



Tema: Produtos metálicos não-ferrosos

## OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE FRESAMENTO E ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS NA LIGA Ti6Al4V\*

Osmar Roberto Bagnato<sup>1</sup>  
 Bruno de Cristo<sup>2</sup>  
 Miqueias Vieira<sup>3</sup>  
 Matheus Vellon Alves<sup>4</sup>  
 Roosevelt Droppa Júnior<sup>5</sup>

### Resumo

Este trabalho apresenta um estudo do desgaste de insertos e tensões residuais em diferentes estratégias de entrada de ferramenta no fresamento da liga Ti-6Al-4V. Esta liga possui propriedades mecânicas que a torna ideal para aplicações onde é necessária uma ótima relação resistência-peso. O objetivo é reduzir o desgaste dos insertos no processo de fresamento e analisar as tensões residuais na usinagem da liga Ti-6Al-4V. A integridade superficial do material após a usinagem deve ser conhecida já que esta liga é utilizada em aplicações críticas. Quatro estratégias de entrada foram estudadas, sendo que no faceamento foi utilizada a entrada por rolagem e a frontal reta e no fresamento de cavidade foi utilizado mergulho reto e em rampa. Em todos os ensaios foram utilizados os mesmos parâmetros de usinagem. As tensões residuais foram medidas por difração de raios-X (Luz Síncrotron), pelo método  $\sin^2\psi$ , utilizando um difratômetro de raios-X instalado no LNLS. No faceamento a estratégia por rolagem mostrou uma importante redução do desgaste e uma pequena redução da tensão residual quando comparada com a estratégia frontal reta. No fresamento de cavidades a estratégia de mergulho reto mostrou um inesperado aumento do desgaste e uma significativa redução da tensão residual quando comparada com o mergulho em rampa. Todas as tensões residuais encontradas foram compressivas. As tensões residuais encontradas em todos os experimentos se mostraram favoráveis a aplicações sujeitas à fadiga.

**Palavras-chave:** Usinagem; Titânio; Desgaste; Tensão residual;

### OPTIMIZATION OF FACE AND DIVE MILLING PROCESSES USING INTERCHANGEABLE INSERTS ON Ti6Al4V

#### Abstract

This work presents a study of the inserts wear and residual stresses at different tool entry strategies in milling of Ti6Al4V alloy. This alloy has mechanical properties that make it ideal for applications where great strength to weight ratio is needed, like in aerospace industry. However, there is still a great difficulty in manufacturing this alloy, which increases production costs. In order for the application of this alloy to be competitive it is necessary to have a strong optimization of the machining process. The aim of this work is to reduce inserts wear in titanium milling process and analyze the residual stresses in machining of Ti6Al4V alloy. The surface integrity of the material after machining should be analyzed because this alloy is used in critical applications. Previous work proved that it is possible to obtain better results in terms of the amount of material removed and optimizing machining times entry strategies in face milling and diving in pocket milling in different materials and it is known that the machining process influences the residual stresses of the processed surface. Four tool entry strategies were studied. On face milling, the straight and roll-in entry was used and on pocket milling straight plunge and ramp dive. All experiments considered the same machining parameters (feed, cutting speed and depth of cut). The surface residual stresses were measured by X-ray diffraction (Synchrotron Radiation) by  $\sin^2\psi$ , using an X-ray diffractometer installed at LNLS. On face milling the roll-in strategy showed a significant reduction in flank wear and a small reduction in residual stress if compared with the straight entry strategy. Pocket milling straight plunge strategy showed an unexpected increase in flank wear and a significant reduction of residual stress when compared with the ramp strategy. All superficial residual stresses found in the experiments were compressive. It is concluded that the roll-in strategy provides insert consumption reduction, and straight plunge strategy showed no improvement regarding of wear. Residual stresses found in all experiments were beneficial to the application when subjected to fatigue.

**Keywords:** Machining; Milling; Wear; Titanium; Residual Stress; Synchrotron.

<sup>1</sup> Engenheiro de Materiais, Doutor em Engenharia Mecânica, Líder do Grupo de Materiais, Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), CNPEM, Campinas, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Supervisor de manutenção, petroquímica BRASKEM, Paulínia, SP, Brasil.

<sup>3</sup> Eng. Mecânico, Projetista CAD/CAM Sênior, Eng. Processos, Hernandes Fim & Cia Ltda. (Finetomos), Campinas, SP, Brasil.

<sup>4</sup> Eng. Mecânico, Assistente de Engenharia, Engenharia de Aplicação, Gardner Denver Nash Brasil, Campinas, SP, Brasil.

<sup>5</sup> Doutor em Física, Professor adjunto, Centro de Ciências Naturais e Humanas (CCNH), Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

As ligas de titânio possuem propriedades mecânicas que as tornam ideais para aplicação em diversas indústrias, entre elas a aeronáutica [1]. A relação resistência-peso aliada à resistência à corrosão a colocam à frente das várias ligas de aço e de alumínio existentes no mercado. Porém ainda há grande dificuldade na fabricação de produtos com esse material, tanto pela baixa usinabilidade como pelo alto ponto de fusão, que acabam aumentando o custo de produção e em diversos casos tornando-se inviável em vista da facilidade de obtenção de ligas de aço ou de alumínio de alta resistência e boa usinabilidade. A baixa produtividade se deve à utilização de reduzidas velocidades de corte quando comparadas às dos aços, uma vez que a temperatura na região do corte é extremamente elevada devido à baixa condutividade térmica do material [1]. Outros fatores determinantes são a afinidade química do titânio com os diversos materiais que revestem as ferramentas de corte, causando o desgaste por difusão, e seu baixo módulo de elasticidade que provoca instabilidade e vibrações durante a usinagem. É possível obter melhores resultados em termos de quantidade de material removido e tempos de usinagem otimizando as estratégias de entrada no fresamento frontal [2] e de mergulho no fresamento de cavidades [3], além de se aplicar ferramentas com ângulo de posição que atenuem as vibrações [1]. As tensões residuais resultantes destas estratégias podem ser mensuradas através da difração de Raios-X, permitindo avaliar o quanto as variáveis controladas influenciam na resistência à fadiga do material. O objetivo desse trabalho é reduzir o desgaste dos insertos no processo de fresamento de titânio e analisar as tensões residuais na usinagem da liga Ti6Al4V, material amplamente utilizado em automóveis e aviões, porém de reconhecida baixa usinabilidade.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Medições de Tensões Residuais por Difração de Luz Síncrotron

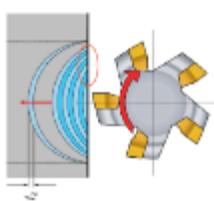
Para medição das tensões residuais decorrentes do processo de usinagem nas diferentes estratégias de entrada será adotada a seguinte metodologia:

1. Usinagem das amostras
2. Cálculo das tensões residuais

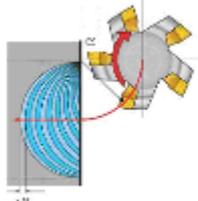
#### 2.1.1 Usinagem das amostras

Para preparação das amostras foi utilizada uma chapa laminada de titânio Ti6Al4V (Gr 5) de 80 x 240 x 8mm. Nesta chapa foram executadas todas as entradas a serem analisadas, conforme ilustrado na figura 5. Foram executadas 6 estratégias de entrada: entrada frontal reta, frontal com redução de avanço, frontal por rolagem, mergulho em rampa, mergulho reto e mergulho helicoidal conforme ilustrado nas figuras 1, 2, 3 e 4.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 1 -**  
Entrada frontal  
reta



**Figura 2 -**  
Entrada por  
rolagem



**Figura 3 -**  
Mergulho  
em rampa/helicoidal



**Figura 4 -**  
Mergulho  
reto

Foi utilizada uma fresa de diâmetro 25mm, com três inserts redondos de diâmetro 10mm, conforme figura. Foi utilizado o mesmo tipo de inserto e os mesmos parâmetros de usinagem aplicados nos ensaios de desgaste.



**Figura 5 -** Chapa de Ti6Al4V usinada

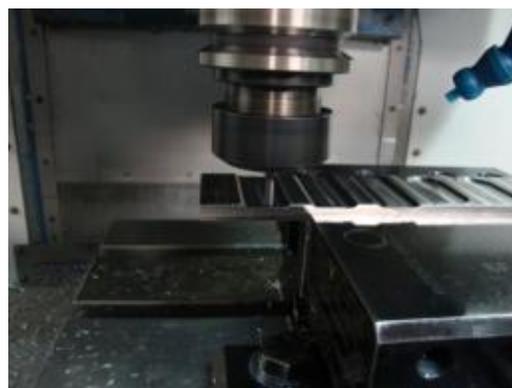


**Figura 6 -** Detalhe da fresa utilizada na usinagem das amostras

As amostras foram então cortadas com uma fresa de topo inteira de diâmetro 5mm em peças de diâmetro 25mm, de forma que pudessem ser posicionadas no porta-amostra do difratômetro da linha XRD2 do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), conforme mostra a figuras 7 e 8.



**Figura 7 -** Perfil das amostras



**Figura 8 -** Fresa de topo inteira utilizada para corte das amostras

As amostras foram então numeradas conforme a sequência da posição na chapa, sendo ímpares para a região de entrada da ferramenta e pares para a região de saída da ferramenta. A tabela 1 relaciona o número da amostra com a estratégia de entrada.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

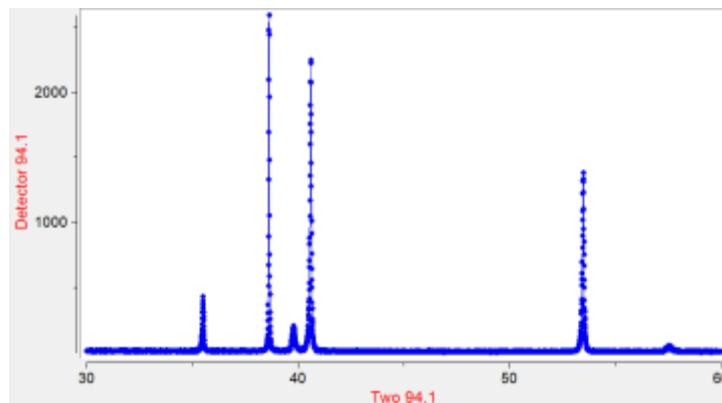
**Tabela 1 - Identificação das amostras**

Amostra	Tipo de entrada
1	Entrada frontal reta – região de entrada da ferramenta
2	Entrada frontal reta – região de saída da ferramenta
3	Entrada frontal reta com avanço reduzido – região de entrada da ferramenta
4	Entrada frontal reta com avanço reduzido – região de saída da ferramenta
5	Entrada em rolagem – região de entrada da ferramenta
6	Entrada em rolagem – região de saída da ferramenta
7	Entrada em mergulho de topo – região de entrada da ferramenta
8	Entrada em mergulho de topo – região de saída da ferramenta
9	Entrada em rampa – região de entrada da ferramenta
10	Entrada em rampa – região de saída da ferramenta
11	Entrada em mergulho helicoidal

### 2.1.2 Cálculo das tensões residuais

Para medição da tensão residual nas amostras usinadas com as diferentes estratégias, foi utilizada a técnica da difração de raios-X, gerados a partir da Luz Síncrotron. Os ensaios foram realizados na linha XRD2 do LNLS. Antes do início da coleta dos dados o difratômetro foi configurado para alta resolução, através da utilização de um monocristal de germânio antes do receptor para aumentar a resolução da medição.

Com base em uma das amostras foi elaborado um difratograma  $\theta$ - $2\theta$  da liga Ti6Al4V, sendo realizada varredura de 30 a 60°, com resolução de 0,005° e 170000 contagens no monitor. O difratograma gerado pode ser visualizado na figura 9.



**Figura 9 - Difratograma da liga Ti6Al4V**

Para medição da tensão residual foi selecionado o pico que ocorre com  $2\theta$  de 53,5°, por ter boa amplitude e estar afastado dos outros picos e por ter maior ângulo de difração. O difratômetro foi parametrizado conforme tabela 2:

**Tabela 2 - Parametrização do difratômetro**

$\psi$	$2\theta$	$\theta$	Resolução	Contagem
0°	51° a 56°	20,5° a 28°	0,05°	880000
26,5°	51° a 56°	20,5° a 28°	0,05°	1320000
39,2°	51° a 56°	20,5° a 28°	0,05°	1760000
50,7°	51° a 56°	20,5° a 28°	0,05°	3740000
63,4°	51° a 56°	20,5° a 28°	0,10°	5500000

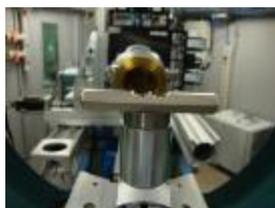
\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

A mesma parametrização foi utilizada para coleta dos dados nos ângulos  $\varphi$   $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$  em todas as amostras. Sendo que o ângulo de  $180^\circ$  foi utilizado para substituir os ângulos  $\psi$  negativos ( $-26,5^\circ$ ,  $-39,2^\circ$ ,  $-50,7^\circ$  e  $63,4^\circ$ ) necessários para análise a  $\varphi=0^\circ$  e o ângulo de  $270^\circ$  foi utilizado para substituir os ângulos  $\psi$  negativos necessários para análise a  $\varphi=90^\circ$ , pois a linha XRD2 não possibilita mecanicamente a medição de ângulos  $\psi$  negativos. As amostras foram fixadas ao porta amostra com fita dupla-face, como ilustrado na figura 10. Para garantir a qualidade dos dados cada amostra foi nivelada com o uso de um nível de bolha no porta amostra e alinhada com o feixe de luz, conforme ilustrado na figura 11.

Para realização das medições na amostra 7 foi necessário fresar uma saída para que fosse possível alinhar a amostra, como pode ser observado na figura 12.



**Figura 10** - Fixação da amostra 7



**Figura 11** - Nivelamento da amostra



**Figura 12** - Amostra 7 após ajuste

Para obtenção do parâmetro de rede livre de tensões e verificação de possíveis erros no processo de medição de tensão residual, foi realizada análise de um pó da liga Ti6Al4V. O pó foi obtido através da abrasão de uma lima cilíndrica revestida com tungstênio, para minimizar contaminações. Após a obtenção, o pó foi limpo com álcool isopropílico e então disposto em uma lâmina de cerâmica resistente à temperatura. Para garantir que o pó estaria livre de tensões, foi realizado o processo de recozimento (annealing). O recozimento foi em um forno a vácuo, disponibilizado pelo grupo de materiais do LNLS, com taxa de aquecimento de  $12^\circ\text{C}/\text{min}$  e patamar de  $730^\circ\text{C}$ , que foi mantido por 1h. Então o forno foi resfriado naturalmente até a temperatura ambiente. O pó foi posicionado em um porta amostra específico. Foi utilizada uma graxa específica para aplicações em vácuo, para aglutinar o pó e mantê-lo estável no porta amostra. As medições foram feitas com o porta amostra girando constantemente, portando o ângulo  $\varphi$  foi mantido em zero. A técnica para medição das tensões residuais no pó foi idêntica a utilizada para medição das amostras, com exceção do ângulo  $\varphi$ , que não variou durante o ensaio. Deste modo o valor medido representa o módulo das tensões residuais do pó, que se espera que sejam próximas a zero. O valor de tensão residual medido no pó recozido representa os erros sistemáticos de medição, visto que o pó não apresenta tensões residuais. Com base nos dados adquiridos com a difração de luz Síncrotron, foi calculada a tensão residual observada em cada amostra. Para tal, as seguintes etapas foram seguidas:

- 1º. Disposição dos dados em uma tabela, contendo as seguintes colunas:
  - a. Coluna A: valores de  $\psi$  em ordem crescente (de  $-63,4^\circ$  até  $63,4^\circ$ ).
  - b. Coluna B: valores de  $\varphi$  ( $0^\circ$  e  $90^\circ$ ).
  - c. Coluna C: valores de  $2\theta$  (posição do pico de intensidade de difração, obtido através de ajuste de uma curva teórica do tipo Pseudo-Voigt).
  - d. Coluna D: valores da distância interplanar medida, baseado na lei de Bragg (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**1), com o ângulo  $\theta$  em radianos.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\theta) \quad (1)$$

Onde:

$d$  = Distância interplanar

$\theta$  = Ângulo de entrada do feixe

e. Coluna E: valor do  $\sin^2 \psi$ .

2º. Elaboração do gráfico  $\sin^2 \psi$  vs.  $d$ . São esperadas duas retas, sendo uma para  $\phi = 0^\circ$  e outra para  $\phi = 90^\circ$ . Será usado o gráfico de dispersão XY do Microsoft Excel.

3º. Levantamento da equação de reta do gráfico  $\sin^2 \psi$  vs.  $d$ .

4º. Levantamento do coeficiente angular de cada reta ( $m_{\phi=0^\circ}$  e  $m_{\phi=90^\circ}$ ), a ser realizado através de uma regressão linear, com a ferramenta Linha de Tendência do Microsoft Excel. Caso o coeficiente angular seja negativo, a tensão residual encontrada será de compressão. Caso positivo, de tração.

5º. Cálculo das tensões para cada direção azimutal  $\Phi$ ,  $\sigma_{\phi=0}$  e  $\sigma_{\phi=90^\circ}$ , com base na equação 3, sabendo que  $d_0 = 1,7178 \text{ \AA}$ ,  $E = 113,8 \text{ GPa}$  e  $\nu = 0,342$ .

$$\frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\phi} \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (2)$$

Onde:

$d_{\phi\psi}$  = Distância interplanar medida no material ensaiado

$d_0$  = Distância interplanar no material livre de tensão

$\nu$  = Coeficiente de Poisson

$E$  = Módulo de elasticidade do material

$\psi$  = Ângulo de rotação do anel do difratômetro

$\sigma_{11}$  = Tensão na direção 11

$\sigma_{22}$  = Tensão na direção 22

6º. Cálculo do módulo da tensão residual com a equação 2. Podemos admitir que a tensão residual encontrada na superfície da amostra pode ser expressa pelo módulo das tensões  $\sigma_{\phi=0}$  e  $\sigma_{\phi=90}$  porque a direção em que a tensão ocorre não é representativa para este estudo.

$$\sigma = \left( \sqrt{(\sigma_{\phi=0^\circ})^2 + (\sigma_{\phi=90^\circ})^2} \right) \quad (3)$$

Onde:

$\sigma_{\phi}$  = Componente de tensão ao longo do respectivo eixo

## 2.2 Medição do Desgaste de Ferramenta

### 2.2.1 Ferramentas utilizadas

Foram realizados dois experimentos para medição de desgaste da ferramenta, sendo o primeiro com fresa intercambiável de diâmetro 50 mm e seis insertos de diâmetro 10 mm cada. As ferramentas foram fornecidas pela empresa Seco Tools, sendo a fresa código R220.29-0050-05.6A e insertos código RDHT10T3M0T-M07 MS2500. O segundo experimento foi realizado com fresa intercambiável de diâmetro 25 mm, código R217.29-1225.RE-05.3A com três insertos, também fornecidos pela empresa Seco Tools.

### 2.2.2 Máquina-ferramenta utilizada

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

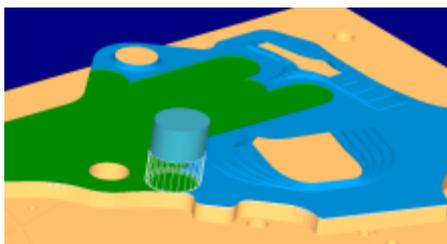
O ensaio de desgaste de ferramenta foi realizado em um centro de usinagem Romi modelo D800 Standard, com cone ISO 40, faixa de rotação de 7 a 7500 RPM, curso máximo em X, Y e Z de 800, 530 e 580mm respectivamente e mesa de 914 x 500mm. A potência máxima do motor principal é de 15 kW, com rotação acima de 1607 RPM e o torque máximo é 87 N.m até 1607 RPM. O comando instalado na máquina é o GE Fanuc 0i-MC.

### 2.2.3 Trajetórias e parâmetros

Os ensaios foram realizados durante a produção de uma peça aplicada na indústria aeronáutica (Embraer), fabricada na liga Ti6Al4V, de dimensões aproximadas de 560 x 430 x 38 mm, na empresa Finetornos. As trajetórias foram geradas em software CAD-CAM Vero Visi – Machining, sobre modelo matemático da peça. Foram feitas réplicas dos ensaios, permitindo assim análise do desvio padrão do desgaste das ferramentas. Foi gerada trajetória de faceamento para fresa de diâmetro 50 mm, com uma parada intermediária para rotação dos insertos, resultando na remoção total de material de 924 cm<sup>3</sup>, comprimento total usinado de 19812 mm e o tempo total 38 minutos para cada amostra. Foram realizados cinco passes com a mesma trajetória, variando a profundidade em 1,5 mm a cada passe e totalizando 67 entradas no material. Adotou-se largura de corte (ae) de 40 mm, porém a geometria complexa do material não permitiu que esse parâmetro se fixasse durante toda a trajetória. Foram registradas duas imagens do estado da aresta de corte ao final de cada passe. Após o segundo passe os insertos foram girados para que uma nova aresta fosse testada. Duas peças foram usinadas utilizando-se apenas entradas frontais retas (peças 1 e 4) e mais duas peças com entradas por rolagem (peças 2 e 3). Na figura 13 está a ilustração da trajetória de faceamento da peça.

Para a fresa de diâmetro 25 mm foi programada uma trajetória de desbaste de três cavidades na peça, com uma parada intermediária para rotação dos insertos. A remoção total de material foi de 568 cm<sup>3</sup>, o comprimento total usinado foi 22480 mm e o tempo total 43 minutos para cada amostra. Foram realizados dez passes com a mesma trajetória variando a profundidade em 1,5 mm a cada passe, totalizando 10 mergulhos da ferramenta em cada peça. Adotou-se largura de corte (ae) de 15 mm, porém a geometria complexa da peça não permitiu que esse parâmetro se fixasse durante toda a trajetória. Foram registradas duas imagens do estado da aresta de corte ao final de cada passe. Após o quinto passe os insertos foram girados para que uma nova aresta fosse testada. Foram usinadas duas peças utilizando a estratégia de rampa com 15° sem redução no avanço e mais duas peças com a estratégia de entrada por mergulho frontal e avanço reduzido para 150 mm/min. Na usinagem da primeira peça ocorreram falhas catastróficas e perda da aresta de corte, assim foi necessário reprogramar a última peça para que se usinassem cinco passes de cada estratégia e se mantivesse a proporção de réplicas. A ilustração da geometria das cavidades fresadas pode ser visualizada na figura 14.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 13** - Modelamento do faceamento da peça



**Figura 14** - Modelamento das cavidades da peça

Durante toda a usinagem foi empregado o fluido de base vegetal Castrol Carecut S 142 BF em abundância sobre a região de corte. Foram adotados os parâmetros de usinagem indicados na tabela 3.

**Tabela 3** - Parâmetros de usinagem

Parâmetros	Fresa diâmetro 25mm	Fresa diâmetro 50mm
Velocidade de corte (Vc)	80m/min	80m/min
Avanço por faca (fz)	0,17mm (3 facas)	0,17mm (6 facas)
Profundidade de corte (ap)	1,50mm	1,50mm
Rotação	1020 RPM	510 RPM
Avanço de mesa	520 mm/min	520 mm/min
Potência de corte	0,55 kW	1,4 kW

#### 2.2.4 Método de medição do desgaste

O acompanhamento do desgaste dos insertos foi realizado fotografando o estado da aresta de corte a cada passe de usinagem. Em cada fotografia foi registrado o tempo de usinagem, permitindo o acompanhamento da evolução do desgaste. Foi utilizada uma câmera fotográfica Sony Cyber-shot modelo DSC-W 220, com zoom óptico de 4x, lente grande angular de 30mm e resolução de 12,1 mega pixels. Foi utilizado um tripé como acessório para evitar vibração da câmera durante a captura das imagens. Elas foram feitas sempre do mesmo inserto no suporte, para eliminar o erro causado por possíveis variações no desgaste entre eles. Após a coleta das imagens, foi feita a contagem de pixels da altura do entalhe e da espessura do inserto, utilizando o software Paint. Como a espessura do inserto é conhecida (3,97mm), é possível estabelecer a razão entre as contagens de pixels e determinar o desgaste, como ilustrado nas figuras 15 e 16.

\* Contribuição técnica ao 69<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14<sup>o</sup> ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

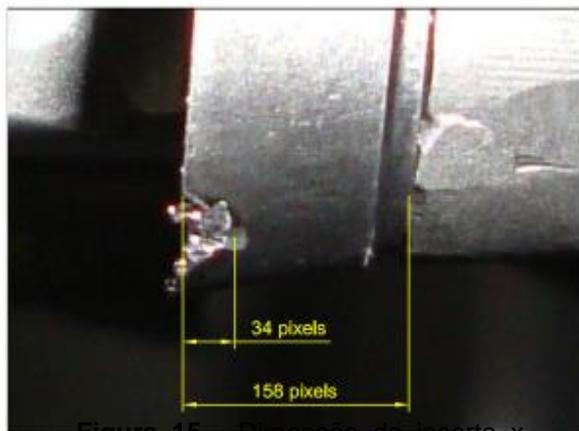


Figura 15 - Dimensão do inserto x desgaste por pixels

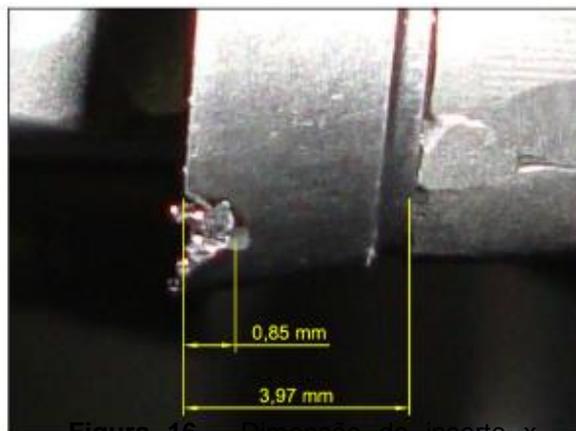


Figura 16 - Dimensão do inserto x desgaste em mm

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Medições de Tensões Residuais por Difração de Luz Síncrotron

A figura 17 representa os dados coletados no difratômetro para a amostra 1, que resultou em tensão residual  $\sigma_1 = -564$  MPa.

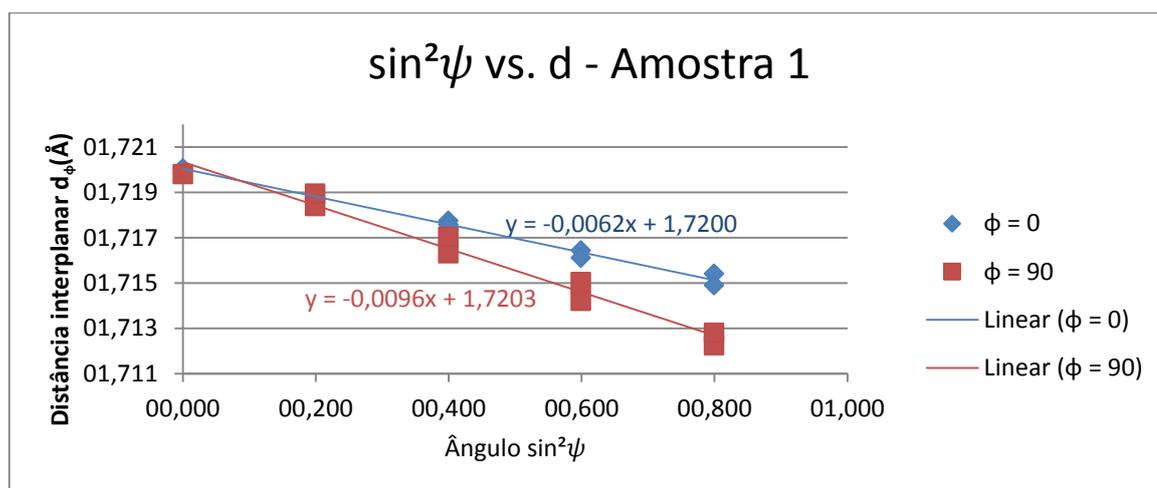


Figura 17 - Gráfico  $\sin^2\psi$  vs. d da amostra 1

A figura 18 representa os dados coletados no difratômetro para a amostra 5, que resultou em tensão residual  $\sigma_5 = -517$  Mpa.

\* Contribuição técnica ao 69<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14<sup>o</sup> ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

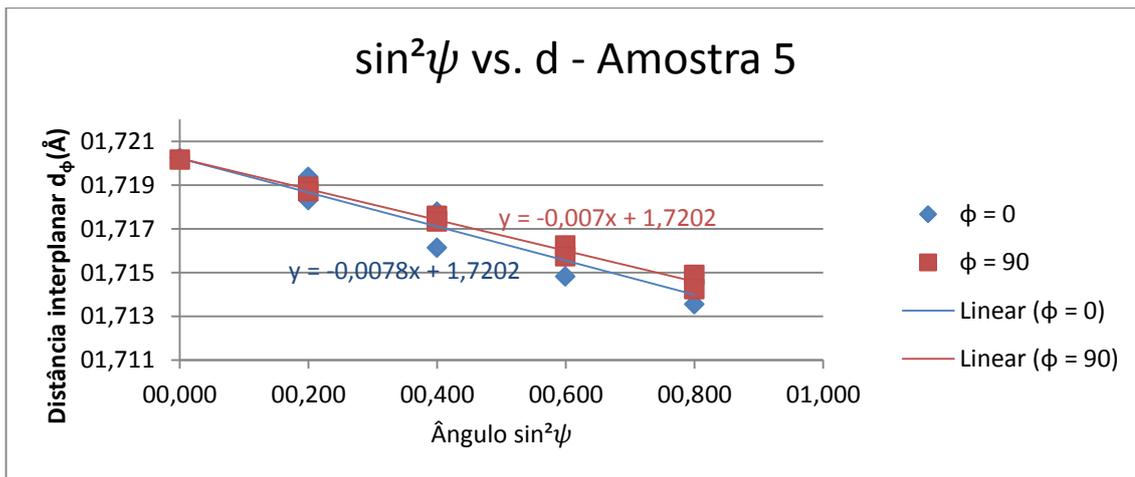


Figura 18 - Gráfico sin<sup>2</sup>ψ vs. d da amostra 5

A figura 19 representa os dados coletados no difratômetro para a amostra 7, que resultou em tensão residual  $\sigma_7 = -378$  Mpa

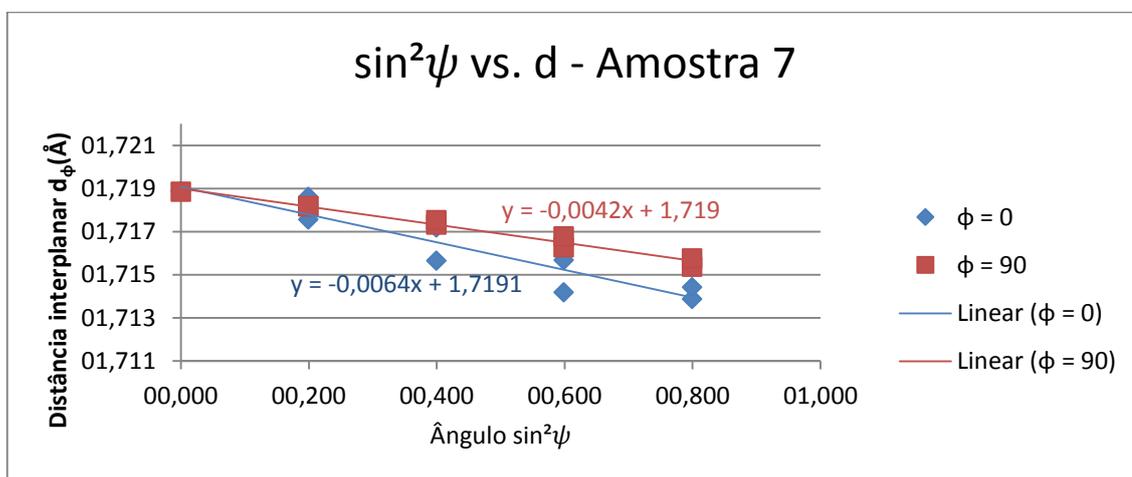


Figura 19 - Gráfico sin<sup>2</sup>ψ vs. d da amostra 7

A figura 20 representa os dados coletados no difratômetro para a amostra 11, que resultou em tensão residual  $\sigma_{11} = -755$  MPa.

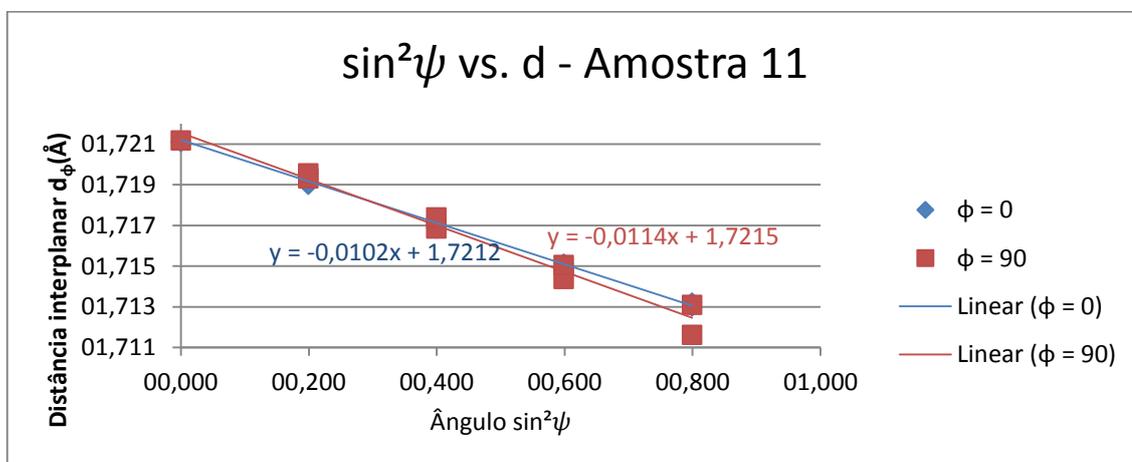


Figura 20 - Gráfico sin<sup>2</sup>ψ vs. d da amostra 11

A verificação da posição do pico de difração do pó recozido foi feito com ajuste de Lorentz ao invés do ajuste de Area Pseudo-Voigt. Este último é muito útil em picos simétricos, mas é falho quando o pico é assimétrico. Os picos de difração obtidos com o pó recozido apresentaram comportamento assimétrico, com cauda para esquerda. Este comportamento ocorreu devido à resolução utilizada na coleta dos dados e ao fato do pico ser muito fino. O pico foi projetado por apenas três pontos. Na figura 21 pode-se observar que o último ponto diverge dos demais. Isto ocorre devido à baixa qualidade do pico observado com  $\psi$  de  $63,4^\circ$  (Figura ).

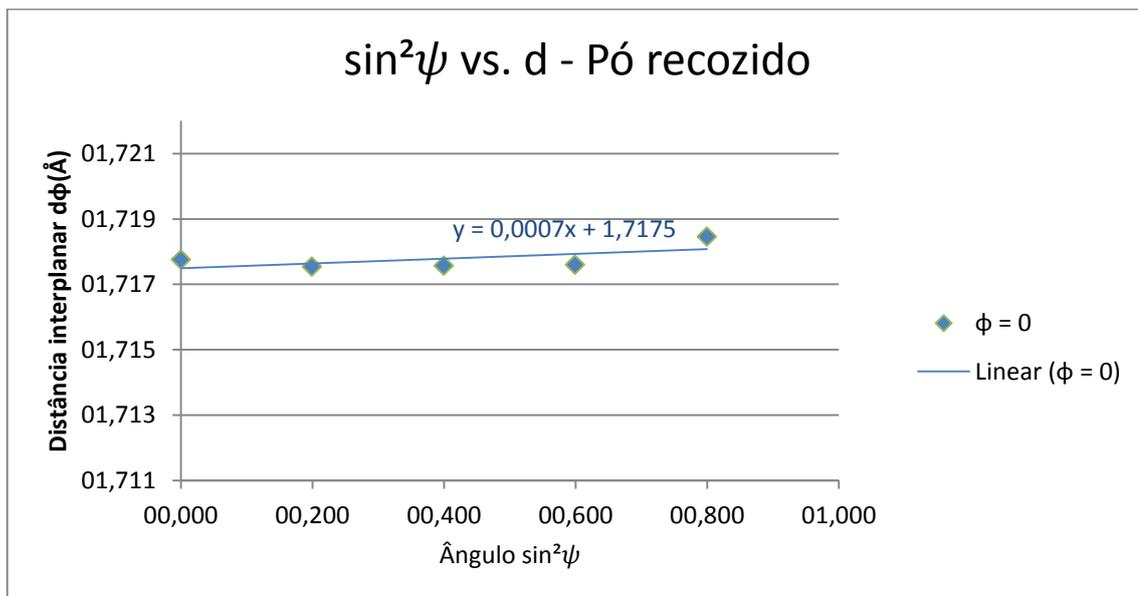


Figura 21 - Gráfico  $\sin^2\psi$  vs. d do pó recozido

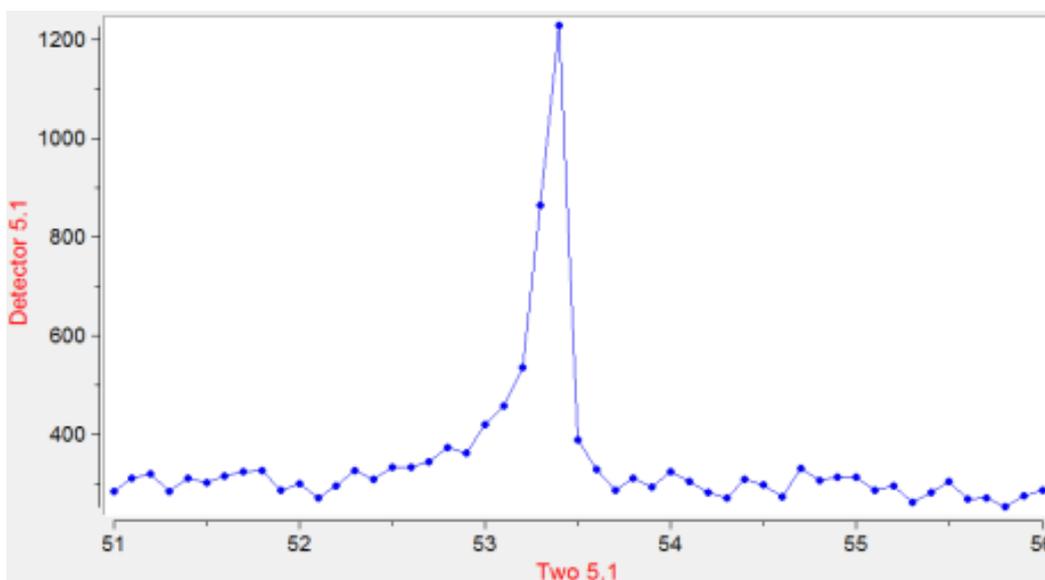


Figura 22 - Última coleta de pontos do pó recozido

Por esta razão optou-se por desconsiderar o ponto em questão, conforme ilustração da figura 23:

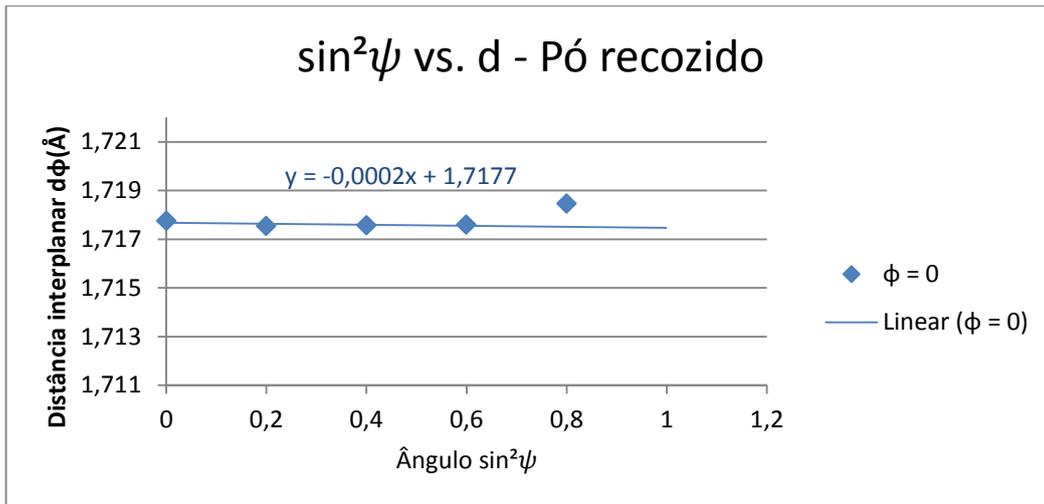


Figura 23 - Gráfico  $\sin^2\psi$  vs.  $d$  do pó recozido, desprezando  $\sin^2\psi = 0,8$

Tensão residual  $\sigma_{\phi=0} = -10 \text{ MPa}$

O valor do parâmetro de rede medido no pó recozido foi  $1,7177 \text{ \AA}$ .

A tensão residual de compressão de 10 MPa observada no pó recozido representa que há um erro sistemático da ordem de 10 MPa no processo de medição utilizado. Tal erro pode ser tolerado, pois a menor tensão medida é da ordem de 370 MPa, ou seja, há um desvio de 2,7% na medição, não justificando que sejam feitas correções nos valores calculados anteriormente.

Resumindo os dados, é possível estabelecer a seguinte relação entre a estratégia de entrada e o módulo da tensão residual ilustrado na figura 24:

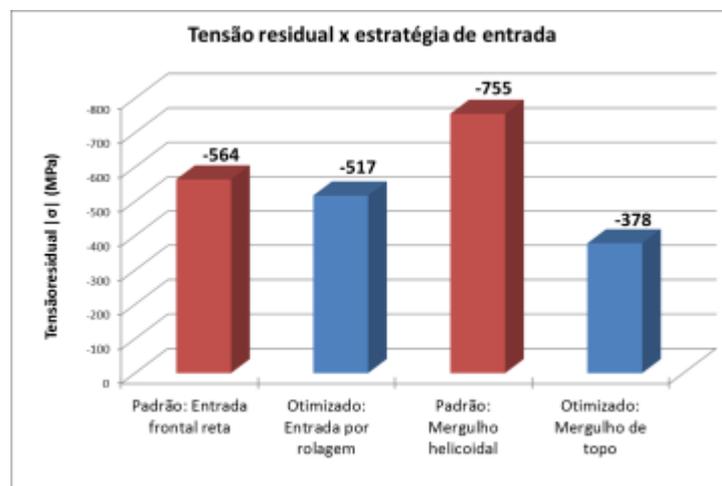


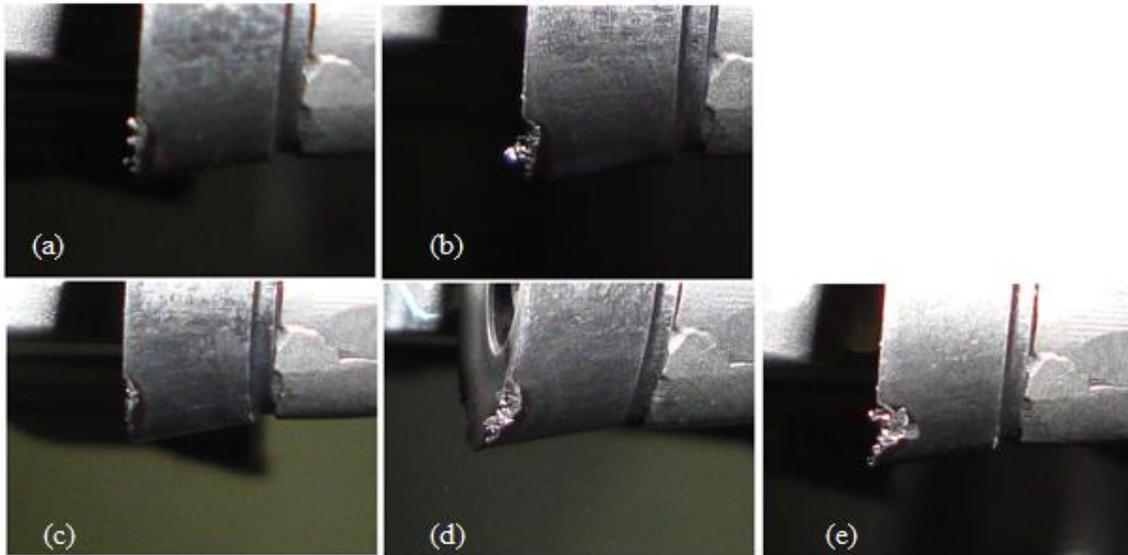
Figura 24 - Comparativo das tensões residuais

Os valores de tensão em todas as estratégias foram de ordem compressiva conforme o esperado. Como relacionado nas referências bibliográficas, as tensões de compressão são benéficas para a vida em fadiga da peça. Nas estratégias de entrada frontal os valores de tensão residual foram semelhantes com variação de 8% e nas estratégias de mergulho os valores de tensão residual apresentaram variação significativa. A estratégia de mergulho helicoidal resultou em maior valor de tensão se comparado com as demais.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

### 3.2 Medição de Desgaste de Ferramenta

Na figura 25 pode-se observar a evolução do entalhe causado pelo desgaste do inserto no faceamento da liga de titânio.



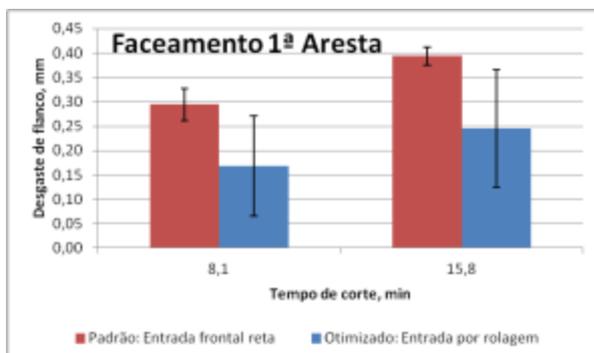
**Figura 25** - Desgaste Fresa Ø50 Peça 1 (a) 1ª aresta em 0:08:04; (b) 1ª aresta em 0:15:49; (c) 2ª aresta em 0:07:46; (d) 2ª aresta em 0:15:35; (e) 2ª aresta em 0:22:18

O desgaste dos insertos resultante da operação de faceamento pode ser observado na tabela 4, onde estão classificados entre a primeira e segunda aresta de cada peça usinada.

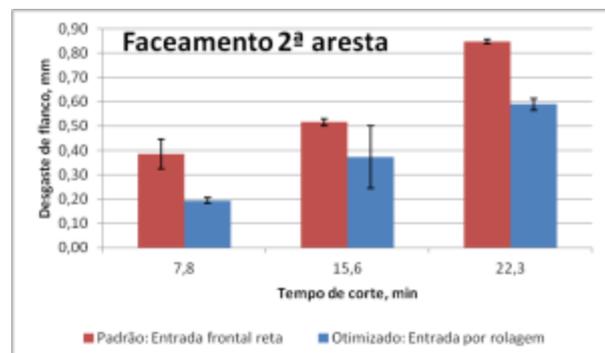
**Tabela 4** - Desgaste resultante no faceamento

	Tempo	Desgaste (mm)			
		Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4
		Frontal	Rolagem	Rolagem	Frontal
1ª aresta	0:08:04	0,27	0,10	0,24	0,32
	0:15:49	0,41	0,16	0,33	0,38
2ª aresta	0:07:46	0,34	0,19	0,20	0,43
	0:15:35	0,53	0,46	0,28	0,51
	0:22:18	0,85	0,57	0,61	0,84

A evolução do desgaste de flanco é exibida nas figuras 26 e 27, diferenciando as estratégias e evidenciando o desvio padrão observado no fresamento da réplica.



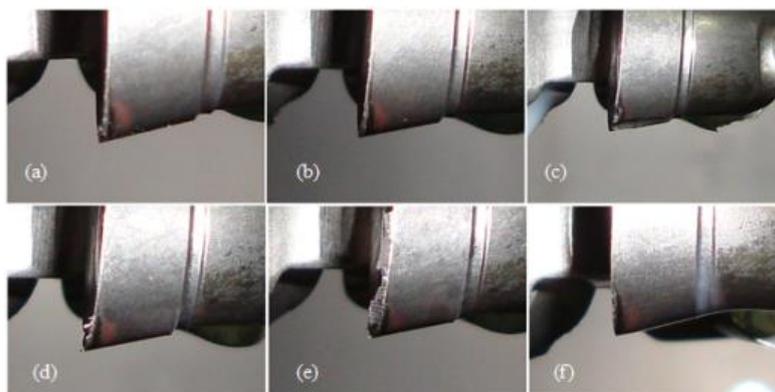
**Figura 26** - Desgaste de flanco x Tempo de corte - Faceamento 1ª aresta



**Figura 27** - Desgaste de flanco x Tempo de corte - Faceamento 2ª aresta

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Houve uma sensível redução do desgaste da aresta de corte durante o faceamento com a aplicação da entrada por rolagem, uma vez que a espessura média do cavaco é reduzida e evita os impactos decorrentes da penetração da ferramenta no material. Na figura 28 pode-se observar a evolução do desgaste de flanco do inserto no faceamento da liga de titânio. O experimento com a peça 1 foi descartado por causa da ocorrência de falha catastrófica durante o ensaio.



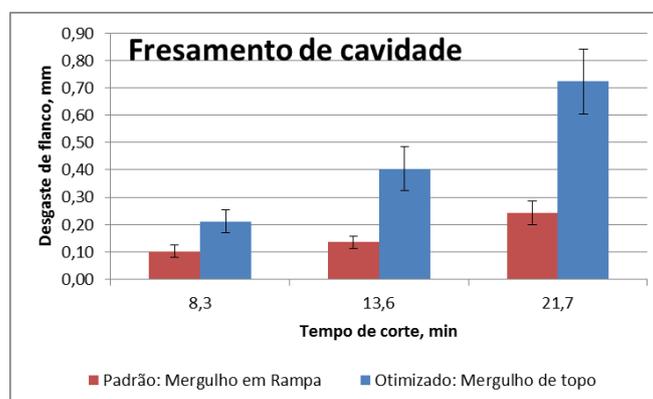
**Figura 28** - Desgaste Fresa Ø25 Peça 2 (a) 1<sup>a</sup> aresta em 0:08:19; (b) 1<sup>a</sup> aresta em 0:13:37; (c) 1<sup>a</sup> aresta em 0:21:44; (d) 2<sup>a</sup> aresta em 0:08:19; (e) 2<sup>a</sup> aresta em 0:13:37; (e) 2<sup>a</sup> aresta em 0:21:44

O desgaste observado no fresamento de cavidades é mostrado na tabela 5, onde a cor azul representa a estratégia de mergulho de topo e em vermelho o mergulho em rampa.

**Tabela 5** - Desgaste no fresamento das cavidades

	Tempo	Desgaste (mm)			
		Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4
1 <sup>a</sup> aresta	0:08:19	0,74	0,10	0,22	0,16
	0:13:37	0,87	0,16	0,42	0,32
	0:21:44	Falha	0,29	0,86	0,63
2 <sup>a</sup> aresta	0:08:19	0,19	0,08	0,25	0,12
	0:13:37	Falha	0,11	0,47	0,14
	0:21:44	Falha	0,23	0,68	0,21

A evolução do desgaste médio de flanco nas cavidades é exibida na figura 29, diferenciando as estratégias e evidenciando o desvio padrão observado no fresamento da réplica.



**Figura 29** – Desgaste de flanco x Tempo de corte nas cavidades



O entalhe causado pelo desgaste do inserto durante o mergulho de topo se mostrou prejudicial quando comparado ao mergulho em rampa, possivelmente pela formação de um cavaco longo, em forma de fita, que aderiu ao suporte de insertos e dificultou tanto o acesso do fluido de corte como o fluxo de cavacos durante a usinagem. Esta condição se repetiu em todas as réplicas em que esta estratégia foi usada.

Analisando os dados obtidos verificou-se que para obter menor desgaste de inserto é recomendado utilizar a estratégia de entrada por rolagem no faceamento ou o mergulho em rampa no fresamento de cavidades. É válido observar que ao se utilizar fluido em alta pressão podem-se obter melhores resultados no mergulho reto forçando a saída do cavaco durante a penetração da ferramenta.

## 4 CONCLUSÃO

A pesquisa desenvolvida ao longo deste trabalho buscou reduzir o desgaste dos insertos no processo de fresamento de titânio e analisar as tensões residuais na usinagem da liga Ti6Al4V. No faceamento, a estratégia proposta de entrada por rolagem resultou em um menor desgaste médio de flanco, sendo 0,59 mm após 22,3 min enquanto na estratégia convencional de entrada frontal reta o desgaste médio foi de 0,85 mm para o mesmo tempo de usinagem. Isso possivelmente ocorreu devido à redução da espessura do cavaco durante a entrada por rolagem da ferramenta no material, reduzindo o efeito dos impactos decorrentes do contato do inserto com a peça e o desgaste em 30%. Ainda no faceamento, a estratégia proposta resultou em uma tensão residual superficial de -517 MPa, uma pequena redução em relação a estratégia convencional, que resultou -564 MPa. Do ponto de vista de projeto, não há alteração significativa entre as tensões, já que ambas apresentaram-se compressivas. No fresamento de cavidade, a estratégia proposta de mergulho reto resultou em um maior desgaste médio de flanco, sendo 0,72 mm após 21,7 min enquanto na estratégia convencional de mergulho em rampa o desgaste médio foi de 0,24 mm para o mesmo tempo de usinagem. Isso possivelmente ocorreu pela formação de um cavaco longo, em forma de fita, que aderiu ao suporte de insertos e dificultou tanto o acesso do fluido de corte como o fluxo de cavacos durante o mergulho reto. Assim, a estratégia proposta aumentou em 200% o desgaste do inserto. Ao contrário do observado no faceamento, no fresamento de cavidade houve uma significativa diferença entre as tensões residuais superficiais observadas nas diferentes estratégias, porém ambas também foram compressivas. A proposta de mergulho reto resultou em uma tensão de -378 MPa, uma expressiva redução em relação a estratégia convencional, que resultou em uma tensão de -755 MPa. Os resultados demonstraram que a estratégia de mergulho em rampa promove os melhores resultados quanto ao desgaste de inserto e valores de tensões residuais superficiais.

## Agradecimentos

Agradecemos primeiramente ao Professor Dr. Osmar Roberto Bagnato, nosso orientador, que acreditou em nós e incentivou-nos para a conclusão deste trabalho, face aos inúmeros percalços do trajeto. Agradecemos também ao Professor Dr. Roosevelt Droppa Jr, um companheiro de percurso e de discussões profícuas, dentro e fora do contexto deste trabalho, agraciando-nos incontáveis vezes com sua paciência, conhecimento e amizade. Alguns experimentos e vários “entendimentos”

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



não teriam sido possíveis sem a colaboração de Cristiane Barbieri Rodella, Douglas Araujo e Enilson Carlos Fim.

## REFERÊNCIAS

- 1 Antonialli AIS. Uma contribuição ao fresamento frontal da liga de titânio Ti-6Al-4V. Campinas : s.n., 2009.
- 2 Diniz AE, Marcondes FCE, Coppini NL. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 3. São Paulo : Artliber, 2001.
- 3 Costa AR. Otimização do Processo de Fresamento de Cavidades com Fresas de Insertos Intercambiáveis, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas. 2003.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 Noyan IC, Cohen E, Jerome B. Residual Stress - Measurement by Driffractton and Interpretation. Evanston : Springer-Verlag, 1987.
- 2 Ferraresi D. Usinagem dos metais: Fundamentos da usinagem dos metais. 1. s.l. : São Paulo, 1970. p. 751.
- 3 Lu J. Handbook of measurement or residual stresses. Califórnia : Fairmont Press, 1996.
- 4 Als-Nielsen J, Mcmorrow D. Elements of Modern X-ray Physics. 2ª. Londres : Wiley, 2011.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.