

# OTIMIZAÇÃO DO CORTE DE TITÂNIO PELA ANÁLISE FATORIAL DOS PARÂMETROS DO LASER PULSADO DE NEODÍMIO: YAG

## **Ivan Alves de Almeida**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP, Av. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária – São Paulo – SP - CEP 05508-900; [ialmeida@ipen.br](mailto:ialmeida@ipen.br)

## **Wagner de Rossi**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP; [wdrossi@ipen.br](mailto:wdrossi@ipen.br)

## **Milton S. F. Lima**

Instituto de Estudos Avançados, CTA - São José dos Campos/SP; [milton@ieav.cta.br](mailto:milton@ieav.cta.br)

## **José Roberto Berretta**

Centro Tecnológico da Marinha – CTM/SP; [berretta@ipen.br](mailto:berretta@ipen.br)

## **Gesse Eduardo Calvo Nogueira**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP; [genoguei@ipen.br](mailto:genoguei@ipen.br)

## **Niklaus Ursus Wetter**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP; [nuwetter@ipen.br](mailto:nuwetter@ipen.br)

## **Nilson Dias Vieira Junior**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP; [nilsondv@ipen.br](mailto:nilsondv@ipen.br)

**Resumo.** *A necessidade de se obter peças processadas a laser, caracterizadas pela boa qualidade de acabamento superficial, baixa rugosidade e a conservação de suas propriedades metalúrgicas, foi a motivação principal na realização deste estudo. Além disso, a versatilidade e as vantagens, como também a tendência global do setor industrial, tornaram-se fatores preponderantes na utilização do laser como ferramenta de usinagem. O escopo do presente trabalho foi determinar os efeitos da usinagem por laser pulsado de Nd:YAG sobre a qualidade e formação de fases na superfície de corte. Para isso, chapas de titânio comercialmente puro (grau 2) e da liga Ti6Al4V (grau 5), com espessuras de 0,5 e 1,0 milímetros, foram empregadas no processo dos ensaios sob ação do laser. As amostras obtidas foram analisadas por microscopia ótica (MO) para determinação da formação de rebarbas. Verificou-se um aumento da dureza superficial na região do corte e a formação de precipitados de nitrogênio sob uma fina camada da zona de re-solidificação. Neste caso, se construiu um arranjo fatorial referente às diversas combinações de diferentes fatores de processamento e pela análise de variância avaliou-se o grau de influência destes parâmetros que são estatisticamente significantes para o processo.*

**Palavras-chave:** *usinagem a laser; laser Nd:YAG; titânio; análise de variância.*

## 1. INTRODUÇÃO

Toda empresa inserida na cadeia de produção visa a melhoria contínua, no controle de seus processos e na geração de seus produtos. Desta forma, os fatores como qualidade, eficiência e redução dos custos são estímulos para a conquista da excelência operacional, como também, servem para gerar itens competitivos dentro do cenário global. Conseqüentemente, estes fatores implicam na investigação de novas tecnologias e atualmente é possível constatar uma tendência do setor da manufatura na substituição de métodos convencionais pelo processamento a laser<sup>1</sup>.

Este processo abrange diversos segmentos em diferentes áreas, entre as quais o laser destaca-se nas principais aplicações industriais<sup>2</sup> como o corte, furação, solda, tratamento térmico e marcação.

A aplicação de um feixe de luz para o processamento de materiais envolve um mecanismo, no qual torna-se necessário adequar o tipo de material e sua forma geométrica ao tipo de laser (que é determinado pelo comprimento de onda e pelo regime de operação contínuo ou pulsado). A partir desta seleção, também é necessário selecionar e ajustar os vários parâmetros relativos ao processamento a laser, que exercem influência na qualidade do resultado final, no custo e na velocidade de processo, entre outros<sup>3,4</sup>.

Esta tecnologia exerce grande interesse devido ao fato de agregar inúmeras vantagens, tais como: processo sem contato e sem desgaste de ferramenta, possibilidade de uso de atmosfera controlada, alta densidade e controle de energia, flexibilidade no caminho do feixe, simplicidade de fixação, fácil automação, pequena zona termicamente afetada, alta velocidade de processo, excelente qualidade da borda entre outras.

Concomitantemente, surge associada à aplicação do processo de usinagem a fabricação de componentes a partir de ligas de titânio<sup>5,6,7</sup> e de titânio comercialmente puro – (Ti CP). Após a década de 50, este material despertou grande interesse em diversas aplicações da engenharia, principalmente devido as suas características metalúrgicas e mecânicas, tais como: densidade razoavelmente baixa ( $4,5 \text{ g.cm}^{-3}$ ), médio módulo de elasticidade (105 GPa) e valores do limite de resistência à tração de 1350 MPa.

A classificação metalúrgica do titânio<sup>8,9</sup>, segundo o sistema da ASTM (American Society of Testing and Materials) é determinada sob a seguinte forma: Ti CP<sup>10</sup> de diferentes graus (também denominado como “não-ligados”): ligas alfa; ligas alfa-beta e ligas beta, as quais definem a predominância das fases presentes na microestrutura.

Um material alotrópico, o qual é caracterizado pela alteração na estrutura cristalina conforme a mudança de temperatura. Na condição da temperatura ambiente apresenta estrutura cristalina hexagonal, chamada de alfa, mas acima de 890 °C sua estrutura se modifica para cúbica de corpo centrado - (beta). Relacionadas diretamente à formação da microestrutura, estas fases proporcionam diferentes propriedades metalúrgicas e mecânicas ao material.

O titânio apresenta elevada resistência à corrosão em temperatura ambiente, assim como a sua dureza e resistência ao desgaste são outras características úteis e atraentes para diversas aplicações. Entretanto, tais propriedades podem gerar entraves aos métodos convencionais, como: alto desgaste de ferramenta, tempo de usinagem e custos operacionais. A soma destes fatores favorece o desenvolvimento da usinagem a laser do titânio e suas ligas, como processo alternativo na confecção de componentes da área aeroespacial e biomédica, principalmente por apresentar excelente biocompatibilidade<sup>11</sup>.

Assim sendo, o presente trabalho une a tecnologia atual de processamento laser a um material relativamente novo, ou seja, um laser pulsado é utilizado para o corte de chapas finas de titânio.

Como a usinagem visa a excelência de qualidade, o processamento a laser para um determinado material deve obedecer a uma combinação adequada dos seguintes parâmetros<sup>12</sup>: densidade de potência; modo transversal do feixe; polarização da luz; velocidade do processo; características do material; geometria e diâmetro do bocal; distância bocal/peça; comprimento focal da lente utilizada; tipo, pressão, fluxo e pureza do gás; energia e duração temporal do pulso laser; comprimento de onda; distribuição energética no ponto focal, entre outros.

A Figura 1 ilustra o processamento de corte a laser e evidencia alguns dos parâmetros de estudo.

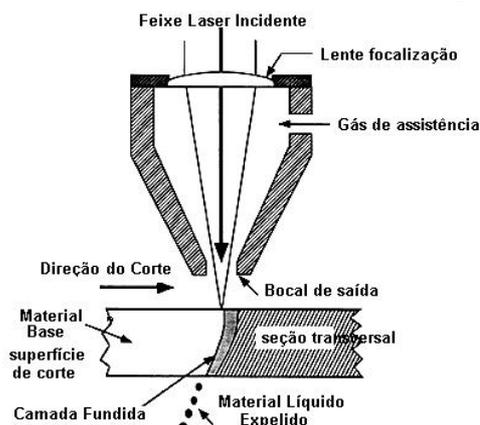


Figura 1 –Ilustração da interação do feixe laser com o material (para o caso do corte).

Os parâmetros descritos acima são inúmeros, desse modo, procurou-se aqui dar início a um estudo que permita evidenciar quais são os mais influentes no processo de corte e quais as possíveis interações que podem ocorrer entre eles. O quadro1 abaixo mostra quais parâmetros foram mantidos fixos e quais foram escolhidos para variar.

Quadro1. Definições dos parâmetros e considerações.

Parâmetros Fixos	Padrão selecionado	Parâmetros Variáveis	Considerações
Polarização da luz	não polarizada	Densidade de potência	Controlada pela relação diâmetro do feixe incidente com potência pico de pulso.
Desenho geométrico & Diâmetro do bocal	Formato cônico; $\varnothing = 0,7\text{mm}$	Energia do pulso laser	Fornecida pelo sistema; Variação: dezenas de milijoules a Joules.
Distância Bocal-Peça	$w_z = 0,6\text{mm}$	Duração temporal do pulso laser	Variação na escala de 0,2 a 10 ms.
Distância focal	100 mm	Velocidade do processo	Controle contínuo pelo CNC; Variação: centenas de mm/min.
Geometria de corte	linhas retas	Fluxo do gás	Controlado pelas válvulas do sistema de injeção;
Tipo de gás	$N_2$	Pressão	Controlado pelas válvulas do sistema de injeção; Limite: 14 bar.
Modo transversal	multímodo		

Elegeu-se esta combinação de parâmetros de acordo com prévio conhecimento adquirido nos laboratórios do Centro de Lasers e Aplicações (CLA/IPEN) e também pela facilidade de execução.

A energia por pulso e a taxa de sobreposição dos pulsos foram, a priori, considerados os parâmetros mais influentes no processo de corte e conseqüentemente tornaram-se as variáveis do sistema.

Assim sendo, escolheu-se a energia por pulso como a mínima possível capaz de realizar um furo homogêneo no material; A partir desta, a taxa de repetição do laser é determinada automaticamente, devido ao fato de manter-se uma potência média constante para a alimentação da lâmpada do laser. A importância de conserva-la constante, está relacionada à sua função de determinar a lente térmica no elemento laser e pela influência que tem na divergência do feixe (e conseqüentemente no diâmetro do feixe no ponto focal). Desta forma, a relação, descrita abaixo (equação1), foi mantida constante e com valor máximo permitido pelo sistema de alimentação.

$$P_m = E.f \quad (1)$$

Definiu-se  $P_m$  como a potência média real de saída do laser,  $E$  é a energia contida em cada pulso laser e  $f$  é a taxa de repetição dos pulsos, ou seja, o número de pulsos laser por segundo.

Diante da necessidade de verificar quais os parâmetros que são estatisticamente significantes para o processo, bem como, estabelecer os valores cujo parâmetro ou, a combinação dos parâmetros fornece as condições de usinagem mais adequadas ao processo, torna-se essencial à realização de ensaios comparativos pela análise de variância.

Muitos experimentos envolvem a análise dos efeitos de dois ou mais fatores sobre uma variável que se quer estudar. Conforme Montgomery<sup>13</sup>, o método de variar um dos fatores de cada vez e manter fixo os demais, não se mostra adequado quando existe a possibilidade da influência de um fator sobre o outro. Neste caso, o mais apropriado é a utilização de desenhos fatoriais, no qual todas as combinações possíveis dos fatores são investigadas em cada medida completa de um experimento.

O escopo principal deste estudo foi o de determinar os efeitos da usinagem laser e a influência do gás de assistência sobre a qualidade de acabamento superficial, relativo à rugosidade, formação de rebarbas, e formação de fases na superfície de corte, assim como de se estabelecer um conjunto de parâmetros, validado pela análise estatística, a resultar na otimização do processamento a laser.

Surge, portanto, um amplo caminho a ser percorrido no desenvolvimento de estudos aprofundados para uma completa avaliação das interações entre esta nova combinação do laser com o titânio.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O critério de seleção do material para a realização deste estudo foi devido à sua relevância comercial, o qual pode ser aplicado em diversos setores, principalmente na área médica e ortodôntica em particular na fabricação de implantes. Deste modo, escolheu-se dois tipos diferentes de titânio: o titânio comercialmente puro – Ti CP (grau 2) e a liga de titânio Ti6Al4V (grau 5), os quais são amplamente empregados, abrangendo cerca de 70% da produção do titânio e suas ligas.<sup>14</sup>

A partir de um sistema computacional, com auxílio de um software CAD/CAM, foi gerado um programa, o qual é transferido a uma central de processamento de materiais a laser – (CPML) para execução do corte das amostras. A CPML é um sistema constituído por uma fresadora de comando numérico em conjunto com um laser de estado sólido pulsado de Nd:YAG. Os cortes seguiram uma geometria retangular de 10 x 15 mm<sup>2</sup> e 5 x 15 mm<sup>2</sup>, com espessuras de 0,5 e 1,0 milímetros.

O mecanismo do processo de corte é resumido pela ação do feixe laser focalizado sobre o material juntamente com um jato de gás colinear a este feixe, proporcionando a remoção do material em fusão de tal maneira a gerar uma superfície usinada. Com o objetivo de se obter um corte com boa qualidade no acabamento superficial, e baseado nos estudos realizados pelo grupo de pesquisadores do CLA, selecionou-se um conjunto de parâmetros do laser, tais como: largura temporal (tp); taxa de repetição (f); energia de pulso (E); e também tipo e pressão do gás de assistência.

Na primeira fase deste trabalho empregou-se o nitrogênio industrial como gás de processo<sup>15</sup>, assim como se utilizaram lentes de focalização com comprimento focal de 50 e 100 milímetros.

Previamente à realização efetiva do corte, foi executada uma seqüência de pulsos únicos associada à variação da posição focal da lente, como uma estratégia para determinação da posição do ponto focal sobre o titânio. O pulso aplicado sobre a superfície gera uma cratera e pela sua observação no microscópio é possível selecionar o ponto de maior intensidade e assim definir a melhor posição focal.

Em uma etapa subsequente foram realizados pulsos únicos para a determinação da velocidade máxima de usinagem ( $v_{max}$  - mm/min) pelo equacionamento do diâmetro do furo ( $\varnothing$ -mm) e da taxa de repetição (f-Hz) conforme (equação 2):

$$v_{max} = \varnothing \cdot f \quad (2)$$

Com este procedimento, determinou-se a velocidade máxima de deslocamento do feixe laser, para o qual, os pulsos provocam furos tangentes uns aos outros. Conseqüentemente, uma velocidade superior tornaria impraticável a execução do corte.

A largura temporal do pulso laser e a potência média de alimentação da lâmpada são dois importantes parâmetros que foram mantidos fixos a 0.6 ms e aproximadamente 5300 Watts respectivamente. A tabela 1 relaciona os diâmetros de furo obtidos em função da energia do pulso laser; a taxa de repetição do laser (frequência) que foi alterada para cada caso, em razão de manter constante a potência média do laser.

Tabela 1. Variação dos parâmetros do laser, dimensão dos furos obtidos e  $v_{max}$  corte.

Condição	Frequência (Hz)	Energia (J)	Diâmetro (mm)	Velocidade Max. de corte (mm/min)
A	89	0,460	0,135	720,90
B	73	0,592	0,167	731,50
C	48	0,925	0,286	823,70

Em garantia da qualidade aplicou-se um fator de 5% de redução nas velocidades máximas. Na continuação do procedimento para obtenção do grupo de amostras neste estudo considerou-se a sobreposição dos pulsos (**S**) como fator importante no critério de seleção. As velocidades das três condições tiveram seus valores reduzidos em 80%, 60% e 40% da inicial conforme demonstrado na tabela 2.

Tabela 2. Grupo de amostras, suas velocidades e taxa de sobreposição para as três condições.

Condição	Nº amostra	Velocidade (mm/min)	S (%)
A	1	684	5
	2	548	24
	3	410	43
	4	274	62
B	5	700	5
	6	560	24
	7	420	43
	8	280	62
C	9	782	5
	10	626	24
	11	470	43
	12	313	62

Observação: A dimensão de cada amostra foi de 5 x 15 mm

Com a utilização de ensaios de microdureza Vickers, análise por difração de raios-X, microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV), analisou-se as características metalúrgicas das superfícies de corte, enfatizando-se a região próxima à aresta de corte, ou seja, a zona afetada termicamente.

Para análise por microscopia óptica e por microscopia eletrônica de varredura as amostras foram polidas e sofreram um ataque químico. A difração de raios-X foi realizada no centro da superfície de corte, por um difratômetro de raios-X Philips MPD 1880, com a utilização de um tubo de Cu ( $\lambda=1.54\text{\AA}$ ). Por meio de um microdurometro, Wolpert / Werke, tipo M-testor com carga de 200 g, obteve-se um conjunto de medidas de microdureza Vickers na superfície de corte, coletado em três posições diferentes: próximo à de entrada do laser; no centro da peça; e próximo à saída do feixe; medidas no material laminado, distante da região de ação do feixe, também foram obtidas.

Com referência à análise da qualidade superficial do corte, dois foram os fatores escolhidos, a rugosidade e a quantidade de rebarba formada. Para a determinação da rugosidade empregou-se um

rugosímetro SurfTest (modelo 211), e a quantidade de rebarbas foi obtida pela digitalização da imagem da superfície usinada (figura 2). Com a ampliação fotográfica da região de corte, a qual apresenta um acúmulo de material bastante evidente, extraiu-se a medida da área da superfície desta rebarba permitindo, dessa forma, revelar a quantidade relativa de cada parâmetro de usinagem.



Figura 2. A esquerda fotografia digital da superfície de corte de uma amostra, a direita a imagem adquirida e tratada graficamente e em destaque sobrepondo a região em preto é o resultado da subtração referente a espessura da chapa de titânio com a área relativa a quantidade de rebarba.

Em uma segunda fase, um novo grupo de amostras foi gerado, agora sob o interesse de uma avaliação relativa à aplicação de diferentes gases e suas influências no processo de corte. Perante a evidência da formação de precipitados de nitrogênio decidiu-se por empregar o argônio, o hélio e três misturas destes (em uma combinação proporcional a 75%He-25%Ar, 25%He-75%Ar e 50%) na execução do processo para evitar o fenômeno e provavelmente reduzir o efeito de endurecimento superficial.

### 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

A dinâmica do processamento a laser sofre influência de um complexo sistema de interação entre os parâmetros fixos e variáveis; contudo alguns deles parecem influenciar decisivamente na qualidade da superfície usinada.

Inicialmente a potencia efetiva do equipamento é um limitador na seleção do material, no que concerne diretamente à espessura, de modo que materiais mais espessos necessitam de maior energia para ocorrer à interação entre feixe laser e superfície do metal.

Outro parâmetro interferente na qualidade do corte é o gás de assistência. O titânio apresenta alta reatividade química com alguns gases, inclusive restringindo o emprego do oxigênio no processamento devido ao seu efeito pirofórico. Na fase inicial do trabalho o nitrogênio foi utilizado como o gás de assistência no processo laser de usinagem. Conforme a micrografia ótica da superfície usinada, apresentada na (figura 3) e os resultados de difração de raios-X, a utilização deste gás na usinagem propiciou a formação de precipitados de nitrogênio sob uma fina camada da zona de re-solidificação<sup>16</sup>.

Estes nitretos foram formados devido à interação do metal líquido superaquecido com o fluxo de gás que impele a poça a liberar o canal de corte.

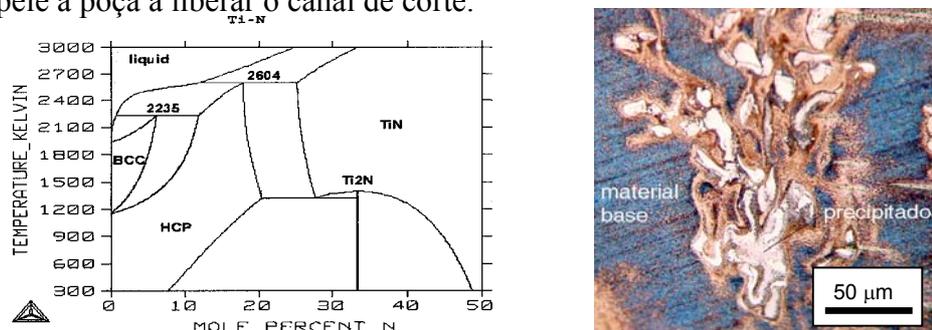


Figura 3 - O diagrama de fases do Titânio e a micrografia ótica da aresta de corte após ligeiro polimento e ataque, mostrando material base (Ti) e precipitados (claros).

Pela realização de um ensaio de microdureza Vickers comparou-se a região do corte com a do material base, o qual demonstrou um aumento da dureza na superfície re-solidificada. Verificou-se um acréscimo de aproximadamente duas vezes do valor médio relativo à região laminada do titânio

(Grau 2) e obteve-se um valor três vezes maior para a superfície re-solidificada na liga Ti6Al4V (Grau5)<sup>17</sup>.

As amostras geradas com a utilização dos gases He e Ar e sua mistura proporcionaram uma usinagem caracterizada pela redução da formação de rebarbas e também pela eliminação dos precipitados de nitrogênio. Resultados obtidos por difratometria de raios-X (figura 4) mostram que somente o corte com gás nitrogênio induz a fase TiN nas arestas de corte. Os picos referentes a esta fase não são observados nos cortes feitos com argônio e misturas de argônio e hélio.

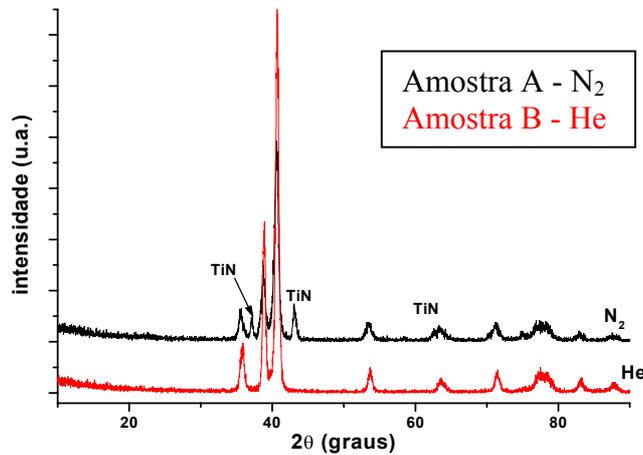


Figura 4. Difratogramas de raios-X: corte com N<sub>2</sub> e corte com He. Os picos correspondentes ao TiN são indicados.

Para a verificação da influência da energia e da taxa de sobreposição sobre a qualidade do corte, trinta e seis amostras foram cortadas de acordo com os parâmetros da tabela 3, ou seja, cortes com todas as combinações possíveis para três valores diferentes de energia do pulso laser e quatro valores diferentes de taxa de sobreposição destes pulsos. Nestas amostras foram medidas a rugosidade e a quantidade de rebarba formada para cada caso; as tabelas 3 e 4 mostram os resultados obtidos.

Tabela 3 - Quantidade de rebarba (mm<sup>2</sup>) medida para três energias e quatro taxas de sobreposição diferentes.

		Energia								
		E <sub>2</sub> - 0,460			E <sub>3</sub> - 0,592			E <sub>5</sub> - 0,925		
Taxa de Sobreposição	S <sub>1</sub> - 5%	0,229	0,246	0,300	0,294	0,222	0,203	0,283	0,278	0,250
	S <sub>2</sub> - 24%	0,378	0,483	0,445	0,431	0,480	0,465	0,323	0,333	0,338
	S <sub>3</sub> - 43%	0,316	0,362	0,407	0,693	0,591	0,655	0,505	0,558	0,484
	S <sub>4</sub> - 62%	0,557	0,475	0,538	0,686	0,676	0,712	0,452	0,497	0,478

Obs.: o grupo dos doze valores acima, dividido em três colunas é a referência da área da quantidade de rebarba obtida nas amostras. E na tabela abaixo é referente aos valores de rugosidade.

Tabela 4 – Rugosidade (µm) medida para três energias e quatro taxas de sobreposição diferentes.

		Energia								
		E <sub>2</sub> - 0,460			E <sub>3</sub> - 0,592			E <sub>5</sub> - 0,925		
Taxa de Sobreposição	S <sub>1</sub> - 5%	4,72	5,73	8,67	7,21	6,98	7,29	19,15	18,57	16,70
	S <sub>2</sub> - 24%	6,13	4,34	3,71	7,07	5,91	8,62	12,09	17,28	16,38
	S <sub>3</sub> - 43%	3,07	5,13	4,25	9,51	6,37	8,11	7,79	5,32	8,75
	S <sub>4</sub> - 62%	2,67	4,58	5,62	2,69	3,92	3,95	7,08	5,29	9,00

A análise de variância feita com o uso do ANOVA mostra que estes dois parâmetros (energia e taxa de sobreposição) são importantes para os fatores escolhidos (rugosidade e rebarba), isto é, influenciam decisivamente na rugosidade e na formação de rebarbas dos cortes realizados. Conforme (tabela 5), a análise mostra também que existe uma forte interação entre estes dois parâmetros (Valor P), ou seja, a influência de um deles, sobre estes fatores, depende do particular nível do outro parâmetro. Defini-se grau de liberdade (DF); soma dos quadrados (SS); média quadrática (MS); razão entre médias (Fo).

Tabela 5 – Análise de variância para acabamento superficial das peças usinadas de titânio.

	Fonte	DF	SS	MS	Fo	Valor P
<b>Análise de variância para quantidade de rebarbas</b>	Sobreposição	3	0.490617	0.163539	119.74	0.000
	Energia	2	0.101402	0.050701	37.12	0.000
	Sobreposição*Energia	6	0.126438	0.021073	15.43	0.000
	Erro	24	0.032780	0.001366		
	Total	35	0.751237			
<b>Análise de variância para rugosidade</b>	Sobreposição	3	170.093	56.698	22.78	0.000
	Energia	2	329.853	164.927	66.27	0.000
	Sobreposição*Energia	6	158.185	26.364	10.59	0.000
	Erro	24	59.730	2.489		
	Total	35	717.862			

As figuras 5 e 6 abaixo mostram melhor como variam a rugosidade e a quantidade de rebarba em função da taxa de sobreposição e energia.

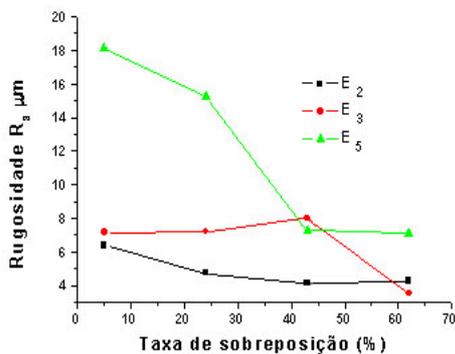


Figura 5.a - Variação Rugosidade x Taxa de sobreposição.

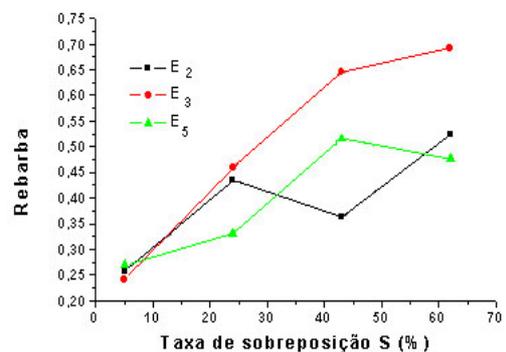


Figura 5.b - Variação Rebarba x Taxa de sobreposição.

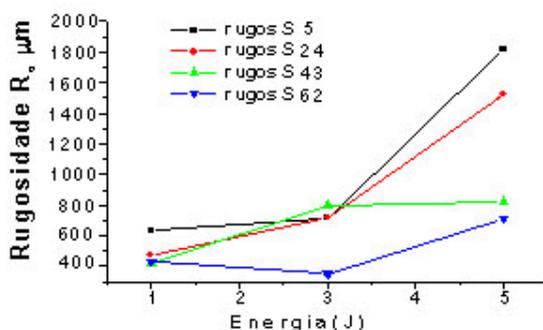


Figura 6.a – Variação Rugosidade x Energia.

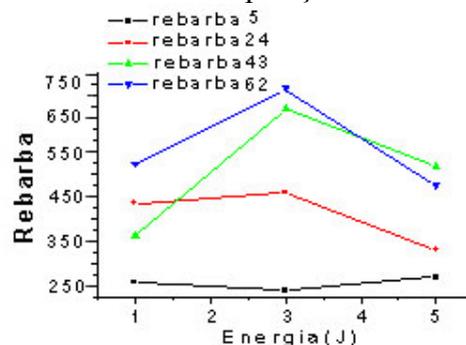


Figura 6.b – Variação Rebarba x Energia.

De uma maneira geral, verificou-se que o aumento da taxa de sobreposição, pulsos mais juntos e menor velocidade de processo, levam a uma diminuição da rugosidade e ao mesmo tempo a um aumento da quantidade de rebarbas. Esta melhoria da qualidade deve estar ligada a uma maior

transferência térmica do processo que, por um lado aumenta a quantidade de líquido expelido, e por outro permite um aplainamento maior da aresta do titânio. Quanto à energia, fica claro que a rugosidade não aumenta muito para os dois valores menores, mas aumenta muito para a energia maior; por outro lado, o comportamento da quantidade de rebarbas, formadas em função da energia do pulso laser, não é tão claro, parecendo que existe um valor intermediário de energia que leva a um aumento de rebarbas.

#### 4 – CONCLUSÕES

Os resultados de difração de raios-X, para o caso do corte com nitrogênio, mostram claramente que houve a formação de precipitados de TiN nesta superfície de corte. Os ensaios de dureza também mostraram que esta foi consideravelmente aumentada nesta mesma região. Concluiu-se, portanto, que este aumento, muito provavelmente, foi devido à formação dos precipitados de TiN. Os cortes realizados com os gases He, Ar e suas misturas não apresentaram a formação destes nitretos, e provavelmente não têm uma alteração acentuada na dureza superficial da região de corte.

Estas diferenças podem ser importantes quanto às exigências sobre a peça a ser utilizada. Conforme a aplicação desta é necessário uma análise do método de processamento empregado juntamente com o tipo de gás utilizado que provocam transformações das características metalúrgicas inerentes a propriedade do material base.

Quanto aos fatores escolhidos para o desenho do nosso experimento, ambos, energia por pulso e taxa de sobreposição, se mostraram influentes no processo. Aqui, novamente, a particular aplicação deve ser avaliada para a escolha dos melhores parâmetros, já que, a melhoria de uma das características do corte (rebarba ou rugosidade), leva necessariamente à piora da outra característica.

Obviamente, este trabalho explorou alguns entre todos os parâmetros possíveis de influência na qualidade do corte. Somente após a avaliação deste universo de parâmetros (outro estudo que está em andamento) será possível ter um quadro mais claro da real importância de cada um deles e desta forma, estabelecer um conjunto “otimizado”, o qual permitirá obter um resultado de corte caracterizado pela menor formação de rebarbas na borda de saída do feixe laser, menor rugosidade da superfície usinada e menor formação de óxidos sob as condições de máxima velocidade de usinagem para o corte do titânio com um laser pulsado de Nd:YAG.

#### 5 – REFERENCIAS

- 1 KATULIN, V. A. **Laser Technology In Industry**. H. Interactions, 1987. vol.37, p.423 - 432.
- 2 WETTER, N. U., ROSSI, W. **ICS Lectures on Industrial Applications of Lasers**. Viena, Unido Publication. S. P. Morato, Editor, 2000. v 1.
- 3 MIYAMOTO, B. L. M. **Laser Materials Processing**. Proceedings of ICALEO, 1993. Ed. P. Denney, I. vol. 2306.
- 4 ROHDE, H. **Sharp cutting and drilling with pulsed solid state lasers**. VDI-Tantung'96, Stuttgart, Deutschland, 1996. p.1-10.
- 5 BAYLES, Ra., MEYN, Da. MOORE, Pg. **Laser Processing of Titanium – 6Al-4V**. Jom-J Min Met Mat S, 1980. 32: (12) 32-32.
- 6 KAR, A., CARROLL, D. L., LATHAM, W. P., et al. **Cutting performance of a chemical oxygen-iodine laser on aerospace and industrial materials**. J. Laser Appl. 11: (3) 119-127 JUN 1999.
- 7 DJANARTHANY, S., VIALA, J. C., BOUIX, J. **An overview of monolithic titanium aluminides based on Ti3Al and TiAl**. Mater Chem Phys 72: (3) 301-319 DEC 1 2001.
- 8 WELLER, M., CHATTERJEE, A., Haneczok, G., et al. **Mechanical properties of intermetallic y-TiAl based alloys at elevated temperatures**. Defect Diffus Forum 194-1: 589-594 2001.
- 9 PRIMA, F., VERMAUT, P., THIBON, I., et al. **A low cost metastable beta titanium alloy: microstructures and mechanical properties**. J PHYS IV 11: (PR4) 241-248 SEP 2001.

- 
- 10 SERGUEEVA, A.V., STOLYAROV, V.V., VALIEV, R.Z., et al. **Advanced mechanical properties of pure titanium with ultrafine grained structure**. Scripta Mater 45: (7) 747-752 OCT 10 2001.
- 11 ES-SOUNI, M., BRANDIES, H.F. **On the transformation behaviour, mechanical properties and biocompatibility of two NiTi-based shape memory alloys: NiTi42 and NiTi42Cu7**, Biomaterials 22: (15) 2153-2161 AUG 2001.
- 12 MODEST, M. F. **“Laser Machining of Ablating/Decomposing Materials - Through Cutting and Drilling Models”**. ICALEO,96. Proceedings sec. Laser Cutting'96 (711P).
- 13 MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. Fourth edition. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- 14 **Key to Metals Knowledge Base**. List of articles - General Characteristics of Other Nonferrous Metals. Disponível em: <<http://www.key-to-metals.com>> acesso em: junho/2004.
- 15 MS Selamat, TN Baker, LM Watson, “Study of the surface layer formed by the laser processing of Ti-6Al-4V alloy in a dilute nitrogen environment”, J Mater Process Tech 113: (1-3) 509-515 JUN 15 2001.
- 16 ALMEIDA, I. A., ROSSI, W., LIMA, M. S. F., BERRETTA, J. R., MORATO, S. P. Corte de Titânio por Laser Pulsado de Neodímio:YAG In: **Anais do XXIX CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem**, São Paulo. 2003. p.CT11.
- 17 ROSSI, W., VIEIRA JÚNIOR, N. D., BERRETTA, J. R., ALMEIDA, I. A., MORATO, S. P. Quando o Laser de Nd:YAG pulsado pode ser mais interessante. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, v.XL, n.456, p.112 - 125, 2004.

## **TITANIUM CUTTING OPTIMIZATION BY THE FACTORIAL DESIGN OF THE LASER'S PARAMETERS.**

### **Ivan Alves de Almeida**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP, Av. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária – São Paulo – SP - CEP 05508-900; [ialmeida@ipen.br](mailto:ialmeida@ipen.br)

### **Wagner de Rossi**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP; [wdrossi@ipen.br](mailto:wdrossi@ipen.br)

### **Milton S. F. Lima**

Instituto de Estudos Avançados, CTA - São José dos Campos/SP; [milton@ieav.cta.br](mailto:milton@ieav.cta.br)

### **José Roberto Berretta**

Centro Tecnológico da Marinha – CTM/SP; [berretta@ipen.br](mailto:berretta@ipen.br)

### **Gesse Eduardo Calvo Nogueira**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP; [genoguei@ipen.br](mailto:genoguei@ipen.br)

### **Niklaus Ursus Wetter**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP; [nuwetter@ipen.br](mailto:nuwetter@ipen.br)

### **Nilson Dias Vieira Junior**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP; [nilsondv@ipen.br](mailto:nilsondv@ipen.br)

***Abstract.** The necessity of getting parts processed by laser, characterized for its good quality of superficial finishing, low roughness and the conservation of its metallurgic properties, was the main motivation in the accomplishment of this study. Besides of that, the versatility and the advantages, as also the global trend of the industrial sector, had become preponderant factors in*

---

*the use of the laser as machining tool. The target of the present work was to determine the effect of the Nd:YAG laser's processing on the quality and formation of phases in the cut surface. One-millimeter thick commercially pure titanium (degree 2) and Ti6Al4V alloys (degree 5) were employed in this study. The metallurgical characteristics were analyzed by optical and scanning electronic microscopy (SEM). In particular, it was analyzed the region next to the cutting edge, i.e. the heating affected zone (HAZ). Surface modifications of titanium alloys were observed in the resolidified zone by X-ray diffraction, showing the formation of nitride layers under a thin layer. An increase in the surface hardness of the cut edge was also verified. It was also used the design and analysis of experiments to evaluate the degree of influence of these parameters and its statistical significance for the process.*

**Key words:** *laser machining; laser Nd:YAG; titanium; the analysis of variance.*