precipitam-se coerentemente com a matriz austenítica. Carbono é adicionado a níveis de aproximadamente 0,5 a 2,0% para a formação de carbeto na forma primária "MC". Durante o tratamento térmico e em serviço, este se decompõe, gerando carbeto como " $M_{23}C_6$ " e o " M_6C ", nos contornos de grão.

Tabela 1 - Materiais utilizados na confecção de válvulas

X3	Liga de aço (Cromo/ Silício)	Válvulas de admissão
Y6	Liga de aço (Cromo/Silício)	Válvulas de admissão
EV8	Aço Inoxidável (Cromo/Níquel)	Ingestão em corridas & válvula de exaustão
EV8-Z18	Aço inoxidável (Cromo/Níquel) Tungstênio	Ingestão em corridas & válvula de exaustão
EV4-N12	Aço inoxidável de alta temperatura	Ingestão turbo & válvula de exaustão
VV54/EV16	Aço inoxidável de alta temperatura	Válvula de exaustão de corrida
VV54/Nb/W	(Base de Níquel + Nióbio + Tungstênio)	Válvula de exaustão de corrida
VV50	Aço inoxidável de alta temperatura	Válvula de exaustão de corrida
IN-751	Liga Inconel 1800° F	Ingestão turbo & válvula de exaustão
NICKELVAC-N80A	Superliga (Base de Níquel) 1850° F	Válvula de exaustão de corrida
NIMONIC 90	Superliga (Base de Níquel) 2000° F	Válvula de exaustão turbo
NICKEL VAC 600	Superliga (Níquel/Cromo) 2200° F	Válvula de exaustão de corrida
NICKEL VAC 800	Superliga (Níquel/Cromo) 2400° F	Válvula de exaustão de corrida
NIMONIC 263	Superliga (Base de Níquel) 2600° F	Válvula de exaustão turbo & nitro
WASPALLOY	Superliga (Base de Níquel) 2700° F	Válvula de exaustão turbo & nitro
ASTELLOY 75	Superliga (Base de Níquel)	Válvula de exaustão turbo
PYROMET	Superliga (Base de Níquel)	Válvula de exaustão turbo
PYROMET 31 V	Superliga (Base de Níquel)	Válvula de exaustão turbo & nitro
PYROMET CTX-909	Superliga (Alto Níquel / Baixa Expansão)	Válvulas de admissão
PYROMET A286	Superliga (Alto Níquel)	Aplicação turbo - compacto esporte
NCF 3015	Superliga (Níquel + Cromo + Titânio)	Válvula de exaustão de corrida turbo
STELLITE	(Cromo/Tungstênio)	Dicas de aplicação

Adaptado para o português da fonte VALVES TECH, 2009.

As técnicas de tratamento térmico são utilizadas para a formação da fase primária gama nos contornos de grão, elevando a tensão de ruptura do material. As propriedades superiores apresentadas pelas superligas foram estudadas por Shuangqun et. al. (2004), demonstrando que para diferentes temperaturas de envelhecimento ocorrem alterações significativas da microdureza para as superligas. No entanto, para tempos de envelhecimento diferentes, para uma mesma temperatura, esta alteração ocorre de maneira bem menos significativa, o que implica que as propriedades desta liga podem ser mantidas durante longos períodos de trabalho.



2.2 Usinagem de ligas à base de níquel

A usinabilidade pode ser definida como o grau de dificuldade de usinagem de um determinado material, segundo Weingaertner (1994), a usinabilidade de metais é, normalmente, analisada com relação a quatro critérios: qualidade superficial, formação de cavacos, vida da ferramenta e forças de corte. Nesse aspecto, a usinabilidade exerce forte influência sobre a produtividade e o custo final de produção e serve como parâmetro para reforçar a necessidade da preocupação não só de materiais com propriedades mecânicas, físicas e químicas superiores, mas também com o comportamento destes materiais quando submetidos a algum tipo de processo de fabricação. A idéia é que eles sejam passíveis de sofrer operações de processamento pelas técnicas existentes. Tanto do ponto de vista prático quanto econômico.

Segundo Jeelani e Ramakrishnan (1985), na usinagem de metais o prejuízo produzido na região superficial é muito diferente para cada material. Esse prejuízo na região superficial consiste na deformação plástica, sendo resultado da interação entre a ponta de ferramenta e a superfície da peça. A região da ponta inclui a aresta de corte, o quebra cavaco e a superfície de folga da ferramenta.

A resistência do material de uma peça aumenta quando este é deformado plasticamente. O crescimento da resistência depende da taxa de deformação e da capacidade de encruamento (KOPAC e BAHOR, 1999). Materiais com alta taxa de encruamento requerem muita energia para formação do cavaco (valor alto da pressão específica de corte – baixa usinabilidade).

A baixa usinabilidade das ligas à base de níquel impõe uma extrema tensão térmica e mecânica à aresta de corte, levando a deformações plásticas e acelerados desgastes das ferramentas de corte. As falhas típicas observadas quando se usina estas ligas são: desgaste de flanco, desgaste de cratera, falha catastrófica, entre outras. As ferramentas usadas para a usinagem destas ligas devem possuir adequada dureza a quente devido às altas temperaturas geradas a condições de alta velocidade de corte (EZUGWU, 2003).

As falhas nas peças usinadas ocorrem por fluência, fadiga e/ou por corrosão sob tensão. Tais falhas começam por pequenas trincas na superfície das peças e são propagadas para o centro ocorrendo quebra súbita. Estas falhas dependem da ferramenta usada, da força da ferramenta na superfície, do tipo de corte (ortogonal ou plano) e da temperatura do cavaco.



A superfície usinada do material contém tensões residuais, onde sua grandeza e natureza dependem dos parâmetros de corte adotados.

No torneamento, na zona de contato entre a ferramenta e a peça, criam-se elevadas pressões e temperaturas. Na usinagem de ligas resistentes a altas temperaturas, devido à sua reduzida condutibilidade térmica, a condução de calor para o cavaco ocorre em pequena escala (WITTING, 2002).

Dessa forma, essas ligas só podem ser usinadas com velocidades reduzidas, sendo que sua usinagem é dificultada pelo encruamento e formação de aresta postiça de corte. Além disto, devem ser consideradas a elevada tenacidade do material e a formação desordenada de cavacos em forma de fita e espiral.

Um exemplo de usinagem de ligas resistentes a altas temperaturas foi demonstrado por Ezugwu e Wang (1997), onde, na usinagem da liga Ti-6Al-4V, cerca de 80% do calor gerado não pode ser removido com o fluxo do cavaco, ficando este calor retido na ferramenta. Para efeito comparativo, cerca de 50% do calor gerado é absorvido na ferramenta com a usinagem do aço.

Quase todos os processos de manufatura e alteração metalúrgica feitos para melhorar o desempenho e as propriedades em temperaturas elevadas, tornam mais difíceis a usinagem dessas ligas. Quando a resistência a altas temperaturas é aumentada, a liga torna-se mais dura e refratária com relação à temperatura de corte. Como resultado, isto gera o aumento do esforço na aresta de corte, podendo causar quebras, lascamentos e deformações.

Segundo Witting (2002) a usinagem convencional das ligas resistentes a altas temperaturas é feita com ferramenta de metal duro, classe K, com tempos de vida útil relativamente pequenos, em virtude das sobrecargas térmica e mecânica. Arestas de corte com cantos vivos possibilitam o cisalhamento fácil dos cavacos, reduzindo a tendência ao encruamento do material.

A ferramenta de corte com revestimento adequado pode ter sua vida útil aumentada. O mercado dispõe de classes de metal duro com revestimentos à base de óxido de alumínio (Al_2O_3), nitreto de titânio (TiN), carbeto de titânio (TiC), além de revestimento de nitreto de alumínio-titânio ($TiAlN$). Comparando-se diferentes revestimentos com o metal duro, o óxido de alumínio é o mais resistente contra a oxidação, porém sua dureza é reduzida. O carbeto de titânio apresenta elevada dureza, a qual é reduzida em elevadas temperaturas. A relação equilibrada entre dureza e resistência ao desgaste por calor torna o nitreto de



alumínio-titânio o material mais indicado como revestimento, para usinagem de ligas à base de níquel.

Tanto as ferramentas de metal duro recobertas através de deposição física de vapor (PVD) quanto por deposição química de vapor (CVD) são utilizadas na usinagem de ligas à base de níquel. Ferramentas de metal duro com multicamadas trabalham melhor, em termos de vida da ferramenta, do que aquelas com uma simples camada (EZUGWU, 2000; JAWAID, 1999).

A formação de cavaco influencia diversos fatores ligados a usinagem, tais como: desgaste da ferramenta, esforços de corte, calor gerado durante a usinagem, penetração do fluido de corte, dentre outros. Dessa forma, estão envolvidos aspectos econômicos, qualidade da peça, segurança do operador, utilização correta da máquina-ferramenta, etc. (DINIZ, COPPINI e MARCONDES, 1999). Além disto, a morfologia micro e macroestrutural final do cavaco podem revelar indícios das dificuldades encontradas no processo de corte.

2.3 Formação do cavaco

A análise cuidadosa da face interior do cavaco que esteve em contato com a ferramenta mostra a transformação que o cavaco sofre devido à alta temperatura local. A temperatura, influenciando no desgaste das ferramentas, limita a aplicação nos processos de corte com velocidade mais alta, fixando, portanto, condições máximas de produtividade e duração das ferramentas. A Figura 2 demonstra um exemplo dos percentuais de calor e sua distribuição, assim como as curvas de distribuição de temperatura.

Verificou-se, experimentalmente, que os trabalhos provenientes da deformação da raiz do cavaco durante a usinagem, do atrito entre o cavaco e a ferramenta, e do atrito entre a peça e a ferramenta, são transformados em calor. Desta maneira, a temperatura da ferramenta de corte se elevará de acordo com o calor específico e a condutibilidade dos corpos em contato, além das dimensões das secções onde o calor escoará.

Em geral, a formação do cavaco, nas condições normais de usinagem com ferramentas de metal duro ou de aço rápido, se processa da seguinte forma: o primeiro passo é o recalque do material da peça contra a face da ferramenta. O material recalcado sofre deformação plástica que aumenta progressivamente até atingir a tensão de cisalhamento necessária ao deslizamento, sem que haja com isso uma perda de coesão entre a porção de

material recalçado e a peça. Inicia-se então o deslizamento do material recalçado segundo os planos de cisalhamento. Os planos instantâneos definem uma região entre a peça e o cavaco denominada região de cisalhamento. Com a continuidade da penetração da ferramenta (movimento relativo) ocorre ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo das condições de usinagem e ductilidade do material. Para materiais altamente deformáveis, a ruptura se realiza somente nas imediações da aresta cortante da ferramenta, o cavaco originado é denominado cavaco contínuo. Para os materiais frágeis, origina-se o cavaco de cisalhamento ou de ruptura. Com o desenvolvimento desse processo ocorre o escorregamento da porção de material deformado e cisalhado (cavaco) sobre a face da ferramenta. O processo se repete, sucessivamente, com o material adjacente (CIMM, 2009). A representação deste processo pode ser visto na Figura 3.

Os fatores que influenciam os diferentes tipos e formas de cavaco podem ser vistos na Figura 4.

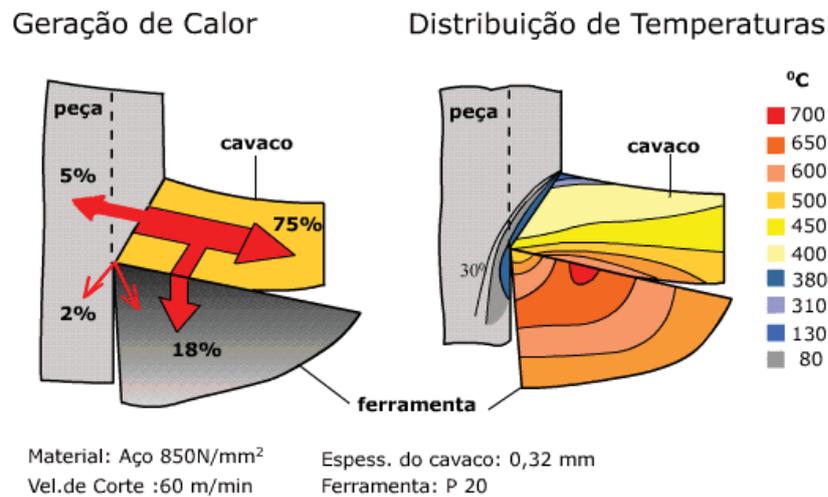


Figura 2 – Exemplo de calor gerado e distribuído na usinagem de aço (CIMM, 2009)

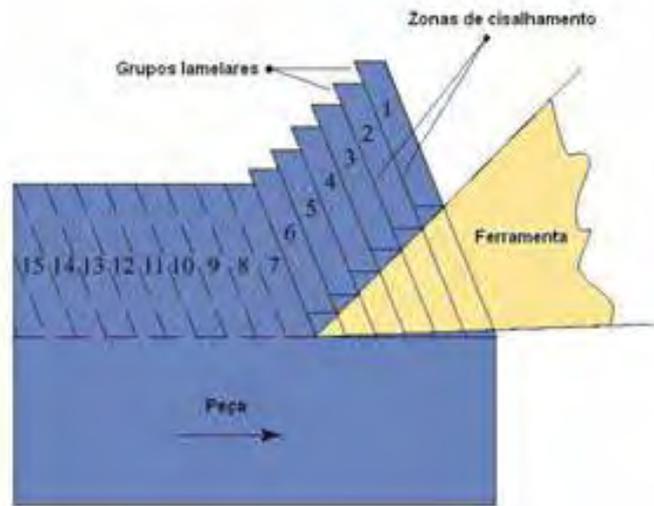


Figura 3 – Mecanismo de formação do cavaco (RIBEIRO, 2009)



Figura 4 – Fatores que influenciam a forma final do cavaco (CIMM, 2009)



2.4 Refrigeração/lubrificação no corte do metal

No passado era comum que oficinas se desvencilhassem de seus fluidos metalúrgicos assim que eles mostrassem sinais de degradação e diminuição de desempenho. Esta prática resultou na diminuição de regulamentos relacionados ao meio ambiente, já que era simplesmente mais fácil e mais econômico “se livrar e reabastecer” do que administrar o fluido, prolongando sua vida útil e prevenindo a poluição (JARRARD, 1993).

Com a chegada da regulamentação ambiental mais rigorosa, o limite de descarga de esgoto sanitário mais estrito, o aumento do preço do fluido e o surgimento de questões de responsabilidade ambiental adicionais, o meio ambiente e os benefícios econômicos associados com o aumento da vida do fluido tornaram-se muito mais aparentes (HYDRICK, 1994; LUKAS, 1994). O uso adequado de fluidos tornou-se então uma alternativa ainda mais atraente na prevenção da poluição, tendo em vista que o aumento na automatização da indústria metalúrgica possibilitou que os custos dos fluidos fossem mantidos a um nível aceitável. Estes fatores combinados levaram a substituição da rotina do “se livrar e reabastecer” para um programa de gerenciamento de fluidos. Assim sendo, a escolha dos fluidos de corte em processos de usinagem mostra-se complexa, pois, além da eficiência técnica para a usinagem dos materiais, os mesmos não deverão causar poluição ao meio ambiente (SOKOVIC, 1997). Isto exige inovação tecnológica aplicada aos fluidos de corte, solução de problemas ainda não resolvidos e até mesmo, implemento cultural e de aprendizagem da parte do operador dessas máquinas.

Emulsões à base de óleo sintético e água têm sido usadas, e apresentam melhores resultados para o processo de usinagem, devido aos efeitos de refrigeração e de lubrificação, que tornam superior a qualidade das superfícies usinadas, aumentando a vida da ferramenta (MACHADO, 1997).

Segundo Kuroda (2006) dentre as muitas vantagens dos óleos vegetais sobre os óleos minerais, talvez a principal seja o fato de a matéria-prima utilizada ser renovável. Como os óleos minerais, os óleos vegetais também podem ser descartados por meio de queima, mas são menos nocivos ao meio-ambiente e apresentam aplicações mais variadas. A única desvantagem observada na utilização de óleos vegetais integrais em substituição aos óleos minerais integrais é o preço inicial de aquisição, fator este largamente compensado ao se



verificar os ganhos obtidos na vida das ferramentas e redução de consumo do produto. O óleo deve ser encarado como uma ferramenta líquida, que justifica o investimento inicial.

Uma tendência que tem sido observada na última década refere-se a pesquisas que tiveram como objetivo restringir ao máximo o uso de fluidos refrigerantes e/ou lubrificantes na produção metal-mecânica. Para que isto ocorra, duas técnicas têm sido intensamente experimentadas: o corte completamente sem fluido (usinagem ecológica) e o corte com mínima quantidade de fluido (MQF), ou seja, quase seco.

A idéia de usinagem quase a seco é borrifar uma quantidade mínima de refrigerante e/ou lubrificante sobre a aresta de corte (MASON, 2001). Esta técnica reduz o atrito, pela lubrificação, no ponto de contato entre a ferramenta e a peça. A quantidade de lubrificante usado é tão pequena que não há problema de descarte de lubrificante. Frequentemente, uma mistura ar-óleo é bombeada através da ferramenta diretamente na zona de corte, as vantagens incluem um baixo consumo de fluido, cavacos secos, nenhum descarte de refrigerante e ar mais limpo.

2.5 Revestimentos em ferramentas de corte

Vários são os fatores que influenciam na qualidade superficial da peça. A produtividade desejada, vida útil da ferramenta e sua resistência, são características que estão diretamente ligadas ao seu acabamento superficial. A operação superficial na peça é afetada pelos parâmetros do processo. Quando estes parâmetros são escolhidos sem levar em conta os elementos citados acima, então existe a possibilidade de haver um desgaste mais rápido da ferramenta de corte, ou até mesmo a fratura da mesma causando danos e prejuízos para as empresas que destas se utilizam (Thomas, 1982).

De acordo com Gokkaya et al. (2004) o efeito de revestimentos em ferramentas de corte e das velocidades das mesmas no processo de usinagem possui importância bastante relevante para um bom acabamento superficial.

As ligas à base de Níquel, que são objetos desse estudo, como indicado acima são materiais particularmente, difíceis de usinar. Geralmente, esta dificuldade aumenta com o aumento do teor de elementos de liga e o que se observa é o intenso desgaste das ferramentas com baixa qualidade de acabamento superficial, com péssima característica de saída de cavaco (quebra), causando congestionamento no centro de usinagem e a baixa velocidade de



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS E TECNOLOGIA

corte gerando a baixa produtividade (Ezugwu 1999). Por isso, normalmente, são utilizadas ferramentas de corte de metal duro. As superligas à base de níquel têm uma tendência a encruar e retêm a maior parte da força de corte, durante a usinagem. Isto ocasiona calor elevado na interface ferramenta de corte/peça e, conseqüentemente, um maior desgaste da ferramenta de corte. Uma alternativa tem sido o uso de revestimentos, os quais proporcionam aumento na resistência ao desgaste e à deformação da ferramenta de corte [Ezugwu 1999].



3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material

A superliga à base de níquel *Pyromet 31V*, utilizada nos ensaios de usinagem, foi produzida pelo processo de laminação a quente, com dureza final entre 41,5 e 42,5 HRC. A Tabela 2 apresenta a composição aproximada da liga utilizada nos ensaios.

Tabela 2 - Composição provável da superliga de níquel *Pyromet 31V* (Internet:Cartech)

COMPOSIÇÃO	Ni	Cr	Fe	Ti	Al	Nb	Mn	Si	S	Mo	B	P	C
PYROMET 31V (SAE HEV8)	57,0	22,7	Rem. *	2,3	1,3	0,85	0,2 Máx.	0,2 Máx.	0,015 Máx.	2,0	0,005	0,015 Máx.	0,04
*Rem.: Remanescente													

A partir dos dados da Tabela 6 no apêndice obteve-se os cavacos que foram produzidos com velocidades de corte diferentes (extremos). Foi cortada uma amostra da liga solubilizada e outra da laminada a quente, seguindo com o embutimento para que estas pudessem ser preparadas por lixamento e polimento com posterior ataque, para que por fim pudesse ser obtida sua micrografia.

3.2 Preparação de amostra

A preparação das amostras para microscopia ótica é uma prática corrente e muito bem conhecida. Ela se presta para investigação de metais cuja estrutura se quer conhecer. Uma preparação cuidadosa poderá nos fornecer informações importantes a respeito do comportamento mecânico do material sem que muitas vezes tenhamos que nos dedicar a outros testes muito mais trabalhosos e caros. Assim, para fazer uma investigação do metal a fim de ter uma idéia das estruturas resultantes do processo de fundição, tratamento mecânico ou tratamentos térmicos prévios, esta será uma importante ferramenta. De qualquer maneira os passos mais comuns nesta prática estão citados a seguir:

- Retirada da amostra
- Embutimento



- Lixamento
- Polimento
- Ataque químico

Embora algumas destas etapas possam não ser necessárias de acordo com o detalhe que se queira observar, explicaremos a seguir cada uma delas para que se tenha uma melhor idéia de seus significados. Salientamos, entretanto, que as diferenças encontradas referem-se basicamente ao tamanho do detalhe que irá ser observado e desta maneira a preparação pode ser subdividida em micrográfica, a qual geralmente engloba todas as etapas citadas, macrográfica, que poderá dispensar as etapas de embutimento e polimento. Isto é possível porque na macrografia são observados detalhes grandes como bolhas, rechupes e estrutura dendrítica de fundição ou ainda linhas de deformação oriundas de um processo de conformação mecânica. Estes detalhes normalmente poderão ser observados a olho nu ou com pequeno aumento (até 100 vezes). Na micrografia o tamanho do detalhe é menor e neste caso poderão ser observadas estruturas oriundas de tratamentos térmicos tais como fases, tamanho de grão e descarbonetação.

Neste trabalho foram cortadas duas amostras, sendo uma da liga solubilizada e outra da laminada a quente, seguindo com o embutimento com resina Epóxi dura de alta resistência *PANTEC* para que estas pudessem ser preparadas por lixamento e polimento com posterior ataque, para que por fim, fossem obtidas suas micrografias. Neste trabalho não foi feita a macrografia. O lixamento ocorreu com lixas de SiC e granulometria 100, 220, 320, 400, 600, 1000, 1200 e 2000. Após isto, foi feito o polimento com OP-S Suspension *STRUERS*, e em seguida feito o ataque. A mistura utilizada no ataque foi HCl + HNO₃ + H₂SO₄ (ácido clorídrico, ácido nítrico e ácido sulfúrico) na proporção de 92:5:3 respectivamente. Este ataque foi feito na temperatura ambiente e após três tentativas mal sucedidas, o melhor tempo encontrado para a amostra solubilizada foi 55 segundos e para a laminada a quente foi 48 segundos.

Por fim foram analisadas as imagens no microscópio Epiphot da Nikon, com várias ampliações. As imagens podem ser vistas na discussão dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados obtidos a partir da usinagem

4.1.1 Desgaste da ferramenta

Devido às características do material usinado como elevada resistência a altas temperaturas, a presença de carbeto, encruamento quando trabalhado e a baixa condutividade térmica dentre outros, responsáveis pelo desgaste elevado da ferramenta, já eram esperados reduzidos comprimentos usinados.

A Figura 5 apresenta o aspecto do desgaste encontrado nas ferramentas de metal duro revestida. De um modo geral, o desgaste gerado nas ferramentas de corte quando se trabalha com ligas à base de níquel não são provenientes de um único mecanismo de desgaste, mas sim de uma combinação de vários deles. Ou seja, os vários fatores como alta temperatura, alta resistência do material da peça, alta deformação plástica, endurecimento da camada superficial durante a usinagem, alta tensão na interface do cavaco-ferramenta e cavacos abrasivos, geram este tipo de desgaste.

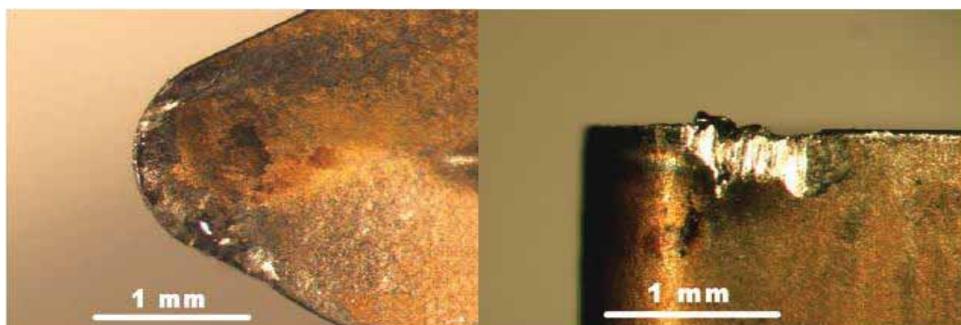


Figura 5 – Aspecto do desgaste na ferramenta de metal duro recoberta TNMG 160408-23 classe 1005 (32X)

Os aspectos do desgaste ocorrido na ferramenta sem cobertura podem ser encontrados na Figura 6. Verifica-se que, ao contrário do ocorrido com ferramentas recobertas, a característica do desgaste é predominantemente por abrasão e difusão, em maior intensidade na ponta da ferramenta do que em sua superfície de saída ou folga, além do efeito de craterização na superfície de saída do material. A ausência de um recobrimento teve grande influência nos comprimentos de corte obtidos, conforme será apresentado posteriormente.

Os cavacos formados caracterizam-se por serem helicoidais de tamanho médio a longo, com casos não raros de formação de cavaco duplo. Os cavacos longos por sua vez

prejudicam a refrigeração impedindo a penetração de forma eficiente do fluido refrigerante. Nas ferramentas sem recobrimento os cavacos gerados foram longos e helicoidais e, freqüentemente se enrolavam na peça prejudicando o acabamento superficial.

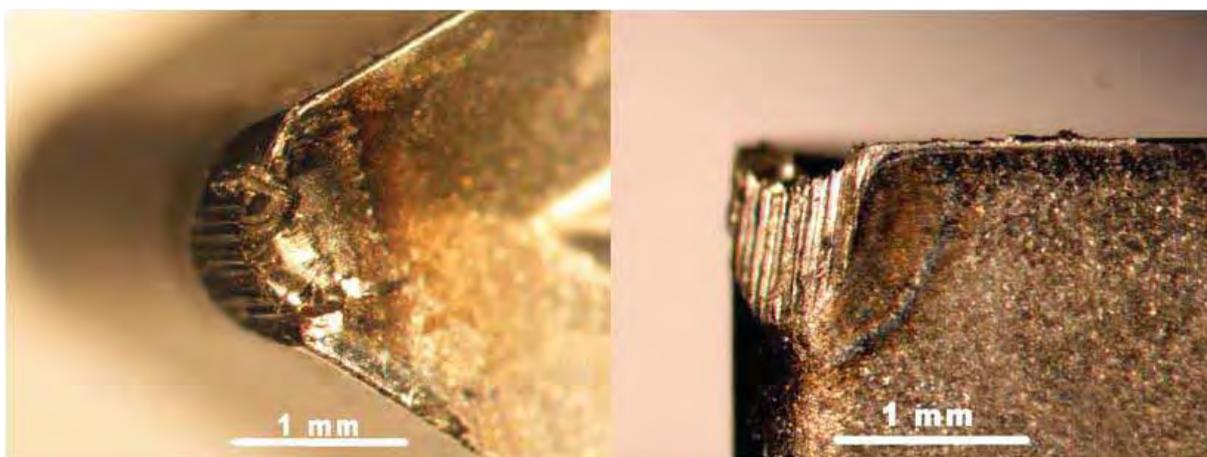


Figura 6 – Aspecto do desgaste na ferramenta de metal duro sem recobrimento TNMG 160408-23 H13A (32x)

4.1.2 Comprimento de peça usinada e rugosidade

Para efeito de comparação da influência do recobrimento em relação aos parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) no acabamento superficial da peça, esta análise foi feita somente para peças usinadas na condição de fluido abundante.

Nas ferramentas recobertas observa-se uma tendência de melhora no comprimento usinado, tanto para as velocidades de 75 m/min como de 90 m/min, em relação às ferramentas sem cobertura. O valor máximo de comprimento usinado para este caso tanto para a velocidade de 75 m/min quanto para 90 m/min foi com $f = 0,15$ mm/rot. Conforme o avanço diminuía, o valor do comprimento usinado aumentava, exceto para o caso de $f = 0,12$ mm/rot em que o comprimento usinado diminuiu. Os valores apresentados no Gráfico 1 demonstram o quão significativo é o recobrimento da ferramenta na usinagem de ligas à base de níquel, em que foi possível a obtenção do comprimento máximo de 926,8 m para uma velocidade 90m/min contra apenas 162 m para esta mesma velocidade com uma ferramenta sem recobrimento.

Ao contrário dos resultados apresentados pela usinagem com ferramenta recoberta, a ferramenta sem recobrimento teve piores resultados com o aumento da velocidade de corte de 75 m/min para 90 m/min.

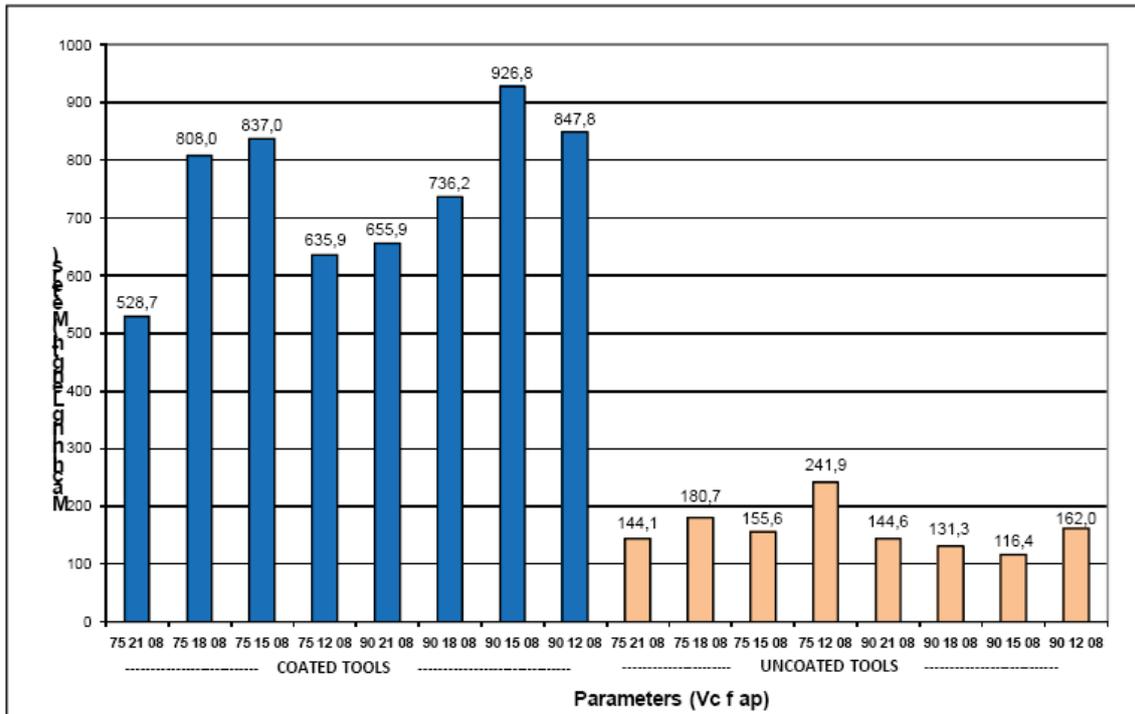


Gráfico 1 – Comprimento usinado (metros) na liga Pyromet 31v com ferramentas recobertas e sem cobertura

O Gráfico 2 apresenta os valores da rugosidade média (Ra) medida após VB atingir o valor definido de 0,5 mm.

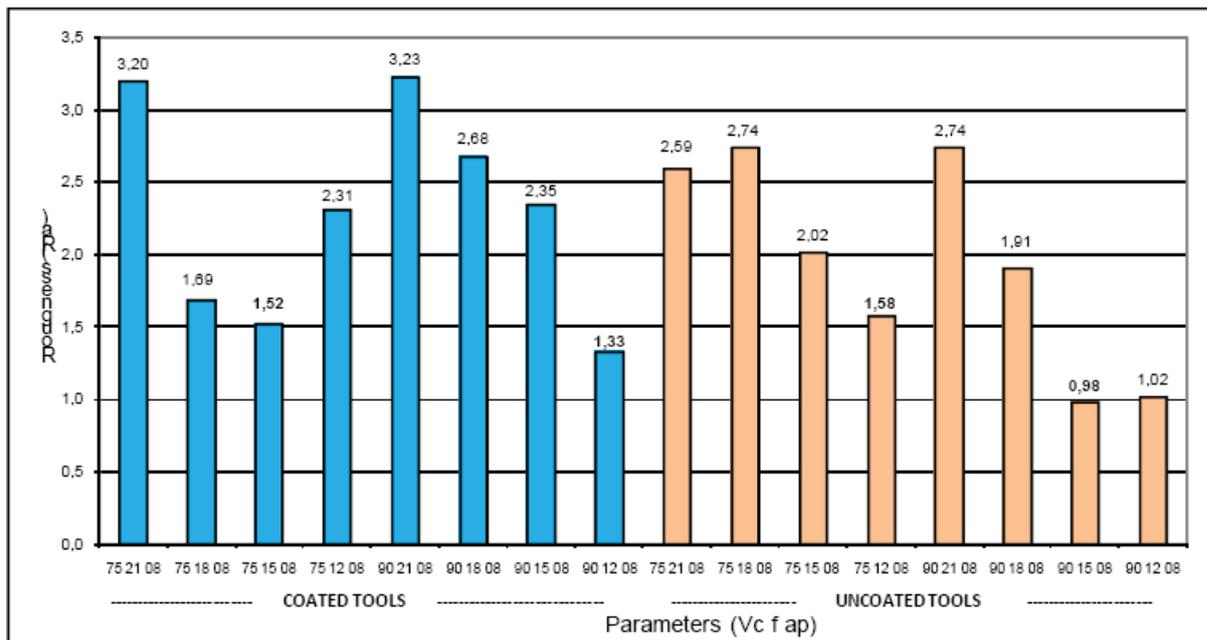


Gráfico 2 – Rugosidade (Ra) da liga de níquel Pyromet 31v na usinagem com ferramentas recobertas e sem recobrimento

Para a ferramenta com recobrimento verifica-se que o processo com os parâmetros (Vc, f, ap) que obtiveram maior comprimento usinado para a velocidade de 75 m/min é o mesmo que obteve melhor acabamento superficial (menor rugosidade). O mesmo não ocorreu para a velocidade de 90 m/min que obteve menor Ra para um avanço de 0,12 mm/rot. As ferramentas sem recobrimento apresentaram os melhores resultados para os menores avanços de corte. Considerando os dois tipos de ferramentas de corte percebe-se que os valores finais da rugosidade média não apresentaram valores percentualmente tão diferentes como ocorrido com o comprimento usinado.

4.2 Análise da influência da aplicação de fluido

A seguir será apresentado um comparativo entre os resultados obtidos na usinagem da superliga de níquel Pyromet 31V laminada à quente, com fluido abundante e com mínima quantidade de fluido (MQF). Os parâmetros selecionados foram baseados no comprimento usinado. Visando otimizar a análise foram selecionados apenas os maiores valores de



comprimento usinado nas duas velocidades, tanto para ferramentas recobertas como para as ferramentas sem recobrimento.

O Gráfico 3 a seguir demonstra o volume de cavaco removido em função do tipo de aplicação de fluido (MQF ou abundante). O volume de cavaco removido pode ser encontrado a partir da equação (1):

$$V = \frac{a_p \cdot L_f \cdot \pi \cdot D}{1000} \quad (1)$$

Onde:

a_p = profundidade de corte (mm)

L_f = comprimento do corpo-de-prova

D = diâmetro do corpo-de-prova

Neste trabalho o MQF não apresentou bons resultados quando comparado à lubrificação convencional, visto que em certos casos foram atingidos valores de VB acima do previsto apenas no primeiro passe da ferramenta, o que dificulta uma análise fiel do volume de cavaco removido.

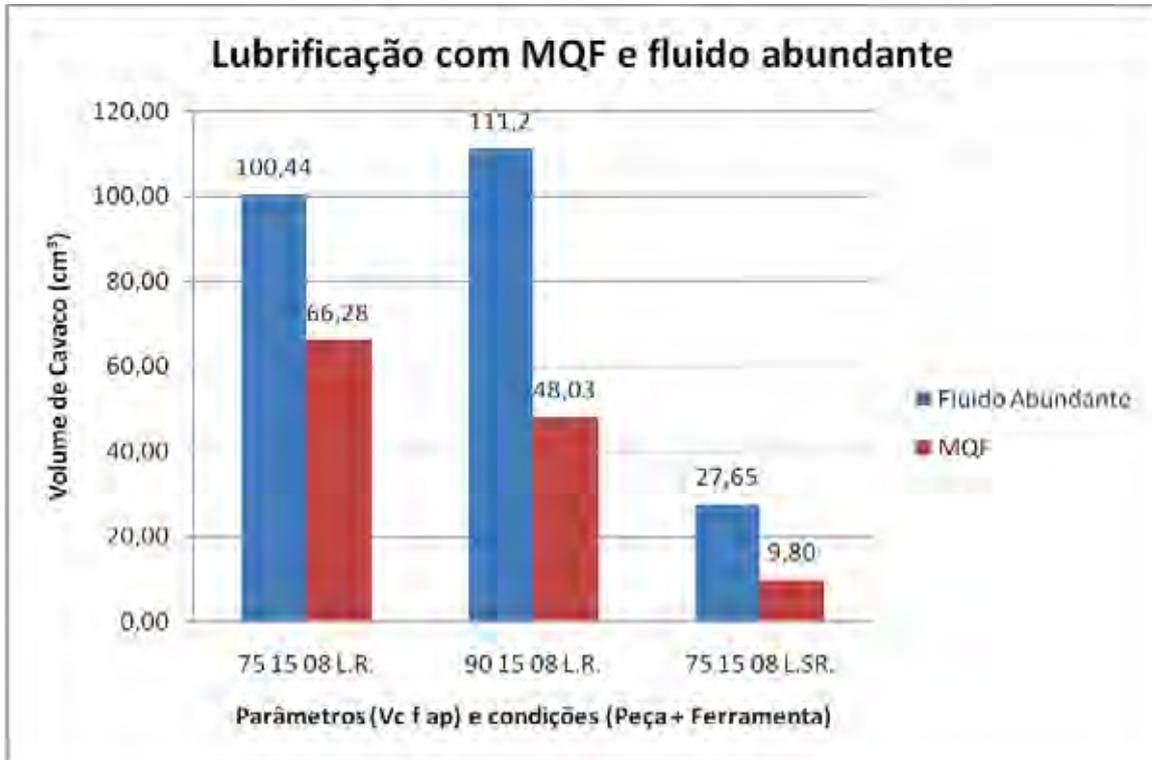


Gráfico 3 – Volume de cavaco removido em ligas laminadas com uso de MQF e Lubrificação abundante

Quando se comparam resultados obtidos para as ferramentas sem recobrimento, o uso de MQF não conseguiu remover nem metade do volume de cavaco obtido com lubrificação abundante, isso provavelmente ocorre devido à insuficiente penetração do lubrificante gerando um alto coeficiente de atrito e uma baixa refrigeração na interface peça-ferramenta.

O Gráfico 4 compara o acabamento superficial (R_a) obtido em função do tipo de aplicação de fluido (MQF ou abundante). Os resultados obtidos variam de acordo com os parâmetros e as condições de usinagem.

Apesar da obtenção de uma vida de ferramenta bem inferior com o uso de MQF, nas condições de ensaio realizadas, os valores de rugosidade (R_a) com MQF foram melhores que em condição de lubrificação convencional (abundante).

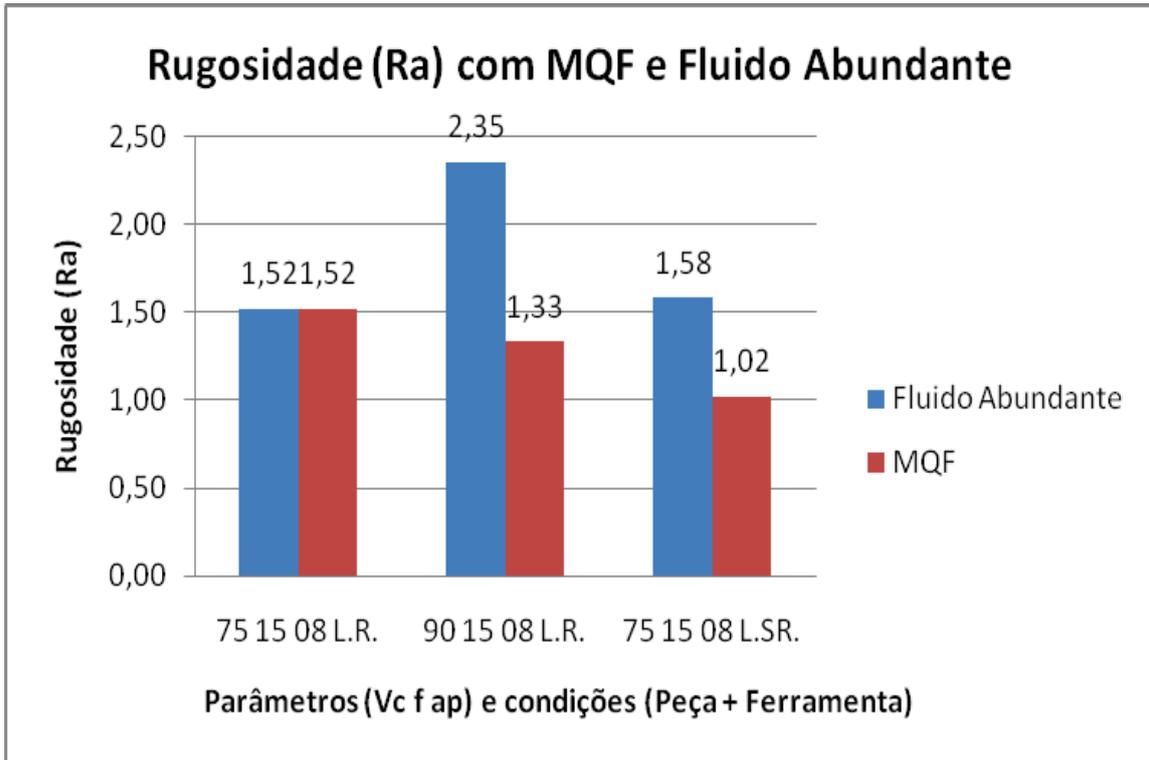
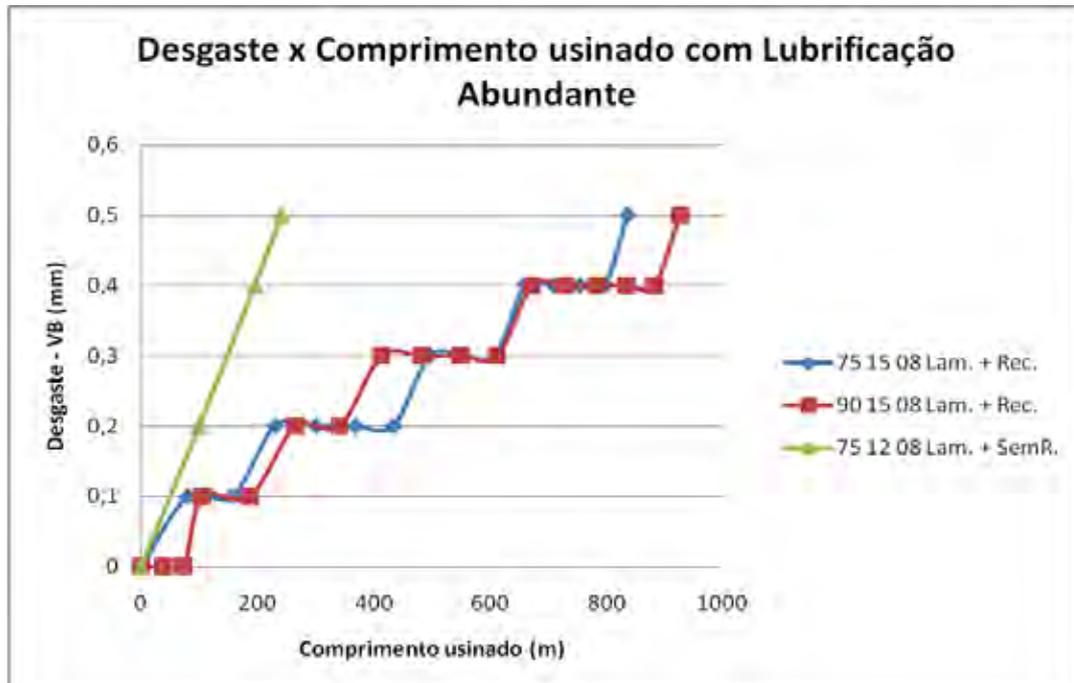


Gráfico 4 – Rugosidade Ra em ligas laminadas com uso de MQF e Lubrificação abundante

No Gráfico 5 são apresentadas as evoluções do desgaste (VB), que foi estipulado para 0,5 mm, ao longo do comprimento usinado.



(a)



(b)

Gráficos 5 – Evolução do desgaste de flanco em ligas laminadas: (a) usando MQF (b) usando lubrificação abundante

4.3 Resultados obtidos a partir da preparação dos cavacos

4.3.1 Análise microestrutural

Atacar superligas tem sido um desafio para pesquisadores do mundo todo. O problema é a propriedade anticorrosiva do níquel que dificulta o ataque químico, dificultando assim a análise microestrutural.

A seleção do ataque depende da composição da liga que se está trabalhando, tratamentos térmicos realizados na mesma e o processamento pela qual ela passou. Os ataques para o exame metalográfico são soluções de ácidos e outros componentes químicos, que são aplicados para atacar a região superficial que se encontra altamente polida, permitindo a análise microestrutural. Os métodos básicos desenvolvidos são três:

- Imersão – A peça é imersa na solução ácida até que a estrutura requerida apareça;
- Esfregar – A amostra é esfregada com um algodão que foi imerso no ataque;

- Ataque eletrolítico – AD. C. fonte ou um retificador pode ser usado como fonte de alimentação e a amostra atua como ânodo na célula eletrolítica. Requisitos de energia podem ser ajustados conforme a necessidade.

Algumas regras importantes para o ataque químico:

- Um bom polimento metalográfico é um dever.
- A amostra deve ser cuidadosamente limpa e seca antes do ataque. Qualquer composto do polimento deve ser removido.
- Após o ataque a amostra deve ser lavada em água, seguida de lavagem em álcool vindo então a secagem em ar quente.

Foram obtidas as seguintes micrografias dos cavacos gerados no processo de usinagem da superliga de níquel (Pyromet 31V) com velocidade de corte (V_c) de 75 m/min, avanço (f) de 0,18 mm/rev e profundidade (a_p) de 0,8 mm.

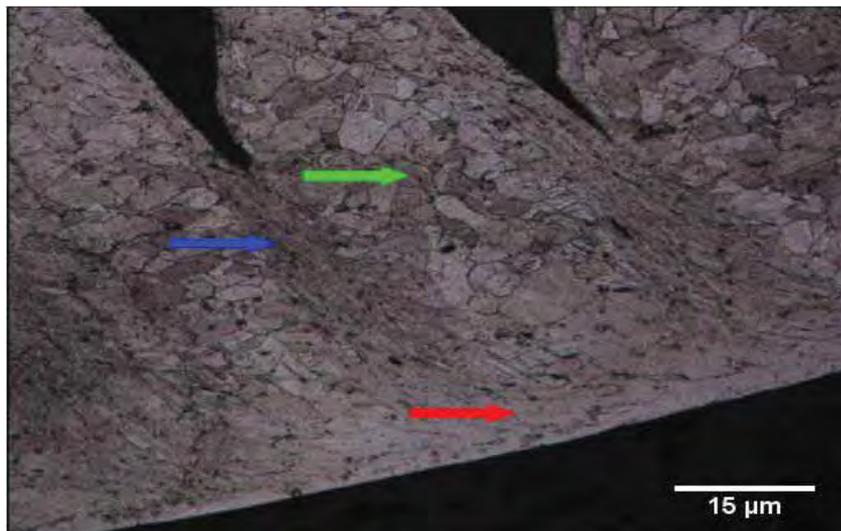


Figura 6 – Micrografia de um cavaco contínuo grande gerado no primeiro passo do processo de usinagem (ferramenta nova)

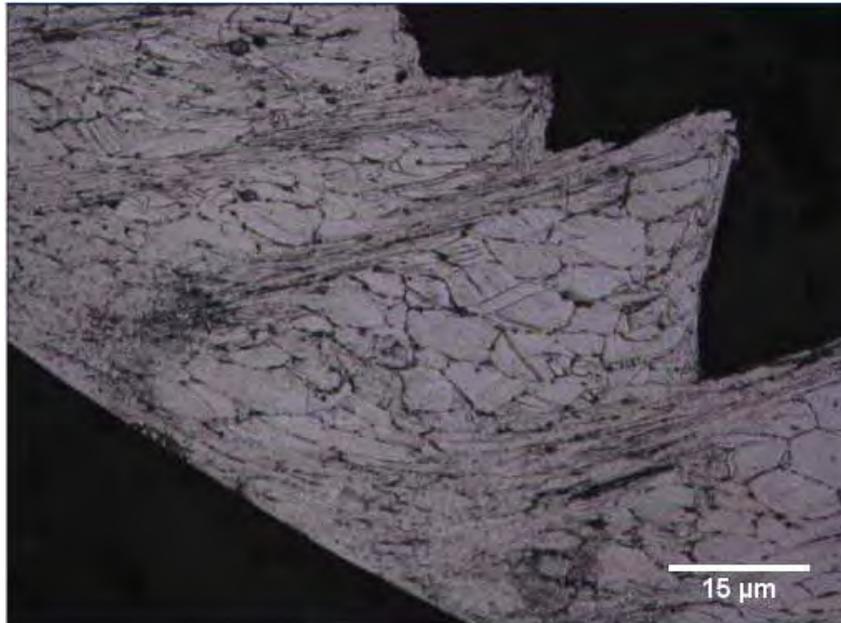


Figura 7 – Micrografia de um cavaco contínuo pequeno gerado no primeiro passo do processo de usinagem (ferramenta nova)

A Figura 6 possui algumas regiões características de superligas quando usinadas. A seta verde indica a região onde aparece os grãos. É possível perceber tanto pela Figura 6 como pela Figura 7 que estes grãos possuem uma simetria considerável podendo-se qualificá-los como grãos equiaxiais. Esta característica pode ser explicada pelo fato deste cavaco ter sido obtido com uma ferramenta nova, gerando esta homogeneidade em relação aos tamanhos dos grãos, dando então um bom acabamento superficial para a peça.

O corte dos metais envolve o cisalhamento concentrado ao longo de um plano chamado de plano de cisalhamento (zona primária de cisalhamento).

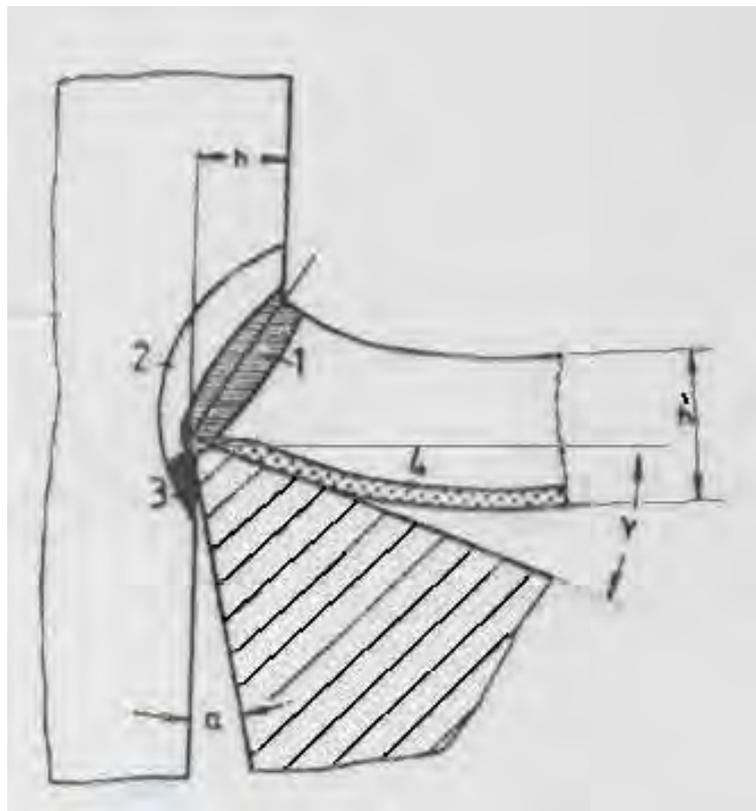


Figura 8 – Ilustração das regiões de deformação gerado no processo de usinagem

As regiões onde ocorre deformação indicada por números na Figura 8 são:

- 1- Zona de cisalhamento primária (formação)
- 2- Onde ocorrem as deformações elástica e plástica do material
- 3 e 4 – Zona de cisalhamento secundário

A seta azul da Figura 6 indica a zona de deformação primária e a seta vermelha à zona de deformação secundária.

Através da Figura 9 e 11 é possível identificar, assim como nas Figuras 7 e 8, as regiões dos grãos e as regiões de deformação primária e deformação secundária gerada na usinagem das peças. Diferente dos grãos das Figuras anteriores, estes possuem menor homogeneidade em relação ao tamanho uns dos outros, não sendo possível classificá-los como equiaxiais. Isto é explicado pelo fato da ferramenta estar desgastada neste passo, mostrando assim a influência da ferramenta no acabamento superficial da peça. As regiões de deformação primária e secundária podem ser vistas com clareza.



Figura 9 - Micrografia de um cavaco descontínuo gerado no último passo do processo de usinagem (ferramenta desgastada)

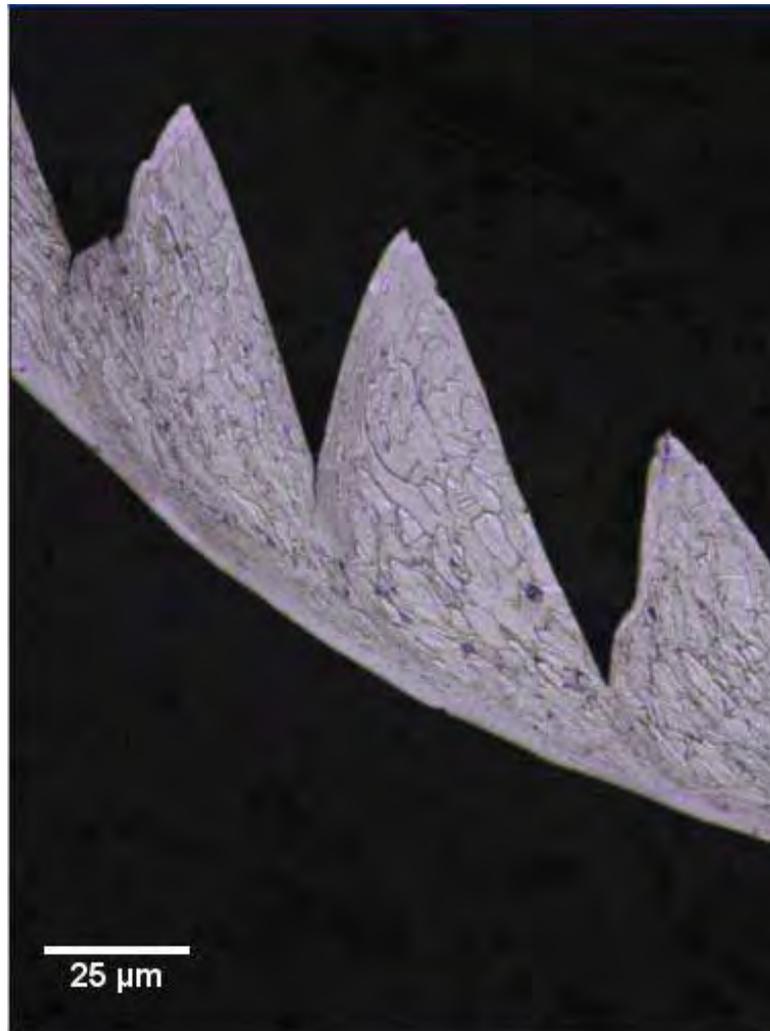


Figura 10 – Micrografia de um cavaco descontínuo gerado no último passo do processo de usinagem (ferramenta desgastada)

4.3.2 Análise dos cavacos formados

A seguir estão apresentadas as fotografias digitais dos principais tipos de cavacos gerados na usinagem das ligas utilizadas para os conjuntos de parâmetros definidos.

Pode ser observado pelas fotografias dos cavacos (Figura 11, 13, 14 e 15), que para a liga laminada a quente, usinada com ferramenta recoberta, com lubrificação abundante e de acordo com os parâmetros $V_c = 75m/min$, $f = 0,12mm/rev$, $a_p = 0,8mm$ o cavaco se manteve com forma longa variando de fita com cavacos duplos para helicoidal.



(a)



(b)

Figura 11 – Cavacos obtidos para a $V_c = 75m/min$, $f = 0,12mm/rev$, $a_p = 0,8mm$: (a)

longo, em fita e com cavacos duplos e (b) longo e helicoidal

Quando se compara cavacos com diferentes avanços (0,12 e 0,15 mm/rev) a forma do cavaco manteve-se a mesma (longa e helicoidal), variando somente o tamanho dos mesmos.



(a)



(b)

Figura 12 - Cavacos obtidos para a $V_c = 75m/min$ e $a_p = 0,8mm$: (a) $f = 0,12mm/rev$ cavaco longo e (b) $f = 0,15mm/rev$ cavaco médio

Já quando se compara não só avanços diferentes (0,12 e 0,15 mm/rev), mas também a maneira como se aplicou o fluido (MQF e Abundante) e ferramentas com e sem recobrimento, a forma do cavaco variou bastante, sendo longo e helicoidal para a aplicação de fluido

abundante com ferramenta sem recobrimento e avanço de 0,12 mm/rev e médio e irregular para a aplicação de MQF com ferramenta recoberta e avanço de 0,15 mm/rev.



(a)



(b)

Figura 13 – Cavacos obtidos para $V_c = 90\text{m/min}$ e $a_p = 0,8\text{mm}$: (a) $f = 0,15\text{mm/rev}$, MQF, ferramenta recoberta e (b) $f = 0,12\text{mm/rev}$, fluido abundante, ferramenta sem recobrimento

Para velocidades de corte diferentes (75 e 90 m/min) e avanços diferentes (0,12 e 0,15 mm/rev), em uma usinagem com fluido abundante e ferramenta recoberta, as formas dos cavacos variaram de pouco helicoidal e irregular para espiralado e irregular.



(a)



(b)



(c)

Figura 14 – Cavacos obtidos para $a_p = 0,8mm$: (a) $V_c = 75m/min$, $f = 0,15mm/rev$ muito longo e pouco helicoidal, com cavacos duplos (b) $V_c = 75m/min$, $f = 0,15mm/rev$ médio e irregular e (c) $V_c = 90m/min$, $f = 0,12mm/rev$ espiralado longo e irregular

4.4 Resultados obtidos a partir da preparação das amostras laminada a quente e solubilizada.

4.4.1 Análise microestrutural

Para a revelação da microestrutura das duas amostras o método de ataque utilizado foi o de imersão, onde a peça é imersa na solução ácida durante um período pré-determinado de tempo até que a estrutura requerida apareça.

Foram obtidas as seguintes imagens após o ataque:

4.4.1.1 Amostra Laminada a Quente

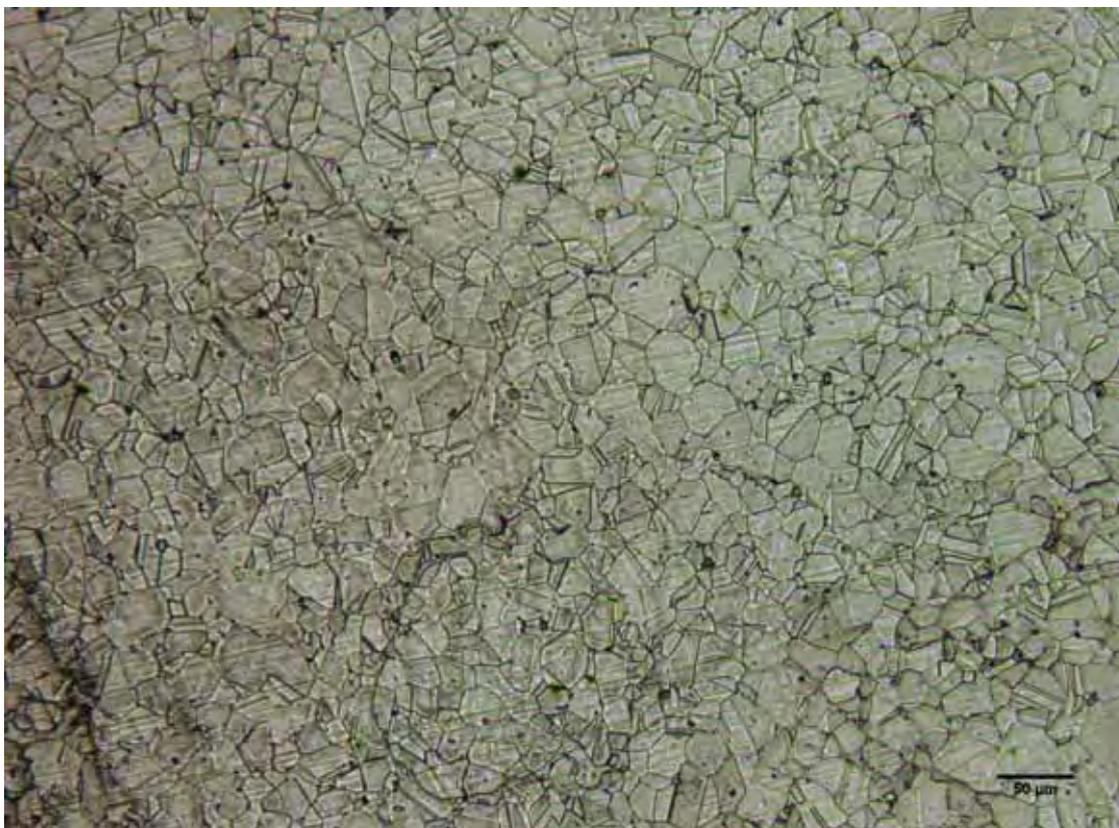


Figura 15: Micrografia da amostra laminada a quente.

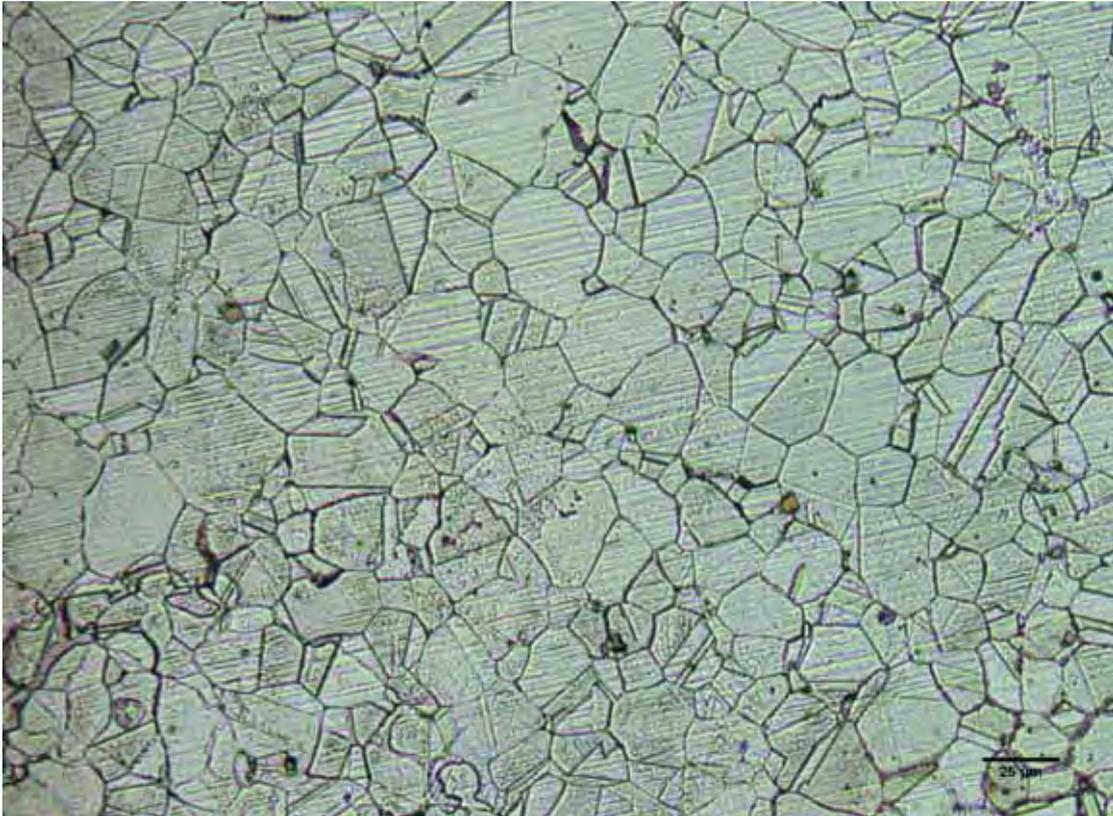


Figura 16: Micrografia da amostra laminada a quente.

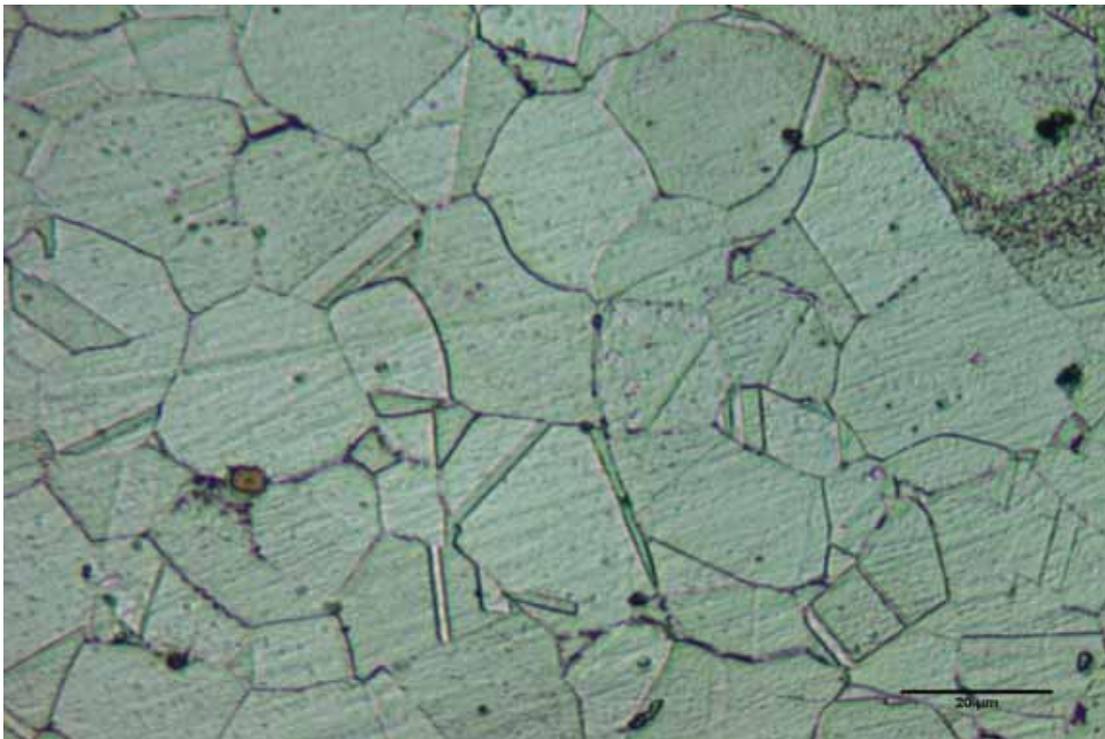


Figura 17: Micrografia da amostra laminada a quente.

Para interpretação das amostras, foram utilizadas informações e imagens tanto da superliga Pyromet 31V como da superliga Inconel 625, pois não existem muitas informações sobre a primeira na literatura, e devido a isto, foi necessário informações de uma superliga de composição bastante próxima, sendo a melhor opção a superliga Inconel 625. As Tabelas 3 e 4 fornecem as composições das superligas Inconel 625 e Pyromet 31V respectivamente :

Tabela 3 – Composição química da superliga Inconel 625 e Pyromet 31V

<i>Composição</i>	<i>Ni</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Mo</i>	<i>Ti</i>	<i>Outros</i>
<i>Inconel 625</i>	63	0,05	0.20	0,20	22,0	-	4,00	9,00	-	<i>Nb + Ta + 3,2</i>

Tabela 4 – Composição química da superliga Pyromet 31V

COMPOSIÇÃO	Ni	Cr	Fe	Ti	Al	Nb	Mn	Si	S	Mo	B	P	C
PYROMET 31V (SAE HEV8)	57,0	22,7	Rem. *	2,3	1,3	0,85	0,2 Máx.	0,2 Máx.	0,015 Máx.	2,0	0,005	0,015 Máx.	0,04
*Rem.: Remanescente													

Pela Figura 18 pode-se perceber que existe bastante semelhança entre as micrografias da amostra laminada a quente (Figura 16), e a superliga Inconel 625, sendo ela laminada também. Elas possuem tamanhos e formatos de grãos aproximados, apesar de na Pyromet 31V o grão ser um pouco maior em geral. Uma diferença a ser notada é a grande quantidade de precipitados encontrados na superliga Inconel 625, e não encontrado com a mesma intensidade na Pyromet 31V.

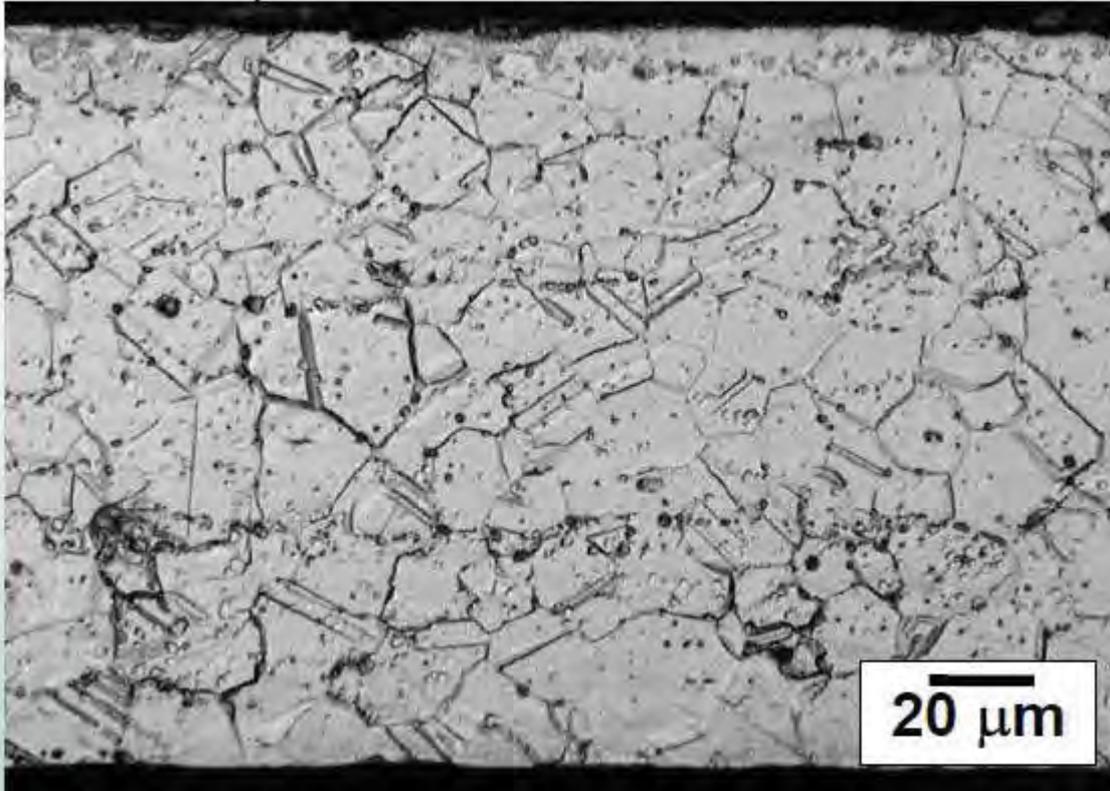


Figura 18 – Imagem de uma micrografia da superliga Inconel 625.

4.4.1.2 Amostra Solubilizada

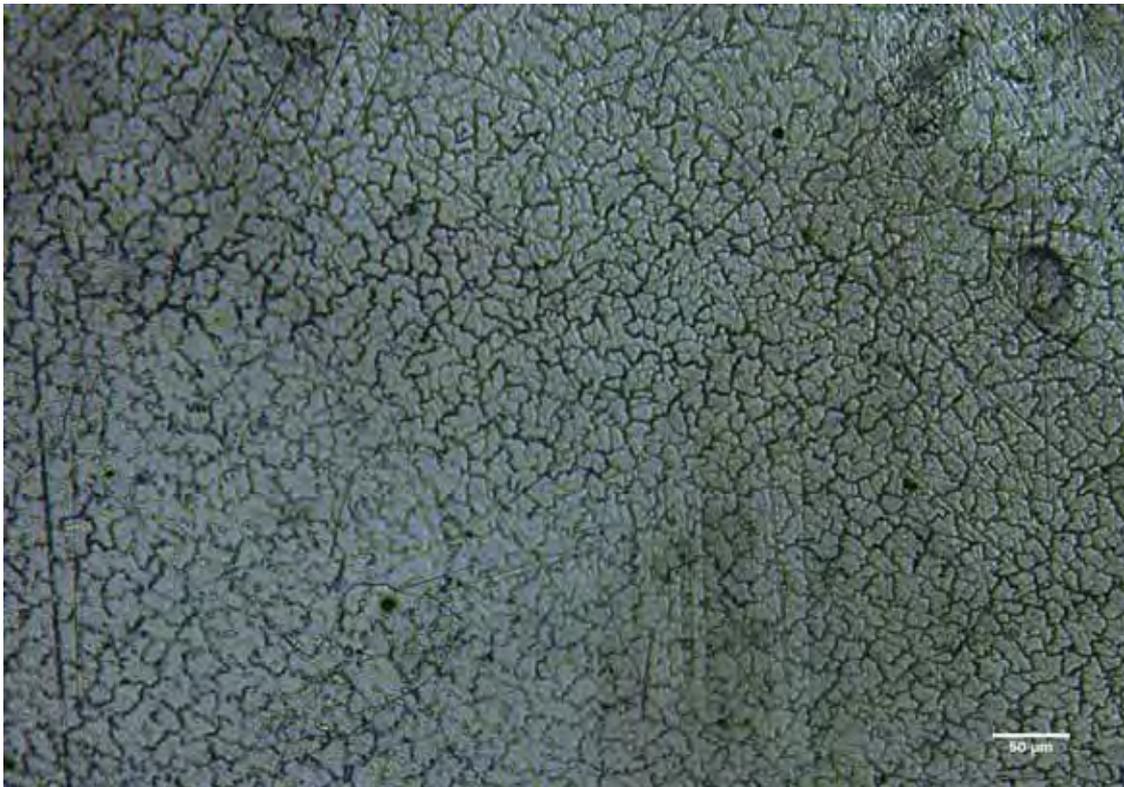


Figura 19: Micrografia da amostra solubilizada.

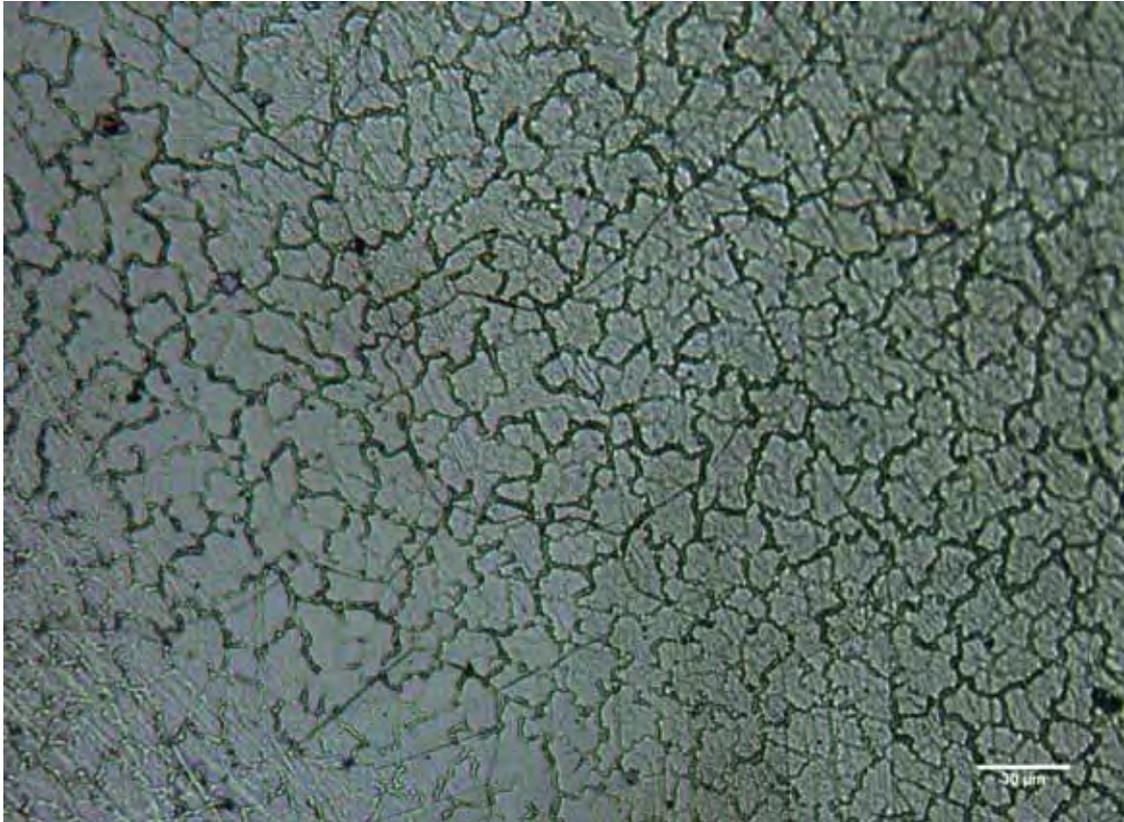


Figura 20: Micrografia da amostra solubilizada.

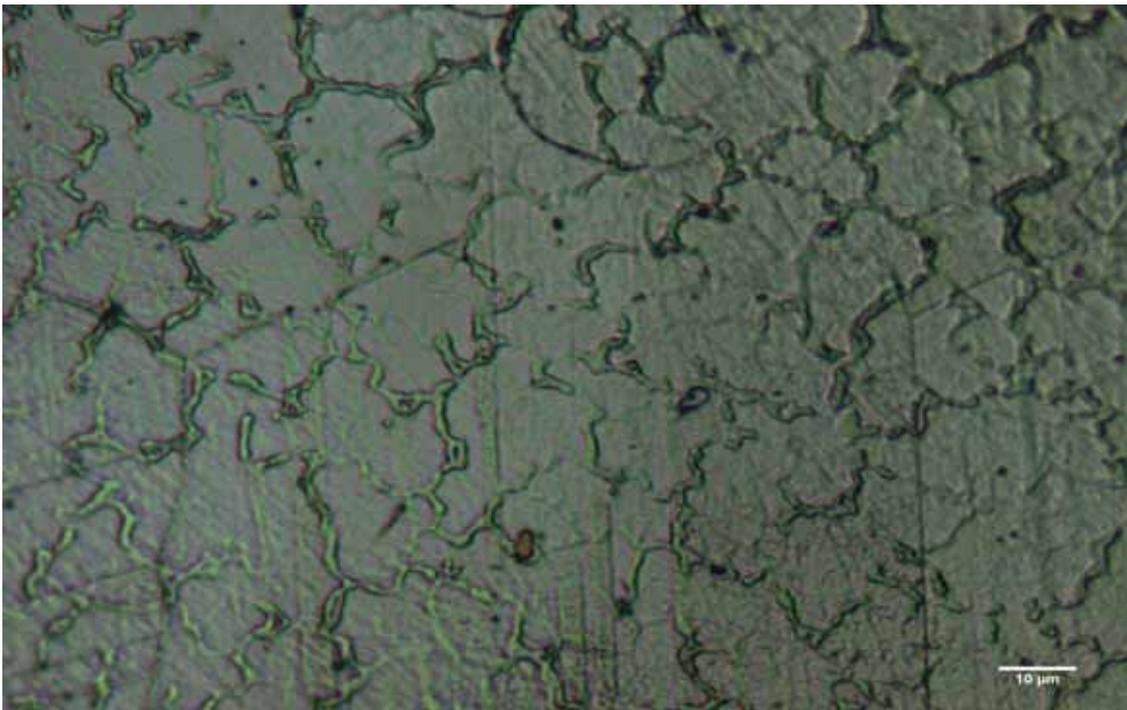


Figura 21: Micrografia da amostra solubilizada.

Nas Figuras 19, 20 e 21 podemos notar a presença de precipitados que são chamados de fase gama primária (γ') que surgem devido a precipitação de altas frações de elementos como Ti e Nb de acordo com a austenita de níquel da superliga. Esta fase é responsável pelo aumento da resistência mecânica à medida que se eleva a temperatura de serviço.

O carbono adicionado à composição da superliga serve para reagir com elementos reativos e refratários formando carbetos primários MC. Este MC quando exposto à alta s temperaturas se decompõe em outros dois tipos de carbetos o $M_{23}C_6$ e o M_6C que são intragranulares ou ficam localizados nos contornos do grão proporcionando um aumento da resistência às tensões e estabilizando os contornos de grão.

Quando comparadas as duas amostras por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) Figura 22 vemos que os precipitados da liga solubilizada são mais destacados do que na liga laminada, isso se deve ao tratamento térmico em que a amostra solubilizada foi submetida.

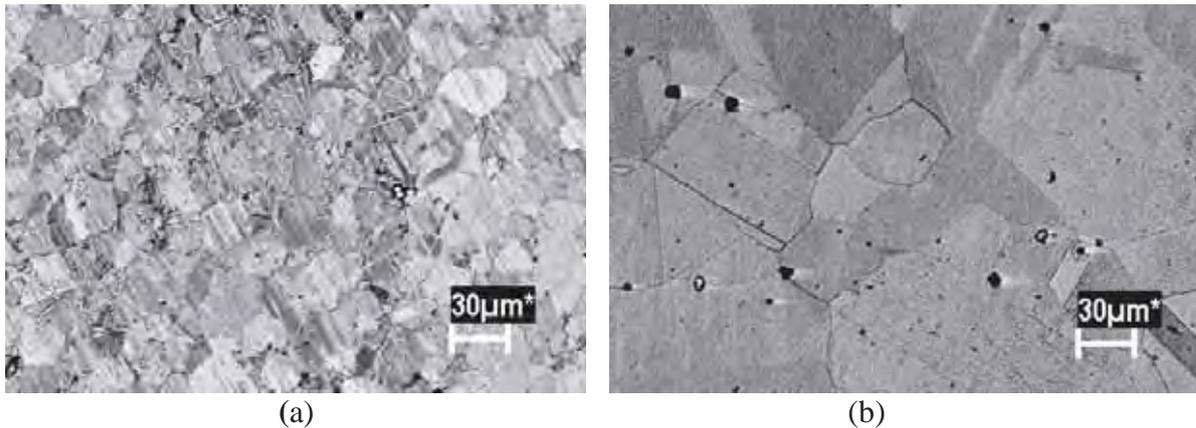


Figura 22: Imagens em MEV das amostras laminada (a) e solubilizada (b)

Através da Figura 23 os carbetos metálicos da superliga de níquel podem ser visualizados com maiores detalhes.

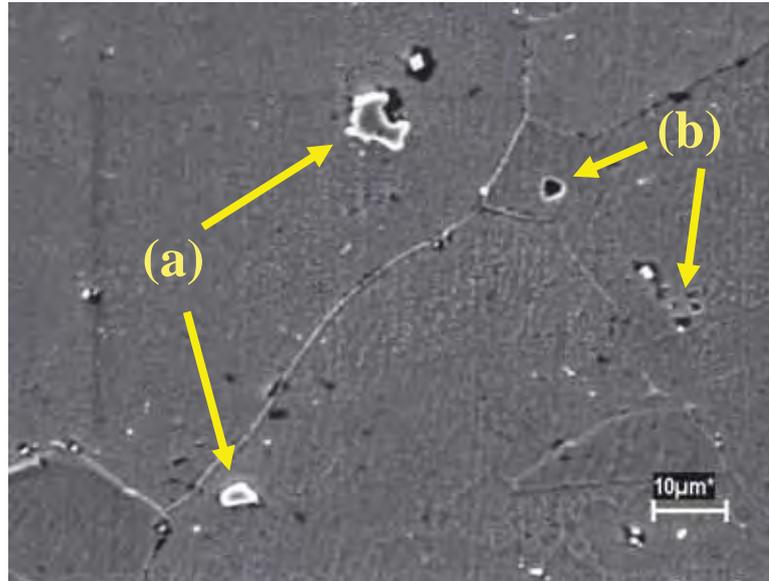


Figura 23: Microscopia por MEV da amostra solubilizada.

Por meio da Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) foi possível à identificação da composição química das partículas intragranulares na liga solubilizada, assim, as partículas com contornos mais claros (a) são formadas predominantemente por carbeto de nióbio e carbeto de titânio, e os pontos mais escuros (b) são carbeto complexo.

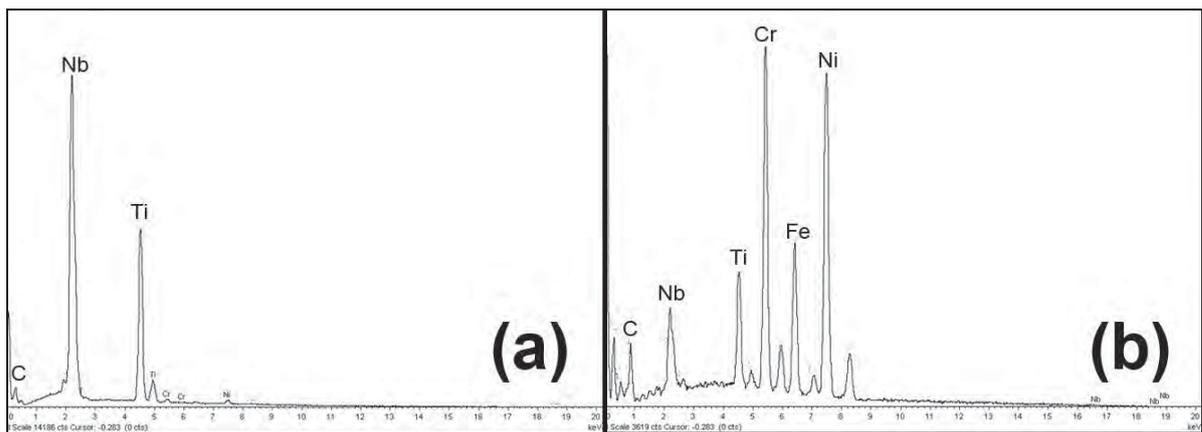


Figura 24: Análise química por EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva) das partículas da superliga Pyromet 31V: (a) pontos claros e (b) pontos escuros.

Tabela 5: Composição química em peso da superliga Pyromet 31V: (a) pontos claros e (b) pontos escuros

Elemento	Número Atômico (Z)	% em peso (pontos claros)	% em peso (pontos escuros)
C	6	23.33	13.24
Ti	22	26.87	5.38
Cr	24	0.69	21.14
Fe	26	--	12.70
Ni	28	1.24	42.76
Nb	41	47.87	4.77
Total	--	100.00	100.00

Em Microscopia Eletrônica de Varredura um ponto que deve ser levado em consideração é o número atômico (Z) dos elementos constituintes da liga e também a porcentagem que este elemento representa na liga. O fato da Figura 23 apresentar precipitados claros (a) e escuros (b) é devido o número atômico do precipitado. Assim precipitados com alto número atômico apresentam-se mais claros enquanto que precipitados com baixo número atômico apresentam-se mais escuros.

Como se pode ver na Tabela 5 o precipitado (a) possui maior número atômico que o (b), um dos principais motivos desta diferença no número atômico é a grande fração de Nb (Z=41) presente no precipitado (a) certa de 47,87% em peso enquanto que no precipitado (b) corresponde apenas a 4,77% em peso. Assim quando comparamos a Figura 23 e a Tabela 5 com outros trabalhos notamos que já era de se esperar fases ricas em Nb e Ti. A Figura 25 é uma micrografia da superliga à base de níquel Inconel 625, tendo esta uma composição bastante próxima da superliga Pyromet 31V, é de se esperar semelhanças quanto à micrografia de ambas.

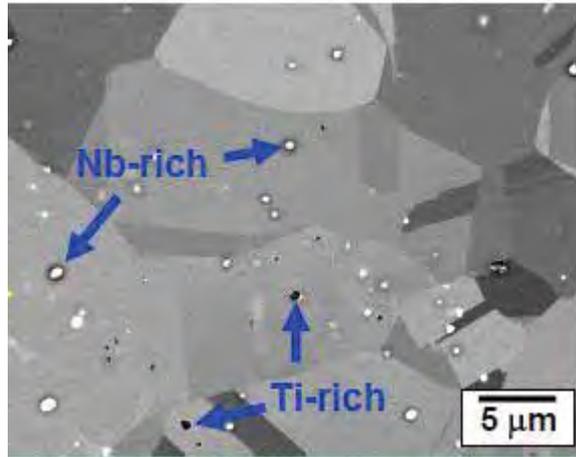


Figura 25: Microscopia por MEV da superliga Inconel 625 mostrando precipitados ricos em Nb e Ti.



5 CONCLUSÕES

Por meio deste trabalho foi possível analisar a influência do recobrimento nas ferramentas de corte em relação aos parâmetros de usinagem (V_c , f , a_p) e o acabamento superficial da peça gerada. Além disso foi possível analisar amostras da liga na forma solubilizada e laminada a quente.

Em geral a aplicação do recobrimento gerou um maior comprimento usinado (L_c) em relação às ferramentas sem recobrimentos. Com relação à rugosidade, em média o recobrimento não teve tanto efeito.

No que diz respeito ao uso de MQF ou fluido abundante os Gráficos 3, 4 e 5 para a liga Pyromet 31V, o uso das ferramentas de corte indicadas pelo fabricante e usadas nestes experimentos nas condições de corte estabelecidas, objetivando grandes comprimentos usinados e alta retirada de volume de cavaco, não permitem o uso de MQF de forma viável, pois, apesar das vantagens de redução no consumo de lubrificante e nos custos de descarte do material atendendo a requisitos ambientais, a vida da ferramenta bem como o volume do cavaco removido obtido não são suficientes de modo a viabilizar a sua aplicação.

Na análise micrográfica foi possível à visualização dos grãos podendo diferenciar aqueles que foram gerados por ferramentas mais novas e aqueles gerados por ferramentas mais desgastadas, sendo equiaxiais os das Figuras 6 e 8 e menos simétrico os das Figuras 9 e 11. Outro detalhe importante visto na análise micrográfica foram às regiões de deformação primária (gerada por cisalhamento) e as regiões de deformação secundária (gerada por atrito). Foram feitas também micrografias das amostras, solubilizada e laminada a quente. As imagens revelaram uma segunda fase que já era esperada pela comparação feita na literatura. Após obtenção de imagens de MEV feitas no CTA em São José dos Campos, foi possível a caracterização de forma precisa das fases presentes na amostra.

Em relação aos cavacos obtidos, no tocante a sua forma, fica nítida a conclusão de que, com os parâmetros utilizados, os tamanhos não variam muito, sendo no geral cavacos longos, e o formato helicoidal se mostrou predominante.



6 REFERÊNCIAS

BAHIA, A. L. H., **Estudo do torneamento da liga de níquel Pyromet 31v (SAE HEV8)**, p. 4-6, 2009

BAKER, R. D., **Ceramic cutting tools: Application guidelines. Carbide Tool**, p. 28-35, 1981.

CHANDRASEKARAN, H.; JOHANSSON, J. O., **Chip flow and notch wear mechanisms during the machining of high austenitic stainless steels. CIRP Annals**, v. 43, n. 1, p. 101-105, Jan. 1994.

DINIZ, A. E.; COPPINI, N. L.; MARCONDES, F. C. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora M.M., 1999, 242pp.

EZUGWU, E. O.; MACHADO, A. R.; PASHBY, I. R.; WALLBANK, J., **The effect of high-pressure coolant supply. Lub. Eng.**, v47, p. 751-757, 1990.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M., **Titanium alloys and their machinability, Journal of Materials Processing and Technology**, v.68, p. 262-274, 1997.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M.; MACHADO, A. R., **The machinability of nickel-based alloys: a review. Journal of Materials Processing Technology**, v.86, p. 1-16, 1999.

EZUGWU, E. O.; OKEKE, C.I., **Effect of coating materials on the machinability of a nickel base, C-263, alloy, Tribol. Trans. V.43 (3)**, p. 549-553, 2000.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y., **An overview of the machinability of aeroengine alloys. Journal of Materials Processing Technology**, v.134, (2), p. 233-253, 2003.

GOKKIIYA, H., SUR, G. AND DILIPAK, H., **"Experimental Investigating of the Effect of Cemented Carbide Cutting Tools Coated by PVD and CVD on Surface Roughness According to Machining Parameters"**, **Journal of Zongnldak Karaelmas University, Technical Education Faculty**, 3-4, 473-478, 2004.



HYDRICK, H. **“Coolant Management Concern Invites Change,”** *Lubricants World* (May, 1994), 29 and 34.

JARRARD, A. **“Metalworking Fluids Management Programs,”** *Modern Machine Shop* (June, 1993), 81-84.

JAWAID, A.; CHE-HARON, C. H.; ABDULLAH, A., **Tool wear characteristics in turning of titanium alloy Ti-6246,** *J. Mater. Process. Technol.*, p. 92-93, 329-334, 1999.

JEELANI, S.; RAMAKRISHNAN, K., **Surface damage in machining titanium 6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy.** *Journal of Materials Science*, v.20, p. 3245-3252, 1985.

KOPAC, J.; BAHOR, M., **Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product.** *Journal of Materials Processing Technology*. V. 92-93, p. 381-387, 1999.

KURODA, M. **Aumentando a lucratividade com óleos vegetais.** *Revista o mundo da Usinagem*, Publicação da Sandvik do Brasil, São Paulo, n. 3/2006, p. 16-19, 2006.

LOPEZ DE LACALLE, L. N.; LORENTE, J. I.; SÁNCHEZ, J. A., **Improving the cutting parameters the machining of nickel and titanium alloys,** in *Annals of the CIRP*, v.47, 1998.

LUKAS, J. **“Fluids Getting More Attention from Management,”** *Lubricants World* (July, 1994), 26.

MACHADO, A. R.; WALLBANK, J., **The effect of extremely low lubricant volumes in machining.** *Wear*. v. 210, n. 1-2; 1997, p. 76-82.

MASON, F., **Usinando a seco, ou quase a seco.** *Máquinas e Metais*, v.37, (424), p. 160-173, 2001.

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.

RIBEIRO, M. V., **Mecanismo de formação do cavaco,** *Notas de Aula*, 2009.



SHUANGQUN, Z., **The oxidation behavior of the new nickel-based superalloy Inconel 740 with and without Na_2SO_4 deposit.** *Surface and Coating technology*, v.185, p. 178-183, 2004.

SILVA, L. R. et. al., **Estudo da geometria de corte para torneamento de inconel.** *Máquinas e Metais*, p. 37, (427), -55, 2001.

SOKOVIC, M.; MIJANOVIC, K. **Influence of Ecological Parameters of the Cutting Fluids on Quantifiable Parameters of the Cutting Process.** *Proceedings of the 6th International Scientific Conference Achievements in Mechanical & Materials Engineering*, 1997, p. 177-80.

THOMAS, T.R., **Rough Surface**, Longman, New York, 1982.

VIGNEAU, J., **Obtendo alta produtividade na usinagem de ligas de titânio e superligas.** *Máquinas e Metais*, v.32, (380), p. 16-32, 1997.

WEINGAERTNER, W. L., **Qualidade superficial e formação de cavacos na usinagem de Al e Cu.** *Máquinas e Metais*, p.82-89, Maio 1994.

WITTING, H.; **Torneamento de superligas.** *Máquinas e Metais*, v.38, (440), p. 156-165, 2002.

BAHIA, A. L. H.; **Torneamento de liga de níquel Pyromet 31V (N07032) com ferramentas de metal duro**, 2010.

Seco Technical Guide, Turning Difficult-To-Machine Alloy.

http://www.ferrea.com/catalog/2009/Valve_Tech.pdf, site acessado no dia 07/12/2009.

http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/3632, site acessado no dia 07/12/2009.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS E TECNOLOGIA

APÊNDICE

Tabela 6 - Valores experimentais dos ensaios

Nº	D (mm)	Lc (m)	Ra (µm)	Ry (µm)	VB (mm)	Lf (mm)	Vc (m/min)	f (mm/ver)
1	39,2	78,82	3,68	15,87	0	256	70	04
2	38,8	78,01	3,49	13,50	0,1	256	70	04
3	38,4	77,21	2,18	8,97	0,3	256	70	04
4	38,0	76,40	0,75	6,03	0,4	256	70	04
5	37,6	75,60	1,12	6,23	0,4	256	70	04
6	37,6	73,83	1,81	8,70	0,5	250	120	04
7	37,6	73,83	3,58	14,13	0,8	250	120	04
8	36,6	35,93	2,88	13,73	0,5	125	90	04
9	36,2	35,54	X	X	0,6	125	170	04
10	35,5	46,47	2,65	15,23	0,2	125	70	03
11	35,1	45,95	2,13	13,83	0,4	125	70	03
12	34,7	45,42	2,05	7,87	0,3	125	70	03
13	34,3	44,90	1,60	8,87	0,3	125	70	03
14	36,7	48,04	1,61	7,13	0,3	125	70	03
15	36,3	47,52	0,87	5,10	0,3	125	70	03
16	35,9	46,99	0,81	4,03	0,4	125	70	03
17	35,5	46,47	1,03	5,27	0,5	125	70	03
18	35,1	45,95	0,93	6,10	0,6	125	70	03
19	34,7	44,64	1,90	6,66	0,4	125	90	03
20	33,9	44,37	1,23	6,73	0,6	125	90	03