



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

MICROFURAÇÃO COM LASER PULSADO

ROBERTO DE BRITO SANTOS

Dissertação 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
2001

INSTITUTO de PESQUISAS ENERGÉTICAS e NUCLEARES

autarquia federal associada à

UNIVERSIDADE de SÃO PAULO



MICROFURAÇÃO com LASER PULSADO

por

ROBERTO de BRITO SANTOS

Dissertação

para obtenção do

Grau Mestre em Ciências.

Orientador: Dr. Wagner de Rossi.

São Paulo - capital

2001

“Ensina o menino o caminho que deve andar,
e até quando envelhecer não se desviará dele.”

Provérbios de Salomão c.22 v.6

aos meus orientadores primeiros

dedico este trabalho

Eliezer e Palmira

in memoriam

em resposta ao seu incondicional incentivo, seu inestimável
apoio e sua compreensão ofereço à *querida Edna*.

Agradecimentos

Em primeiro lugar e acima de tudo agradeço a Deus, pela oportunidade do apoio desta equipe, cuja eficiência está acima da minha capacidade crítica e sem a qual o desfecho deste trabalho certamente não seria o mesmo.

Devo agradecer ao patrocínio financeiro recebido do CNPq. Também aos Professores da USP no Ipen, Dra. Martha Marques Vicira, Dr. Nilson Vicira Jr. pelo incentivo e apoio, ao Dr. Wagner de Rossi pela orientação durante este trabalho, e ao Dr. Spero Penha Morato. Identicamente ao Dr. Rudimar Riva e ao Dr. Marcelo Geraldo Destro, ambos Professores da Divisão de Fotônica, do Instituto de Estudos Avançados, CTA - Centro Técnico AeroEspacial, em São José dos Campos.

<www.ieav.cta.br>

Ao suporte da equipe laboratorial: M.Sc. José Roberto Berretta, Eng. Ivan A. Almeida, Glauson A. F. Machado, Bel. José Tort Vidal, Marco Antonio Andrade, MSc. Manuel Lopes Filho facilitador em informática. À secretaria do departamento ME: Edna Isabel de Matos e Bel. Elsa Papp. Ao indispensável serviço de documentação e biblioteca: Doralice L. Xavier, Sílvia S. Santos e Waldir Ferreira. À Secretaria de Pós Graduação, e ao Departamento de Intercâmbio do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Aos servidores e professores da Universidade de São Paulo na pessoa do seu Reitor, aos funcionários e pesquisadores deste Instituto representados na pessoa do seu Superintendente, e ao Diretor de Ensino Prof. Dr. José Roberto Rogero, meus agradecimentos.

O empreendimento da CPML recebeu suporte financeiro da Finep - Financiadora de Pesquisas (contrato nº 56.94.0174.00) e foi realizado integralmente no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP. As atividades experimentais deste trabalho foram a somatória de esforços conjuntos, desenvolvidos como parte integrante de um cenário, que contou com a participação de vários órgãos. A Financiadora de Estudos e Projetos FINEP, o Programa Brasileiro para o Desenvolvimento de Ciência e Engenharia PRODENGE, o grupo de Processos Avançados de Usinagem da Rede Cooperativa de Pesquisa RECOPE (referência nº 3524 / 96), o Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico PADCT do Ministério de Ciência e Tecnologia, através do Subprograma de Física Aplicada e o grupo de óptica do Centro de Laser e Aplicações, CLA - IPEN.

<www.ipen.br>

Por uma questão de foro íntimo, deixo assinalada minha indizível gratidão para com os precursores da ciência contemporânea, que nos legaram as bases do atual progresso científico e tecnológico, mais particularmente à *Universidade Rosacruz Internacional*.

<www.amorc.org.br>

MICROFURAÇÃO por LASER PULSADO

Roberto de Brito Santos

RESUMO

Foi feito um abrangente estudo sobre a influência de diversos fatores, que contribuem e concorrem para o aprimoramento dos processos de furação com dimensões sub-milimétricas, realizadas por radiação *Laser* de alta potência. Na parte experimental que se seguiu, foi desenvolvida uma seqüência de ensaios, para investigar e demonstrar os pressupostos a respeito da afinidade entre as características do equipamento e sua destinação. Tendo sido projetada e construída pelo grupo de óptica do IPEN, com financiamento Finep, a CPML (central para processamento de materiais por *Laser*) está atualmente em operação, podendo ser utilizada para fins de estudos e fornecimento de serviços à comunidade industrial.

As investigações foram feitas por meio de amostras irradiadas por *Laser* Nd:Yag pulsado. As amostras foram feitas em chapa de aço inox AISI 304. Os métodos investigados experimentalmente foram *Laser Single Shot*, percussão e trepanação. Respectivamente, são indicados para fins nos quais maior primor cosmético seja desejado. Os resultados apresentaram estreita concordância com os pressupostos, no sentido de que cada método destina-se às exigências de cada aplicação. Também foram investigados os efeitos obtidos da variação dos parâmetros do feixe, com intensidades variando entre 8,5 e 45kW.mm⁻², enfatizando o aprimoramento do fator qualidade do feixe M² por meio de filtro espacial. Os resultados foram avaliados por meio de medidas geométricas de diâmetros obtidos das amostras, e a sua relação com a profundidade dos furos, conicidade, e a região afetada por resíduos e material ressolidificado.

MICRODRILLING by PULSED LASER BEAM

Roberto de Brito Santos

ABSTRACT

The present study happened by means a broadening theoretical reasearch, later concluding about what are more efficient parameters and applied resources approachable in the academic database, with respect the submilimetric drilling using a high power pulsed laser beam. In the experimental chapter we address a developed trial, to investigate and to demonstrate the advantageous reliability between the equipment characteristics and your destination. It was projected and constructed by the optical researchers team in this Institute, with Finep financial support, the CPML (Laser Materials Center Processing) is actually operating, being utilized to studies and providing parts at the industrial purposes.

The investigations occur constructing irradiated specimens with pulsed neodimium laser beam. The samples was made employing AISI 304 stainless steel plate. The investigated experimental methods was laser single shot, percussion and trepan drilling. Respectively, they are indicated to purposes whose higher cosmetic be spected. The results presents fine agreement with the targets, in the sense that each method is appropriated to each application requirements. Also was investigated the obtained effects variation accross the range of beam parameters, with intensity between 8,5 and 45 kW.mm⁻², and enhanced the quality beam factor M^2 using spatial filter. The evaluation, by means of the geometric measurements, was obtained from these samples, and related to the hole deep, tapering, debris and ressolidified affected region.

Sumário	pg
1. Prolegômenos	1
2. Justificativa	3
3. Objetivos	7
Capítulo I - Fundamentos teóricos	
4. Considerações iniciais	9
4.1. Módulo <i>Laser</i>	9
4.2. Os parâmetros e sua relevância	10
4.3. Relações de Pertinência	12
4.4. Principais aspectos qualitativos do feixe <i>Laser</i>	13
4.4.1. O comprimento de onda	14
4.4.2. Lente térmica	25
5. Interação do feixe <i>Laser</i> com a matéria	27
5.1. Abordagem quântica	29
5.2. Abordagem Térmica	32
5.2.1. Propriedades ópticas	33
5.2.2. Quantificação da energia	36
5.2.3. Ciclo térmico	38
5.2.4. Ondas de choque	42
5.2.5. <i>Ripples Laser</i>	46
6. Discussões	52
6.1. Eficiência do processo	52
6.2. Itens quantitativos do feixe	57
6.3. Itens de controle	63
6.3.1. Formato do pulso	66
6.3.2. <i>Spiking</i>	67
6.3.3. Desempenho esperado	68
6.3.4. A extração como função da temperatura superficial	69

(continuação)	
7. Métodos de furação	70
7.1. <i>Laser Single Shot</i>	71
7.2. Percussão	71
7.3. Trepanação	72
7.4. Considerações	72
Capítulo II – Capítulo Experimental	
8. Central de Processamento de Materiais por <i>Laser</i>	75
8.1. Parametrização	82
8.1.1. Determinação do perfil de potência	84
8.1.2. Filtragem intracavitária	87
8.1.3. Conformação temporal do pulso	87
8.1.4. Energia do feixe	89
8.2. Restrições	91
9. A escolha do material	91
10. Desenvolvimento experimental e análise dos resultados	92
10.1. Capacidade de extração por LSS	93
10.2. Percussão	96
10.2.1. Feixe com filtro espacial	106
10.2.2. Aquisição dos dados & estudo do erro	107
10.2.3. análises não quantitativas	112
10.2.4. Refinamento do feixe	118
10.3. Trepanação	121
11. Critérios de experimentação	124
11.1. Descrição dos métodos	124
11.1.1. Determinação do diâmetro do feixe	125
11.1.2. Medição da energia contida no feixe	125
11.1.3. Métodos para caracterização da qualidade do feixe	125
11.1.4. Procedimento para amostras	127
11.2. Tratamento dos dados	132
12. Conclusões	133
13. Sugestões	135
14. Notas adicionais	136
15. Referências	137

Lista de Figuras	pg
Figura 1 - Diagrama relacionando os parâmetros e sua influência.	12
Figura 2 - Trajetória produzida pela óptica gaussiana	17
Figura 3 - Interações ocorridas durante a furação	28
Figura 4 - Profundidade de condução de calor para diferentes pulsos	40
Figura 5 - Comportamento termoelástico num sólido sob ação <i>Laser</i>	43
Figura 6 - Vista da estação de trabalho dentro do laboratório CPML	75
Figura 7 - Esquema de um módulo <i>Laser</i> genérico	79
Figura 8 - Perfil temporal pulsos de durações temporais 200 μ s, 2 ms e 5 ms	82
Figura 9 - Condições de contorno da CPML	84
Figura 10 - Imagem da distribuição de potência na no <i>near field</i> .	85
Figura 11 - Imagem da distribuição de potência no <i>far field</i> .	86
Figura 12 - Medição da divergência do feixe	86
Figura 13 - Traço mostrando <i>spikes</i> , num pulso <i>Laser</i> de 200 μ s	88
Figura 14 - Curva de transferência do módulo <i>Laser</i> .	89
Figura 15 - Tetraedro dos materiais para dois domínio tecnológicos	90
Figura 16 - Série de furos cegos com LSS 1,91 Joule por pulso	94
Figura 17 - Curvas de eficiência aprimorada de extração por LSS	94
Figura 18 - Curvas de eficiência refinada, para extração por LSS	95
Figura 19 - Três furos obtidos com largura de pulso 200 μ s	97
Figura 20 - Quatro furos obtidos com largura de pulso 300 μ s	97
Figura 21 - Diâmetros de furos por percussão para largura de pulso 200 μ s	99
Figura 22 - Cálculo da conicidade na perfuração	100
Figura 23 - Gráfico da conicidade plena	100
Figura 24 - Gráfico da conicidade na meia seção de saída	101
Figura 25 - Diâmetros para percussão com larguras de pulso 300 μ s	102
Figura 26 - Diâmetros para percussão com larguras de pulso 600 μ s	102
Figura 27 - Diâmetros para percussão com larguras de pulso 900 μ s	103
Figura 28 - Comparação entre os diâmetros medianos	103
Figura 29 - Micrografias comparando percussão com pulsos 300, 600 e 900 μ s	104

(continuação)

Figura 30 - Malha de furação ensaiada com feixe filtrado	107
Figura 31 - Diâmetros para percussão com largura de pulsos 300 μ s	108
Figura 32 - Diâmetros para percussão com largura de pulsos 600 μ s	109
Figura 33 - Diâmetros para percussão com largura de pulsos 900 μ s	109
Figura 34 - Conicidade comparada entre larguras de pulso	110
Figura 35 - Conicidade na meia seção de saída, com feixe filtrado	111
Figura 36 - Comparativo dos diâmetros medianos	111
Figura 37 - Grade de análise das entradas dos furos	112
Figura 38 - Influência da intensidade no acabamento	113
Figura 39 - Entradas de furos com diâmetro 300 μ m feitos com feixe filtrado	114
Figura 40 - Furos com excelente cosmética na saída, sem retrabalho	114
Figura 41 - Micrografias de dois furos com <i>barreling</i>	115
Figura 42 - Evolução do fenômeno <i>barreling</i>	116
Figura 43 - Dois exemplos de solução para o <i>barreling</i>	117
Figura 44 - Entradas de furos obtidos por feixe refinado	119
Figura 45 - Efeitos da compensação no tempo de exposição	120
Figura 46 - Ilustração do processo de trepanação	121
Figura 47 - Trepanação com feixe filtrado	122
Figura 48 - Entradas dos furos trepanados	122
Figura 49 - Arranjo para leitura da energia incidente no ponto de trabalho	124
Figura 50 - Esquema interno de montagem do conjunto focal	125
Figura 51 - Distribuição de potência de um feixe no modo TEM fundamental	126
Figura 52 - Geometria padronizada das amostras	128
Figura 53 - Amostras prontas para análise	129
Figura 54 - Jig utilizado para fixação de amostras durante o desbaste	130

1. Prolegômenos

Do grego (*prolegómena*), prolegômenos significa exposição preliminar dos princípios de uma obra.

Este trabalho faz parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em ciências, sendo um condensado que inclui um estudo literário, relacionado à microfuração por *Laser* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), adicionado da caracterização do laboratório CPML (Central de Processamento de Materiais por *Laser*), e também dos resultados obtidos por meio de experimentação desenvolvida numa fresadora CNC, dotada com módulo *Laser* Nd:YAG do Centro de *Laser* e Aplicações do Ipen.

Diversos trabalhos têm sido divulgados com discussões a respeito da produção de radiação *Laser* e também de suas aplicações. Entretanto as formas de explorar as configurações e parâmetros do sistema, deixam espaço para muitas abordagens complementares.

Os primeiros trabalhos nesta área datam do início dos anos 1970 e tiveram grande desenvolvimento principalmente nos Estados Unidos da América, Suíça e Inglaterra. A partir de 1990 verificamos uma acentuada expansão na Arábia Saudita, Turquia, Índia, Singapura, Alemanha e Rússia. Além disso a literatura disponível indica que nos últimos vinte e cinco anos foram feitas diversas abordagens, particularmente por indústrias e centros de pesquisa enfocando o tema de forma segmentada.

Uma busca literária nas bases de dados disponíveis entre os anos de 1997 até 2000, não localizou nenhum trabalho que apresente tais técnicas, descritas em língua portuguesa de forma integrada, o que confere certa autenticidade e mérito didático a este conteúdo, que apesar de preliminar, traz sugestões para desenvolvimentos e aprimoramentos futuros.

Aprofundamos o tema sem a intenção de esgotar o assunto, e sem entrar no mérito estrutural e analítico, ou matemático dos modelos. Todavia demonstramos relações de pertinência, trazendo argumentos e apontando utilidades. Discutimos questões que fornecem respostas às necessidades emergentes numa análise não necessariamente conclusiva.

No primeiro capítulo são discutidos os fundamentos teóricos bem como os desdobramentos mais recentes sobre o assunto. No segundo capítulo são apresentados os métodos, técnicas e recursos empregados para atingir os resultados esperados, e também tratamos do detalhamento dos métodos aplicados e da quantificação e desenvolvimento experimental, pela furação de chapas de aço inox AISI 304.

Pelo motivo de alguns termos não poderem ser traduzidos para o português sem prejuízo da compreensão e do conteúdo, necessitando assim extensas explicações adicionais que lhe conferissem sentido, consideramos oportuno adotar diversas expressões adquiridas de outros idiomas, que estão *grafadas em itálico*, e cujos conceitos são universais e estão se tornando parte da cultura e do acervo tecnológico mundiais.

Hoje em dia, a literatura apresenta uma nomenclatura diversificada que contém uma quantidade razoavelmente grande de termos e expressões, nem sempre concordantes. O acervo da terminologia que inclui o desenvolvimento da aplicação de tecnologia *Laser*, particularmente sobre os processos industriais de usinagem, possui um conteúdo que por si justificaria uma publicação exclusivamente dedicada.

Durante o desenvolvimento deste projeto pudemos constatar que muitos dos pressupostos eram bem fundamentados, portanto dispensando maior detalhamento. Porém, ocorreu a descoberta de lacunas que podem ser úteis para futuras pesquisas.

No tema da microfuração por *Laser*, julgamos favorável abordar o assunto de forma abrangente e genérica do ponto de vista conceitual, independentemente de fatores ligados ou não à parte experimental do trabalho. As propostas desta pesquisa foram definidas de maneira interativa, na medida em que foram sendo julgadas necessárias, sendo também conceituados os termos mais importantes relacionados ao processo, cujas considerações são citadas ao longo desta redação.

“A maioria das modernas tecnologias são baseadas em luz”

Hank Hogan

2. Justificativa

A tecnologia da luz marcou definitivamente a entrada numa nova era tecnológica. A princípio isto pode ter apenas aparência semântica, porém o que se sabe é que estamos deixando para trás a era da informação e entrando na era do conhecimento. O conhecimento foi desde tempos remotos associado a idéia de luz, pelos resultados que apresenta na vida das pessoas e das civilizações. Os princípios da ação *Laser* foram descritos por Townes & Schawlow em 1958 [1], para que Townes pudesse inventar o *maser* (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*), similar ao *Laser* em microondas. Nos laboratórios da *Hughes Aircraft Corporation*, Maiman foi pioneiro na demonstração de um feixe *Laser* visível utilizando um cristal de rubi [2]. O uso de *Laser* na micro-usinagem teve origem em 1966 na Suíça para furar mancais de relógios [3].

Aspectos relevantes - Como justificativa do tema, temos a considerar o impetuoso aprimoramento das técnicas da qualidade e da produtividade, que veio alavancar o crescimento da aplicação de tecnologia *Laser* nos processos de usinagem. As políticas de comércio internacional do petróleo, a intensificação nos transportes intercontinentais e espaciais, sistemas de vigilância, de prospecção, bélicos e a automação industrial, que exigiram portabilidade, redução de massa e miniaturização em escalas crescentes, com aumento de confiabilidade. Apenas pelo uso de tecnologia *Laser*, e de nenhuma outra forma, foi possível fazer frente às expectativas estratégicas e industriais em tão pouco tempo. Considerando apenas o mercado mundial de sistemas *Laser* utilizados em usinagem US\$ 2,4 bilhões foram movimentados em 1997, enquanto que as vendas em microusinagem foram de US\$ 2,5 bilhões com crescimento anual acima de 20 % [4].

As formas de produzir peças para diversos segmentos industriais esbarraram em protocolos de qualidade, produtividade, empregabilidade e conceituação de transferência de tecnologia, desenvolvimento de processos e automação. Diversas técnicas foram desenvolvidas para processamento com *Laser*. Abordagens genéricas e abrangentes estão convivendo com estudos muito específicos. Embora o desenvolvimento da parte experimental tenha sido feita sobre chapa de aço inox, preferimos omitir no título a expressão “metais”, por dois motivos principais: (1) levando em conta a demanda acadêmica e tecnológica, a ênfase no sentido de aprimorar processos de furação por *Laser* em outros materiais é assunto recente, exceção feita às aplicações em odontologia, cujos parâmetros mais importantes estão relacionados às precauções com o potencial dano

provocado ao tecido, e as novas técnicas de furos cegos para aplicação na indústria microeletrônica para telefonia celular [5] [6] na produção de circuitos impressos com materiais dielétricos, com tecnologia SMD (*surface mounting device*) e ensaios envolvendo compósitos e cerâmicas; (2) levando em consideração as peculiaridades intrínsecas, e afinidade entre as propriedades da radiação e do material, é esperado que as discussões, os resultados e conclusões do presente trabalho possam servir como contribuição para os demais casos.

Para chegarmos a uma definição do campo de estudo da furação por *Laser*, a fim de balizar a parte experimental deste trabalho, o desenvolvimento do método empírico foi interativo no qual foram utilizadas chapas de aço inox AISI 304, sendo estudados a partir de uma revisão bibliográfica da sua atualização, passando pela caracterização de itens do módulo *Laser* utilizado, dos ensaios que completam a etapa experimental com metais tendo por finalidade de coletar, analisar, classificar e otimizar dados relacionados ao aspecto quantitativo, principalmente à sua qualidade cosmética. Os dados utilizados são de natureza semiquantitativa, posto que passam por análises de valores quantitativos que são convertidos em apreciação qualitativa.

Comparativo dos processos - Como termo de comparação temos que, os processos concorrentes do *Laser* para furação, como ECD (*electro chemical drilling* - eletroquímico) ou EDM (*electrical discharge machining* - feixe de elétrons) são os maiores concorrentes. As exigências e restrições com relação aos métodos convencionais estão relacionados principalmente à geometria, velocidade e complexidade ferramental. Estes pré requisitos são satisfeitos pelo *Laser* Nd:YAG que supera os concorrentes por ter baixa complexidade, baixo custo, velocidade elevada [7].

As principais vantagens da utilização de *Laser* na usinagem [7] de microfuros reside na ausência de magazine de ferramentas, na localização imediata dos furos por translação do CNC que proporciona grande precisão no reposicionamento, auxílio do sistema óptico de alinhamento por *Laser* HeNe e também de câmeras digitalizadas CCD, produção de furos com diâmetro muito inferior a 100 μm e com elevada razão de aspecto, permite usinagem de uma ampla gama de materiais duros ou macios como diamante, alumina, *Hastalloy*, tungstênio e titânio, extrema rapidez de furação e tempo de *setup* econômico, permite furação para ângulos de entrada complicados, com incidência até 80° da normal à

superfície, o processo pode ser facilmente automatizado por sua flexibilidade, dispensa furo guia bem como retrabalho reduzindo assim enormemente o custo operacional, possibilita redução de custo na implementação de maquinário podendo desempenhar múltiplas aplicações com relativa facilidade e rapidez na reconfiguração.

Os principais inconvenientes do processo de microfuração por *Laser* são o elevado custo de equipamento [8] dependendo da capacidade produtiva. A conicidade é um fenômeno intrínseco ao processo, podendo ser minimizada mas não eliminada, e depende principalmente da espessura a ser perfurada. Dificuldade em conseguir furos cegos com profundidade e razão de aspecto precisos. Restrição na espessura a ser furada, menor que 50 mm. Produção de material ressolidificado na borda, principalmente para ciclo térmico com ênfase na extração líquida, podendo entretanto ser facilmente removido. Atualmente há grande demanda por equipamentos *Laser* de estado sólido [9], operando em *free running* (amplificação com pulsos longos) ou em configuração híbrida de duplo estágio CPA [10] (*chirped pulse amplification*), que comprime a duração dos pulsos no tempo, gerando assim pulsos curtos e intensificando a potência de pico.

Planejamento da experimentação - Há recomendações no sentido de se realizar um cuidadoso planejamento preliminar dos experimentos, para possibilitar a obtenção de tanta informação estatística quanto possível. Testes estatísticos [11] são proveitosos para revelar a utilidade a um dado nível de significância como referência, com a possível eliminação total do erro pelo emprego de curvas de operação, evitando assim que sejam tomadas decisões erradas como por exemplo qual o tamanho numérico das populações amostrais que deve ser adotado.

Testes especiais são destinados a grandes grupos amostrais, nos quais as regras de decisão, ou testes de significância, utilizam populações infinitamente grandes [12]. A distribuição de Student, concebida por Gosset, pode ser utilizada em tabelas de distribuição normal, recomendando que um grau de liberdade $v = N - 1$ seja no mínimo trinta. Portanto o tamanho da população, ou número de observações N para qualquer caso deve ser tal que $N > 30$.

Uma importante técnica desenvolvida por Fisher, conhecida como análise de variância utiliza a distribuição F de Snedecor. Aplicada a um experimento de “um fator” gera uma matriz com “a” grupos de amostras ou ensaios e com “b” repetições semelhantes. Cada

grupo produz um valor médio acompanhado de desvio padrão e variância. Para o caso de mais de um fator, o coeficiente de relevância de cada um é determinado truncando o triângulo de Pascal, formado pelos coeficientes do polinômio fatorial.

Um controle estatístico de processo computadorizado *on line*, que apresenta dados sobre fadiga do material em processo com base na alteração de resistividade, e que responde em tempo real com comandos aos erros de posicionamento planar, é utilizado na fabricação de circuitos impressos para telefonia celular [6].

Yilbas [13] desenvolveu um estudo estruturado, empregando o modelo matemático de análise fatorial por aproximação estatística. As tabelas de significância produzidas forneceram fatores que determinam a qualidade dos furos, no qual foram analisados a largura temporal dos pulsos, o conjunto de lentes focais, a energia unitária de cada pulso e espessura da peça. Nestas quatro variáveis foram estabelecidos quatro níveis previamente escolhidos para cada um dos parâmetros, nas regiões de maior interesse. Fixando três variáveis experimentou cada um dos conjuntos de parâmetros e construiu uma matriz na qual os coeficientes de cada termo recebeu um tratamento.

Levando em consideração os índices dos efeitos lineares, os de primeira ordem, e os de segunda ordem, e tendo quatro níveis de valores para cada parâmetro, nos quatro parâmetros temos algo como que 7.680 furos validados. Para desenvolver os cálculos foi providenciado um programa lógico dotado de algoritmo estatístico, que gerou três tabelas contendo 26 parâmetros em 8 quesitos cada uma delas.

Evidentemente um projeto destes é ambicioso, e para ser replicado prescinde de planejamento fundamentado em conhecimento preliminar das possibilidades, dos objetivos em âmbito mercadológico, e da constituição de uma equipe com apoio de ferramenta estatística computadorizada. O nosso trabalho tem como uma de suas propostas determinar os passos iniciais de cada um dos três métodos de furação, acompanhado de parametrização, que possa guiar futuros trabalhos mais específicos neste domínio.

Qualidade - Este é um assunto inesgotável que depende de muito boa vontade para frutificar resultados perceptíveis. Antes da segunda revolução industrial, a General Motors criou o conceito de que “qualidade é aquilo que o cliente quer”. Nos dias atuais, uma

empresa que faça investimentos em pesquisa e desenvolvimento para seus processos, espera encontrar parcerias cujos parâmetros de avaliação e obtenção de qualidade, levam em conta o ciclo de vida de um produto e os recursos humanos e técnicos empregados. Na gestão da qualidade total os processos devem ser analisados em contínuo, num sistema de *feed back* (realimentação em malha fechada), o controle da qualidade deve ser em tempo real e segundo Myiauchi [¹⁴], as práticas de mercado em padrões internacionais exigem que a garantia da qualidade tenha critérios que não podem depender das avaliações feitas em percentuais. Pelo padrão Seis Sigma da qualidade, os índices não podem ser alcançados por meio de inspeção, tendo confiabilidade em partes por milhar. São indispensáveis processos dotados de confiabilidade imposta por ferramenta computadorizada em tempo real, integrados em sistemas de rotinas, denominados CPM (*computing process management*).

3. Objetivos

Ao escrever este trabalho, procuramos somar informações que possam ser consideradas relevantes em três diferentes eixos na abordagem do tema “furação por *Laser*”. Desta forma foram constituídos três objetivos centrais.

Pela ordem que se apresentam, devemos fornecer suporte a uma discussão atualizada sobre os fenômenos ocorridos na produção de um feixe *Laser*, os critérios e recursos para análise e manipulação do mesmo, sua aplicação sobre uma superfície material e as interações da radiação com a matéria. Outro objetivo deste trabalho é o de tecer considerações detalhadas a respeito das condições de trabalho, no que se refere ao laboratório CPML, seu projeto e construção, seus recursos, características e parametrização. Um terceiro objetivo foi o de situar a questão dos fenômenos envolvidos durante o processo, no contexto das possibilidades da CPML, incluindo três diferentes métodos de processo, LSS, percussão e trepanação que foram desenvolvidos, aplicados e analisados.

Capítulo I - Fundamentos teóricos

4. Considerações iniciais

Uma vez que os fundamentos conceituais são amplamente publicados, bem como suas configurações comparativas, temos como proposta descrever sucintamente neste capítulo o módulo *Laser* Nd:YAG, e principalmente pormenorizar os fenômenos decorrentes da interação da radiação com a superfície do material, que vêm sendo alvo de exaustivas pesquisas, incluindo no capítulo experimental uma caracterização e parametrização do módulo utilizado.

4.1. Módulo *Laser*

Os principais componentes de um módulo *Laser* de estado sólido são o meio *Laser* ativo, o ressonador *Laser*, a fonte bombeadora e o sistema de refrigeração. O elemento ativo geralmente tem a forma de um longo bastão com as pontas planas e paralelas; a energia de bombeamento é fornecida por uma ou duas lâmpadas lineares de arco por gás, que são alimentadas por uma fonte eletronicamente chaveada, e dois espelhos dielétricos que formam o ressonador tendo o bastão *Laser* em seu eixo central.

O elemento *Laser* ativo de estado sólido mais utilizado atualmente é o Nd:YAG, onde YAG denota a matriz hospedeira *yttrium aluminum garnet* (estrutura granada de *yttrium* e alumínio), com fórmula $Y_3 Al_5 O_{12}$ [8]. O *neodímium* Nd é o dopante, íon com valência Nd^{3+} elemento da família terra rara, incorporado à rede cristalina como substitucional ao *yttrium* Y. O cristal de Nd:YAG é crescido pelo método de Czochralski, a velocidade aproximada de $1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, sendo incorporados dopantes numa proporção de 0,725% [9]. O cristal, que tem simetria cristalina cúbica, é crescido na forma de um tarugo com eixo maior na direção [111]. Posteriormente, o tarugo é usinado na forma de um bastão cilíndrico com 6 milímetros de diâmetro e comprimento entre 50 e 200 mm. Ao ser estimulado por luz branca, o íon dopante Nd^{3+} emite radiação fluorescente com comprimento de onda $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ e largura espectral $\Delta\lambda \sim 4 \text{ \AA}$. Esta radiação pode se transformar em *Laser* se o elemento ativo apresentar ganho suficiente e estiver adequadamente alinhado no interior de um ressonador óptico.

O regime de operação da emissão *Laser* é determinado pela fonte de bombeamento, ou seja, pela fonte chaveada de alimentação, e pode ser contínua ou pulsada. No caso do regime contínuo, o único parâmetro controlável é a potência do feixe *Laser*; no caso de regime pulsado, os parâmetros de controle podem ser a energia por pulso, a largura temporal de cada pulso e a taxa de repetição. Elementos colocados dentro do ressonador *Laser* ainda possibilitam a obtenção de outros modos temporais de operação; por meio de chaveadores *Q-switching* podem ser obtidos pulsos com largura temporal da ordem de dezenas ou centenas de nano-segundos, ou da ordem de dezenas ou centenas de pico-segundos por *mode-locking* (bloqueio de modos).

O acoplamento entre a energia fornecida pela lâmpada de bombeamento e o elemento *Laser* é feito por um invólucro que envolve os mesmos, o qual tem a função de transferir a maior parte possível da luz da lâmpada para o bastão *Laser*. Este invólucro é normalmente chamado de cavidade bombeadora, e pode ser construído de diversas maneiras. Pode ser um refletor especular cilíndrico ou elipsoidal, ou pode ser um refletor difuso, ambos com o bastão *Laser* e a lâmpada bombeadora no seu interior. A eficiência típica de um *Laser* de estado sólido, ou seja, a relação entre a energia armazenada nos capacitores da fonte de alimentação e a energia do pulso *Laser*, é de apenas 1 a 3 %. Assim, um eficiente sistema de refrigeração deve ser utilizado para arrefecer o excesso de energia, que é transformada em calor. Este sistema, geralmente fornece água gelada que circula pelo elemento *Laser* ativo, pela lâmpada e pela cavidade de bombeamento.

4.2. Parâmetros e sua relevância

O feixe *Laser*, daqui em diante denominado preferencialmente como 'feixe', acontece numa intrincada cadeia de eventos, alguns dos quais são intrínsecos do processo de geração e amplificação no ressonador, enquanto que outros, aos quais poderíamos chamar de extrínsecos, decorrem das configurações, ajustes ou mesmo inclusão de elementos no conjunto óptico, dispostos na trajetória para tratamento do feixe.

A energia contida em cada pulso denominada aqui como 'energia unitária', a frequência da emissão, determinada pelo comprimento de onda que pode ser visível, infravermelha ou ultravioleta; o formato do pulso, o modo espacial, conhecido por "transversal eletromagnético" TEM, a divergência do feixe como consequência da difração característica, a taxa de repetição num trem de pulsos, a largura temporal dos pulsos aqui

mencionada apenas como 'largura de pulso' e as aberrações são alguns dos parâmetros considerados entre os mais relevantes na avaliação do processo. Fazemos aqui uma descrição sucinta destes parâmetros e os efeitos que provocam, sem contudo entrar no equacionamento matemático.

A energia unitária dos pulsos, a densidade de energia que incide no ponto focal, e a energia média transferida por unidade de tempo contida no feixe, são fatores da maior relevância no processamento por *Laser*. O formato temporal do pulso é descrito aqui, apenas como 'formato do pulso'.

A taxa de repetição durante um trem de pulsos é um parâmetro que limita e é limitada pela largura dos pulsos. A largura de pulso é um parâmetro fundamental na determinação dos resultados do processo. Para um feixe produzido em *free path* (livre amplificação), tipicamente são gerados pulsos da ordem de dezenas de micro-segundos até mili-segundos, enquanto que por meio de chaveadores ou recursos mais sofisticados podem ser obtidos pulsos curtos ou ultracurtos, compreendidos para durações desde nano-segundo até femto-segundo respectivamente. O formato do pulso, ou seja, o perfil da amplitude de energia contida no feixe, distribuída no tempo de duração do pulso, teoricamente concebido como sendo retangular, geralmente tem forma trapezoidal com distorções que serão comentadas na descrição e caracterização da CPML. No caso de pulso retangular, admitimos para fins práticos que a potência de pico seja invariante para períodos longos, como para intervalos de tempo infinitesimais. Outro elemento importante, o modo TEM é a forma clássica de mencionar o modo transversal eletromagnético do feixe, fenômeno que tem lugar durante a sua amplificação, regendo o perfil da distribuição de energia e potência na seção transversal do feixe. O modo TEM pode ser único ou múltiplo. No caso de ser único pode ter ordem elevada ou reduzida. O modo TEM de menor ordem é o modo fundamental, ou TEM₀₀. A obtenção deste modo implica em baixa eficiência do sistema, e apresenta distribuição de potência com perfil gaussiano. Durante a propagação do feixe, o modo TEM se mantém praticamente invariante, o que não acontece com seu diâmetro. A divergência do feixe é consequência da difração que ocorre desde a amplificação do campo eletromagnético como consequência das características de emissão ainda dentro do ressonador *Laser*, e inclui efeitos ópticos gerados pelas interações durante a propagação. Embora muito menor que a de outras fontes de luz, a divergência de um feixe *Laser* não

pode ser desprezada, sendo que uma divergência menor que 1 mili-radiano somente é obtida ao custo de um considerável esforço.

As aberrações não constituem parâmetro de controle, sendo interferências que descaracterizam a coerência espacial, temporal e cromática do feixe [9], introduzidas por fatores que vão desde a concepção do ressonador, passando pela qualidade dos agregados do trem óptico como lentes, espelhos e prismas, indo até os ajustes de alinhamento e configuração do sistema. Muitos dos seus efeitos podem ser corrigidos pelo conhecimento aprofundado, cuidados na parametrização, inserção e ajuste do sistema.

4.3. Relações de Pertinência

Dado que o motivo principal de atenção neste trabalho é a identificação, estudo e caracterização dos fatores que implicam no incremento da qualidade cosmiética no processo de furação de metais por *Laser*, bem como a forma pela qual estes fatores se relacionam com o processo, consideramos oportuno absorver conceitos utilizados para representar operações padronizadas na melhoria da qualidade dos processos industriais, que foi muito bem discutido e adaptado ao processo de furação.

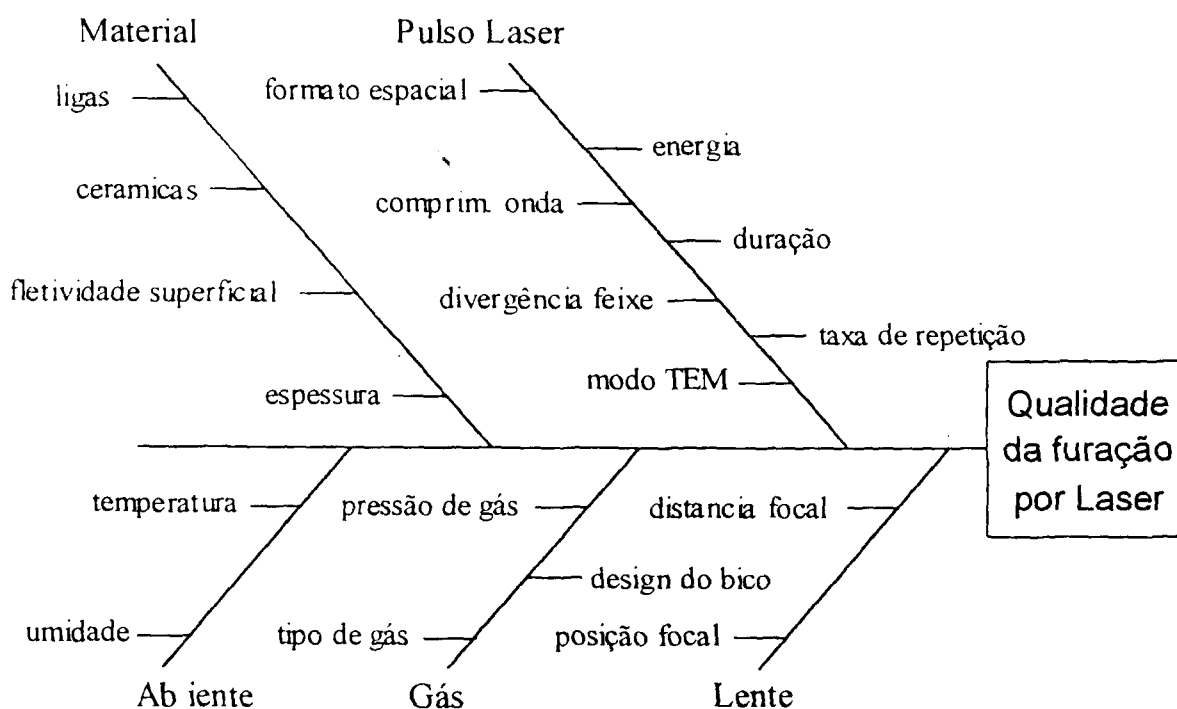


Figura 1 – Diagrama relacionando os parâmetros e sua influência.

Um esboço com base no diagrama proposto por Ishikawa, inicialmente desenvolvido e utilizado em sistemas da qualidade industrial, é apresentado na figura 1. Nele foi descrita e adaptada por Yeo [7] de forma sintetizada a interdependência entre os fatores mais relevantes na determinação da qualidade do processo de furação por *Laser*, e no qual podemos verificar a complexidade inicialmente citada. É oportuno comentar que o número de implicações é mais extenso, e que os fenômenos descritos não são seqüenciados mas combinados. Constitui uma intrincada malha de relacionamentos com diversos pareceres, conclusões e dúvidas que necessitam aprofundamento. Há estreita sinergia entre eles, fazendo com que uma abordagem abreviada, ou resumida, possa ser vista com restrições.

Se por um lado, os métodos de produção estão permanentemente sendo reavaliados, por outro lado, novas aplicações estão sendo solicitadas e desenvolvidas. O sistema produtivo assume complexidade e importância crescentes. Procuramos uma proposta para discutir os itens supostamente mais relevantes, tomando como base as informações contidas na literatura, e procurando preencher lacunas indispensáveis à escolha de futuros métodos, tornando assim o escopo bastante diversificado.

A elevada quantidade de itens mencionadas no diagrama da figura 1 não traduz por inteiro a natureza das características de cada um dos itens. Outro centro de atenção é a relevância com que cada um destes itens influem sobre o processo de furação por *Laser*, e quais são os parâmetros que devem balizar o trabalho. Por meio do diagrama de Yeo podemos visualizar a extensão das implicações relacionadas com o processo a que nos propusemos, evidenciando que alguns destes itens de controle têm maior relevância que outros, dependendo dos objetivos previstos. Evidentemente, ao elaborar o projeto e durante o desenvolvimento dos experimentos, alguns destes parâmetros acabaram se demonstrando mais influentes que os demais.

4.4. Principais aspectos qualitativos do feixe *Laser*

Este é um assunto bastante delicado, que assume complexidade e importância crescentes, dado que a intrincada malha de parâmetros vem sendo estudada, indicando que um sistema com elevado desempenho simultaneamente para pesquisa e produção operacional, em escala industrial multi-processos, possa significar um investimento difícil de ser justificado. Por isto, consideramos mais proveitoso mencionar os elos de maior relevância do assunto.

Um sistema ou equipamento destinado à pesquisa deve ter alto grau de compatibilidade, confiabilidade e versatilidade, características que para produção em escala são pré calibradas e padronizadas, dispensando a exploração dos limites operacionais. Por outro lado, na indústria os pontos frágeis são cuidadosamente contabilizados, diluídos nos custos e repassados no preço. Uma configuração não seriada prescinde de um diversificado ferramental, a manipulação de recursos que na indústria dispensariam calibração rotineira, a parametrização automatizada e aquisição de dados em tempo real, merecendo permanentes investimentos a fundo perdido.

Os itens de que trataremos a seguir são de complexa mensuração, até porque para cada uma das técnicas de furação, existe um número razoável de aplicações. Assim procuramos descrever cada um independentemente, justificando nossa preocupação com cada qual pelo conteúdo das publicações a respeito.

4.4.1. O comprimento de onda

Além de exercer papel de fundamental importância na determinação do comportamento do feixe em sua trajetória, seu tratamento, e sua focalização, o comprimento de onda de um feixe *Laser* tem destacada importância na absorção do mesmo pelo material processado. Trata-se do acoplamento eletromagnético que é ou não favorecido pelas características intrínsecas da composição química, de estrutura molecular e das propriedades físicas da superfície no que se refere à reflexão, condução de calor, permeabilidade magnética, porosidade, rugosidade, dureza, ponto de fusão entre outros. Tanto a linha de emissão *Laser* como a largura espectral são geralmente constantes, sem flutuações significantes podendo ser desprezadas para efeito prático..

Ocorre que o *Laser* de neodímio tem sido utilizado para uma maior variedade de aplicações que outros tipos de *Laser* [9] e o que mais tem sido pesquisado e desenvolvido entre os de estado sólido. Fica aqui sugerido um estudo posterior mais aprofundado dos diferentes índices e características de absorção.

Embora 'óptico' seja um conceito associado com a visão e com a luz, 'ótico' (do grego - *otós*) se refere a orelha ou audição.

Óptica Gaussiana - Comparativamente, o comportamento do feixe *Laser* durante a sua propagação apresenta comportamento parecido com o da óptica geométrica apenas em termos gerais. Fowles [1] apresenta um estudo da natureza eletromagnética e da propagação da luz. O feixe *Laser* desenvolve uma distribuição de energia na forma de sino, cuja função matemática é uma gaussiana. Na óptica gaussiana, uma das características do feixe em propagação é a curvatura da superfície que contém a frente de onda.

Esta curvatura é uma função [15] da distância da trajetória a partir da cintura do feixe ou ponto focal. Para um ponto infinitesimalmente aproximado do foco o raio desta curva tende a infinito, ou seja a curvatura é desprezível, e para um ponto de distância infinita do foco o raio se aproxima da medida da própria distância percorrida.

A função que define o raio R da curvatura da frente de onda como função da trajetória z do feixe, é dado por $R_{(z)}$ na equação (1) sendo π constante, Z é a distância a partir do ponto de menor diâmetro do feixe, ou cintura. λ é o comprimento de onda da radiação e w_0 é o raio do feixe na cintura.

$$R_{(z)} = Z \cdot \left[1 + \left(\frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda \cdot Z} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Por sua vez, o comportamento dimensional $w_{(z)}$ da projeção do feixe como função da distância z que é o raio do feixe para uma distância Z , a partir do ponto que a frente de onda é plana, não é linearmente proporcional, obedecendo a equação (2) que determina o raio do feixe em função da trajetória.

$$w_{(z)} = w_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{\lambda \cdot Z}{\pi \cdot w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

Na óptica gaussiana o ponto focal é situado sobre o eixo da trajetória, no qual a imagem não tem dimensão zero, justamente pela natureza divergente, intrínseca da radiação *Laser*, que será discutida no item sobre “**qualidade do feixe**”. Utilizando a equação (3) podemos calcular o ângulo divergente [16] de um feixe *Laser* no modo fundamental.

$$\theta = \lambda (\pi \cdot W_0)^{-1} \quad [\text{radianos}] \quad (3)$$

Sabendo o ângulo de divergência do feixe em propagação, numa distância Z muito grande, considerada no *far field*, usamos a aproximação assintótica da equação (4).

$$W_{(z)} = Z \cdot \theta \quad (4)$$

Um feixe isento de aberrações, pode ser focalizado num dado ponto por meio de uma lente com distância focal curta, também chamada lente de focalização rápida ou ainda “lente rápida”, cujo elevado ângulo de convergência θ pode ser determinado em função do diâmetro S do ponto focal desejado, do comprimento focal f da lente, do comprimento de onda λ , do diâmetro original D do feixe constricto por uma íris, e de uma constante k que depende da distribuição de intensidade do feixe sobre a lente, conforme as seguintes igualdades de Melles [16]:

$$S \cdot D = f \cdot \lambda \quad (5)$$

$$S \cdot \theta = k \cdot \lambda \quad (6)$$

$$f \cdot \theta = k \cdot D \quad (7)$$

Isolando a variável θ em (6) ou (7) temos que o ângulo de divergência que pode ser determinado respectivamente pelas equações (8) ou (9), dependendo do parâmetro que desejamos impor, diâmetro do disco iluminado ou distância focal da lente. Em valores do modo fundamental, o diâmetro do feixe é $2w_0$, e o ângulo de divergência máxima é $2\lambda (\pi \cdot w_0)^{-1}$, sendo $4 \cdot \pi^{-1}$ o valor mínimo da constante k .

$$\theta = k \cdot \lambda \cdot S^{-1} \quad (8)$$

$$\theta = k \cdot A \cdot f^{-1} \quad (9)$$

Região de Rayleigh - nome dado ao parâmetro confocal. Lord Rayleigh [16] pesquisou e escreveu em 1901 sobre o espalhamento especular de luz sobre uma superfície rugosa.

Levando em consideração as análises de Köchner [10], e tendo que a cintura (*waist*) é o ponto da trajetória onde o feixe tem o menor raio w_0 , no sentido da trajetória para além deste ponto o feixe começa a divergir numa aproximação assintótica ao cone ideal. A região mais provável desta cintura pode ser matematicamente determinada utilizando o

método de mínimo de uma função tomando a equação (1) do raio R como função da propagação, igualando a zero a primeira derivada em z , como indicado na equação (10).

$$\partial(R)/\partial z = 1 - \left(\frac{\pi \cdot \omega_0^2}{\lambda \cdot Z} \right) = \text{zero} \quad (10)$$

Temos então que a distância entre o ponto Z da trajetória no qual a frente de onda é plana, e o ponto divergente forma um quase-cilindro, ilustrado na figura 2, conhecido também como parâmetro confocal, região em cujas extremidades temos o diâmetro que é $2^{0,5}$ vezes maior que o diâmetro na cintura, fazendo com que a área iluminada pelo feixe seja o dobro da área na cintura. Esta distância pode ser calculada conforme a equação (11), sendo que a região de Rayleigh tem dimensão $2Z$.

$$Z = \pi \cdot \left(\frac{\omega_0^2}{\lambda} \right) \quad (11)$$

Por esta equação temos que, sendo constante o comprimento de onda λ , a única variável para se determinar esta distância é o raio da cintura ω_0 . Um estudo detalhado sobre a forma como um expensor pode minimizar a divergência do feixe é apresentado por Melles [16].

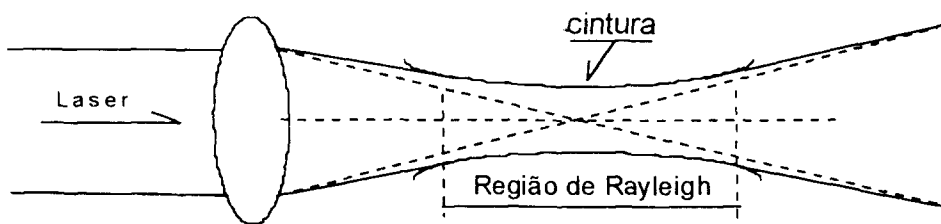


Figura 2 - Trajetória produzida pela óptica gaussiana

Ao longo do eixo de propagação, a curvatura da frente de onda $R(z)$ varia, sendo plana (raio tendendo ao infinito) e com diâmetro do feixe aproximadamente constante nas proximidades da cintura, região de Rayleigh. Temos então uma região na qual, pela sua divergência, o feixe começa a se aproximar assintoticamente de um cone com vértice na

cintura. Para além desta região a curvatura da frente de onda é uma função linear da distância percorrida, conforme a equação (1) e aproximada pela equação (3).

Qualidade do feixe - As características acima descritas são verdadeiras para um feixe gaussiano ideal. Por esta análise, podemos conceber o comportamento geral do feixe [17] [18]. Uma curva em forma de sino, é representada no domínio matemático por uma função gaussiana simples, que apresenta um único pico [19]. Na seção transversal da distribuição de intensidade de um feixe *Laser*, este perfil corresponde ao modo transversal eletromagnético fundamental TEM₀₀. Para feixes com modo TEM de ordem superior, ou mesmo feixes em multimodo, um programa lógico microprocessado [20] pode desenvolver uma envoltória (*envelope*), com distribuição estatística ponderada, equivalente ao modo fundamental. Para uniformizar as avaliações de mérito qualitativo de um feixe *Laser*, têm sido propostos diversos métodos derivados do princípio da incerteza quântica. Foram necessários vários estudos, que se demonstram aplicáveis para descrever a influência da propagação em um feixe arbitrário.

A adoção de um parâmetro que possa representar a qualidade espacial é ferramenta indispensável no aprimoramento dos processos. Em sendo possível tomar este índice por meio de uma quantidade mensurável que descreva a propagação, a qualidade do feixe passa a compor o *mix* de variáveis do sistema. Até recentemente, não havia um consenso relacionado ao conceito do fator de propagação do feixe. Pela análise tridimensional do feixe, ao longo de seu eixo de propagação e na sua seção transversal, se pode determinar as propriedades espaciais. Estas propriedades incluem diâmetro, divergência, distribuição de potência e constante de propagação [21]. Na maioria dos casos, obter um disco iluminado de tamanho reduzido produz resultados melhores que o aumento da potência, ou energia, total contida no feixe.

O perfil do feixe pode ser concebido pela intensidade – potência por unidade da área normal ao eixo de propagação – que teoricamente é considerada como tendo distribuição gaussiana perfeita. Na prática isto não acontece, sendo que a cintura e a divergência são muito maiores. Para um feixe com difração controlada, há um valor mínimo definido pelo produto entre o diâmetro na cintura e o ângulo da divergência. Produtos destes dois valores são descritos como tendo *n* vezes o limite de difração. Um número adimensional M^2 , que

descreve uma constante de propagação, foi criado para representar o fator qualidade do feixe, com M^2 sendo determinado pela equação (12).

$$w_0 \cdot \alpha = M^2 \cdot \lambda \cdot \pi^{-1} \quad (12)$$

Onde w_0 é o raio do feixe medido na cintura e λ é o comprimento de onda. Qualquer feixe real tem valor M^2 muito maior que a unidade. A maioria dos sistemas ópticos são concebidos admitindo que o feixe é perfeitamente gaussiano com $M^2 = 1$. Num exemplo prático da influência da divergência, a cintura de um feixe com $M^2 = 3$ é quase três vezes maior utilizando a mesma lente focal, e com divergência maior, do que um feixe gaussiano. Para um dado feixe, o produto entre o seu raio medido na cintura w_0 , e o semi ângulo α da divergência, é constante podendo ser determinado pela relação $\lambda \cdot \pi^{-1}$. Sendo o comprimento de onda constante, esta relação também é constante, e define um feixe com difração limitada.

O semi ângulo divergente α medido no *far field* (campo distante), dado em radianos, como função do raio na cintura do feixe w_0 e do seu fator qualidade M^2 , para um feixe *Laser* com comprimento de onda $\lambda = 1064$ nm apresenta a relação $w_0 \cdot \alpha \cdot M^{-2} = 339$ nm. Isto ilustra a variação da divergência maior para um diâmetro menor na cintura, uma vez que M^2 permanece invariante. Um arranjo óptico pode ser idealizado para se obter um disco iluminado menor, porém aumentando a divergência do feixe. Depreciando a qualidade do feixe o valor M^2 aumenta, tornando maior a divergência α para um raio constante da cintura w_0 do feixe. Por meio de uma série de medições do diâmetro na cintura e em diversas posições no campo distante, ao longo do eixo de propagação, é possível determinar o ângulo divergente, calculando então a constante de propagação do feixe. As medições no campo distante podem se tornar complicadas pelo arranjo exigido. Porém, as instabilidades que ocorrem no *near field* (campo adjacente) provocam oscilações na difração, prejudicando a confiabilidade das medições. Este efeito é observado pelo desvio embutido no cálculo. Uma vez abordado o aspecto dimensional, analisamos agora os métodos de se obter tais medidas.

“Tem sido dito que medir o diâmetro do feixe *Laser* é o mesmo que medir um cotonete com paquímetro.” Roundy et all. [22]

Medição do feixe - Podemos citar cinco entre os métodos para medir o diâmetro do feixe mais utilizados. O método “energia de pico *versus* a percentagem de energia”, o método borda de faca D_{KE} , o método da energia percentual, o método de abertura variável D_{86} e o método do segundo momento $D_{4\sigma}$. [22]

O método da percentagem é insensível aos erros de *offset*, mas em muitos casos é muito sensível ao erro de cálculo, oriundo das oscilações no valor de pico. Enormes discrepâncias podem ser observadas dependendo do padrão de distribuição. Os demais métodos descritos abaixo contêm pesada influência dos erros de *offset*. Um erro puntiforme de insignificante percentagem, integrado na área total, pode propagar enorme erro na determinação do valor do diâmetro do feixe, posto que uma câmera CCD de boa resolução contém algo em torno de um milhão de células.

O método de leitura em borda de faca é definido pela percentagem da energia total contida no feixe, que impõe as bordas limite. A dimensão é medida como a distância estimada entre os pontos nos quais o valor da energia representa 10 e 90 % do total, sendo então aplicado um fator de correção. O método da energia percentual gera uma janela por meio do software em torno do centróide do feixe e compara com a energia total do mesmo, aumentando incrementalmente seu tamanho. É uma aproximação variável onde os valores unitários de cada célula são somados em ordem decrescente até totalizar a percentagem preestabelecida. O diâmetro é então suposto como equivalente ao diâmetro circular que contém os valores somados.

O método de abertura variável denominado D_{86} é um caso particular aprimorado do método da energia percentual onde a janela gerada pelo software tem seu tamanho aumentado até uma percentagem predefinida de 86,47 % da energia total do feixe medido. Este valor é originado desconsiderando os índices de intensidade que têm atenuação maior que a exponencial (-2), ou seja $1 - \exp(-2) = 1 - 0,1353 = 0,8647$ produzindo, para feixes puramente gaussianos, um diâmetro equivalente ao “método do segundo momento”.

O método do segundo momento $D_{4\sigma}$ é considerado por muitos como a verdadeira definição da medida do diâmetro, mas apresenta grande dificuldade de implementação. Neste método a energia lida é multiplicada pelo quadrado da distância do centróide, e então

integrado, produzindo uma medição mais isenta de erro na leitura. Contudo, o ruído na borda do feixe contribui com erro excessivo, resultando em amplo desvio.

A hipersensibilidade ao espalhamento, a pobre concordância entre diferentes métodos, e a dependência de apenas um único e confiável número para determinar o fator de propagação M^2 do feixe, tem produzido prolongadas discussões a respeito do método mais adequado para medição. Em 1994 foi proposto à ISO (*International Standardization Organization*), um padrão internacional de medição [23]. Este método é muito mais interessante para feixes que apresentam elevada divergência, e que degeneram rapidamente as suas qualidades durante a propagação. O escopo do critério proposto por Lawrence inclui principalmente feixes produzidos em cavidades estáveis e também contempla feixes ligeiramente instáveis. Um feixe *Laser* com muito boa qualidade pode ter $M^2 \sim 1,1$ enquanto que um feixe com $M^2 > 1,5$ pode ser considerado pobre. O método mais preciso é do segundo momento, descrito na equação (14) na qual Δx é a distância entre o ponto lido e o centróide do feixe.

$$\sigma_x^2 = \frac{\iint I(x, y)(\Delta x)^2 \cdot dx \cdot dy}{\iint I(x, y) \cdot dx \cdot dy} \quad (13)$$

Este critério potencializa os valores de intensidade, sendo excessivamente sensível ao espalhamento, o que o torna inadequado aos feixes multi modo principalmente para leituras próximas da cintura, sendo mais tolerante com as medições feitas no campo distante. Por ser mais insensível ao espalhamento, os métodos borda de faca e o de abertura variável parecem mais apropriados para feixes instáveis, particularmente em medições próximas à cintura. Entretanto os erros introduzidos na leitura de intensidade os tornam imprecisos. Para possibilitar a utilização de algoritmo com segundo momento, uma combinação contendo um *software* de boa qualidade e com recursos avançados, pode construir um ajuste polinomial para minimizar as aberrações, e formar uma matriz numérica com redistribuição equivalente ao modo fundamental.

Na equação (15) então proposta, d_0 é o diâmetro do feixe na cintura, α é o ângulo divergente lido, e λ é o comprimento de onda. Neste passo é vantajosa a determinação de M^2 pelo método de abertura variável simulada.

$$M^2 = \frac{\pi \cdot d_0 \cdot \alpha}{4\lambda} \quad (14)$$

As técnicas de medição afetam os valores medidos. Conseqüentemente, na comparação dos valores medidos, é um dado crítico que eles tenham sido medidos pela mesma técnica. Vários métodos têm sido utilizados, mas os erros podem ser constatados mesmo comparando medições feitas pelo mesmo método.

É indispensável o emprego de um dispositivo que pode ser uma câmera CCD, ou dispositivo de varredura de fenda, ou varredura de perfil em borda de faca. Cada um destes recursos tem suas vantagens e desvantagens. A medição por varredura em fenda não requer atenuação, tem elevada resolução mas pode medir feixes de diâmetro elevado, geralmente maior que 20 μm e é menos apropriada às análises de estruturas finas que podem existir no perfil de intensidade. Na medição em borda de faca os bloqueios são acionados mecanicamente durante a leitura, e a precisão deixa a desejar. Sua resolução é de até 100 nm podendo ser usada na análise de feixe mais delgado que 3 μm mas, também neste caso, as estruturas finas são negligenciadas.

Câmera CCD (*charge coupled device*) - é um transdutor que consiste numa matriz de fotoelementos, máxima sensibilidade em torno de 800 μm , com arranjo bidimensional composto de *pixels* (*particle induced by Xray emission cells*), elementos semicondutores fotosensíveis, que registram um padrão ótico. Uma resolução microprocessada produz um padrão gráfico de distribuição baseado nas intensidades obtidas na câmera. Este padrão pode ser acessado de várias formas e armazenado em disco flexível. A desvantagem deste instrumento é a limitada resolução de cada *pixel* que faz a câmera saturar facilmente. Esta técnica exige, pela sensibilidade da câmera, um arranjo óptico para medição que atenuie substancialmente o feixe antes de incidir sobre a mesma. Com a interposição de separadores e filtros de feixe, a técnica de atenuação geralmente causa distorção na distribuição da intensidade produzindo resultados imprecisos [24]. A equação (15) foi proposta por Johnston [19] e pode ser utilizada com uma boa aproximação para determinar o fator de propagação do feixe, quando se conhece o ângulo de divergência do feixe.

$$M^2 = 0,25 \pi \cdot \theta \cdot 2W_0 \cdot \lambda^{-1} \quad (15)$$

Uma ressalva que pode ser feita a este cálculo é o erro nas medições próximas à cintura de um feixe instável, com multi modo TEM. Outra forma de conhecer este fator de maneira direta é proposto por Sasnett [25] efetuando medições do diâmetro do feixe, ao longo da trajetória numa ampla região que pode ser próxima da cintura, e interpolando os valores por meio da equação (16).

$$W(z) = W_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{M^2 \cdot \lambda \cdot z}{\pi \cdot W_0^2} \right)^2} \quad (16)$$

Onde M^2 é o fator qualidade do feixe, $W(z)$ é o raio do feixe como função da distância na trajetória, w_0 é o raio do feixe na cintura, λ é o comprimento de onda, Z é a distância medida da cintura ao longo da trajetória, também conhecido como parâmetro confocal ou parâmetro de Rayleigh. Pelo uso desta equação podemos determinar o valor de M^2 , independentemente para coordenadas retangulares x e y , uma vez que a divergência não necessariamente tem mesmo comportamento para ambas como função de alguma aberração ou efeito de astigmatismo que possa estar presente.

O desenvolvimento de aplicações *Laser* depende da confiabilidade do processo, custo, potência e pulsos característicos do equipamento disponível [26]. Um critério, para o dimensionamento do arranjo óptico destinado ao processamento, deve incluir distância focal e qualidade das lentes, para se obter a dimensão do disco iluminado no foco bem como a divergência esperada. O diâmetro do disco iluminado é decisivo no diâmetro do furo e na sua qualidade cosmética. A divergência implica em conicidade o que altera a precisão e confiabilidade nos valores de diâmetro e razão de aspecto.

“A redução do disco iluminado é mais importante que a potência total.”

Dones & Scott

Com limitação na transferência de calor, o resultado na produção de furos é mais limpo, isento de material ressolidificado e diminuição da HAZ (*heat affected zone* - zona afetada pelo calor). Processamento em elevadas intensidades causa efeitos não lineares que tendem

a desfocar o feixe, limitando a penetração e aumentando a conicidade. Obter as condições que excedem os valores para limiar de energia e intensidade, requer utilização de lentes focais adequadas. Assim, pode ser produzido um feixe com difração limitada no foco, sendo que a dimensão do disco iluminado que limita a difração é dada por (17)

$$d_{\text{MIN}} = 4F\lambda \cdot \pi^{-1} \quad (17)$$

onde d_{MIN} é o diâmetro mínimo do disco iluminado, F é a razão entre a distância focal e o diâmetro inicial do feixe, λ é o comprimento de onda. Aplicando esta equação para um suposto feixe *Laser* no modo fundamental puro ($M^2 = 1$), diâmetro inicial do feixe tendo 16 mm e lente focal 100 mm fica o valor $F = 6,25$. Sendo $\lambda = 1064$ nm temos diâmetro mínimo no ponto focal $d_{\text{MIN}} = 8 \mu\text{m}$. Como consequência do uso de ótica focalizadora a profundidade do foco afeta a profundidade de penetração, e o formato do furo. A profundidade do foco para um feixe limitado por difração pode ser calculada em (18)

$$d_f = 2.56F^2\lambda \cdot \pi^{-1} \quad (18)$$

Para os mesmos valores do exemplo anterior, a profundidade do foco $d_f = 34 \mu\text{m}$. O incremento no tamanho do disco iluminado está restrito a menos de 5 % para se obter os resultados esperados. As equações para feixe com difração limitada requerem um cuidado especial para aplicação em feixe de baixa qualidade, pela maior dimensão do disco iluminado e mais rasa a penetração do foco obtido. Furos mais profundos que o parâmetro confocal podem ser obtidos mas com significativa conicidade.

Aumentando a distância focal é possível perfurar chapas com espessura maior e com menor conicidade, mas isto produz feixe com cintura aumentada, que pode causar degradação na qualidade quando se deseja um diminuto disco iluminado, por exemplo para produzir trepanação com aspecto polido. As restrições mencionadas podem provocar ajustes empíricos tediosos da posição focal para reduzir a conicidade.

A função que define a o parâmetro confocal Z_R , sendo este o comprimento da trajetória com diâmetro quase constante, em cujas extremidades o raio do feixe é $2^{0.5}$ vezes o raio na

cintura w_0 , e para um suposto valor $M^2 = 12$, comprimento de onda $\lambda = 1064$ nm, raio do feixe na cintura $w_0 = 150$ μm , pode ser determinado pela equação (19) tendo $Z = 5,5$ mm.

$$Z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda \cdot M^2} \quad (19)$$

O parâmetro confocal Z , que determina a dimensão longitudinal da região de Rayleigh, pode variar amplamente como função de w_0 , e também como função do fator qualidade do feixe. Isto pode ser resolvido, pela troca da lente por outra com distância focal diferente. Uma diminuição na distância focal significa aumento na divergência do feixe. Tahmouch [27] apresenta um estudo da influência da distância focal, que pode gerar uma degradação por espalhamento, atenuação pela nuvem de plasma que se forma diante do ponto focal [28]. As emissões cintilantes da poça estudadas por Yilbas [29] e as múltiplas reflexões da geometria da camada fundida que se forma na cratera constituem fatores de incerteza na determinação dos efeitos secundários. As medições do diâmetro do feixe utilizado são apresentadas no capítulo experimental. [30] [31]

4.4.2. Lente térmica

Como consequência do arrefecimento e da geometria do bastão, um perfil radial de temperatura é induzido no interior deste, que provoca distorção no feixe [32]. O ciclo óptico a que se submete uma transição, durante a emissão *Laser*, tem parte de sua energia dissipada na forma de energia térmica ou calor. Este calor é resultado da relaxação de estados quânticos excitados que decaem espontaneamente propagando-se pela rede cristalina na forma de fônons acústicos.

A geometria cilíndrica do bastão favorece a dissipação do calor por condução radial no seu contorno, interface do mesmo com o líquido refrigerante, ou seja na sua superfície externa. Como consequência natural do perfil radial de acúmulo de calor, há maior aquecimento na região central, e portanto há propagação de calor obedecendo a lei de difusão da maior para a menor concentração, ou seja, do centro para a periferia, mantendo uma intensidade maior de calor acumulado a partir do centro diminuindo em direção à superfície.

A rede cristalina é deformada por decorrência do gradiente térmico, que dá origem a dilatações geométricas desiguais, implicando numa deformação maior da região central do

bastão. Quanto melhor for a qualidade do bastão, mais reduzidas são as imperfeições cristalinas que provocam deformações assimétricas. O fornecimento de energia luminosa da lâmpada bombeadora, no volume do bastão *Laser*, pode ser considerada homogênea. A refrigeração, contudo, ocorre somente na superfície do cilindro cristalino, gerando assim, um gradiente radial de temperatura. No centro a temperatura é consideravelmente mais alta que nas bordas, podendo chegar próximo de 120 °C, com gradiente de 25 °C.mm⁻¹ que é o responsável pelo aparecimento de uma aberração de segunda ordem no bastão. Isto ocorre devido ao fato de que o índice de refração do cristal depende da temperatura, e como esta tem uma dependência quadrática com a distância ao centro do bastão, temos como resultado final, um comportamento semelhante ao de uma lente presente no interior do mesmo, ou seja, o elemento ativo comporta-se do ponto de vista óptico, como se fosse uma lente espessa.

Segundo Lancaster & Dawes [33], uma lente térmica surge durante o bombeamento por lâmpada, por causa da ineficiência no acoplamento de energia da lâmpada para com os íons ativos do bastão. Segundo este trabalho, uma reduzida taxa de repetição dos pulsos reduz também a lente térmica. Significa dizer que quanto maior a potência média, maior deve ser a lente térmica. Porém não relaciona o regime estacionário ao gradiente dinâmico de temperatura, nem a lente térmica dinamicamente variável, bem como a simetria geométrica do bastão. Há uma drástica redução no rendimento, como consequência da lente térmica [9], se não houver arrefecimento eficaz.

Obviamente, como o gradiente de temperatura depende da potência fornecida à lâmpada, esta lente, chamada “lente térmica induzida”, irá depender da potência com que *Laser* opera. Assim, para cada potência média de operação, teremos uma particular lente térmica no interior do ressonador. Esta tem portanto, que ser considerada quando do cálculo no projeto do ressonador. Esta lente térmica considerada dinâmica quando a taxa de repetição for menor que 10 Hz, variando assim a forma espacial do feixe durante o desenvolvimento da ação *Laser*, sendo entretanto estacionária se o sistema opera com uma taxa de repetição acima desta frequência. Por isto, é conveniente procurarmos manter constante a potência média de operação mesmo nos casos em que apenas um pulso foi utilizado.

Ao mantermos constante a potência média desenvolvida no interior do ressonador, não estamos garantindo nem prestigiando a formação de um determinado modo TEM, mas sim

a ocorrência de um ciclo térmico de regime estacionário análogo, que tem características semelhantes para um dado arranjo dos parâmetros, que por sua vez é responsável pela manutenção da estabilidade térmica e pela similaridade na configuração cristalina do bastão, onde as características geométricas de propagação luminosa exercem a tendência de produzir um modo TEM similar, por similaridade de condições termofísicas. Além disso, é recomendável manter constantes as temperaturas da sala e do arrefecimento.

5. Interação do feixe *Laser* com a matéria

Dependendo da natureza do material a ser processado e das características do feixe *Laser*, podemos esperar um dado desempenho do processo onde as principais características de afinidade descritas no início, são resumidamente a largura de pulso, o acoplamento entre a cor do feixe e a absorção típica, a refletividade, a difusividade térmica, o ponto de fusão, e a energia contida em cada pulso.

O ciclo completo de furação é algo complexo e não linear. Os fenômenos envolvidos acontecem numa trama de efeitos simultâneos e sequenciais. No momento da incidência do feixe sobre uma superfície metálica o padrão de rugosidade é alterado bruscamente. A oxidação inicial também é responsável pelo aumento da rugosidade e pela migração de impurezas intersticiais. O padrão de rede muda com a evolução do ciclo pela duração do pulso. Dependendo do gradiente de potência e da intensidade do feixe, bem como do formato temporal do pulso, acontece uma extração que inicialmente forma pequena quantidade de vapor inibindo a incidência do feixe sobre a superfície, e com isto maior quantidade de metal fundido forma uma poça. As explosões de plasma que ocorrem no interior da poça geram as instabilidades dinâmicas que, além de alterar o padrão de rugosidade, também concorrem para arremessar material fundido para fora da poça e com isto perde energia, voltando ao estado inicial de vaporização. Como formato adotado neste capítulo buscamos torná-lo o mais objetivo e conciso possível.

Um modelo relacionando as interações ocorridas neste intervalo é apresentado no diagrama da figura 3. Por meio de uma representação esquemática foi concebido este modelo por Kar & Mazunder [³⁴] das interações inerentes ao processo de furação por *Laser*. Num processo priorizando a extração por meio de vapor, os índices de intensidade do feixe bem como de gradiente de potência devem ser mais intensos, os pulsos curtos ou mesmo ultra

curtos são mais adequados, principalmente no caso de metais ou ligas com elevadíssimo ponto de fusão e alto coeficiente de difusividade térmica.

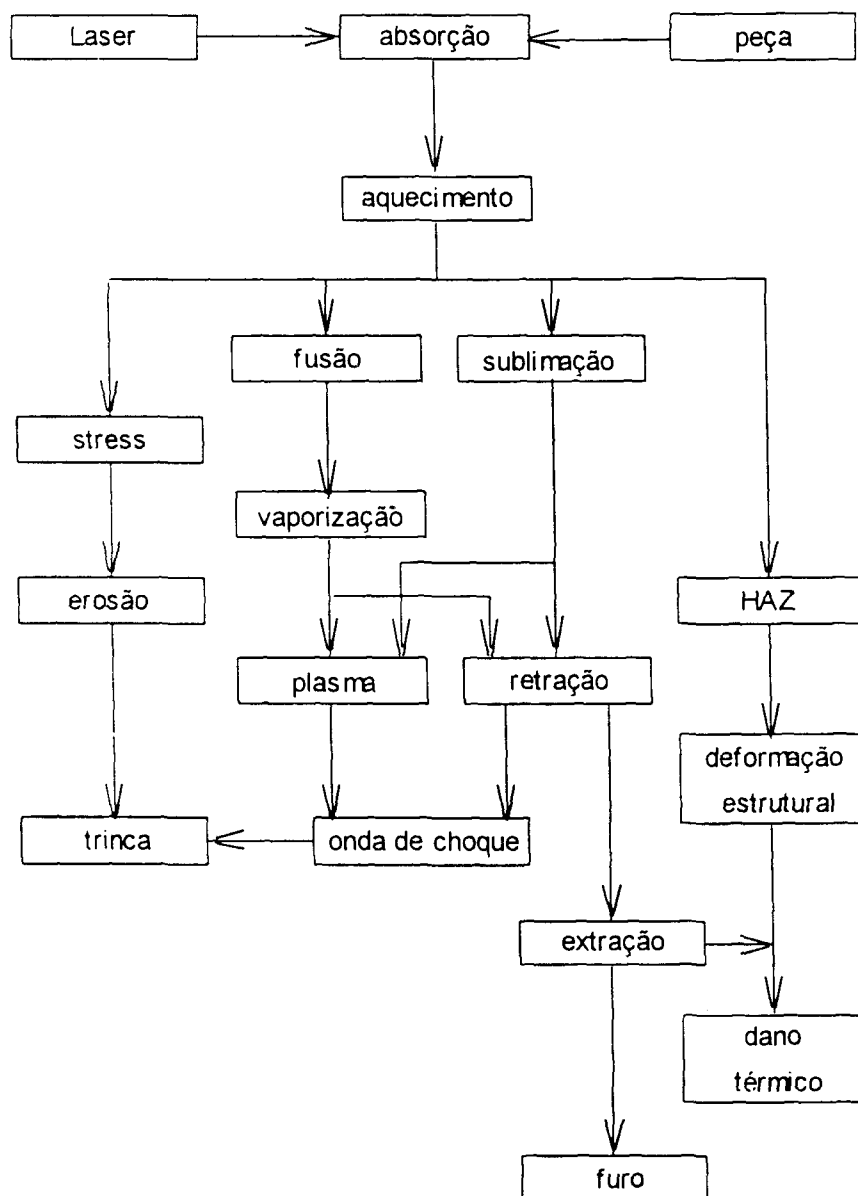


Figura 3 – Interações ocorridas durante a furação.

Para furação de chapas finas, imediatamente após os primeiros pulsos a perfuração se completa, mas quando aumenta a espessura, é necessário um trem de pulsos tanto maior quanto menores forem a energia unitária e à taxa de repetição. Neste caso pode não haver perfuração, caso as explosões de plasma não sejam suficientemente fortes para expulsar material. Se isto ocorre, a quantidade de material fundido, retido dentro da poça, pode ser

suficiente para inibir o avanço do processo, quando a formação de nuvem de vapor metálico ofusca o brilho da radiação incidente a ponto de não haver extração.

O metal fundido que é empurrado contra as paredes do furo implica num acabamento melhorado do processo. Por isto, quando se deseja extração principalmente líquida os pulsos devem ter duração temporal que permita um esfriamento gradativo. Com este perfil, a HAZ também aumenta.

Modelos de interação - Há dois modelos principais pelos quais podemos analisar a interação do feixe com a superfície material. No modelo térmico a energia do feixe excita os elétrons, que rapidamente transferem sua energia pela emissão de fônons reequilibrando a vibração de rede. Por este modelo a energia absorvida é convertida em calor. No modelo plasmático a taxa de aumento na emissão de fônons é muito menor que a taxa de absorção. Por este modelo, em sendo elevado o coeficiente de absorção, as mudanças estruturais conferem desestabilização das ligações covalentes por meio da excitação eletrônica. Para uma dada excitação elevada o suficiente dos elétrons de valência, do estado de ligação para o de repulsão, ocorre instabilidade seguida de transição de fase estrutural. Uma abordagem aprofundada deste assunto é discutida por Mazur [35], que trata principalmente da absorção de radiação pela amostra submetida à irradiação por feixe *Laser*, que descreve os efeitos quânticos da radiação sobre a superfície.

5.1. Abordagem quântica [35]

Há uma relação linear entre a frequência angular $\omega = 2\pi f$ e o vetor de onda gerando na interação $k = 2\pi \cdot \lambda^{-1}$, dando a relação $\omega = c.k$. A frequência de propagação desta onda é uma resposta do meio sólido para uma determinada frequência da radiação, e depende do campo eletromagnético incidente, e das características físicas como constante dielétrica, permeabilidade magnética, condutividade elétrica. Ondas geradas de diferentes frequências se propagam a diferentes velocidades, determinando diferentes propriedades ópticas.

Para frequências de onda abaixo da frequência de plasma, o valor da constante dielétrica provoca forte atenuação do acoplamento eletromagnético. Acima da mesma, as ondas se propagam, e para frequências elevadas a função dielétrica se aproxima da unidade, otimizando o acoplamento. Os elétrons agem como filtro passa alta. Abaixo da frequência

de plasma ocorre reflexão, ao passo que acima da mesma os elétrons livres são transparentes à radiação.

Níveis de energia mais baixos correspondem ao estado de ligação, enquanto que aos mais elevados corresponde anti-ligação. Nos sólidos não metálicos e compostos, os elétrons compartilhados nas ligações covalentes resultam em ligações fortíssimas, tornando os sólidos densos e quebradiços. Nas ligações iônicas existe troca de um ou mais elétrons resultando em forte atração eletrostática e um estado de energia com reduzidíssima condutividade. Ligações metálicas são decorrentes de sobreposição dos orbitais, resultando em materiais ducteis e mais macios que os covalentes e os iônicos.

Nos semi condutores a energia que separa as bandas de valência e de condução os torna eletricamente isolantes, mas começam a se tornar condutores quando os elétrons são excitados da banda de valência para a banda de condução, se transformando em portadores de cargas. Se o número de elétrons na banda mais elevada é parcialmente preenchido, o sólido se comporta como condutor elétrico. Adicionalmente, portadores livres podem também absorver radiação. No caso dos metais, a ausência de um limiar para frequência de absorção incrementa a interação do feixe com os portadores livres. Contrariamente, a ausência de portadores de carga em outros materiais reduz drasticamente a absorção fundamental, que no espectro está deslocada para as frequências elevadas tornando isolantes os mesmos.

Os íons podem ser retirados das posições de equilíbrio e, estes distúrbios podem caminhar pela rede na forma de fônons que, desempenham papel importante nas propriedades ópticas do sólido pois interagem diretamente com as ondas eletromagnéticas incidentes. No processo de absorção pelo qual o material ganha energia do pulso *Laser*, o comprimento de onda da luz λ é muito maior do que a constante de rede $\lambda \gg a$, e por isto o momento do fóton é muito mais fraco que o momento do elétron em estado de equilíbrio dependendo da sua posição na rede, conforme a equação (20), onde q é o momento do fóton.

$$q = 2\pi.\lambda^{-1} \ll k = 2\pi.a^{-1} \quad (20)$$

Desprezando a alteração no momento, na escala do vetor recíproco de rede k , a absorção de um fóton pelo elétron resulta na transição vertical do mesmo, que se torna excitado. Nos

semi condutores ocorrem diferentes mecanismos de excitação. A formação de pares elétron-lacuna se comportam como portadores. O aumento destes pares inibe a probabilidade de surgimento de outras formações, porém, feixes com intensidades muito elevadas compensam esta perda. Pulsos *Laser* muito intensos causam excitação elevadíssima, que é relaxada quando um portador compartilha a energia por ele absorvida com outros portadores adjacentes.

Portadores altamente excitados podem criar portadores adicionais por impacto ionizante. Uma dificuldade adicional em determinar a absorção total é devida ao rigor matemático das expressões que prescindem de um valor fixo que defina a profundidade de absorção, que por sua vez varia com a densidade dos portadores. No processo de relaxação, o espalhamento portador-portador causa aquecimento, para pulsos *Laser* na faixa de 10 fs. Causa espalhamento inelástico de portadores por meio de fônons e reduzem sua energia aquecendo a rede, para pulsos na faixa de 100 fs. O início da relaxação ocorre na região de 2 ps. Na região de 1 ns há recombinação de pares com idênticos vetores de onda, que emitem a diferença de energia na forma de fótons. Um mecanismo importante que reduz a densidade de portadores livres na região excitada pelo pulso *Laser*, é a difusão dos mesmos. Se a área do disco iluminado na superfície da amostra é muito maior que a profundidade de absorção, então a densidade de portadores varia apenas na direção normal à superfície. Na excitação por *Laser*, o gradiente espacial de intensidade luminosa induz um gradiente espacial na densidade de excitação de portadores. As mudanças observadas na refletividade podem ser atribuídas à alteração na densidade de portadores, esta eleva a frequência de plasma, e para frequências acima da de plasma o índice de refração decai.

Na região de 100 fs desde o início do pulso, a transmitância decai rapidamente devido ao espalhamento portador-portador, criando uma distribuição uniforme dos portadores. O modelo térmico pressupõe que os “elétrons quentes” se equilibram rapidamente pela excitação da rede, com a emissão de fônons. Nesta concepção a energia *Laser* absorvida pela amostra é convertida instantaneamente em calor. Por outro lado, o modelo plasmático atribui as mudanças estruturais à desestabilização das ligações covalentes, resultante da excitação eletrônica. A imediata mudança, num período menor que 1 ps, torna difícil a interpretação da refletividade, uma vez que não necessariamente são resultantes diretamente das propriedades intrínsecas do material.

Indispensável mencionar que devido à drástica mudança das propriedades físicas nos metais durante a incidência de um feixe *Laser*, mudanças de comportamento ainda mal conhecidas são provocadas, não sendo adequado fazer uma discussão levando em conta apenas as condições CNTP. Do ponto de vista cosmético qualitativo, são ainda incipientes os estudos sobre furação de materiais dielétricos, utilizando pulsos ultracurtos e elevados valores de intensidade. O processamento destes materiais tem especial relevância na indústria de telefonia celular principalmente pela portabilidade exigida, com redução de peso. Nesta modalidade de aplicação a ênfase está sobre o reduzido diâmetro desejado e a reduzida quantidade de material extraído na formação de furos cegos [5] [36]. O ponto de fusão e a difusividade térmica são relevantes apenas nos processos envolvendo geração de calor e fusão por efeito Joule [37] [38]. Para elevadas intensidade de feixe até 10 MW.mm⁻², a remoção por líquido é dominante [39]. PJShayler [40] introduziu um modelo de superfície no qual a remoção se deve principalmente à vaporização, bem adaptado a intensidades de potência moderadas até 100 kW.mm⁻².

5.2. Abordagem Térmica [41]

Existem três componentes fundamentais na interação do feixe com a superfície do material. A fusão laminar, a evaporação e a quebra de ligações moleculares. Nos processos utilizando *Laser* com comprimento de onda menor que 300 nm, ou seja no ultravioleta, o processo de extração se dá principalmente por quebra das ligações. Os processos utilizando *Laser* infravermelho, com comprimento de onda 1064 nm, não estão isentos da ocorrência de fenômenos como a produção de plasma e ablação, mas neste caso a ênfase se localiza na fusão, e a extração acontece principalmente pelas interações que ocorrem envolvendo calor. Um conceito a respeito do efeito Joule diz que se trata de fenômeno no qual há conversão de energia elétrica em calor. Se levarmos em consideração que a incidência de um feixe *Laser* na superfície de uma peça de metal provoca excitação eletrônica, sendo esta responsável pela conversão em calor, temos por aquele conceito a ocorrência de efeito Joule. O fenômeno de fotoionização em avalanche consta de registro experimental [37]. Para larguras de pulsos de nanosegundo fusão e evaporação são dominantes, enquanto que para pico-segundos predominam a formação de plasma e ablação. Segundo Maillet [42], na ablação o impacto do feixe sobre a superfície provoca sublimação, extraindo material na forma de vapor.

Uma forma bastante simplificada de descrever a sucessão de eventos durante o ciclo térmico poderia ser apresentada como uma seqüência iniciada pela absorção do feixe, seguida pela fusão laminar ou superficial, desequilíbrio nas tensões superficiais, mudança no padrão de rugosidade, surgimento da nuvem de vapor, explosões de plasma, ondas de choque que dão origem ao efeito punção agindo como tensor, espalhamento do feixe, queda no índice de absorção, aumento da energia na poça, perda de calor por condução, instabilidade na quantidade de vapor presente, instabilidade na iluminação, instabilidade na absorção, início de extração de material fundido, emissão cintilante, surgimento de multiplas reflexões, perda de energia na poça, instabilidade na extração, erosão acentuada, surgimento de stress, deformação no padrão da rede, emissão de respingos, oxidação, migração de impurezas. Quando cessa a irradiação do feixe surgem ressolidificado, recristalização, porosidade e microtrincas.

Evidentemente cada um destes eventos não são isolados, ocorrendo simultaneamente numa profusão bastante irregular, que no entanto pode ser controlada de forma não muito precisa dependendo de certas características do feixe como intensidade, modo espacial, largura do pulso, formato do pulso, além de outras características como gás de proteção, tipo de material, entre outros.

5.2.1. Propriedades ópticas

Nos processos envolvendo calor, o aquecimento do material é determinado principalmente pela absorção, e esta está diretamente relacionada a um determinado comprimento espectral de onda λ da radiação. A absorcividade é determinada pelas propriedades ópticas, pela taxa de aquecimento, incluindo a temperatura do ambiente. Nos metais, a absorcividade demonstra uma tendência a aumentar quando diminui o comprimento de onda da radiação, indo do infravermelho para o ultra violeta. Nestes casos em particular, geralmente uma fonte de radiação no infravermelho, comprimento de onda $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ apresenta absorção muito baixa podendo chegar a frações de 1 %.

Entretanto outros fatores incrementam o rendimento do processo, como por exemplo o aumento da temperatura do ambiente, que proporciona um aumento no índice de absorção superior a uma ordem de grandeza. Baseado na pressuposição de que a energia dos fótons é absorvida através dos elétrons, que depois a transmitem à rede cristalina, por meio de colisões, Drude [43] formulou um modelo pelo qual pode ser determinada a frequência e o

tempo de relaxação do elétron excitado. O aquecimento ocorre no transporte por colisão com fônons, com elétrons e com defeitos introduzidos por impurezas.

A condutividade elétrica σ é definida como uma proporção entre a componente de densidade de corrente elétrica oscilando em fase com o campo elétrico, para com a intensidade do mesmo. Similarmente, a polarizabilidade α_p é obtida como sendo proporcional à componente da corrente, defasada a 90° do campo.

Levando em consideração a massa m do elétron em repouso, que nos metais é de $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg, a densidade n_e de elétrons livres, e a carga elementar do elétron e , pode-se determinar a magnitude da frequência de explosões de plasma ω_p , que deformam a rede cristalina do material e geram a força de arraste das partículas no processo de extração, causando espalhamento interferindo sobre a refletividade, que para temperatura amena (22°C) é da ordem de $\omega_p \sim 10^{16}$ rad . s⁻¹ dada na equação (21).

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi \cdot n_e \cdot e^2}{m} \quad (21)$$

Calculando a condutividade elétrica σ pela relação de Lorentz-Sommerfeld, a constante dielétrica pela equação de Boltzmann e, admitindo um intervalo médio que é o inverso da frequência de relaxação $\tau = \Gamma^{-1}$, o extremo limite que acontece para $\Gamma^2 \ll \omega_p^2$. Neste caso o espalhamento R_D , também denominado refletividade de difusão, ou refletividade de Drude, pode ser determinado pela equação (22).

$$R_D = 1 - \frac{2\Gamma}{\omega_p} \quad (22)$$

Dentro dos limites de aplicação da formulação de Drude, a profundidade de absorção da radiação *Laser* no metal também conhecida como espessura da película pode ser avaliada pela expressão (23)

$$\delta_D = \frac{c_0}{2\omega_p} \cdot \frac{[2(1 + \omega^2 \cdot \tau^2)]^{1/2}}{[1 + (1 + \omega^2 \cdot \tau^2)]^{1/2}} \quad (23)$$

Dados pela frequência do *Laser* ω (onde $\omega = 2 \pi c \lambda^{-1}$), e pela velocidade da luz c_0 , tempo de relaxação τ , no limite $\Gamma^2 \ll \omega_P^2$ pode ser determinado de maneira simplificada pela equação (24).

$$\delta_D \sim \frac{c_0}{2\omega_P} \quad (24)$$

Anomalias na absorção – na década de 1930 já estava comprovada a influência da temperatura na mobilidade dos elétrons. O fluxo de relaxação decai drasticamente para temperaturas muito reduzidas. Posteriormente foi reconhecido que o comportamento da absorcividade como função da temperatura, denominado “efeito pelicular anômalo” não pode ser acomodado na abordagem clássica. O comprimento de onda λ , a profundidade de penetração z_F e a corrente elétrica i_E no ponto de incidência é determinada não apenas pelo valor do campo elétrico E mas também pela mobilidade dos elétrons. Na região de abrangência do campo elétrico, que na presente discussão está localizado nas imediações do disco iluminado pelo feixe *Laser*, estas grandezas também exercem papel determinante na velocidade dos elétrons, provocando influência sobre a profundidade de penetração, sobre a absorção e sobre a reflexão.

Uma parcela adicional é introduzida por efeitos peculiares na absorção superficial, e nos fenômenos eletromagnéticos superficiais. Esta absorcividade adicional A_A pode ser calculada por uma abordagem simplificada quando a temperatura diminui, o que diminui a frequência de colisões Γ , ficando então estabelecida uma condição limite na qual $\Gamma^2 \ll \omega_P^2$ dada pela equação (25) que determina pela velocidade principal do elétron $\langle v_F \rangle$, a velocidade da luz c_0 , e a frequência do *Laser* ω .

$$A_A \sim \frac{3}{4} \cdot \frac{\langle v_F \rangle}{c_0 (1 + \Gamma^2 \cdot \omega^{-2})} \quad (25)$$

Prokhorov constatou que as transições interbandas A_{IB} podem representar significativa influência. Irradiando alumínio com *Laser* neodímio, verificou que a absorção pelas transições interbandas é até quatro vezes maior que a absorção descrita por Drude. A

influência da rugosidade superficial pode se manifestar de duas maneiras. A absorcividade aumenta para incidência diferente da normal à superfície e conseqüentemente nas ranhuras, sulcos, fendas e poros, que simulam guias de onda por onde o campo elétrico é modulado. Há também produção de ondulações superficiais eletromagnéticas, as **RPS** com período da ordem de magnitude do comprimento de onda da radiação λ , que serão abordadas com detalhes mais adiante.

Os dados disponíveis na literatura apresentam grande dispersão, a maioria revelando completa discordância para com os modelos previamente examinados, mesmo fazendo referência ao mesmo material. Estes valores de absorção adicional A_A , absorção de Drude A_D , e a absorcividade interbandas A_{IB} experimentalmente levantados e disponíveis na literatura não são determinados apenas pelas propriedades intrínsecas do material, portanto não poderiam ser precisamente descritas pelas fórmulas clássicas.

Absorção induzida por defeitos, impurezas e oxidação também foram exaustivamente estudados pelos métodos mais avançados, e feitos com materiais de elevado grau de pureza. Por este argumentos se pode deduzir que teoricamente os compósitos, as resinas, e as altas ligas como aço inox com diversos elementos (Fe, Mn, Si, Cr, Ni, Mo, P, S, C) em sua composição apresentam um audacioso campo de investigação. Fica claro que, além do processo de laminação, a uniformidade e o tamanho de grão, o grau de confiabilidade e qualidade do fornecedor de matéria prima são responsáveis diretos pelos índices experimentais verificados.

5.2.2. Quantificação da energia

Desprezando as perdas por irradiação de calor para o ambiente, considerando constante o coeficiente de absorção A para uma amostra sólida semi-infinita, um feixe com energia necessária para aquecer a amostra numa temperatura próxima da fusão T_F , um valor para intensidade ótima I_{ot} , pode ser calculado pela equação (26)

$$I_{ot} \cong \frac{1.85k_f \cdot T_f}{A \cdot z_f} \quad (26)$$

Nas mesmas condições, uma profundidade da película fundida z_f , sob a ação de um pulso retangular, com duração temporal ótima τ_P^{ot} pode ser estimado pela equação (27)

$$\tau_P^{ot} \cong \frac{1,33 \cdot z_F^2}{k} \quad (27)$$

Por meio da equação (28) podemos determinar a energia mínima E_S unitária, contida num pulso, mínima para fundir a superfície do metal dadas as condições desejadas. Sendo que o calor específico c , a densidade ρ , a temperatura de fusão ou T_F , a condutividade térmica k_T , a difusividade térmica k , é desejada a espessura da película fundida $z_F = 100 \mu\text{m}$.

$$E_S = 2,47 \cdot (c \cdot \rho \cdot z_F \cdot T_F) \quad (28)$$

Supondo a condutividade térmica $k_T = 15 \text{ mW} (\text{mm} \cdot \text{k})^{-1}$, a temperatura próxima da fusão $T_F = 1698 \text{ K}$ (ou $T_F = 1425 \text{ }^\circ\text{C}$), admitindo coeficiente de absorção $A \sim 30 \%$, pela relação (27) a intensidade ótima pode ser calculada em $I_{ot} = 1,5 \text{ kW} \cdot \text{mm}^{-2}$. A duração temporal ótima, ou largura do pulso ótima τ_P^{ot} , sendo a difusividade térmica $k = 50 (\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$, pode ser estimada pela relação (27) como sendo $\tau_P^{ot} = 270 \mu\text{s}$.

Utilizando os mesmos valores acima, sendo o calor específico $c = 0,12 \text{ kcal} (\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})^{-1}$ e a densidade $\rho = 7,9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; pela relação (28) temos a densidade de energia mínima requerida $E_S = 4,70 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ (onde $1 \text{ Joule} = 0,2389 \text{ cal}$) entregue pelo feixe, para que um pulso único possa fundir a película de $100 \mu\text{m}$ na superfície do material.

Há, porém, que se levar em conta que a difusividade térmica decai bruscamente com o aumento da temperatura, apresentando uma variação de até duas ordens de grandeza, enquanto que o padrão de rugosidade e a oxidação local, causam um sensível aumento da absorção como função da temperatura. Neste raciocínio a intensidade do feixe ótima pode ser estimada numa faixa bastante ampla podendo superar os $100 \text{ kW} \cdot \text{mm}^{-2}$. Os valores constantes acima são os do aço inox AISI 304, com o qual foi realizado o desenvolvimento experimental.

5.2.3. Ciclo térmico

Como a eficiência do processo de extração de material está diretamente relacionada com a cadeia de fenômenos que ocorrem durante o ciclo térmico, existem diversos trabalhos

publicados a este respeito, mas a obra de Prokhorov [⁴¹], que serve de eixo para esta discussão merece atenção e comentários.

Um feixe *Laser* em propagação obedece às leis e ao equacionamento acima discutido, considerando as propriedades da radiação, as propriedades físicas do material, e do meio de propagação. São necessários elementos ópticos de elevada qualidade, e com tratamento anti reflexivo na superfície, cujos índices sejam previamente conhecidos. Por terem diferentes propriedades físicas, o meio de propagação (ar) e o material em questão, desenvolvem no ponto de trabalho uma interface eletromagnética. Isto pode ser facilmente deduzido pelo contraste entre as propriedades eletromagnéticas de ambos. Sendo a radiação um conjugado eletromagnético, as diferenças entre as propriedades físicas influem diretamente sobre a permeabilidade magnética e condutividade elétrica. Submetido a elevada intensidade e elevada energia do *Laser*, materiais metálicos ou não têm as suas propriedades físicas modificadas, apresentando contrastes idênticos pela presença de água adsorvida, e substâncias que passam para a fase líquida durante a irradiação da amostra.

A permeabilidade magnética tem comportamento diverso entre materiais sólidos e o meio, identicamente aos elementos sólidos podem apresentar comportamento diverso com relação à condutividade elétrica como função da temperatura. Exemplo clássico é a resistividade do carbono que tem coeficiente de condutividade negativo, diversamente dos metais. Estas considerações de ordem ilustrativa apontam um cuidado permanente na adoção de critérios, uma vez estando em estudo compostos ou ligas metálicas.

O ciclo térmico é uma função da absorção, e a mesma é função dos fenômenos ocorridos durante a irradiação. Poder-se-ia supor que as propriedades materiais aqui descritas pudessem balizar plenamente, o que não acontece visto que as mesmas são estabelecidas para as condições ideais CNTP que visivelmente não é o caso. Procuramos apresentar uma abordagem mais ilustrativa e menos técnica, por isto tratando de discutí-la de forma sucinta e dando ênfase preferencialmente aos conceitos fenomenológicos em vez do tratamento matemático e físico.

Para se considerar tal equacionamento é necessário levar em conta que alguns dos parâmetros mencionados são empíricos e foram inclusos na literatura na forma de curvas gráficas ou tabelas, após validação por meio de ensaios. Tais requisitos experimentais são

muito específicos, dificultando sua reprodução em atividades tecnológicas de escala industrial; são funções cujo comportamento escapa a uma análise confortável e linearizada.

Tipicamente podemos dizer que se trata de variáveis estocásticas, em lugar das variáveis determinísticas cuja explicação é bem mais confortável. Estas são concebidas por meio de modelos matemáticos, de caráter conceitual, enquanto aquelas são retiradas de resultados empíricos não necessariamente conceituáveis. A onda de calor que tem origem no disco iluminado varia com o tempo, pois a sua distribuição no interior do corpo material é descrita diferentemente para diferentes momentos. A espessura pelicular metálica susceptível à radiação, varia a partir de algumas unidades até algumas dezenas de nanômetros, para a maioria das fontes *Laser* de potência, gerado no intervalo espectral $0,20 < \lambda < 10,6 \mu\text{m}$. Segundo Goldman [44], a máxima profundidade pode ser estimada pela equação (29) na qual z é a profundidade, I é a intensidade de potência, L é o calor latente, c é o calor específico e T_v é a temperatura de vaporização do material. Contudo, isto serve apenas como ponto de partida, pois para um cálculo mais exato, há que se considerar a temperatura ambiente, a redução na capacidade de extração pelo ofuscamento do plasma e pela condução térmica, compensados em parte pelo vapor localizado que serve como fonte de calor [42].

$$Z = \frac{I}{L + c \cdot T_v} \quad (29)$$

A distância de propagação L_{th} da onda de calor durante o curto prazo de equalização de duração temporal τ_p do pulso *Laser* incidente pode ser estimado pela expressão (30) onde k é o coeficiente de difusão térmica que para a maioria dos metais $0,1 < k < 1,0 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.

$$L_{th} = (k \cdot \tau_p)^{0,5} \quad (30)$$

O gráfico da figura 4 foi construído com base na tabela 1 [41], em anexo, e apresenta a profundidade de difusão do calor em 17 metais Al, Cr, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pt, Ag, Ta, Ti, W, U, V, Zn, Zr para larguras temporais de pulso *Laser* 1 ns, 100 ns, 1 μs , 100 μs .

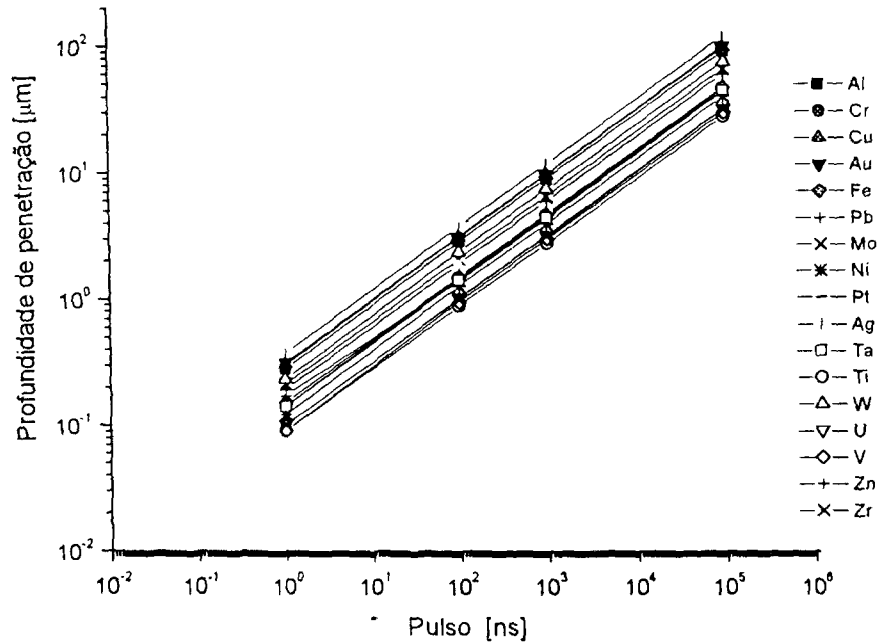


Figura 4 – Profundidade de condução de calor para diferentes pulsos.

Assim, como a maioria dos sistemas de produção *Laser* emitem um feixe cuja distribuição de potência na frente de onda pode ser considerada como aproximadamente gaussiana, é necessário fazer uma correlação entre a eficiência do feixe com distribuição gaussiana, e aquele com distribuição uniforme (*top hat*) cujo impacto térmico pode ser mais facilmente avaliado. Um feixe *Laser* de raio R_s , com distribuição uniforme em toda a seção transversal, num pulso de duração infinita, a máxima temperatura alcançada na superfície do disco iluminado pode ser aproximado para a equação (31)

$$T(o, o, \infty) = \frac{A I_0 R_s}{k_T} \quad (31)$$

Para um feixe de mesmo raio R_s com distribuição gaussiana de potência, incidindo sobre uma amostra do mesmo metal apresenta uma elevação de temperatura na superfície do disco iluminado de acordo com a equação (32).

$$T_G(o, o, \infty) = \frac{A I_0 R_s \cdot \sqrt{\pi}}{2k_T} \quad (32)$$

Relacionando os dois feixes *Laser* com intensidade idêntica, com largura de pulso infinita, tendo perfis de distribuição de potência distintos acima descritos, numa notação $T(r, z, \tau_p)$ a relação entre a elevação de temperatura entre ambos é apresentada em (33)

$$T_G / T = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cong 88.5\% \quad (33)$$

O que significa que a elevação de temperatura tem pouca relação com a distribuição espacial da intensidade do feixe.

Susceptibilidade às transições não lineares - Via de regra, a difusividade térmica dos metais diminui com o aumento da temperatura. Devido ao elevado gradiente de temperatura imposto, surgem pequenas mudanças no comportamento dos parâmetros termofísicos, implicando em conseqüente variação no índice de absorção, conforme já foi discutido anteriormente.

O gradiente de elevação da temperatura é diferente para diferentes períodos de irradiação, dependendo dos parâmetros em questão, sendo da ordem de $1 \mu s$ para $I \sim 10 \text{ kW.mm}^{-2}$. Após este período a taxa de elevação de temperatura decai bastante.

O problema fica por conta da escolha do valor médio mais adequado. A solução seria simples, bastando partir das curvas de temperatura disponíveis na literatura, e observar cuidadosamente os parâmetros dos elementos disponíveis para o processo que se deseja desenvolver. Ainda assim a questão continua sendo até que ponto os parâmetros disponíveis podem ser usados como aproximação das reais condições de cada caso.

Para materiais diferentes há que se observar a variação linear de temperatura característica de cada um deles. É esperado que metais diferentes tenham comportamentos ligeiramente diferentes. Levando em consideração uma grande variedade de aços, para uma ampla faixa de temperatura, as seguintes funções têm comportamento linear além de poderem ser aplicadas a outros metais em faixas específicas de temperatura. As relações (34) e (35) descrevem as variações do coeficiente térmico $K_T(T)$ e da capilaridade térmica, onde k_T é a condutividade térmica, C_v é a capilaridade térmica por unidade de volume, C_v°

capilaridade térmica inicial à temperatura ambiente, δ_C descreve o seu comportamento dinâmico.

$$K_T(T) = k_0 + \beta T \quad (34)$$

$$C_v(T) = C_v^0 + \delta_C \cdot T \quad (35)$$

Para os casos mais complexos uma estimativa da ordem de grandeza da elevação de temperatura na região iluminada pode ser obtida pela seguinte aproximação.

$$T \sim \frac{A \cdot E_0}{\rho \cdot c \cdot V} \quad (36)$$

Considerando os valores sugeridos em (26), (27) e (28) podemos fazer uma aproximação da elevação de temperatura em °C utilizando a relação (36).

5.2.4. Ondas de choque

Foi comprovado que o tensor de *stress* $\sigma_{zz}(0, z, t)$ é máximo no centro do feixe, com valor pico no eixo Oz ($r = 0$), indo em direção à superfície quando a duração do pulso decresce, para qualquer ponto da região interna ao disco definido pelo contorno da secção transversal do feixe incidente sobre o alvo, ou disco iluminado, corresponde uma área de compressão, a partir da energia contida no aquecimento do material. No limiar da circunferência do disco é a região de transição para além da qual o tensor de *stress* adquire valor negativo, ou seja, há distensão do material.

Foi constatado que com o aumento da duração do pulso, cresce a deformação térmica na amplitude e no raio. Com o aumento da intensidade do feixe ou da largura de pulso, o *stress* induzido alcança o limiar de elasticidade σ_m . Um dano irreversível acontece na superfície, como trincas radiais, que são evidência de abruptas distensões locais. A análise se torna mais complexa para *Laser* em pulsos curtos.

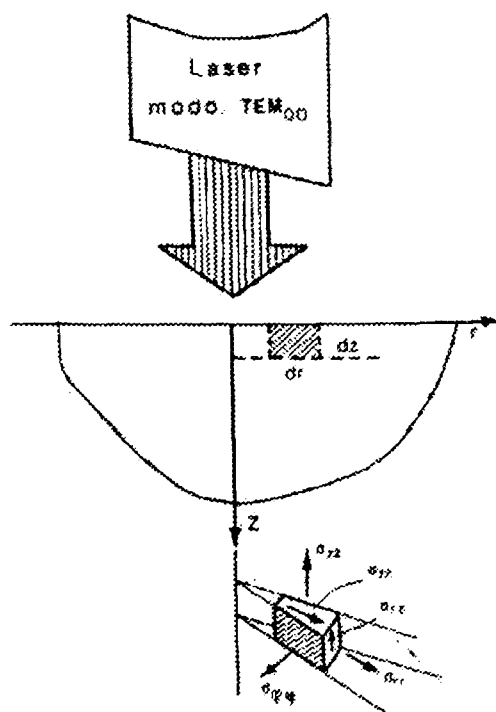


Figura 5 – Comportamento termoelástico num sólido sob ação *Laser*.

Foi constatado também [45] que para a incidência de um feixe com intensidade de energia acima do limiar de vaporização do material, ocorre um correspondente pulso de pressão sobre a superfície do alvo, cuja amplitude é diretamente proporcional à largura do pulso *Laser*, por sua forte relação com a função temperatura superficial.

A força de compressão é exercida muito mais pela interface de vapor e muito menos pelo metal fundido. À resultante das compressões pontuais contidas no disco iluminado pelo pulso *Laser*, chamaremos *punção*. A extensão deste problema foi experimentalmente verificada no corte de alumina de 1 mm de espessura, onde trincas apareciam para pulsos *Laser* de longa duração, em torno de 1 ms. Diminuindo a duração temporal para a metade eliminou o aparecimento destas trincas que inviabilizavam o corte deste material [46].

Ação *Laser* de pulso curto único - Dependendo do tipo de material o dano pode ser causado por deformação plástica ou fragmentação. Para que haja deformação plástica, o valor do módulo de *stress* σ_m no limiar de elasticidade deve ser $\sigma_m = \sigma_T$ onde σ_T é o limite de escoamento para fusão, e para que haja fragmentação deve haver $\sigma_m = \sigma_B$ onde σ_B é o módulo de tração.

Para pulsos com largura temporal $\tau_P \ll 10^{-2}$ s, o limiar de intensidade de escoamento para fusão $I_P^{\sigma_T}$ decresce linearmente com o aumento da largura do pulso *Laser* τ_P . Por exemplo para $\tau_P = 100$ ns o limiar fica acima de $I = 10^6$ W . mm⁻².

Duas inferências são possíveis, (1) o limiar de intensidade $I_P^{\sigma_m}$ decresce com o aumento da largura de pulso τ_P e (2) o limiar de intensidade $I_P^{\sigma_m}(\sigma_r)$ como função do tensor radial não depende do raio do feixe incidente.

A primeira inferência permite concluir de início que pulsos curtos ($\mu s > \tau_P > ns$) tem elevado limiar de intensidade comparado com pulsos mais longos ($\tau_P \sim ms$), sendo que daquela forma fica desfavorecida a ocorrência de defeitos microestruturais detectados ou latentes, por gradiente de *stress* e tensões residuais intrínsecas ao processo. Dedução imediata é que com o aumento da energia contida no pulso, pelo aumento da sua duração, a geração de calor modifica as características intrínsecas.

Já a segunda, permite que se faça uma análise de dinâmica térmica modelando a partir de um conceito pelo qual a energia *Laser* exerce seu efeito como sendo concentrada num ponto central do feixe em propagação ($r = 0$), difundindo-se radialmente quando atinge a superfície do alvo como pode ser observado na figura 5. Sem dúvida isto facilita em muito a abordagem conceitual. Pode se deduzir então que os efeitos ópto acústicos secundários independem do acoplamento eletromagnético sendo determinados pela energia absorvida.

O escoamento do metal sob *stress* está relacionado com os deslocamentos entre as camadas estruturais, ou escoamento laminar, também denominado ablação. O disparo das deformações plásticas que ocorrem pelas tensões, o limite de escoamento σ_T do metal, é determinado por vários parâmetros, entre eles o tamanho de grão d_G e o *stress* de fricção σ_f conforme (37) onde k é uma constante.

$$\sigma_T = \sigma_f + k \cdot (\sqrt{d_G})^{-1} \quad (37)$$

Assim, a peculiar forma com que a matéria prima foi processada influencia decisivamente no resultado da interação do feixe com a superfície da amostra ou da peça.

Trem de pulsos - Uma vez que as microtrincas facilitam a adsorção de impurezas por migração intersticial, os efeitos do primeiro pulso sobre os subseqüentes diminui o limiar para ignição de plasma, sendo responsável pelo surgimento de porosidade em forma de microbolhas. Os níveis quiescentes de intensidade do feixe para trens de pulso são inferiores aos valores iniciais, pois formam uma grande concentração de *stress* agindo sobre *clusters* de deslocamentos, situados diante de certas discontinuidades.

Estes deslocamentos surgem e se multiplicam durante o processo cíclico de carga térmica e conseqüente carga mecânica. São chamados dano por fadiga, e ocorrem devido ao acúmulo de distorções inelásticas da rede cristalina, situadas para além do valor crítico.

Fusão superficial - A primeira dificuldade em determinar a energia para o limiar de fusão, é que esta depende da energia absorvida, e a absorção é função dinâmica da temperatura local e da refletividade. Já o índice de reflexão é inversamente proporcional à oxidação presente, que por sua vez é provocada pela elevação de temperatura.

Isto é comprovado por meio de cálculos, corroborados pelos resultados experimentais obtidos com alto índice de precisão. Portanto, os resultados experimentais são mais férteis em indicar mudanças de comportamento, e após isto busca-se embasamento na teoria, num processo de raciocínio dedutivo. Vale a pena observar que teoricamente não há consideração formal a respeito deste parâmetro, quando se calcula o valor de intensidade necessária para atingir o ponto de fusão superficial. Sendo F_G a maior intensidade de energia que a superfície metálica pode suportar sem derreter, é dada pela equação (38)

$$F_G = \frac{(T_m - T_0)(\rho \cdot c \cdot k_T)^{1/2}}{A(T_0)} \quad (38)$$

Vaporização metálica - Quando há intensa mudança nas propriedades termofísicas e ópticas do metal, para $T > T_m$ onde T_m é a temperatura de *melting* (fusão), um incremento muito pequeno na intensidade incidente, acima do limiar de fusão I_m , pode ser o suficiente para causar uma excursão de temperatura acima do ponto de evaporação, e iniciar uma vaporização intensa, seguida de ignição de plasma [47].

A vaporização provém da fase líquida, com a pressão do pico de vaporização agindo sobre a camada fundida e a existência de um gradiente de vapor agindo do centro para a periferia do disco iluminado, induzindo uma remoção suplementar do metal no eixo do feixe, ou centro do foco. Este efeito explica deposição de material ressolidificado na borda da cratera. [7] [48].

A vaporização é, geralmente, acompanhada de ignição de plasma que facilita a identificação visual do momento inicial da expulsão, por meios da observação dos *flashes* emitidos, que cintilam com comprimentos de onda conhecidos conforme estudado por Yilbas [39], o que permite estudo por meios fotográficos.

Foi evidenciado por medições que na percussão durante um número N suficientemente grande de pulsos, a refletividade especular R_R relativa cai de duas ordens de grandeza, comparada com o valor inicial R_0 para largura de pulsos 100 ns com intensidade pico no centro do feixe $I_0 = 3 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$. Isto porque além de modificar o relevo da superfície alterando o índice de rugosidade, modifica o ângulo de incidência do feixe, existe absorção e espalhamento de energia pela nuvem de plasma.

5.2.5. *Ripples Laser*

São estruturas periódicas ressonantes e não ressonantes, ocorrem na forma de mudanças dinâmicas no padrão de rugosidade observadas por interferometria, quando uma superfície metálica se comporta como um guia de ondas eletromagnéticas, ao desenvolver interações com um feixe *Laser* incidente.

Estruturas periódicas ressonantes - As RPS (*resonant periodic structures*) têm particular interesse para uma discussão qualitativa e quantitativa dos fenômenos eletromagnéticos e térmicos durante o desenvolvido do ciclo térmico da irradiação de materiais metálicos por um feixe *Laser*.

Estas estruturas denotam a existência de vetores de onda g se propagando pela superfície, podendo ser estudadas a partir da observação dos padrões de difração. Tipicamente tem períodos determinados pela polarização e ângulo do feixe *Laser* incidente. A dinâmica do seu desenvolvimento é análogo às instabilidades não lineares que ocorrem no caso de

espalhamento Raman. O fenômeno pode ser abordado por meio de dois estágios interconectados que são a análise eletrodinâmica e a análise termofísica.

Análise eletrodinâmica - A análise eletrodinâmica classifica e relaciona a formação qualitativa dos fenômenos que descrevem a modificação dos contrastes, ou padrão de rugosidade superficial. Há um particular interesse na segunda análise, de natureza quantitativa; neste estágio pode ser determinada a distribuição espacial de temperatura, bem como a amplitude dos padrões, além da grandeza das tensões que causam a modificação do perfil de rugosidade ξ , para um dado vetor de onda G (ξ_G).

Resolvendo uma das equações de ξ_G para temperatura, obtemos o elo de realimentação causando o desenvolvimento regenerativo de RPS. Dependendo do fenômeno de interesse como ondas acústicas, capilaridade, instabilidade interferente à vaporização, utiliza-se uma equação apropriada para cada caso.

Relembrando, como o padrão de distribuição de forças decorrentes da incidência do *Laser* sobre a superfície tem comportamento tal que permite ser modelado como se toda a energia estivesse contida no ponto central, no eixo de propagação do feixe, o ponto central do disco iluminado pode ser referido como 'epicentro', a partir do qual emanam todas as forças que dão origem aos *Ripples Laser*.

Na formação de RPS dependente de temperatura é necessário que as depressões, onde o coeficiente de tensão superficial dependente de temperatura se torna menor, sejam mais fortemente aquecidas que as saliências a fim de produzir realimentação regenerativa; nestas condições o líquido será evacuado das depressões acentuando o índice de rugosidade. Em contraste, para se obter o mesmo resultado nas RPS por expansão térmica deve-se enfatizar distribuição de energia nos picos.

Por esta abordagem pode ser determinada a distribuição espacial de temperatura que em seguida causa a indução de forças, modificando o perfil de rugosidade. Desta forma, resolvendo uma das equações relacionadas à temperatura pode ser obtido um elo de realimentação.

Discutindo as ondas acústicas superficiais, ondas de capilaridade sobre as superfícies fundidas, ou na instabilidade interferencial da frente de vaporização, podem ser utilizadas respectivamente a equação do vetor de deformação elástica do meio, as equações hidrodinâmicas, ou a equação de vaporização, conforme o caso. O desenvolvimento de RPS persiste no disco iluminado até um certo número crítico N_{cr} de pulsos *Laser* consecutivos, no intervalo $N < N_{cr}$. Para $N > N_{cr}$ começam a alterar sua natureza gradualmente se transformando em estruturas periódicas não ressonantes NRPS.

Enquanto que o resultado observado dos padrões de difração, nas proximidades do epicentro, cujo padrão de rugosidade observado é algo caótico e desprovido de periodicidade, ocorre que para um aumento do número de pulsos devido a interferências destrutivas mútuas entre as ondas, e particularmente sobre aquelas que se desenvolvem radialmente com propagação paralela às microtrincas, num ponto mais distante do epicentro prevalece um padrão de ondas esféricas, numa configuração linear com período Λ da estrutura, proporcional ao comprimento de onda λ do *Laser*; sendo perpendicular ao campo elétrico da onda de radiação.

Para se calcular o valor de ressonância pode ser utilizada a relação (39), quando a radiação for polarizada linearmente, o “período Λ da estrutura” é dado por

$$\Lambda = \lambda \cdot (1 \pm \sin \theta)^{-1} \quad (39)$$

Com um feixe *Laser* circularmente polarizado, incidindo perpendicularmente à superfície, as estruturas se desenvolveram com período $\Lambda \sim \lambda$ em todas as direções. Já a taxa do crescimento destas estruturas sob radiação circularmente polarizada é muito menor, se comparada à radiação linearmente polarizada.

As componentes de Fourier da rugosidade em questão, interagindo com o vetor de onda \mathbf{g} , dão origem a componentes de Fourier na forma de dipolos, cujos momentos por unidade de área da superfície da amostra formam um vetor resultante. O campo gerado por tais dipolos pode interferir, abaixo da camada iluminada, com a porção refratada do feixe, causando absorção desuniforme de energia. Isto proporciona uma realimentação necessária a tais estruturas para induzir um ruído aleatório dos harmônicos espaciais da rugosidade,

tornando algo caóticos os padrões de interferência que alteram drasticamente o índice de absorção.

Análise termofísica - O mecanismo termofísico induz a formação de RPS que responde pelos índices de expansão térmica, fusão, vaporização, plasma; e também pelas condições que dão origem e realimentação aos fenômenos relacionados, assegurando a estimulação da grade de rugosidade e principalmente, determinando o comportamento dos valores nas vizinhanças de Λ , também determinando a fase instantânea do feixe Φ na forma $\Phi_{(\Lambda)}$ no instante da incidência.

A fase com que o feixe incide sobre o alvo é função da polarização e da distância na trajetória. Uma vez que o período Λ das estruturas superficiais influi no padrão de rugosidade, esta polarização muda a fase de incidência do feixe.

Estruturas periódicas não ressonantes – O mecanismo pelo qual as NRPS (*non resonant periodic structures*) ocorrem ainda não foram completamente esclarecidos. Segundo um modelo proposto pelo autor em 1985, quando o contraste da superfície, ou melhor, seu padrão de rugosidade é modificado como resultado de vaporização não uniforme do metal, tem lugar uma auto organização do mesmo, devido às instabilidades ocorridas na interface entre o plasma e o material.

A primeira evidência das NRPS é a falta de relação do período com o comprimento de onda da luz λ e conforme os autores, as observações foram que (1) a fusão na superfície metálica é requisito fundamental para a formação de NRPS tanto na presença quanto na ausência de atmosfera; (2) uma profusão de diversos padrões NRPS no mesmo disco iluminado com período variando entre $1 < \Lambda < 50 \mu\text{m}$, sempre com $\Lambda \neq \lambda$; (3) o período das estruturas Λ depende da intensidade do feixe, do número de pulsos, e do material; (4) padrões NRPS não exibem um grau aceitável de organização; (5) pelos dados experimentais disponíveis fica evidente que a transição, partindo duma estrutura com contraste superficial desorganizado para outro organizado, é sempre acompanhado de erosão, e da ignição do plasma em vapor; (6) a formação de NRPS é acompanhada da diminuição especular da refletividade, induzindo diminuição do limiar de ignição de plasma.

Efeitos ópticos em sistemas não equilibrados - Trataremos aqui dos mecanismos determinantes da absorção. Para uma dada temperatura inferior à de ativação de oxidação, o feixe *Laser* limpa a superfície. Para taxas moderadas de aquecimento, acontece adsorção de moléculas de gás, água ou mesmo atmosfera, nos defeitos introduzidos durante o aquecimento, mudando o conteúdo estequiométrico da liga, e induzindo variação do coeficiente de absorção do metal $A(T)$ como função da temperatura.

Isto determina uma alteração da absorção do feixe dentro da camada oxidada, particularmente por meio das oscilações interferentes, que influenciam no aumento da concentração de portadores móveis de cargas, simultâneo ao aumento da temperatura. A variação das propriedades ópticas durante intensa combustão do metal, limita a difusão gasosa e surgem novos compostos como nitretos.

Para níveis elevadíssimos de intensidade do feixe, da ordem de $100 \text{ GW}\cdot\text{mm}^{-2}$, ocorre a formação de uma densa nuvem de plasma ofuscando o disco iluminado, que interfere diretamente sobre a absorção definindo uma região de fusão em confinamento inercial ICF (*inertial confinement fusion*) [28].

As instabilidades nos espalhamentos estimulados Brillouin (SBS) e Raman (SRS) têm crucial importância sobre a ICF, manifestados como modificação nas amplitudes das ondas íon-acústicas IAW (*ion-acoustic wave*) e das ondas elétron-plasma EPW (*electron-plasma wave*) respectivamente, simultâneo à ignição de plasma. A mudança no processo de interação acontece principalmente por meio do acoplamento entre as ondas de plasma EPW. Os espalhamentos estimulados são muito bem definidos como o decaimento ressonante da onda eletromagnética incidente, enquanto que as instabilidades no espalhamento estimulado, por não serem homogêneas, induzem perdas significativas da energia contida no feixe incidente deteriorando assim a simetria iluminada necessária.

Como consequência do intenso campo elétrico formado no plasma, este processo de ionização induz a um número de fenômenos não lineares, incluindo um deslocamento do comprimento de onda da radiação, por desfocamento refrativo devido a inhomogeneidade da densidade eletrônica do plasma. Isto é, acompanhado da geração de harmônicos dependentes da taxa de ionização do campo [49]. Por causa da refração provocada pelo

plasma, o pulso espalha num comportamento instável, durante o seu bordo de subida, até que a amplitude da onda espalhada se torna grande o suficiente para dar origem a plena modulação entre a densidade de plasma e a amplitude do pulso *Laser*. Neste ponto a nuvem se torna transparente mediante o intenso brilho do feixe.

Prokhorov [41], argumenta que pela equação a seguir podemos notar que a variação da frequência do plasma depende apenas da concentração de elétrons, sendo que o número de portadores de carga livres e a condutividade do óxido sobem exponencialmente com a temperatura. A elevação de temperatura provoca aumento da oxidação, que é responsável pela diminuição do coeficiente de reflexão, aumentando a absorção, que favorece o aumento da temperatura, dando origem a um ciclo regenerativo; algo semelhante ocorre com relação ao plasma associado à nuvem de vapor metálico. A frequência do plasma ω_p à temperatura ambiente pode ser determinada com bastante precisão por meio da equação (40) onde m_e^* é a massa efetiva do elétron, n_e é a concentração de elétrons, e é a carga do elétron.

$$\omega_p = \left(\frac{4\pi n_e e^2}{m_e^*} \right)^{1/2} \quad (40)$$

A propagação de RPS com intensidades de energia na região das deformações elásticas, na forma de ondas acústicas, também denominada “ondas de choque”, são utilizadas para realizar tratamento superficial de alívio de tensões residuais conhecido como *shock penning*.

O ensaio com *Laser* pode apresentar uma distribuição arbitrária de intensidade temporal, bem como um perfil arbitrário de intensidade espacial [50]. O controle de equações fornece solução dos valores das propriedades termofísicas, constantes e variáveis, por meio de programa lógico usando um método diferencial finito. Por este meio foi estudada a eficiência do ciclo térmico para usinagem de carbetos de silício por ablação, ou seja, quando a ênfase é no processo de evaporação, sem formação significativa de líquido.

A indução de ondas de choque por *Laser* em aço inox e alumínio são consequência da expansão de plasma em alta pressão gerado pelo pulso [51], onde a composição básica, ferrosa ou não, parece exercer efeito marginal sobre a pressão de plasma e que a eficiência do processo influi diretamente na qualidade do acoplamento eletromagnético entre o feixe

e o material, tendo como dependência principal o meio fluido onde ocorre o processo, interface ar ou água.

Foi observado [52] que falta de simetria da intensidade do feixe, ou a desuniformidade na absorção deste pela superfície, induz correntes elétricas sobre a superfície de um condutor, que isto parece ser devido a um momento dipolo do plasma, que pode ser observado por meio de *ripples* na superfície gerados por dois pulsos consecutivos.

6. Discussões

“O aquecimento do material por *Laser* é principalmente determinado pela sua absorção característica para um dado comprimento de onda”. [41] Prokhorov, et all

Conceitualmente, os fenômenos intrínsecos da radiação *Laser* tem duas vertentes principais a saber o feixe em si, e as suas interações com o meio. Dentre os fenômenos que caracterizam a radiação *Laser* comentamos brevemente os mais importantes, apenas para respaldar a noção de conjunto, sem entrar no rigor do equacionamento físico.

6.1. Eficiência do processo

O índice de eficiência da energia contida no feixe *Laser* sobre o alvo, ou seja o índice de acoplamento entre a radiação e a peça, é a quantidade de energia absorvida como função principalmente da intensidade do feixe incidente e também da qualidade do feixe. Com respeito à intensidade do feixe, o mais importante a considerar é a “densidade crítica energia”, ou o limiar de energia para o qual há extração, típica de cada material ou composto. Como a distribuição de potência é maior no centro, diminuindo na borda do feixe, o diâmetro eficaz no processamento varia de acordo com a potência pico [7] instantânea do feixe, para baixos valores dos parâmetros.

Outro fator importantíssimo é o gradiente de energia incidente. Como o processo depende inicialmente da energia convertida em calor e em seguida em vapor, seguida da energia convertida em plasma, que cria a pressão necessária para o início da expulsão, um excessivo acúmulo de calor na poça pode significar ineficiência do processo. Como componentes quantitativos da intensidade temos o diâmetro do feixe, a energia unitária, a largura temporal de pulso e a potência pico.

A eficiência do acoplamento entre o feixe e a superfície material é formada diretamente pelos itens quantitativos e indiretamente pela divergência, pelo fator qualidade do feixe M^2 , pelo modo TEM, pelo espalhamento, pelo formato do pulso e pelo comprimento de onda. A divergência, o modo TEM e o comprimento de onda podem ser considerados como itens semiquantitativos uma vez que sua apreciação passa por valores matemáticos conhecidos e padronizados. O formato temporal de pulso foi estudado desde os primórdios do desenvolvimento da tecnologia *Laser* e quase não há mais dúvidas sobre as características adequadas para cada processo como da sua relevância.

A radiação, ao incidir sobre a matéria, pode ter a sua energia dissipada por espalhamento, reflexão e absorção. O espalhamento ocorre quando o tamanho particular é diminuto, como por exemplo poeira, partículas de gás, vapor ou água, e no processamento por *Laser* ocorre após o surgimento da nuvem de vapor metálico. A absorção pode resultar em transmissão e outros efeitos secundários como excitação e relaxamento. A transmissão é comum em meios ou corpos de baixa densidade cujas características físicas e eletromagnéticas típicas, são diferentes dos metais, nos quais a transmissão é inexistente. Quando a superfície a ser processada é metálica, uma parte de energia incidente é absorvida e outra parte é refletida.

Energia – É comumente aceito que a energia contida nos pulsos é um parâmetro fundamental. A principal função da energia é aquecer, fundir e vaporizar o material, onde o vapor cria pressão para extração, rompendo com as ligações atômicas.

A principal forma de se estimar a eficiência do processo é determinando a absorção de energia por uma amostra [53]. Entretanto segundo Bostanjoglo [54], utilizando *Laser* chaveado com pulsos curtos na faixa de 10 ns até 1 μ s, é possível remover a mesma quantidade de material com menos energia. A explicação está na perda provocada por condução de calor na peça, para pulsos longos. Utilizando feixe de elevada intensidade em pulsos curtos, a condução de calor na peça durante a irradiação do pulso pode ser desprezada, incluindo a diminuição da HAZ, minimizando *stress* residual, e inibindo a propagação de microtrincas.

Convém enfatizar que, embora a extensão da região afetada pelo calor HAZ produzida tenha muita importância na pesquisa avançada, nas aplicações tecnológicas a mesma tem sido considerada desprezível dependendo das dimensões a serem consideradas. Como a

energia absorvida do feixe é um dos principais fatores determinantes na eficiência de extração de material, bem como na geração e propagação de calor, podemos descrever conceitualmente uma estimativa. Teoricamente, conforme a equação (41), a energia unitária E é a integral no tempo da potência pico P_p durante a duração do pulso τ_p .

$$E = \int_{\tau_p} P_p dt \quad (41)$$

No caso de um pulso retangular podemos supor a potência de pico constante, e aproximar para a energia total ΔE como o produto entre a potência pico absorvida P_p e o intervalo de tempo dado pela largura temporal do pulso τ_p de acordo com a equação (42), equivalente simplificada da equação (41).

$$E = P_p \cdot \tau_p \quad [J] \quad (42)$$

A simplificação adotada no parágrafo anterior, dada pela equação (42) entretanto, deve ser tomada apenas como referência da ordem de grandeza, sendo que considerações mais detalhadas sobre a energia unitária e intensidade, bem como a produção das forças dentro da poça são mais minuciosamente discutidas no item sobre *spiking*. A natureza das transformações de energia que ocorrem durante a irradiação tem sido discutidas em diversas publicações. A distribuição de temperatura na poça líquida é influenciada por convecção, induzida pelo gradiente de tensões superficiais [55]. Os modelos desenvolvidos para furação *Laser* levam em consideração mecanismos de condução de calor, fusão e evaporação, mas não contabilizam o fluxo radial e eventual ejeção de líquido [56]. Isto demonstra uma preocupação com o ciclo dinâmico de absorção e dissipação de energia que acontece na poça.

Segundo estudos relacionados com as ondas de choque, o ciclo térmico provocado pela produção de plasma gera grande turbulência na poça, como uma condição inicial do mecanismo de expulsão líquida, dado pela superação das tensões superficiais [57]. Estas tensões superficiais correspondem ao limiar de pressão de saturação do vapor, porém este não é um fenômeno estático, havendo necessidade de uma velocidade radial mínima.

Abordar o tema destas interações de forma reduzida sem incorrer em mutilações é uma tarefa difícil. Trazemos resumidamente alguns argumentos no item sobre o ciclo térmico, que trata dessas implicações na absorção e no aquecimento.

Com o avanço no desenvolvimento da engenharia dos materiais, tornou-se primordial estudar e formular técnicas de processamento que levem a alterações não apenas cosméticas mas também estruturais. Processos *Laser* podem utilizar pulsos ultracurtos entre nano-segundos e pico-segundos com emissão em diversos comprimentos de onda indo desde o infravermelho até o ultravioleta, com reduzida produção de calor. Estes processos são empregados na usinagem de diversos materiais condutores ou não, tais como resinas e compósitos, com dimensões micrométricas [6] e submicrométricas [58]. Como na parte experimental deste trabalho as características relacionadas ao processo envolvem a geração de calor, mencionamos a seguir os principais itens de controle.

Largura de pulso - Este tópico é motivo de grande atenção na atualidade. Faremos agora considerações sobre a classificação do intervalo de tempo do pulso *Laser*, denominado largura de pulso, durante o qual se desenvolve uma certa potência de pico.

Chen et all [59], estudaram o efeito do formato do feixe *Laser* Nd:YAG pulsado na furação de materiais avançados, como carbetos de silício, superliga de níquel e compósito cerâmico pelo que consideraram “pulsos longos” de 600 μ s e “pulsos curtos” de 300 ns. Paek & Gagliano [60] adotaram como “pulso longo” $\tau_P \sim 1$ ms para análise térmica no processo de furação de alumina por *Laser* Nd:YAG. Mais recentemente, há referência [59] ao uso de *Laser* Nd:YAG, pulsos com largura temporal na faixa de 500 μ s como sendo pulsos longos. Neste caso considerou-se como curtos, os pulsos chaveados com duração temporal três ordens de grandeza menor, ou seja, frações de micro-segundo.

Yilbas [61] definiu este valor utilizando rotina de computador para determinar largura ótima para perfurar aço carbono e alumínio em 30 μ s. Rockstroh, et all [62] escreveram sobre a “influência da duração dos pulsos de *Laser* Nd:YAG na qualidade da furação em superliga de níquel”, com larguras temporais variando entre 520 ps < τ_P < 600 μ s. Riva et all [63], escreveram sobre a furação de alumínio, cobre e tungstênio utilizando *Laser* de vapor de cobre pulsado com largura temporal 20 ns. Grad & Mozina [64] e Roos [65] compararam a

eficiência de microfurações com *Laser* pulsado a $\tau_p = 200 \mu s$, e com tempo total de exposição $200 \mu s$ para trem de pulsos $\tau_p = 5 \mu s$, tendo concluído que o resultado do trem de pulsos é muito superior ao normalmente obtido na furação em metais.

A texturização de superfície requer um controle de parâmetros, simulando uma sucessão de furos cegos com baixa razão de aspecto. Poterasu et al [66], concluíram que pulsos curtos $50 < \tau_p < 70$ ns são mais eficientes que pulsos longos (*free running*) para texturizar metais, procesando aço inox e alumínio com feixe *Laser* Nd:YAG. Hobbs [67] descreveu um sistema CPA (*chirped pulse amplification*) construído em Stanford, com *mode-locking* e *Q-switching*, que produz expansão temporal, amplificação e compressão temporal dos pulsos, elevando o nível de potência para muito próximo do limite teórico possível, 4 TW a 10 fs. Recentemente desenvolvido, um sistema CPA [68] [69] fornece pulsos ultracurtos com 50 femto-segundos de duração, sendo empregado na construção de *stents* de titânio.

Utilizando a técnica CPA, Tönshoff & Ostendorff [68] escreveram sobre microfuração de metais por *Laser* com pulsos ultra curtos; Kamlage & Nolte [70], também Momma & Knop [70] sobre futuros desenvolvimentos médicos na construção de *stents*, Momma & Nolte [71] difração em elementos óticos em regime de femto-segundos.

Um meio termo entre o LSS e a livre percussão é a furação por percussão controlada, com rigoroso controle do número de pulsos, e fazendo o intervalo entre os pulsos muito maior que a largura dos mesmos, os ciclos térmicos individuais são isolados entre si. Atualmente busca-se uma discretização dos ciclos térmicos, pela produção de pulsos curtos da ordem de $\mu s < \tau_p < ns$ demonstrando uma necessidade irreversível, de uma tendência para se trabalhar com pulsos ultracurtos com duração variando entre $ps < \tau_p < fs$. Por isto temos motivos para classificar, neste trabalho, os pulsos com milisegundos de duração como pulsos longos. Além disso, pulsos longos de elevada intensidade tem seu efeito reduzido pela intensa formação de vapor metálico, o que não ocorre com pulsos ultra curtos. Tendo isto em mente procuramos construir uma conjunto de parâmetros que leve na direção de um ponto ótimo de trabalho para os fins de aprimoramento cosmético da geometria.

Classificação - Na ausência de uma nomenclatura uniforme para classificar os pulsos *Laser* propomos que sejam atribuídos os conceitos de pulsos convencionais para módulos que geram *Laser* em *free running*, pulsos curtos para os gerados a partir de módulos chaveados, com largura temporal menor que um micro-segundo, e pulsos ultra curtos para aqueles produzidos por outros dispositivos com largura temporal menor que nano-segundos. Existe uma constatação que a irradiação por *Laser* provoca algum estrago, ou dano, nas imediações do disco iluminado, e que raramente as observações experimentais e os modelos teóricos concordam. Como fato temos que com relação a estes danos, pulsos mais curtos apresentam menor incerteza estatística comparados aos pulsos longos. [72].

6.2. Itens quantitativos do feixe

Os itens quantitativos que têm maior relevância são a potência desenvolvida, a intensidade do feixe, a largura temporal do pulso, e a energia unitária do pulso. Estes aspectos são particularmente relevantes para a capacidade de fusão e evaporação, eficiência de extração, velocidade do processo e formação de defeitos residuais.

Parametrizada a fonte de bombeamento para um dado conjunto de valores, o produto (43) da frequência dos pulsos pela integral da potência de pico no tempo define a potência média de operação.

$$P_M = F \int_{\tau_p} P_p \cdot dt \quad (43)$$

Os módulos *Laser* chaveados possuem dispositivos mecânico-ativos, óptico-passivos, opto-acústicos, que atuam no feixe em janelas temporais, têm aplicações como bombeamento indireto para geração de feixe *Laser* Nd:YAG com pulsos curtos da ordem de nano-segundo de alta intensidade. Pulsos ultracurtos da ordem de pico-segundos, são obtidos através do bombeamento chaveado de potência.

Como todo sistema físico, o módulo *Laser* apresenta perdas. Uma parte da potência de bombeamento é convertida em radiação de corpo negro que, pelo efeito Joule se transforma em calor. Outra parte é perdida por emissão espontânea durante a amplificação do feixe. O balanço líquido resultante apresenta um rendimento característico pouco acima de um por cento para o *Laser* Nd:YAG.

Intensidade - Índices de intensidade absorvida entre 0,5 até 5 MW . mm⁻² [57], oferecem ótimos resultados para a maioria dos metais. Para intensidades menores predominam a condução de calor pela peça acompanhada de perdas por reflexão, enquanto que para intensidades muito elevadas ocorre perda de foco provocada pela nuvem de vapor, ou ainda a drástica degradação da eficiência e da reprodutibilidade, pela ionização induzida do ar. A perda de foco se dá por espalhamento induzido pelo plasma e conseqüente redução da absorção além de criar risco operacional devido à emissão de brilho intenso [7].

Para dissipar a nuvem de plasma pode ser usado gás de assistência a pressões elevadas agindo como punção. Segundo Battista & Shiner [73], para índices elevados de intensidade do feixe uma considerável parcela da energia incidente é convertida em fusão e vaporização, uma vez que a relação entre a taxa de energia convertida e a energia perdida aumenta consideravelmente. Dado que há necessidade de prévia fusão e em seguida a pressão da vapor para expulsão de material fundido, no processo de furação é importante que se veja estes dois elementos como um conjugado.

Na vaporização o local inicia por ionizar podendo produzir plasma. A expansão de vapor e plasma transmitem uma fração da energia por meio de ondas opto-acústicas, ou ondas de choque. A depressão resultante induz significativa expansão da nuvem de vapor excedendo as tensões superficiais, pressões hidrostáticas, e rompendo a hidrodinâmica da poça líquida. A mudança do regime teïmoelástico para o regime plasmático, ou ablação, denominado simplesmente 'regime', que depende principalmente das propriedades físicas do material exemplifica tipicamente a transição das interações lineares para interações não lineares, entre o pulso *Laser* e o material.

O valor da intensidade é aceito como sendo um dos parâmetros de maior relevância para se determinar tanto a eficiência do processo como também seu resultado cosmético. A intensidade **I** do feixe é dada pela densidade de potência, razão aritmética entre a potência pico **P** do feixe e a área **A** da seção transversal do mesmo, dado na equação (44). Nesta relação fica claro que, para um mesmo feixe, a intensidade aumenta quando o disco iluminado diminui. Este é função dos cuidados com a determinação do foco e da lente focal utilizada.

$$I = P \cdot A^{-1} \quad [W \cdot mm^{-2}] \quad (44)$$

A taxa de elevação da amplitude no tempo ou gradiente, bem como o acúmulo de forças induzidas por meio de um pulso de elevada potência provocam uma deformação plástica completamente diferente dos moldes conseguidos por meio de uma radiação com menor gradiente ou com intensidade moderada. Sendo a magnitude do *stress* acumulado uma função essencial do perfil de temperatura [60], é desejável e preferível utilizar um feixe com intensidade suficientemente elevada em pulsos curtos da ordem de nano-segundos minimizando assim o efeito de *stress*.

Tensões são induzidas pela incidência do feixe sobre o alvo que exercem pressões que correspondem a um efeito punção no ponto de trabalho, provocando deformações elásticas que são absorvidas e devolvidas pelo material em questão, e deformações plásticas que são responsáveis pela extração de massa. Como contrapartida das elevadas pressões na região do disco iluminado, na rede cristalina ao redor da poça líquida se formam depressões atuando como forças de recuo dando origem a vórtices que modificam a orientação das tensões superficiais que, até certos níveis de intensidade de energia incidente, atuam no sentido de devolver a conformação anterior. Esta faixa de energias pode ser entendida como correspondente à memória elástica, sendo que parte desta energia se converte em calor aquecendo a superfície da peça. Acima do limite de fusão, há uma ruptura das tensões superficiais e o material fica susceptível a expulsão de uma parte da poça líquida, quando ocorre desequilíbrio dinâmico entre as tensões superficiais, o que faz a poça perder energia entrando no ciclo de recuo novamente pelo arraste de uma parcela da sua energia que pode ser observada na forma de cintilações projetadas [39] [56] [74] que excede o limiar crítico, ou seja, a energia mínima necessária para mudança de estado físico. A intensidade do feixe alcançada para furação e corte com *Laser* neodímio, quer com comprimento de onda 1064 nm ou com frequência multiplicada, pode variar desde 100 kW . mm⁻² [75], 1 MW . mm⁻² [53], 2.2 MW . mm⁻² [60], 160 MW . mm⁻² [76], 90 GW . mm⁻² [77] e acima de 10 TW . mm⁻² [78] com *Laser* titânio-safira (Ti:Al₂O₃) conhecido como *sapphire Laser*.

Absorção - O feixe ao atingir o alvo tem parcela da sua energia absorvida, sendo que a parcela complementar é refletida. A refletividade é uma função intrínseca do acoplamento entre o comprimento de onda da radiação *Laser* e a estrutura do material. Estudos a respeito da absorção de feixe *Laser* sobre Au, Cu e Ag demonstraram acentuada queda nos

índices de absorção, de 60 % para menos de 10 %, para comprimentos de onda 450, 550 e 600 nm respectivamente [6].

O coeficiente de absorção é típico para um dado comprimento de onda da radiação incidente, que interage com sua estrutura a uma dada profundidade de penetração, dadas as CNTP. A absorcividade está intimamente ligado à refletividade intrínseca, mas também depende de outros fatores como temperatura superficial, rugosidade, composição do gás de proteção e assepsia.

Temos um binômio dado pela seguinte equação $E_A + E_R = 1$, onde E_A é a energia absorvida e E_R é a energia refletida. Um estudo da eficiência da incidência de um processamento por *Laser* requer uma abordagem na qual um quesito fundamental é o conjugado dado pelo acoplamento entre a energia do feixe e as características do material. O coeficiente intrínseco de absorção pode ser determinado experimentalmente por uma de duas maneiras, métodos calorimétricos e medição da refletividade.

Uma vez que se espera um elevado coeficiente de refletividade, a medição da mesma é algo problemática pelo fato que uma suposta variação na reflexão de 98 % para 99 % torna a detecção da variação quase imperceptível em termos práticos. Por outro lado, para a mesma situação, a absorção varia de 2 % para 1 % o que indica claramente uma variação de 50 %. Isto é particularmente verdadeiro para um feixe *Laser* infravermelho ou com largura de pulso da ordem de mili-segundos [53] [79].

Implicações sobre o processo de furação - Há um certo consenso a respeito dos processos *Laser* envolvendo calor, atribuindo sua eficácia à velocidade de propagação da interface líquido-vapor. A extração de material inicia por meio de instabilidades nas tensões superficiais, que provocam fluxo radial na poça líquida, sendo seguida pela vaporização, e no final do pulso é mantida principalmente pelas explosões de plasma [78] [80] [81].

O fator de controle é provavelmente a variação da tensão superficial. Semelhante à cavitação, o resultado da sublimação do material gera nucleação das bolhas de vapor, produzindo a ejeção de partículas rápidas por meio de explosões no interior da poça

líquida; contudo o comportamento a altas temperaturas não é conhecido suficientemente bem para permitir uma explicação adequada.

Por meio das fotos, foi observado que a 10 μs do início do pulso, surge uma cintilação vaporizada com certa frequência que, a 300 μs decai consideravelmente correspondendo a uma pequena quantidade de vapor + líquido; nestas regiões há intensa e rápida expansão na produção de plasma.

Foi demonstrado [82], por meio de *Laser CO₂* de alta potência, que a ejeção de material formando uma superfície plasmática teve efeito sobre a conformação do furo, que indicou ser particularmente verdadeiro para os primeiros 10 μs . Neste caso, foi sugerido que encurtar para 5 μs melhora a furação, pois o efeito do plasma é minimizado.

Dois tipos de ejeção líquida foram constatados; um pela observação de traços cintilantes mais lentos e ângulos rasos, produzidos na região térmica onde há produção de vapor, cujas partículas lentas são expelidas primeiramente devido ao fluxo radial, com baixo gradiente de pressão. O segundo tipo começa 100 μs após, envolvendo partículas rápidas, muito finas, que formam ângulos íngremes, próximos à normal da superfície, ejetadas quase que continuamente, devido explosões seguidas de nucleação no interior da poça líquida, coincidindo com o aumento do gradiente de pressão, dando origem a partículas de velocidade elevada.

A nuvem de vapor que se forma na trajetória de feixe pelo acúmulo de partículas de vapor entre o bico e a peça, ofusca a iluminação no ponto de trabalho, diminuindo a intensidade incidente, gerando distorções na distribuição de potência, modificando o índice de absorção superficial, mas também funcionando como fonte de calor em regime estacionário.

Esta fonte de calor é importante uma vez que as partículas expelidas carregam certa quantidade de calor para fora da peça, empobrecendo o teor de energia na poça, e fazendo com que haja retrocesso das forças de convexão. Estas agem no sentido de retrain a expansão inicial gerando forças de recuo, que ao se chocarem com uma nova onda de pressão dão origem a ondas de choque, tendo sido denominadas repercussão.

Em chapas finas, a pressão repercute na lâmina líquida induzindo forças de arraste suficientes para empurrar material ao longo das paredes do furo, expelindo partículas líquidas, ou limpando a cratera na superfície adjacente.

O líquido residual aderido à parede do furo é sugado por tensões superficiais para ressolidificar-se em seguida, quando as altas pressões são aliviadas e forças de arraste são reduzidas, tapando o furo. Portanto num bloco, como o material fundido é removido da cratera antes que a interação seja completada, esta quantidade de massa arrasta consigo parte da energia da cratera, ou da poça líquida, provocando assim penetração mais lenta o que inibe a velocidade do processo [80], até mesmo inibindo seu avanço.

A alta difusividade térmica e elevado ponto de fusão, influenciam na velocidade de furação. Há que se esperar, portanto que uma comparação entre metais com ponto de fusão idênticos apresente maior eficiência e maior velocidade de furação para aquele que tiver o menor coeficiente de difusividade térmica. O titânio com baixa difusividade térmica e elevado coeficiente de absorção apresenta gradiente de temperatura bem maior que o níquel, inox e tântalo. Consequentemente o titânio evapora mais rápido dando origem a alta 'repercussão' na faixa térmica de evaporação, com isto aumentando a cratera e também a massa removida. Curiosamente, o aço inox tendo ponto de fusão apenas ligeiramente superior e com difusividade térmica sensivelmente mais baixa que o níquel, fura mais lentamente.

A falta de uma definição sobre as propriedades físicas dos materiais quando submetidos a elevados gradientes de temperatura, sugerem que outros fatores desempenham papel importante nos processos de interação. Por exemplo, no mecanismo de transfêrencia de energia no interior da peça via plasma, ou como função da velocidade de furação.

O processo de ejeção líquida passa por diferentes fases, de acordo com o progresso do pulso; no início, ao mesmo tempo que começa o vapor, partículas muito lentas são ejetadas, provavelmente como resultado do líquido fluindo radialmente para fora do furo, devido a redução de pressão de evaporação na superfície; com o progresso do pulso, aumenta o gradiente de pressão, e com isto a velocidade do líquido; isto contribui para a extração de maior massa com menor interferência do vapor sobre o processo para pulsos

longos. Dependendo da frequência dos pulsos na percussão, o intervalo entre o mesmos pode ser superior ao tempo de relaxação térmica, dependendo do coeficiente de difusão e da refletividade, para pulsos longos com elevada energia pode acontecer da absorção característica em estado líquido perder eficiência, recompondo a reflexão na poça, e dando origem à conicidade reversa [6] que é constatada na forma de *barreling*, com o alargamento no interior do furo e estreitamento da saída, como será analisado na parte experimental.

Difusividade térmica característica do material prejudica a retenção do calor durante o processo, e como os metais e ligas tem alto coeficiente de difusividade, o estudo do processamento de metais por *Laser* é um assunto da maior importância.

Ponto de fusão desempenha um papel relevante com relação a eficiência de extração, posto que o material extraído passa inicialmente por fusão que modifica as tensões superficiais favorecendo o ganho de energia no sistema. Dependendo do caso, a qualidade pode ser fortemente influenciada quando é processado um material com baixo ponto de fusão, como no caso do alumínio, uma dada quantidade de energia é suficiente, porém isto pode também significar excesso de respingos se a potência for insuficiente.

Ponto de evaporação consitui particular interesse, visto que é por meio da pressão exercida pelo vapor que acontece o rompimento das tensões que levam à expulsão do material previamente fundido no alvo do feixe.

Homogeneidade estrutural é um fator que pode influir pois em estruturas complexas pode haver diferentes interações para regiões de diferentes constituições; isto tem implicações reduzidas quando se trata de metais ou ligas, identicamente quando se trata de potência elevada e intensidade elevada conforme estudado a seguir, geralmente por meio de pulsos curtos. Pode ser desconsiderada uma vez que os fornecedores asseguram parâmetros mínimos de confiabilidade.

6.3. Itens de controle

Para que o feixe percorra o espaço entre o ressonador e o alvo, seria interessante que o seu diâmetro pudesse ser mantido constante, mas como já mencionamos existe um fator de divergência; além disto existe um fator limitante que concorre para o *stress* e degradação do *coating* na superfície dos espelhos, trata-se da densidade de potência, ou ainda

intensidade do feixe, ou simplesmente 'intensidade'. Um feixe com intensidade excessivamente elevada danificaria precocemente estes elementos. Como recurso preventivo é de praxe expandir o feixe no trem óptico para atenuar a intensidade e também a divergência. O feixe então se propaga com baixa intensidade para ser então focalizado sobre o alvo.

Qualidade da lente de focalização é um item de grande importância neste processo, uma vez que pode provocar distorções sobre a qualidade do feixe *Laser* comprometendo a eficácia do processo.

Posição do foco ou posição focal é a distância do foco com relação à superfície do alvo, e tem desempenho fundamental em processos de grande precisão.

Distância focal da lente é uma característica intrínseca da construção da lente utilizada para focalizar o feixe sobre o alvo. A película de material exposta ao feixe deve ter suas condições monitoradas para que estejam em conformidade com as previamente estabelecidas. A película em questão compreende a área de incidência do feixe sobre o alvo, confinada a uma profundidade de penetração, resultando num disco iluminado. Entre as grandezas físicas que implicam em maior impacto temos as abaixo mencionadas.

Espessura da amostra, ou lâmina, é um parâmetro importante pois num alvo de espessura acima de 1 mm consideramos que a dissipação de calor ocorre segundo um modelo denominado semi esférico, ao passo que para chapas muito finas o modelamento de propagação de calor é planar, considerando que a incidência do feixe iluminou toda a espessura da chapa, simplificando os cálculos. Isto os torna mais precisos, motivo pelo qual são preferencialmente utilizados nos laboratórios de pesquisa fundamental. Processamento de furos cegos em placas multicamadas com espessura em torno de 50 μm , na indústria de telefones celulares, indicam melhor performance e dos sistemas empregando *Laser UV:YAG* [6].

Temperatura do alvo - num diferencial de tempo anterior à incidência do feixe, a temperatura superficial é um fator relevante que influi principalmente na forma pela qual ocorre a difusão, já que esta é função da temperatura local. Para prevenir flutuações nos resultados do processamento a temperatura ambiente da sala é mantida constante.

Refletividade esta relacionada com o coeficiente de absorção, com o ângulo de incidência do feixe, com a rugosidade superficial do alvo, e em casos específicos pode-se adicionar uma camada absorvedora de tinta ou óxido para favorecer a absorção inicial do feixe. É imperioso salientar que alguns nano-segundos após o início de um pulso longo as condições iniciais de refletividade mudam drasticamente, como veremos adiante ao propormos o conceito de pulso longo.

O **ambiente** necessário ao trabalho com *Laser* tem características peculiares. A **temperatura** estável é condição indispensável à manutenção das características do *Laser*; temperatura elevada também influi sobre a estabilidade do ressonador, devendo ser mantida amena. A **umidade** ambiente excessiva pode implicar em mudanças na reflexividade do alvo e na formação de plasma. A **poeira** é um item proibido quando se trata de processamento por *Laser*, principalmente porque se deposita sobre os elementos do caminho óptico como lentes e espelhos, comprometendo a qualidade do feixe e principalmente diminuindo o limiar de dano destes componentes.

O **gás de assistência** tem quatro funções: (a) proteger a lente e o bico contra o vapor metálico e os respingos de metal fundido que são arremessados durante o processo; (b) formar uma película de revestimento que recobre a superfície do alvo assim evitando o contato com a atmosfera; (c) expulsar a nuvem de vapor que se forma sobre o alvo ofuscando a incidência do feixe sobre o mesmo, e (d) resfriar o alvo por convecção forçada. Esta última função pode ser considerada contraproducente uma vez que a eficiência do processo está diretamente ligada à conservação de calor. Entretanto há que se ponderar que em alguns casos um excessivo acúmulo de calor na poça pode contribuir para uma dinâmica térmica local pouco favorável aos resultados cosméticos.

Três fatores relacionados ao gás influem no resultado do processo. (1) A pressão é responsável pela otimização das funções acima. (2) A composição do gás é um fator de relevância microestrutural que pode influir sobre a migração intersticial no caso de He ou H devido ao raio atômico reduzido, podendo reagir quimicamente com a estrutura do alvo no caso de O₂ gerando oxidação local; pode também acentuar a porosidade inerente ao processo. Acontece que o consumo de gases nobres com finalidade de proteção pode tornar o processo oneroso dependendo do fluxo requerido, assim damos particular atenção à sua

escolha. (3) O *design* do bico e a distância entre o mesmo e a peça, designado por *work nozzle*, influi na forma como o fluxo de proteção gasosa escoar pela região de incidência do feixe, alterando a forma como acontece a expulsão de material fundido. O bico não deve estar muito próximo da superfície a ponto de obstruir a saída do gás e do material extraído, mas também se estiver muito distante a contribuição do gás pode ser anulada.

Para utilizar um conceito de engenharia reversa, os resultados são fixados e durante o processo se procura caminhos que determinem os parâmetros mais adequados. Na engenharia reversa há que se supor os porquês para se conseguir desenvolver artifícios que contribuem para os resultados esperados. Nosso trabalho experimental está confinado entre as condições oferecidas pelo equipamento e as necessidades de aprimoramento do processo, opções tais como material, tipo de processo que no caso presente é a microfuração, finalidade de uso, conjunto de propriedades físicas, características mecânicas ou cosméticas.

A isto se soma uma característica dos ensaios em laboratório nos quais os parâmetros são controlados por um sistema de malha aberta. A literatura não menciona a existência de um controle de processo *Laser* em malha fechada para controlar os parâmetros, o que torna o processo bastante artesanal.

6.3.1. Formato do pulso

O que vem a ser interpretado como formato retangular de pulso é apenas um conceito geométrico idealizado. Segundo este conceito, durante o pulso de energia bombeada para a lâmpada, a potência de pico desenvolvida pela fonte é constante, tendo bordos de subida e descida com gradientes tendendo ao infinito, o que é uma abstração matemática que não corresponde ao desempenho dos dispositivos físicos. Além disso, existem características intrínsecas que são típicas do ressonador e da física da geração *Laser*, que distorcem o formato do pulso teoricamente retangular.

Um feixe produzido em *free path* apresenta um perfil temporal cuja envoltória tem formato trapezoidal, com distorções no bordo de subida e de descida, que são enfatizadas na medida em que diminui a largura de pulso. Deformações no nível de potência provocadas, como produto decorrente dos vários fenômenos interdependentes que ocorrem durante a fase de emissão e amplificação *Laser*.

Podemos interpretar este fenômeno luminoso instável de forma simplificada não exata, por analogia ao que ocorre com todo sistema físico ao ser excitado por uma função descontínua, degrau ou mesmo estímulo Dirac. Dependendo do gradiente de excitação de um dispositivo óptico ou eletrônico, há produção de harmônicos de elevada ordem, com diversas intensidades que se sobrepõem, formando um padrão aparentemente caótico na saída do sistema durante um período transitório, também denominado surto. A emissão *Laser* é particularmente muito mais susceptível por causa da elevada potência.

Assim, o formato temporal do pulso luminoso, obtido no ponto de trabalho, é o resultado das características da fonte, associadas ao processo de produção *Laser* na cavidade, juntamente com eventuais recursos implantados por dispositivos de chaveamento, bloqueio de modo TEM, ou compressor-amplificador de pulsos. Este ponto é melhor exemplificado e ilustrado no item que descreve a CPML.

6.3.2. *Spiking*

As diversas fases de formação do pulso *Laser* resultam num padrão óptico temporal com irregularidades pontiagudas, que como o próprio nome deixa supor, são semelhantes a pregos ou cravos (*spike*), como resposta a uma excitação supostamente retangular, ou plana no bombeamento. Steffen [3] cita a vantagem dos *spikes* de 300 ns, muito agudos, na furação de materiais termicamente sensíveis, pois os ciclos térmicos ficam isolados.

Ao analisarmos o perfil do pulso *Laser* por meio de osciloscópio calibrado para enfatizar os picos de potência, face aos distúrbios gerados durante a amplificação do feixe no interior do ressonador, podemos constatar a formação de *spikes*. Estes argumentos são ilustrados no Capítulo Experimental, tendo sido registrados na caracterização da CPML.

Vem sendo desenvolvida análise acurada dos itens qualitativos do feixe com relação às distorções temporais dos pulsos e uma delas se refere aos picos um tanto aleatórios presentes nos pulsos retangulares, cujos picos apresentam largura FWHM da ordem de 500 ns enquanto que o intervalo entre os mesmos é maior que 1 μ s [7]. Uma seqüência controlada destes *spikes* produz furos de muito boa qualidade, enquanto von Allmen menciona o uso de duplo estágio oscilador-controlador de *spiking*, para produção de *Laser* Nd:YAG com pulsos planos.

Ao ser utilizada uma técnica para agir como ignitor de plasma [41] foi recomendado um formato especial de pulso para um máximo acoplamento térmico entre o feixe e a superfície de trabalho.

6.3.3. Desempenho esperado

Com relação à velocidade de penetração, ao posicionamento e à ausência de *setup* de ferramenta, o processamento por *Laser* tem demonstrado viabilidade ilimitada. Conforme foi publicado [80] a investigação sobre a velocidade de usinagem na furação por *Laser* indicou forte relação entre velocidade do processo e a propagação da interface líquido - vapor, que pode ser expressa em termos dos mecanismos de transferência de calor que ocorrem na interação *Laser*-peça.

O material extraído no início do pulso *Laser* forma uma nuvem de plasma que afeta o formato do furo [83], sendo isto particularmente verdadeiro para os primeiros 10 μ s de interação. Foi sugerido que encurtar os pulsos para 5 μ s exerce efeito positivo, pois o efeito do plasma é minimizado. A pressão de vapor somada às tensões superficiais e à pressão do gás de assistência [84] forçam a camada líquida a escoar pela parede interna do furo. Este escoamento tem sido denominado ablação [85] [86] [87].

Recentemente, o termo ablação tem sido interpretado como a remoção de material por um processo não térmico, utilizando fótons ultravioleta, em pulsos ultracurtos com energia suficiente para quebrar as ligações atômicas, que vem apresentando excelentes resultados cosméticos inclusive para microfuração. Schaeffer [88] aborda o estudo deste fenômeno que tem mais de uma conotação. Este termo indica escoamento, ou descamação, sendo amplamente utilizado quando se trata de deslizamento das geleiras, e perda de massa na fuselagem dos foguetes durante a reentrada na atmosfera, mas também tem a conotação de remoção cirúrgica. Desta maneira, a idéia está presente no âmbito da tecnologia *Laser*, associando este termo também ao deslizamento laminar do material fundido.

Para estudar a razão entre evaporação e fusão, Yilbas utilizou *Laser* Nd:YAG, largura de pulso 1,48 ms, energia entre 15 e 30 J, distância focal da lente 51 mm, no qual foi montado um conjunto óptico, que registrou imagens. A natureza do mecanismo foi examinado por

traços fotografados da interação do feixe *Laser* pulsado sobre extração, em titânio, tântalo, níquel e aço inox. Os modelos desenvolvidos para furação por *Laser* levam em consideração mecanismos de condução de calor, fusão e evaporação, mas não contabilizam o fluxo radial e eventual ejeção de líquido [⁵⁶].

As forças de arraste que empurram material líquido ao longo das paredes do furo, pela tensão da lâmina líquida, é suficiente para limpar a superfície adjacente dos danos internos da cratera. O líquido residual aderido à parede do furo é sugado por tensões superficiais e ressolidifica, podendo inclusive tapar o furo. Como consequência, a velocidade de avanço da interface líquido - vapor fica comprometida. A contribuição do ponto de fusão e da difusividade térmica do metal comprometem a velocidade do processo por causa da condução de calor na peça, que influi diretamente na perda de energia.

Assim, os experimentos com tântalo apresentaram baixa velocidade de furação, por ter alta difusividade térmica e alto ponto de fusão. No entanto, surpreendentemente aquele trabalho demonstrou que o inox fura lentamente, apesar da baixa difusividade, indicando que estes parâmetros interagem com outros fenômenos cuja interdependência ainda permanecem um tanto obscuros como a intensidade do feixe, o comportamento cíclico da nuvem de vapor metálico e a oxidação provocada pelos efeitos físicos na incidência da radiação e seus efeitos térmicos.

6.3.4. A extração como função da temperatura superficial [³⁹].

Os efeitos resultantes da radiação foram estudados por meio de fotos durante a incidência de pulsos. A 10 μ s do início do pulso, apareceu na superfície uma cintilação indicando o início da expansão da nuvem de vapor. Logo em seguida inicia a extração líquida provocada pelo fluxo radial, provocado pelo desequilíbrio da tensão superficial. Aos 100 μ s, um aumento no gradiente de pressão deu origem a partículas de alta velocidade que foram ejetadas quase continuamente, devido explosões seguidas de nucleação dentro da poça líquida. Como resultado da nucleação das bolhas de vapor, o fator determinante no controle é provavelmente a variação da tensão superficial com o crescimento da temperatura.

Após os 300 μs ocorre rápida e intensa expansão de plasma se o furo for raso e a intensidade do feixe for elevada, decaindo consideravelmente a extração de vapor e líquido. O plasma age, então, como fonte de calor melhorando o resultado. O processo de ejeção líquida passa por diferentes fases, de acordo com o progresso do pulso. No início o líquido flui radialmente para fora do furo reduzindo a pressão de vapor na superfície. Em seguida aumentam o gradiente de pressão, e também a velocidade do líquido.

O formato dos pulsos pode ser determinante na extração. O baixo gradiente inicial de pressão dá origem ao fluxo radial, seguido da fase de nucleação do vapor com elevado gradiente de pressão, coincidindo com o aumento da temperatura. Contudo nas altas temperaturas o comportamento não é suficientemente conhecido para permitir uma explanação ampla e adequada.

A remoção de material por vapor ou líquido, não se trata de um processo contínuo, mas com explosões altamente luminosas na superfície que podem ocorrer devido a absorção do feixe *Laser* incidente por parte do líquido ou vapor, causando redução temporária na intensidade de potência do feixe. Isto pode reduzir a quantidade de fluido ejetado do furo que reduzindo o bloqueio do feixe produz outra cintilação em seguida. Por meio de um modelo de superfície, Shayler [40] estimou que a remoção acontece principalmente por vaporização para intensidades da ordem de $10^5 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$, enquanto a remoção líquida é dominante para intensidades de $10^7 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$.

A atenuação do feixe pode ocorrer na superfície do plasma que no entanto funciona como fonte armazenadora de calor, mantendo a furação contínua e melhorando sua cosmética [47]. Um aumento intenso na evaporação é seguido do ofuscamento do feixe na poça o que reverte o gradiente de temperatura e de pressão. Pelo sopro do gás, a nuvem é dissipada e novamente torna a subir a temperatura e pressão na poça. Este ciclo dinâmico parece determinar a ênfase do processo com base na duração temporal dos pulsos.

7. Métodos de furação

Há três diferentes métodos [89], para aplicações com exigências diferentes tendo resultados diferentes. Os três métodos de furação por *Laser* são por pulso único ou LSS, percussão e trepanação. Para caracterizar estes tipos podemos utilizar uma variável com *clusters* \mathcal{F} de

fator de forma, ou razão de aspecto. A razão de aspecto é a relação entre a profundidade e o diâmetro dos furos estudados. Comumente se denomina furo um orifício que atravessa uma chapa. Entretanto, o rigor gramatical indica outra forma de classificar pela geometria, que pode ser furo cego para furos feitos em apenas uma das faces e perfuração para furos que atravessam a amostra.

7.1. *Laser Single Shot* - LSS

LSS é o processo no qual se dispara um único pulso sobre uma amostra, mantendo o feixe e o alvo fixos um em relação ao outro. A razão de aspecto \mathcal{F} varia bastante, sendo difícil estimar previamente por meio de cálculos. Na forma equacionada fica que $\alpha < \mathcal{F} < \beta$, onde $\alpha \sim 1$ e $\beta \gg 1$. Este processo é geralmente utilizado em estudos para se avaliar a eficiência energética de erosão do feixe, ou perfuração onde a qualidade cosmiética tem relevância marginal. Para diagnosticar, o *stress* residual existente na região abaixo de uma superfície processada por meio de calor intenso, pode ser utilizado LSS construindo microfuros, os quais servem como janelas para posterior análise interferométrica. Na microfuração de placas multicamadas, com diferentes características de condutividade elétrica é utilizado LSS para formar furos cegos. Outra aplicação do LSS é o implante iônico no substrato para fabricação de circuitos integrados. Constatando que pulsos curtos produzem estrago com menor incerteza estatística, estão sendo realizados estudos para aplicação em cirurgia oftalmológica utilizando LSS com largura de pulso da ordem de femto segundos, para precisão submicrométrica.^[90] Também denominado cratera, o furo obtido por LSS ^[91] é assim conhecido principalmente por resultar numa geometria errática. Numa conceituação mais precisa, a cratera é a erosão produzida por explosão decorrente, de uma frente de onda opto-acústica durante sua propagação num meio inelástico ^[86].

7.2. *Percussão*

É o processo no qual um trem pulsos *Laser*, com ou sem controle no número dos pulsos, é disparado sobre sobre a peça num período tempo. É um processo no qual a erosão do alvo é progressiva podendo ou não ser controlada. Na percussão, o feixe e o ponto de trabalho também estão fixos um em relação ao outro. A razão de aspecto de um furo obtido por percussão pode variar entre $1 < \mathcal{F} < 10^n$ onde $n < 3$, e geralmente é utilizada em furo cego com alto índice de sofisticação, na produção de galerias para arrefecimento ou para

lubrificação com geometria e profundidade preestabelecidas. [92] A percussão é utilizada também para fazer o *piercing*, um furo guia para o início da trepanação.

7.3. Trepanação

É o processo no qual o feixe *Laser* se move com relação ao alvo enquanto um trem de pulsos incide sobre a peça. Também chamado furação helicoidal [26], é utilizado em furações com elevada exigência, e geralmente é aplicada em microfuração com baixa razão de aspecto tendo $\mathcal{F} < 2$, ou em rasgos de geometrias complexas, um meio termo para corte de dimensões reduzidas. Este termo é dado ao processo por similaridade ao serrar do crânio para cirurgia cerebral utilizando trépano. O diâmetro do furo geralmente é bem maior do que o diâmetro do feixe, por isso havendo necessidade do deslocamento do feixe sobre a superfície. O trépano é uma ferramenta circular de corte, idêntica a uma serra copo. Existem três possibilidades de deslocamento, que pode ser por meio do movimento do feixe mantendo a peça fixa, ou trasladar a peça mantendo fixa a posição do feixe. Uma terceira opção é a mútua translação. [93] [94]

7.4. Considerações

Um desafio considerável que se faz atualmente é a microfuração dos circuitos impressos para dispositivos eletrônicos de consumo como telefones celulares e *palm-tops*, principalmente devido às pressões de mercado no sentido da miniaturização e redução de massa com aumento da qualidade e confiabilidade, cuja demanda já vem sendo crescentemente reprimida a algum tempo sem expectativa de reversão, apontando números indicadores de performance. Estes processos podem ser executados opcionalmente por recursos mecânicos de no mínimo 6 μm , sendo que o custo para diâmetros de 10 μm já é proibitivo [95]. Apenas no mercado mundial de aparelhos para telefonia celular, houve um aumento de 43 para 60 % na utilização de *Laser* pulsado em processos de microfuração [6].

No Japão 90 % dos processos de microfuração para indústria eletrônica é feito por *Laser*, já nos EUA estão sendo realizados esforços emergenciais de *upgrading* em sistemas *Laser* Nd:YAG, inserindo bombeamento por semicondutores, triplicadores de frequência e *Q-switching*. Na comparação do *Laser* Nd:YAG com o *Laser* CO₂, este tem a preferência por furar dielétricos mais rapidamente. Já o *Laser* excimer oferece maior rapidez podendo perfurar um arranjo multicamadas em vez de uma peça de cada vez. O ultra violeta é mais

eficiente por realizar extração sem fusão, e por isto sistemas *Laser* híbridos estão sendo desenvolvidos e utilizados.

Geralmente, como no caso da CPML, as máquinas dispõem de recurso para controlar um obturador, através do qual é possível isolar apenas um único pulso *Laser*. A energia de um único pulso do feixe *Laser* é suficiente para provocar a extração desejada, o obturador libera a passagem do feixe durante uma janela de tempo suficientemente pequena [60]. Quando são necessários vários pulsos o obturador permanece aberto, para passagem de um trem de pulsos sobre o ponto focal.

A trepanação é semelhante a um corte circular de diâmetro reduzido, que pode variar da ordem de algumas dezenas de microns até alguns milímetros, utiliza feixe com pulsos de menor energia buscando maior qualidade e menor extração, assim isolando os ciclos térmicos em cada pulso, e tem sido empregada em processos de acabamento primoroso, realizando extração de material em quantidades muito reduzidas para cada pulso, o que resulta na diminuição na velocidade do processo.

O furo cego é utilizado na desobstrução de regiões danificadas, em ensaios para determinar a eficiência de um único pulso, e na texturização de superfícies. A utilização de furo cego apoia estudos na determinação de parâmetros como limiar de fusão e evaporação [96]. Nos ensaios realizados para verificar a qualidade cosmética, um dos resultados apresentados foi uma evidente ineficiência do feixe em perfurar. Abaixo de um determinado valor de intensidade não há expulsão do material mesmo fundido, fenômeno este que inviabiliza a perfuração apesar do aumento de energia.

Capítulo II – Parte Experimental

Neste capítulo, nosso propósito é voltado a discutir os fenômenos, e detalhar a influência e o controle dos parâmetros envolvidos no processo de microfuração. Tratamos inicialmente de aprofundar a descrição da CPML, em seguida sua parametrização, logo após discutindo o aprimoramento das características do feixe. Foi dada atenção especial aos parâmetros cujo controle concorrem mais fortemente para aprimorar os resultados desejados.



Figura 6 – Vista da estação de trabalho dentro do laboratório CPML

8. Central de Processamento de Materiais por *Laser* - CPML

O mercado brasileiro de serviços para processamento de materiais por *Laser* é abastecido quase que exclusivamente por equipamentos *Laser* CO₂ de média e alta potência. Algumas empresas utilizam sistemas dedicados, tendo sido concebidos e destinados exclusivamente às suas próprias necessidades. Uma vez que tais recursos não atendem a todas as aplicações, nem tampouco às necessidades das pequenas manufaturas, uma expressiva parcela do mercado relacionado à usinagem de precisão por meios avançados permanece desassistida em face às exigências do mercado, pondo a perder inúmeras oportunidades de negócios e desenvolvimento. [97]

Tentando minimizar este problema, o Centro de *Laser* e Aplicações do IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) desenvolveu a CPML, que possui flexibilidade e precisão em corte, microfuração, soldagem e tratamento térmico. Habilidade e conhecimento são necessários na resolução de questões nesta área, e o grupo de construção de protótipos *Laser* estabeleceu tais bases. Progressos foram obtidos pelo Programa nacional brasileiro para o Desenvolvimento de ciência e Engenharia PRODENGE, no qual a CPML está inserida.

O protótipo de um equipamento para processar materiais por *Laser* foi desenvolvido no IPEN. O equipamento foi construído sobre a estrutura de uma fresadora CNC, na qual o eixo árvore e o porta-fresas foram substituídos por um módulo *Laser* pulsado de neodímio. O feixe *Laser* fornece uma potência média de até 100 W, com máxima energia por pulso de 10 J, largura temporal variando entre 0,2 ms e 2,0 ms com taxa de repetição até 500 Hz [98] [99]. O sistema é adequado ao corte e furação de cerâmicas e metais de espessura até 4 mm, podendo também ser utilizado em solda e tratamento térmico superficial de metais. Estes processos podem ser realizados com ou sem gás de proteção. Uma câmera CCD monitora e inspeciona a área de usinagem e permite posicionamento do feixe sobre a peça.

Diferentemente dos sistemas disponíveis, que são dispendiosos, grandes e pesados, concebidos para grandes lotes de produção, a CPML é uma máquina mais flexível, apropriada especialmente aos projetos especiais, envolvendo pesquisa e desenvolvimento onde a precisão no posicionamento pode furar dimensões reduzidas, cortar, e soldar no mesmo equipamento. É dotada de acionamento CNC que controla três eixos lineares e um eixo acessório rotativo, um módulo *Laser* pulsado Nd:YAG com entrega de feixe na mesa. Uma visão completa da estação de trabalho é mostrada na figura 6. Dependendo da configuração do ressonador o feixe pode ser gaussiano TEM₀₀ ou multi modo, podendo apresentar nesta faixa um fator qualidade $M^2 < 20$. Esta versatilidade permite uma ampla faixa de aplicações em lâminas que podem variar de 100 µm até 4,0 mm de espessura.

Máquina - foi construída sobre a estrutura de uma fresadora CNC, marca Rocco, modelo GL700, com três eixos ortogonais mais um eixo rotativo de fixação, interpolados dois a dois. O eixo árvore e o porta-fresas foram substituídos por um módulo *Laser* pulsado de neodímio, associado a um sistema óptico para entrega de feixe na mesa. Os eixos têm cursos de deslocamento 700 mm, 300 mm e 400 mm para X, Y e Z respectivamente. A

precisão de repetibilidade no posicionamento é menor que 20 μm e a velocidade máxima de deslocamento é 80 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Controlador Numérico - CNC Heidenhein 360. Programa CAD-CAM versão 6.13 marca registrada MasterCam, com pós processador dedicado para CNC e módulo *Laser*. Um microcomputador Pentium monitora a fonte de bombeamento para o *Laser*, e o CNC controla o *shutter* (obturador) e a válvula de gás. Os parâmetros de bombeamento para ajuste da fonte são inseridos por meio de um aplicativo dedicado, marca registrada Cvi.

Fonte de potência - bombeia energia para dentro da cavidade ressonadora alimentando a lâmpada de descarga por arco, que transfere luz ao meio ativo *Laser*. Este processo apresenta baixa eficiência, tipicamente 10 % da energia emitida pela lâmpada é absorvida pelo meio ativo *Laser* [¹⁰⁰]. Esta configuração apresenta pico de potência elétrica na lâmpada de até 288 kW, largura de pulso entre 0,2 to 2,0 ms. Taxa de repetição até 500 Hz e potência máxima na lâmpada 12 kW. Para obter tal desempenho, o fornecimento de energia é chaveado em 100 VDC produzindo 16 kW. A conversão foi montada com transistores IGBT (*insulated gate bipolar transistors*), controlando a saída de tensão entre 150 e 700 volts. A energia é armazenada num banco de capacitores, enquanto que um circuito *chopper* controla a potência pico na lâmpada. O esquema de um módulo *Laser* típico é mostrado na figura 7. Nele são apresentados os elementos básicos para produção do feixe, bem como acessórios necessários para aplicação em processos de usinagem, feitos sobre a mesa da máquina CNC.

Módulo *Laser* - é composto por cavidade de bombeamento e espelhos do ressonador. A cavidade de bombeamento é mono elíptica folheada por vaporização com ouro [¹⁰], contendo um bastão *Laser* com diâmetro 6,35 mm e comprimento 150 mm, e única lâmpada de bombeamento, que pode ser do tipo Xenônio ou Kryptônio dependendo da aplicação. A cavidade de bombeamento contém tubos de quartzo ao redor da lâmpada e do bastão, para fluxo turbulento de água que mantém um eficiente resfriamento.

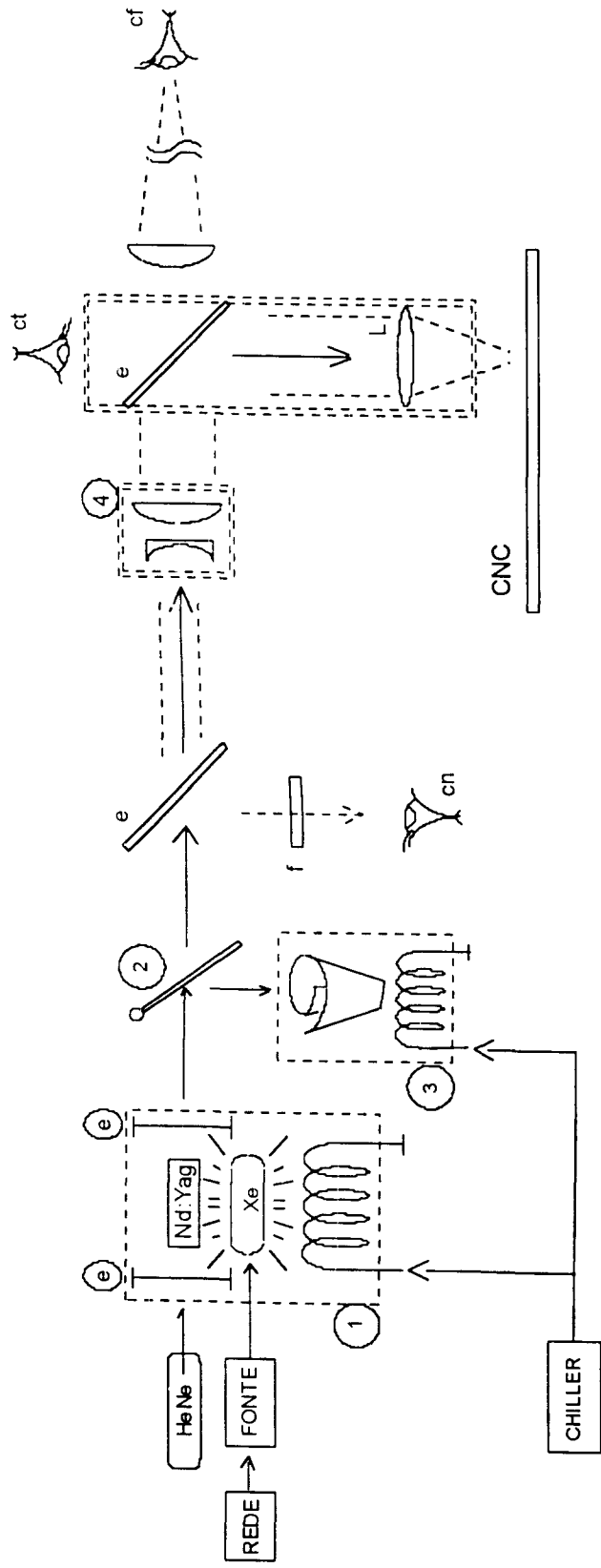


Figura 7 – Diagrama esquemático de um módulo *Laser Nd:Yag* contendo ressonador (1), *shutter* (2), absorvedor de feixe (3), expansor (4), três câmeras, sendo uma para análise do feixe *near field* (cn), outra no *far field* (cf) e uma terceira para inspeção do ponto focal, ou ponto de trabalho (ct). O *Laser HeNe* tem a finalidade de auxiliar no alinhamento do arranjo e de posicionamento do feixe infravermelho de alta potência.

Entrega de feixe – é feita por um conjunto óptico que guia o feixe desde o espelho de saída do ressonador até o ponto de trabalho na mesa de trabalho. Uma fração do feixe é retirada para diagnóstico. Esta amostra do feixe é obtida por reflexão. Um separador de feixe, leva uma amostra a uma câmera CCD e outra a um fotodetector. Uma câmera marca Cohu, acoplada a um monitor dedicado para posicionamento e inspeção visual no ponto focal, permite monitorar o padrão de potência no *near field* (campo adjacente), e um fotodetector mostra o perfil temporal do pulso *Laser*. Um par de lentes formam um expensor, que expande o diâmetro do feixe antes da focalização.

O expensor tem razão fixa de expansão em duas vezes. Para aplicações que requerem feixe no modo fundamental é usado um expensor com razão três de multiplicação do diâmetro. O feixe passa então por um cabeçote onde é defletido verticalmente para baixo, sendo focalizado sobre a mesa. O cabeçote é um modelo comercial da marca LASAG, disponível para diversas distâncias focais, que neste caso utiliza lentes com $f = 50$ mm ou $f = 100$ mm para focalização do feixe. O cabeçote também incorpora uma câmera CCD e um bico para sopro do gás de assistência a alta pressão.

Ressonador *Laser* - para um alto grau de versatilidade foi necessário construir um ressonador com alta flexibilidade que, com a simples mudança no posicionamento dos espelhos, permite uso eficiente em corte, microfuração, soldagem e tratamento térmico de superfícies metálicas. Pode gerar feixes com elevado número de modos TEM, fator qualidade $M^2 \sim 100$ destinado às aplicações em soldagem, ou feixe no modo fundamental TEM₀₀ com baixo fator qualidade M^2 necessário a processos como furação com elevada razão de aspecto. O *design* da cavidade pode incorporar um entre três diferentes ressonadores, pela troca relativamente simples de uma configuração para outra, obtida pelo reposicionamento de dois espelhos no interior da cavidade.

Uma configuração de alta potência e feixe multi modo para soldagem, um outro com fator qualidade aproximado $M^2 = 12$ para corte eficiente com *kerf* diminuto, e outro para feixe no modo fundamental. O *kerf* é uma fenda deixada na passagem do feixe durante o corte.

O ressonador foi concebido para compensar a lente térmica induzida no bastão de cristal, de forma que este procedimento originalmente desenvolvido para *Laser* em *continuous wave* (não pulsado) e modo TEM₀₀ [101], pode ser eficientemente aplicado ao *Laser*

pulsado com reduzido número de modos. Por isto, para frequências de pulsos acima de 10 Hz, o bastão de cristal em regime típico de operação, tem alcançado equilíbrio térmico. A degradação normalmente associada com modo de operação transversal no bastão de elevado diâmetro, é a pequena faixa de utilização na potência de saída. Para compensar esta perda o ressonador foi concebido com especial cuidado para zonas de estabilidade [102]. Isto permite operação com lâmpada de potência desde 4,00 até 7,50 kW mantendo baixo fator de qualidade, sendo $M^2 < 20$.

Arrefecimento - A refrigeração para o bastão e lâmpada é produzida por um equipamento *chiller* comercial marca Neslab, modelo HX-500. Fornece água deionizada a temperatura constante e fluxo direto na cavidade bombeadora. A temperatura é controlada em 17 °C e o fluxo mantido a 20 litros por minuto. Tubos e mangueiras são feitos de material inerte para evitar contaminação da água. Em caso de funcionamento irregular, os controles de segurança para fluxo, temperatura e pressão do circuito desligam o *Laser* e os movimentos da mesa.

Suprimento de gás - Um eficiente suprimento de gás foi montado e acoplado à CPML. Consiste de uma bateria com cilindros de gás comprimido, de diferentes composições, acoplados à máquina por tubos plásticos e um conjunto de válvulas e dois estágios reguladores que permitem selecionar o tipo de gás e a pressão de acordo com a necessidade do processo. Pode ser utilizado argônio, hélio, oxigênio ou nitrogênio. Operando com nitrogênio a pressão é disponível até 20 bar. Como um gás inerte, o nitrogênio previne contra oxidação e a altas pressões elimina a deposição de material ressolidificado.

Desempenho geral - O formato temporal dos pulsos típico é retangular com atenuação inferior a 10 % no seu bordo de descida, conforme pode ser visto na Figura 8. Este comportamento é mantido usando tanto lâmpada de Xenônio quanto de Kriptônio. Em tais condições, as faixas de largura de pulso produzidas são entre 300 μ s e 2 ms no caso da lâmpada de Xenônio, e entre 2 ms e aproximadamente 10 ms no caso da lâmpada de Kriptônio.

Para a duração 200 μ s os pulsos mostram suave elevação, e usando a mesma lâmpada de Xenônio para pulsos com duração maior que 2 ms implica em atenuação no bordo de descida. A figura 8 mostra os três casos mencionados.

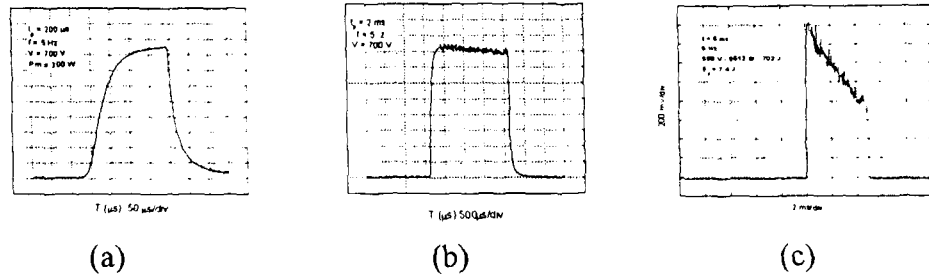


Figura 8 - diferentes perfis temporais para diferentes larguras de pulso *Laser*, usando lâmpada de Xenônio, (a) 200 μ s; (b) 2 ms; (c) 5 ms.

O formato de pulso influencia na boa eficiência térmica, podendo ser apropriado para aplicações isentas de porosidade e trincas [102], principalmente na soldagem de ligas de alumínio [103]. A formação de bolhas na camada ressolificada de material em soldagem é condição que pode ser otimizada, utilizando o formato de pulsos mostrado na figura 8. Uma relação entre potência de pico, formato de pulso e comprimento de onda é abordada por Chen, et all [104].

Em termos da energia ou potência média de saída, o equipamento apresenta eficiência total de 1,3 % medida após a lente focal. A faixa de energia e potência foi obtida com $M^2 \sim 12$. Obviamente, para melhorar a qualidade do feixe, obtendo menor valor para M^2 , implica na perda de eficiência, enquanto que um incremento na eficiência energética do módulo, corresponde a elevação do valor M^2 piorando a qualidade. Uma seleção apropriada do ressonador é reflete na precisão dos resultados. Um feixe *Laser* Nd:YAG com $M^2 \sim 15$ é muito pior que um feixe *Laser* CO₂ que apresenta $M^2 \sim 2$ mas muito melhor que um potente *Laser* neodímio comumente apresentando $M^2 \sim 100$.

8.1. Parametrização

Manipulando pelo programa lógico Cvi, pode-se fornecer pulsos com largura temporal τ_p no intervalo $0,2 < \tau_p < 2,0$ ms com resolução em degraus de 100 μ s. Pode também fornecer pulsos isolados por meio de obturador instalado no painel, ou trem de pulsos cuja frequência F pode ser calibrada através do programa Cvi entre $1 < F < 500$ Hz, com resolução unitária.

Um valor de potência média P_M foi previamente estipulado por dois motivos principais. Primeiro a longevidade da lâmpada, segundo a manutenção do modo transversal eletromagnético TEM. Conforme foi descrito, sendo mantida constante a potência média, favorece o desenvolvimento de uma lente térmica constante, mantendo então os modos TEM idênticos. Foi estipulada uma estreita faixa de trabalho entre $5700 < P_M < 5800$ W.

Na caracterização da CPML foram medidas a energia e a área iluminada, e estimadas a potência média, a largura de pulso, e a frequência dos pulsos por meio de parametrização. Como a extração de material é o resultado da energia eficaz absorvida no ponto de trabalho, e como o calor se dissipa por condução a uma taxa elevada nos metais, um item crítico de controle é o balanço final entre energia do feixe, largura de pulso e coeficiente de absorção, ou absorcividade.

Os parâmetros controlados inicialmente foram a energia de pico e a taxa de repetição, enquanto que os parâmetros controlados com menor grau de liberdade foram a intensidade, a energia unitária, a área do disco iluminado, e a largura de pulso. A potência pico é determinada pela capacidade da fonte. A taxa de repetição determina a potência média do módulo que também é limitada pela capacidade térmica do arrefecimento. A intensidade do feixe I pode ser calculada pela equação (45) onde, E é a energia unitária do pulso, S é a seção transversal do feixe no ponto focal, τ_p é a largura de pulso. Esta relação é equivalente à (44) na qual $P = E \cdot \tau_p^{-1}$.

$$I = E (\tau_p \cdot S)^{-1} \quad (45)$$

Foram levantadas as condições de contorno da CPML para os valores de potência pico e intensidade do feixe, como função da energia unitária. Esta região compreende o grau de liberdade, com manipulação dos demais parâmetros. Foi estimada a energia unitária E_p variando entre $0,1 < E_p < 3,0$ J. Os limites críticos para intensidade mínima e máxima do feixe estão no intervalo $5,5 < P_p < 47$ kW.mm⁻², contida na área iluminada de 0,071 mm², um disco iluminado de diâmetro 300 µm, conforme descrito na figura 9. O eixo horizontal deste gráfico tem escala logaritmica com a finalidade de tornar mais visível a região próxima à origem das coordenadas.

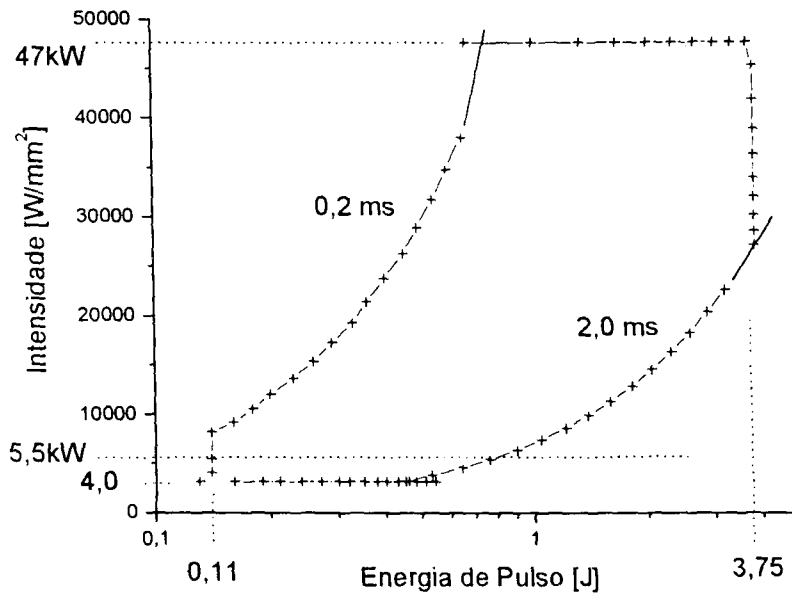


Figura 9 – Condições de contorno da CPML.

O limite superior da energia unitária E_p para um suposto regime contínuo, é definido pelo limite máximo de carga térmica suportada pelo banco de capacitores, ao passo que o limite inferior da mesma é imposto pelo limiar da potência mínima para produção de *Laser*.

8.1.1. Determinação do perfil de potência

Na análise do feixe *Laser*, feita por meio de uma câmera CCD conectada a um microcomputador, que processa o sinal pelo software Win Cam Beam Analyzer, produzido por MerchantekTM.

Devido a alta intensidade do feixe *Laser*, certos cuidados devem ser tomados com respeito à sensibilidade da câmera, cujo limiar de dano segundo o fabricante fica em $300 \mu\text{W}$, que corresponde a sete ordens de grandeza abaixo da potência pico do pulso *Laser*, algo em torno de 3 kW. Filtros de densidade neutra foram inseridos na trajetória do feixe, para atenuar o sinal incidente sobre a câmera.

A figura 10 mostra uma imagem da distribuição de potência por meio do programa *Win Cam Beam Analyzer*, para uma tomada no campo distante. Podemos visualizar no canto inferior esquerdo da tela a imagem em perspectiva tridimensional equivalente. Temos na figura 11 outra imagem tomada no campo adjacente, utilizando opção do programa com

imagem em perspectiva. No lado direito é exibida uma escala de cores correspondentes às intensidades do feixe, relativas ao valor de pico da intensidade do feixe.

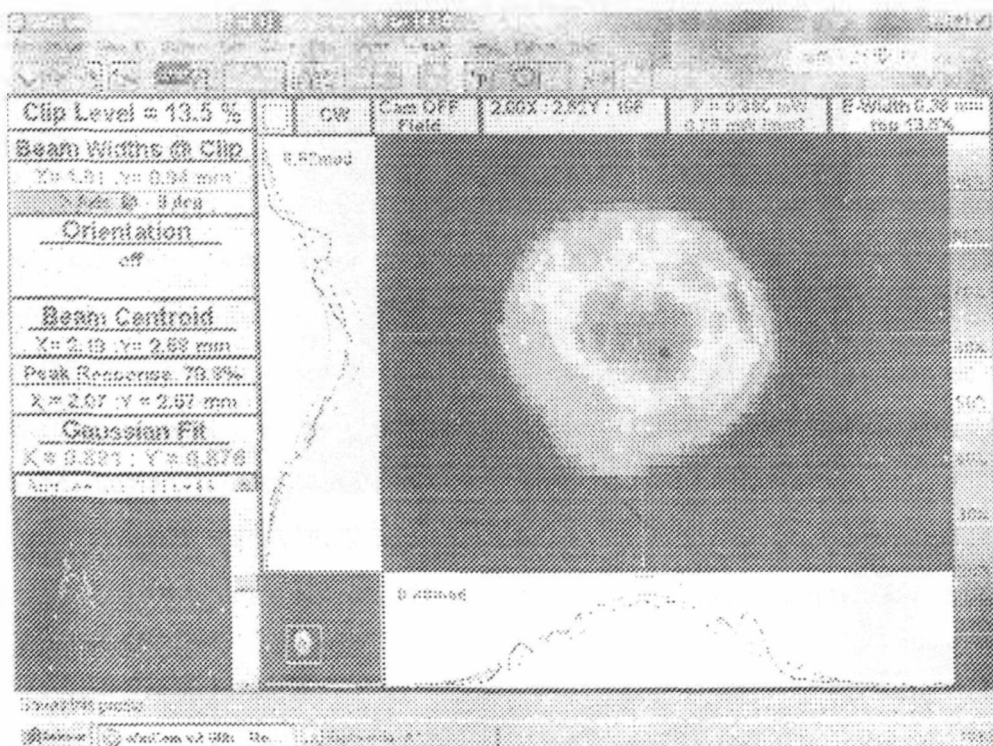


Figura 10 - Imagem da distribuição de potência no *near field*.

Nas caixas cinzas situadas abaixo e do lado esquerdo da figura principal, são apresentados em linha sinuosa os perfis que descrevem ponto a ponto o valor da intensidade, ao longo dos eixos x e y da mira tendo como referência o eixo de propagação. O programa traça uma curva gaussiana equivalente que aparece em vermelho para ambos os eixos.

Estas imagens foram tomadas com potência média 5,8 kW e com feixe em multimodo TEM, e ressonador com amplificação *free path*. O método utilizado pelo aplicativo é o do segundo momento D_{40} discutido no capítulo anterior.

A característica divergente do feixe fornece os parâmetros para determinação do fator qualidade M^2 . Para tanto foi utilizado o programa que fornece as dimensões de diâmetro do feixe para as coordenadas x e y , por meio dos valores apresentados na tela. Segundo este método, a câmera é deslocada no eixo z , ao longo da trajetória do feixe. Anotando as distâncias da trajetória no *far field* e também as dimensões em x e y o programa realizou o cálculo por meio da equação (17).

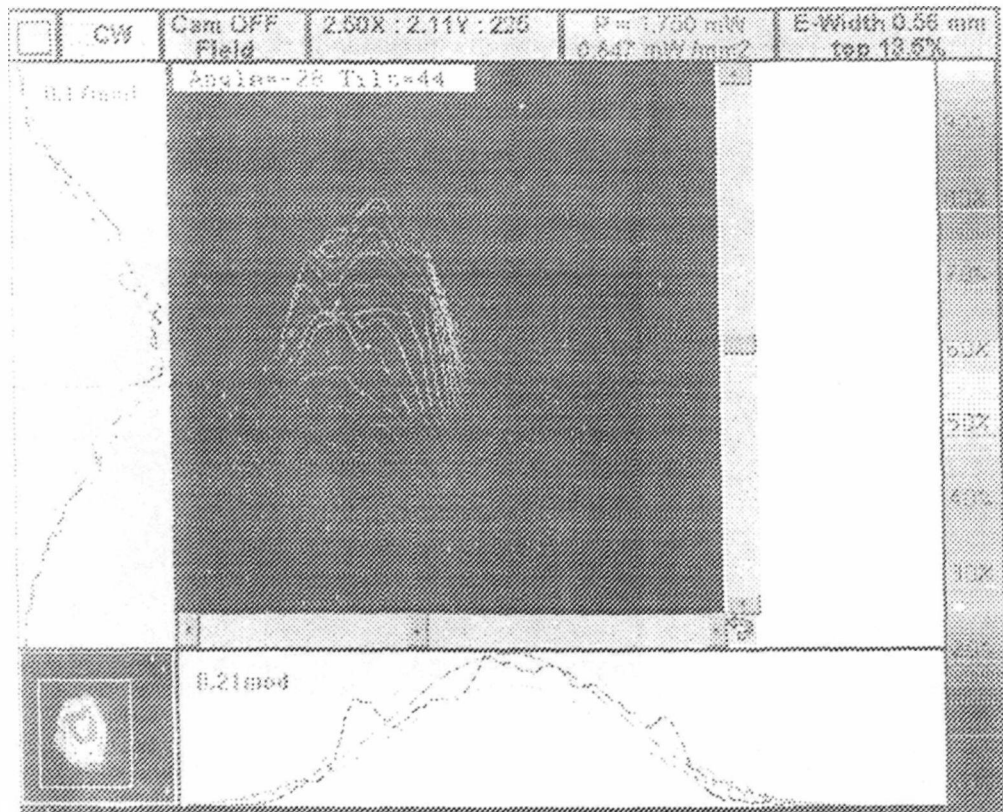


Figura 11 - Imagem da distribuição de potência no *far field*.

O cálculo indicado gerou o perfil divergente apresentado na figura 12. A linha contínua é um ajuste plotado pelo programa. O ponto da trajetória onde o feixe adquire o menor raio é denominado cintura (*waist*), que neste gráfico está deslocado 12 mm da origem.

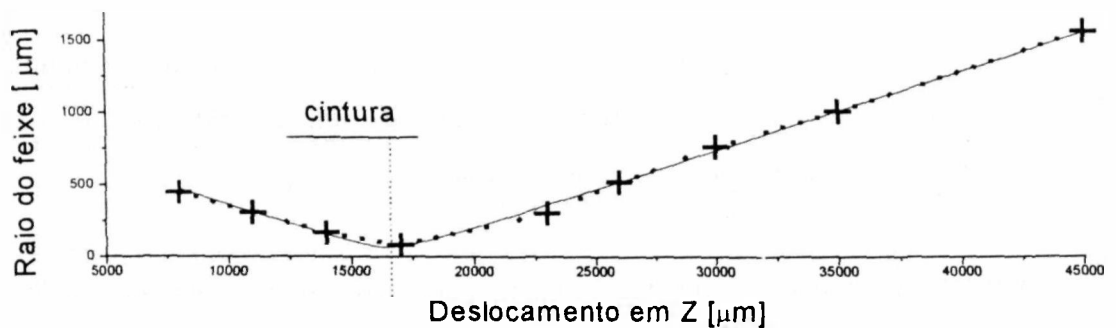


Figura 12 - Medição da divergência do feixe

Como termo de comparação temos que o fator qualidade do feixe é unitário no modo fundamental ideal. No nosso experimento, pelo método mencionado, o fator qualidade do feixe *Laser* utilizado foi determinado como tendo $M^2 = 10,57 \pm 4,16$.

8.1.2. Filtragem intracavitária

Pela inserção de filtro espacial, uma íris interposta na cavidade do ressonador, apenas os modos de menor ordem são amplificados gerando um feixe *Laser* cuja distribuição espacial de intensidade apresentam melhor qualidade. Existe um custo quantitativo com diminuição da energia total mas com aumento da intensidade, o que favorece os resultados cosméticos no processo. Nos experimentos desenvolvidos pudemos constatar a influência da filtragem espacial do feixe sobre a intensidade e a qualidade do mesmo. Foram realizadas filtragens com íris de duas diferentes aberturas, uma com diâmetro 4,0 mm e outra com diâmetro 1,2 mm. Foram experimentadas duas séries de amostras com furos obtidos pelo feixe filtrado, uma para cada filtragem diferente. Os resultados destes experimentos são apresentados neste capítulo.

8.1.3. Conformação temporal do pulso

Um fotodiodo de silício submetido a irradiação converte a luz em sinal elétrico, produzindo uma imagem temporal do pulso *Laser*. Utilizando um osciloscópio marca Tektronix, modelo TDS 684B, acoplado à saída deste fotodiodo, e fazendo incidir sobre o mesmo, uma amostra do feixe, foi obtida a imagem apresentada na figura 13, na qual se pode observar a formação dos *spikes*. A envoltória dos pulsos luminosos têm relação direta com a amplitude e com a duração temporal dos pulsos bombeados.

O traço do formato temporal do pulso apresentado na figura 13 ilustra a medição de um pulso *Laser* com largura temporal 200 μ s, considerando o valor FWHM para determinação da duração dos pulsos [61] [62].

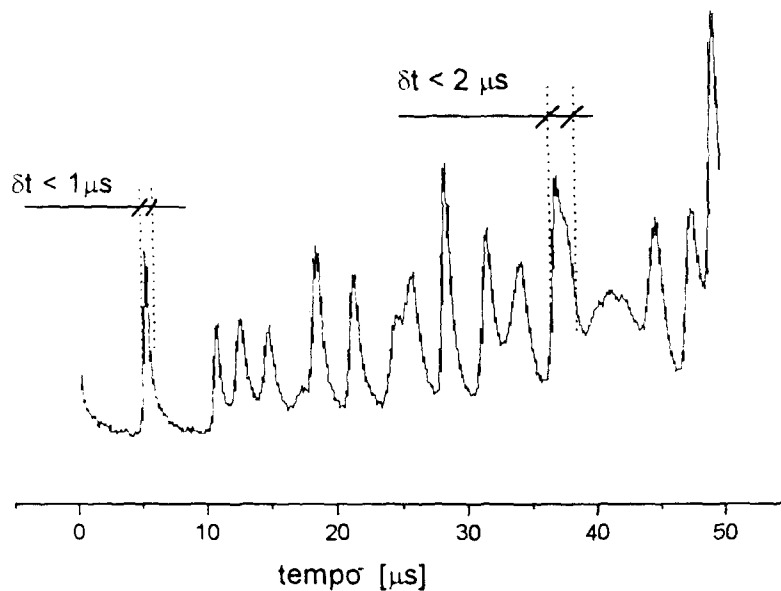


Figura 13 – Traço mostrando *spikes*, num pulso *Laser* de 200 μs .

Por se tratar de um equipamento digitalizado de 500 MHz, resolução de leitura em 2 ns, o osciloscópio utilizado tem excelente resolução para o experimento realizado. Trata-se de um equipamento com recurso opcional para leitura de picos. Ao calibrar o aparelho para leitura dos picos, o valor médio RMS e a fidelidade dos valores plotados são distorcidos não apresentando confiabilidade nos valores de amplitude. Por este motivo, deve ser observado o gradiente de subida dos picos agindo como ignitores de plasma, dando menos atenção à variação dos valores. Fica patente que a relação existente entre estes valores são mais importantes pela ordem de grandeza do que pelas grandezas registradas. As principais utilidades destas leituras são de mensurar o intervalo temporal existente entre um pico e outro, o intervalo entre o bordo de subida e descida, além de demonstrar o comportamento geral da intensidade do feixe com suas instabilidades.

Nos pulsos retangulares, os picos apresentam largura FWHM da ordem de 500 ns enquanto que o intervalo entre os mesmos é maior que 1 μs [7]. É mencionado por von Allmen que o uso de duplo estágio oscilador-controlador de *spiking*, para produção de feixe *Laser* Nd:YAG produziu uma seqüência controlada de *spikes*, que foram aplicados na microfuração de muito boa qualidade.

Já foi utilizada uma técnica para agir como ignitor de plasma [41], provocado pelo feixe incidente. Os autores recomendam um formato especial de pulso para um máximo acoplamento térmico entre o feixe e a superfície de trabalho.

8.1.4. Energia do feixe

Um gráfico pode ser levantado, cuja curva da energia do feixe (medida no ponto de trabalho) *versus* a energia (elétrica parametrizada para bombeamento) na lâmpada, resultando na determinação da eficiência do *Laser* para uma extensa faixa de operação, que é o rendimento do sistema. Tomadas as leituras contidas na tabela 2 anexa, resultaram na construção do gráfico da figura 14.

Este gráfico relaciona a energia de pulso no ponto de trabalho com a energia de pulso bombeada pela fonte chaveada. Linearizando o gráfico, o resultado indica estreita analogia com o valor pressuposto, algo bem próximo de 1,25 % para a região entre $0,2 < E_p < 1,0$ J sendo a eficiência de *slope* (rampa) 1,60 %.

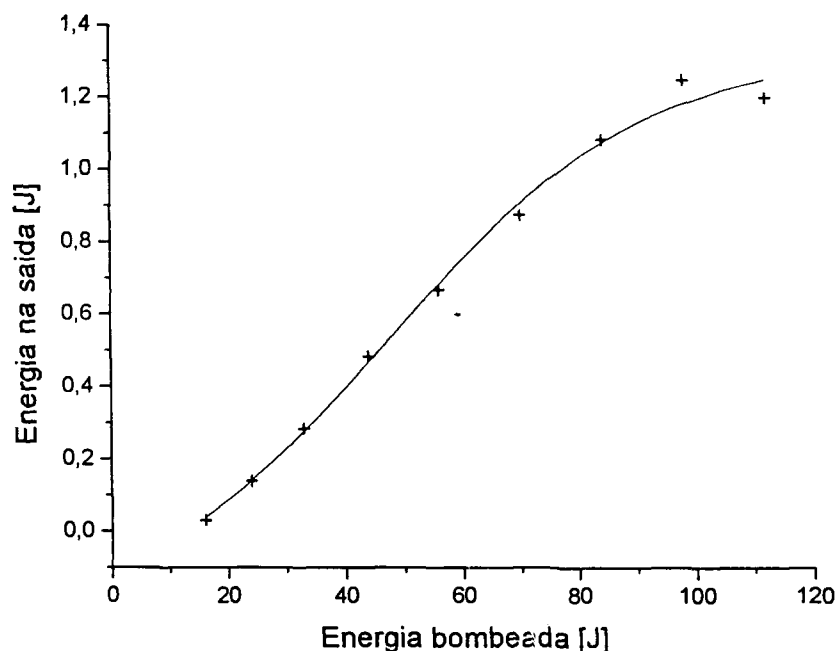


Figura 14 – Curva de transferência de energia do módulo *Laser*.

Assim, tomamos a eficiência total de 1,3 % como referência para todos os valores de energia unitária utilizadas neste trabalho. Desta forma, a energia de cada pulso *Laser* é a energia de bombeamento multiplicada pelo fator 0,013.

Desenvolvimento - O tetraedro dos materiais utilizado em pesquisa e desenvolvimento de materiais conhecido por 4P, é composto pelo polinômio “princípio-propriedades-processo-produto”. Estes passos se sucedem num ciclo interativo e são integrados numa seqüência típica no desenvolvimento de cada âmbito tecnológico. Uma representação deste tetraedro é mostrada na figura 15 fazendo distinção entre tecnologias de duas naturezas.

Nas tecnologias tradicionais o “processo” tem importância marginal, e está subordinado aos outros elementos. A principal ênfase está nas “propriedades” físico-químicas do material, que exercem papel determinante sobre o “princípio” pre-estabelecido de abordagem, e ambos influem sobre as características do “produto” e seu “processo” de fabricação, havendo uma tênue ligação entre o princípio pré-estabelecido e o produto final.

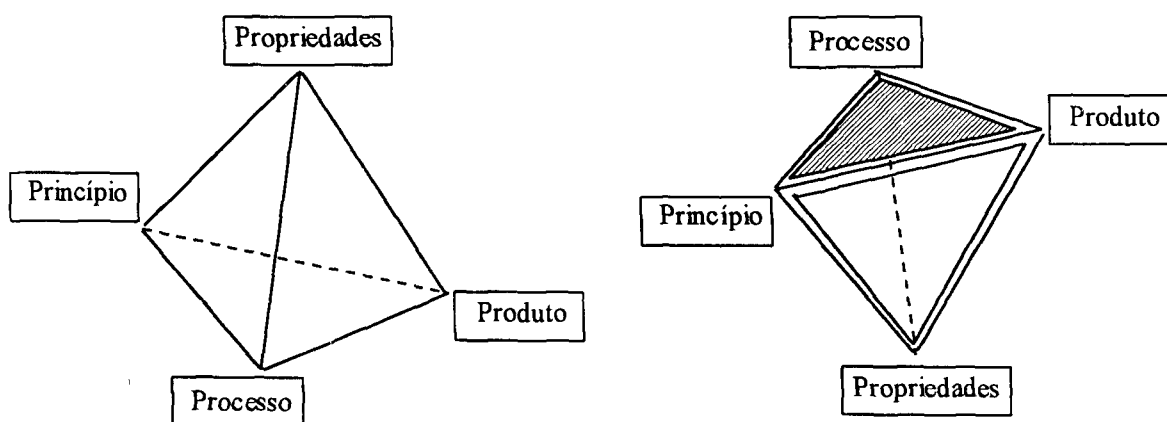


Figura 15 – Tetraedro dos materiais aplicado a dois domínios tecnológicos.

À esquerda, relação tradicional; à direita, relação de alta tecnologia.

No caso de tecnologia avançada, é razoável afirmar que as “propriedades” podem ser manipuladas quase completamente, sendo decorrência dos demais elementos. O “produto” final ganha importância com relação ao “princípio” concebido, enquanto que o “processo” é determinante sobre todos os elementos. A única relação que o “processo” tem para com as “propriedades” intrínsecas são a adaptação, por meio de manipulação dos parâmetros. Uma semelhança entre os conceitos de processo e parâmetros é inevitável. No presente caso, as “propriedades” da radiação *Laser* são mais numerosas e mais frequentemente manipuladas, sendo muitas vezes mais fortemente determinantes. As “propriedades” do material processado exercem influência marginal conforme já foi discutido. Segundo

Prokhorov [41] na medida em que se vai aproximando do conjunto ótimo de parâmetros do *Laser*, as diferenças entre as propriedades materiais vão se tornando irrelevantes.

8.2. Restrições

Limitações do feixe são pertinentes à sua baixa intensidade, a falta de um dispositivo chaveador, e de polarizador. Estes recursos poderiam aprimorar aplicações do módulo *Laser* da CPML conforme mostram estudos referentes ao uso de feixe colimado em furação de Hastelloy e cerâmica, para câmara de combustão aeronáutica [54]. Também utilizando feixe colimado a profundidade da furação aumenta linearmente com o aumento da energia de pulso [96]. Metais e algumas cerâmicas são sensíveis à polarização do feixe [105] durante a furação. Quanto mais fortemente orientada for a polarização, melhor pode ser a qualidade e velocidade do processo. Por isto, seria de grande atratividade a inclusão de um elemento polarizador do feixe.

9. A escolha do material

Na atualidade tem sido constatada uma discordância entre os interesses acadêmicos e os comerciais. A indústria é o elo de ligação entre ambos, e pelo seu papel no desenvolvimento econômico constitui a peça insubstituível na era pós industrial. Por este motivo este empreendimento incluiu as necessidades industriais como eixo. O interesse do presente trabalho apontou para um conjunto composto pela escolha do material, escolha do método de construção das amostras, estudo da capacidade de extração, estudo da influência dos parâmetros, caracterização cosimética dos resultados, apresentação e discussão dos resultados. Diversamente dos critérios acadêmicos, a escolha do material e a construção das amostras seguiram uma visão mais aproximada possível das condições reais encontradas no chão de fábrica, tanto para lotes piloto quanto em produção seriada.

A escolha do material levou em consideração os trabalhos já realizados por parte dos grupos desenvolvedores da pesquisa básica, e na área de microfuração por *Laser*, que tem acumulado informações a respeito do processamento de metais como chumbo, cobre, alumínio, titânio, tungstênio, com elevado grau de pureza, em chapas com espessuras reduzidas (*foils*) de no máximo 200 μm , para níveis sutis de energia, e também de ligas ferrosas ou não como aço inox, aço carbono e ligas especiais, especialmente as ligas de elevada tenacidade para fins aeroespaciais.

Uma vez que é do nosso interesse apresentar resultados práticos que possam ser utilizados principalmente na indústria mecânica e aeronáutica, e que os argumentos encontrados são muitos, apontando para a escolha do aço inox AISI 304. O aço inox AISI 304 é uma liga não magnética, tem boa ductilidade, excelente soldabilidade, baixo limite de escoamento, elevados limites de resistência à tensão, tração e torção. Tem bom alongamento, estabilidades química e térmica, e a única restrição é o endurecimento por tratamento térmico. É amplamente utilizado em diversos ramos industriais, e fundamental na indústria aeronáutica, frigorífica, hospitalar, odontológica, cirúrgica e farmacêutica. [55] [106].

O aço inox AISI 304 é uma liga composta basicamente de ferro, cromo de 18 a 20 %; níquel de 8,0 a 10,5 %; manganês menos de 2,0 %; carbono residual menos de 0,08 %; fósforo residual menos de 0,045 %; ponto de fusão aproximadamente 1425 °C; condutividade térmica 150 mW (cm . K)⁻¹; densidade 7,9 g.cm⁻³; coeficiente de expansão 17,3 °C⁻¹; resistividade elétrica 72 μΩ . cm; módulo de elasticidade 195 GPa; resistência à tensão 550 GPa. [107]. Não conseguimos localizar o valor exato do coeficiente de difusão térmica, ou difusividade térmica k . Segundo Prokhorov [41], a maioria dos metais apresenta $0,1 < k < 1,0 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ e com base nisto adotamos para fins ilustrativos o valor aproximado $k = 0,5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.

10. Desenvolvimento experimental

Como a parte experimental aqui descrita foi desenvolvida sobre aço inox AISI 304, todas as considerações seguintes sobre o material são referidas ao mesmo, salvo citação em contrário. Não foi constatada ênfase apreciável nos registros da pesquisa e desenvolvimento, relacionada ao aprimoramento da furação por *Laser* em não metais, levando em conta a geometria e a cosmética final.

A escolha dos métodos foi desenvolvida com base em pesquisa literária e mesmo na quantidade de propostas feitas por empresas interessadas em conhecer a atratividade do *Laser* diante dos processos concorrentes. O estudo da capacidade de extração e a cosmética resultante foram obtidos na CPML.

“O aquecimento do material por *Laser* é principalmente determinado pela sua absorção característica para um dado comprimento de onda.” Prokhorov & Mihăilescu

Caracterização cosmética dos resultados - As principais características extrínsecas do módulo *Laser* que contribuem para os resultados cosméticos do processo de furação por *Laser* pulsado, e que servem de argumento são a quantidade de respingos, a conicidade, o diâmetro esperado da furação, a espessura do material, e um conjugado de ambos consistindo na razão de aspecto.

10.1. Capacidade de extração por LSS (*Laser* Single Shot)

Como uma das características intrínsecas do *Laser* Nd:YAG é sua instabilidade temporal, mesmo em regime estacionário, o resultado cosmético pode ser bastante incerto. O LSS apresenta uma relação útil para estimar a capacidade do pulso *Laser* na extração de material durante o processo.

Os resultados das furações foram obtidas por LSS, variando a largura de pulso para cada configuração, visando a determinação dos índices de eficiência de extração e profundidade, além de contribuir para uma estimativa da ocorrência de ressolidificado, respingos e índice provável de repetibilidade onde a intensidade do feixe foi mantida constante, para cada uma das séries.

A figura 16 mostra uma série onde os furos foram realizados exatamente com os mesmo parâmetros, indicando um comportamento muito irregular da interação e eficácia do feixe sobre a superfície metálica. Outra evidência é o comportamento instável de orientação na extração apontando em diferentes direções. É possível que a penetração tenha ocorrido para além do plano de desbaste o que implica em erro na leitura de medição da profundidade. Isto é particularmente verdadeiro para pulsos de elevada energia. Este resultado foi obtido com feixe $19,4 \text{ kW.mm}^{-2}$ de intensidade, energia 1,9 J por pulso de largura temporal 1,4 ms. O diâmetro maior que 500 μm indica grande dano por extração sólida para um feixe de diâmetro 300 μm e a profundidade média medida é 880 μm .

Nesta imagem podemos notar que houve rechupe na raiz do furo mais profundo, o segundo da esquerda para a direita, conseqüência de forças de recuo. Este rechupe ocasiona tanto extensas trincas como microtrincas estruturais e, no caso de perfuração, é responsável por obstrução do furo quando a intensidade é moderada.

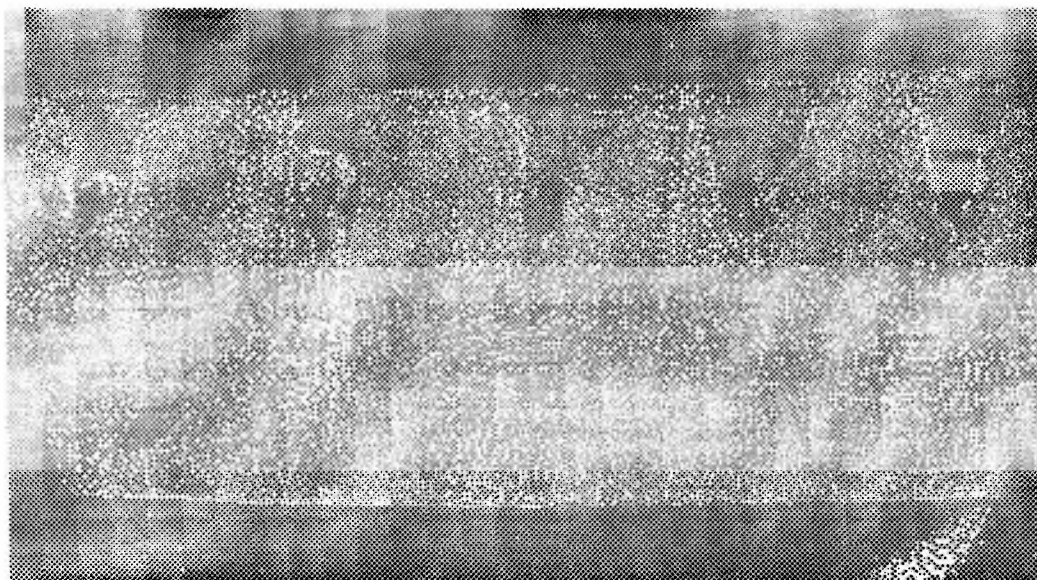


Figura 16 – Série de furos cegos com LSS 1,9 Joule por pulso.

Variando a largura de pulso para cada configuração, foram determinados os índices de eficiência na penetração, além de observar a ocorrência de ressolidificado e respingos. Os resultados obtidos por LSS foram analisados, para intensidades em quatro degraus de intensidade do feixe 7,5; 10,5; 19,4 e 32 kW.mm⁻², sendo o diâmetro iluminado constante em 300 µm, o que significa área iluminada 0,0707 mm², com distância focal 100 mm, com pulsos em larguras temporais de 0,4; 0,7; 1,0 e 1,4 ms e são encontrados na tabela 3 anexa.

As medidas de profundidade na penetração produziram as curvas do gráfico da figura 17, que foi plotado com as curvas obedecendo a um ajuste polinomial. Fica clara a relação da intensidade para com a profundidade da furação. Uma vez que a energia unitária é diretamente proporcional à largura do pulso, o mesmo gráfico indica também uma estreita relação entre a energia contida no pulso e sua capacidade de extração do material.

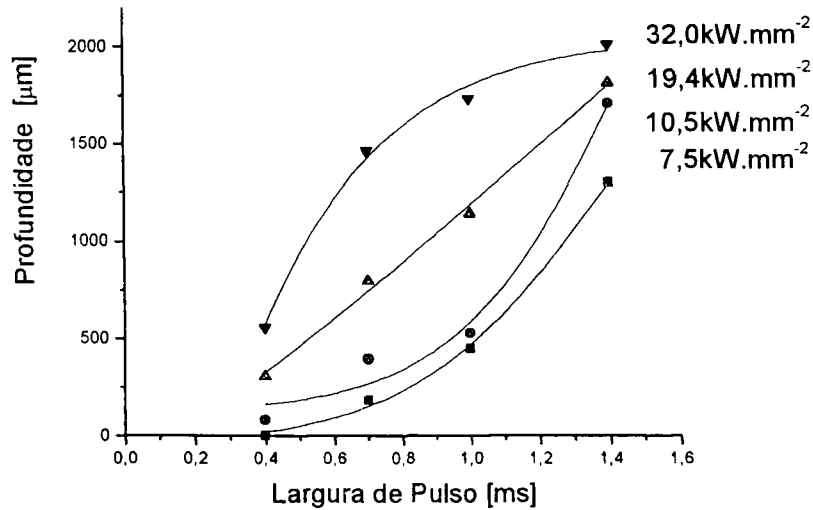


Figura 17 – Curvas de eficiência aprimorada, para extração por LSS

É possível verificar uma dispersão dos dados, pela inclinação das curvas, na região para pulsos de largura temporal entre 0,6 e 1,0 ms havendo um estreitamento das medições para fora deste intervalo. Com o intuito de esclarecer esta anomalia, foi desenvolvida outra série de experimentos, cujos dados são apresentados a seguir. Por meio deste recurso, valores muito próximos foram conseguidos utilizando desta vez intensidades 19 e 25 kW.mm⁻², com apreciação mais detalhada no intervalo entre 0,7 e 1,0 ms que pode ser verificado na figura 18, cujos valores são apresentados em anexo na tabela 4.

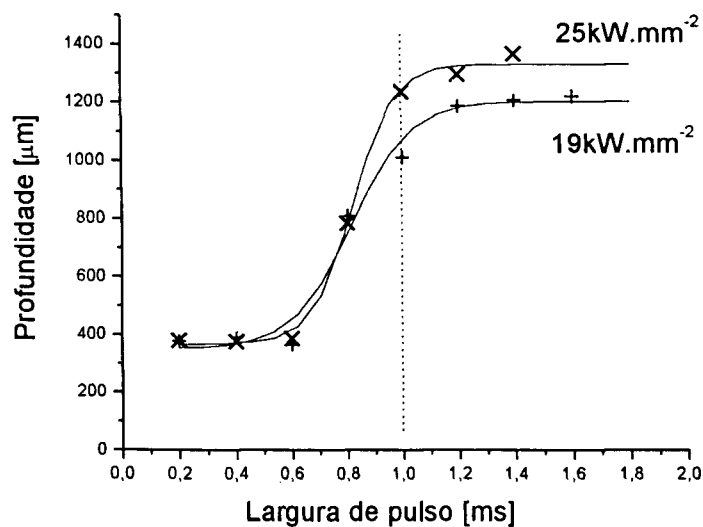


Figura 18 – Curvas de eficiência refinada, para extração por LSS

Esta constatação aponta uma importante concordância com a literatura [7], pelo fato de ocorrer uma drástica mudança no comportamento do processo de extração na região de duração do pulso 1,0 ms. Nesta região, a ênfase de extração de material passa do vapor para o estado líquido. Quando se trata simplesmente de retirar material sem um cuidado mais estreito com a qualidade resultante, é nesta faixa que ocorre a melhor relação da curva custo *versus* benefício. Isto pode ser muito útil para fazer o *piercing* que precede corte de peças com elevado número de entradas, minimizando tempo de processo.

Neste caso de LSS, usa-se a relação entre energia por pulso, largura temporal e intensidade para a determinação do diâmetro obtido. A partir daí, ajusta-se a taxa de repetição do feixe para que a sua potência média de entrada seja da ordem de 5,8 kW. A relação entre velocidade de deslocamento e a taxa de repetição determina o espaçamento entre os furos. Um exemplo desta aplicação é uma peneira de aço inox que foi desenvolvida, com chapa de espessura 500 μm tendo furos de diâmetro 400 μm . A variação dimensional dos furos obtidos foi menor que 10 %, que foi considerada menos importante do que a elevada produtividade do processo. Neste peça, projetada para ser utilizada como filtro em máquina de café expresso, foram executados 600 furos em menos de 1 minuto.

10.2. Processo de percussão

Este método de furação é o mais amplamente utilizado, por meio de feixe filtrado ou não. A natureza espacial do feixe é importante pois neste caso o *Laser Nd:YAG* desenvolve muitos modos TEM ao ser amplificado, ao passo que no feixe filtrado há maior coerência espacial [9] pela redução destes modos, fazendo com que a furação tenha apresentado resultados bastante diferenciados.

Pelo mesmo processo de construção que já foi descrito, as amostras foram construídas por percussão e analisadas, tendo uma configuração dos parâmetros com intervalos de intensidade mantendo constante a largura de pulso para cada uma das amostras.

Apresentamos nas figuras 19 e 20, algumas imagens micrografadas no MEV que de início apresentaram um visível avanço qualitativo com relação ao obtido no processo LSS, anteriormente descrito. No experimento com largura de pulso 200 μs foram utilizadas as intensidades 8,13; 9,18; 10,52; 11,99; 13,58; 15,32; 17,19 e 19,21 $\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$. Foi nesta

configuração que obtivemos os mais expressivos indicadores de razão de aspecto somado a ausência de ressolidificado na saída dos furos.

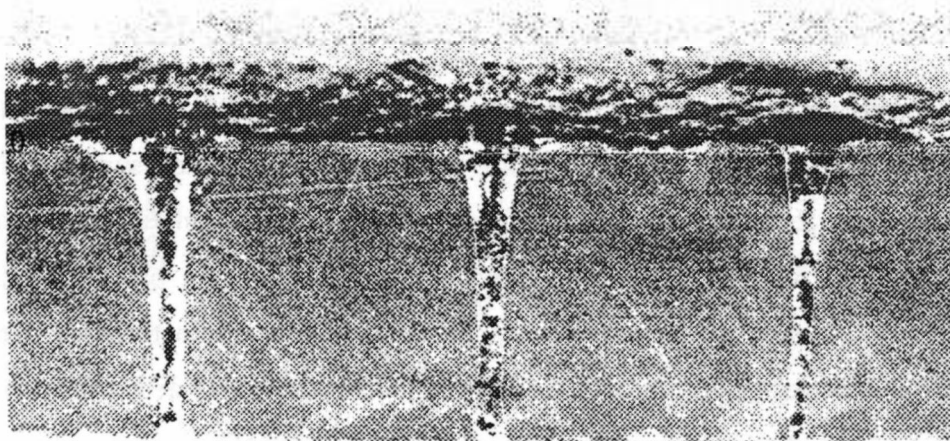


Figura 19 – Três furos obtidos com largura de pulso 200 μ s.

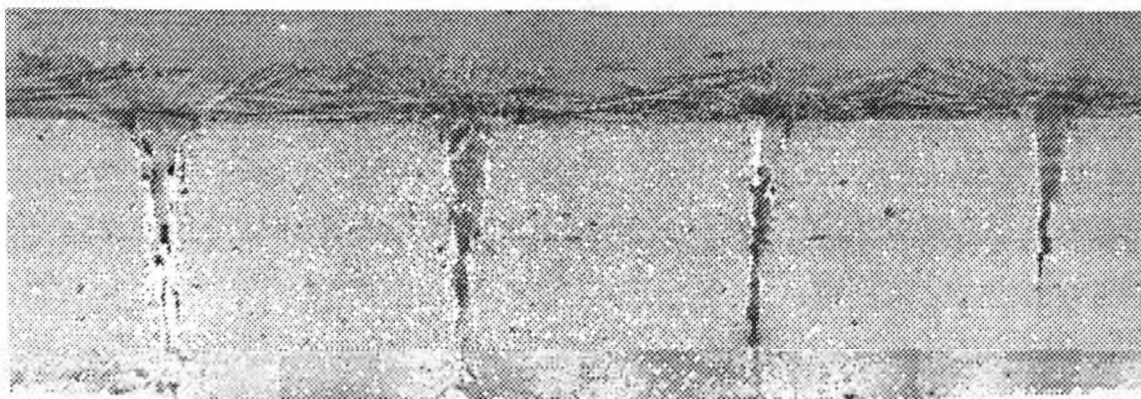


Figura 20 – Quatro furos obtidos com largura de pulso 300 μ s.

A razão de aspecto, ou o fator de forma, é o primeiro grande diferencial quantitativo que se pode observar na comparação entre LSS e percussão. A figura 19 apresenta a relação entre a profundidade e diâmetro, para furos obtidos com largura de pulso 200 μ s obtidos com menor intensidade 8,13; 9,18 e 10,52 $\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$. A profundidade na perfuração é igual à espessura da chapa de 1 mm. Uma vez que a profundidade é constante, sendo determinada pela espessura da chapa, em contraste aos furos cegos do estudo anterior feitos com LSS, a razão de aspecto varia na proporção inversa do diâmetro, e para baixos

valores de intensidade, um aumento da intensidade implica em aumento do diâmetro do feixe e do furo pelos motivos já discutidos no capítulo anterior, como pode ser observado nas figuras 23, 26, 27, 28 e 29. Nestas figuras são indicados, nas curvas, os diâmetros de entrada **dE**, diâmetros medianos **dM**, e diâmetros de saída **dS** dos furos.

O mesmo ocorre para pulsos com baixas energias. Isto resulta da interação entre dois fenômenos: um é o diâmetro eficaz do feixe, aquele cuja intensidade supera o limiar de extração, e o outro é a baixa intensidade dos pulsos, causando ineficiência em extrair totalmente material fundido, que acaba ficando retido, aderindo à parede do furo pela forças de recuo. A partir de certo valor da intensidade este efeito torna-se irrelevante, demonstrando que nesta região o processo atinge sua total capacidade de extração.

Na figura 20, as razões de aspecto medida dos furos da direita para a esquerda foram 4,93; 4,22 e 3,70 respectivamente considerando o diâmetro na entrada do furo, enquanto que considerando o diâmetro mediano foi 15,87; 13,89 e 11,36. Para chegar a estes valores foram medidos respectivamente 63; 72 e 88 μm os diâmetros medianos e calculados em 8,0; 10,1 e 11,4° os ângulos de conicidade. Nesta figura é evidente a projeção dos respingos ao redor da entrada dos furos, provocada pela extração na fase líquida. As intensidades utilizadas nesta amostra foram 5,43; 5,85; 6,85 e 7,96 $\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$ respectivamente da direita para a esquerda. Como pode ser verificado o furo à direita, com menor intensidade, não chegou a perfurar.

Para o caso de percussão com pulsos de duração 200 μs é necessário um maior número de pulsos para perfurar. Assim, a extração de menor quantidade por pulso leva a melhores resultados. Altas intensidades também são necessárias para retirar material da poça quanto maior é a profundidade.

Como os valores de energia e intensidade foram menores na amostra da figura 20 comparando com os valores da figura 19, a eficiência de extração pode ser determinada por este argumento, mesmo havendo aumento da largura de pulso que implica em aumento da energia. Um estudo preliminar dos efeitos da variação da intensidade sobre o diâmetro dos furos, medidos na entrada, na meia seção (aqui denominados “medianos”) e na saída, foi realizado por percussão mantendo-se fixos os demais parâmetros, com pulsos 200 μs . Os

valores dos diâmetros para as amostras obtidas por percussão com feixe *free path*, constam na tabela 5 do anexo.

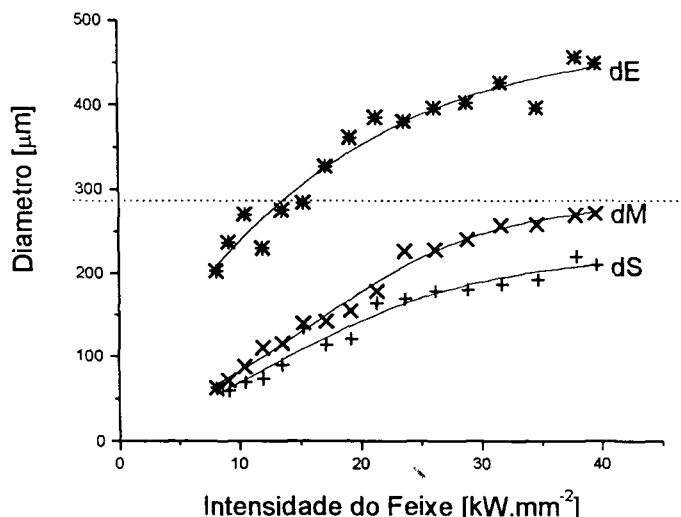


Figura 21 - Diâmetros obtidos por percussão, em função da intensidade do feixe, para $\tau_p = 200 \mu s$.

Um gráfico com os diâmetros de entrada **dE** (curva superior), diâmetros medianos **dM** (curva intermediária), e diâmetros de saída **dS** (curva inferior) para furos obtidos com largura de pulso $200 \mu s$ é apresentado na figura 21, num intervalo de densidade de potência ou intensidade variando na faixa $8 < I < 40 \text{ kW.mm}^{-2}$. As curvas foram traçadas por ajuste polinomial, e demonstram que os furos obtidos com maior intensidade têm uma tendência à uniformidade num valor próximo do diâmetro do feixe estimado em $300 \mu m$.

A tabela 6 no anexo também contém os valores dos diâmetros medidos em função das intensidade experimentados nas séries seguintes, enquanto que os valores de largura de pulso escolhidas para estudo de conformação geométrica são $300, 600$ e $900 \mu s$ por serem as mais representativas, ou expressivos, no que se refere aos contrastes discutidos em seguida. Os mesmos servem como referência para a construção dos gráficos das figuras 23, 24, 25, 26, 27 e 28. O gráfico da figura 21 é um modelo de construção dos demais que se seguem, com a nomenclatura das curvas. A curva superior indica a evolução do diâmetro medido na entrada do furo, a curva inferior indica os valores do diâmetro na saída do furo, e a curva intermediária representa o comportamento das medições medianas, feitas a meia espessura da amostra, entre a entrada e a saída dos furos.

O ângulo da conicidade dado em graus, foi determinado da forma mostrada na figura 22. Idealizando um cone perfeito com base nas medições do diâmetros de entrada e saída dos furos, foi determinado o ângulo de inclinação da parede do furo, conforme descrito a seguir. O ângulo apresentado nos gráficos de conicidade a seguir é dado por 2α cujo cálculo é dado na equação (46) onde α é o ângulo de inclinação da parede do furo, ou semi conicidade, d a diferença entre os raios de entrada e saída do furo, e e a espessura da chapa.

$$\alpha = \text{atg} (d / e) \quad (46)$$

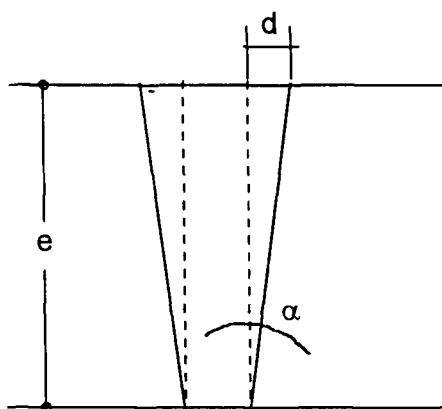


Figura 22 – Cálculo da conicidade na perfuração

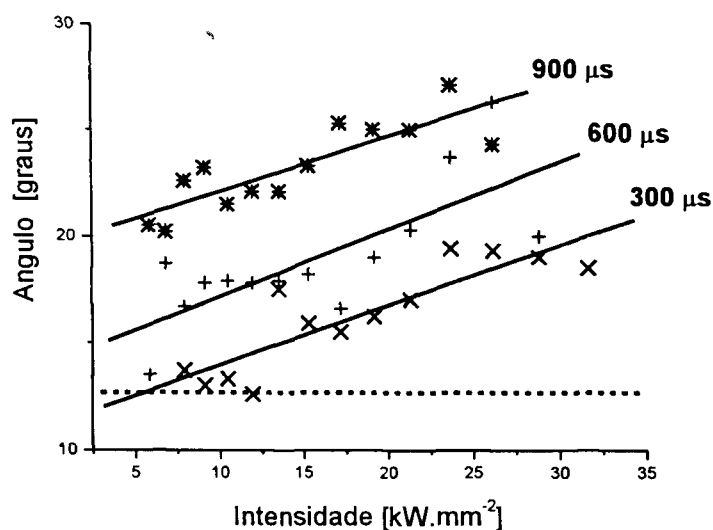


Figura 23 – gráfico da conicidade plena.

Com auxílio do gráfico da figura 23 verificamos que na medida em que a largura temporal dos pulsos aumenta, simultaneamente aumenta o ângulo de conicidade do furo. provocado pelo aumento do diâmetro na região de entrada do furo. Isto pode ser explicado por dois argumentos que se somam. Com as instabilidades no posicionamento do feixe multi modo, quanto maior for o tempo de exposição, maior será a probabilidade de aumentar a região danificada. O limiar de extração para pulsos com menor energia não chega a danificar a borda de entrada do furo; por isto, supomos que o aumento da conicidade para maiores intensidades seja devido a contribuição da soma de diversos modos TEM.

A entrada do furo, na face superior da amostra, recebe a maior carga de energia do feixe, e desenvolvendo a poça inicial. produzindo assim maior região danificada pelo calor. As instabilidades no posicionamento do feixe, ocorridas durante a percussão, que são insuficientes para produzirem extração dentro da poça líquida mas que eventualmente fundem a superfície, aumentam o diâmetro na região de entrada. Por outro lado, as partículas que aderem à parede do furo ao serem parcialmente expelidas ficam retidas pelas tensões de recuo e se ressolidificam internamente, diminuindo o diâmetro intermediário e o diâmetro de saída, aumentando assim a conicidade. Este fenômeno pode inibir o avanço do processo para valores reduzidos de intensidade e de energia, podendo produzir a obstrução de um furo pela prolongada exposição ao *Laser*. Isto explica outra importante relação que favorece o uso de percussão com elevada taxa de repetição, que extraindo menos material em cada pulso com maior número de pulsos resulta em melhor acabamento.

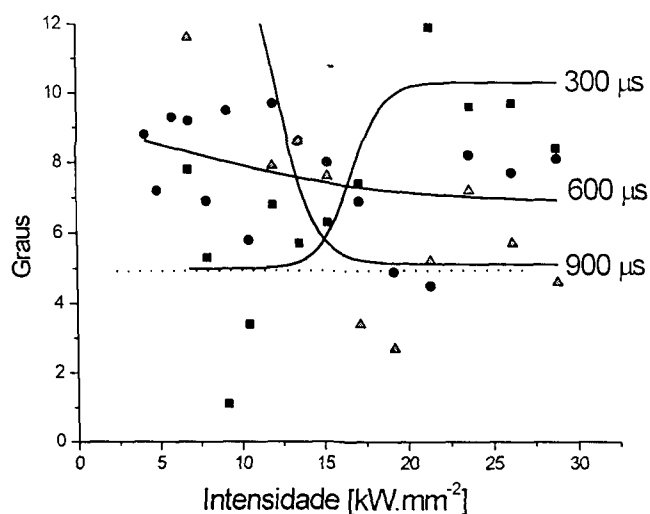


Figura 24 - Gráfico da conicidade na meia seção de saída.

O gráfico da figura 24 leva em consideração a conicidade na meia porção de saída do furo, sendo evidente sua minimização, uma vez que o diâmetro mediano é algo próximo do diâmetro medido na saída. A abertura do furo apresenta uma região superficial com elevado diâmetro mas a uma profundidade mínima a conicidade muda seu comportamento. Na região de 5 graus foi traçada uma reta tracejada nos gráficos das figuras 23 e 24 para reforçar a noção de patamar a ser mais detalhadamente pesquisado.

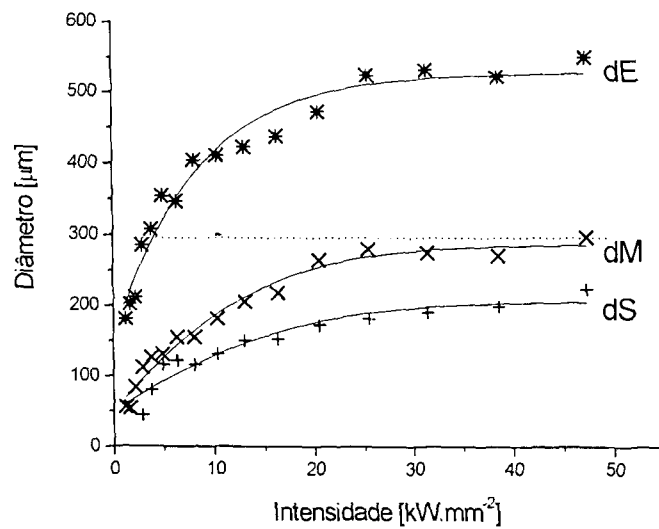


Figura 25 – Diâmetros para percussão com largura de pulso 300 μs

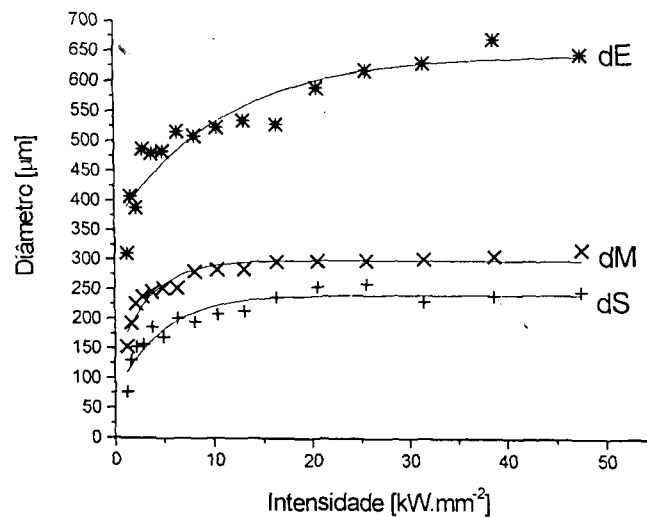


Figura 26 – Diâmetros para percussão com largura de pulso 600 μs

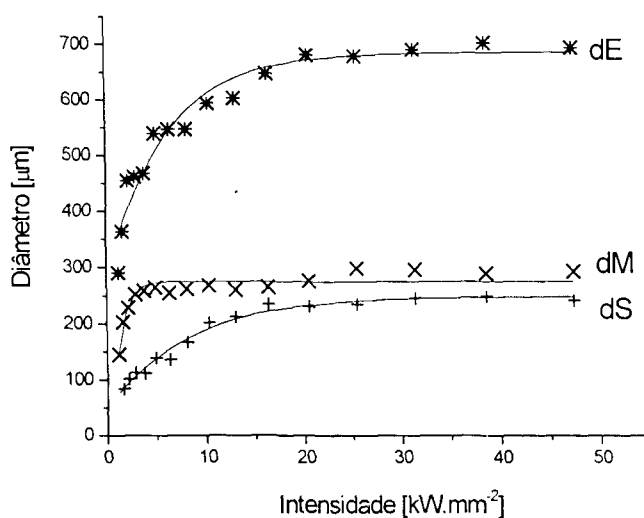


Figura 27 – Diâmetros para percussão com largura de pulso 900 μs

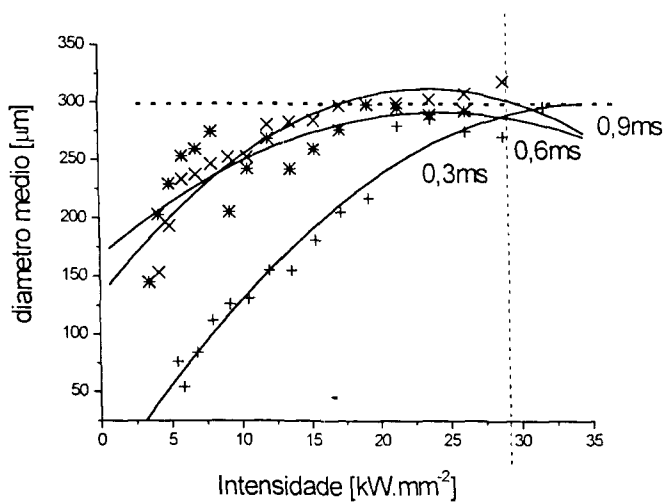


Figura 28 – Comparação entre os diâmetros medianos.

Os gráficos das figuras 27, 28 e 29 confrontam os diâmetros na entrada dE e na saída dS com os diâmetros medianos para as séries de furos feitos por percussão nas larguras de pulso 300, 600 e 900 μs para intensidades do feixe variando de 3,5 até 31,7 kW.mm⁻². A figura 30 faz comparação os comportamentos das curvas dos diâmetros medianos, obtidos entre os três gráficos anteriores. As curvas foram construídas por ajuste de regressão

polinomial de segunda ordem. Estes quatro gráficos indicam claramente um ponto de máximo diâmetro em 300 μm .

Pode ser facilmente deduzido que quando a intensidade aumenta, os pulsos mais estreitos apresentam melhor resultado, com desvio menor. Por outro lado os pulsos mais longos apresentam maior dispersão na região onde a derivada da curva é positiva, declinando logo após o ponto de máximo. Pulsos com largura temporal maior também mostram uma tendência de estabilização do diâmetro na entrada com o aumento da intensidade; porém, este diâmetro é maior quanto maior for a intensidade pelos motivos já discutidos.

Dentro desta faixa de trabalho, os pulsos com maior duração também mostram uma tendência de convergência da medida do diâmetro mediano para valores de intensidade do feixe mais próximos de $31,7 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$, final da escala estudada. Todavia, para valores acima de um certo limite, na região de $29 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$ da figura 28, este valor tende a diminuir novamente indicando degradação do processo, o que permite supor que haja energia unitária excessiva. Uma última análise sobre os grupos de experimentos pode ser feita comparando os resultados obtidos por diferentes larguras de pulso, e simultâneo à variação da intensidade. A série de amostras apresentadas na figura 29 foram feitas, pela ordem de cima para baixo, com larguras de pulso 300, 600 e 900 μs .

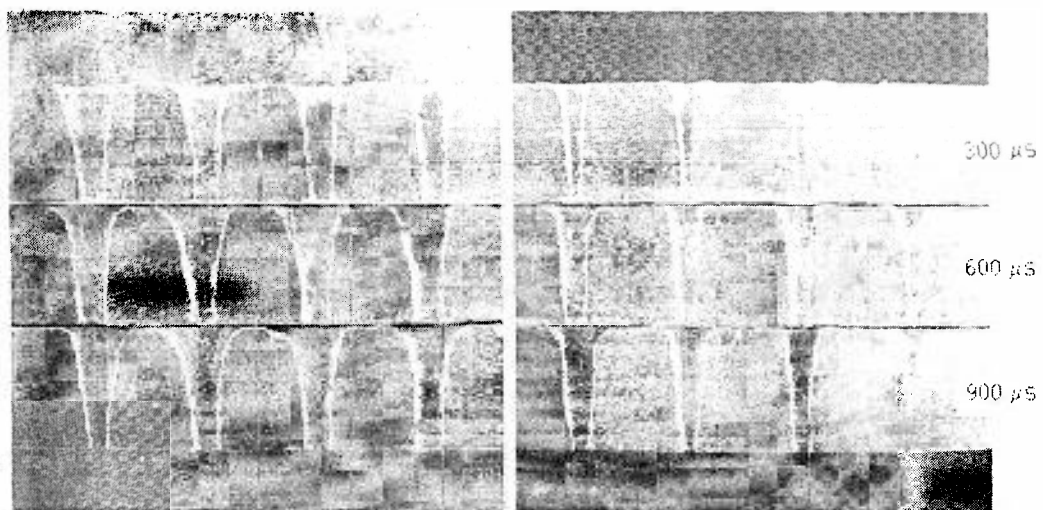


Figura 29 – Micrografias obtidas com larguras de pulsos 300, 600 e 900 μs , para intensidades 39; 37; 34; 31; 6,9; 5,9; 5,0 e 4,3 $\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$ da esquerda para a direita

No box à esquerda da figura 29, as intensidades foram maiores entre 39 e 31 kW.mm⁻², da esquerda para a direita, enquanto que à direita as intensidades foram menores, entre 7,0 e 4,0 kW.mm⁻². Pode ser visto o resultado baixas intensidades podem não conseguir perfurar seja quão longo for o tempo de exposição, principalmente para pulsos mais longos. Com relação às maiores intensidades, no box à esquerda, as diferenças são minimizadas.

O quarto furo da direita para a esquerda, na amostra inferior foi feito com pulsos 900 μs e intensidade 6,9 kW.mm⁻² apresentando resíduo ressolidificado no orifício de saída. Ao passo que o furo superior direito apresenta menor conicidade e menor resíduo tendo sido feito com largura de pulso 300 μs e intensidade 4,3 kW.mm⁻².

Isto evidencia que mesmo tendo maior energia unitária e intensidade similar, o resultado qualitativo fica comprometido, e os melhores resultados são obtidos quando uma menor quantidade de material é retirada em cada pulso. Verificamos que abaixo à extrema direita não foi obtida perfuração. Neste caso foram utilizadas intensidade menor 4,3 kW.mm⁻², e largura de pulso maior 900 μs indicando que a falta de intensidade não é recomposta pelo aumento de energia unitária. Isto está de acordo com a literatura que recomenda maiores intensidades para aprimoramento do processo. Mostra também que é preferível o aumento da intensidade pela diminuição da duração dos pulsos, não pelo aumento da energia unitária. Os pulsos com intensidade menor, não foram capazes de produzir um furo limpo na sua borda de saída, pois neste caso fica demonstrado que a geometria do ressonador (ou seja, o raio de curvatura dos seus espelhos e a distância entre eles) vai determinar as características espaciais do feixe. Estas características se referem à distribuição espacial de energia e de potência na seção transversal do feixe, e a forma como esta distribuição se comporta durante a sua propagação no *far field*.

Podemos observar também uma acentuada conicidade dos furos feitos com largura de pulso 900 μs nas baixas intensidades. O aumento da conicidade está relacionada com os danos na região de entrada. Os furos feitos por percussão apresentaram alargamento no diâmetro de entrada, porém apenas na camada superficial, da ordem de algumas dezenas de microns. A presença de respingos ressolidificados na parte externa da borda, também numa espessura muito fina, realça o argumento que, a cosmética resultante é grandemente influenciada pela película fundida na região adjacente.

10.2.1. Feixe com filtro espacial

Com o intuito de melhorar a qualidade na borda de entrada dos furos, optamos por utilizar um filtro no interior do ressonador, com orifício circular de diâmetro 4,0 mm, tendo por finalidade diminuir o número de modos espaciais oscilantes, melhorando assim qualidade espacial do feixe. Por este procedimento, o feixe focalizado tem diâmetro menor, tendo sido medido com 190 μm no ponto focal utilizando lente focal $f = 100$ mm. Ao introduzir filtro com diâmetro 1,2 mm o feixe medido no ponto focal tem diâmetro aproximadamente 60 μm . A introdução do filtro espacial no ressonador provoca uma diminuição proporcional na potência de saída do feixe, mas pela redução na divergência característica do feixe, a intensidade resultante é aumentada.

Foi determinada uma potência pico $P_p > 350$ W com $I = 5,5$ $\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$, como o rendimento do sistema varia, em primeira aproximação, proporcionalmente com a seção permitida de amplificação, a perda de potência fica proporcional ao valor da potência total desenvolvida no feixe com *free path*.

O comportamento da intensidade foi estudado pela medição do diâmetro do feixe no ponto focal seguida do cálculo. Assim, foi verificado que o feixe permanece com diâmetro diminuído proporcionalmente em toda a sua trajetória. Pela medição no ponto focal ficou comprovada a relação (47) em primeira aproximação. Proporcionalmente, relacionamos os diâmetros de amplificação no interior do ressonador, com e sem filtro, respectivamente 4,0 e 6,3 mm com os diâmetros medidos no ponto de trabalho 190 e 300 μm respectivamente.

$$\frac{6,3}{4,0} = \frac{300}{x} \quad \text{daí } x = \frac{4,0 \cdot 300}{6,3} = 190 \mu\text{m} \quad (47)$$

O mesmo critério se mostrou válido para íris com diâmetro de 1,2 mm como será discutido adiante na relação (48). Assim sendo, apesar da perda de potência comparado ao feixe em *free path* a intensidade é similar. Esta é uma constatação ainda sem respaldo, motivo pelo qual deixamos uma proposta de que sejam feitos estudos mais detalhados no sentido de comprovar ou não esta assertativa.

Uma análise completa comparando os efeitos da variação de intensidade do feixe, a energia unitária de pulso e a razão de aspecto determinam a dinâmica de extração de material na formação do furo. Para cada caso é preciso experimentalmente encontrar os parâmetros adequados à perfuração do material.

10.2.2. Aquisição dos dados & estudo do erro

Utilizando uma câmera, foram tomadas medições no diâmetro de entrada dos furos, no mediano e na saída. Nestas leituras foram apurados erros médios, tomando como base 20 medições, que na entrada foi de 10,6 μm e na saída foi de 5,35 μm gerando uma média total de 7,98 μm . Esta avaliação é consequência da definição da imagem nos contrastes. As intensidades foram calculadas segundo o processo anteriormente descrito.

Parâmetros experimentais - Foram construídas amostras, uma para cada diferentes larguras de pulso no intervalo $200 < \tau_P < 900 \mu\text{s}$ com degrau 100 μs para valores de intensidade do feixe fixados em 8,25; 10,88; 14,01; 17,68; 21,95; 26,86; 32,45 e 38,77 $\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$, gerando uma malha de oito furos, indicada na figura 30, para oito intensidades diferentes.

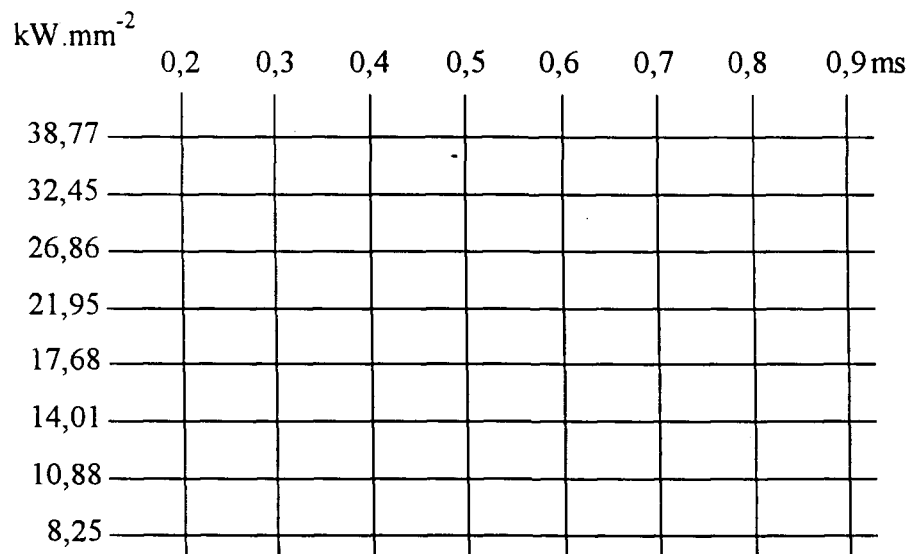


Figura 30 – Malha de furação ensaiada com feixe filtrado

Medidas para determinar o diâmetro gerou um valor médio na entrada 211 μm e na saída 124 μm . Apresentamos abaixo os gráficos levantados a partir das medições dos diâmetros, cujos valores que estão nas tabelas que constam no apêndice, e são função da intensidade.

As imagens tomadas das amostras, julgadas mais expressivas pelas medições, foram feitas nas larguras de pulso 200, 400, 600 e 800 μs agrupadas por intensidades idênticas. A apreciação cosmiética foi realizada por microscópio ótico, marca Olympus, capacidade de ampliação 1000 vezes na ocular. Acoplado ao mesmo um analisador de imagens com luz polarizada marca Laika, modelo Quantinet 600HR, tem capacidade para digitalizar e recolher os dados de imagem em memória e disco. Os erros médios apurados nas medidas tomadas são de 4,78 μm para superfície com boa definição e 6,55 μm com definição precária da superfície para trinta leituras em boas condições. As micrografias foram obtidas no MEV.

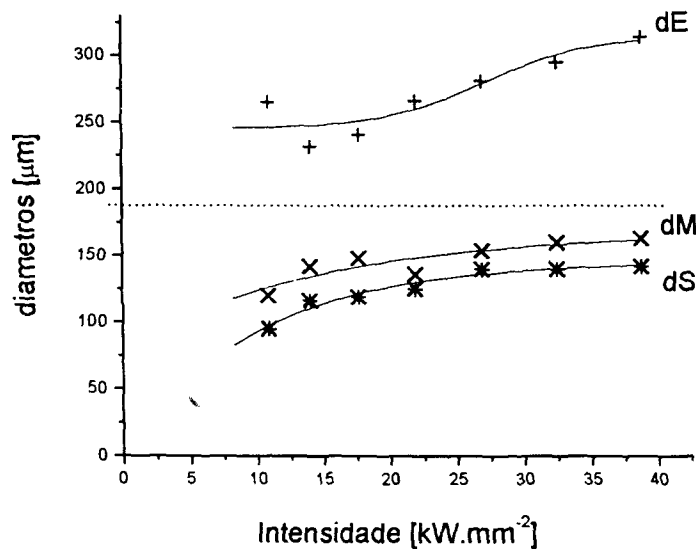


Figura 31 – Diâmetros para percussão com feixe filtrado, pulsos de 300 μs .

Os gráficos das figuras 31, 32 e 33 levantados a partir das medições, cujos valores estão na tabela 7 do anexo, descrevem os diâmetros de entrada **dE** (curva superior), mediano **dM** (curva intermediária), e de saída **dS** (curva inferior) como função da intensidade, para furos obtidos com largura de pulso 300, 600 e 900 μs respectivamente.

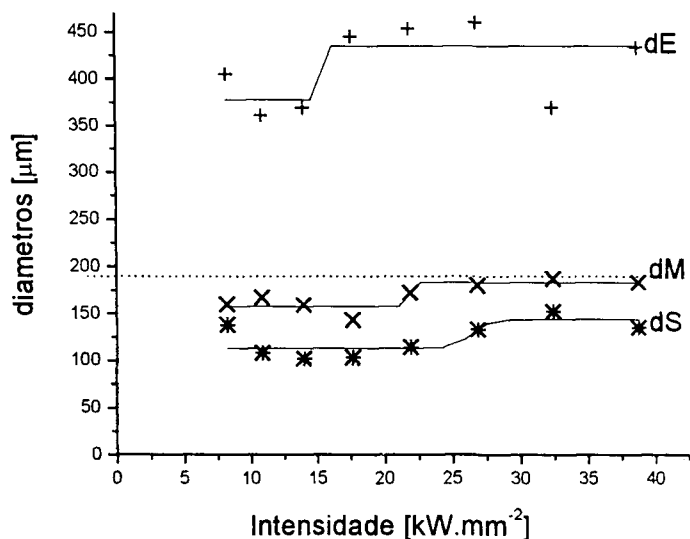


Figura 32 – Diâmetros para percussão com feixe filtrado, pulsos de 600 μs.

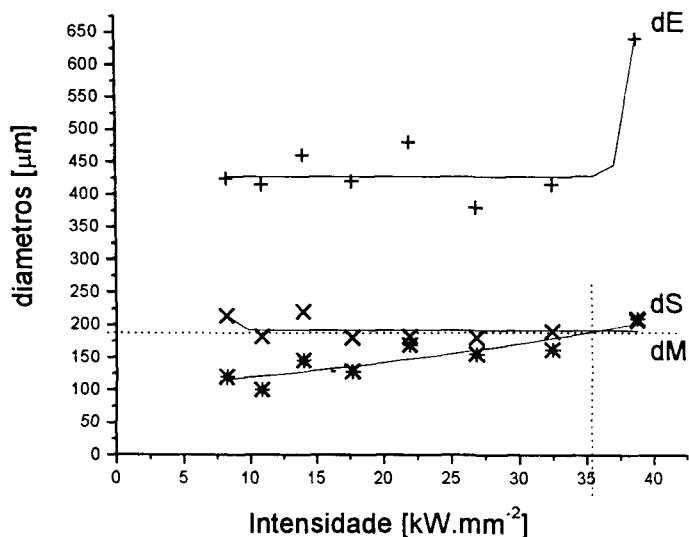


Figura 33 – Diâmetros para percussão com feixe filtrado, pulsos de 900 μs.

Um ajuste polinomial ameniza os desvios. Pode ser observado que os diâmetros dos furos obtidos com maior intensidade, também neste caso, tendem à uniformidade num valor próximo ao do diâmetro do feixe adotado em 190 μm. Particularmente interessante é o gráfico da figura 33 que aponta boa acomodação dos valores de diâmetros medianos, e com total eficiência na saída dos furos para intensidades da ordem de 35 kW.mm⁻², nas quais o diâmetro medido do feixe coincide como diâmetro de saída, indicando grande paralelismo nas paredes do furo, ou seja, reduzida conicidade.

Para os três casos, a ordenada tracejada indica a tendência de acomodação dos valores anotados para os diâmetros medianos dos furcs, que segundo nosso entender indicam o diâmetro eficaz do feixe. As intensidades constantes na malha descrita na figura 30. Acompanhando o mesmo procedimento de análise da série anterior, dos experimentos com feixe com livre amplificação, apresentamos na figura 34 um gráfico que diz respeito à conicidade calculada sobre os furos feitos com pulsos 300, 600 e 900 μs .

Os ângulos da conicidade dado em graus, constantes no gráfico da figura 34 foram calculados de maneira idêntica ao método descrito na figura 22. Os gráficos das figuras 36 e 35 apresentam curvas que foram construídas pelo cálculo apresentado na equação (46), cujo critério é ilustrado na figura 22, pelo dados contidos na tabela 7 do anexo. Na figura 34 podemos notar que a conicidade é uma consequência da exposição prolongada à radiação, durante pulsos longos. Comparando as curvas da figura 23, com as da figura 34 é evidente a influência do feixe filtrado na redução dos índices de conicidade.

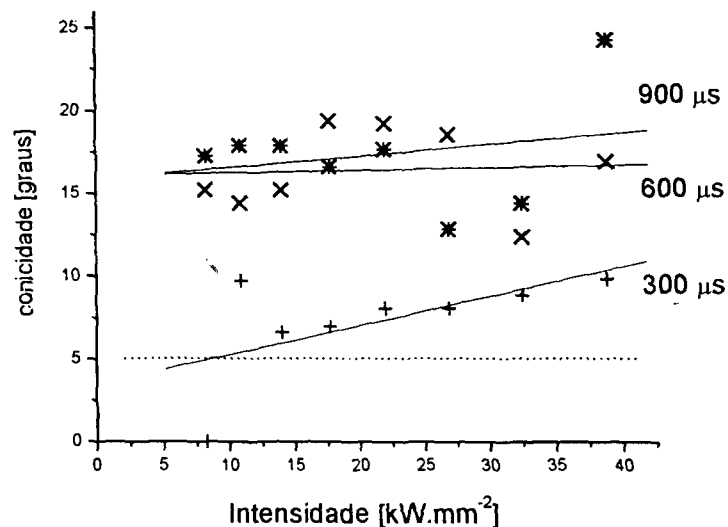


Figura 34 – Conicidade comparada entre larguras de pulso.

Aqui também o gráfico da figura 35, tem critério semelhante ao da figura 24, que leva em consideração a conicidade na meia porção de saída do furo, cujo cálculo leva em consideração o diâmetro mediano. Aqui também foram traçadas nas figuras 34 e 35, retas para efeito de realçar o patamar dos 5 graus. Particularmente interessante é a redução da conicidade para altas intensidades com pulsos 900 μs no gráfico da figura 35.

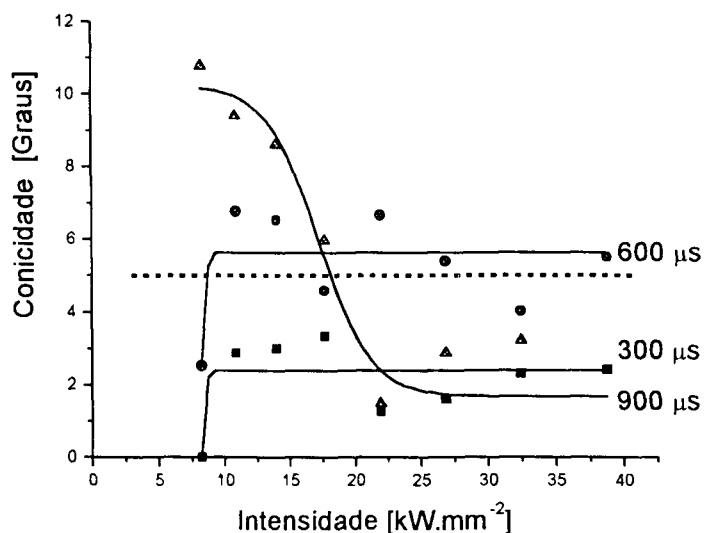


Figura 35 - Conicidade na meia seção de saída, com feixe filtrado.

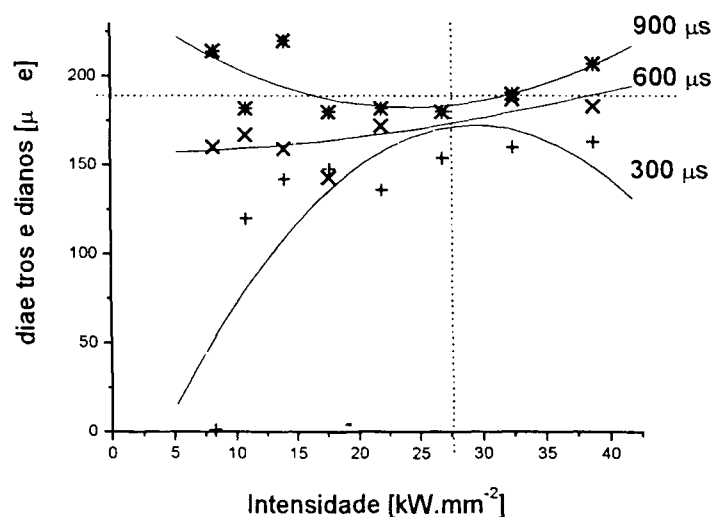


Figura 36 – Comparativo dos diâmetros medianos.

Neste último, as curvas parecem indicar um desempenho mais uniforme da conicidade para furos feitos com largura 600 μs. Verificamos que prevalece a tendência de aumentar o ângulo de conicidade do furo na medida em que a largura temporal dos pulsos aumenta, provocando aumento simultâneo do diâmetro na região danificada na entrada do furo. A explicação pelos dois argumentos citados anteriormente também é válida. O primeiro é a instabilidade do feixe em multi-modo, e o segundo é o limiar de extração que, para pulsos com menor energia, não chega a danificar a borda do furo.

Comparativamente, os diâmetros medianos desenvolvidos são apresentados no gráfico da figura 36, no qual podemos verificar a tendência de acomodação dos valores em torno de 190 μm , diâmetro eficaz do feixe filtrado. Esta tendência indica um valor aproximado da intensidade do feixe em $28 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$. Por meio de regressão polinomial de segunda ordem, as curvas da figura 36 evidenciam outra característica que é a maior dispersão dos valores medidos nas amostras para intensidades muito baixas, e também para aquelas acima de $30 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$. Foram testados outros ajustes, que entretanto não geraram apreciação satisfatória para efeito de conclusões ou deduções.

Para baixos valores de intensidade este comportamento pode ser explicado pelo processo dinâmico de extração do material, cujos valores de intensidade do feixe se localizam próximo à região na qual há obstrução do furo pelo material ressolidificado. Para valores de intensidade acima de $30 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$, analisando este conjunto de fatores geométricos, a dispersão pode ser explicada pela excessiva nuvem de plasma sobre a poça, provocando espalhamento do feixe incidente, com isto degradando a energia de extração.

10.2.3. análises não quantitativas

Das amostras contruídas, examinamos agora quatro extremos da malha proposta. Foram tomadas imagens de entradas de furos e analisadas no MEV, agrupadas por duas intensidades idênticas e em larguras de pulsos.

$\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$	0,2	0,8ms
38,77		
8,25		

Figura 37 – Grade de análise das entradas dos furos

A figura 37 é uma matriz para localização, citando os valores dos parâmetros de processo que foram utilizados nos furos da figura 38.

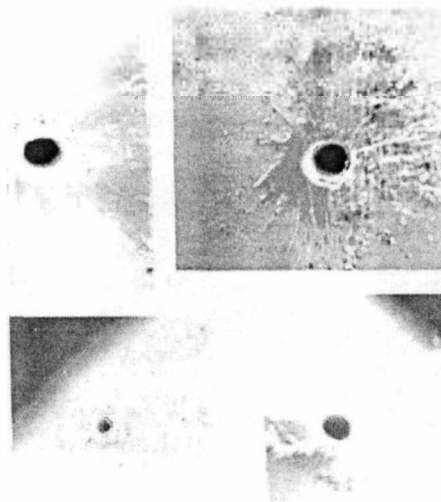


Figura 38 – Influência da intensidade no acabamento.

Pelas imagens obtidas, podemos evidenciar o ganho qualitativo conseguido pela filtragem espacial do feixe em comparação com a série feita com feixe *free path*. As micrografias que deste mosaico foram obtidas das entradas de furos feitos por percussão nos seguintes parâmetros. Os superiores construídos com intensidade $38,8 \text{ kW} \cdot \text{mm}^{-2}$ e os inferiores com intensidade $8,25 \text{ kW} \cdot \text{mm}^{-2}$. Os da esquerda com pulsos de $200 \mu\text{s}$ e os da direita com pulsos de $800 \mu\text{s}$.

Comparando as entradas dos dois furos feitos com menor intensidade podemos observar que o da esquerda teve seu diâmetro comprometido pela falta de energia dos pulsos. Os dois da direita apresentam maior quantidade de respingos provocados pelos pulsos longos. Comparando as duas entradas dos furos feitos com maior intensidade, podemos observar que os diâmetros são muito semelhantes, a despeito da largura dos pulsos. Para efeito de medição temos que as escalas são idênticas.

Para uma verificação visual simplificada da ocorrência de respingos depositados na borda de entrada dos furos, a figura 39 mostra entradas de três furos obtidos por feixe filtrado, sendo a largura de pulsos $400 \mu\text{s}$ para os três casos nas intensidades de 8,3; 10,8 e $14,0 \text{ kW} \cdot \text{mm}^{-2}$ respectivamente da esquerda para a direita.

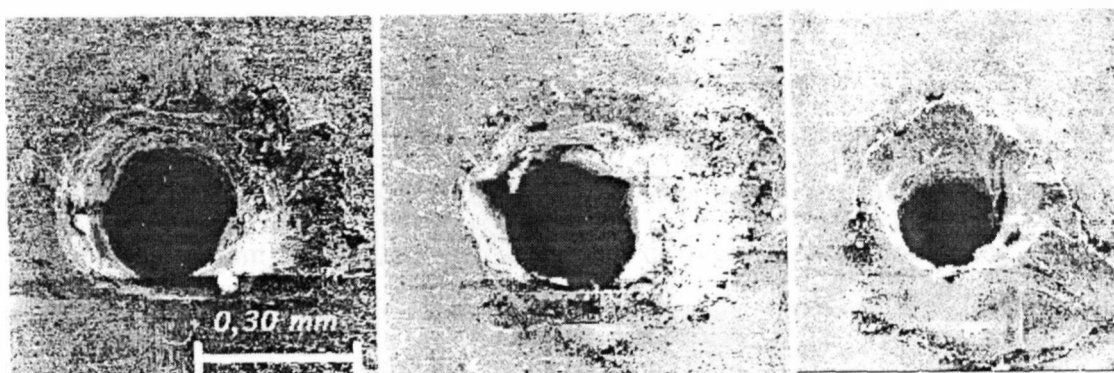


Figura 39 – Entradas de furos com diâmetro 300 µm feitos com feixe filtrado.

A situação típica é apresentada na figura 40 cujas micrografias mostram as saídas dos furos feitos com feixe filtrado contendo resíduos nas bordas. O furo da esquerda foi obtido com feixe de intensidade $39 \text{ kW} \cdot \text{mm}^{-2}$ com pulsos de largura 800 µs. O furo da direita foi obtido com feixe de intensidade $34 \text{ kW} \cdot \text{mm}^{-2}$ com pulsos 400 µs.

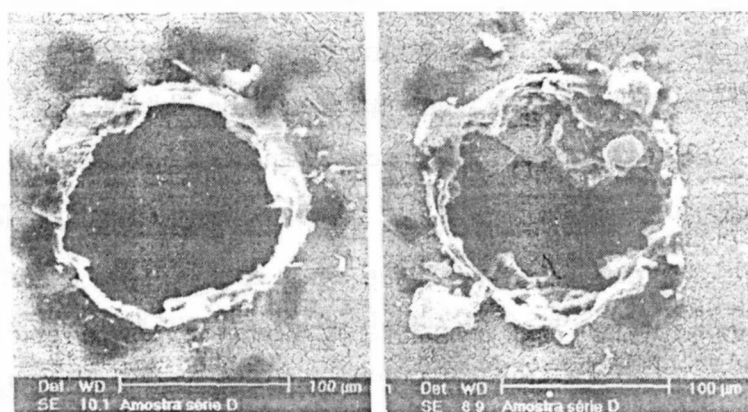


Figura 40 – Furos com excelente cosmética na saída, sem retrabalho.

Comparativamente, fica demonstrado que com uma diminuição simultânea na intensidade e na energia dos pulsos a saída do furo fica mais congestionada pelos resíduos ressolidificados, além de comprometer a circularidade.

Há certas irregularidades na conformação geométrica do furos que são internas e podem receber classificações distintas. A rugosidade é quase inexistente dentro da malha dos parâmetros de percussão que praticamos, principalmente pelo efeito restaurador do material ressolidificado na parede do furo.

Vale salientar que na obtenção destas imagens, as amostras foram limpas apenas em ultrassom com água. Uma limpeza eletroquímica poderia ter removido parte dos respingos e material depositado nas bordas. Este tratamento não foi proposto para este trabalho por uma questão de simplicidade, uma vez que resultados como estes estão rigorosamente mais próximos da simplicidade do processo, sem retrabalho.

Deve ser observado que as imagens resultantes da análise no MEV destacam os contrastes estruturais, onde as formações são constituídas por materiais de características alteradas e diferenciadas das originais. Como nas bordas de um furo feito em chapa de aço inox temos material ressolidificado constituído por diversas estruturas oxidadas, e respingos bruscamente ressolidificados com diferentes parâmetros de rede, incluindo fase vítrea, as imagens ficam prejudicadas comparadas com análise por iluminação natural.

Formação de *barreling* - Um fenômeno muito citado nos estudos de furação por *Laser* é a conformação de “barrica” no interior do furo. Na figura 41 podemos observar, box à direita dois furos feitos por percussão com feixe *free path*, cujo perfil irregular apresenta um estreitamento não linear na saída, desta forma não constituindo simples conicidade.

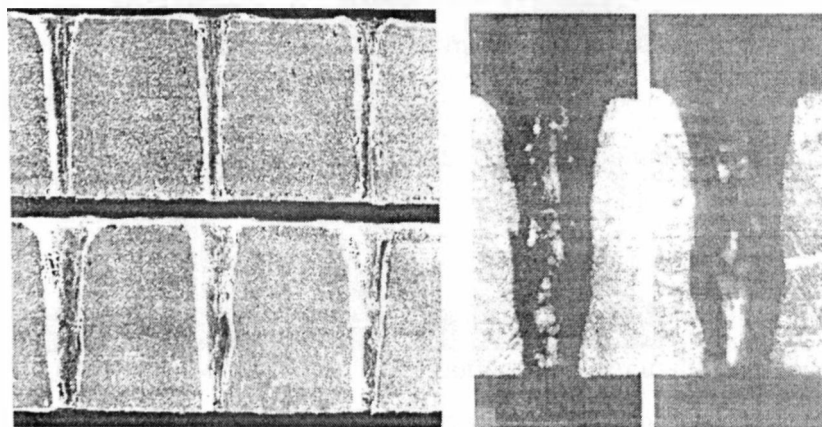


Figura 41 – Micrografias de dois furos com *barreling* ilustrados à direita, e visíveis na comparação do bloco à esquerda, sendo abaixo para pulsos mais longos, e sem *barreling* e à esquerda acima, para pulsos mais curtos.

A duração temporal dos pulsos, tem relevante papel na formação deste fenômeno conforme é apresentado na figura 41. No box à esquerda duas amostras obtidas em condições idênticas de intensidade, cujos furos foram obtidos variando, da esquerda para a direita, de 5,0 a 8,0 kW.mm⁻², a superior feita com pulsos 300 μs e a inferior com pulsos 600 μs demonstram que, nas baixas intensidades, um aumento da energia dos pulsos pode ser contraproducente. No box à direita duas micrografias de furos feitos por percussão com pulsos 200 μs de feixe *free path* com intensidades elevadas 31,7 kW.mm⁻² o da esquerda e 37,9 kW.mm⁻² o da direita. Esta redução acentuada no diâmetro de saída faz com que a utilização de *Laser* para fins de furação com elevado grau de rigor cosmético ou elevado desempenho, como pulverização e turbulência, perca atratividade para os processos concorrentes. No nosso estudo, a etapa que analisa os efeitos do feixe filtrado este fenômeno não ocorreu, demonstrando que além da intensidade compatível com a duração dos pulsos, a qualidade do feixe também exerce importante influência neste resultado.

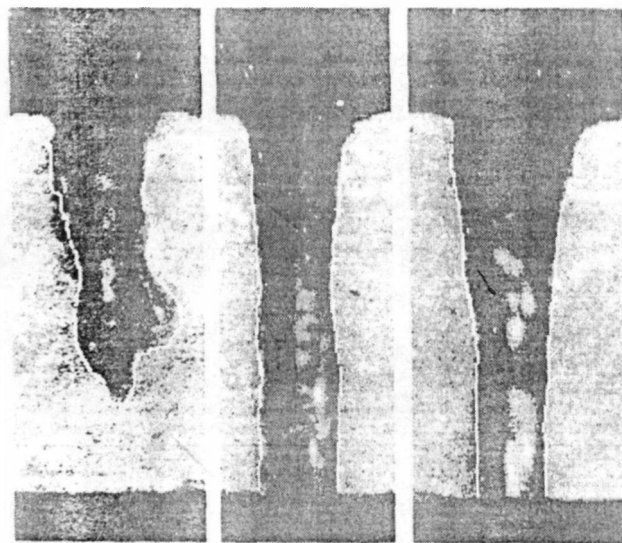


Figura 42 – Evolução do fenômeno *barreling* .

A seqüência da figura 42 descreve a evolução do fenômeno enquanto função da intensidade do feixe. As três micrografias são de furos feitos com feixe *free path* por percussão com largura de pulsos 500 μs. Da esquerda para a direita, as intensidades utilizadas foram respectivamente 4,15; 5,85 e 7,96 kW.mm⁻². Isto denota que com o aumento da intensidade, mantendo constante a duração dos pulsos e aumentando a sua

energia unitária, há um aprofundamento da poça culminando com um perfil mais regularmente próximo de um cilindro.

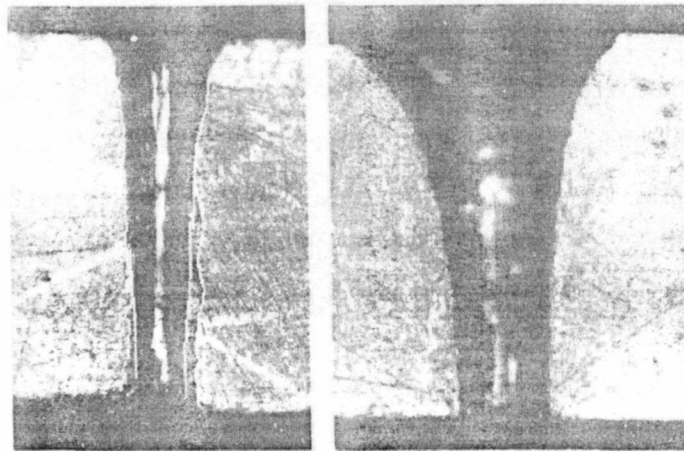


Figura 43 – Dois exemplos de solução para o *barreling*

Há pelo menos duas possibilidades de solucionar este problema. Um é o resultado restaurador do material aderido e ressolidificado na parede do furo como pode ser observado no box da esquerda na figura 43, e o outro é por meio de um feixe de grande intensidade com pulsos de alta energia, conforme o que se apresenta na mesma figura no box à direita. As duas micrografias obedecem à mesma escala. O primeiro foi obtido com feixe de intensidade $15,3 \text{ kW.mm}^{-2}$ e pulsos com $200 \mu\text{s}$ e o outro com feixe de intensidade $23,7 \text{ kW.mm}^{-2}$ e pulsos com $900 \mu\text{s}$. No segundo caso o custo desta solução fica evidente com agravamento da conicidade.

Uma vez que foi obtida melhoria dos resultados para o processo com feixe filtrado pela íris de diâmetro 4,0 mm comparado aos resultados obtidos por percussão com feixe *free path*, com a finalidade de aprimorar tais resultados, foi desenvolvida outra série experimental utilizando feixe ainda mais fortemente filtrado.

10.2.4. Refinamento do feixe

Foi inserida no ressonador uma íris com diâmetro 1,2 mm que resulta num feixe com modo TEM_{00} para realizar ensaios por percussão com feixe mais próximo do modo fundamental, que chamaremos “feixe refinado”, e desenvolvemos uma série destinada a observar o desempenho do processo com feixe de melhor qualidade, mais fino e com menor potência.

Por este meio foram estabelecidos valores aproximados das variáveis de controle, ou parâmetros da fonte no bombeamento, para larguras temporais de pulsos 400 e 600 μs . Com a degradação na potência pico do feixe e da energia do mesmo, decorrente da filtragem espacial, os patamares de intensidades foram aumentados para possibilitar a perfuração nas intensidades 12,4; 17,7; 23,6 e 38,8 $\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$ que registraram diâmetros de 60, 67, 70 e 90 μm . Desprezando o valor mais disperso resulta uma média de 65,7 μm . O valor do diâmetro em primeira aproximação, dado na relação (48), toma como base o feixe desenvolvido em *free path*, pode ser encontrado no intervalo entre $57 < \Phi < 70 \mu\text{m}$.

$$\frac{6,3}{1,2} = \frac{300}{X} \quad (48)$$

Estamos propondo que esta relação (48), a exemplo da (47), seja mais intensamente testada para verificar sua validade. Isto é possível tomando como base o diâmetro do bastão, o diâmetro da íris, o diâmetro medido no ponto focal com e sem íris. Recomendamos que os valores de potência pico para bombeamento sejam os mais elevados possíveis para compensar a degradação do feixe. Estimamos que a potência obtida por este arranjo, bem como a energia discreta responsável pela propagação das ondas de calor, seja suficiente para perfurar chapas finas com bom rendimento.

De acordo com este critério, adotamos a utilização de chapas com espessura máxima 200 μm para obter resultado de bom nível e de espessuras 300 μm , 500 μm e 1,0 mm para comparar com os resultados anteriores. Para compensar a degradação energética dos pulsos, decorrente da atenuação de potência no refinamento do feixe, também dilatamos o tempo de exposição em trens de pulsos com duração de 10, 15, 20, 30 e 50 segundos para verificar a influência do tempo de exposição sobre a capacidade de perfuração. Os experimentos preliminares foram realizados com chapa de espessura 1 mm, em furos utilizando intensidades de feixe 38,8; 32,5 e 26,9 $\text{kW}\cdot\text{mm}^{-2}$. As análises demonstraram que o emprego de chapas com espessura acima de 200 μm não podem ser perfuradas com tal configuração, e os resultados cosméticos não foram expressivos.

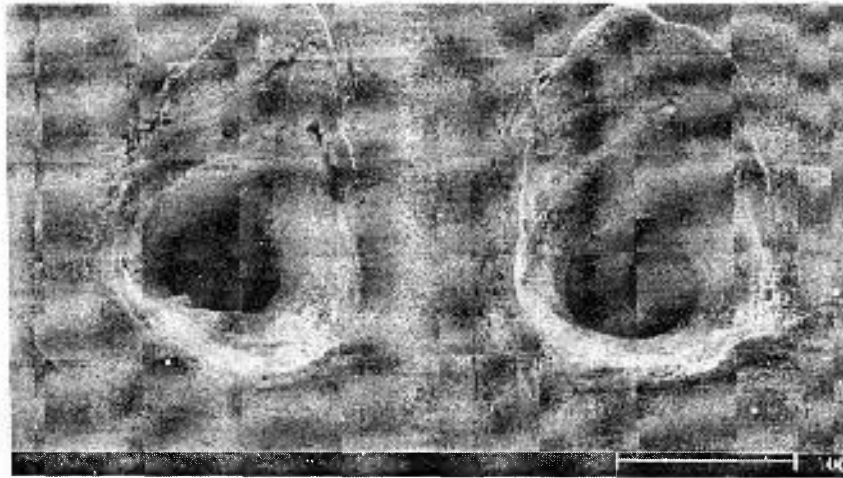


Figura 44 - Entradas de furos obtidos por feixe refinado, com diâmetro aproximado de 65 μm , em chapa de aço inox espessura 200 μm .

Para verificar a eficiência de perfuração em chapa de espessura 300 μm foi experimentado com feixe refinado de intensidade $38,8 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$ com pulsos de 600 μs com tempo de exposição 1, 2, 4, 6, 8 e 10 segundos.

As imagens da figura 44 são micrografias feitas dos furos obtidos com feixe refinado de intensidade $38,8 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$ para largura de pulsos 600 μs para tempo de exposição 6 e 10 segundos. Na figura 45 um painel mostra em cima as entradas de dois furos com trincas na borda, mas com baixo índice de material ressolidificado e ausência de respingos. Na parte inferior as entradas de outros dois furos nos quais é possível visualizar os danos na borda provocados por penetração demorada.

Neste quadro as imagens superiores esquerda e direita são de furos em chapa de espessura 300 μm que foram obtidos com feixe refinado de intensidade $38,8 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$ para largura de pulsos 600 μs com tempos de exposição 8 e 10 segundos.

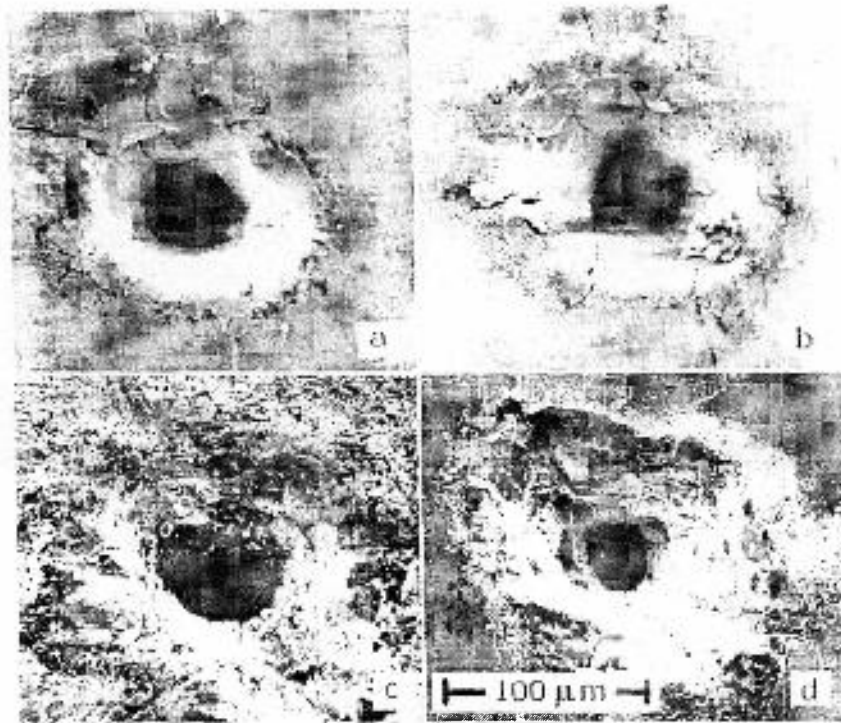


Figura 45 – Efeitos da compensação no tempo de exposição, para pulsos 600 μ s;
(a) I = 39 kW, 8 s.; (b) I = 39 kW, 10 s.; (c) I = 27 kW, 50 s.; (d) I = 27 kW, 20 s.

Ambas as imagens inferiores pertencem às entradas de furos obtidos com feixe refinado de intensidade $26,9 \text{ kW} \cdot \text{mm}^{-2}$ para largura de pulsos 600 μ s sendo a esquerda com tempo de exposição 50 segundos e a direita com com tempo de exposição 20 segundos. Fica com isto ilustrada a influência do tempo de exposição para compensar um feixe de menor potência e pulsos de menos energia pelo aumento de tempo de exposição assim aumentando o tempo de processo e também o número de pulsos necessários para obter perfuração além da degradação cosmética.

Consideramos ser estes os mais relevantes dos fenômenos que ocorrem no processo de furação por *Laser*, porém nem todos são facilmente mensuráveis do ponto de vista quantitativo. As duas formas de avaliação não quantitativa acima descritas, respingos, *barreling* e trincas aparentes na borda não encerram a discussão nem esgotam as possibilidades de avaliação qualitativa mas foram as contribuições mais evidentes a extrair dos experimentos realizados. Melhorias no processo são possíveis principalmente podendo ser escolhida outra modalidade, a trepanação.

10.3. Trepanação

Uma série de experimentos foi feita para verificar a influência de *piercing* na borda do furo feito por trepanação. Recapitulando, a percussão é o processo onde um trem de pulsos incide sobre o mesmo ponto, perfurando o material enquanto que na trepanação o *piercing* é obtido por percussão e em seguida o feixe desenvolve uma excursão circular conforme pode ser observado na figura 46.

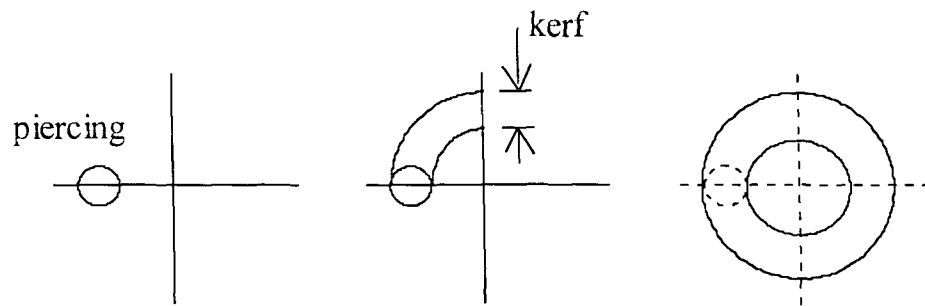


Figura 46 – Ilustração do processo de trepanação

Desenvolvimento experimental - Foram construídas amostras visando verificar a influência deste processo sobre o resultado cosmético comparativamente à percussão. Foram construídos programas CNC de corte circular que obedeceram a duas finalidades, uma para realização de *piercing* na borda, como ilustrado na figura 46, e outra para *piercing* central buscando verificar possíveis influências da mudança da posição do *piercing* nos resultados finais.

Os programas CNC foram projetados para os diâmetros 60 e 300 μm e previstos para realizar *piercing* no centro, programas para diâmetros 100 e 450 μm foram previstos para realizarem *piercing* na borda e os programas para diâmetros 120 e 570 μm foram previstos para realizarem *piercing* em ambas as posições, no centro e na borda.

Irradiação - O ajuste dos parâmetros nesta etapa das investigações seguiu uma malha de valores onde os resultados esperados são de ordem mais ilustrativa e menos quantitativa. Em chapa fina de espessura 200 μm foi experimentado feixe refinado de diâmetro 60 μm no ponto focal com a intensidade $38,8 \text{ kW} \cdot \text{mm}^{-2}$, para círculos de diâmetros 60, 100 e 120 μm enquanto que, em chapa de espessura 1,0 mm foram experimentadas duas intensidades, a menor com $12,4 \text{ kW} \cdot \text{mm}^{-2}$ e a maior com $38,8 \text{ kW} \cdot \text{mm}^{-2}$ para diâmetros 300, 450 e 570 μm com feixe filtrado de diâmetro 190 μm no ponto focal. Em todos os casos a largura dos

pulsos foi de 400 μ s. Este critério levou em consideração a capacidade energética do feixe em perfurar chapas, tendo como resultado esperado um elevado grau de aprimoramento.



Figura 47 – Trepanação de diferentes diâmetros, com feixe filtrado.

A amostra superior que mostra os perfis desbastados na figura 47 foi obtida com feixe de intensidade $12,4 \text{ kW} \cdot \text{mm}^{-2}$ e a inferior com intensidade $38,8 \text{ kW} \cdot \text{mm}^{-2}$, ambas em chapa de espessura 1.0 mm com feixe filtrado de diâmetro 190 μ m no ponto focal. Da direita para a esquerda foram desenvolvidos respectivamente os diâmetros 300, 450, 570 e 570 μ m.

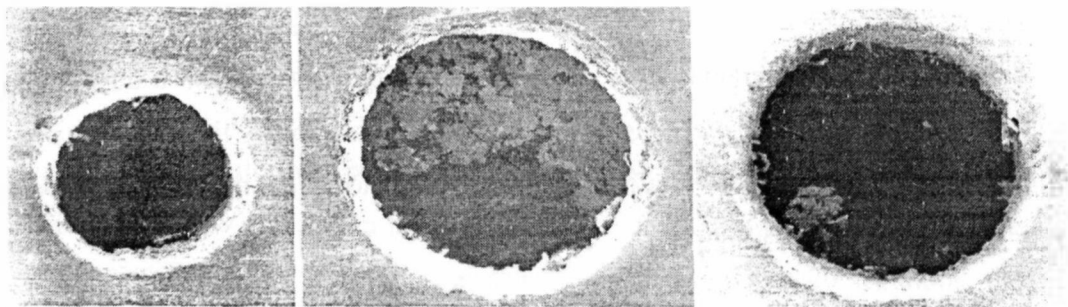


Figura 48 – Entradas de furos trepanados

Na figura 48 vemos entradas de furos trepanados em chapa espessura 200 μ m, com feixe refinado diâmetro 60 μ m no ponto focal. Da esquerda para a direita os diâmetros foram 60, 100 e 120 μ m respectivamente. É facilmente dedutível que ao executar esta modalidade de furação os resultados são muito compensadores tanto pela circularidade, pela drástica atenuação da conicidade, pela ausência de *barreling*, pela ausência de respingos, bem como pela ausência de material ressolidificado. A única ressalva que se faz é no sentido de utilização de parâmetros que sigam critérios para diminuição da largura dos pulsos, aumento da intensidade e refinamento do feixe. Notamos que para furos com diâmetros trepanados com, no mínimo, três vezes o diâmetro do feixe, o resultado final é bastante satisfatório.

11. Critérios de experimentação

Os critérios para construção dos arranjos e das amostras, bem como as leituras feitas durante a caracterização estão descritos aqui. Iniciando pela escolha e descrição do aço inox. matéria prima utilizada nestes experimentos que já foi analisado pela sua composição e aplicações.

11.1. Descrição dos métodos

No processo de parametrização foram utilizados, configurados e interfaceados vários equipamentos. Para verificar experimentalmente os índices do feixe, que foram estudados e descritos, o método escolhido foi de leitura da energia unitária *versus* a energia bombeada, para verificar o ganho do sistema. Neste percurso, foram levados em conta a leitura da configuração da fonte na entrada e a medição por meio de calorímetro na saída, que indicou estreita concordância com os dados literários que são mencionados como sendo da ordem de 1 %. A determinação do perfil do feixe foi realizada por dois métodos. Um para determinar o perfil espacial por câmera e programa lógico, e outro para determinar o perfil temporal pelo uso de osciloscópio.

11.1.1. Determinação do diâmetro do feixe

A medição do diâmetro do feixe, mostrou uma relação direta de proporcionalidade entre o diâmetro do feixe no ponto de trabalho e o diâmetro permitido durante a amplificação. Usando lente focal de comprimento 100 mm. A medição do diâmetro eficaz do feixe foi feito com filme *kaptan* no ponto de trabalho.

A amplificação livre tem diâmetro estimado de 6,3 mm que é o diâmetro do bastão, e produz um diâmetro iluminado de 295 μm , que concorda com os gráficos de diâmetros, dos furos feitos por percussão. Em ambos os casos a leitura convergiu para 300 μm . Ao ser inserida uma íris com diâmetro 4,0 mm na trajetória do feixe no interior do ressonador, foi obtido um diâmetro iluminado de 190 μm , e ao trocar a íris por outra de 1,2 mm o diâmetro iluminado foi de 60 μm . Restringindo o feixe, a energia produzida provoca extração insuficiente, provocando acúmulo de metal fundido que ao ressolidificar obstrui a saída do furo. A energia mínima produzida pelo módulo para um pulso de 200 μs tem aproximadamente 100 mJ, energia proporcional à área iluminada. Supondo válida a

equação (47) é possível supor a (48) que estima um pulso de 400 μ s contendo 8 mJ pela inserção da íris diâmetro 1,2 mm.

11.1.2. Medição da energia contida no feixe

A lente focal não é apropriada para medição pois concentra a radiação num ponto diminuto aumentando a intensidade. Um arranjo para atenuação pode ser montado com retirada da lente focal, que permite menor densidade no detetor sendo este colocado fora de foco.

O feixe é atenuando numa razão previamente conhecida, e interposto um expensor, aumentando a precisão da leitura. Este arranjo é apresentado na figura 49.

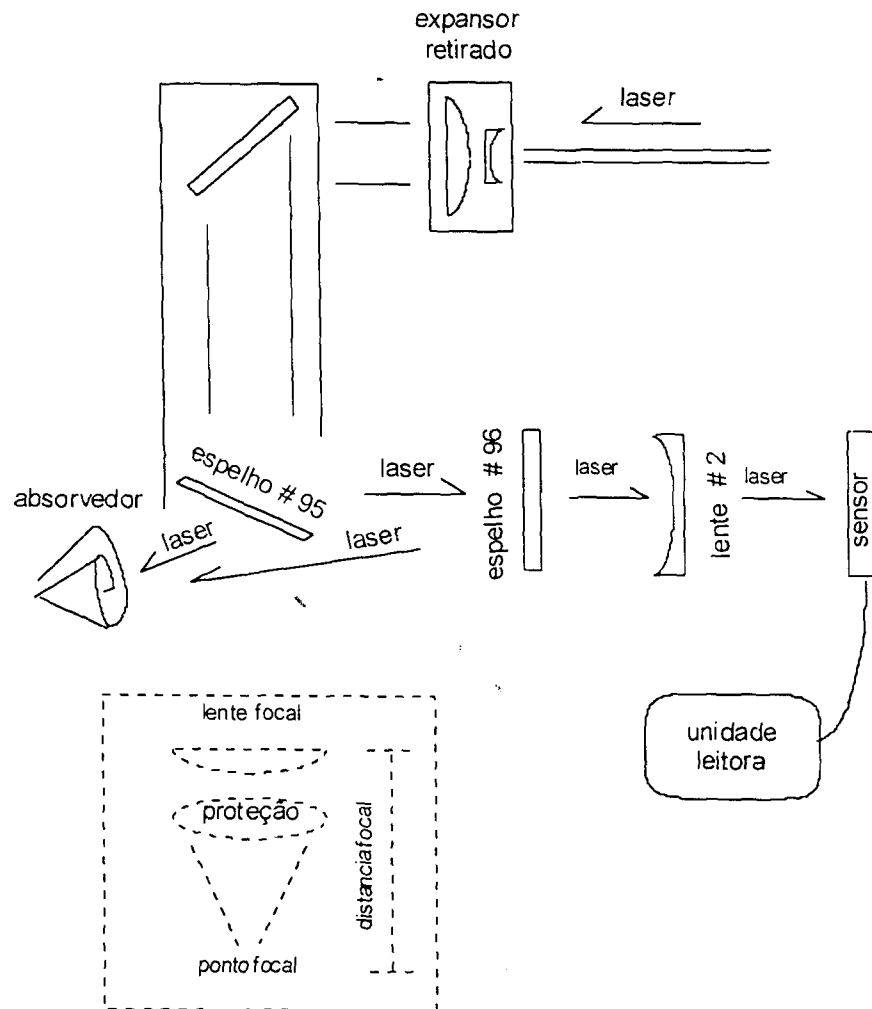


Figura 49 – Arranjo para leitura da energia incidente no ponto de trabalho.

Para o uso de medidor calorimétrico de energia, marca Scientech, modelo 373, torna-se necessário interpolar filtros atenuadores na trajetória do feixe, para fazer uma amostragem isenta de risco. Estes filtros atenuadores são construídos de espelhos dielétricos com reflexão cuja ordem de grandeza é conhecida, para retirar uma amostra do feixe incidente. Uma vez mensurada, a leitura pode fornecer o valor da energia incidente na superfície de trabalho, bastando para isto multiplicar o valor da leitura pelo fator de atenuação.

11.1.3. Métodos para caracterização da qualidade do feixe

As características de emissão *Laser*, sua amplificação, instabilidades e aberrações influem drasticamente na qualidade do feixe e do processo, e do perfil da distribuição de potência característico. O modo TEM₀₀ é mais eficiente quanto à qualidade cosmológica da furação, desde que mantida a sua potência, sendo mais amplamente utilizado na abordagem conceitual. Entretanto no modo fundamental a redução do do volume amplificado implica em redução de potência, o rendimento de potência neste caso é muito baixo, o que dificulta o uso de feixe com este modo TEM em aplicações como a microfuração.

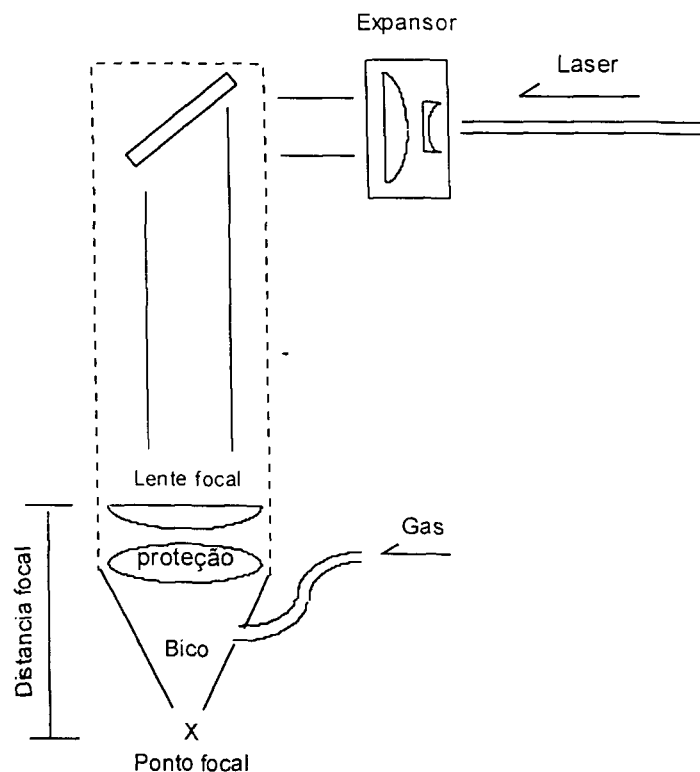


Figura 50 – Esquema interno de montagem do conjunto focal.

A medição de energia incidente no ponto de trabalho foi possível por meio de um arranjo óptico que é apresentado na figura 50. Isto foi indispensável, pela necessidade de atenuação do índice de energia incidente utilizado no processo, que precisa ser muito inferior para preservar o limite de sensibilidade ao dano, do elemento de leitura.

A figura 50, descreve o perfil espacial de intensidade do modo TEM₀₀. A região tracejada define o diâmetro do feixe $2w$, que no seu bordo lateral tem intensidade 13,5 % do valor máximo. A região periférica adjacente é desconsiderada para efeitos práticos. Assim sendo, o nível crítico de intensidade do feixe para que haja erosão do material a ser processado depende de fatores como o comprimento de onda, a coerência do feixe, o modo TEM e o gradiente de energia. Supondo que as flutuações sejam sutis, podemos considerar o nível crítico de energia e intensidade como um valor definitivo para o processo.

O diâmetro eficaz do feixe depende da potência pico, do diâmetro do feixe e do valor crítico de energia típica para o material em questão. Considerando, para efeitos gerais, que a potência pico seja mantida constante, o diâmetro do feixe se mantém constante. [cvi].

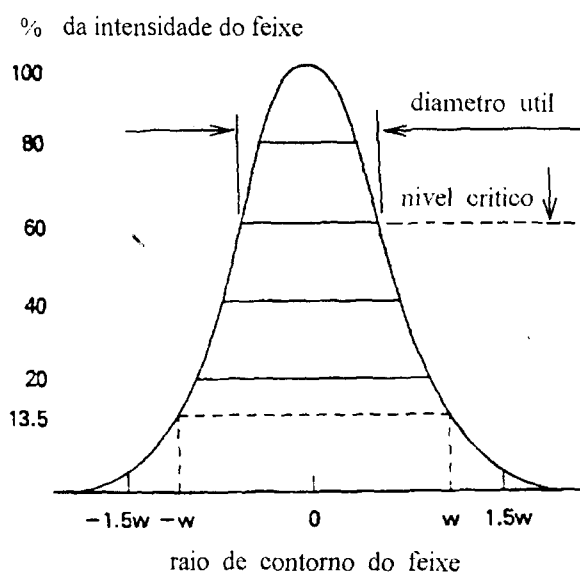


Figura 51 – Distribuição de potência de um feixe no modo TEM fundamental

Flutuações na intensidade do feixe. implicam em alteração no diâmetro eficaz do mesmo durante o processo. Assim, o diâmetro útil do feixe define o comportamento do diâmetro efetivo do processo.

11.1.4. Procedimento para amostras

Para construção de amostras seguimos um roteiro que é apropriado tanto para séries contínuas, lotes pilotos, ou também para ensaios eventuais quanto à sua irradiação, preparação e análise. Uma observação inicial é que devido as dimensões micrométricas dos furos produzidos, o recorte das amostras deve ser realizado fora dos domínios do processo. Em seguida, é necessário desbastar a lateral dos furos construídos para se analisar sua seção transversal, que contém os dados que são alvo do estudo deste projeto.

Irradiação das amostras - Foi idealizado um modelo geométrico padrão para construção de amostras visando a rapidez e eficiência no processamento, na preparação, na inspeção, no *setup* de desbaste, no desbaste propriamente dito, e na análise. A geometria das amostras foi concebida, de tal modo que o tempo de irradiação varia de acordo com a necessidade ou não de troca dos parâmetros do *Laser*. Foram levadas em consideração as dimensões apropriadas aos microscópios, ao *Jig* de polimento, à geometria do CNC.

O posicionamento pode ser feito por comandos do CNC previamente inseridos num programa ou ainda por meio de comandos *Jog*, aquele que for mais conveniente. Preferimos os comandos *Jog* dado a simplicidade de operação. A realização individual de cada furo depende de vários fatores compreendendo a modalidade LSS, percussão ou trepanação bem como a eficiência de um dado conjunto de parâmetros.

Geometria das amostras - Os principais cuidados com relação às dimensões das amostras ficam por conta dos itens espessura da chapa, dimensões dos furos, excedente no recorte e construção de ferramenta. A espessura da chapa seguiu o critério definido empiricamente baseado na energia dos pulsos, e na necessidade de perfurar a chapa. Como os experimentos LSS tiveram interesse em medir a profundidade, houve o cuidado preliminarmente estabelecido de evitar a perfuração, e por isto foi utilizada chapa de espessura 2,0 mm. No caso da percussão e trepanação o objetivo foi o oposto e portanto utilizamos chapa de espessura máxima 1,0 mm, dependendo da intensidade do feixe. Uma

vez que a intensidade é função do diâmetro do feixe durante sua amplificação, a filtragem por iris restringe o mesmo fazendo cair a sua intensidade aproximadamente proporcional.

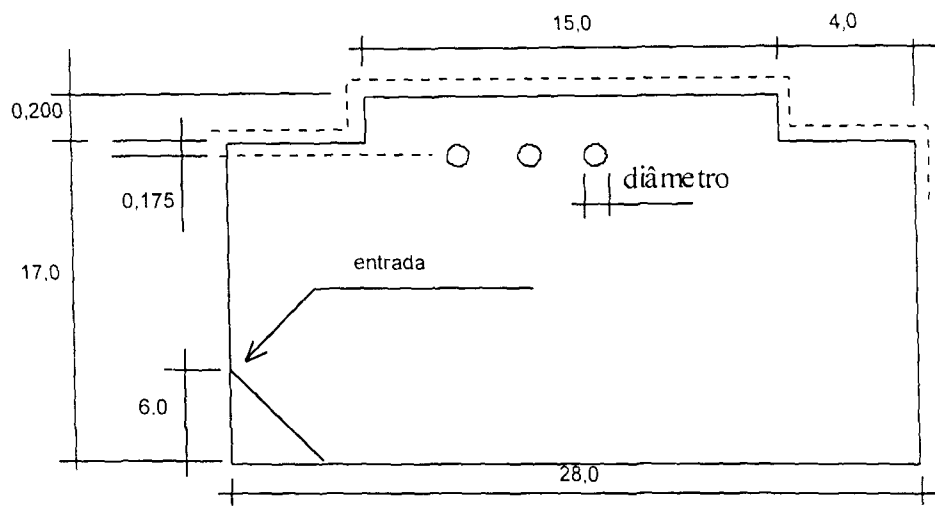


Figura 52 – Geometria padronizada das amostras, cotas em mm.

As dimensões da amostra padrão devem respeitar o compartimento de análise do MEV, a compactação do maior número de furos na mesma amostra de formato padronizada, a irradiação feita em linha reta para possibilitar posterior desbaste lateral simultâneo. O desbaste foi cuidadosamente estudado para não demandar tempo em excesso, e ao mesmo tempo preservar as propriedades conferidas pelo *Laser* aos furos durante a irradiação, para análise da parede interna.

Uma geometria descrita na figura 52 foi concebida para ser utilizada na construção padronizada de amostras. Uma chapa do material fixada sobre a mesa da máquina no ponto de trabalho foi irradiada a espaços Δ_L em fila simples, produzindo até dezesseis furos de diâmetro 300 μm em cada uma. Este diâmetro é relativo ao feixe utilizado na primeira parte e serviu como base para padronização dos intervalos $\Delta_L \approx 1 \text{ mm}$.

Ao completar a série, o programa gráfico, previamente editado e carregado na memória CNC serviu para recortar o contorno da amostra automaticamente após os furos serem realizados. Por este procedimento, amostras podem ser irradiadas num intervalo mínimo de tempo, que incluindo a troca de amostras, decai acentuadamente à medida que esta

mudança de parâmetros é menos freqüente. A figura 53 mostra diversas amostras preparadas.



Figura 53 – Amostras prontas para análise

Identificação - Uma vez terminada a etapa de construção das amostras e sua avaliação preliminar, as mesmas foram identificadas por três dígitos utilizando um *engraver*, um dígito alfanumérico e dois numéricos, no formato αNN , onde α é a série, e NN representam um número de série. As séries **A** e **B₀** e **B₁** foram destinadas ao LSS, sendo que a série **A** foi preliminar para estimar e espessura mais adequada de chapa. e as séries **B** foram de desenvolvimento e refinamento dos resultados respectivamente. A série **C** foi precedida de uma série **C₀** também para determinar a espessura mais adequada de chapa, e juntamente com a série **D** foram destinadas à percussão, sendo que a série **D** foi um refinamento dos resultados utilizando filtro espacial. Sucederam-se diversas séries com objetivo preliminar de desenvolver trepanação. sem no entanto apresentar resultados satisfatórios ou relevantes, motivo pelo qual preferimos abordar apenas as que são aqui mencionadas. As séries **K** e **M** foram destinadas à trepanação, sendo que a série **K** foi realizada com feixe em *free path*, ao passo que a série **M** foi realizada com filtro.

Preparação das amostras & análise cosmética - As amostras limpas foram analisadas em microscópio ótico Olympus com ampliação 10x na ocular e 5x, 10x, 20x, 50x, 100x na objetiva gerando uma ampliação A nas grandezas $50x < A < 1000x$, e medidas com auxílio do analisador de imagens digitalizado Quantinet acoplado. Algumas foram separadas para serem micrografadas no microscópio eletrônico de varredura.

Desbaste das amostras - As amostras foram desbastadas utilizando uma lapidadora constituída por um disco plano horizontal giratório construído em ferro fundido, irrigado com uma solução abrasiva de *ethilenoglicol* como solvente, contendo alumina 2000 em suspensão, com tamanho médio de grão 8,55 μm .

O *Jig*, um aparelho utilizado para desbaste em politriz, sobre o qual foi parafusado um dispositivo de fixação para o posicionamento da amostra durante o desbaste. Este foi concebido e usinado em alumínio, com formato idêntico de morsa conforme pode se ver na figura 54. A fixação das amostras tem troca rápida. Para possibilitar tal operação, desenhamos um dispositivo de fixação rápida das amostras ao *Jig*. Trata-se de um dispositivo, cuja função é garantir firmeza e precisão no alinhamento, que dispõe de ajuste para controle de carga sobre a peça em desbaste. Pela geometria padronizada adotada, obtemos um avanço no desbaste de até $20 \mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ podendo desbastar uma amostra em 30 minutos.

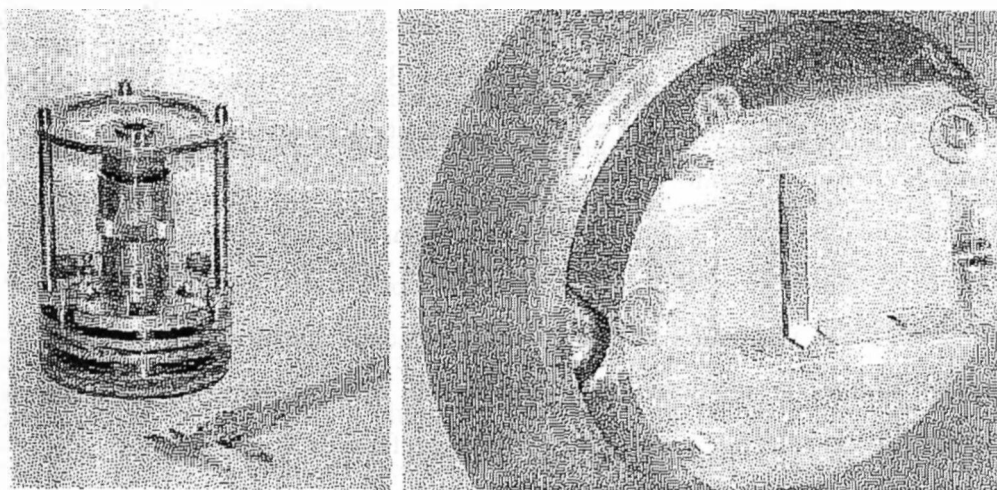


Figura 54 – Jig utilizado para fixação de amostra durante o desbaste, à esquerda; fixação de amostra, à direita.

Características da solução abrasiva - As amostras foram desbastadas utilizando uma lapidadora irrigada com uma solução abrasiva de *ethilenoglicol* como solvente, contendo alumina granulada em suspensão. O solvente tem formulação $\text{C}_2 \text{H}_6 \text{O}_2$; sendo carbono a 38,70 %; hidrogênio a 9,74 % e oxigênio a 51,56 %, percentuais em peso. Estrutura *ethanediol* $\text{HOCH}_2 \text{CH}_2 \text{OH}$; mol 62,07; densidade a 25 °C entre 1,1126 e 1,1134 $\text{G} \cdot \text{ml}^{-1}$;

ponto de fusão aproximado entre 193 e 205 °C; viscosidade característica 17,3 centipoise a 25 °C. É largamente utilizado em diversas aplicações industriais principalmente por sua estabilidade e propriedades químicas e neutralidade. A alumina 2000 é uma calcinação higroscópica de Al_2O_3 , sendo alumínio a 51,91 % e oxigênio a 47,08 % em peso; constante dielétrica $1,2 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ a 300 °C; mol 101,94; tendo tamanho médio de grão entre 7.89 e 9.21 μm .

Limpeza - Neste processo, a limpeza foi feita deixando mergulhadas as amostras num banho de ultra-som, utilizando água potável misturada com detergente doméstico. A geometria da seção do furo é apropriada para se tomar suas medidas, porém parte do resíduo abrasivo permanece no interior do furo. As amostras que devem ser analisadas e micrografadas no MEV passam então por um banho de solução contendo água com detergente imersa em ultra som, que destaca as crostas do material remanescente.

11.2. Tratamento dos dados

Como o espaço amostral N produzido pelos experimentos está compreendido no intervalo $2 < N < 8$ leituras para cada configuração do sistema, ou conjunto de parâmetros, a dispersão dos valores segue um padrão denominado “exato”, ao passo que a “distribuição aproximada” é normalmente utilizada para $N < 30$. A verificação da consistência não foi estatística, mas ocorreu por amostragem e repetição da experimentação nos casos duvidosos, detalhando os intervalos que indicavam indefinições. Sugerimos que sejam feitos ensaios posteriores, com populações maiores no sentido de gerar resultados que sejam estatisticamente referendadores ou não para o que se apurou nas conclusões aqui apresentadas, no que teríamos pronunciado interesse.

12. Conclusões

Durante o desenvolvimento da etapa experimental deste trabalho foram publicados dois trabalhos com resultados parciais dos experimentos [CIX] [CX].

As constatações levantadas no processo LSS levaram na direção da volumosa quantidade de material extraído, e na capacidade de perfuração de chapas de espessura 2,0 mm com intensidade máxima e máxima largura temporal dos pulsos. O LSS é uma ferramenta versátil quando se trata de aplicações onde não haja rigor cosmético, e também onde a razão de aspecto seja irrelevante.

Este processo, para o caso da CPML, somente é viável quando do uso de chapas de espessura abaixo de 1,0 mm onde o valor do diâmetro e o seu posicionamento podem variar dentro de tolerâncias relaxadas. Neste caso, a ênfase se dá na produtividade, e o número de furos obtidos por segundo é igual à taxa de repetição permitida pelo equipamento.

Para percussão com feixe filtrado a degradação no rendimento foi compensada pela melhoria na cosmética resultante, e seu diâmetro útil diminuiu proporcionalmente. A potência pico foi atenuada implicando na redução de eficiência na perfuração de chapas com espessura de 1,0 mm, mesmo com a manutenção da intensidade. Para chapas com espessura até 200 μm a filtragem trouxe aprimoramento dos resultados. Para valores de intensidade abaixo de $15 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$, a capacidade de perfuração ficou comprometida, o que foi observado pelo aumento da conicidade e ocorrência de *barreling* para larguras de pulso acima de 400 μs . Os valores de conicidade não indicaram coerência na mudança de parâmetros uma vez que aumentando a intensidade os ângulos aumentaram quase linearmente, indicando que para extração preferencial na fase líquida a conicidade apresentada é fator inerente e irreversível, pois no nosso estudo não indicou possibilidade de atenuação. Estudos enfatizando extração de vapor podem trazer maiores contribuições neste sentido, pela utilização de pulsos curtos com maior intensidade.

No processo de trepanação, não foi observada qualquer influência da posição do *piercing* incidindo no centro ou na borda do furo trepanado, pelo menos dentro dos parâmetros praticados. Nos programas de corte para trepanação foi introduzida uma correção no

diâmetro de ferramenta, que se demonstrou irrelevante mediante a dispersão dos valores medidos. A correção de ferramenta previa o ajuste de posicionamento do feixe relacionado ao seu diâmetro, porém o desvio nas medições bem como a conicidade foram mais expressivos. Os diâmetros medianos não foram estimados no processo de trepanação, pelo qual foram obtidos furos com aprimorado paralelismo entre as paredes, conforme pode ser visto na figura 49, até porque a espessura da chapa foi um fator limitante no processo de desbaste lateral, motivo pelo qual foi abortado. Este fator não representou restrição aos resultados do nosso estudo, pois como foi mencionado, o caráter da investigação do processo de trepanação foi mais ilustrativo do que quantitativo.

Como o processo de extração, para precussão com pulsos da ordem de décimos de mili segundo, acontece principalmente com material fundido, há um acúmulo de respingos ou material ressolidificado na borda de entrada dos furos quando o feixe *free path* é utilizado, sendo portanto vantajoso filtrar os modos concorrentes, com isto aprimorando a cosmética. O material ressolidificado tanto na bordas como na paredes interna do furo podem ser ou não vantajosos dependendo dos fins propostos, e sua ocorrência é inversamente proporcional à potência do feixe, e no caso de intensidades insuficientes é simultaneamente proporcional à energia unitária, aquela contida em cada pulso quando em regime estacionário. Para intensidades elevadas é quase imperceptível a variação na largura dos pulsos bem como na energia unitária.

O processo de furação de metais por *Laser* é um assunto vasto e que pode e deve ser estudado com minúcias a partir de certos pressupostos, dependendo das condições disponíveis para cada situação. São muitas as possibilidades de exigência dependendo da aplicação final do produto. A variedade de alternativas para controle dos parâmetros ofereceram no nosso estudo, opção de escolha o que foi fundamental para expressivos resultados preestabelecidos.

No que se refere à geometria e às características mecânicas o aço inox é muito versátil e, mesmo não sendo adequado ao tratamento térmico, o que implica na ocorrência de fenômenos intrínsecos envolvendo reações entre os diversos elementos de sua composição, o resultado foi altamente satisfatório. Nas condições que se apresentam, e pelos resultados obtidos e demonstrados podemos afirmar que a CPML oferece amplo grau de liberdade com relação a todas as exigências que se fizeram presentes.

A extração por LSS se demonstrou instável na região dos pulsos entre 700 e 1000 μs , os valores de intensidade mais interessantes nestas séries de ensaios experimentais, para efeitos gerais, foram acima de $18 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$. A conicidade parece difícil de minimizar para os 5 graus. A convergência dos valores medidos dos diâmetros dos furos, para com o diâmetro do feixe utilizado no caso do processo de percussão, indicou que as larguras de pulsos 300 μs são em geral melhores, sendo mais estáveis e apresentando menor dispersão nas medidas com intensidades acima de $20 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$ para feixe *free path*, e $30 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$ para feixe filtrado, provavelmente pela degradação energética.

13. Sugestões

Podemos citar algumas das vertentes que somariam valor ao presente trabalho. Um estudo sobre o comportamento da absorção {A} do feixe *Laser Nd:YAG* pelo aço inox, a diferentes regimes de temperatura, e a absorção {B} em diferentes larguras de pulso.

Realização de estudos na furação por percussão utilizando uma análise mais minuciosa a faixa de intensidade do feixe {C} acima de $25 \text{ kW}\cdot\text{mm}^{-2}$, pois nesta região os valores pareceram mais em conformidade com o esperado. Este estudo poderia incluir experimentação com feixe *free path* (livre amplificação) e feixe filtrado {D} por diversas aberturas. Um estudo incluindo avaliação quantitativa {E} e geométrica da furos obtidos por trepanação. Estudos direcionados às cinco sugestões acima realizadas sobre outras ligas {F} de uso industrial.

Um outro estudo sobre a variação de energia e intensidade impostas ao feixe filtrado {G} com relação ao feixe obtido por *free path*. Outro estudo sobre a variação do diâmetro no feixe filtrado {H} como função da abertura conforme suposto pelas relações (50) e (51). A inclusão de um recurso de medição microprocessada automática {I}, dos furos para

avaliação em lote. A instalação de um polarizador de feixe {J} poderia ser vantajoso em mais de uma forma de processo. Também seria interessante adicionar recursos na amplificação do feixe como multiplicador de frequência espectral {K} na banda visível ou ultravioleta, e também dispositivo chaveador ou compressor para fornecer pulsos curtos {L} com elevação de algumas ordens de grandeza na intensidade, seriam alguns dos desdobramentos desejáveis que poderíamos mencionar.

14. Notas adicionais

Aço inox - Há uma leve discordância entre os valores contidos na literatura, com relação às constantes termofísicas, pelo que achamos oportuno deixar aqui uma nota neste sentido.

O fabricante [cxⁱ] das chapas de aço inox 304 dá uma composição assim definida; é uma liga composta basicamente de ferro, cromo de 18 a 20 %; níquel de 8,0 a 10,5 %; manganês menos de 2,0 %; carbono residual menos de 0,08 %; fósforo residual menos de 0,045 %.

Segundo Lide [cxⁱⁱ] o aço inox AISI tem calor específico $c = 0,12 \text{ kcal (kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}^{-1}$, ou $502 \text{ J (kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}^{-1}$ onde $1 \text{ Joule} = 0,2389 \text{ cal}$; a temperatura de fusão $T_F = 1698 \text{ K}$ (ou $T_F = 1425 \text{ }^\circ\text{C}$); condutividade térmica $15 \text{ mW (mm} \cdot \text{ K)}^{-1}$; densidade $7,9 \text{ g.cm}^{-3}$; coeficiente de expansão $17,3 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; resistividade elétrica $72 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{ cm}$; módulo de elasticidade 195 GPa ; resistência à tensão 550 GPa . Não foi possível localizar o valor do coeficiente de difusão térmica, ou difusividade térmica k .

Segundo Steen [cxⁱⁱⁱ] o aço inox AISI 304 apresenta para as condições CNTP, estes valores nas unidades no Sistema Internacional: densidade $8,03 \text{ g} \cdot \text{ cm}^{-3}$, calor latente de fusão $300 \text{ kJ} \cdot \text{ kg}^{-1}$; calor latente de vaporização 6500 kJ.kg^{-1} , calor específico $500 \text{ J (kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}^{-1}$, temperatura de fusão $1450 \text{ }^\circ\text{C}$, (ou 1723 K); temperatura de vaporização $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ (ou 3272 K), condutividade térmica $4,98 \text{ mm}^2 \cdot \text{ s}^{-1}$.

Como podemos notar os dados são um tanto esparsos. Segundo Prokhorov [41], para pulsos *Laser* curtos, a maioria dos metais apresenta difusividade térmica entre $0,1 < k < 1,0 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. Porém este não disponibiliza o valor da difusividade térmica do aço inox AISI 304 e assim adotamos para fins ilustrativos o valor aproximado $k = 50 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$.

Características da solução abrasiva - As amostras foram desbastadas numa lapidadora irrigada com uma solução abrasiva de *ethilenoglicol* como solvente, contendo alumina granulada em suspensão.

O solvente tem formulação $\text{C}_2 \text{H}_6 \text{O}_2$; sendo carbono a 38,70 %; hidrogênio a 9,74 % e oxigênio a 51,56 %, percentuais em peso. Estrutura *ethanediol* $\text{HOCH}_2 \text{CH}_2 \text{OH}$; mol 62,07; densidade a 25 °C entre 1,1126 e 1,1134 G.ml^{-1} ; ponto de fusão aproximado entre 193 e 205 °C; viscosidade característica 17,3 centipoise a 25 °C. É largamente utilizado em diversas aplicações industriais principalmente por sua estabilidade e propriedades químicas e neutralidade.

Foi utilizada alumina granulada 2000, que é uma calcinação higroscópica de $\text{Al}_2 \text{O}_3$, sendo alumínio a 51,91 % e oxigênio a 47,08 % em peso; constante dielétrica $1,2 \times 10^{13} \Omega.\text{cm}^{-1}$ a 300 °C; mol 101,94; tendo tamanho médio de grão 8,55 μm , com grãos variando entre 7,89 e 9,21 μm .

15. REFERÊNCIAS

- ¹ Fowles, Grant. R; Introduction to Modern Optics; Dover Publications, Inc.; 2nd ed., 1975
- ² Melles, Jan A., et all; What's a Laser ? Melles Griot; Optics Guide 5, c.17, p.3-6, 1990
- ³ Steffen, J.; Lasers for Micromechanical, Electronic, and Electrical Tasks; Industrial Applications of Lasers, p.209-227; 1984
- ⁴ Hogan, Hank; Photonics Rolls Up Its Sleeves; Photonics Spectra, v.33, n.8, p.98-104, aug 1999
- ⁵ Burgess, Larry W. & Pauri, Fabrizio; Defining the Production Role of Laser Technology in PCB Fabrication into the Millennium; Proceedings of European PCB Convention; Wiesbaden, Germany; p.1-7; Sept.29 – oct 01, 1998
- ⁶ Raman, Sudhakar; Park, Keong-Yang; Sun, Bem; Heong, Hun & Nam, C.Hyun; Successful Implementation of UV Laser Drilling Technology; Circuitree; p.78-86; dec.1999
- ⁷ Yeo, C.Y.; Tam, S.C.; Jana, S. & Lau, Michael W.S.; A Technical Review of the Laser Drilling of Aerospace Materials; Journal of Materials Processing Technology, v.42, n.1, p.15-49, 1994
- ⁸ Hecht, Jeff; The Neodimium Laser: A tutorial on the most widely used solidstate laser; Laser & Applications, v.II, n.11, p.57-62, nov. 1983
- ⁹ Silfvast, William T.; Laser Fundamentals; Cambridge University Press; 1996
- ¹⁰ Köchner, Walter; Solid State Laser Engineering; Springer-Verlag, 4th ed., 1996
- ¹¹ Spiegel, Murray. R.; Estatística; Makron Books do Brasil Ed. Ltda; 3^o ed., 1993

-
- ¹² Kamalu, John & Jones, Dean; Statistical Analysis and Control of the Nd:Yag Laser Percussion Drilling Process; ICALEO section C, p.123-130, 1996
- ¹³ Yilbas, Bekir Sami; Parametric Study to Improve Laser Hole Drilling Process; Journal of Materials Processing Technology, v.70, p.264-273, 1997
- ¹⁴ Campos, Vicente Falconi; Controle da Qualidade Total; Fund. Cristiano Otoni, 1992
- ¹⁵ Melles, Jan A., et al; Gaussian Beam Optics; Melles Griot Optics Guide 5, c.18, p.2-7, 1990
- ¹⁶ Lord Rayleigh (1901), apud Dewhurst, R.J & Swift, KG; Optics and Lasers in Engineering, v.10, p.27-41, 1989
- ¹⁷ Melles, Jan A. et al; Multi-Function Beam Intensity Profilers Melles Griot Optics Guide 5; 1990
- ¹⁸ Prakash, O. & Ram, R.S.; Technical Note - Determination of Focal Length of Large Focal Length Convex Lenses; Optics & Laser Technology, 1996
- ¹⁹ Johnston Jr, T.F.; M^2 concept characterizes beam quality; Laser Focus World, p.173-183, may 1990
- ²⁰ Beam Profiler – Operations Manual; Merchantek, version 2-07, jun 1995
- ²¹ Dones, Richard D. & Scott, Thomas R.; Laser beam analysis pinpoints critical parameters; Laser Focus World, v.29, n.1, p.123-130, jan.1993
- ²² Roundy, Carlos B.; Slobodzian, Gregory E.; Jensen, Kurt & Ririe, Dan; Digital imaging produces fast and accurate beam diagnosis; Laser Focus World, v.29, n.10, p.117-120, oct.1993

-
- ²³ Lawrence, George N.; Proposed international standard for laser-beam quality falls short; Laser Focus World, v.30, n.7, p.109-114, july 1994
- ²⁴ Melles, Jan A., et all; Measurement of beam profiles; Manufacturers of Optical, Optomechanical, Laser & instrumentation, c.63, p.3-5,1994
- ²⁵ Sasnett, M.W.; apud Hall, D.R. & Jackson, P.E.; The Physics and Technology of Laser Resonators; IOP Publishing Ltd., 1989
- ²⁶ Leong, Keng H.; Drilling with Lasers; Industrial Laser Solutions, n.9, v.15, p.39-46, sept. 2000
- ²⁷ Tahmouch, G.; Meyrueis, P. & Grandjean, P.; Cutting by a High Power Laser at a Long Distance Without an Assist Gas for Dismantling; Optics & Laser Technology, v.29, n.6, p.307-316, 1997
- ²⁸ Labaune, C.; Baldis, H.A.; Bauer, B.S.; Schifano, E.; Cohen, B.I.; Spatial and Temporal Coexistence of Stimulated Scattering Processes under Crossed-Laser-Beam Irradiation; Physical Review Letters, v.82, n.18, p.3613-3616; 3 may 1999
- ²⁹ Yilbas, B.S. & Sami, M.; Study into the Effect of Beam Waist Position on Hole Formation in the Laser Drilling Process; Journal of Engineering Manufacture, v.210, p.271-277, 1996
- ³⁰ Schmidt, Richard E. (chairman & CEO); Gaussian Beam Optics Tutorial; Scientific & Labo. Prod. Catalog; Newport Corp.; part II; c.2, p.66-67; 1994
- ³¹ Yen, W.C. & Liu, H.P.; Reduction of Beam Divergence of a Thermal Lensing Insensitive Nd:Yag Laser; Optics & Laser Technology, 1997
- ³² Tiffany, William B.; Drilling, Marking and other Applications for Industrial Nd:Yag Lasers; Spie-Applications of High Power Lasers, v.527, p.28-36, 1985

-
- ³³ Lancaster, D.G. & Dawes, J.M.; Thermal-lens measurement of a quasi steady-state repetitively flashlamp-pumped Cr, Tm, Ho:Yag laser; *Optics & Laser Technology*, v.30, p.103-108; 1998
- ³⁴ Kar, A. & Mazunder, J.; Two-dimensional model for material damage due to melting and vaporization during laser irradiation; *Journal Applied Physics*, v.68, n.8, p.3884-3891; 1990
- ³⁵ Mazur, Eric; Interaction of ultrashort laser pulses with solids; de Bartolo, editors; Plenum, NATO ASI series; p.1-54; 1996
- ³⁶ Burgess, Larry W. & Pauri, Fabrizio; Laser Technology defining its role in the PCB production process; *Printed Circuit Fabrication*, v.22, n.1, p.22-30, 1999
- ³⁷ Stuart, B.C; Feit, M.D; Rubenchik, A.M; Shore, B.W & Perry, M.D.; Laser-Induced Damage in Dielectrics with Nanosecond to Subpicosecond Pulses; *Physical Review Letters*; v.74; n.12; p.2248-2251; mar 1995
- ³⁸ Stuart, B.C; Feit, M.D; Herman, S; Rubenchik, A.M; Shore, B.W & Perry, M.D.; Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics; *Physical Review B*; v.53; n.4; p.1749-1761; jan. 1996
- ³⁹ Yilbas, Bekir Sami; The Study of Laser Produced Plasma Behaviour Using Streak Photography; *Japanese Journal of Applied Physics*, v.24, n.11, p.1417-1420, nov. 1985
- ⁴⁰ Shayler, P.J.; PhD thesis at Mechanical Engineering Dept., University of Birmingham, 1975; apud Yilbas, B.S.; 1988 [⁸⁰]; apud Yilbas, B.S; 1985 [³⁹]
- ⁴¹ Prokhorov, A.M.; Konov, V.I.; Ursu, I.; Mihailescu, I.N.; *Laser Heating of Metals*; IOP Publishing Ltd., 1990
- ⁴² Maillet, Henry; *O Laser, Princípios e Técnicas de Aplicação*; Ed. Manoele, 1987

-
- ⁴³ Drude; apud Prokhorov et al, 1990 [⁴¹]
- ⁴⁴ Goldman, Leon; Applications of the Laser; CRC Press, 1973
- ⁴⁵ Murray, Todd W. & Wagner, James W.; Laser generation of acoustic waves in the ablative regime Journal Applied Physics, 85, n.4, p.2031-2040, 1999
- ⁴⁶ Rossi, W. de; comunicação privada a respeito de ensaio experimental na CPML; 2001
- ⁴⁷ Fabbro, R.; Fournier, J.; Ballard, P.; Devaux, D. & Virmont, J.; Physical study of laser-produced plasma in confined geometry; Journal Applied Physics, v.68, n.2, p.775-784; 1990
- ⁴⁸ Yilbas, Bekir Sami; Study of Affecting Parameters in Laser Hole Drilling of Sheet Metals; Journal of Engineering Materials and Technology; v.109, n.4, p.282-287, oct. 1987
- ⁴⁹ Antonsen Jr, Thomas M. & Bian, Zhigang; Ionization Induced Scattering of Short Intense Laser Pulses; Physical Review Letters, v.82, n.18, p.3617-3620; may 3, 1999
- ⁵⁰ Modest, Michael F.; Laser Machining of Ablating / Decomposing Materials – Through Cutting and Drilling Models; ICALEO section C, p.58-67, 1996
- ⁵¹ Peyre, P.; Berthe, L.; Scherpereel, X.; Fabbro, R. & Bartnicki, E.; Experimental study of Laser-driven shock waves in stainless steel; Journal Applied Physics, v.84, n.11, p.5985-5992; 1998
- ⁵² Kabashin, A.V; Konov, V.I.; Nikitin, P.I. & Prokhorov, A.M.; Konjevic, N. & Viktor, L.; Laser plasma generation of currents along a conductive target; Journal Applied Physics, v.68, n.7, p.3140-3146; 1990

-
- ⁵³ Lima, M. & Wagnière, J.D; Determinação da absorção do feixe laser em ensaios de refusão em regime contínuo; Revista de Metalurgia, c.34, p.131-134, maio 1998
- ⁵⁴ Bostanjoglo, G.; Sarady, I.; Beck, Th. & Weber, H.; Processing of Ni-based Aero Engine Components with Repetitively Q-switched Nd:Yag Lasers; Spie, v.2789, p.145-157, 1996
- ⁵⁵ Basu, S. & DebRoy, T.; Liquid Metal Expulsion During Laser Irradiation; Journal of Applied Physics, v.72, n.8, p.3317-3322, oct 1992
- ⁵⁶ Yilbas, Bekir Sami; Study of liquid and vapor ejection processes during laser drilling of metals; Journal of Laser Applications, v.7, n.3, p.147-152, 1995
- ⁵⁷ von Allmen, M; Laser Drilling Velocity in Metals; Journal of Applied Physics, v.47, n.12, p.5460-5463, dec 1976
- ⁵⁸ Simon, P. & Ihlemann, J.; Machining of submicron structures on metals and semiconductors by ultrashort UV-laser pulses; Applied Physics; v.A-63; p.505-508; jun. 1996
- ⁵⁹ Chen, Xiangli; Lotshaw, Willian T.; Ortiz, A.L.; Staver, P.R.; Erikson, C.E.; McLaughlin, M.H. & Rockstroh, Todd J.; Laser Drilling of Advanced Materials: Effects of Peak Power, Pulse Format and Wavelength; Journal of Applied Physics, v.8, n.5, p.233-239, 1996
- ⁶⁰ Paek, Un-Chul & Gagliano, Francia P.; Thermal Analysis of Laser Drilling Processes; IEEE-Journal of Quantum Eletronics, v.8, n.2, p.112-119, 1972
- ⁶¹ Yilbas, Bekir S. & Sahin, Ahmet Z.; Laser Pulse Optimization for Practical Laser Drilling; Optical and Lasers in Engineering, 1994

-
- ⁶² Rockstroh, Todd J.; Chen, Xiangli & Lotshaw, William T.; Influence of Laser Pulse Duration on Laser Drilled Hole Quality in Nickel Based Super Alloy; ICALEO section C, p.113-122, 1996
- ⁶³ Riva, Rudimar; Rodrigues, Nicolau A.S.; Watanuki, Jaime T.; Christ, Benedito & Schwab, Carlos; Cutting and Drilling with a Copper HyBRID Laser; Symposium on Lasers and their Applications, p.90-93, 1997
- ⁶⁴ Grad, Ladislav & Mozina, Janez; Laser Pulse Shape Influence on Optically Induced Dynamic Processes; Applied Surface Science, v.127, p.999-1004, 1998
- ⁶⁵ Roos (1980); apud Grad, Ladislav & Mozina, Janez, 1998 [⁶⁴]
- ⁶⁶ Poterasu, M; Dascalu, T.; Marian, A. & Buca, D.; Nd:Yag Laser Surface Texturing; Spie v.3405, p.233-240, 1998
- ⁶⁷ Hobbs, Jerry R.; CPA sustains 30 fs applications; Laser focus World, 1993
- ⁶⁸ Tönshoff, H.K.; Ostendorf, A.; Momma, C.; Kamlage, G. & Nolte, S.; Microdrilling of Metals with Ultrashort Laser Pulses; Proceedings ICALEO, v.A1, p.1-10, 1999
- ⁶⁹ Momma, C.; Knop, U. & Nolte, S.; Laser Cutting of Slotted Tube Coronary Stents - State of the Art - and Future Developments; Progress in Biomedical Research, p.39-44, feb. 1999
- ⁷⁰ Kamlage, G. & Nolte, Stefan; Momma, Carsten & Ostendorf, A.; Microdrilling of Metals with Ultrashort Laser Pulses; Journal Laser Applications; v.A1, p.1-12, 1999
- ⁷¹ Momma, C; Nolte, S.; Kamlage, G; Alvensleben, F. von; Tünnermann, A; Beam delivery of femtosecond radiation by diffractive optical elements; Journal of Applied Physics v.A-67, p.517-520, 1998

-
- ⁷² Center for Ultrafast Optical Science, New Findings on Single-Shot Laser Pulse Damage, Photonics Spectra, v.33, n.8, p.46, august 1999
- ⁷³ Battista, Albert D. & Shiner, William H.; Production Laser Hole Drilling - Now; SME Laser Conference, 1976
- ⁷⁴ Yilbas, B.S.; Davies, R. & Yilbas, Z.; Study into the Measurement and Prediction of Penetration Time During CO₂ Laser Cutting Process; IMechE, v.204, p.105-113, 1990
- ⁷⁵ Zhang, Guozhong; Liu, Limin & Li, Changjiang; Study on laser drilling in rare earth magnets; Spie v.2888, p.202-206, 1996
- ⁷⁶ Yilbas, Bekir S.; Sahin, Ahmet Z. & Davies, R.; Laser Heating Mechanism Including Evaporation Process Initiating Laser Drilling; International Journal of Machining Tools Manufacturing, v.35, n.7, p.1047-1062, 1995
- ⁷⁷ Tönshoff, Hans Kurt; Alvensleben, Ferdinand von; Ostendorf, Andreas; Kamlage, Günter & Nolte, Stefan; Micromachining of Metals with Ultrashort Laser Pulses; International Journal of Electrical Machining, n.4, p.1-6, jan 1999
- ⁷⁸ Luft, A.; Franz, U.; Emsermann, A. & Kaspar, J.; A study of thermal and mechanical effects on materials induced by pulsed laser drilling; Applied Physics; v.A-63, p.93-101, 1996
- ⁷⁹ Yilbas, B.S.; Yilbas, Z. & Akcakoyun; Investigation into Absorption of the Incident Laser Beam During Nd:Yag Laser Processing of Metals; Optics & Laser Technology, v.28, n.7, p.503-511, 1996
- ⁸⁰ Yilbas, Bekir Sami; Investigation into drilling speed during laser drilling of metals; Optics & Laser Technology, v.20, n.1, p.29-32, 1988

-
- ⁸¹ Köller, L.; Schumacher, M.; Köhn, J.; Teuber, S.; Tiggesbäumker, J.; Meiwes-Broer, K.H.; Plasmon-Enhanced Multi-Ionization of Small Metal Clusters in Strong Femtosecond Laser Fields; *Physical Review Letters*, v.82, n.19, p.3783-3786; may 10, 1999
- ⁸² Takeno; Massahura & Seigo, H; 1990; apud Yilbas [¹³]
- ⁸³ Takeno, S; Moriyasu & Hiramoto, 1993; apud Yilbas [⁵⁶]
- ⁸⁴ Wei, P.S. & Ho, J.Y; 1990; apud Modest [⁵⁰]; apud Yilbas [²⁹]
- ⁸⁵ Marvin; Excimer lasers target material ablation; *Industrial Laser Solution*; pp.27-31; nov 1999
- ⁸⁶ Kostrubiec, F. & Pawlak, R.; Changes of Macrostructure of Tungsten Under the Influence of Surface Laser Irradiation; *Journal of Materials Science Letters*, v.A2, p.1295-1297, 1987
- ⁸⁷ Bonk, Paulo Akira; Modelamento das microesplôsões e avaliação da mudança da microdureza na superfície de esmalte dentário irradiada com Laser de Hólmio; Ipen-Usp, dissertação de mestrado, 1999
- ⁸⁸ Schaeffer, Ronald D.; A closer look at laser ablation; *Industrial Laser Solutions*, v.15, n.9, p.21-25; sept. 2000
- ⁸⁹ Schwob, Hans Peter; Yag Laser Machining Center; Technical Note - Lasag AG Industrial, p.366-373, 1989
- ⁹⁰ New Findings on Single Shot Laser Pulse Damage; *Photonics Spectra*, p.46; ago 1999
- ⁹¹ Rhode, H. & Dausinger, F.; The Forming Process of a Through Hole Drilled with a Single Laser Pulse; Technical Note - Lasag AG Industrial, 1996

-
- ⁹² Laser Welding, Cutting and Drilling; Technical Note - Raytheon Laser Products, 1978
- ⁹³ Gauthier, R.C.; Optical Trapping: a Tool to Assist Optical Machining; Optics & Laser Technology, v.29, n.7, p.389-399, 1997
- ⁹⁴ Rohde, H. & Meiners, E.; Trepan drilling of fuel injection nozzles with a TEM₀₀ Nd:Yag slab laser; Journal of Laser Applications, v.8, p.95-101, 1996
- ⁹⁵ Hand, Aaron J.; Laser Squeeze into Tighter Board Assemblies; Photonics Spectra, v.33, n.7, p.96-101, July 1999
- ⁹⁶ Olson, Radley W. & Swope, William C.; Laser Drilling with Focused Gaussian Beams; Journal of Applied Physics, v.72, n.8, p.3686-3696, Oct 1992
- ⁹⁷ Rossi, W.; Vieira Jr., N.D.; Nogueira; Wetter; Berretta; Vidal & Morato; Development of a Prototype of a Laser Material Processing Center at IPEN, 1994
- ⁹⁸ Vieira Jr, N.D.; Rossi, W.; Wetter, N.U.; Nogueira, G.E.C.; Berretta, J.R.; Vidal, J.T.; Galego, E. & Morato, S.P.; Development of a Prototype of a Laser Material Processing Center; Ipen, p.1-5, 1998
- ⁹⁹ Vieira Jr, N.D.; Rossi, W.; Wetter, N.U.; Nogueira, G.E.C.; Berretta, J.R.; Monteiro, W.A. & Neves, M.D.M.; CPML - Central de Processamento de Materiais por Laser; Relatório Final Ipen-Finep, 1998
- ¹⁰⁰ ILC Technical Bulletin 2, 1983, ILC Technology, 399 Java Drive, Sunnyvale, California 94089, USA.
- ¹⁰¹ Cerullo G., De Silvestri S., Magni V., Svelto O. Optical And Quantum Electronics, v.25, p.489-500, 1993
- ¹⁰² Bransch. H. N., Weckman. D. C., Kerr, H. W. Welding Research Supplement, p.141-151, June 1994

-
- ¹⁰³ Michaud E. J., Kerr H. W., Weckman D. C.; Temporal Pulse Shaping and Solidification Cracking in Laser Welded Al-Cu Alloys; 4th Intl. Conf. On Trends in Welding Research. Gatlinburg. Tennessee, June 5-8, 1995
- ¹⁰⁴ Chen, Xiangli; Lotshaw, William T.; Ortiz, A.L.; Staver, P.R.; Erikson, C.E.; McLaughlin, M.H. & Rockstroh, Todd J.; Laser drilling of advanced materials: effects of peak power, pulse format, and wavelength; Journal of Laser Applications n.8, p.233-239, Jun 1996
- ¹⁰⁵ Culkin, Thomas J. & Kugler, Thomas R.; Designer's Handbook; Photonics Spectra, Oct. 1987
- ¹⁰⁶ Stecher, P.G.; Windholz, M; Leahy, D.S.; Bolton, D.M. & Eaton, L.G.; The Merck Index; Publishing Merck & Co., Inc.; Rahway, N. Jersey, USA; 1968
- ¹⁰⁷ Lide, David R.; CRC – Handbook of Chemistry and Physics 74th. Ed, 1993-94
- ¹⁰⁸ Belforte, David A.; Basics of laser drilling; Industrial Laser Review, p.19-24, Oct 1998
- ¹⁰⁹ Brito, Roberto; de Rossi, Wagner & Vieira, Nilson D.; Microfuração em Aço Inox por Laser Nd:Yag; Sulmat – Congresso em Ciência de Materiais, p.619-628, Florianópolis, 2000.
- ¹¹⁰ Rossi, Wagner de; Brito, Roberto de; Berretta, J.R.; Almeida & Vieira, Nilson D.; Microfuração a Laser em Chapa de Aço Inox AISI 304; 1^o COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, p.1-8, Curitiba, 2001
- ¹¹¹ Retinox aços inoxidáveis;
- ¹¹² Lide, David R.; CRC – Handbook of Chemistry and Physics 74th. ed, 1993-94
- ¹¹³ Steen, William M.; Laser Material Processing; Springer, 2nd edition, p.107, London
-
-
-