



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**“Desenvolvimento de um sistema opto-mecânico para micro usinagem com laser de femtosegundo”**

**José Tort Vidal**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais

Orientador:  
Prof. Dr. Wagner de Rossi

São Paulo  
18/5/2010

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

**“Desenvolvimento de um sistema opto-mecânico para micro usinagem com laser  
de fentossegundos”**

**José Tort Vidal**

**Tese apresentada como parte  
dos requisitos para obtenção do  
Grau de Mestre em Ciências na  
Área de Tecnologia Nuclear –  
Materiais.**

**Orientador:  
Dr. Wagner de Rossi**

**SÃO PAULO  
2010**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço,

*Ao Prof. Dr. Wagner de Rossi, por ter sido um orientador no mais pleno sentido da palavra, por dividir parte de seus vastos conhecimentos comigo, e me escutar onde eu podia de alguma forma contribuir.*

*Ao Prof. Dr. Nilson Dias Vieira Júnior, pelo seu apoio e confiança em meu trabalho.*

*Aos Professores da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo pela minha formação como Bacharel, e por me mostrar os caminhos da Física.*

*Ao Instituto de Física da Universidade de São Paulo pela oportunidade de obter o grau de Mestre em Física.*

*Ao IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – por permitir que eu contribuísse de alguma forma nos caminhos da pesquisa no Brasil, nestes últimos 25 anos.*

*Ao Prof. Dr. Gesse Eduardo Calvo Nogueira por dividir comigo um pouco de seu conhecimento, e confiar em meu trabalho e minha competência.*

*À Profa. Dra. Sonia Licia Baldochi pelo seu apoio, e por sua confiança.*

*Ao Prof. Dr. Spero Penha Morato por me contratar para trabalhar no IPEN, e por acreditar no meu potencial.*

*Ao Dr Anderson Zanardi de Freitas, por seu apoio e amizade e seu incentivo em meu trabalho.*

*À Profa. Dra. Izilda Márcia Ranieri por nossas conversas e pelo apoio ao trabalho.*

*Ao Dr. Niklaus Ursus Wetter e à Dra Denise Zezell pelas tantas vezes que valorizaram o meu trabalho.*

*Ao Dr. José Roberto Berreta, por sua amizade, pelas conversas e por acreditar em mim.*

*Ao corpo técnico do Centro de Lasers e Aplicações, do qual me orgulho muito de fazer parte, Marcão, Paulinho e Braga, por sempre fazer tudo possível e impossível para me ajudar nos desafios, e principalmente por sua amizade.*

*À Solange pela sua amizade, apoio e incentivo.*

*À Elsa e à Sueli por toda sua eficiência, apoio e incentivo.*

*A todos os demais bolsistas e funcionários do CLA, com os quais convivi nestes últimos 25 anos e fazem parte de minha formação científica e pessoal.*

Aos meus pais, pela educação, os princípios e o amor que me deram, e que fizeram de mim o que sou hoje.

À Lidia, pelo seu apoio nestes anos e por acreditar sempre em mim.

A Luara, minha Filha, por sempre me dar uma razão para seguir, por seu carinho, e por me dar a alegria de ser seu Pai.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

### ***EPÍGRAFE***

“A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem os olhos abertos para o misterioso passará pela vida sem ver nada.”

**Albert Einstein**

# **“Desenvolvimento de um sistema opto-mecânico para micro usinagem com laser de fentossegundos”**

**José Tort Vidal**

## **Resumo**

A usinagem de estruturas micrométricas pode ser feita com pulsos laser de nano, pico ou fentossegundos. Destes, porém, somente os mais curtos podem resultar em uma interação não térmica com a matéria, o que evita a fusão, formação de rebarba e zona afetada pelo calor. Devido à sua baixa potência média, contudo, a sua utilização na produção em massa somente pode ser considerada em casos muito especiais, isto é, quando o processamento não-térmico é essencial. Este é o caso da usinagem de semicondutores, aços elétricos, produção de MEMS (sistemas micro eletro-mecânicos), de micro canais e diversos dispositivos médicos e biológicos. Assim, visando a produção destes tipos de estruturas, uma estação de trabalho foi construída com capacidade de controlar os principais parâmetros de processo necessários para uma usinagem micrométrica com laser de pulsos ultracurtos.

Os principais problemas deste tipo de estação são o controle da fluência e do posicionamento do ponto focal. Assim, o controle do diâmetro do feixe (no foco) e da energia devem ser feitos com grande precisão. Além disso, o posicionamento do ponto focal com precisão micrométrica nos três eixos, também é de fundamental importância. O sistema construído neste trabalho apresenta soluções para estes problemas, utilizando diversos sensores e posicionadores controlados simultaneamente por um único programa. A estação de trabalho recebe um feixe vindo de um laser de pulsos ultracurtos localizado em outro laboratório, e manipula este feixe de maneira a focalizá-lo com precisão na superfície da amostra a ser usinada. Os principais parâmetros controlados

dinamicamente são a energia, o número de pulsos e o posicionamento individual de cada um deles. A distribuição espacial da intensidade, a polarização e as vibrações também foram medidas e otimizadas.

O sistema foi testado e aferido com medidas de limiar de ablação do silício, que é um material bastante estudado neste regime de operação laser. Os resultados, quando confrontados com a literatura, mostram a confiabilidade e a precisão do sistema. A automatização, além de aumentar esta precisão, também aumentou a rapidez na obtenção dos resultados.

Medidas de limiar de ablação também foram realizadas para o metal molibdênio, levando a resultados ainda não vistos na literatura.

Assim, de acordo com o objetivo inicial, o sistema foi desenvolvido e está pronto para utilização em estudos que levem à produção de estruturas micrométricas.

# **"Development of an opto-mechanical system for micro machining with femtosecond laser"**

**Jose Tort Vidal**

## **Abstract**

Machining of very small structures has been made with nano, pico and femtosecond pulsed lasers. Among them, only femtosecond lasers may result in non-thermal interaction with matter, avoiding melting, formation of slag and heat affected zone. Mass production with such lasers yet can only be considered in cases where non-thermal effects are of prime importance. This is the case in machining of semiconductors and electric steels, the production of MEMS, microchannels, and many medical and biological devices. Hence, a workstation for production of such kind of microstructures was built with the capability of controlling the main parameters necessary for the machining process.

Control of the laser fluence and focus positioning are the main concern in this kind of processing. So, the control of the laser beam diameter (in the focus) and of the pulse energy must be very precise. Positioning of focal point with micrometric precision in the three axes is also fundamental. The system built in this work provides solutions for these problems incorporating several sensors and positioning stages simultaneously controlled by a single software. The workstation receives a laser beam coming from another laboratory and delivers it to the surface of the sample managing with precision the main process parameters. The system can dynamically control the energy, number of pulses and positioning for each individual laser spot. Besides, the spatial distribution of the laser intensity, polarization and vibrations were also measured and optimized.

The system was tested and calibrated with threshold ablation measurement for silicon, which is well studied in this regime of laser operation. The results were compared with data found in the literature and attested the reliability and precision of the system. Besides the increase in precision, the automation also turned much faster the data acquisition.

Threshold ablation for metallic molybdenum was also obtained and resulted in data not found in the literature yet.

Concluding the initial goal, the workstation was developed and is ready to be used in studies that can lead to production of micrometric structures.

## Sumario

	<b>Pagina</b>
<b>1 Introdução.....</b>	<b>13</b>
<b>2 Embasamento teórico .....</b>	<b>15</b>
2.1 Usinagem com os lasers de pulsos longos .....	16
2.2 Usinagem com lasers de pulsos ultracurtos.....	17
2.3 Cálculo do Limiar de Ablação.....	21
2.3.1 Pulsos Longos (nano segundo) .....	23
2.3.2 Limiar de Ablação para Pulsos Sobrepostos .....	28
2.3.3 Estruturas periódicas induzidas por pulsos ultracurtos. ....	29
2.4 Linguagem de Programação .....	30
<b>3 Materiais e Métodos .....</b>	<b>32</b>
3.1 O laser de pulsos ultracurtos.....	32
3.2 A estação de trabalho .....	33
3.2.1 Características da mesa de movimentação .....	36
3.2.2 Controle da estabilidade espacial. ....	37
<b>4 Resultados experimentais .....</b>	<b>39</b>
4.1 Automação e Integração dos Sistemas.....	39
4.1.1 Software para controle de processo. ....	39
4.1.2 Controle do motor de passo. ....	46
4.1.3 Controle do Shutter .....	46
4.1.4 Leitura da Energia do pulso Laser. ....	47
4.2 Vibrações.....	49

4.3	Fator de Qualidade $M^2$ .....	50
<b>4.4</b>	<b>Limiares de Ablação</b> .....	<b>54</b>
4.4.1	Limiar de Ablação para o Silício .....	55
4.4.1.1	Efeito do acúmulo de pulsos .....	60
4.4.1.2	Traços no Si .....	68
4.4.1.3	Análise da Fluência .....	88
4.4.2	Limiar de Ablação para o Molibdênio .....	92
4.4.2.1	Estudo de Pulsos sobrepostos em Molibdênio .....	94
<b>5</b>	<b>Conclusões e Avaliações</b> .....	<b>102</b>
<b>6</b>	<b>Trabalhos futuros</b> .....	<b>104</b>
	<b>Referencias Bibliográficas</b> .....	<b>105</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ilustração do processo de ablação (a) Laser de pulsos longos (b) Laser de pulsos ultracurtos. ....	18
Figura 2: Distribuição temporal e espacial de temperatura de um elétron e de um alvo de cobre atingido por um feixe de pulsos de 100fs e com uma intensidade de $10^{13} \text{W/cm}^2$ . A ablação não foi levada em conta. ....	19
Figura 3: Esquema da ablação com laser de Femtossegundos e transporte de calor por elétron aquecido; à esquerda em um dielétrico e à direita em um metal. ....	20
Figura 4: Esquema do aquecimento com dois pulsos ultra curtos. (a) $\delta > 1$ ; (b) $\delta < 1$ ...	24
Figura 5: Profundidade de ablação por pulso para o cobre em função da fluência do laser incidente ( Ti: safira, $\lambda = 780 \text{ nm}$ , 150 fs). (----) $L = 10 \ln (F / F_{th}^{\delta}) \text{ nm}$ ; (- - -) $L = 80 \ln (F = F_{th}^{\delta}) \text{ nm}$ . ....	26
Figura 7- Sistema de movimentação X,Y e sistema de entrega de feixe e focalização. .	35
Figura 8 Tela principal do programa de controle da mesa de posicionamento X,Y. ....	40
Figura 9- Sistema de controle de potência através de lamina polarizadora de 1/2 onda. ....	41
Figura 10-Sistema de rotação de lamina por motor de passo. ....	41
Figura 11-Telas do sistema de calibração 1-Escolha do numero de passos e grau de varredura, 2- Tela de registro dos valores de potencia encontrados em cada posição. ....	42
Figura 12- Sistema de busca de valores de Energia. ....	42
Figura 13- Arquivo criado com os dados sobre a leitura de energia em cada pulso. ....	43
Figura 14 Seis series de 4 pulsos e uma serie de 128 pulsos. ....	44
Figura 15-Acionamento manual do motor de passo, duas velocidades e leitura de posição. ....	44
Figura 16- Rotina de Comunicação no programa da MESA XY ....	45
Figura 17- Rotina de Comunicação no programa de Controle. ....	45
Figura 18-(a)Iris e Shutter pneumático, controle da passagem do feixe. (b)Acionador manual do shutter. ....	47
Figura 19 Diagrama de blocos com o sistema de controle e comunicação entre os diversos equipamentos que compõem a mesa de processo. ....	48
Figura 20: Flutuação espacial do feixe laser com e sem o controle do FSM. ....	49
Figura 21 Distribuição de intensidade do feixe laser após passar por uma íris de 12 mm e expensor 2x invertido (a) 2,5 metros da íris; (b) 5,3 metros da íris. Foto Tirada do feixe vermelho sobre um papel branco. ....	50
Figura 22 Imagem do feixe obtido na CCD. ....	51
Figura 23 Diâmetro x Posição. ....	52
Figura 24 Gráfico de $M^2 \times l$ . ....	53
Figura 25 Fotos das sequências de pulsos sobre o Silício. ....	56
Figura 26 Fotos dos danos no Si com energias de 36mJ 25mJ 18mJ 12mJ 8mJ. ....	57
Figura 27(a)Microscópio ótico utilizado para fotografar os danos (b) Escala de referencia (c) Software para captura das imagens. ....	58

Figura 28 Software IMAGE, utilizado para fazer as medidas dos danos.....	58
Figura 29- Gráfico $F_0 \times D^2$ , limiar de ablação do Silício. ....	59
Figura 30- Sequência para marcação de pulsos em número variavel.....	61
Figura 31- Distribuição dos pulsos sobre o silício .....	62
Figura 32- Gráfico $F_0 \times D^2$ - 2 Pulsos.....	63
Figura 33- Gráfico $F_0 \times D^2$ - 4 Pulsos.....	63
Figura 34- Gráfico $F_0 \times D^2$ - 16 Pulsos.....	64
Figura 35- Gráfico $F_0 \times D^2$ - 32 Pulsos.....	64
Figura 36- Gráfico $F_0 \times D^2$ - 128 Pulsos.....	65
Figura 37- Gráfico $F_0 \times D^2$ - 512 Pulsos.....	65
Figura 38- Gráfico $F_0 \times D^2$ - 1024 Pulsos.....	66
Figura 39 Gráfico da Fluencia em função do número de pulsos no silicio. ....	67
Figura 40 Gráfico do numero de pulsos por diâmetro para o silicio. ....	67
Figura 41 Perfil transversal de um traço em silício, fornecido por um rugosímetro. ....	69
Figura 42 Gráfico do volume do material retirado por pulso em função da Fluência. ...	71
Figura 43 Gráfico que permite ver o comportamento da eficiência do laser em função da Fluência. ....	72
Figura 44 Gráfico onde podemos observar as duas regiões de fluência, baixa fluência (a) e alta fluência (b).....	73
Figura 45 Relação Profundidade x Velocidade, para cada uma das sete energias estudadas.....	79
Figura 46 Aqui se vê como a profundidade aumenta com a energia e com o número de pulsos. ....	79
Figura 47 Largura da fenda em função da velocidade para o silício.....	80
Figura 48 Volume extraído do silício por pulso, em função ao numero de pulsos.....	80
Figura 49 Eficiência (volume extraído por energia) em função do numero de pulos, para cada energia estudada. ....	81
Figura 50 Largura do traço em função do numero de pulsos, para cada valor de energia utilizado. ....	81
Figura 51 $E = 1 \mu\text{J} - v_1v_2, v_3v_4, v_5v_6$ ;	82
Figura 52 $E = 3 \mu\text{J} - v_1v_2, v_3v_4, v_5v_6$ .....	83
Figura 53 $E = 3 \mu\text{J} v_5v_6$ .....	83
Figura 54 $E = 6 \mu\text{J} -v_1v_2, v_3v_4, v_5v_6$ .....	83
Figura 55 $E = 6 \mu\text{J} v_3v_4, v_5v_6$ .....	84
Figura 56 $E = 20 \mu\text{J} v_5v_6$ .....	84
Figura 57 $E = 20 \mu\text{J} v_1v_2, v_3v_4$ .....	85
Figura 58 $E = 50 \mu\text{J} v_1v_2, v_3v_4, v_5v_6$ .....	85
Figura 59 $E = 50 \mu\text{J} v_5v_6$ .....	86
Figura 60 $E = 6 \mu\text{J} v_3$ .....	86
Figura 61 $E = 3 \mu\text{J} v_4 y e v_4 x$ .....	86
Figura 62 $E = 6 \mu\text{J} v_3$ .....	87
Figura 63 $E = 20 \mu\text{J} v_5v_6$ .....	87
Figura 64 $E = 20 \mu\text{J} x v_5v_6$ .....	88
Figura 65 Seção transversal de um traço sobre o silício .....	91
Figura 67- Grafico $F_0 \times D^2$ ,limiar de ablação do Molibdênio.....	93

Figura 68 Fluência em função do diâmetro ao quadrado, para a serie de 2 pulsos.....	94
Figura 69 Fluência em função do diâmetro ao quadrado, para a serie de 4 pulsos.....	95
Figura 70 Fluência em função do diâmetro ao quadrado, para a serie de 16 pulsos.....	95
Figura 71 Fluência em função do diâmetro ao quadrado, para a serie de 32 pulsos.....	96
Figura 72 Fluência em função do diâmetro ao quadrado, para a serie de 128 pulsos.....	96
Figura 73 Fluência em função do diâmetro ao quadrado, para a serie de 512 pulsos.....	97
Figura 74 Fluência em função do diâmetro ao quadrado, para a serie de 1024 pulsos..	97
Figura 75 Diâmetro do dano causado em função do numero de pulsos, ara cada energia utilizada. ....	98
Figura 76 Limiar de ablação em função do numero de pulsos. ....	99
Figura 77-Foto de danos com 1024 pulsos e energia de $7,2\mu\text{J}$ .....	100

## 1 INTRODUÇÃO

Diversas áreas do conhecimento têm experimentado um desenvolvimento significativo nos últimos anos; mais recentemente, a junção de uma ou mais tecnologias têm possibilitado um incremento ainda maior na utilização daquelas tecnologias já estabelecidas e em uso corrente pela indústria. A utilização da informática nos mais diversos ramos do conhecimento é, talvez, o exemplo mais evidente.

Uma das tecnologias que na última década saiu dos laboratórios para ganhar o chão de fábrica foi a de processamento de materiais a laser<sup>1</sup>. Depois de décadas no desenvolvimento de equipamentos eficientes e confiáveis, esta tecnologia ganhou grande impulso quando foi agregada a modernos métodos computacionais (nos CNC e CAD/CAM), e agora está ao alcance de todos. Além dos sistemas de controle mecânicos, a informática possibilitou o processamento e o controle de vários parâmetros de processo, assim como o controle de vários parâmetros em tempo real.

No Centro de Lasers e Aplicações – (CLA) do IPEN, esta tecnologia foi desenvolvida, e muitas aplicações foram transferidas para o meio produtivo e estão sendo utilizadas comercialmente<sup>2,3</sup>.

Mais recentemente, lasers com pulsos de largura temporal extremamente curtos, da ordem de  $10^{-14}$ s foram desenvolvidos<sup>4</sup> e se tornaram comerciais a preços ainda altos, mas já acessíveis. O CLA, mantendo sua posição atuante no segmento de aplicações de lasers no país, montou um laboratório onde um sistema bastante complexo gera radiação com pulsos de até 5 fentossegundos (fs) ( $1\text{fs} = 10^{-15}\text{s}$ ) de largura temporal, com comprimento de onda centrado em 788nm, energia controlável até  $800\mu\text{J/pulso}$ , e taxa de repetição de até 4.000Hz. Este sistema, abre a possibilidade de inúmeros desenvolvimentos em diversas áreas do conhecimento<sup>5</sup>. Tantas são as possibilidades a serem exploradas que o ambiente do laboratório onde se encontra o laser não pode comportar todos os equipamentos necessários para as aplicações pretendidas. Assim,

foi necessária a criação de outros três laboratórios para a maior utilização deste feixe laser. Os laboratórios são: aplicações ambientais (lidar), aplicações em ciências da vida e aplicações industriais, onde este trabalho foi realizado. Em todos eles, o objetivo é a junção de tecnologias já estabelecidas de utilização de lasers com esta nova ferramenta que é o pulso laser de fentossegundos.

Este trabalho teve, portanto, como objetivo, a implementação de um sistema que permitisse a utilização de pulsos laser de fentossegundos como ferramenta para o processamento de materiais, ou seja, para as suas aplicações industriais.

Em particular, o objetivo principal foi a construção de um sistema automatizado, que permitisse o controle e alteração de alguns parâmetros de processo a fim de viabilizar o processamento de materiais em escala bastante reduzida. A implementação deste sistema foi feita juntamente com a medida experimental do limiar de ablação de alguns materiais, e o início de alguns trabalhos de processamento. A realização destes trabalhos à medida que o sistema ia sendo implementado foi fundamental na identificação de necessidades e das características funcionais de cada parte do sistema.

Os materiais escolhidos para estes processos foram o silício mono-cristalino, um semiconductor muito utilizado na indústria eletrônica, e o molibdênio, um metal com ponto de fusão extremamente alto. Para estes materiais foram medidos os seus limiares de ablação para pulso único e para pulsos sobrepostos; também foram determinadas as regiões de baixa e de alta fluência. Estes resultados são essenciais para a usinagem controlada de alta precisão, e foram utilizados para a obtenção de algumas estruturas no silício.

## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Como a natureza da interação da radiação de pulsos ultracurtos com a matéria possibilita uma ablação com pouca ou nenhuma formação de calor<sup>6,7</sup>, em princípio, torna-se possível que o processamento seja feito em dimensões da ordem do diâmetro do feixe focalizado, ou seja, de micrometros. Isto coloca condições de contorno muito rígidas no conjunto do sistema de guiamento e movimentação do feixe laser, o qual deve apresentar estabilidade e controle espacial menor que 0,001 mm.

Como a estação de trabalho aqui desenvolvida está instalada em um laboratório que está a algumas dezenas de metros longe da fonte geradora dos pulsos laser (o sistema T-cubo), outra dificuldade fica evidente. A vibração espacial natural na emissão laser que é grandemente amplificada pelo meio onde o feixe se propaga. Assim, o chão, as paredes, e até o ar, com sua movimentação e gradientes de temperatura, passam a ser elementos que introduzem vibrações indesejáveis no ponto de focalização do feixe laser. Como pretendemos utilizar este feixe focalizado para gerar estruturas muito pequenas, esta movimentação certamente deve ser controlada. Assim, a caracterização destas movimentações<sup>8</sup> e a sua minimização também fizeram parte dos objetivos do trabalho.

A conclusão deste trabalho, portanto, tornará possível a realização de desenvolvimentos que poderão levar à obtenção de estruturas processadas muito pequenas. No início, estruturas de poucos micrometros serão obtidas; depois, com a otimização do sistema e dos processos, estruturas menores que 1  $\mu\text{m}$  poderão ser alcançadas<sup>9</sup>. Com isto feito, máscaras e métodos ópticos de demagnificação<sup>10</sup> poderão então ser utilizados para a obtenção de estruturas de poucas dezenas de nanômetros, ou seja, capacitaremos o CLA a criar elementos, ou arranjos de elementos na escala nanométrica. Assim, a junção da óptica, de lasers e da nanotecnologia possibilitará ao instituto a exploração de mais um ramo da nanotecnologia. Sensores ultra pequenos<sup>11</sup>,

<sup>12</sup>, com larga utilização na indústria moderna, como os MEMS (micro electro-mechanical systems) poderão ser criados.

## **2.1 Usinagem com os lasers de pulsos longos**

Tecnicamente falando, denomina-se pulso longo aquele no qual a duração do pulso laser é maior do que o tempo da difusão do calor no material processado. Isto é desejável para processos como a soldagem a laser, mas para trabalhos de micro usinagem, a difusão do calor no material circunvizinho é indesejável e aumenta a imprecisão do processo.

A difusão do calor reduz a eficiência do processo de micro usinagem, desviando a energia do ponto do trabalho - a energia que estaria de outra maneira removendo o material. A difusão do calor também reduz a temperatura no ponto focal (o ponto de usinagem), mantendo-a não muito acima do ponto de fusão do material.

A energia é depositada muitas vezes no material fundido que entra em ebulição formando gotas. Isto provoca ejeção de material derretido para longe da zona de trabalho, prejudicando o acabamento da peça usinada e contaminando a sua superfície. Estas gotas retêm uma quantidade grande de calor residual e podem se ligar fortemente à amostra. A remoção destes contaminadores pode ser difícil ou impossível sem danificar a amostra.

O calor difundido também reduz a exatidão da operação de micro usinagem. Tipicamente, o calor que se difunde afastando-se do ponto focal (e há uma abundância do calor porque o processo é ineficiente) provoca a fusão de uma área que é muito maior do que o tamanho do ponto focal do feixe laser. Assim, enquanto o tamanho do ponto focal pode estar na escala de um micrón ou menos, em muitos materiais não é possível criar estruturas com dimensões muito menores que 10 microns de diâmetro.

A propagação de calor afeta uma região relativamente grande em torno do ponto usinado. Esta região é chamada de "zona afetada pelo calor" ou a ZAC. As ondas do aquecimento (e refrigeração subsequente) que se propagam na ZAC causam stress mecânico e podem criar micro fissuras (ou macro fissuras em alguns casos) no material circunvizinho. Estes defeitos ficam incorporados à estrutura quando o material esfria.

Outro fenômeno associado é a formação de uma camada de ressolidificação de material em torno do furo. Esta camada pode ser mecanicamente mais fraca e deve frequentemente ser removida.

O calor difundido às vezes também é associado à formação das ondas de choque na superfície. Estas ondas podem danificar estruturas próximas do dispositivo ou o material usinado<sup>27</sup>.

## 2.2 Usinagem com lasers de pulsos ultracurtos

Devido às limitações de usinagem apresentadas por pulsos longos, muitas atividades de pesquisa para minimizar o dano colateral provocado pela difusão térmica foram desenvolvidas com a utilização de lasers de pulsos ultracurtos<sup>13</sup>.

Graças às suas características, os pulsos laser ultracurtos surgem como uma ferramenta excelente para micro fabricação, sendo possível a sua interação com qualquer tipo de material, como metais, semicondutores, dielétricos, polímeros, etc. Até mesmo materiais transparentes<sup>14</sup> ou opacos (duros e frágeis), podem ser usinados com pulsos de fentossegundos, com extrema precisão e, na maioria das vezes, sem a necessidade de um pós-processamento.

A micro usinagem com laser de fentossegundos foi demonstrada primeiramente em 1994, quando um laser de fentossegundos foi usado para fazer micro ablações em superfícies de silício e prata<sup>15,16</sup>, e em menos que dez anos a resolução avançou de modo a permitir precisão nanométrica<sup>17,18</sup>.

Ao contrario do que ocorre nos processos com laser de pulsos longos, onde os fenômenos térmicos dominam, no caso da interação da matéria com laser de fentossegundos, só uma pequena parte da energia do pulso é transferida ao meio na forma de calor. Assim, os pulsos de laser de fentossegundos induzem mudanças estruturais não por efeitos térmicos, mas sim por excitação eletrônica e processos não lineares associados antes da rede atingir o equilíbrio com os portadores excitados<sup>19</sup>. O processo de ablação neste caso é ilustrado na (a) (b)

Figura 1 .

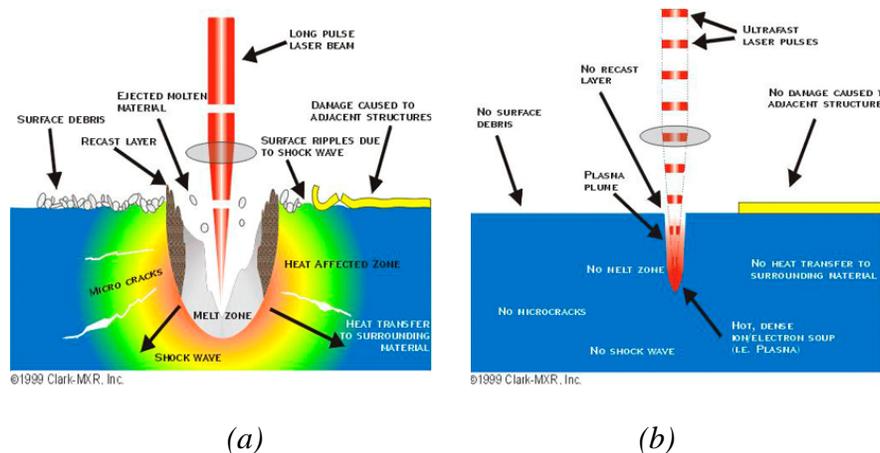


Figura 1 Ilustração do processo de interação (a) Laser de pulsos longos (b) Laser de pulsos ultracurtos.

No caso de ablação a laser com pulsos longos, os elétrons e os átomos permanecem todo o tempo em equilíbrio térmico. Durante o pulso de laser, calor se difunde para fora da área irradiada e o material se expande.

No caso de pulsos ultracurtos, ao contrário, há um forte desequilíbrio no processo. No início, a radiação laser é absorvida por elétrons livres dentro de uma camada muito superficial. Esta excitação de elétrons leva a uma ionização da superfície com consequente ejeção de material. Antes da ionização, os elétrons excitados, adquirem uma temperatura extremamente alta, assim, antes da transferência do calor destes elétrons para a rede, existe um desequilíbrio de temperatura muito alto, onde os elétrons excitados apresentam temperaturas de milhares de graus e a rede permanece à temperatura ambiente. Esta situação, chamada de modelo de duas temperaturas, permanece durante um tempo inferior ao tempo necessário à transferência de calor elétron-íon, que é da ordem de picosegundo<sup>27</sup>.

Como o pulso laser incidente tem uma duração muito inferior a este tempo, todo o processo de ejeção acontece antes que o calor seja transferido para a rede. Assim, o material é ejetado e o processo de usinagem ocorre sem que o material base seja termicamente afetado.

Para o caso no qual há poucos elétrons livres, como em dielétricos e semicondutores, uma etapa anterior ainda ocorre. Nestes casos, a alta intensidade do feixe focalizado é suficiente para absorção multifotônica pelos elétrons ligados, os

quais são levados em grande quantidade à banda de condução, criando assim (e também por um processo subsequente de ionização por avalanche) uma situação localizada semelhante à de um metal, permitindo que o processo descrito anteriormente comece a ocorrer.

Na Figura 2 vemos a distribuição de temperatura temporal e espacial, de um alvo de cobre atingido por um feixe de pulsos de 100fs e com uma intensidade de  $10^{13}\text{W/cm}^2$ . O aquecimento do subsistema de elétrons acontece muito rápido, considerando que o resto da rede mantém-se relativamente fria durante a duração do pulso laser. A transferência de energia para o restante da rede ocorre em um intervalo de tempo mais longo, e os elétrons são então aquecidos até temperaturas muito altas.

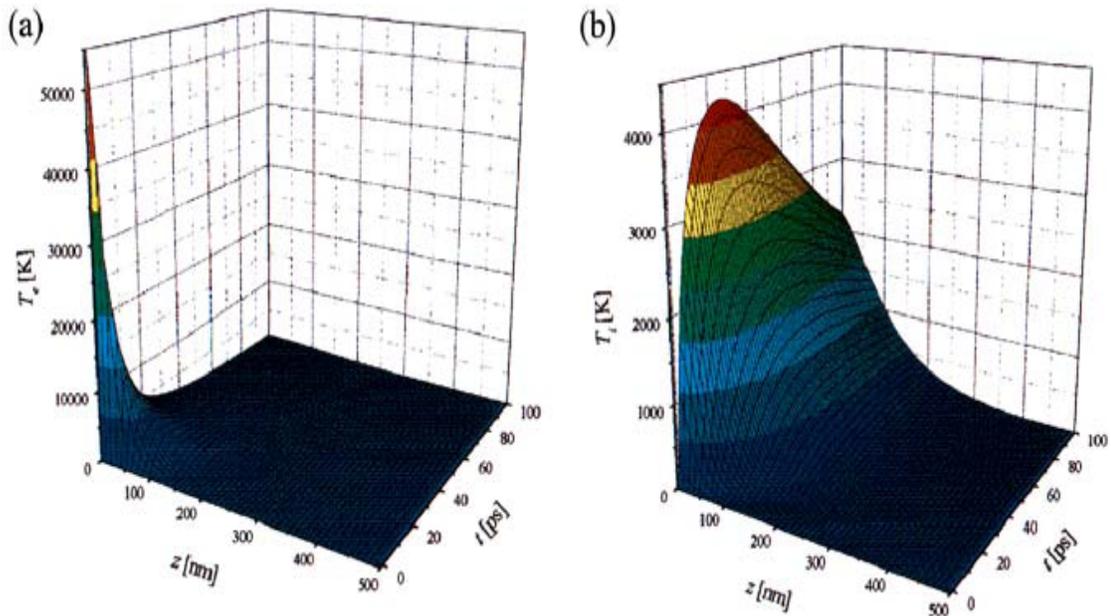


Figura 2: Distribuição temporal e espacial de temperatura (a) de um elétron (b) de um alvo de cobre atingido por um feixe de pulsos de 100fs e com uma intensidade de  $10^{13}\text{W/cm}^2$ . A ablação não foi levada em conta.

Para fluências de laser ligeiramente acima do limiar de ablação, a difusão de calor fora da área irradiada é mínima para estes pulsos laser ultracurtos. Em resumo, podemos falar da formação de um protoplasma de densidade alta como é esquematicamente mostrado na Figura 3.

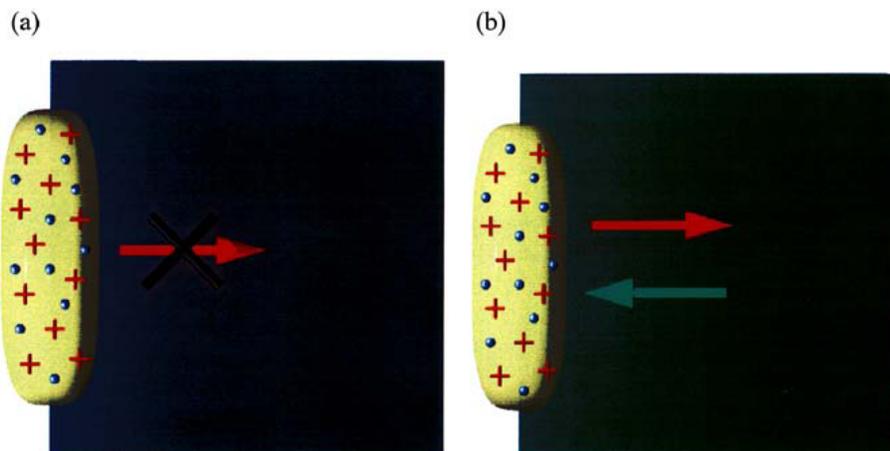


Figura 3: Esquema da ablação com laser de Femtossegundos e transporte de calor por elétron aquecido; à esquerda em um dielétrico e à direita em um metal.

No caso dos dielétricos, o transporte do calor dos elétrons para a rede é fortemente suprimido. Elétrons não podem escapar devido a forte força de atração que mantém o protoplasma neutro. Em metais o transporte de calor dos elétrons é permitido, porque os elétrons aquecidos que se movem no meio podem ser substituído por elétrons frios da região adjacente.

A física complexa associada com a ablação com pulsos ultracurtos faz com que uma análise teórica detalhada seja difícil. As dinâmicas do processo de ablação podem ser simuladas através dos cálculos das dinâmicas moleculares (ou MD)<sup>20</sup>

Estes cálculos que consideram a interação de uma única molécula com sua vizinhança, (Simulações de MD) permitem várias previsões qualitativas do processo de ablação a laser com pulsos ultracurtos, como o aumento na taxa de ablação e a diminuição no limiar de ablação com diminuição da duração do pulso. Simulações de MD também mostram que a remoção de material principal acontece em uma escala de tempo de alguns picossegundos, até mesmo para pulsos de laser de femtossegundos<sup>27</sup>.

Simulações de MD, contudo, requerem poder computacional enorme. Na prática, só volumes de interação muito pequenos com dimensões de alguns nanômetros (contendo só vários dezenas de milhares de átomos) podem ser modelados, o que está longe de condições experimentais. Comparar simulações com resultados

experimentais, este deve ser o caminho, enquanto tivermos dados quantitativos questionáveis.

Uma descrição teórica alternativa do processo de ablação é baseada em consideração do comportamento comum de muitos átomos. Tal descrição é possível para laser de pulsos ultracurtos com base no modelo de duas-temperaturas (TTM) no qual os elétrons e a rede são caracterizadas por suas distintas temperaturas. Um tratamento total do processo de ablação inclusive o protoplasma hidro-dinâmico só é numericamente possível<sup>27</sup>.

### 2.3 Cálculo do Limiar de Ablação

Esta seção apresenta uma descrição teórica do fenômeno de ablação com pulsos laser de fentossegundos, em metais, com base no modelo de duas temperaturas (TTM).

Neste caso, a energia do pulso laser é absorvida por elétrons livres devido ao processo de *Bremsstrahlung* inverso. A absorção é seguida por um rápido relaxamento de energia dentro do subsistema eletrônico, e transferência de energia por difusão térmica para a rede devido à interface elétron-fônon. A evolução espacial e temporal das temperaturas dos elétrons e da rede ( $T_e$  e  $T_i$ , respectivamente) em uma fina camada de superfície com subsequente expansão do material é descrita pelo conjunto de equações unidimensionais a seguir.

$$\text{Equação 1} \quad C_e \frac{dT_e}{dt} = -\frac{\partial Q(x)}{\partial x} - (T_e - T_i) + S - P_e \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\text{Equação 2} \quad C_i \frac{dT_i}{dt} = \gamma(T_e - T_i) - (P_i + P_c) \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\text{Equação 3} \quad \rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial}{\partial x} (P_c + P_e + P_i)$$

$$\text{Equação 4} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0$$

Onde  $x$  é a direção perpendicular para a superfície designada,  $d/dt = \partial/\partial t$ ,  $\partial u/\partial x$ , e  $C_e$  e  $C_i$  são as capacidades de calor (por unidade de volume) do elétron e da rede, respectivamente.

O parâmetro  $\gamma$  caracteriza a interação elétron-rede,  $\rho$  e  $v$  representam a densidade e a velocidade do material evaporado,  $P_e$  e  $P_i$  são as pressões do elétron térmico e do íons respectivamente.  $P_e$  é a pressão elástica (ou "fria") que é positiva para compressão e negativa para expansão,

$Q(x) = -k_e(T_e) \partial T_e / \partial x$  é o fluxo de calor, e  $S = I(t) A_\alpha \exp(-\alpha x)$  é o termo de fonte da energia laser. Aqui,  $k_e$  é a condutividade térmica do elétron,  $A$  é a absorvidade (índice que caracteriza a capacidade de absorção de radiação) da superfície,  $\alpha$  é o coeficiente de absorção do material, e  $I(t)$  é a intensidade do pulso laser.

As Equação 1 e 2 são as equações de conservação de energia para os elétrons e os íons do subsistema. A Equação 3 expressa a lei de Newton e a Equação 4 é a equação de continuidade, que descreve a conservação de massa.

Apesar da simplicidade óbvia das equações 1 a 4, a sua aplicação para modelar a ablação com pulso de fentossegundos é problemática. Isto é devido à falta de informação segura sobre vários parâmetros que entram nestas equações hidrodinâmicas. Por exemplo, há informação insuficiente nas equações de estado que poderiam descrever a evolução dos elétrons e dos íons a baixas pressões.

Um modelo simples para a ablação a laser de pulsos ultracurtos pode ser obtida negligenciando-se completamente a expansão do material e admitindo-se que seja necessária uma certa quantidade de energia para iniciar a ablação. Neste caso, as últimas condições nas Equação 1 e Equação 2 (contendo  $\frac{\partial u}{\partial x}$ ) podem ser omitidas e as equações hidrodinâmicas se reduzem a um modelo de difusão de duas temperaturas unidimensional.<sup>21</sup> Assim, temos:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = -\frac{\partial Q(x)}{\partial x} - \gamma(T_e - T_i) + S \quad Eq. 5$$

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \gamma(T_e - T_i) \quad \text{Eq. 6}$$

### 2.3.1 Pulsos Longos (nanos segundos)

Se a duração do pulso laser é maior que o tempo de aquecimento da rede ( $\tau_i = C_i/\gamma$ , que é da ordem de  $\tau_i \approx 0,01 - 1 \text{ ns}$ )<sup>27</sup>, o equilíbrio térmico, entre o subsistema de elétrons e o meio material, se dá durante o pulso laser. Neste caso, os elétrons e a rede podem ser caracterizados por uma temperatura comum  $T = T_e = T_i$  e a Eq. 5 e a Eq. 6 ficam reduzidas à bem conhecida equação de difusão de calor unidimensional que descreve o aquecimento com laser de pulsos longos. Soluções da Eq. 7 podem ser achadas, por exemplo, em Prokhorov et al. (1990)<sup>22</sup>.

$$C_i \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} k_e \frac{\partial T}{\partial x} + I(t)A\alpha \exp(-\alpha x) \quad \text{Eq. 7}$$

#### *Lasers de Pulsos Ultracurtos (fentossegundos)*

Para pulsos laser de fentossegundos, a condução de calor e a transferência de energia para a rede durante o pulso podem ser negligenciadas em uma primeira aproximação. Neste caso simplificado, a taxa de ablação e o limiar de ablação só dependem da profundidade de penetração óptica  $\delta$ <sup>23 24 25</sup>. Porém, como será mostrado a seguir, a interação de troca de energia entre elétrons e o meio, e a difusão de calor têm consequências importantes, até mesmo para a ablação com pulsos ultracurtos.

Quando a capacidade de calor, a condutividade térmica e a difusão térmica do elétron são tratadas como constantes, pode-se encontrar a distribuição de temperatura de equilíbrio para os elétrons e para a rede após relaxamento térmico através da seguinte relação (Nolte et al., 1997)<sup>26</sup>:

$$T_i \approx \frac{F_a}{C_i} \left( \frac{1}{\ell^2 - \delta^2} \right) \left[ \ell \exp\left(\frac{-x}{\ell}\right) - \delta \exp\left(\frac{-x}{\delta}\right) \right] \quad \text{Eq. 8}$$

Aqui,  $F_a$  é a fluência absorvida do laser, e a profundidade de penetração óptica é dada por  $\delta = 1/\alpha$ , e o comprimento de difusão térmica do elétron é dado por  $\ell = \sqrt{D\tau_a}$ , onde  $D$  é a difusividade térmica. A duração do processo de ablação,  $\tau_a$ , é determinada pelo tempo necessário para a transferência de energia dos elétrons para a rede.

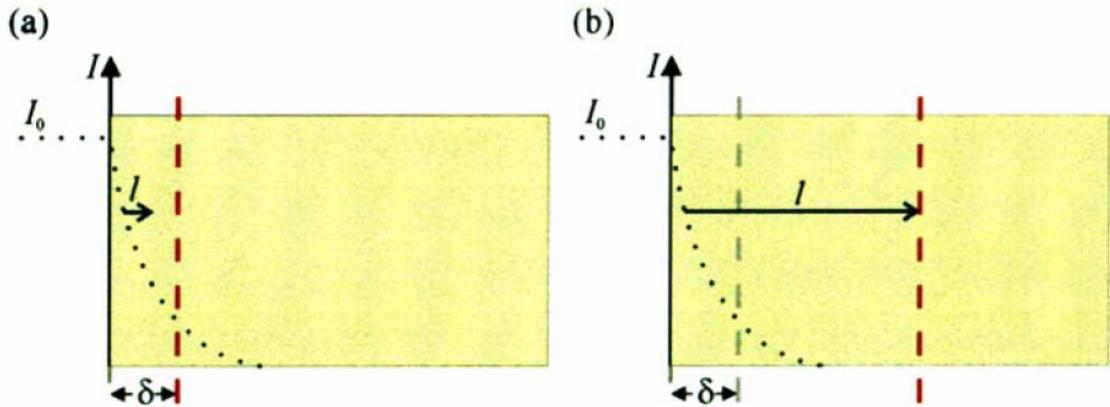


Figura 4: Esquema do aquecimento com dois pulsos ultra curtos. (a)  $\delta > \ell$ ; (b)  $\delta < \ell$ .

Dois casos, ilustrados na Figura 4, podem ser distinguidos: a profundidade ótica de penetração é superior ao comprimento de difusão térmica,  $\delta > \ell$ , e vice-versa,  $\ell > \delta$ . Para estes casos, as seguintes fórmulas para as temperaturas de equilíbrio podem ser obtidas da

$$T_i \approx \frac{F_a}{C_i \delta} \exp\left(\frac{-x}{\delta}\right) \quad (\delta > \ell) \quad \text{Eq. 9}$$

$$T_i \approx \frac{F_a}{C_i \ell} \exp\left(\frac{-x}{\ell}\right) \quad (\delta < \ell) \quad \text{Eq. 10}$$

Neste modelo simplificado de ablação, algo significativo acontece quando a energia da rede (por unidade de volume)  $C_i/T_i$ , excede um certo valor de limiar. Este valor de limiar pode ser calculado, em uma primeira aproximação, como o calor de evaporação  $\rho\Omega$ , onde  $\rho$  é a densidade e  $\Omega$  é o calor específico de evaporação por unidade de massa.

A condição para ablação significativa,  $C_i T_i \geq \rho\Omega$ , pode ser escrita como

$$F_a \geq F_{th}^\delta \exp\left(\frac{x}{\delta}\right), \quad F_{th}^\delta \sim \rho\Omega\delta \quad (\delta > \ell) \quad \text{Eq. 11}$$

$$F_a \geq F_{th}^\ell \exp\left(\frac{x}{\ell}\right), \quad F_{th}^\ell \sim \rho\Omega\ell \quad (\delta < \ell) \quad \text{Eq. 12}$$

Onde,  $F_{th}^\delta$  e  $F_{th}^\ell$ , são os limiares de ablação para as correspondentes fluências laser absorvidas.

As profundidades da ablação podem ser derivadas da Eq. 11 e da Eq. 12, obtendo-se:

$$L \approx \delta \ln\left(\frac{F_a}{F_{th}^\delta}\right) \quad (\delta > \ell) \quad \text{Eq. 13}$$

$$L \approx \ell \ln\left(\frac{F_a}{F_{th}^\ell}\right) \quad (\delta < \ell) \quad \text{Eq. 14}$$

Isto significa que são obtidas duas relações em escala logarítmicas no modelo de duas temperaturas - TTM.

Estes dois regimes de ablação também foram observados experimentalmente em ablação com pulsos de sub picossegundos em Cu<sup>26</sup>, em Au e Ag<sup>27</sup>.

Com relação à Eq. 13 e à Eq. 14, estas duas relações logarítmicas podem ser atribuídas à profundidade de penetração óptica e a condução de calor eletrônica, respectivamente.

Na Figura 5<sup>27</sup> a profundidade de ablação por pulso é mostrada como uma função da fluência para pulsos de 150fs (comprimento de onda 780nm), que irradiaram um alvo de Cu. Os dois regimes de ablação estão associados às duas relações logarítmicas diferentes e são claramente visíveis nesta figura.

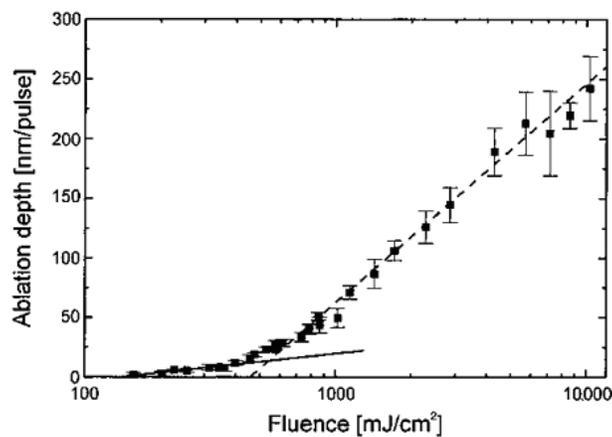


Figura 5: Profundidade de ablação por pulso para o cobre, em função da fluência do laser incidente (Ti: safira,  $\lambda = 780$  nm, 150 fs). (----)  $L = 10 \ln (F / F_{th}^{\delta})$  nm; (- - -)  $L = 80 \ln (F = F_{th}^l)$  nm.

Para fazer o levantamento destes pontos, pode-se utilizar a técnica da regressão de diâmetro. Esta técnica está baseada no fato de que a dimensão do dano provocado no material está diretamente ligada à fluência do pulso incidente, e considera-se a dimensão do dano como o diâmetro medido da região afetada.

A distribuição de fluência radial no foco do feixe com distribuição Gaussiana é determinada por<sup>28</sup>.

$$F(r) = \frac{E_{meas}}{\pi\omega_0^2} e^{-\frac{2r^2}{\omega_0^2}} = F_{meas} e^{-\frac{2r^2}{\omega_0^2}}$$

*Eq. 16*

Onde  $E_{meas}$  é a energia medida,  $r$  a coordenada radial e  $\omega_0$  o raio médio medido a  $1/e^2$  da intensidade máxima.

Aqui, a suposição é que, se o material não é danificado a uma distância  $r$  do centro do feixe, então, o valor correspondente da fluência  $F(r)$  iguala-se ao valor de limiar  $F_{th}$ .

Assim, a interação do feixe com a superfície da amostra resulta em um dano, cujo diâmetro  $D$  ao quadrado obedece a uma relação logarítmica com a fluência do pulso laser. Desta maneira, a equação 16 se transforma em:

$$F_0 = F_{th} \exp\left(\frac{D^2}{2\omega_0^2}\right)$$

*Eq. 17*

Assim, são utilizados dados experimentais para se traçar o gráfico da fluência  $F$  em função de  $D^2$ . Uma projeção numérica permite então a obtenção da fluência de limiar para a ocorrência de dano; ou seja, a fluência  $F_{th}$  para a qual o diâmetro  $D$  seja igual a zero.

A medida precisa de  $F_{th}$  é extremamente importante para usinagem com pulsos ultracurtos, pois somente a utilização de fluências próximas a  $F_{th}$  irá garantir um processo sem acúmulo de calor na região afetada. Fluências muito acima de  $F_{th}$  levam à ocorrência de outros fenômenos que resultam em transferência de calor para a rede e limitam a precisão do processo de usinagem.

### 2.3.2 Limiar de Ablação para Pulsos Sobrepostos

Quando uma superfície é irradiada por pulsos espacialmente sobrepostos, verifica-se que o aparecimento de dano ocorre para fluências muito abaixo do limiar de ablação para pulso único. Como a usinagem requer frequentemente o uso de múltiplos pulsos, torna-se muito importante o estudo do comportamento da interação laser-matéria nestas condições.

A redução no limiar de ablação com o aumento do número de pulsos revela um efeito de incubação e obedece a uma relação de potência que é válida para metais, isolantes e semicondutores. Para o caso de metais, o mecanismo de incubação proposto é o de acúmulo de deformação plástica, resultante de campos de stress térmicos induzidos pelo laser. Para semicondutores e isolantes, acredita-se que este efeito tenha origem na formação de defeitos como os centros de cor.

A fluência de limiar  $F_{th}(N)$  para  $N$  pulsos sobrepostos está relacionada com a fluência de limiar  $F_{th}(N=1)$  para pulso único como <sup>29</sup> :

$$F_{th}(N) = F_{th}(1) \cdot N^{S-1} \quad \text{Eq. 18}$$

O coeficiente de incubação  $S$  caracteriza a extensão do fenômeno de incubação no determinado material; quando  $S=1$  este efeito não existe.

A combinação da equação 18 com Eq. 17 leva a uma relação entre o diâmetro  $D$  do dano com o número  $N$  de pulsos sobrepostos em um mesmo ponto da seguinte maneira:

$$D = \omega_0 \sqrt{2 \ln \left( \frac{F}{F_{th}(1) N^{S-1}} \right)} \quad \text{Eq. 19}$$

Com esta relação também é possível obter o valor de  $S$  e da fluência de limiar para pulso único.

### 2.3.3 Estruturas periódicas induzidas por pulsos ultracurtos.

A formação de estruturas periódicas induzidas por laser, conhecidas como LIPSSs (“laser-induced periodic surface structure”) sobre as superfícies de sólidos é bem conhecida para pulsos longos. Mais recentemente, a formação destas estruturas também foi observada quando do uso de pulsos ultracurtos<sup>30 31 32</sup>. Estas estruturas aparecem sobre metais, semicondutores ou dielétricos e a sua formação não é determinada pelas propriedades dos materiais no seu estado normal. A alta intensidade dos pulsos de fentossegundos modifica suas propriedades ópticas iniciais (de maneira transitória) como o seu índice de refração devido ao estado excitado do material. O mecanismo aceito para a formação destes LIPSSs (ou NC-LIPSSs, onde NC refere-se a nano-covered) é a interferência entre a luz incidente e a onda espalhada tangencialmente pela superfície. A formação da estrutura em forma de grade surge da ablação que ocorre ao longo das linhas de interferência construtiva. O período observado é dado por:

$$\Lambda = \lambda / (\eta \pm \text{sen}\theta) \quad \text{Eq. 20}$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda incidente,  $\eta$  é a parte real do índice de refração efetivo, e  $\theta$  é o ângulo de incidência do feixe laser. Para o caso de pulsos longos, a formação dos LIPSSs é considerada como sendo relacionada à rugosidade da superfície, enquanto que para pulsos ultra-intensos, a formação de NC-LIPSSs com estruturas significativamente menores deve estar relacionada à mudança da parte real do índice de refração efetivo da interface ar-material.

Este tipo de estrutura tem sido bastante estudado recentemente, pois ela pode ser utilizada em diversos tipos de aplicações, como no aumento da absorção de luz, na geração de radiação de terahertz, e no aumento das propriedades hidrofílicas de superfícies<sup>27</sup>.

## 2.4 Linguagem de Programação

A linguagem de programação utilizada neste trabalho é a Labview (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). Esta linguagem foi desenvolvida pela National Instruments em 1986 originalmente para Macintosh, mas hoje em dia está plenamente desenvolvida para vários outros ambientes tais como Windows e Linux. Sua programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, e oferece uma grande facilidade para medições e automação, assim como aquisição e análise de dados.

Um programa em Labview pode ser formado por varias partes interligadas, os chamados Instrumentos Virtuais ou VIs. Cada um deles tem o seu painel frontal e o diagrama de blocos, onde está o código gráfico do programa. O painel, que seria a interface com o usuário, pode ou não ser apresentada durante a sua execução. O programa, com linguagem gráfica chamada “G”, é processado por um compilador, o que a torna comparável com aquelas de alto nível.

Cada parte do programa, chamado de VI, ou Sub-VI, pode ser usado por qualquer programa que tenha um link direcionado ao bloco, assim como cada VI pode ser executado isoladamente.

Dentro destes VIs, os diversos blocos são ligados por “linhas de ligação”, que definem o fluxo de dados. Cada um destes subprogramas pode ter entradas e saídas individuais ou que são compartilhadas pelos outros blocos. A ordem da execução do programa é definida pelo programador, já que a direção da entrada e saída de dados está desenhada no programa. Esta ordem permite a ocorrência de processos em paralelo, ou mesmo VIs inteiros sendo executados simultaneamente.

Um Sub-VI, pode receber dados de um equipamento externo, através de uma porta ou de outro dispositivo de aquisição de dados, e após processar esta informação, transferi-la para a saída que será usada por um outro VI.

Existem vários VIs já predefinidos em LabView, que por serem polimorfos, adaptam-se a vários tipos de dados, e podem ser usados em muitos outros VIs, adaptando-se ao tipo de variável utilizada.

No programa Labview, cada tipo de variável e seu fluxo de dados dentro do programa são indicados por uma cor diferente, assim, para variáveis do tipo inteiro, e

para as linhas que indicam os seus fluxos, a cor utilizada é a azul; a cor rosa é utilizada caso a variável seja uma string, bem como para as linhas que descrevem o fluxo de dados deste tipo de variável.

Para que o usuário possa entrar com dados e interagir com a execução do programa, existem muitos tipos de variáveis que vão desde as alfanuméricas, as numéricas e as booleanas; para isso podem ser usadas, janelas, dial, chaves-LEDs ou outros tipos de dispositivos virtuais.

O Labview tem uma rica interface gráfica, e não requer que o programador escreva nenhuma linha de programa. Esta talvez seja a grande vantagem deste tipo de programação, além do fato de ser fácil a criação de uma programação que se execute paralelamente.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 O laser de pulsos ultracurtos

O sistema gerador de pulsos ultracurtos é o modelo Rainbow da marca FemtoLasers. Trata-se de um laser *mode-locked* de Ti:safira, que emite radiação com espectro centrado em 791 nm e uma largura temporal de aproximadamente 5 fs. A energia emitida é de poucos nJ com taxa de repetição de 78 MHz.

Os pulsos deste laser são posteriormente injetados em um sistema amplificador de Ti:safira, que aumenta a energia de cada pulso e diminui a taxa de repetição. No início do trabalho, contudo, um outro sistema amplificador foi utilizado. Trata-se do modelo Odin da Quantronix, com energia máxima de saída de 400  $\mu$ J, taxa de repetição de 1kHz e largura temporal de 30 fs. Este sistema apresentava um feixe com acentuada elipsidade e instabilidade de energia com desvio padrão de 6 a 8%. Este sistema amplificador foi em seguida substituído por outro, com amplificação de energia para até 800  $\mu$ J, e redução da taxa de repetição para 4 kHz. Uma célula de Pockles no interior do seu sistema óptico permite o controle da taxa de repetição para qualquer frequência que seja submúltiplo de 4 kHz. Ao sair do amplificador, a largura espectral dos pulsos é de 42nm o que corresponde a uma largura temporal de 17fs. O amplificador é o modelo Compacta PRO CE-Phase HP/HR da marca Femtopower.

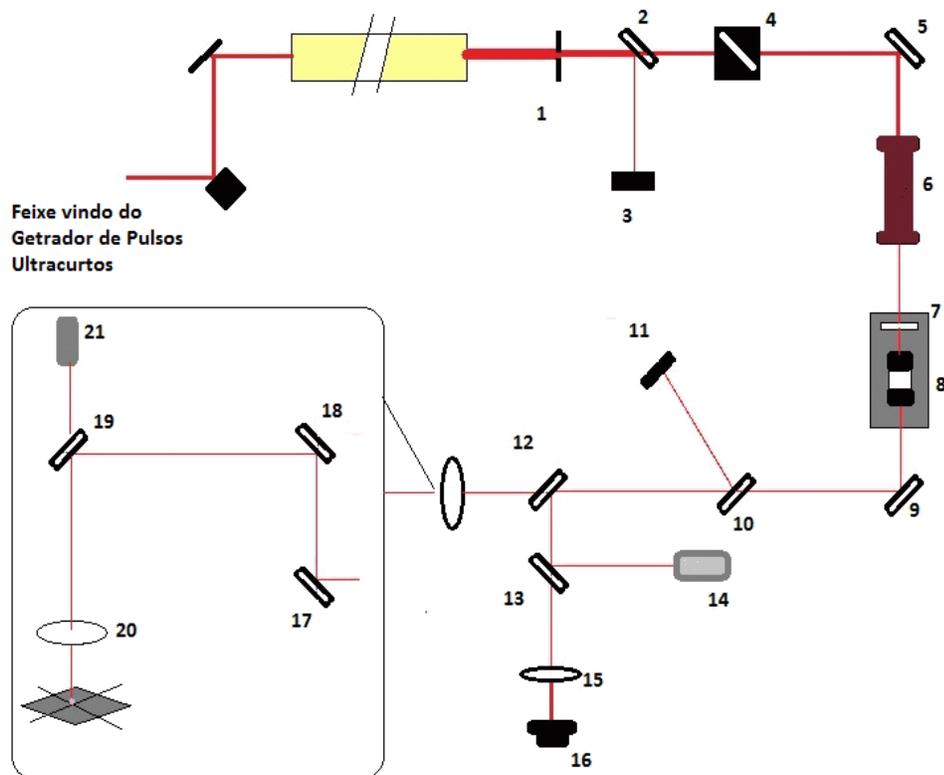
Após deixar o amplificador, o feixe laser é manipulado por uma série de espelhos dielétricos até ser levado a um tubo fixado à parede do prédio, que liga os quatro laboratórios pertencentes ao sistema. Em cada laboratório, a introdução de um espelho altamente refletor em 45° desvia o feixe para uso dedicado.

O laboratório de “aplicações industriais” de pulsos ultracurtos, chamado de T3U, é o último da linha e está a cerca de 30 metros do laser gerador. Aqui não há

necessidade de um espelho para desviar o feixe, e este é diretamente injetado em uma íris de obturação do feixe (descrita a seguir).

### 3.2 A estação de trabalho

Trata-se de um sistema óptico e mecânico construído para se obter processamento com o feixe laser de pulsos ultracurtos. É composto de um conjunto de elementos ópticos, fixados em uma estrutura de perfis de alumínio, cuja função é receber o feixe vindo do laboratório T-cubo, e levá-lo até a superfície da peça a ser processada. Ele também tem a função de focalizar o feixe laser na superfície ou em qualquer outro ponto da amostra. A Figura 6 mostra um esquema do sistema.



*Figura 6:* Desenho esquemático do sistema óptico da estação de trabalho do T<sup>3</sup>U. 1- íris com diâmetro de 12 mm; 2 - amostrador de feixe; 3 - sensor de quadrante para o “fast steering mirror” FSM; 4 - Obturador pneumático; 5 - Espelho de dobra; 6 - Expansor de feixe 2x invertido; 7 - Lâmina de meia onda; 8 - Polarizador Glan-Thompson; 9 - Espelho de dobra; 10 - Lâmina de BK7; 11 - Detector pyroelétrico; 12 - Amostrador de feixe; 13- Divisor de feixe; 14 – Fotodiodo; 15 - Lente positiva de comprimento focal longo; 16 - Câmera CCD; 17 – Espelho de dobra para direcionamento vertical; 18 e 19 - Espelho de dobra; 20 – Lente de Focalização; 21 – Câmera de visualização

A distância de aproximadamente 30 metros percorrida pelo feixe laser desde a fonte emissora até a estação de trabalho faz com que o seu diâmetro aumente de ~ 10 mm para ~ 30 mm e seja maior que a abertura útil dos elementos utilizados no sistema óptico (de ~17mm). Assim, uma íris com 12 mm de diâmetro (elemento 1) foi introduzida no início do sistema para diminuir o diâmetro do feixe de entrada e, também para servir como referência de alinhamento. O expansor de feixe invertido de 2X (elemento 6) reduz para 6mm o diâmetro do feixe, o que possibilita a sua utilização nos elementos de menor abertura, como o detector piroelétrico e algumas lentes objetivas. Um obturador de feixe (elem. 4) também foi inserido no caminho óptico e é acionado por uma válvula solenóide acoplada a um sistema pneumático.

A energia dos pulsos laser é controlada de maneira precisa através do conjunto formado por uma lâmina de meia onda e por um polarizador Glan-Thompson (elem.7 e 9). Aqui, o feixe que já é naturalmente polarizado é girado de maneira controlada e precisa através da lâmina de meia onda, e somente a componente paralela à direção de transmissão do polarizador prossegue no caminho óptico. Com este sistema, pode-se controlar a energia com grande precisão e também a direção da polarização do feixe incidente sobre a amostra.

Um detentor piroelétrico (elem. 11) registra a energia individual de cada pulso. Utilizou-se um sensor modelo J-10 MB-LE acoplado a um medidor FieldMax II TOP, ambos da Coherent Inc. A sensibilidade deste sistema é de 1nJ com capacidade de medida para taxa de repetição de até 300 Hz. Para taxas de amostragem maiores, utiliza-se o mesmo medidor com um sensor do tipo termo pilha modelo PM3 também da Coherent. Com o feixe com polarização vertical, uma lâmina de BK7 (elemento 10), sem coating anti-refletor, é colocada a um ângulo de aproximadamente 55° no caminho óptico. Nesta condição, uma porção razoável do feixe é desviada para o detector aumentando a confiabilidade do sistema. Neste caso, a refletividade (polarização S) de Fresnell foi medida como sendo de 29,5%.

A seguir, um amostrador de feixe (elemento 12), com coating anti-refletor em uma face e sem coating na outra, desvia cerca de 2% da energia incidente para um divisor de feixe (elem. 13), que leva o feixe a um detector fotodiodo de silício (elem.

14) e uma câmera CCD (elm. 16). O detector é utilizado para monitoramento em tempo real das condições do feixe laser (taxa de repetição e flutuações de intensidade), enquanto que no outro braço, o feixe é utilizado para monitoramento de seu perfil espacial e para medidas do fator  $M^2$ . Neste caso, utiliza-se uma lente de comprimento focal longo ( $f = 500\text{mm}$ ) e um sistema da Newport, modelo LPB-2, que utiliza uma câmera CCD e um software dedicado para mapeamento do perfil espacial de intensidade do feixe incidente.

Depois deste ponto, o feixe é elevado verticalmente (elem. 17) e injetado em um tubo que o desvia verticalmente para baixo passando-o por uma lente de focalização (ele. 20). O espelho altamente refletor em  $45^\circ$  (para a radiação laser em  $800\text{nm}$ ) dentro do tubo é transparente à luz visível e permite que a área do feixe focalizado seja projetada em uma câmera CCD (elem. 21) colocada logo acima deste. A estrutura desta parte do sistema óptico é mostrada na *Figura 7*.

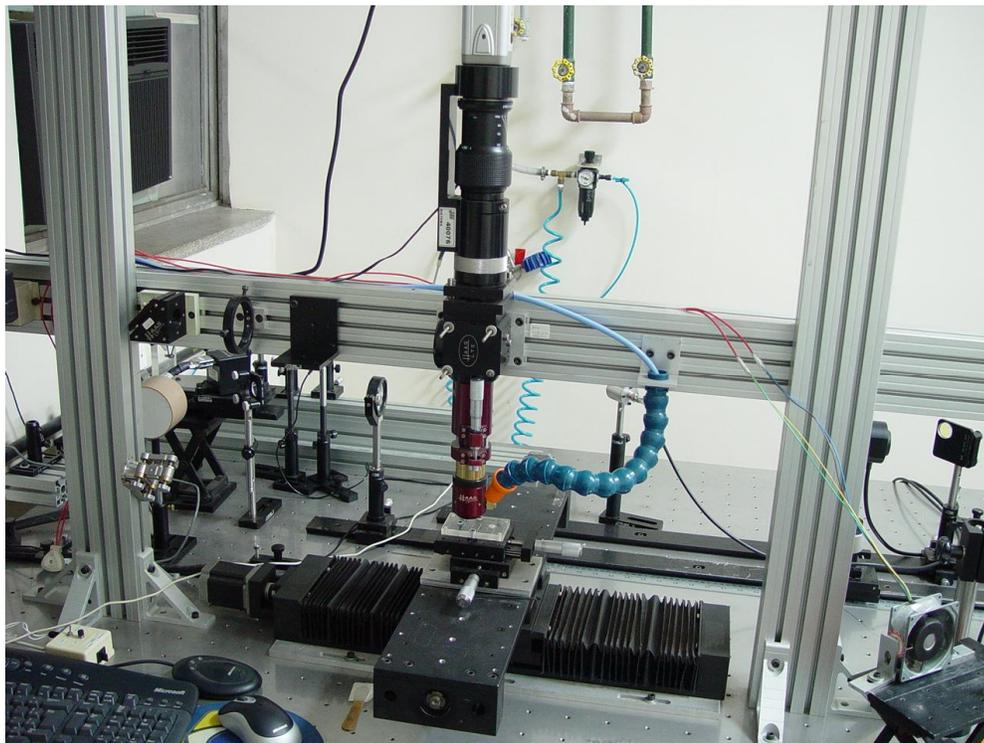


Figura 7- Sistema de movimentação X,Y e sistema de entrega de feixe e focalização.

Vale aqui salientar que, devido aos custos, alguns dos espelhos foram feitos com coatings convencionais, ou seja, possuem uma largura de banda de aproximadamente 30 nm. Isto é suficiente para transmissão de pulsos com largura temporal de aproximadamente 30 fs. Pulsos com largura temporal menor que esta são alargados temporalmente devido à supressão de parte de seu espectro.

A estrutura modular do sistema de focalização, permite o uso de qualquer comprimento focal. Um micrômetro acoplado ao deslocamento da lente permite a localização e a medida precisa do ponto focal sobre a superfície da amostra. Se a troca da lente, ou da amostra, exigir deslocamentos maiores, todo o conjunto de focalização é movimentado verticalmente nos trilhos de fixação.

Abaixo da lente de focalização, a amostra é fixada em uma mesa de deslocamento com precisão micrométrica e controlada por computador. Ela tem possibilidades de movimentos em duas direções perpendiculares horizontais X e Y, e fornece o movimento relativo entre o feixe e a superfície a ser processada. Esta mesa é movimentada por motores de passo e possui um sistema computadorizado que possibilita o seu deslocamento conforme um desenho pré-estabelecido. Trata-se de um sistema CNC que, em conjunto com um CAD/CAM, fornece infinitas possibilidades de movimentação com controle não só do movimento da mesa, mas também de outros parâmetros de processo, como velocidade, injeção de gases de proteção e/ou processo, parada do feixe, controle de sua intensidade, etc. Este é um sistema que foi desenvolvido especialmente para este uso e foi implementado neste trabalho. Toda a caracterização dos movimentos, precisão, repetibilidade, etc. foram obtidas. A implementação de um pós-processador dedicado ao sistema de software também foi feito neste trabalho. Este pós-processador possibilita o controle de uma série de acessórios necessários ao processamento a laser, como solenóides de controle de fluxo de gás, do obturador (shutter) do pulso laser, de uma lâmina de meia onda para controle de energia, e outros que forem necessários implementar.

### **3.2.1 Características da mesa de movimentação**

A mesa possui dois eixos perpendiculares sobrepostos, acionados por motores de passo, com fuso de esferas e guias prismáticos de precisão. O controle dos motores é

feito por uma placa National da serie Motion modelo PCI 7340 controlada por um software desenvolvido em plataforma LabView. Os *drivers* de potência dos motores de passo são da Kalatec modelo 3540-MO. As demais características da mesa são:

- Motor de passo: Kalatec Mod KTC - HT23-400
- Curso total: 317 mm

Foram feitos alguns ensaios com a mesa e os resultados dos testes foram os seguintes:

1º teste: movimento simultâneo dos dois eixos (XY), executando interpolações lineares (“zig-zag”) e circulares, e retornando para a posição inicial.

Erros (em micron) no retorno para a posição inicial: 1, -1, -2, 1, -3, 0, 2.

2º teste: movimento simultâneo dos dois eixos (XY), com carga (+ ou - 2Kg), executando interpolações lineares (“zig-zag”) e circulares, e retornando para a posição inicial.

Erros (em micron) no retorno para a posição inicial: -1, -2, -2, -2, -3, -6, -2.

3º teste: movimento do eixo (X), executando interpolações lineares (+ou - 40 interações de “zig-zag”) e retornando para a posição inicial.

Erros (em micron) no retorno para a posição inicial: 0, 1, 0, 1, 0

4º teste: movimento do eixo (Y), executando interpolações lineares (+ou- 40 interações de “zig-zag”) e retornando para a posição inicial.

Erros (em micron) no retorno para a posição inicial: -3, 0, -3, 0, 0

### **3.2.2 Controle da estabilidade espacial.**

Devido à grande distância entre o laser gerador de pulsos curtos e a estação de trabalho, pequenas vibrações na estrutura prédio e mesmo variações do “pointing” do feixe podem causar grande variação na posição do feixe focalizado. Para minimizar este problema, um sistema automatizado com sensor de quadrante foi utilizado. Neste sistema, uma porção do feixe principal é direcionado ao centro de um sensor tipo CCD (elemento 3 da figura 6), o qual detecta qualquer variação espacial na posição do centróide do feixe. Assim que esta variação é detectada, um sinal eletrônico é enviado

a um suporte de espelho “motorizado” com a finalidade de fazer um reposicionamento do feixe e desviá-lo novamente para o centro do sensor de quadrante. Este suporte motorizado atua com um espelho de dobra logo na saída do laser gerador e atua em tempo real de modo a minimizar grandemente a flutuação espacial do ponto focal. O sistema utilizado, chamado de “Fast Steering Mirror” é o modelo FSM-300-01 da marca Newport, com precisão de  $\leq 0.262$  mrad.

## **4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

### **4.1 Automação e Integração dos Sistemas**

Um processo de microusinagem com pulsos ultracurtos, como visto, requer um controle preciso e simultâneo de diversos parâmetros do feixe laser. Sem este controle, o resultado não será o melhor possível e o processo pode ser extremamente lento.

Assim, uma das condições para a viabilidade de utilização da estação de trabalho é a automatização e a integração de vários conjuntos ópticos e mecânicos que compõem o sistema. Embora ainda não totalmente automatizado (o trabalho continua), o sistema conta com um controle inteligente que tornou a usinagem ou tomada de dados muito mais rápida, eficiente e confiável. A seguir será dada uma descrição de cada um destes sistemas.

#### **4.1.1 Software para controle de processo.**

Com o intuito de integrar e automatizar os diversos sistemas, foi desenvolvido um software que permite o controle e o registro de algumas variáveis do processo (Figura 8). Assim, os diversos equipamentos que participam deste sistema são simultaneamente controlados em uma única plataforma instalada no mesmo computador.

Primeiramente, foi adquirida uma mesa com movimentação em dois eixos, controlada por um software na linguagem LabView, desenvolvido pela empresa Sensoft Indústria e Automação Ltda. Foi escolhida esta linguagem por permitir a interação entre outros programas que foram objetos deste trabalho e desenvolvidos nesta mesma plataforma.

O programa de controle da mesa aceita os comandos básicos de linguagem CNC, e por ser de arquitetura aberta, permitiu a interação com os softwares de controle de processo.

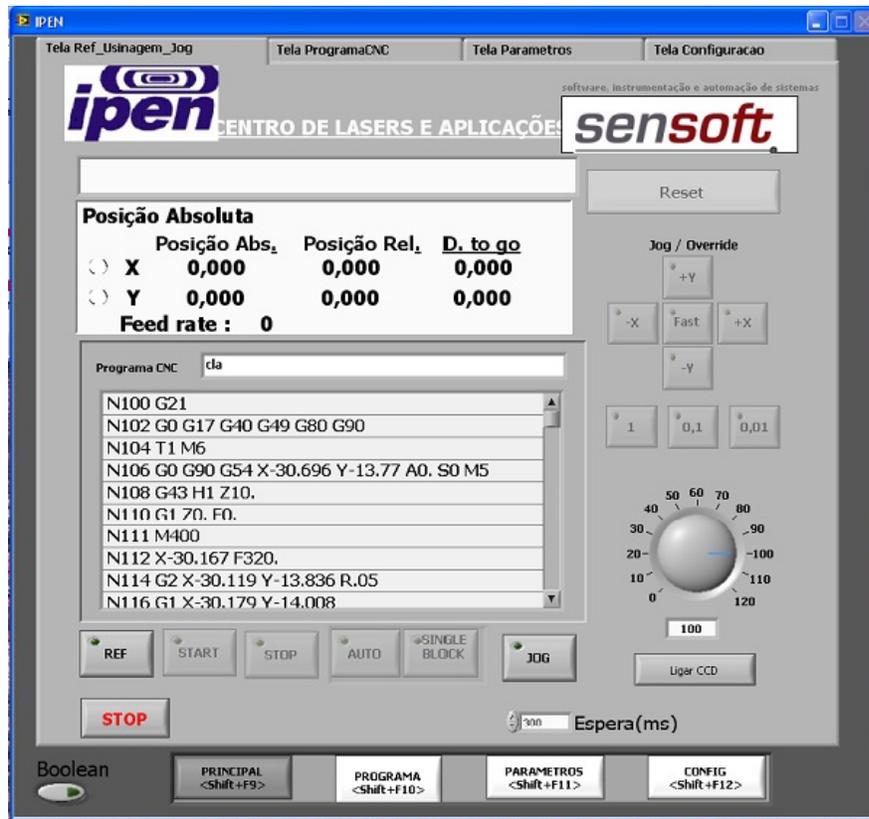


Figura 8 Tela principal do programa de controle da mesa de posicionamento X,Y.

Foi identificada a necessidade de haver um controle preciso da energia dos pulsos laser no próprio local dos processos, já que a fonte laser encontra-se distante da mesa de trabalho, e não seria possível alterar os parâmetros dinamicamente durante o processo. Para isso foi implementado um sistema de controle da potencia transmitida pelo conjunto polarizador Glan Thompson mais lâmina de meia onda, que permite, com a rotação da lâmina, a seleção precisa da energia que se deseja utilizar ( Figura 9).

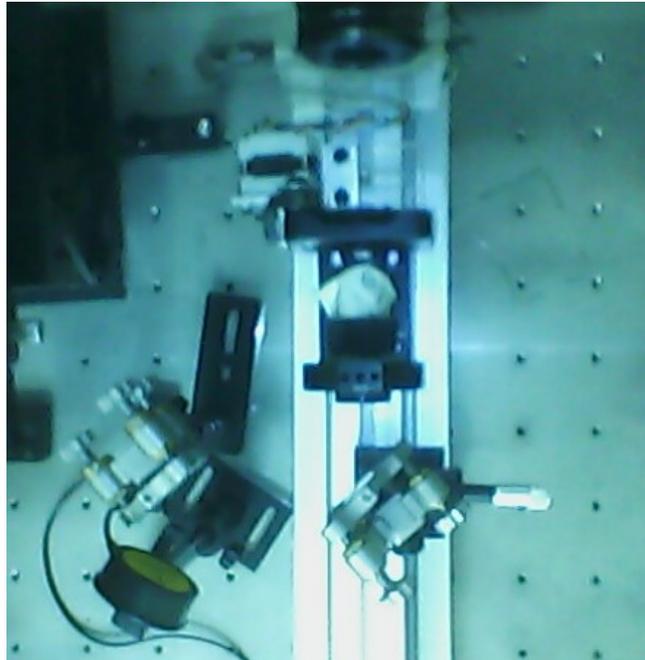


Figura 9- Sistema de controle de potência através de lamina polarizadora de 1/2 onda.

Para promover a rotação automatizada da lâmina foi instalado um motor de passo, o qual foi acoplado ao sistema de giro da lâmina através de uma polia e correia dentada (Figura 10).

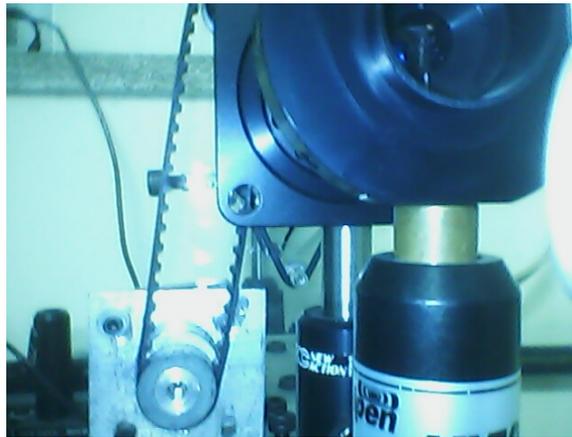


Figura 10-Sistema de rotação de lamina por motor de passo.

O ângulo da rotação é controlado pelo software de processo. A leitura da energia é feita por um sensor pyroelétrico, controlado por um sistema de medição, o qual se comunica com o computador através de uma porta USB. Este equipamento também

tem um software escrito na plataforma LabView, e é através deste software que é feita a leitura da energia após a passagem pelo polarizador e pela lâmina de meia onda. Esta informação é utilizada pelo software de controle para diversas finalidades, que são:

*Controle de potência automático.*

Através de uma relação entre a posição do motor de passo e a leitura de energia obtida através do detector, o software faz uma pré-calibração e cria uma tabela interna da posição em função da energia (Figura 11). Quando solicitado um determinado valor de energia, o software procura a posição da lamina que mais se aproxima do valor solicitado, e faz o ajuste fino da posição até a aproximação mais adequada, levando em conta a tolerância admitida pelo usuário (Figura 12).

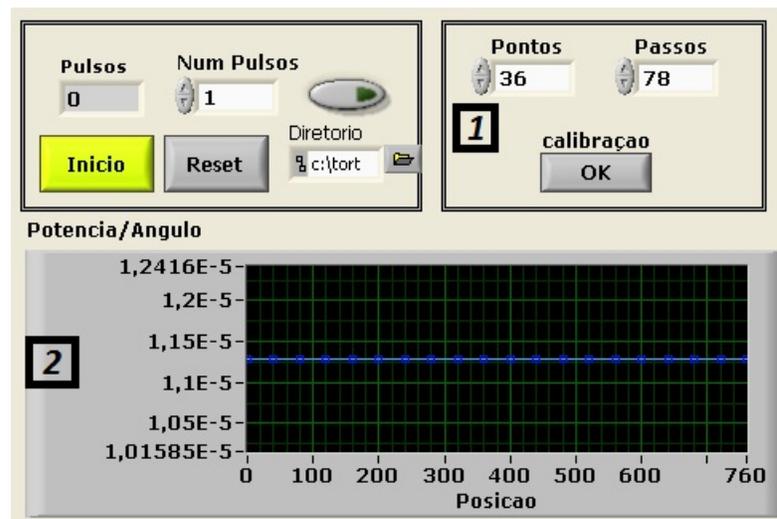


Figura 11-Telas do sistema de calibração 1-Escolha do numero de passos e grau de varredura, 2- Tela de registro dos valores de potencia encontrados em cada posição.

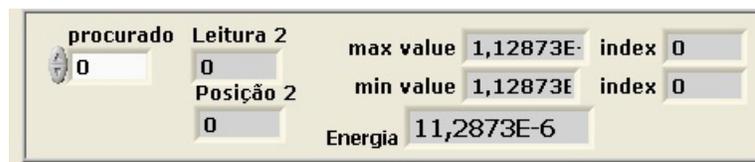


Figura 12- Sistema de busca de valores de Energia.

*Registro do valor da energia para cada pulso, ou média de pulsos.*



Na fig. b) temos uma serie de 128 pulsos cujo desvio padrão é de 0,044904 ou seja 1,5% o que permite uma maior confiabilidade nos dados.

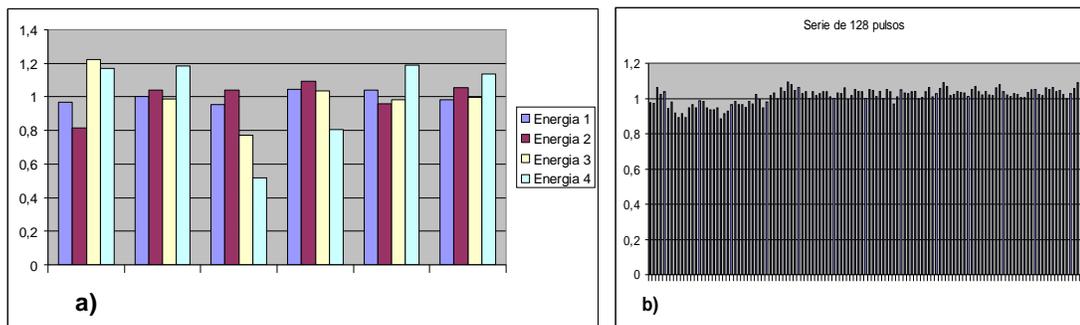


Figura 14 a)Seis series de 4 pulsos b)serie de 128 pulsos

*Controle manual da energia via teclado ou mouse.*

Durante testes preliminares, ou em quaisquer circunstâncias onde seja necessário alterar o valor de energia fornecido à amostra, o programa permite a intervenção manual (Figura 15) para a movimentação do motor de passo e conseqüentemente a alteração do valor de energia.



Figura 15-Acionamento manual do motor de passo, duas velocidades e leitura de posição.

Este software também se comunica com o programa que controla o movimento da mesa X,Y para interagir durante um processo. O programa original da Sensoft foi modificado e adicionadas duas variáveis globais, compartilhadas pelo dois softwares (Figura 16) desta maneira, o programa da mesa, informa ao software de controle, o

instante em que o laser deve ser acionado, e se for necessário o número de pulsos e a energia desejada, assim como o software de controle (Figura 17) para o movimento da mesa até que os pulsos do laser desejado, tenham sido liberados sobre a amostra.

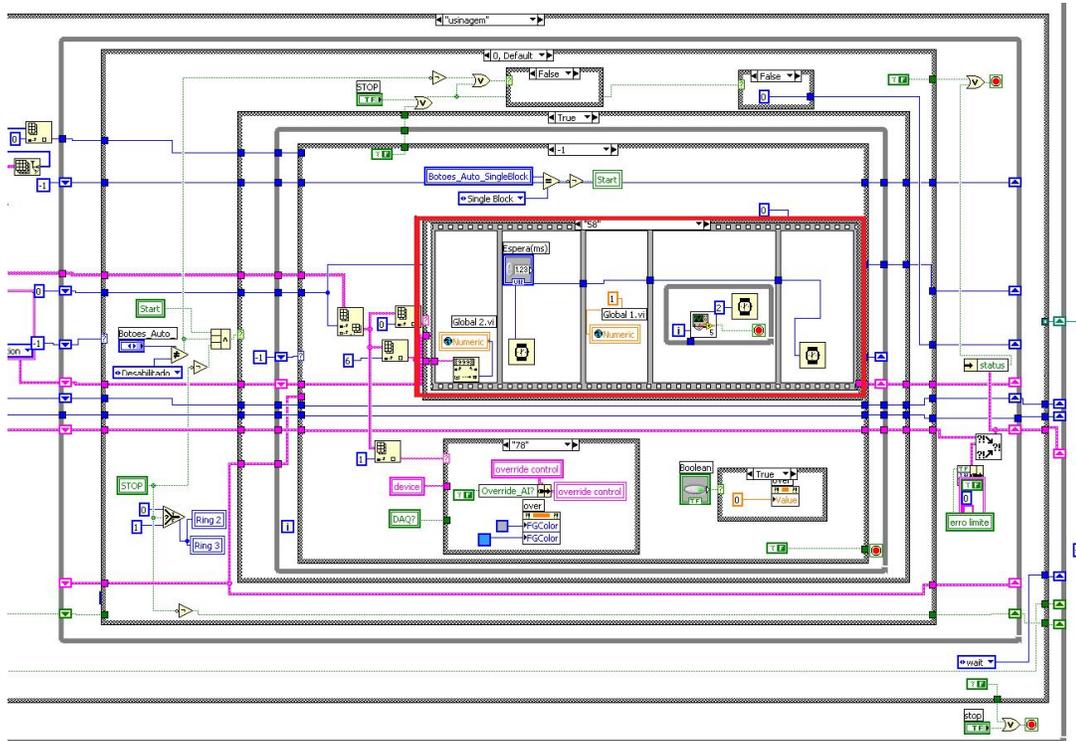


Figura 16- Rotina de Comunicação no programa da MESA XY

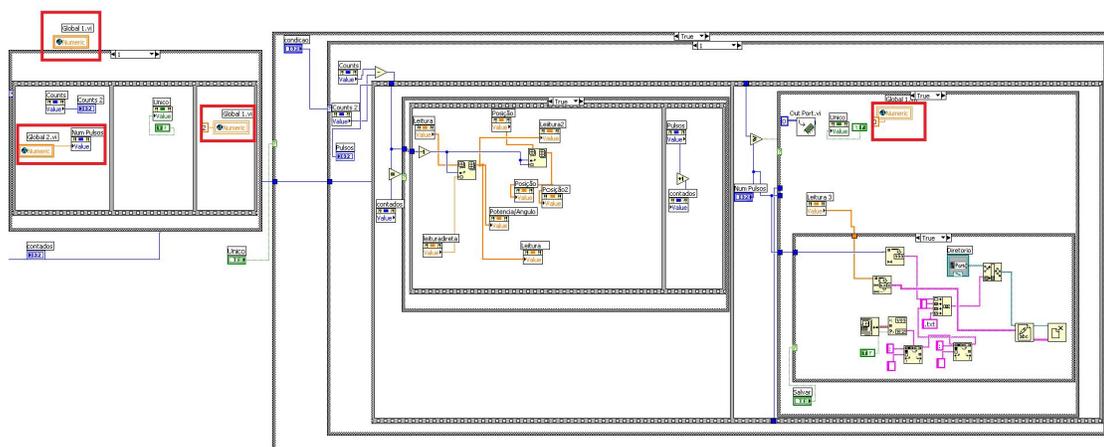


Figura 17- Rotina de Comunicação no programa de Controle.

A seguir será descrito como foi feita a comunicação entre o software e as outras partes do sistema.

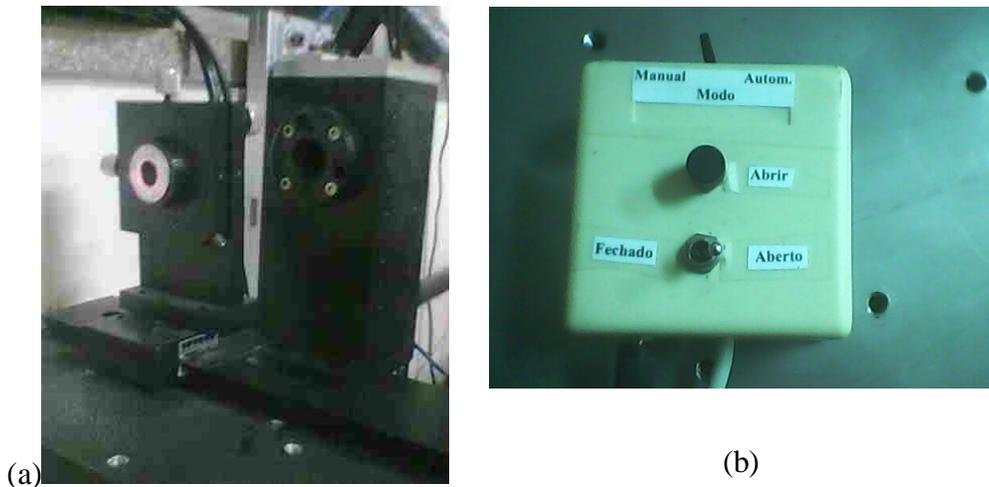
#### **4.1.2 Controle do motor de passo.**

Utilizou-se um motor de passo marca Akiyama modelo AK39H/12-1.8, e um driver AKDMP5- 1.7A (Figura18). Este *driver* exige um sinal pulsado de sincronismo; a cada pulso, temos o giro de um passo do motor, e um sinal de sentido de rotação para o motor.

Para gerar o sinal de *clock* e sentido, utilizou-se a porta paralela do computador, através do software em LabView. Alternado-se uma das saídas desta porta entre o estado alto e baixo, gerou-se um trem de pulsos com frequência controlada; assim quando se quer que o motor gire mais rápido, aumenta-se a frequência e quando se quer um giro mais lento, diminui-se a frequência. Outra saída da porta paralela foi utilizada para enviar um sinal ao *driver* para a escolha do sentido de rotação do motor.

#### **4.1.3 Controle do *Shutter***

Utilizou-se outra saída da porta paralela para acionar um rele que controla o solenóide que abre e fecha o *shutter*. Assim através de um comando gerado pelo software de controle pode-se abrir o *shutter* e assim permitir a passagem do laser até a área de trabalho. Este controle também pode ser feito manualmente, com a finalidade de facilitar o fechamento e a abertura do *Shutter* durante ajuste de experimentos (Figura 19 ).



*Figura 19-(a)Iris e Shutter pneumático, controle da passagem do feixe. (b)Acionador manual do shutter.*

#### **4.1.4 Leitura da Energia do pulso Laser.**

Através da porta USB do computador, conectou-se o medidor FieldMax. Utilizando parte do software escrito em LabView fornecido pelo fabricante, é feita a leitura da energia que atinge o detector. Este dado é capturado pelo software de controle que o utiliza para interagir no processo.

Quando se faz o levantamento do limiar de ablação de um material utilizando-se os pulsos de fentossegundos, é necessário que se tenha o controle da posição, do número e da energia dos pulsos que incidem sobre o material. Assim, utilizando-se a comunicação entre os softwares é possível programar o número de pulsos que se quer que incidam em um determinado local da a mostra, bem como armazenar o valor da energia de cada um destes pulsos. Isto permite uma maior exatidão nos cálculos e confiabilidade nas medidas, pois caso haja alguma variação durante o processo, esta ficará registrada.

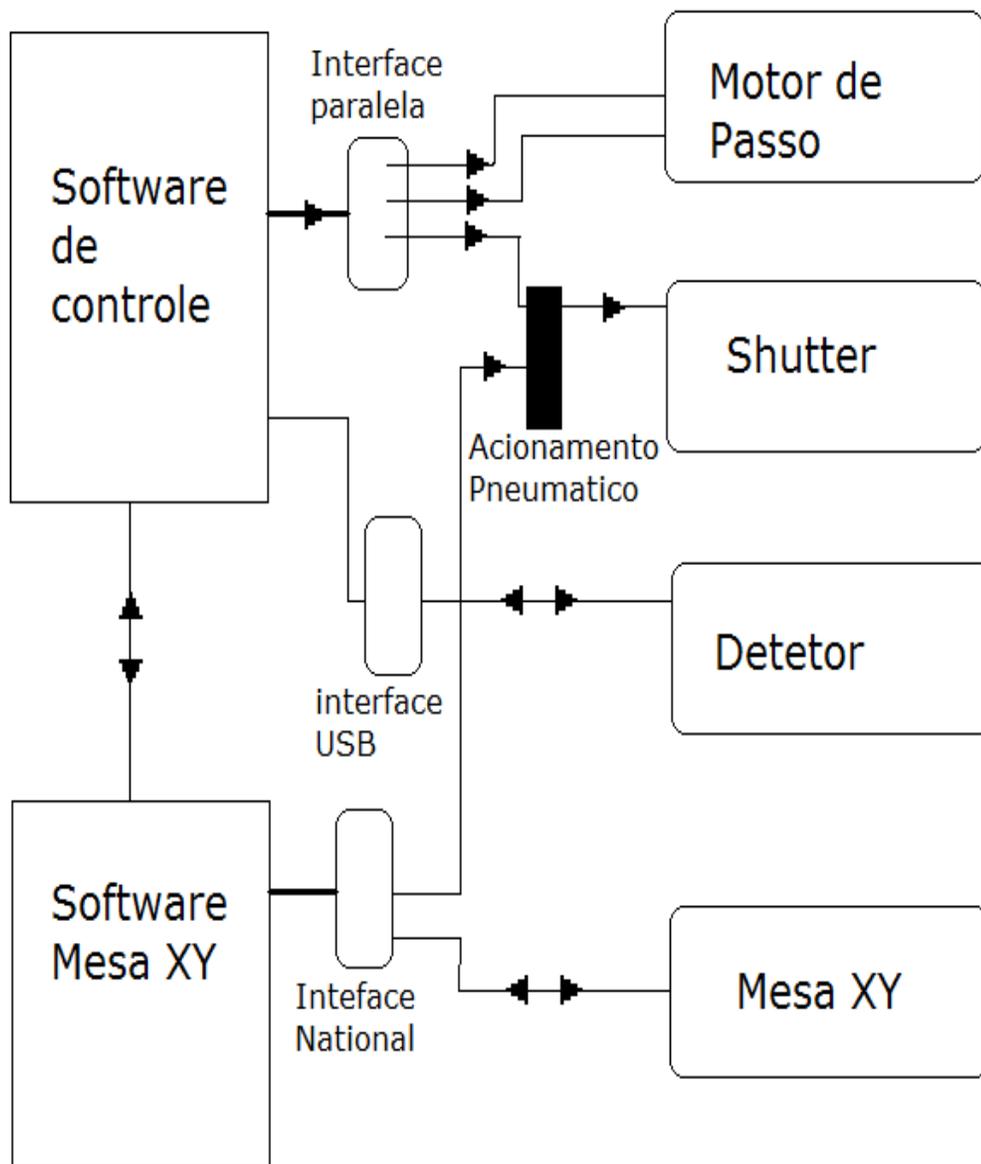


Figura 20 Diagrama de blocos com o sistema de controle e comunicação entre os diversos equipamentos que compõem a mesa de processo.

## 4.2 Vibrações

A medida da influência das vibrações no posicionamento do feixe laser foi feita pelo conjunto do sensor de quadrante e o espelho de varredura rápida FSM. Embora o conjunto tenha sido importado, algumas intervenções e calibrações no sistema foram necessárias. Assim, foi montada uma caixa de controle que permite atenuar o nível do sinal e inverter o sentido dos sinais de realimentação dos sensores de quadrante, para o caso de mudança nos espelhos ou na fixação do sensor.

Com a utilização de um feixe laser de HeNe, a redução na variação de posição (vibração) do feixe foi obtida e mostrada na figura abaixo (Figura 21). No eixo X, a variação da posição do feixe que era de  $20\ \mu\text{m}$  sem o controle, passou para  $0,5\ \mu\text{m}$  após a implementação deste sistema.

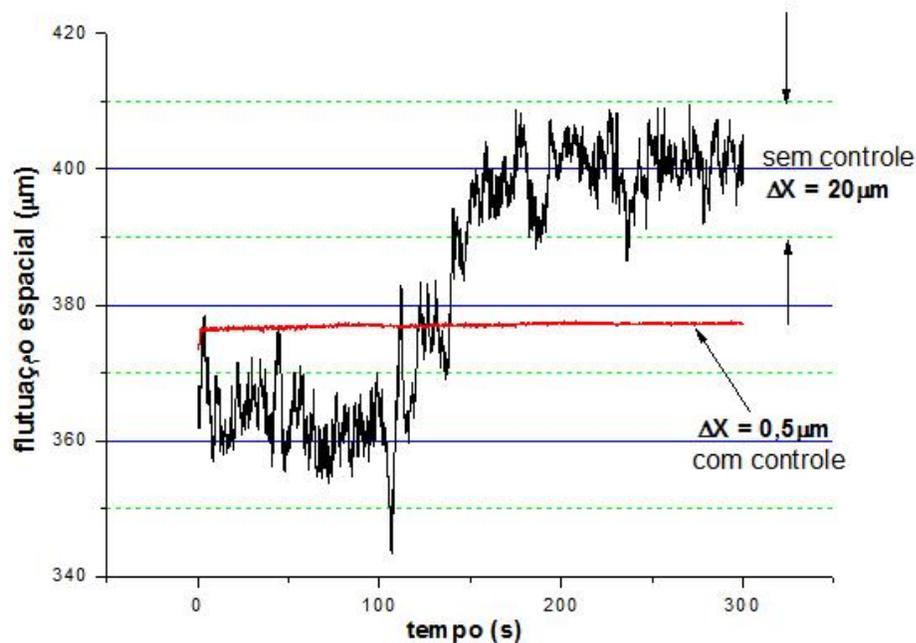
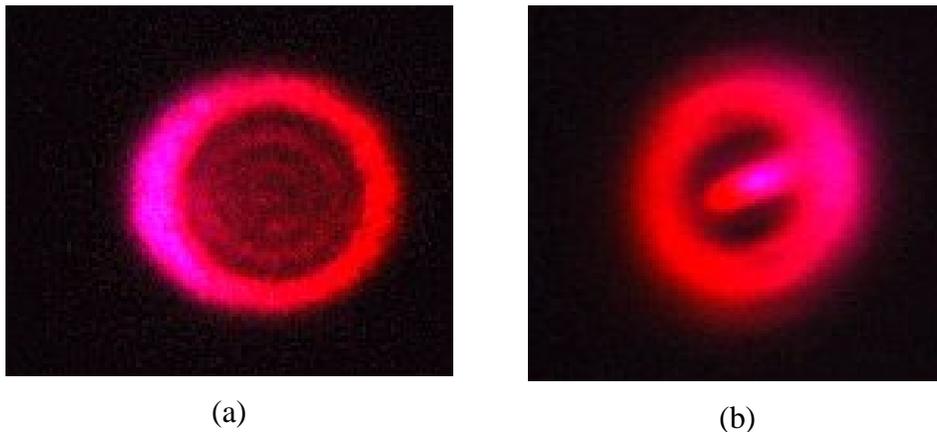


Figura 21: Flutuação espacial do feixe laser com e sem o controle do FSM.

### 4.3 Fator de Qualidade $M^2$

A necessidade da introdução de uma íris para diminuir o diâmetro do feixe faz surgir uma alteração no perfil espacial do feixe laser que precisou ser mais bem analisada. O feixe que inicialmente apresentava um perfil com distribuição espacial Gaussiana de intensidade, e ao passar por uma íris, tem este perfil grandemente alterado, apresentando-se como uma série de anéis concêntricos. A Figura 22 mostra a distribuição de intensidade do feixe em campo próximo após a passagem pela íris de 12 mm de diâmetro. É claro que este perfil é muito diferente da distribuição Gaussiana antes da íris, e em princípio seria inadequado para a utilização como uma ferramenta de usinagem de precisão. Contudo, esta figura se altera significativamente quando o feixe é focalizado; os anéis diminuem muito de intensidade e praticamente desaparecem, enquanto que no centro surge um pico pronunciado com uma distribuição muito próxima a de uma curva Gaussiana. Este fato é claramente observado na Figura 22(a) Esta figura corresponde ao mesmo feixe da Figura 22(b), com a diferença de que aqui é visto em “campo distante”, ou seja, próximo ao ponto de focalização. Vale aqui observar, que a figura de campo distante é mais convenientemente obtida no plano focal de uma lente positiva<sup>33</sup>.



*Figura 22 Distribuição de intensidade do feixe laser após passar por uma íris de 12 mm e expensor 2x invertido (a) 2,5 metros da íris; (b) 5,3 metros da íris. marcar a e b Foto Tirada do feixe vermelho sobre um papel branco.*

Da figura 21 nota-se claramente a mudança na forma do perfil do feixe laser, que começa a formar um pico central com a aproximação do campo distante.

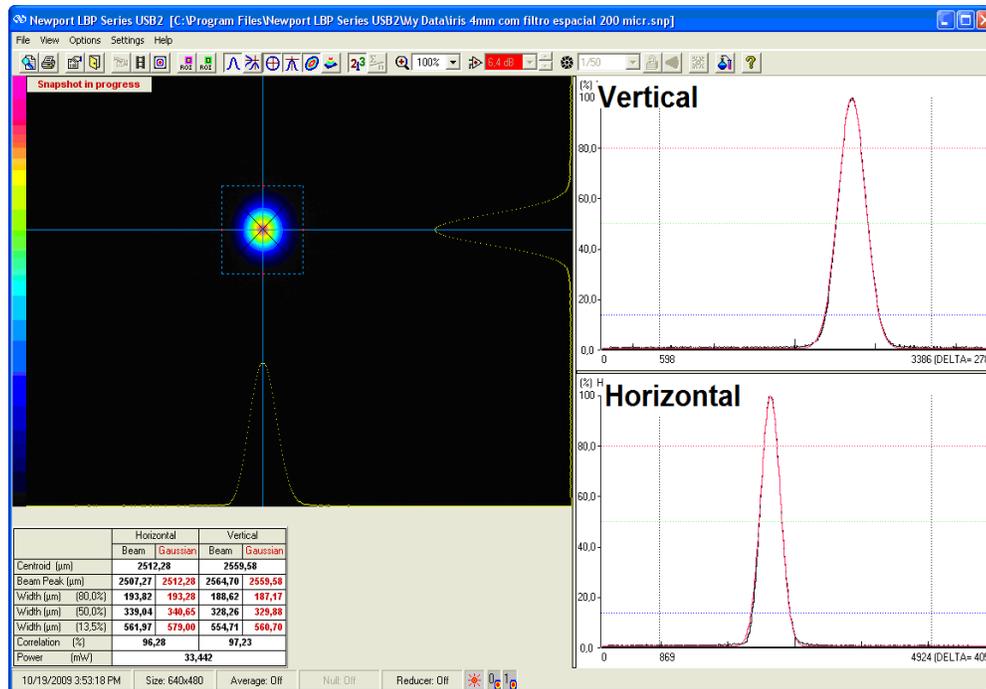


Figura 23 Imagem do feixe obtido na CCD e o perfil espacial correspondente nos eixos horizontal e vertical.

Inúmeros são os exemplos na literatura, onde uma íris é colocada no caminho óptico e o feixe resultante é tratado como sendo Gaussiano puro. O diâmetro do feixe focalizado é calculado baseado nesta suposição. Como sabemos que isto pode levar a um erro importante, como já apontado pela literatura<sup>34, 35</sup> tivemos o cuidado de estudar este problema analisando o comportamento do fator de qualidade  $M^2$ .

Os valores de  $M^2$  do feixe foram obtidos com o uso da

Eq.o 21, onde o seu diâmetro em campo distante foi medido em função da posição no seu eixo de propagação. Para isto foi utilizada uma lente convergente de comprimento focal longo de  $f = 500$  mm e uma câmera CCD (Newport modelo LBP Series Beam Profiler) Figura 23.

$$M^2 = \pi D_0^2 \left( \frac{\sqrt{\left(\frac{D_z}{D_0}\right)^2 - 1}}{4\lambda Z} \right) \quad \text{Eq.o 21}^{36}$$

Na Eq.o 21,  $D_0$  é o diâmetro mínimo medido;  $D_z$  é o diâmetro na posição  $Z$ , e  $Z$  é a distância entre o ponto medido e a posição de  $D_0$ . A Figura 24 mostra a variação do diâmetro do feixe laser, no ponto onde a intensidade é igual a  $e^{-2}$  da intensidade no ponto central.

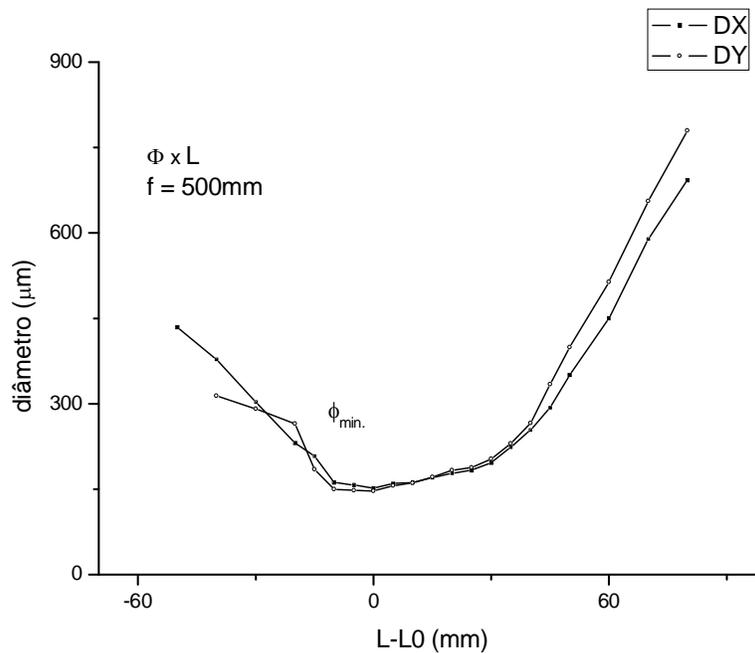


Figura 24 Diâmetro x Posição

Com os valores das relações do diâmetro pela posição, os valores correspondentes de  $M^2$  foram obtidos e plotados em um gráfico como visto a seguir.

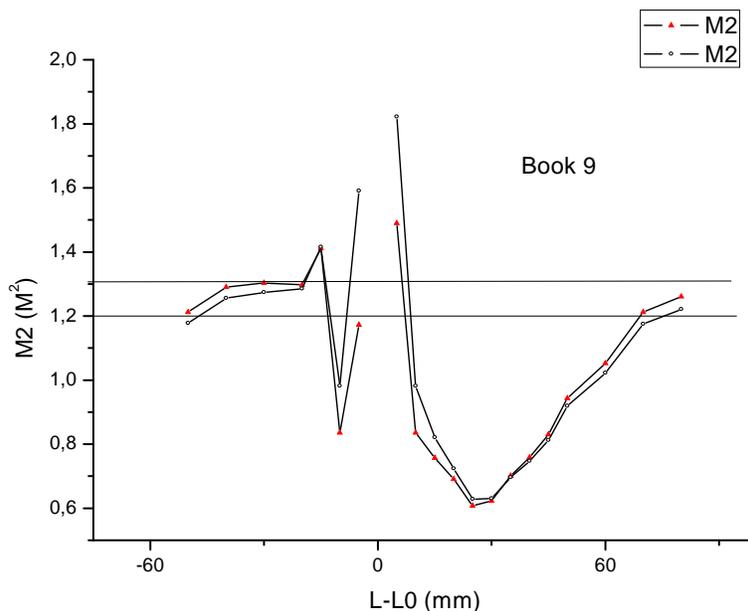


Figura 25 Gráfico de  $M2 \times l$

Apesar da aparência normal apresentada na evolução do diâmetro em função da propagação, fica evidente uma variação anormal para o fator  $M^2$ .

O valor exagerado próximo ao foco já é esperado e não deve ser levado em conta. O valor abaixo de 1.0 para pontos logo após o foco mostra uma variação do diâmetro menor que a esperada para um feixe Gaussiano. Como nenhum outro tipo de feixe pode ter um diâmetro menor que o feixe Gaussiano no foco, então fica evidente que alguma coisa está errada neste tipo de medida. Para explicar estes fatos podemos supor as seguintes hipóteses:

- O feixe não se comporta com o sendo Gaussiano.
- O método de medida não é o correto.
- A câmera utilizada não é confiável para os diâmetros próximos ao foco.

É claro também que duas ou todas as hipóteses podem ser verdadeiras simultaneamente. A solução para este problema não é trivial, e não será discutida aqui. Assim, o valor do diâmetro para o ponto focal utilizado para a medida da fluência não deve ser calculado com base no  $M^2$  obtido do gráfico acima. O que é feito, é utilizar

este valor de maneira preliminar, calculando-se  $F \times D^2$  e obtendo-se daí o valor “real” do diâmetro  $2\omega_0$  através do ajuste da relação

Eq. 17.

O valor de  $M^2$  utilizado então é aquele calculado para uma distância maior que o parâmetro de Rayleigh, que neste caso é de aproximadamente 90 mm. Do gráfico acima vemos que segundo este critério,  $M^2 \sim 1,25$ .

Para o amplificador Odin, o feixe era elíptico e o resultado foi:

$$M_x^2 = 2,6$$

$$M_y^2 = 1,4$$

#### 4.4 Limiares de Ablação

A determinação das regiões de processo de alta e baixa fluência possibilita a escolha de parâmetros para usinagem com ou sem efeitos térmicos. Para isto, a

Eq. 17 foi utilizada e um gráfico experimental da fluência  $F$  em função do quadrado do diâmetro dano foi obtido.

Com uma lente de focalização com comprimento focal de 38 mm uma série de danos foi obtida na superfície do material estudado. Isto foi feito com variação de energia, desde a máxima possível para o sistema, com diminuição constante até que nenhum dano superficial fosse observado. Este procedimento foi repetido cinco vezes para cada energia e o diâmetro de cada dano foi medido com a utilização de um microscópio óptico marca Leica com 500 vezes de aumento. Para cada dano provocado, o programa desenvolvido registra a energia correspondente; assim, para cada diâmetro medido existe uma fluência medida. O valor médio destes pontos foi então utilizado para a obtenção do gráfico de  $F \times D^2$ .

Para o cálculo da fluência, é necessário utilizar o valor do diâmetro  $\phi_{\text{foco}}$  do feixe laser no ponto focal (não o diâmetro do dano). O valor inicial deste diâmetro foi estimado pela expressão:

$$\phi_{\text{foco}} = 4M^2\lambda f / (\pi \cdot \phi_0)$$

Eq. 22

Onde  $\lambda$  é o comprimento de onda do laser,  $f$  o comprimento focal da lente utilizada e  $\phi_0$  o diâmetro do feixe laser ao incidir na lente de focalização.  $M^2$  é o fator de qualidade do feixe gaussiano.

Para um feixe incidente na lente de focalização com  $d_0 = 8\text{mm}$  temos:

$$\phi_{\text{foco}} = M^2 \cdot 4,8 \mu\text{m}$$

Para o amplificador Odin temos:

$$\phi_x = 12,5 \mu\text{m} \quad \text{e} \quad \phi_y = 6,7 \mu\text{m}$$

$$\Rightarrow \text{elipse de área } A = \pi \cdot ab \text{ ou } A = \pi \cdot 6,25 \times 3,35 \mu\text{m}^2$$

$$A_{\text{foco}}(f=38\text{mm}) = 65,7 \mu\text{m}^2$$

Para o amplificador Odin, com  $M^2 = 1,25$  temos:

$$\phi_{\text{foco}} = 6,0 \mu\text{m}$$

$$A_{\text{foco}}(f=38\text{mm}) = 28,3 \mu\text{m}^2$$

Como vimos, estes valores para o diâmetro do feixe no foco não são confiáveis. Desta maneira adotamos a mesma metodologia utilizada por Uteza<sup>37</sup>, ou seja, do gráfico  $F \times D^2$  da Eq. 17, obtido com a fluência calculada como acima, obtemos um valor de  $F_{\text{th}}$  provisório e um valor para  $2\omega_0$ . Este valor de raio obtido é então utilizado para recalculas as fluências experimentais e refazer o gráfico  $F \times D^2$ . Deste novo gráfico é obtido o valor definitivo de  $F_{\text{th}}$ .

#### 4.4.1 Limiar de Ablação para o Silício

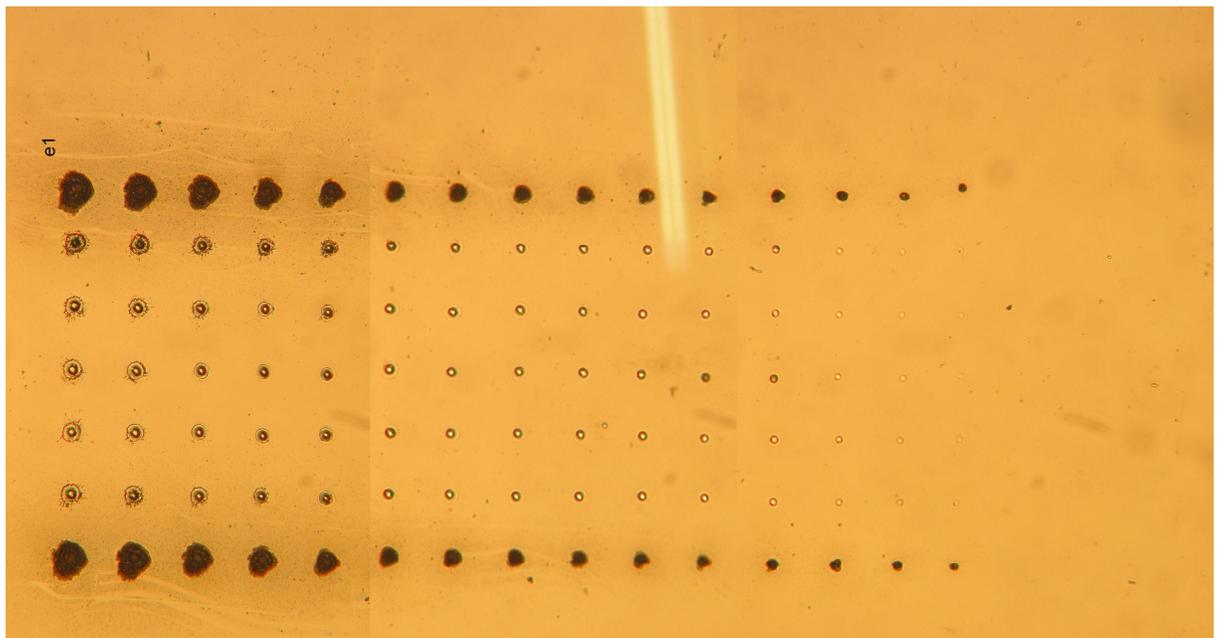
O silício foi escolhido como um dos materiais a ser estudado neste trabalho por ser um semiconductor e por ser muito utilizado na indústria, inclusive para a produção

de MEMS<sup>38</sup>. Além disso, diversos estudos sobre os mecanismos de ablação com pulsos curtos foram publicados sobre o silício, e estes dados podem ser utilizados para validação do nosso sistema e metodologia.

Muitos grupos também estudaram a microusinagem de diversos materiais, entre eles o silício, utilizando lasers de nano e picossegundo; contudo, este estudo com lasers de femtossegundos somente agora começa a aparecer na literatura.

Para os nossos experimentos, uma lâmina de Si cristalino com 0,2mm de espessura e polimento especular foi utilizada, tanto para obtenção do gráfico  $F \times D^2$  como para a microusinagem de canais.

Para o levantamento do limiar de dano, o feixe laser foi focalizado sobre a superfície do silício conforme descrito acima, e 15 conjuntos de pulsos com valores de energia crescentes foram obtidos, cada conjunto com cinco pulsos idênticos. A Figura 26 mostra uma fotografia dos danos feitos no silício.



*Figura 26 Foto das sequências de pulsos sobre o Silício. Energia constante para as colunas verticais e decrescente da esquerda para a direita. Os primeiros e últimos pulsos de cada coluna são utilizados como referencia.*

As fotos abaixo (Figura 27) mostram em maior detalhe alguns pontos obtidos em regimes de baixa e alta fluência.



*Figura 27 Fotos dos danos no Si com energias de  $36\mu\text{J}$ ;  $25\mu\text{J}$ ;  $18\mu\text{J}$ ;  $12\mu\text{J}$  e  $8\mu\text{J}$ .*

Para a execução da série de pulsos como visto na Figura 26, o programa de controle, deixava passar apenas um pulso pelo obturador e a cada pulso liberado sobre o silício, o valor da energia medido foi armazenado em um arquivo antes de movimentar a mesa até a próxima posição e liberar um novo pulso. Todos os valores de energia de cada pulso foram registrados pelo programa, e a medição do diâmetro do dano causado na superfície do silício foi feita com o auxílio do programa IMAGE (Figura 29) e das fotos tiradas em um microscópio óptico acoplado a uma câmera digital (Figura 28).

Para chegar a tais medidas, primeiramente é tirada uma foto de uma escala micrométrica (Figura 28 (b) ) e anotados os valores de ganho e ampliação utilizados para fazer a foto, e mantidos estes parâmetros sempre iguais em todas as fotos que serão feitas com o software que coletas as fotos do microscópio óptico (Figura 28 (c)).

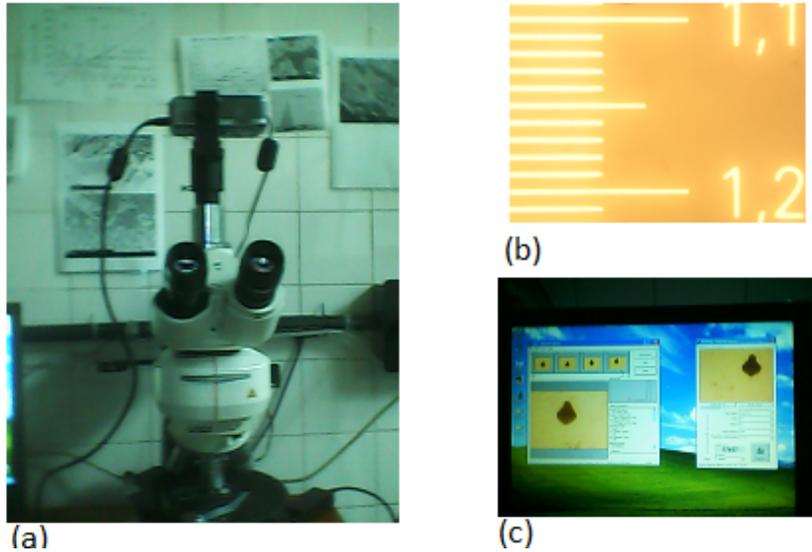


Figura 28(a) Microscópio ótico utilizado para fotografar os danos (b) Escala de referência (c) Software para captura das imagens.

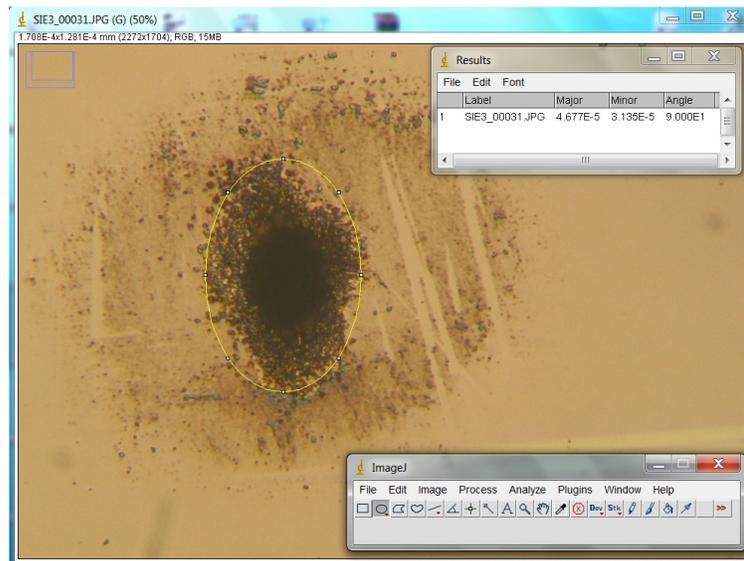


Figura 29 Software IMAGE, utilizado para fazer as medidas das dimensões dos danos.

Como as vezes a figura formada pelo dano não é exatamente um círculo, optamos por fazer uma media entre a maior e a menor diagonal da figura, esta informação é fornecida automaticamente pelo programa IMAGE.

Uma vez coletados todos os dados, o gráfico  $F \times D^2$  foi traçado. Ele é representado em uma escala logarítmica e mostrado na figura a seguir:

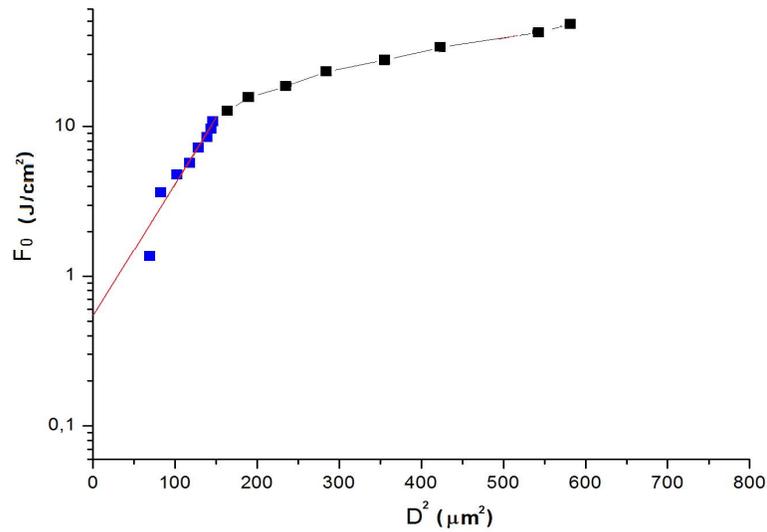


Figura 30- Gráfico  $F_0 \times D^2$ , limiar de ablação do Silício.

O gráfico apresentado foi obtido após uma correção no diâmetro  $\phi_{foco}$  do feixe focalizado. Isto é feito após um primeiro ajuste da curva  $F \times D^2$ , cuja inclinação forneceu o valor de  $\omega_0 = 5,0 \mu\text{m}$  (o raio do feixe no foco). Este valor é então utilizado para recalculer a fluência utilizada no experimento. O programa Origin 8.0 foi utilizado para a obtenção das curvas e o ajuste foi feito segundo a equação:

Equação 23

$$F_0 = F_{th} \exp\left(\frac{D^2}{2\omega_0^2}\right)$$

O comportamento exponencial da dependência de F com  $D^2$  é evidente no gráfico e a reta de ajuste intercepta o eixo Y no valor correspondente ao da fluência de limiar  $F_{th}$ . O valor experimental assim obtido para o Si foi de:

$$F_{th} = 0,55 \text{ J.cm}^{-2}$$

Este valor é bastante próximo daqueles obtidos em outros laboratórios<sup>38</sup> e serve como validação para o nosso sistema.

O comportamento da curva demonstra com clareza o comportamento da interação de pulsos curtos com a matéria conforme descrito no capítulo 2. Duas regiões distintas são observadas, ambas com um comportamento puramente exponencial entre a fluência e o quadrado do dano formado. A inclinação da reta é menos acentuada para a região de alta fluência, ou seja, nesta região, um aumento de  $F$  acarreta em um aumento muito mais significativo no diâmetro do dano que na região de baixa fluência. Assim, a eficiência na extração de material é maior para alta fluência, e maior aumento no diâmetro também é seguido por um maior aumento na profundidade (capítulo 2). Isto, como visto, é explicado pelo surgimento de efeitos térmicos, que são significativos nesta região. Aqui, a energia adquirida pelos elétrons é transferida para a rede cristalina em forma de calor e contribui para o aumento do dano. Na outra região, de baixa fluência, esta energia é levada para fora da região de interação na forma de energia cinética dos elétrons e íons expelidos do material.

É claro que, embora com menor eficiência na extração de material, a região de baixa fluência leva a um processo muito mais limpo e preciso, sem formação de material ressolidificado (rebarbas) e com precisão dimensional muito maior. Infelizmente, mesmo nesta região, o processo não é perfeito, e a formação de defeitos também ocorre para baixa fluência, inclusive para fluências abaixo do limiar. É este efeito que será explorado na seção a seguir.

#### **4.4.1.1 Efeito do acúmulo de pulsos**

A obtenção de microestruturas geralmente é obtida com a “usinagem” do material, ou seja, a retirada de um volume de material de maneira controlada. Isto, frequentemente não pode ser feito com um único pulso laser para o qual se escolhe a energia correspondente à profundidade pretendida. Normalmente, em usinagem a laser com pulsos longos, usa-se a máxima energia disponível (ou a necessária para se obter a profundidade pretendida) e a taxa de repetição é limitada pela potência média máxima do sistema. Para o caso de pulsos ultracurtos temos que decidir se esta energia máxima pode ser utilizada, visto que o gráfico da Figura 30 mostra duas regiões distintas para a resposta do material em função da fluência. Se o efeito térmico (e outros) não é importante, a energia máxima pode ser utilizada e o processo será mais eficiente;

contudo, se estes efeitos devem ser evitados, então o processo deve ser executado na região de baixa fluência, porém com o máximo de energia possível para esta condição ( $\sim 10 \text{ J.cm}^{-2}$  para o gráfico da Figura 30).

Infelizmente, estes cuidados não são suficientes para o caso de usinagem com pulsos sobrepostos. Nestes casos, como visto anteriormente, a Figura 30 muda de maneira significativa, e o valor de  $F_{th}$  para baixa fluência depende do número  $N$  de pulsos sobrepostos. Assim, um estudo foi feito com o intuito de se obter a dependência de  $F_{th}$  com  $N$ , e usar estes resultados quando da usinagem dos materiais aqui estudados. Para fazer tal estudo, utilizou-se novamente o programa de controle, pois ele permite a contagem e registro da energia para qualquer número de pulsos programado. Caso isso fosse feito manualmente, seria necessário a contagem dos pulsos, para um número pequeno e o controle de tempo de abertura do *shutter*, para um número de pulsos maior.

Assim sendo, cada vez que a amostra é movimentada para uma nova posição, além do comando de liberação do laser, temos em anexo a informação de quantos pulsos deverão ser liberados, conforme podemos ver no trecho do programa de movimentação da mesa, na Figura 31.

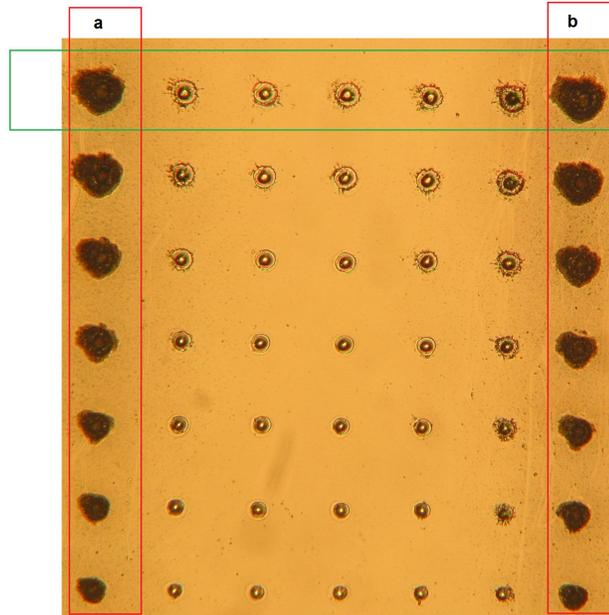
```
N11 G58 F16
N12 G0 X-0.2 G58 F16
N13 G0 X-0.2 G58 F16
N14 G0 X-0.2 G58 F16
N15 G0 X-0.2 G58 F16
N16 G0 X-0.2 G58 F16
N17 G0 X1 Y0.25
N18 G58 F32
N19 G0 X-0.2 G58 F32
N20 G0 X-0.2 G58 F32
N21 G0 X-0.2 G58 F32
N22 G0 X-0.2 G58 F32
N23 G0 X-0.2 G58 F32
N24 G0 X1 Y0.25
```

No de Pulsos

*Figura 31- Sequência para marcação de pulsos em número variável.*

Este recurso permitiu que fossem feitos cerca de 9000 pulsos de cada energia escolhida sobre a superfície em estudo, sem a interferência humana. Ao final temos as marcas distribuídas de acordo com a energia e o número de pulsos. Na Figura 32 , vemos uma serie com uma determinada energia e que cada linha corresponde a uma

seqüência de pulsos 1024,512,128,32,16,4,2,1 de cima para baixo. Em cada linha temos a repetição 5 vezes de um mesmo numero de pulsos, e as coluna a e b são marcações para orientação visual durante a medida.



*Figura 32- Distribuição dos pulsos sobrepostos sobre o silício*

Repetimos o processo de medida através do software IMAGE, e levantamos a informação do diâmetro em função da energia e do numero de pulsos.

Normalizando os dados para obtermos a Fluência em  $J/cm^2$  e o diâmetro em  $\mu m$ , pudemos plotar os gráficos a seguir, onde se apresentam os limiares encontrados para cada quantidade de pulsos.

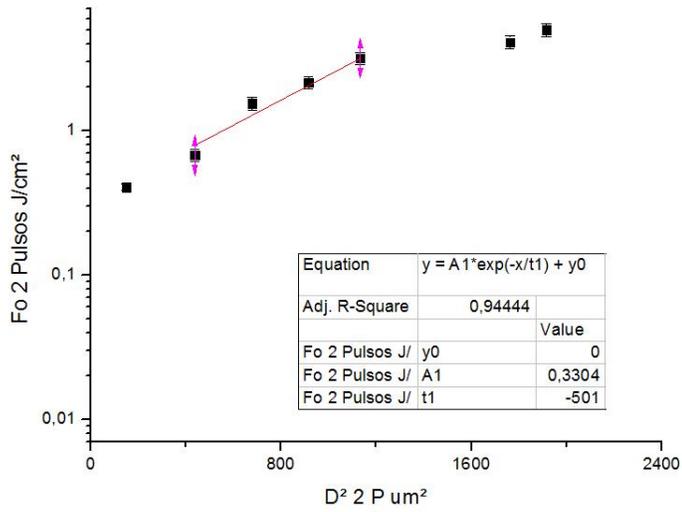


Figura 33- Gráfico  $F_0 \times D^2$  - 2 Pulsos

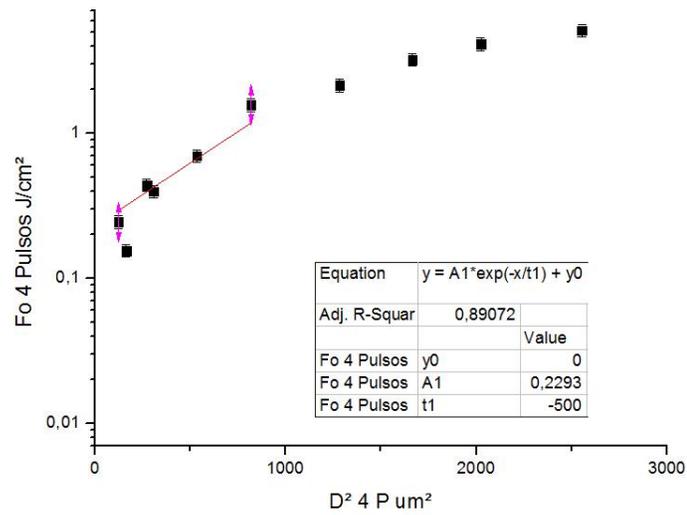


Figura 34- Gráfico  $F_0 \times D^2$  - 4 Pulsos

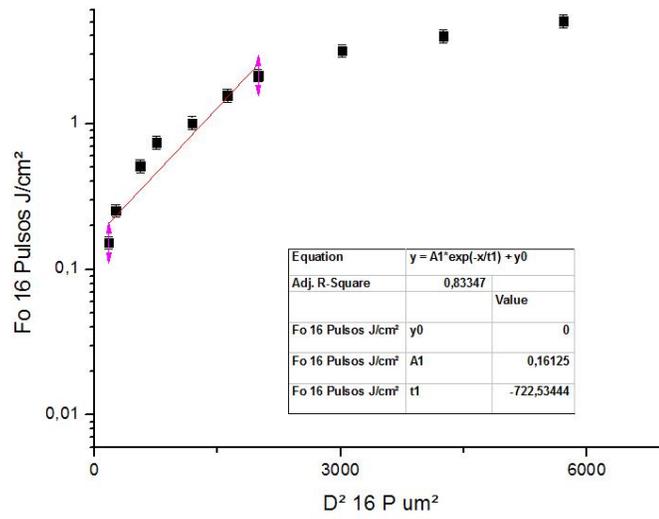


Figura 35- Gráfico  $F_0$  x  $D^2$  - 16 Pulsos

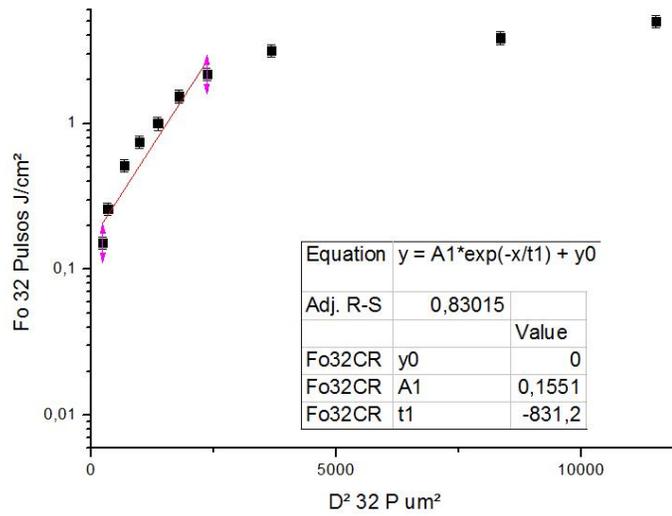


Figura 36- Gráfico  $F_0$  x  $D^2$  - 32 Pulsos

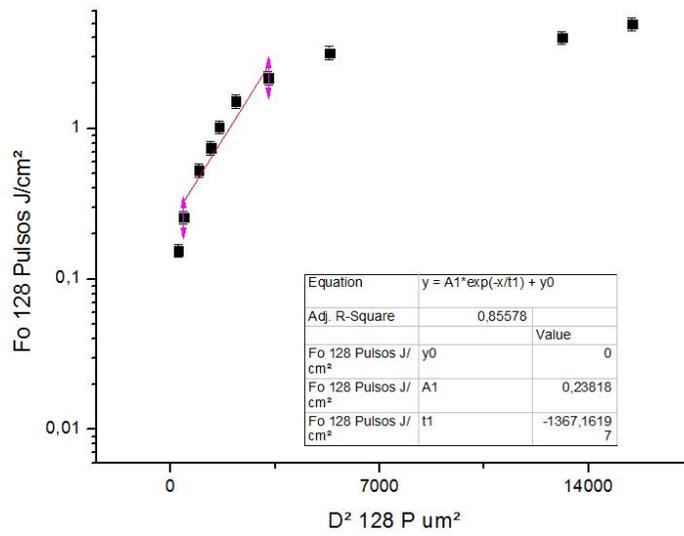


Figura 37- Gráfico  $F_0 \times D^2$  - 128 Pulsos

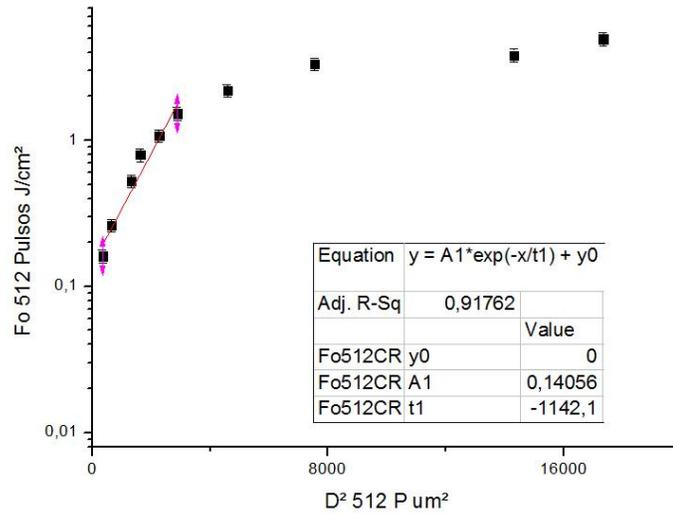


Figura 38- Gráfico  $F_0 \times D^2$  - 512 Pulsos

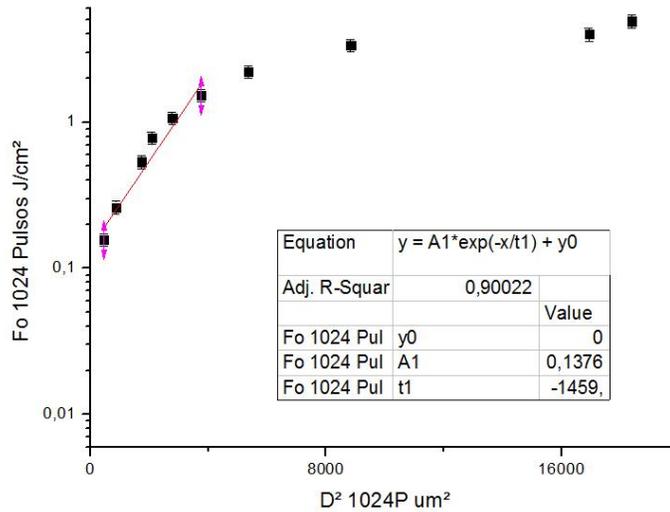


Figura 39- Gráfico  $F_0 \times D^2$  - 1024 Pulsos

Destes gráficos podemos tirar as seguintes relações entre o numero de pulsos, o limiar de ablação e o diâmetro do feixe.

Tabela 1- Resultados obtidos para sobreposição de pulsos.

Nº de Pulsos sobrepostos	2	4	16	32	128	512	1024
$F_{th}$ (J.cm <sup>-2</sup> )	0,330	0,229	0,161	0,155	0,141	0,141	0,138

Se traçarmos o gráfico de  $F_0 \times$  Numero N de Pulsos, poderemos observar que embora o diâmetro aumente consideravelmente, devido à sobreposição de pulsos e à possível trepidação (vibração) do feixe sobre o local de incidência, quando atingimos certo valor, mesmo dobrando-se o numero de pulsos, não existe um aumento significativo no diâmetro nem no limiar de ablação.

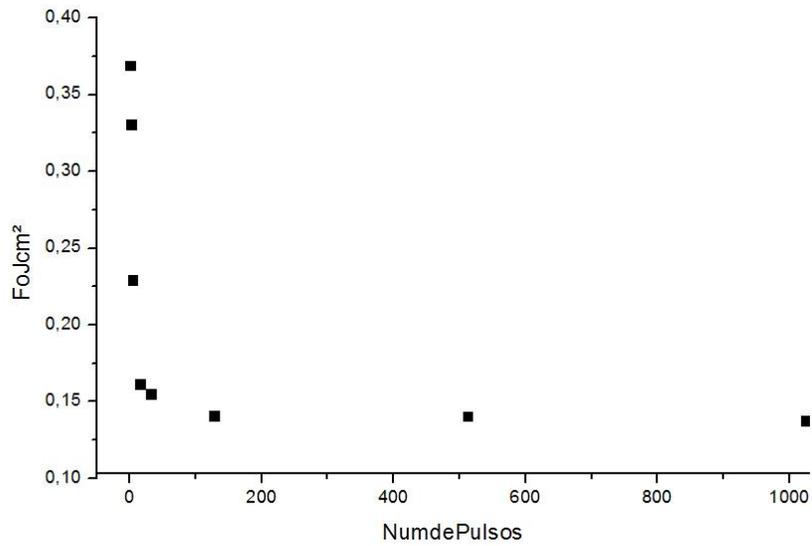


Figura 40 Gráfico da Fluência de ablação em função do número de pulsos no silício.

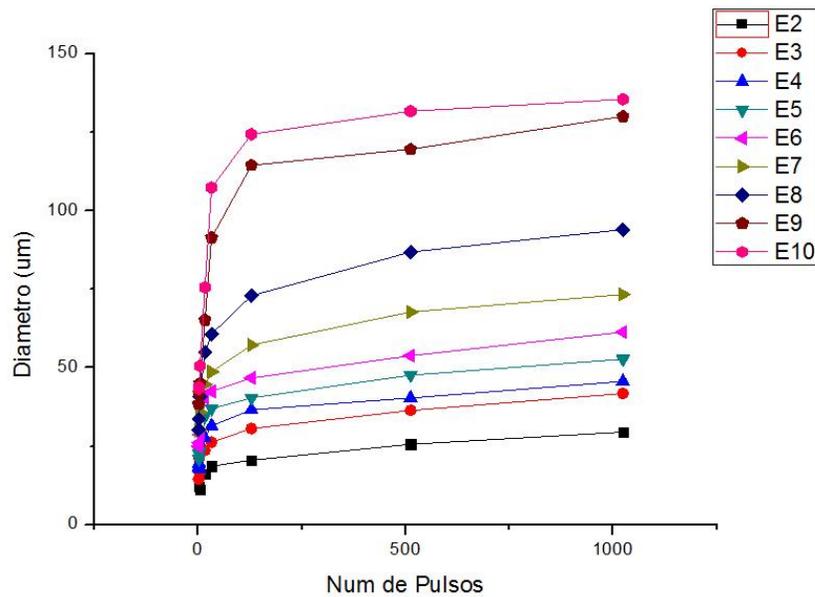


Figura 41 Gráfico do diâmetro pelo número de pulsos para o silício.

Os gráficos das figuras 39 e 40 mostram as relações entre os diâmetros dos danos (em função da energia) e a fluência de limiar para várias sobreposições de pulsos. Vemos claramente que os diâmetros dos danos aumentam com a energia e com o

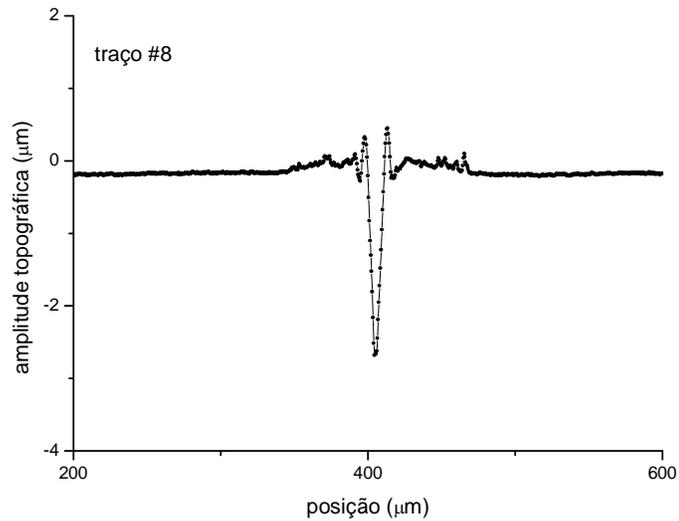
número de pulsos; o primeiro efeito é obvio, mas o segundo nem tanto. O efeito causado pela sobreposição de pulsos em D indica um efeito de memória do material, que de alguma maneira é sensibilizado pelos pulsos anteriores, ou seja, demonstra um efeito de incubação. Este efeito é muito pronunciado para sobreposição de até 32 pulsos e se estabiliza para sobreposição infinita de pulsos. Isto significa que depois deste número de pulsos, o diâmetro do dano e o limiar de ablação permanecem quase constantes. No caso de uma usinagem, isto implica que, a partir deste ponto, o diâmetro da ferramenta e a quantidade de material extraído por pulso não precisam mais ser corrigidos a cada camada usinada. É possível agora projetar a quantidade de material extraído e a consequente profundidade usinada a cada “passe de desbaste”.

É claro que outros fenômenos ainda surgem em um processo de usinagem, e que não se pode obter uma profundidade tão grande quanto se queira. Razão de aspecto muito grande (usinagem estreita e profunda) dificulta o processo, na medida em que se torna mais difícil a extração de material do fundo da “cavidade” usinada e também onde reflexões nas paredes tendem a torná-las inclinadas resultando em um corte em “V”.

#### **4.4.1.2 Usinagem de Traços no Si**

Com o laser operando a 1 kHz e a amostra sendo deslocada a uma velocidade de 30 mm/min. (0.5mm/s), diversos traços foram feitos sobre a superfície da lâmina de silício. A energia foi modificada para cada traço, a lente utilizada foi de comprimento focal de  $f = 38\text{mm}$ , e a polarização do feixe laser paralela à direção de deslocamento.

O perfil transversal de cada traço foi obtido com a utilização de um rugosímetro da marca Kosaka, modelo profilometer 1200 Alfa, com raio da ponta de  $2,0\ \mu\text{m}$ . Um resultado típico é mostrado na Figura 42.



*Figura 42 Perfil transversal de um traço em silício, fornecido por um rugosímetro.*

Os perfis destes traços assim obtidos foram então utilizados para a medida de volume extraído e das eficiências em função dos parâmetros variados. Para a velocidade e taxa de repetição utilizada, temos um total de 2.000 pulsos por mm de material irradiado. Assim, temos uma média de  $0,5 \mu\text{m}/\text{pulso}$ , no sentido do movimento; ou seja, para efeito de cálculos podemos considerar que cada  $0,5 \mu\text{m}$  do traço foi afetado por um único pulso. Portanto, o volume extraído por pulso é igual à área transversal do traço multiplicado por  $0,5 \mu\text{m}$ .

Os dados obtidos para cada traço são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 Relação entre material extraído e energia por pulso para traços em silício.

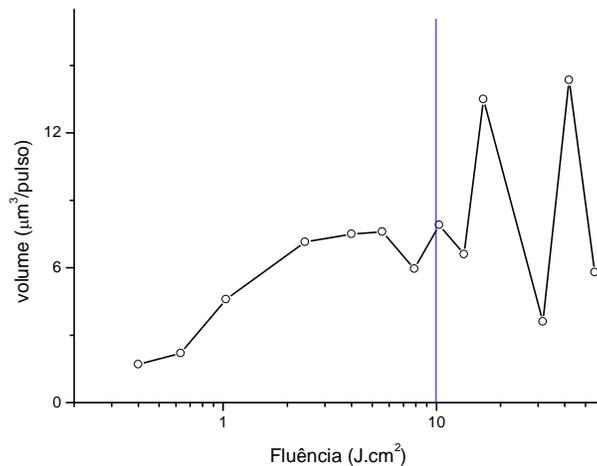
<b>V = 30 mm/min N=22</b>		<b>Profundidade</b>	<b>Largura</b>	<b>Volume</b>	<b>Eficiência</b>	<b>Fluência</b>
<b>Traço</b>	<b>E<sub>foco</sub> (<math>\mu</math>J)</b>	<b><math>\mu</math>m</b>	<b><math>\mu</math>m</b>	<b><math>\mu</math>m<sup>3</sup>/pulso</b>	<b><math>\epsilon \equiv \mu</math>m<sup>3</sup>/<math>\mu</math>J</b>	<b>J.cm<sup>-2</sup></b>
1	52,5	3,3	7	5,8	0,11048	55,3
2	39,8	5,22	11	14,35	0,36055	41,9
3	30,0	2,6	5,5	3,6	0,12	31,6
4	15,8	4,5	12	13,5	0,85443	16,7
5	12,8	3,1	8,5	6,6	0,51562	13,5
6	9,8	3,5	9	7,9	0,80612	10,3
7	7,5	2,8	8,5	5,95	0,79333	7,9
8	5,3	2,53	12	7,6	1,43396	5,6
9	3,8	1,15	13	7,5	1,97368	4,0
10	2,3	1,10	13	7,15	3,1087	2,4
11	0,98	0,84	11	4,6	4,69388	1,0
12	0,60	0,55	8	2,2	3,66667	0,6
13	0,38	0,44	7,8	1,7	4,47368	0,4
14	0,23	***	***			0,2

Diâmetro do feixe de 11  $\mu$ m considerado para os cálculos da tabela 2.

A eficiência de extração de material em função da fluência é mostrada na Figura 43 e na Figura 44. Destes gráficos fica claro que:

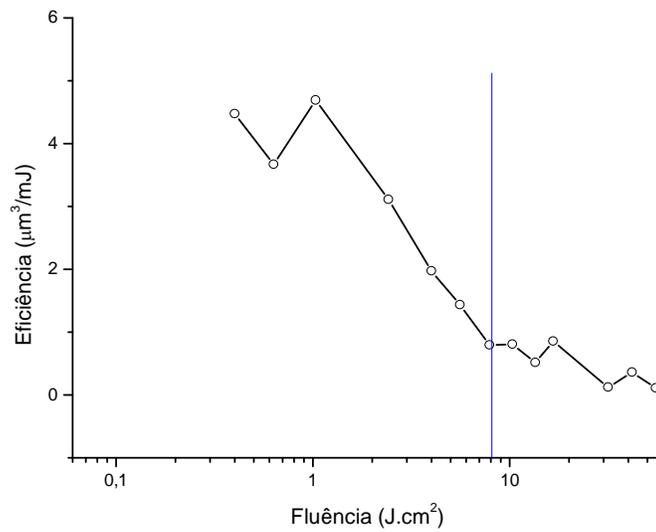
A extração de material aumenta quase que exponencialmente com a fluência até aproximadamente 4 J.cm<sup>-2</sup>, atingindo um valor praticamente constante até ~10 J.cm<sup>-2</sup>. Valores mais altos de fluência, além de não aumentarem a eficiência do processo de extração de material, ainda causam grande deposição de material ressolidificado na

borda do corte. A grande flutuação na parte final do gráfico é causada por este material.



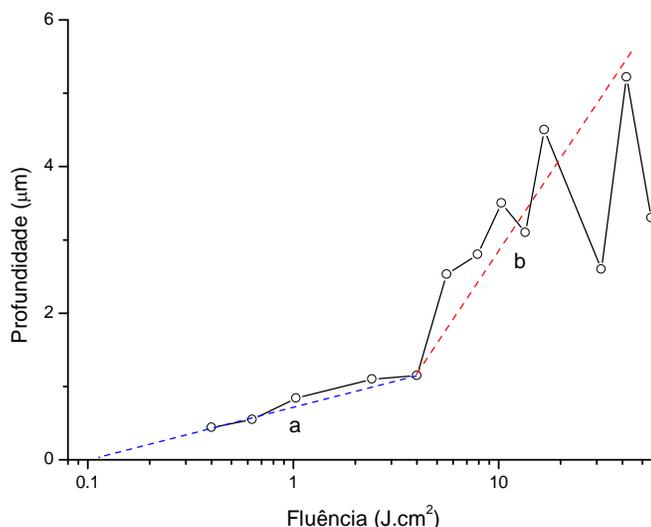
*Figura 43 Gráfico do volume do material retirado por pulso em função da Fluência.*

Ao contrário do volume extraído, a eficiência energética para extração de material cai exponencialmente com a fluência, aparentemente mostrando duas regiões distintas. Depois de uma queda muito rápida para fluência até  $10 \text{ J.cm}^{-2}$ , a queda diminui de ritmo e chega a praticamente zero para valores maiores que  $40 \text{ J.cm}^{-2}$ .



*Figura 44 Gráfico que permite ver o comportamento da eficiência do laser em função da Fluência.*

Um gráfico (Figura 45) da profundidade dos sulcos com a fluência mostra uma relação exponencial com duas regiões distintas: de alta e de baixa fluência. Acreditamos que esta relação está muito próxima àquela obtida para superposição de múltiplos pulsos, mas obviamente é influenciada pelos fatores geométricos introduzidos pelo particular processo.



*Figura 45 Gráfico onde podemos observar as duas regiões de fluência, baixa fluência (a) e alta fluência (b).*

Uma análise do gráfico da Figura 45 mostra claramente uma redução muito acentuada do limiar de ablação; mostra também uma redução do valor de  $F$  para o ponto de inflexão da curva onde começa a região de alta fluência. Nestas condições de velocidade (e sobreposição de pulsos), a região de baixa fluência apresenta  $F_{th} \sim 0,15 \text{ J.cm}^{-2}$ , enquanto a região de alta fluência tem seu início para  $F > 6 \text{ J.cm}^{-2}$  aproximadamente, e um limiar extrapolado  $F_{th} \sim 1,5 \text{ J.cm}^{-2}$ . Estes resultados estão de acordo com a expectativa da existência de um fator de incubação quando da incidência de pulsos sobrepostos; e o valor de  $F_{th} \sim 0,15$  para  $N = 22$  está em perfeito acordo com aqueles da tabela 1.

Novos traços foram feitos com a variação não só da energia (e fluência), mas também da velocidade. Assim, uma relação mais direta com o número de pulsos sobrepostos pode ser obtida. Aqui também foi utilizada a lente de  $f=38\text{mm}$  e taxa de repetição de  $1\text{kHz}$ .

O número de pulsos sobrepostos foi obtido usando o valor de  $\omega_0 = 5,5 \mu\text{m}$  conforme obtido do gráfico de  $F_{th} \times D^2$  para o silício quando da utilização do

amplificador Odin. Este valor é ligeiramente diferente daquele obtido com o amplificador Femtopower, que é de  $\omega_0 = 5,0 \mu\text{m}$ . O cálculo foi feito usando-se o tempo  $t_\phi$  necessário para o feixe percorrer a distância de  $\phi_{\text{foco}}=11,0 \mu\text{m}$  e o número N de pulsos sobrepostos é igual ao número de pulsos emitidos neste tempo. Assim:

$$N = f \cdot t_\phi = (f \cdot \phi_{\text{foco}}) \cdot V^{-1}$$

*Tabela 3*

<b>Velocidade</b>	<b>mm/min</b>	<b>N</b>
<b>V1</b>	1,2	550
<b>V2</b>	2,4	275
<b>V3</b>	7,2	91,7
<b>V4</b>	14	47,1
<b>V5</b>	72	9,2
<b>V6</b>	144	4,6

Os quadros a seguir mostram as relações medidas das características geométricas dos traços com as diferentes condições de usinagem utilizadas. As direções X e Y são perpendiculares entre si e o vetor de polarização do campo elétrico é paralelo à direção X.

Tabela 4

<b>E=1<math>\mu</math>J F=1,1 J.cm- 2</b>		<b>Profundidade</b>	<b>Largura</b>	<b>Volume</b>	<b>Eficiência</b>
<b>Traço</b>	<b>direção</b>	$\mu$ m	$\mu$ m	$\mu$ m <sup>3</sup> /pulso	$\epsilon \equiv \mu$ m <sup>3</sup> / $\mu$ J
<b>V1</b>	<b>Y</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>
<b>V2</b>		<b>8</b>	<b>9</b>	<b>1,44</b>	<b>1,44</b>
<b>V3</b>		<b>2</b>	<b>8</b>	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>
<b>V4</b>		<b>2</b>	<b>8</b>	<b>1,86667</b>	<b>1,86667</b>
<b>V5</b>		<b>0</b>	<b>8</b>	--	--
<b>V6</b>		<b>0</b>	<b>8</b>	--	--
				--	--
<b>V1</b>	<b>X</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>0,64</b>	<b>0,64</b>
<b>V2</b>		<b>8</b>	<b>8</b>	<b>1,28</b>	<b>1,28</b>
<b>V3</b>		<b>2</b>	<b>7</b>	<b>0,84</b>	<b>0,84</b>
<b>V4</b>		<b>2</b>	<b>6</b>	<b>1,4</b>	<b>1,4</b>
<b>V5</b>		<b>0</b>	<b>8</b>	--	--
<b>V6</b>		<b>0</b>	<b>8</b>	--	--
		<b>Não medido</b>			

Tabela 5

<b>E=3<math>\mu</math>J F=3,2 J.cm<sup>-2</sup></b>		<b>Profundidade</b>	<b>Largura</b>	<b>Volume</b>	<b>Eficiência</b>
<b>Traço</b>		$\mu$ m	$\mu$ m	$\mu$ m <sup>3</sup> /pulso	$\epsilon \equiv \mu$ m <sup>3</sup> / $\mu$ J
<b>V1</b>	<b>Y</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>1,2</b>	<b>0,4</b>
<b>V2</b>		<b>7</b>	<b>10</b>	<b>1,4</b>	<b>0,46667</b>
<b>V3</b>		<b>3</b>	<b>12</b>	<b>2,16</b>	<b>0,72</b>
<b>V4</b>		<b>3</b>	<b>12</b>	<b>4,2</b>	<b>1,4</b>
<b>V5</b>		<b>0</b>	<b>22</b>	--	--
<b>V6</b>		<b>0</b>	<b>18</b>	--	--
				--	--
<b>V1</b>	<b>X</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>0,96</b>	<b>0,32</b>
<b>V2</b>		<b>6</b>	<b>9</b>	<b>1,08</b>	<b>0,36</b>
<b>V3</b>		<b>4</b>	<b>8</b>	<b>1,92</b>	<b>0,64</b>
<b>V4</b>		<b>4</b>	<b>8</b>	<b>3,73333</b>	<b>1,24444</b>
<b>V5</b>		<b>1</b>	<b>6</b>	<b>3,6</b>	<b>1,2</b>
<b>V6</b>		<b>0</b>	<b>12</b>	--	--

Tabela 6

<b>E=6 <math>\mu\text{J}</math> F=6,3 <math>\text{J.cm}^{-2}</math></b>		<b>Profundidade</b>	<b>Largura</b>	<b>volume</b>	<b>Eficiência</b>
<b>Traço</b>		$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}^3/\text{pulso}$	$\epsilon \equiv \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$
<b>V1</b>	<b>Y</b>	<b>13</b>	<b>22</b>	<b>2,86</b>	<b>0,47667</b>
<b>V2</b>		<b>8</b>	<b>20</b>	<b>3,2</b>	<b>0,53333</b>
<b>V3</b>		<b>3</b>	<b>12</b>	<b>2,16</b>	<b>0,36</b>
<b>V4</b>		<b>7</b>	<b>12</b>	<b>9,8</b>	<b>1,63333</b>
<b>V5</b>		<b>2</b>	<b>8</b>	<b>9,6</b>	<b>1,6</b>
<b>V6</b>		<b>1</b>	<b>8</b>	<b>9,6</b>	<b>1,6</b>
				--	--
<b>V1</b>	<b>X</b>	<b>10</b>	<b>24</b>	<b>2,4</b>	<b>0,4</b>
<b>V2</b>		<b>5</b>	<b>22</b>	<b>2,2</b>	<b>0,36667</b>
<b>V3</b>		<b>3</b>	<b>16</b>	<b>2,88</b>	<b>0,48</b>
<b>V4</b>		<b>3</b>	<b>16</b>	<b>5,6</b>	<b>0,93333</b>
<b>V5</b>		<b>1</b>	<b>6</b>	<b>3,6</b>	<b>0,6</b>
<b>V6</b>		<b>1</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>1</b>
				<b>2,86</b>	<b>0,47667</b>

Tabela 7

<b>E=10 <math>\mu\text{J}</math> F=10,5 <math>\text{J.cm}^{-2}</math></b>		<b>Profundidade</b>	<b>Largura</b>	<b>Volume</b>	<b>Eficiência</b>
<b>Traço</b>		$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}^3/\text{pulso}$	$\epsilon \equiv \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$
<b>V1</b>	<b>Y</b>	<b>20</b>	<b>32</b>	<b>6,4</b>	<b>0,64</b>
<b>V2</b>		<b>10</b>	<b>28</b>	<b>5,6</b>	<b>0,56</b>
<b>V3</b>		<b>8</b>	<b>20</b>	<b>9,6</b>	<b>0,96</b>
<b>V4</b>		<b>7</b>	<b>18</b>	<b>14,7</b>	<b>1,47</b>
<b>V5</b>		<b>3</b>	<b>12</b>	<b>21,6</b>	<b>2,16</b>
<b>V6</b>		<b>2</b>	<b>6</b>	<b>14,4</b>	<b>1,44</b>
				--	--
<b>V1</b>	<b>X</b>	<b>18</b>	<b>32</b>	<b>5,76</b>	<b>0,576</b>
<b>V2</b>		<b>7</b>	<b>28</b>	<b>3,92</b>	<b>0,392</b>
<b>V3</b>		<b>4</b>	<b>24</b>	<b>5,76</b>	<b>0,576</b>
<b>V4</b>		<b>2</b>	<b>24</b>	<b>5,6</b>	<b>0,56</b>
<b>V5</b>		<b>2</b>	<b>6</b>	<b>7,2</b>	<b>0,72</b>
<b>V6</b>		<b>2</b>	<b>6</b>	<b>14,4</b>	<b>1,44</b>

Tabela 8

<b>E=15 <math>\mu\text{J}</math> F=15,8 <math>\text{J.cm}^{-2}</math></b>		<b>Profundidade</b>	<b>Largura</b>	<b>Volume</b>	<b>Eficiência</b>
<b>Traço</b>		$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}^3/\text{pulso}$	$\epsilon \equiv \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$
<b>V1</b>	<b>Y</b>	<b>17</b>	<b>32</b>	<b>5,44</b>	<b>0,36267</b>
<b>V2</b>		<b>14</b>	<b>34</b>	<b>9,52</b>	<b>0,63467</b>
<b>V3</b>		<b>10</b>	<b>28</b>	<b>16,8</b>	<b>1,12</b>
<b>V4</b>		<b>6</b>	<b>26</b>	<b>18,2</b>	<b>1,21333</b>
<b>V5</b>		<b>2</b>	<b>12</b>	<b>14,4</b>	<b>0,96</b>
<b>V6</b>		<b>1,5</b>	<b>12</b>	<b>21,6</b>	<b>1,44</b>
				--	--
<b>V1</b>	<b>X</b>	<b>21</b>	<b>36</b>	<b>7,56</b>	<b>0,504</b>
<b>V2</b>		<b>18</b>	<b>36</b>	<b>12,96</b>	<b>0,864</b>
<b>V3</b>		<b>5</b>	<b>30</b>	<b>9</b>	<b>0,6</b>
<b>V4</b>		<b>X</b>	<b>24</b>	<b>--</b>	<b>--</b>
<b>V5</b>		<b>5</b>	<b>20</b>	<b>60</b>	<b>4</b>
<b>V6</b>		<b>2</b>	<b>16</b>	<b>38,4</b>	<b>2,56</b>

Tabela 9

<b>E=20 <math>\mu\text{J}</math> F=21,1 <math>\text{J.cm}^{-2}</math></b>		<b>Profundidade</b>	<b>Largura</b>	<b>Volume</b>	<b>Eficiência</b>
<b>Traço</b>		$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}^3/\text{pulso}$	$\epsilon \equiv \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$
<b>V1</b>	<b>Y</b>	<b>23</b>	<b>40</b>	<b>9,2</b>	<b>0,46</b>
<b>V2</b>		<b>16</b>	<b>40</b>	<b>12,8</b>	<b>0,64</b>
<b>V3</b>		<b>12</b>	<b>30</b>	<b>21,6</b>	<b>1,08</b>
<b>V4</b>		<b>9</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>1,05</b>
<b>V5</b>		<b>3</b>	<b>14</b>	<b>25,2</b>	<b>1,26</b>
<b>V6</b>		<b>3</b>	<b>12</b>	<b>43,2</b>	<b>2,16</b>
				--	--
<b>V1</b>	<b>X</b>	<b>25</b>	<b>36</b>	<b>9</b>	<b>0,45</b>
<b>V2</b>		<b>20</b>	<b>38</b>	<b>15,2</b>	<b>0,76</b>
<b>V3</b>		<b>8</b>	<b>32</b>	<b>15,36</b>	<b>0,768</b>
<b>V4</b>		<b>4</b>	<b>30</b>	<b>14</b>	<b>0,7</b>
<b>V5</b>		<b>7</b>	<b>10</b>	<b>42</b>	<b>2,1</b>
<b>V6</b>		<b>3</b>	<b>8</b>	<b>28,8</b>	<b>1,44</b>

Tabela 10

<b>E=50 <math>\mu\text{J}</math> F=52,6 <math>\text{J.cm}^{-2}</math></b>		<b>Profundidade</b>	<b>Largura</b>	<b>Volume</b>	<b>Eficiência</b>
<b>Traço</b>		<b><math>\mu\text{m}</math></b>	<b><math>\mu\text{m}</math></b>	<b><math>\mu\text{m}^3/\text{pulso}</math></b>	<b><math>\epsilon \equiv \mu\text{m}^3/\mu\text{J}</math></b>
<b>V1</b>	<b>Y</b>	<b>40</b>	<b>56</b>	<b>22,4</b>	<b>0,448</b>
<b>V2</b>		<b>26</b>	<b>52</b>	<b>27,04</b>	<b>0,5408</b>
<b>V3</b>		<b>16</b>	<b>50</b>	<b>48</b>	<b>0,96</b>
<b>V4</b>		<b>21</b>	<b>48</b>	<b>117,6</b>	<b>2,352</b>
<b>V5</b>		<b>6</b>	<b>36</b>	<b>129,6</b>	<b>2,592</b>
<b>V6</b>		<b>4</b>	<b>20</b>	<b>96</b>	<b>1,92</b>
<b>V1</b>	<b>X</b>	<b>Não medido</b>	<b>Não medido</b>		
<b>V2</b>					
<b>V3</b>					
<b>V4</b>					
<b>V5</b>					
<b>V6</b>					

Com as relações obtidas acima, alguns gráficos foram feitos para verificar a influência dos parâmetros de usinagem com as características do traço usinado.

Do gráfico da Figura 46, vemos uma relação quase que exponencial (menos para a maior energia) entre a velocidade e a profundidade dos sulcos; e quanto maior é a velocidade, menor é a profundidade e mais eficiente é o processo. Isto se explica pela diminuição do número de pulsos sobrepostos com o aumento da velocidade. Um possível aumento da eficiência devido a fenômenos de incubação (com o aumento de N) não chega a compensar as dificuldades de usinagem de uma estrutura de alta razão de aspecto. Isto mostra que a usinagem de sulcos profundos é sempre um processo pouco eficiente, e um aumento da velocidade não pode ser compensado por um aumento de energia por pulso. Mesmo com energia alta, uma velocidade baixa deve ser utilizada para a obtenção de um sulco profundo.

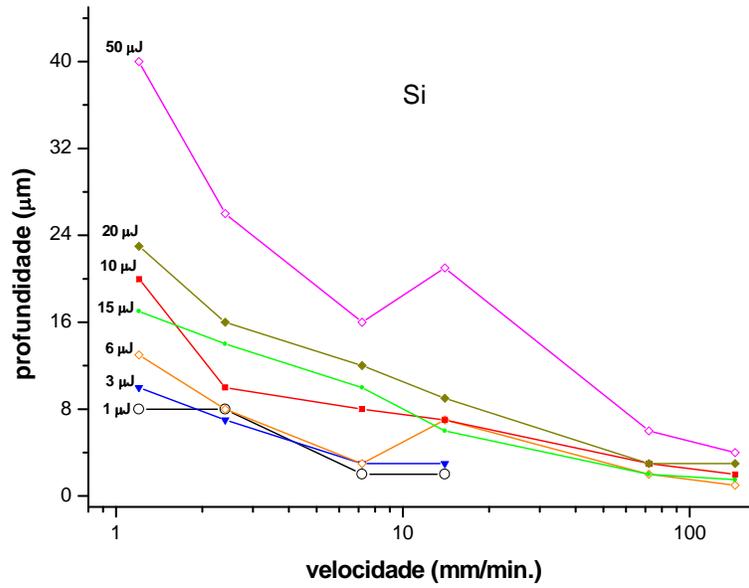


Figura 46 Relação Profundidade x Velocidade, para cada uma das sete energias estudadas.

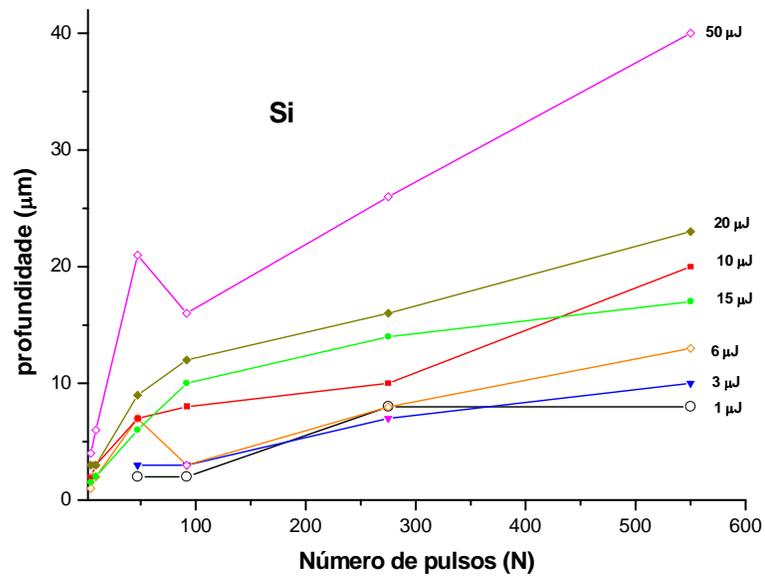


Figura 47 Relação da profundidade com a energia e com o número de pulsos.

A profundidade aumenta com a energia e com o número de pulsos (Figura 47). Para um número pequeno de pulsos, abaixo de 100, a inclinação da reta é maior; a partir daí a eficiência diminui e a inclinação é menor tendo uma relação linear entre o número de pulsos e a profundidade. Para energias maiores, a eficiência é maior, com a inclinação das retas sendo mais acentuada para energias maiores.

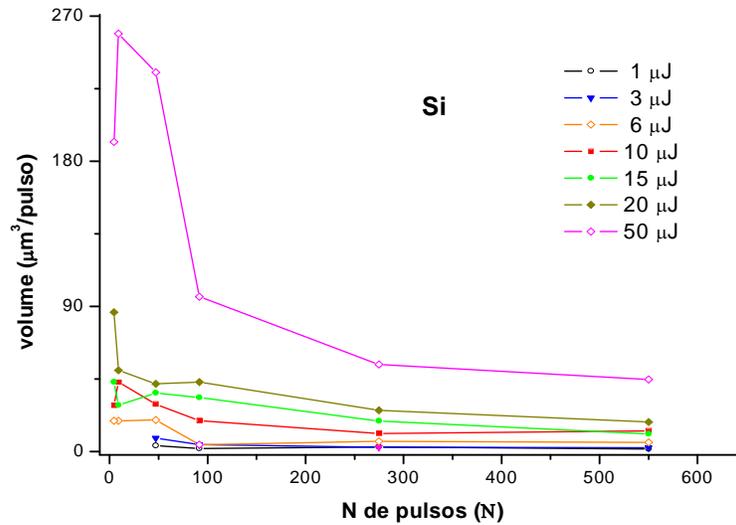


Figura 48 Volume extraído do silício por pulso, em função ao numero de pulsos.

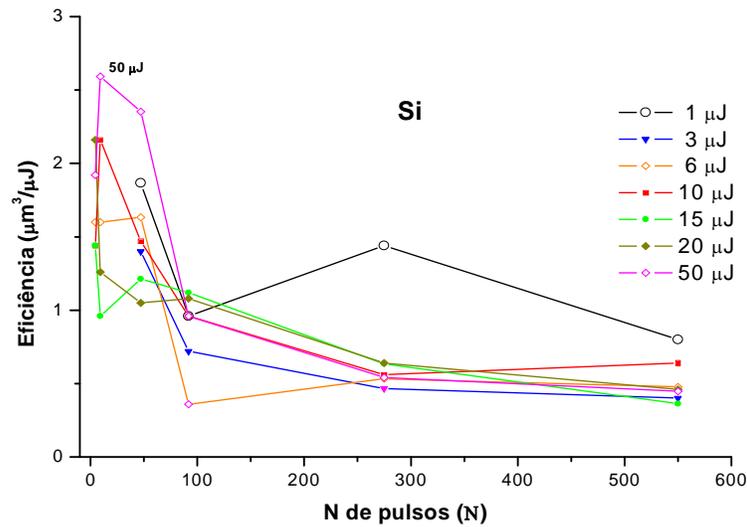


Figura 49 Eficiência (volume extraído por energia) em função do numero de pulsos, para cada energia estudada.

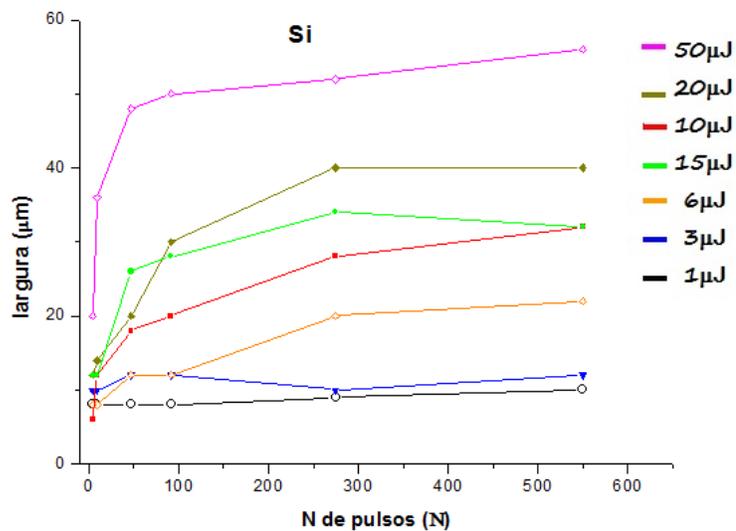


Figura 50 Largura do traço em função do numero de pulsos, para cada valor de energia utilizado.

Do gráfico da Figura 50 fica claro que energias maiores levam a larguras maiores, e que esta largura aumenta com N até haver uma saturação. Este resultado está de acordo com os resultados obtidos na tabela 1, e mostra que o efeito de



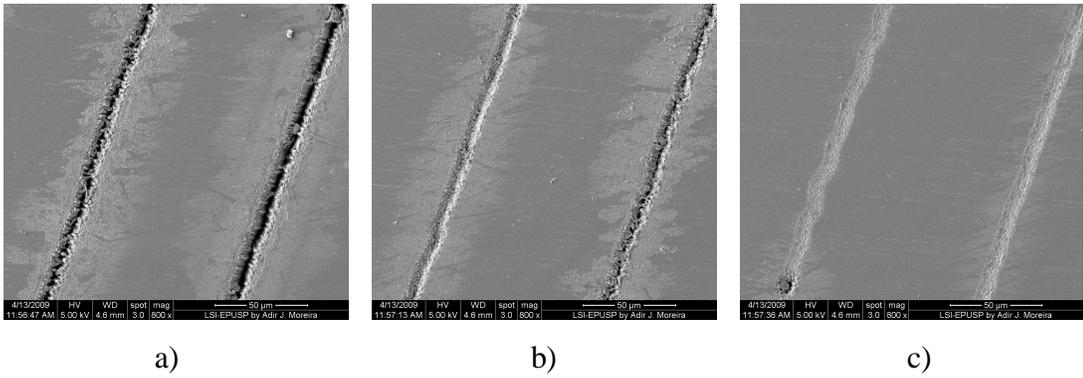


Figura 52  $E = 3 \mu\text{J}$  a)v1v2, b)v3v4, c)v5v6;

$$\vec{E} \perp \vec{V}$$

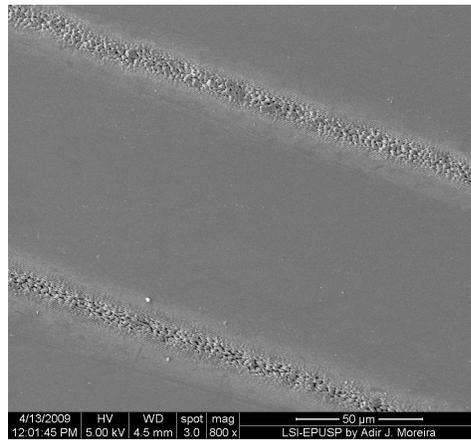


Figura 53  $E = 3 \mu\text{J}$  v5v6

$$\vec{E} \perp \vec{V}$$

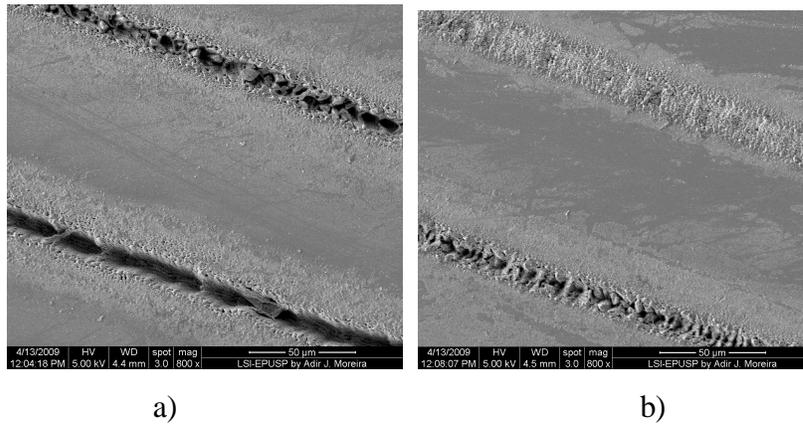
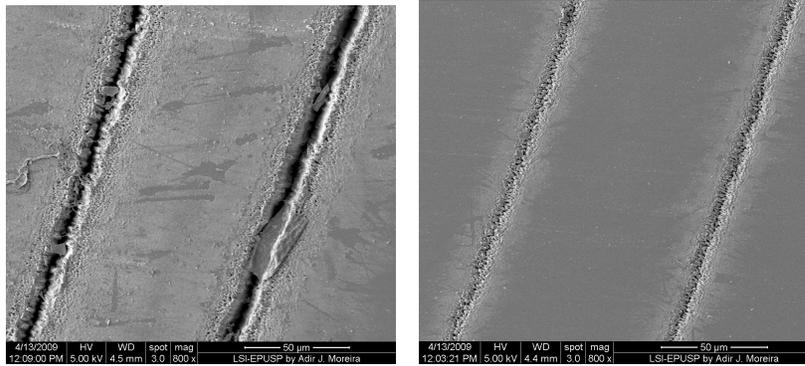


Figura 54  $E = 6 \mu\text{J}$  a)v3v4, b)v5v6

$$\vec{E} // \vec{V}$$



a)

b)

Figura 55  $E = 6 \mu\text{J}$  a)v3v4, b)v5v6

$$\vec{E} // \vec{V}$$

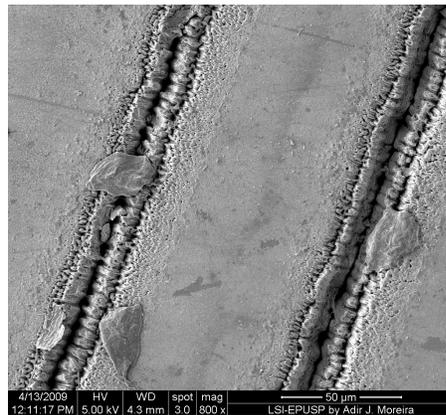
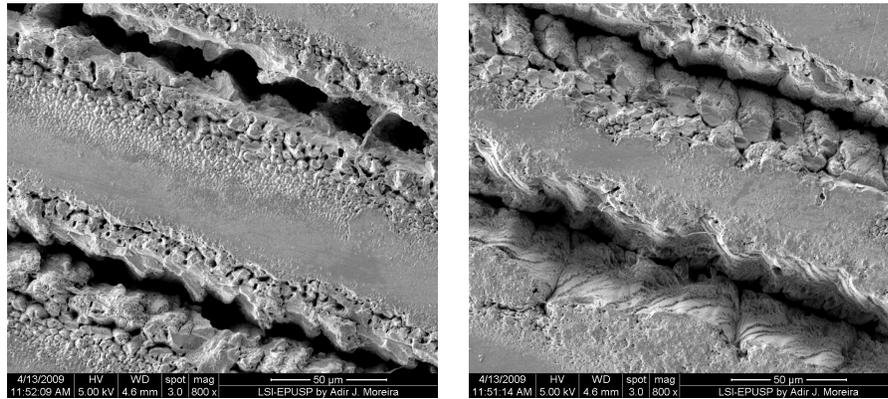


Figura 56  $E = 20 \mu\text{J}$  v5v6

$$\vec{E} \perp \vec{V}$$

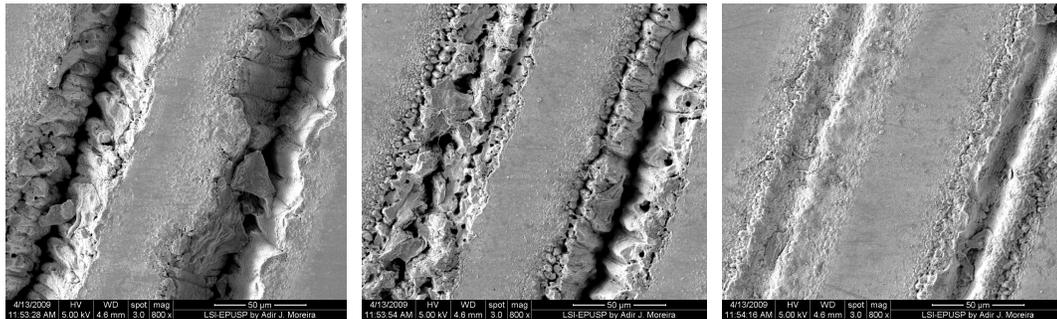


a)

b)

Figura 57  $E = 20 \mu\text{J}$  a) v1v2, b) v3v4

$$\vec{E} // \vec{V}$$



a)

b)

c)

Figura 58  $E = 50 \mu\text{J}$  a) v1v2, b) v3v4, c) v5v6

$$\vec{E} \perp \vec{V}$$

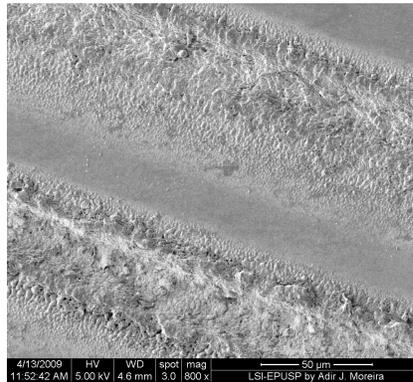


Figura 59 E = 50 μJ v5v6

$$\vec{E} // \vec{V}$$

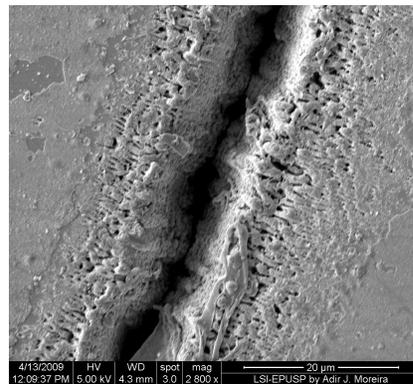
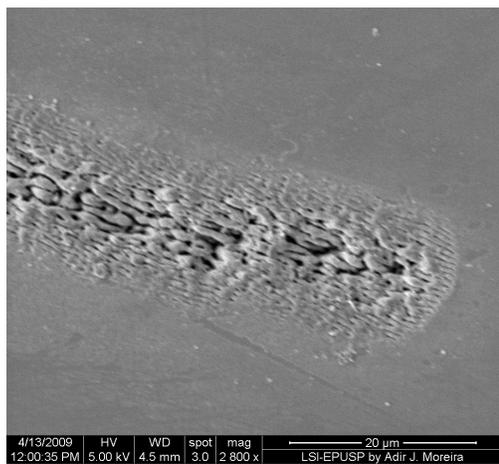
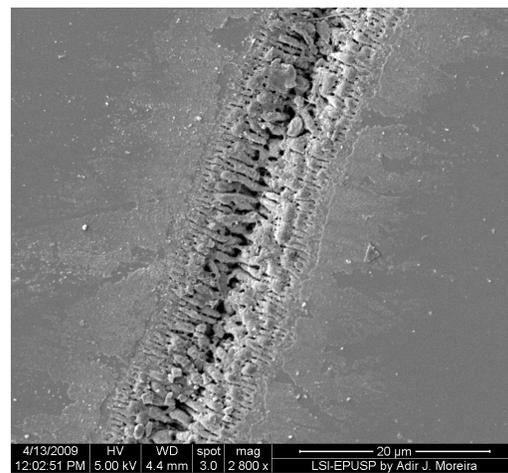


Figura 60 E = 6 μJ v3



a)



b)

Figura 61 E = 3 μJ a) E// v4 e b) E ⊥ v4

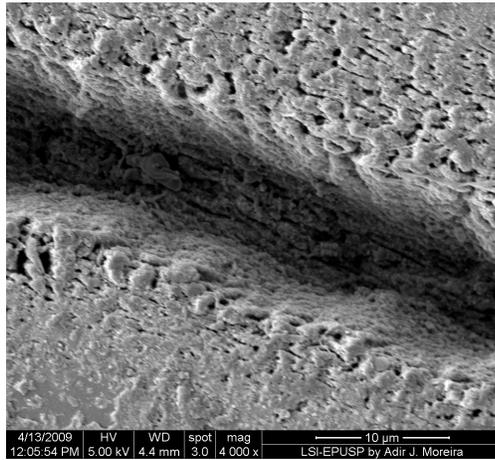


Figura 62 E = 6 μJ v3

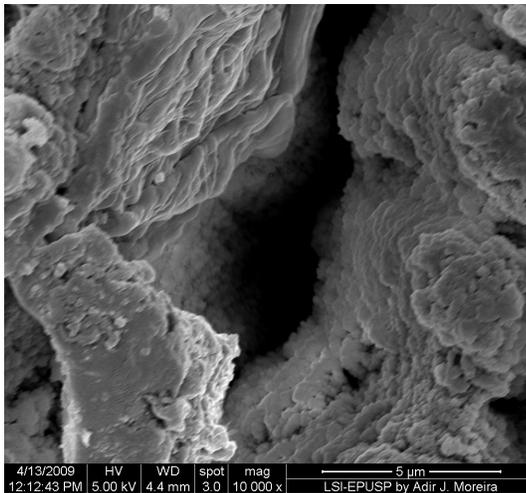


Figura 63 E = 20 μJ v5v6

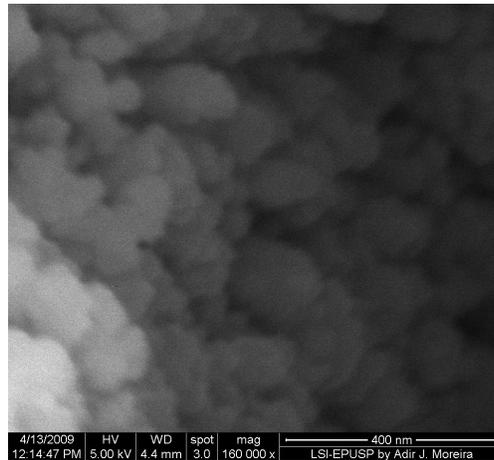


Figura 64  $E = 20 \mu\text{J}$  x v5v6

Em todos os traços são observadas estruturas periódicas do tipo NC-LIPSSs. Estas estruturas aparecem tanto dentro do traço como próximo à sua borda; ou seja, mesmo para um caso onde a borda é bem definida, a parte externa do feixe gaussiano que não possui intensidade para remover o material, ainda é capaz de provocar o aparecimento destas estruturas na parte exterior do sulco. Este efeito pode ter sido aumentado para este particular arranjo experimental devido à presença de anéis ao redor do feixe central gaussiano.

Assim como em pulsos estáticos, as estruturas dos NC-LIPSSs também são perpendiculares à direção do campo elétrico  $E$  e são aprofundadas com a diminuição da velocidade (e aumento de  $N$ ).

Estruturas NC-LIPSSs paralelas à direção do sulco resultam em uma qualidade geométrica e de acabamento muito melhor do que para estruturas perpendiculares. Para uma usinagem complexa, envolvendo diversas direções de usinagem, a escolha mais adequada talvez fosse a de um feixe com polarização circular. Isto pode ser facilmente obtido com a adição de um lâmina de quarto de onda ( $\lambda/4$ ) no caminho óptico do feixe laser.

#### 4.4.1.3 Análise da Fluência

Para baixas fluências, 1,1 e 3,2  $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ , temos apenas a formação de NC-LIPSSs, com penetração extremamente baixa para baixa sobreposição de pulsos (altas velocidades). Com o aumento de  $N$ , o contraste na profundidade das estruturas

aumenta e material começa a ser ejetado em maior quantidade. Parte deste material permanece dentro do sulco que se apresenta como pedaços soltos e também ainda presos no seu interior. O sulco apresenta pouca definição de borda e alta conicidade (Figura 51 a).

O aumento da fluência para  $6,3 \text{ J.cm}^{-2}$  (Figura 54 e Figura 55) ainda não é suficiente para retirar material de dentro do sulco para a maior velocidade ( $N=4,6$ ), mas começa esta retirada para uma sobreposição de 9,2 pulsos (v5). As estruturas já estão muito profundas e começa a haver a retirada de material com a desintegração dos NC-LIPSSs. Estas estruturas se aglutinam formando “grãos” retangulares maiores com o comprimento maior ainda com direção perpendicular à da polarização. Estes grãos e a separação entre eles começam a aumentar com o aumento de  $N$ ; a separação é cada vez maior e o número destas estruturas começa a diminuir. Para  $N= 47$  (v4) ainda existem muitas destas estruturas dentro do sulco, mas para  $N = 92$  (v3) elas quase não existem e o interior do traço está bem limpo. Para velocidades mais baixas, a maior sobreposição de pulsos começa a degradar a borda do sulco e a torna-lo mais cônico. A forma espacial do feixe, com anéis ao redor do feixe central, parece decisivo para isto.

Fluências altas, de 21,1 e  $52,6 \text{ J.cm}^{-2}$  (Figura 56 e Figura 59) mostram claramente fusão das paredes do sulco e uma menor definição das bordas, especialmente para  $N$  pequeno. Mesmo para energia de  $50 \mu\text{J}$ , é necessário um número grande de pulsos para se obter uma boa penetração.

Deste conjunto de experimentos, a melhor condição encontrada para a obtenção de um bom traço é vista na Figura 62; abaixo estão os parâmetros para este caso:

$$E = 6 \mu\text{J}$$

$$V = 7,2 \text{ mm/min}$$

$$N = 92$$

$$F = 6,3 \text{ J.cm}^{-2}$$

Estas condições mostram que o valor de fluência de  $6,3 \text{ J.cm}^{-2}$  está bem abaixo do valor de  $F$  para o qual se inicia o regime de alta fluência para pulso único

( $\sim 10 \text{ J.cm}^{-2}$ ). Isto mostra que o efeito de incubação não só diminui o valor do limiar de ablação, mas também diminui a fluência para a qual o regime de alta fluência é iniciado. O número de pulsos sobrepostos ( $N=92$ ), também corresponde ao ponto de inflexão da curva no gráfico da Figura 40; ou seja, o ponto para o qual o acúmulo de defeitos já está saturado.

Com o intuito de obter uma estrutura com dimensões maiores e controladas, quatro traços foram feitos com deslocamento lateral de  $3\mu\text{m}$ ; este processo foi repetido 20 vezes sobre si mesmo. Os parâmetros de processo utilizados e o resultado são mostrados a seguir.

Diâmetro do feixe:  $\sim 15 \mu\text{m}$

Energia por pulso:  $10 \mu\text{J}$

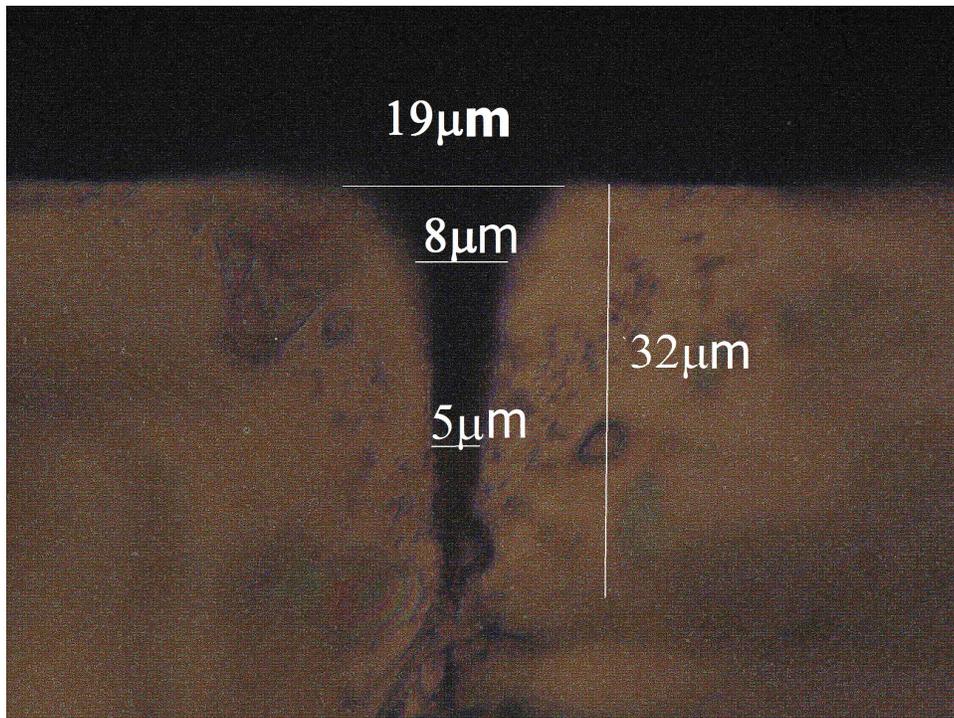
Taxa de repetição:  $1 \text{ kHz}$

Velocidade:  $10 \text{ mm/min}$ .

Número de passagens sobrepostas: 20

Deslocamento lateral:  $4 \times 3\mu\text{m}$

Taxa de sobreposição:  $N = 90$  para cada traço



*Figura 65 Seção transversal de um sulco sobre o silício*

Obviamente, o resultado não foi o esperado, com o traço apresentando-se extremamente cônico desde próximo à superfície. Este fato, juntamente com a dimensão muito pequena (menor que o diâmetro do feixe) para a parte inferior do sulco, sugere um fenômeno de guiamento do feixe, com reflexões nas paredes da peça usinada.

Ainda numa tentativa de aumentar a razão de aspecto dos traços, a energia foi diminuída para 1  $\mu\text{J}$ , o que resulta numa largura de  $\sim 10 \mu\text{m}$  para velocidade de 1,2mm/min. Nesta condição, o feixe laser foi repassado diversas vezes sobre o mesmo caminho, resultando em uma sobreposição maior de pulsos sem diminuir a velocidade. Isto foi necessário, pois para uma velocidade menor que 1 mm/min., ocorre uma instabilidade na movimentação dos motores de passo. Os resultados obtidos são mostrados na tabela a seguir:

Tabela 11

Traço	Número de pulsos N	Largura ( $\mu\text{m}$ )	Profundidade ( $\mu\text{m}$ )
1	550	8	7
2	1100	12	9 – 10
3	1650	12	10 - 12
4	2200	12	10 - 12
5	2750	12	10 - 12
6	3300	12	10 - 12
7	3850	12	10 - 12
8	5500	14	10 - 12

Destes resultados observa-se que um aumento do número de pulsos sobrepostos (equivalente a uma diminuição da velocidade) em um mesmo ponto, não resulta em um aumento de extração de material.

A

Tabela 11 mostra um aumento da profundidade e largura dos traços com a diminuição da velocidade, mas estes aumentos tendem a uma saturação para N entre 550 e 1.100 e não é possível o aumento da razão de aspecto além deste nível.

#### 4.4.2 Limiar de Ablação para o Molibdênio

O metal puro de molibdênio apresenta um alto ponto de fusão, de 2.623 °C, e um dos mais baixos coeficientes de expansão térmica entre os metais comercialmente utilizados<sup>39</sup>. Sua capacidade de suportar temperaturas extremas sem expansão significativa ou amolecimento, o torna útil em aplicações que envolvem calor intenso, como em partes de aviões, contatos elétricos, motores e filamentos. Raros são os artigos que utilizam Mo puro em estudos com laser de fs; alguns poucos fazem estes estudos com o Mo na forma de óxido ( $\text{MoO}_3$ ), utilizado como cobertura de outros metais. Por estes motivos, escolhemos este material como o metal a ser estudado.

Uma lâmina de molibdênio metálico com 0,2mm de espessura e polimento especular foi utilizada para obtenção do gráfico  $F \times D^2$  com o mesmo arranjo utilizado para o Si. O mesmo procedimento já descrito foi utilizado para a obtenção da fluência de limiar.

A Figura 66 mostra um exemplo das marcas feitas no molibdênio com vários valores de energia, e através destas medidas, pudemos traçar o gráfico da Figura 67.

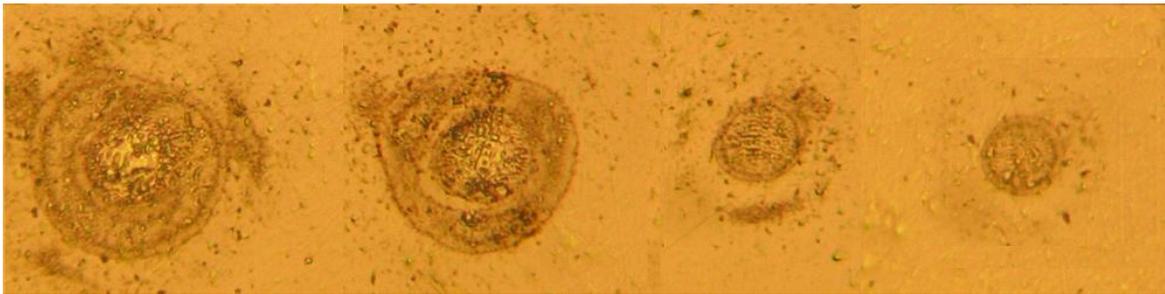


Figura 66-Fotos dos danos no Molibdênio  $E = 32 \mu J$ ;  $17 \mu J$ ;  $3 \mu J$ ;  $1,8 \mu J$ .

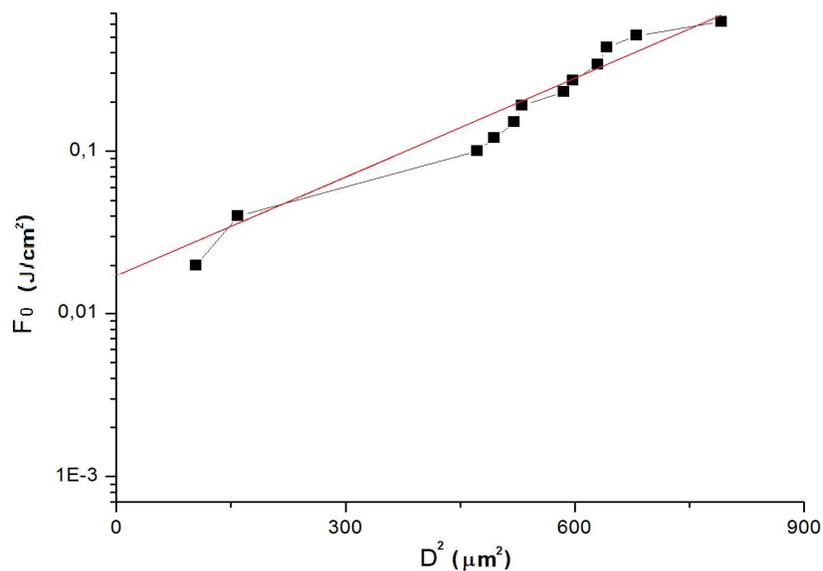


Figura 67- Gráfico  $F_0 \times D^2$  com o limiar de ablação do Molibdênio.

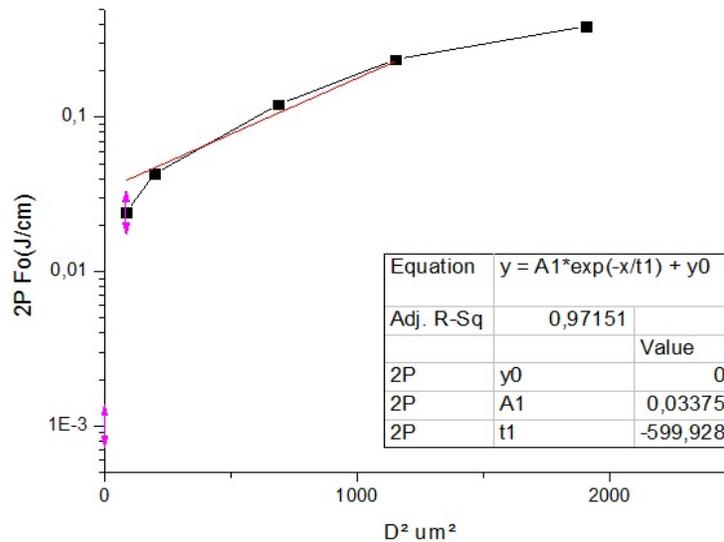
Assim como no silício, a reta de ajuste do gráfico acima intercepta o eixo Y no valor correspondente ao da fluência de limiar  $F_{th}$ . O valor experimental obtido para o molibdênio foi:

$$F_{th} = 0,017 \text{ J.cm}^{-2}$$

Este valor é muito mais baixo que aquele encontrado para o silício, o que já era esperado por se tratar de um metal, e até onde sabemos, é o primeiro obtido para este material.

#### 4.4.2.1 Estudo de Pulsos sobrepostos em Molibdênio

Além desta informação, da mesma maneira como foi feito com o silício, uma série de pulsos sobrepostos foi feita com vários valores de energia. Os gráficos de  $F \times D^2$  para  $N$  pulsos sobrepostos são mostrados a seguir para  $N = 2, 4, 16, 32, 128, 512$  e  $1024$ .



*Figura 68 Fluência em função do diâmetro ao quadrado, para a serie de 2 pulsos. Em vermelho a interpolação que permite encontrar o valor do limiar de ablação*

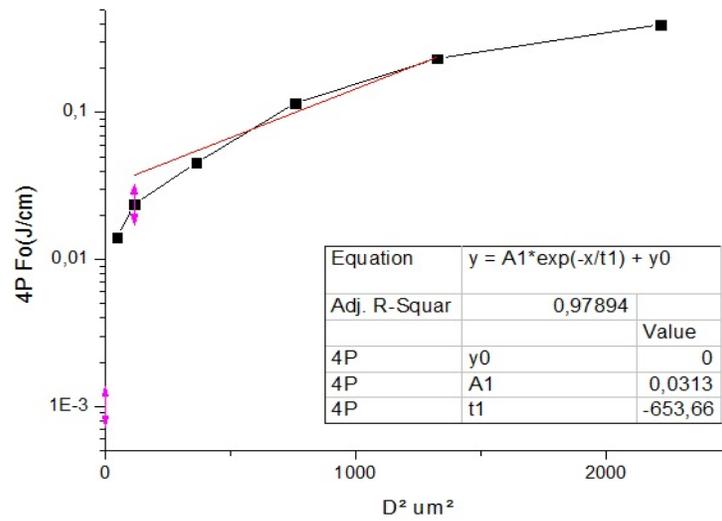


Figura 69 Fluência em função do diâmetro ao quadrado, para a serie de 4 pulsos.

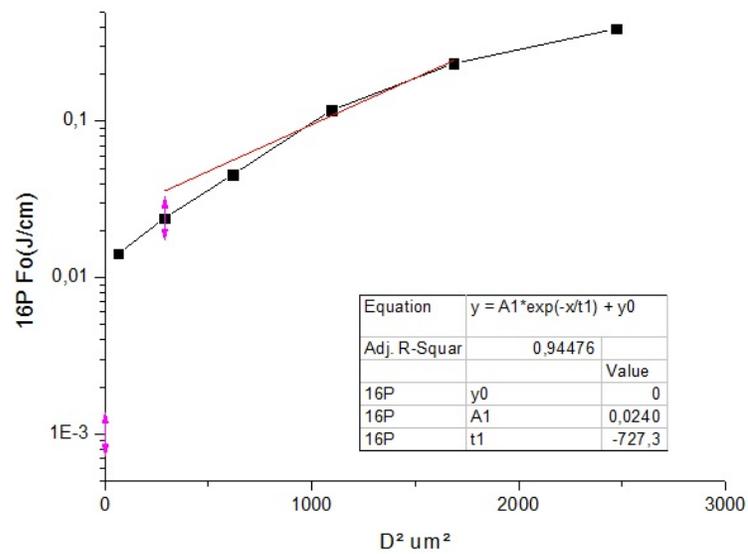


Figura 70 Fluência em função do diâmetro ao quadrado, para a serie de 16 pulsos.

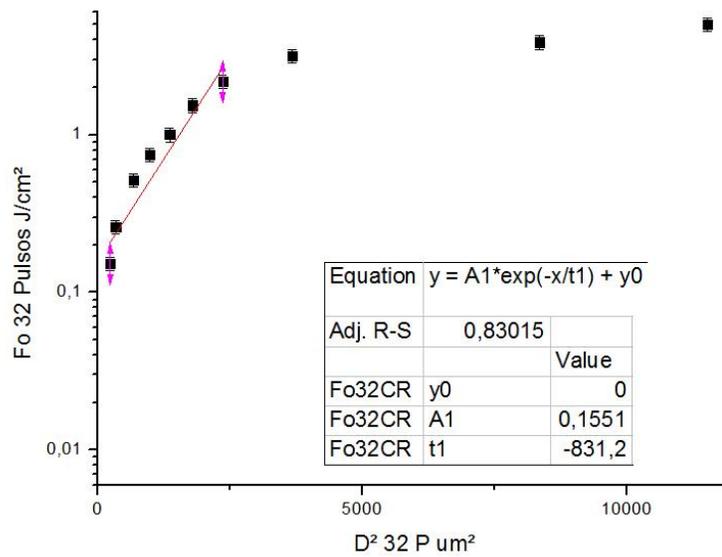


Figura 71 Fluência em função do diâmetro ao quadrado, para a serie de 32 pulsos.

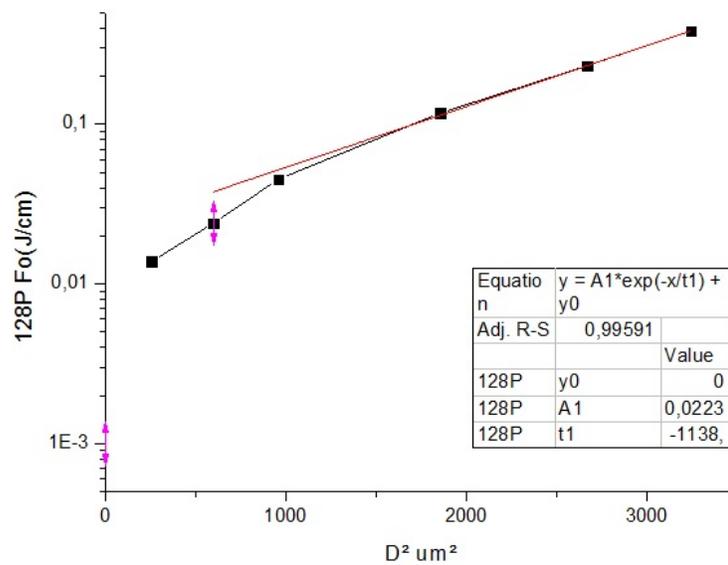


Figura 72 Fluência em função do diâmetro ao quadrado, para a serie de 128 pulsos.

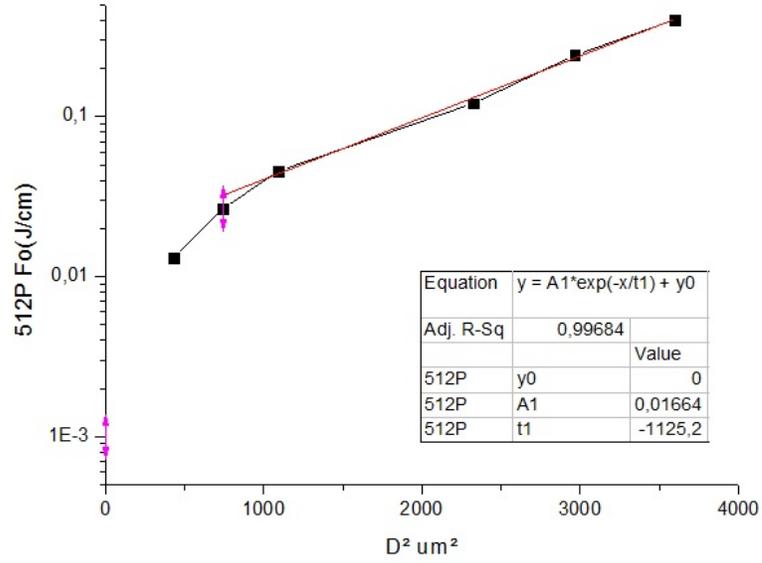


Figura 73 Fluência em função do diâmetro ao quadrado, para a serie de 512 pulsos.

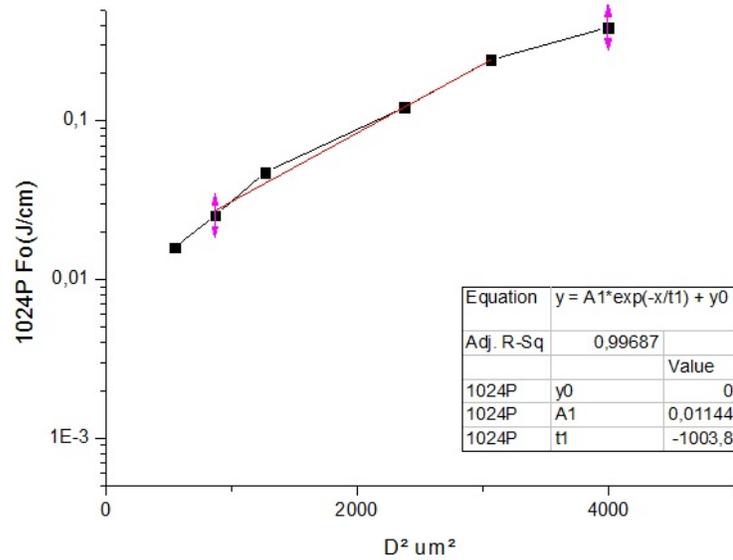
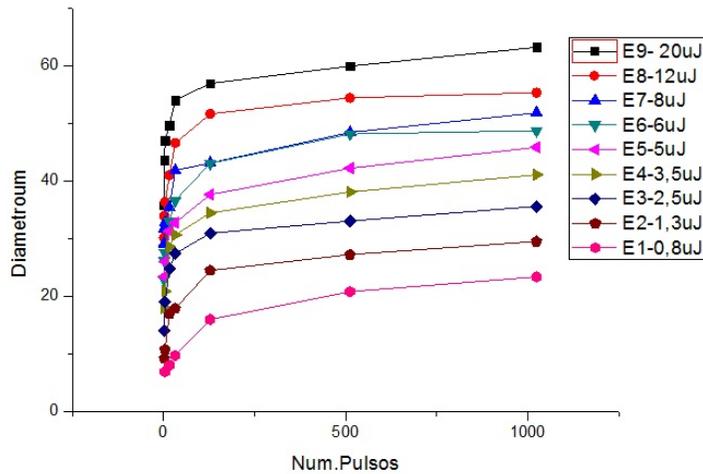


Figura 74 Fluência em função do diâmetro ao quadrado, para a serie de 1024 pulsos.

A relação entre o número de pulsos sobrepostos e o diâmetro do dano formado, para diversas energias de pulso, é mostrado na Figura 75 .

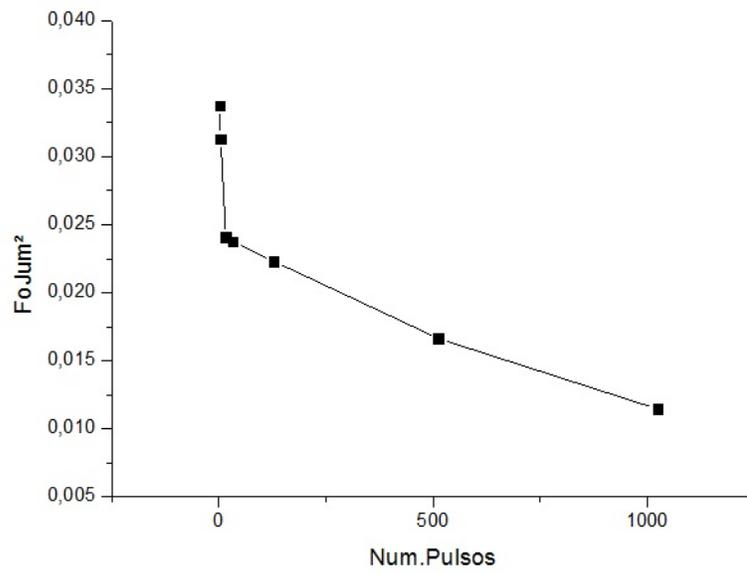


*Figura 75 Diâmetro do dano causado em função do número de pulsos, para cada energia utilizada.*

Este gráfico é muito semelhante ao obtido para o silício *Figura 41*, com um rápido aumento do diâmetro do dano para um número relativamente pequeno de pulsos sobrepostos. As diferenças na natureza da interação com o laser e da formação dos defeitos (do efeito incubador) não são refletidas nestes gráficos.

A fluência de limiar, como função do número de pulsos sobrepostos é mostrada na *Figura 76*. Fica evidente uma rápida diminuição em  $F_{th}$  com o aumento do número de pulsos sobrepostos. Aqui também um efeito de incubação, ou memória, torna o material mais suscetível ao dano quando este material já foi irradiado anteriormente. Assim, o acúmulo de  $N$  pulsos pode levar ao dano do material, mesmo para uma condição onde a incidência de  $N-1$  pulsos não cause dano. Diferentemente do Si, contudo,  $F_{th}$  continua diminuindo mesmo para um número grande de pulsos, e até onde analisamos ( $N=1024$ ) uma saturação neste efeito não foi encontrada. A diferença na natureza dos defeitos (abaixo do limiar de ablação) deve explicar este comportamento, e a deformação plástica da rede cristalina parece ser capaz de suportar um intervalo maior de “concentração” de defeitos.

Como já mencionado, o conhecimento da relação entre o limiar de ablação e o número de pulsos é importante tanto para usinagem como para o caso onde não se quer que haja dano, como acontece em materiais que devem refletir ou transmitir o feixe.



*Figura 76 Limiar de ablação em função do numero de pulsos.*

A figura 76 seguir mostra a região afetada pela sobreposição de 1024 pulsos com energia de  $7,2 \mu\text{J}$  por pulso.

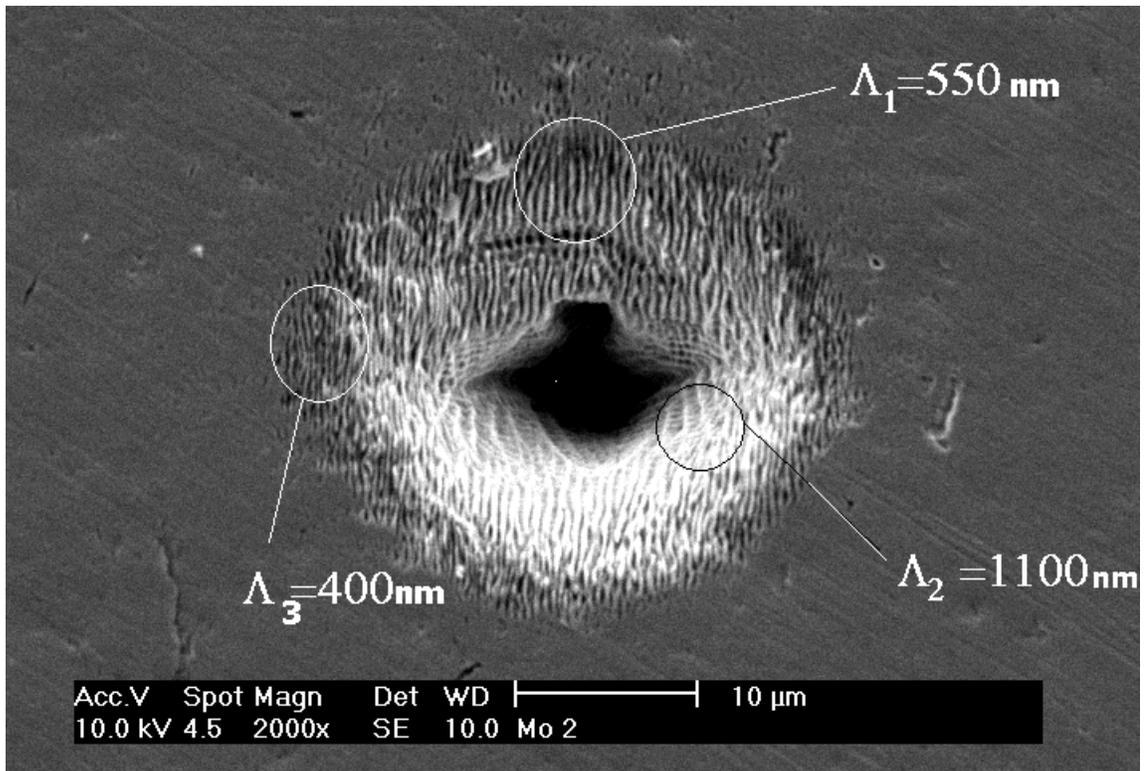


Figura 77-Micrografia de danos com 1024 pulsos e energia de  $7,2\mu\text{J}$

A formação de estruturas periódicas sobre o molibdênio é claramente observada quando da sobreposição de pulsos laser. Para pulso único, dano somente é observado para energia a partir de  $2,1 \mu\text{J}$ ; pouca ou nenhuma evidência de nanoestruturas é observada, mesmo para as energias maiores. Para múltiplos pulsos, já é observado dano com energias menores, a formação de nanoestruturas fica cada vez mais evidente com o aumento do número de pulsos sobrepostos.

A foto da Figura 77 mostra uma estrutura com período próximo do comprimento de onda do laser utilizado. Esta estrutura mostra um período de repetição que varia conforme a região:

$\Lambda_1 = 550 \text{ nm}$ ;  $\Lambda_2 = 1100 \text{ nm}$   $\Lambda_3 = 400 \text{ nm}$ ;

Esta figura é muito semelhante para todas as energias utilizadas, e parece estar de acordo com a *Eq. 20*. Uma simples análise das figuras nos faz levantar as seguintes observações:

- As estruturas são perpendiculares à direção de polarização.
- O período destas estruturas depende da inclinação da superfície, e quanto maior a inclinação, maior é o período.
- Para as regiões onde a inclinação é grande, provocada pela remoção de material, também aparece uma estrutura paralela à polarização inicial. Isto pode ser devido a uma interferência entre as ondas sobrepostas ou a um giro da polarização causado pela reflexão sobre a superfície.

## 5 CONCLUSÕES E AVALIAÇÕES

Com a implementação da estação de trabalho, foi possível agilizar e aumentar a confiabilidade nos experimentos desenvolvidos no laboratório T3U do CLA.

A comunicação entre os diversos softwares desenvolvidos permitiu colher dados em tempo real, e controlar os parâmetros dos processos de maneira a estudar a influencia de sua variação em alguns processos estudados.

O ambiente de programação LabView, mostrou-se bastante versátil, e graças à sua aceitação como interface para usuário por vários fabricantes, pode-se integrar o programa desenvolvido com os programas que acompanham alguns equipamentos utilizados.

O sistema de compensação de vibrações, que utiliza um espelho de varredura rápida, mostrou-se bastante eficiente para corrigir as vibrações introduzidas pela distancia e os vários planos que fazem parte do sistema desde o laboratório onde o Laser é produzido, até a mesa onde se utilizara o laser como ferramenta. Verificou-se a necessidade de implementação de um sistema manual de controle de ganho para ajuste fino e o perfeito acoplamento entre o sinal de realimentação proporcionado pela amostra do feixe, e a resposta do espelho rápido.

Todas estas automatizações introduzidas pelo programa e os sistemas eletromecânicos de acionamento do obturador do feixe e do controle de ganho permitiram que fosse possível fazer o levantamento do limiar de ablação do silício e do molibdênio, com maior confiabilidade e rapidez, e assim projetar algumas aplicações tais como micro canais em silício, e micro estruturas em molibdênio.

O principal objetivo do trabalho foi alcançado, pois o sistema mostrou-se bastante confiável e permitiu um grande ganho de tempo em experimentos que exigem uma grande quantidade de dados e repetibilidade.

O limiar de ablação obtido para o silício serviu como validação do sistema, pois o valor obtido encontra-se bastante próximo aos encontrados na literatura. Com o método desenvolvido para o silício, o mesmo foi feito para o molibdênio e o resultado, pelo nosso conhecimento, é o primeiro já reportado.

A estação de trabalho também já foi utilizada para medidas com vidro óptico BK7. Neste caso, os resultados também foram confrontados com a literatura e demonstrou a precisão e confiabilidade do sistema.

A produção de um microcanal controlado no Si não foi possível, indicando a necessidade de mais estudos para a sua obtenção. Em um outro trabalho, estes estudos estão sendo desenvolvidos e já produziram microcanal com qualidade bastante melhorada.

## **6 TRABALHOS FUTUROS**

Seguindo o processo de automatização, será implementado uma célula de Pockels no próprio laboratório de processamento de materiais, que será controlado via software e integrado ao sistema, permitindo a mudança de taxa de repetição durante o processo.

Um sistema de movimentação X,Y,Z, nanométrico, também fará parte do sistema automatizado, o que permitirá junto com todos os outros controles, a elaboração de processos, rápidos, confiáveis e repetitivos, agilizando o estudo dos mais diversos materiais.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- <sup>1</sup> DE ROSSI, W.; WETTER, N. U.; **“ICS Lectures on Industrial Applications of Lasers”**, , UNIDO Publication, Spero Penha Morato, 2000, v 1, p 93.
- <sup>2</sup> ALMEIDA, I. A.; DE ROSSI, W.; LIMA, M. S. F.; BERRETTA, J. R.; NOGUEIRA, G. E. C.; WETTER, N. U.; VIEIRA JR., N. D. **“Optimization of titanium cutting by factorial analysis of the pulsed Nd:YAG laser parameters”**, Journal of Materials Processing Technology, v. 179, p. 105-110, 2006.
- <sup>3</sup> BERRETTA, J. R.; DE ROSSI, W.; NEVES, M. D. M.; ALMEIDA, I. A.; VIEIRA JR. N. D.; **“Solda com Laser de Nd:YAG Pulsado entre os Aços Inoxidáveis AISI 304 e AISI 420”**, Revista Soldagem e Inspeção, v. 11, n. 1, p.2-9, 2006.
- <sup>4</sup> RULLIERE , C. (ed); **“Femtosecond laser pulses, Principles and experimens.”** Berlin - Springer-Verlag, 1998. 309 p.
- <sup>5</sup> KE, K.; JOGLEKARI, A. P.; LIU H.; MEYHOFER E.; HASSELBRINK, E.; MOUROU, G.; HUNT, A. J.; **“The Physics and Limits of Femtosecond Laser Micromachining”**, CThV3 2005 Conference on Lasers & Electro-Optics(CLEO) 05, p. 1912 - 1914
- <sup>6</sup> LE HARZIK, L.; BREITLING, D.; WEIKERT, M.; SOMMER, S.; FOHL, C.; DAUSINGER, F.; VALETTE, S.; DONNET, C.; AUDOUARD, E., **“Ablation comparison with low and high energy densities for Cu and Al with ultra-short laser pulses”**, Applied Physics A Materials Science and Processing, A 80, 1589-1593, 2005.
- <sup>7</sup> NOLTE, S.; MOMMA, C.; JACOBS, H.; TUNNERMANN, A.; CHICHKOV, B. N.; WELLEGEHAUSEN, B.; WELLING, H.; **“Ablation of metals by ultrashort laser pulses”**, J. Opt. Soc. Am. B/ Vol. 14, No. 10/October 1997
- <sup>8</sup> THOMSON, W. T.; **“Teoria da vibraçao com aplicações”**. [Theory of vibration with applications]. Rio de Janeiro - Interciencia, 1978. 462 p..
- <sup>9</sup> KE, K.; JOGLEKAR, A. P.; LIU, H.; MEYHOFER, E.; HASSELBRINK, E.; MOUROU, G.; HUNT, A. J. **“The Physics and Limits of Femtosecond Laser Micromachining”** CThV3 2005 Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO)
- <sup>10</sup> BAˆHNISCH, R.; GROß, W.; STAUD, J.; MENSCHIG, A.; **“Femtosecond laser-based technology for fast development of micromechanical devices”**, Sensors and Actuators 74\_1999.31–34
- <sup>11</sup> KIMA, J.; NA, S.; **“Metal thin film ablation with femtosecond pulsed laser”**, Optics & Laser Technology, Volume 39, Issue 7, October 2007, Pages 1443-1448

- 
- <sup>12</sup> REUTER, S.; SUTTER, D. H.; ECKERT, D.; TAN, C.; SPRINGMANN, O.; ZIOLEK, C.; HONNINGER, C.; KUMKAR, M.; **“Towards industrial micro-machining with ultrashort laser pulses”**, 2005 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2005, p. 355.
- <sup>13</sup> KU “POR E STUKE, 1989; Du et al., 1994; Pronko et al., 1995a; Stuart al de et., 1995, 1996;
- <sup>14</sup> RAFAEL R. GATTASS AND ERIC MAZUR **Femtosecond laser micromachining in transparent materials** nature photonics ,VOL 2, APRIL 2008
- <sup>15</sup> DU, D., LIU, X., KORN, G., SQUIER, J. & MOUROU, G. **“Laser-induced breakdown by impact ionization in SiO<sub>2</sub> with pulse widths from 7 ns to 150 fs”**. Appl. Phys. Lett. 64, 3071–3073 (1994).
- <sup>16</sup> PRONKO, P. P. ET AL. **“Machining of submicron holes using a femtosecond laser at 800-nm.”** Opt. Commun. 114, 106–110 (1995).
- <sup>17</sup> JOGLEKAR, A. P. ET AL. **“A study of the deterministic character of optical damage by femtosecond laser pulses and applications to nanomachining.** Appl. Phys. B 77, 25–30 (2003).
- <sup>18</sup> CHIMMALGI, A., CHOI, T. Y., GRIGOROPOULOS, C. P. & KOMVOPOULOS, K. **Femtosecond laser aperturless near-field nanomachining of metals assisted by scanning probe microscopy.** Appl. Phys. Lett. 82, 1146–1148 (2003).
- <sup>19</sup> S.S. MAO, F. QUERE, S. GUIZARD, X. MAO, R.E. RUSSO, G. PETITE, P. MARTIN, **Appl. Phys. A 79** (2004) 1695.]
- <sup>20</sup> HERRMANN RFW, GERLACH J, CAMPBELL EEB. (1998). **Ultrashort pulse laser ablation of silicon: an MD simulation study.** Appl Phys A 66:35–42.
- <sup>21</sup> ANISIMOV SI, KAPELIOVICH BL, PEREL’MAN TL. (1974). **Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses.** Sov Phys—JETP 39:375–377.<sup>21</sup>
- <sup>22</sup> PROKHOROV AM, KONOV VI, URSU I, MIHAILESCU IN. (1990). **Laser Heating of Metals.** Bristol, UK: Adam Hilger
- <sup>23</sup> PREUSS S, DEMCHUK A, STUKE M. (1995). **Sub-picosecond UV laser ablation of metals.** Appl Phys A 61:33–37.
- <sup>24</sup> KRUGER J, KAUTEK W. (1995). **Femtosecond-pulse laser processing of metallic and semiconducting thin films.** Proc Laser-Induced Thin Film Processing, SPIE 2403:436–447.
- <sup>25</sup> CHICHKOV BN, MOMMA C, NOLTE S, VON ALVENSLEBEN F, TUNNERMANN A. (1996). **Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids.** Appl Phys A 63:109–115.
- <sup>26</sup> NOLTE S, MOMMA C, JACOBS H, TUNNERMANN A, CHICHKOV BN, WELLEGEHAUSEN B, WELLING H. (1997). **Ablation of metals by ultrashort laser pulses.** J Opt Soc Am B 14:2716–2722

- 
- <sup>27</sup> Martin E. Fermann (Editor), Almantas Galvanauskas **Ultrafast Lasers: Technology and Applications** Chapter 7 Micromachining Stefan Nolte pp. 359-395
- <sup>28</sup> A.E. SIEGMAN, **Lasers** (University Science Books, Mill Valley, 1986)
- <sup>29</sup> P.T. MANNION\*, J. MAGEE, E. COYNE, G.M. O'CONNOR, T.J. GLYNN **The effect of damage accumulation behaviour on ablation** - P.T. Mannion – teoria para N pulsos; Applied Surface Science 233 (2004) 275–287
- <sup>30</sup> A. Y. VOROBYEV AND CHUNLEI GUO; **Colorizing metals with femtosecond laser pulses**; Applied Physics Letters 92, 041914 \_2008\_;
- <sup>31</sup> L. RAN, S. QU, **Structure formation on the surface of alloys irradiated by femtosecond laser pulses**, Appl.Surf. Sci. (2009), doi:10.1016/j.apsusc.2009.09.040.
- <sup>32</sup> X. FU, L. LI, Y. WU, N. GENG; **Measuring and machining of ripples on silicon surface with femtosecond pulse laser**; Key Engineering Materials, vol. 381-382 (2008) pp. 101-104.
- <sup>33</sup> P E JACKSON **The Physics and Technology of Laser Resonators**; Ed. D R Hall ,
- <sup>34</sup> CHONGWEI ZHENG, YAOJU ZHANG, LING WANG; **Propagation of vectorial Gaussian beams behind a circular aperture** Optics & Laser Technology 39 (2007) 598–604
- <sup>35</sup> GUOQUAN ZHOU; **Propagation properties of a non-paraxial hollow Gaussian beam**, Optics & Laser Technology 41 (2009) 562–569
- <sup>36</sup> **Test Methods for Laser beam parameters: Beam widths, Divergence angle and beam propagation factor**. Document ISO/11146:1999
- <sup>37</sup> O. UTEZA, B. BUSSIE`RE, F. CANOVA, J.-P. CHAMBARET; P. DELAPORTE, T. ITINA, M. SENTIS; **Laser-induced damage threshold of sapphire in nanosecond picosecond and femtosecond regimes**; Applied Surface Science 254 (2007) 799–803
- <sup>38</sup> R. Bähnisch, W. Groß, J. Staud, A. Menschig, Sensors and Actuators **74**, 34 (1999).
- <sup>39</sup> EMSLEY, JOHN (2001). **Nature's Building Blocks**. Oxford: Oxford University Press. pp. 262–266. ISBN 0198503415