

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

DAIR FERREIRA SALGADO JUNIOR

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NA QUALIDADE DA
MICROFURAÇÃO COM LASER PULSADO Nd:YAG EM CHAPAS DE AÇO
INOXIDÁVEL AISI 316L**

Ilha Solteira
2016

DAIR FERREIRA SALGADO JUNIOR

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NA QUALIDADE
DA MICROFURAÇÃO COM LASER PULSADO Nd:YAG EM CHAPAS
DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre. Área de Conhecimento: Materiais e Processo de fabricação

Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella
Orientador

Prof. Dr. Juno Gallego
Coorientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S164i Salgado Junior, Dair Ferreira.
Influência dos parâmetros de usinagem na qualidade da microfuração com laser pulsado Nd:Yag em chapas de aço inoxidável AISI 316L / Dair Ferreira Salgado Junior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
68 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processo de Fabricação, 2016

Orientador: Vicente Afonso Ventrella

Co-orientador: Juno Gallego

Inclui bibliografia

1. Microfuração. 2. Aisi 316L. 3. Nd:Yag.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Influência dos parâmetros de usinagem na qualidade da microfuração com Laser Pulsado Nd:YAG em chapas de aço inoxidável AISI 316L

**AUTOR: DAIR FERREIRA SALGADO JUNIOR
ORIENTADOR: VICENTE AFONSO VENTRELLA
COORIENTADOR: JUNO GALLEGO**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. VICENTE AFONSO VENTRELLA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RICARDO CURY IBRAHIM
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de sistemas Mecânicos / Escola Politécnica da USP

Ilha Solteira. 12 de dezembro de 2016

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Andreia Justino Custodio, pessoa com quem amo partilhar a vida. Com você tenho me sentido mais vivo de verdade. Obrigado pela paciência e por sua capacidade de me trazer paz na correria de cada semestre, pelo incentivo, pela força e principalmente pelo carinho. Valeu a pena toda distância, todo sofrimento, todas as renúncias.... Valeu a pena esperar.... Hoje estamos colhendo, juntos, os frutos do nosso empenho! Esta vitória é muito mais sua do que minha!!!

AGRADECIMENTOS

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior. Ao meu orientador Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella e ao meu coorientador Prof. Dr. Juno Gallego, pelo suporte no pouco tempo que lhes couberam, pelas suas correções e incentivos. A todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos. Aos amigos, companheiros de trabalhos e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

“O homem é do tamanho do seu sonho”. Fernando Pessoa.

RESUMO

A evolução do processo de furação nos trouxe ao desenvolvimento do método de furação por laser pulsado, mas não temos definido o que a variação de cada parâmetro produz nos microfuros em relação à qualidade dos mesmos medidos com base em seu formato em aço inoxidável austenítico AISI 316L. O presente estudo analisou como variações na potência de pico, largura temporal do pulso e existência ou não de atmosfera protetora podem mudar os tamanhos, formatos e profundidades em microfuros. Produziram-se combinações dos parâmetros que foram usadas para obter furos em chapas de aço AISI 316L com 1 mm de espessura com o uso de uma fonte de laser pulsado Nd:YAG e analisar as propriedades em cada combinação, tais como diâmetros de entrada e de saída, profundidades e formatos observados em estereoscópio.

Palavras-chave: Microfuro. Laser. Nd:YAG. AISI 316L. Potência de pico. Largura temporal.

ABSTRACT

The evolution of the drilling process has brought us to the development of drilling method by pulsed laser, but we have not defined what the variation of each parameter produces in the micro-holes in relation to the quality of the same ones measured on the basis of its austenitic stainless steel format AISI 316L. This study analyzed how variations in peak power, temporal pulse width and whether or not protective atmosphere can change the sizes, shapes and depths in micro-holes. parameter combinations were produced which were used for holes in sheet steel AISI 316L with a thickness of 1mm using a laser light source pulsed Nd:YAG laser and analyzing the properties of each combination, such as inlet and outlet diameters, depths and shapes observed in stereoscope.

Keywords: Micro-hole. Laser. Nd:YAG laser. AISI 316L. Peak power. Temporal width.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fotocópia do artigo de Maiman de 1960 'Stimulated Optical Radiation in Ruby'	16
Figura 2 – Níveis energéticos em um átomo	19
Figura 3 – Processos radioativos em sistemas de dois níveis, (a) emissão espontânea, (b) absorção, (c) emissão estimulada	19
Figura 4 – Cristais Nd:YAG utilizados em lasers de estado sólido	22
Figura 5 – Níveis energéticos do Neodímio	23
Figura 6 – Diagrama esquemático de um laser de estado sólido de Nd:YAG	24
Figura 7 – Diagrama esquemático de um sistema laser Nd:YAG	25
Figura 8 – Detalhamento em perspectiva isométrica de um sistema laser Nd:YAG	25
Figura 9 – Sistema laser Nd:YAG pulsado, modelo UW-150A United Winners, montado no Laboratório de Soldagem	32
Figura 10 – Dimensões do corpo de prova	33
Figura 11 – Linhas auxiliares para posicionamento do laser	33
Figura 12 – Medição do diâmetro de entrada do disparo	34
Figura 13 – Medição da área do furo	34
Figura 14 – Comparação antes e após lixamento, (a) e (b) 3 kW 1 ms com atmosfera protetora não obteve profundidade, (c) e (d) 7 kW 1 ms com atmosfera protetora	35
Figura 15 – Corte dos corpos de prova por eletroerosão a fio	35
Figura 16 – Detalhe da medição	36
Figura 17 – Corpos de prova após embutimento e lixamento	36
Figura 18 – Medida de profundidade do furo	37
Figura 19 – Painel da unidade laser	38
Figura 20 – Energia medida para pulsos de 1ms	38
Figura 21 – Energia medida para pulsos de 2ms	38
Figura 22 – Comparação da energia de saída	39
Figura 23 – Comparação de condições para 1ms	40
Figura 24 – Comparação de condições para 2ms	41
Figura 25 – Comportamento da área em relação a energia do pulso de 1ms	42
Figura 26 – Comportamento da área em relação a energia do pulso de 2ms	42
Figura 27 – Densidade energética do processo	43
Figura 28 – Desvio padrão para 1ms	44
Figura 29 – Desvio padrão para 2ms	44
Figura 30 – Comparativo de desvios com base em largura temporal	45
Figura 31 – Comparativos de diâmetros na direção e transversal a laminação 1ms	46
Figura 32 – Comparativos de diâmetros na direção e transversal a laminação 2ms	46
Figura 33 – Comparativo com larguras temporais diferentes	46
Figura 34 – Quantidade de furos para 1ms	48
Figura 35 – Quantidade de furos para 2ms	48
Figura 36 – Comparativo entre 1ms e 2ms	49
Figura 37 – Diâmetros médios	49
Figura 38 – Diâmetros de saída	50
Figura 39 – Saída 6kW 2ms cg	50
Figura 40 – Saída 6,5kW 2ms cg	51
Figura 41 – Saída 7kW 2ms cg	51
Figura 42 – Saída 7kW 2ms sg	51
Figura 43 – Conicidade	52

Figura 44 – Perfil de furo passante após ataque químico	53
Figura 45 – Perfil de furo “cego” após ataque químico.....	53
Figura 46 – Empescoçamento do furo	54
Figura 47 – Fechamento total do furo	54
Figura 48 – Empescoçamento após ataque.....	55
Figura 49 – Fechamento após ataque.....	55
Figura 50 – Superfície após pulso de 1kW 1ms cg	56
Figura 51 – Superfície após pulso de 1kW 1ms sg	56
Figura 52 – Superfície após pulso de 0,5kW 2ms cg	57
Figura 53 – Superfície após pulso de 0,5kW 2ms sg	57
Figura 54 – Perfil do furo.....	58
Figura 55 – Material expulso no processo.....	59
Figura 56 – Regiões analisadas	60
Figura 57 – Espectrografia do metal base.....	60
Figura 58 – Espectrografia do metal ressolidificado.....	60
Figura 59 – Análise de variância de potência de pico	62
Figura 60 – Análise de variância de atmosfera protetora	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Efeitos específicos dos elementos de liga nos aços.....	29
Quadro 2 – Ajustes selecionados para potência de pico e largura temporal.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos e características de processos de soldagem a laser	17
Tabela 2 – Propriedades do Nd:YAG	24
Tabela 3 – Composição de alguns aços inoxidáveis austeníticos.....	28
Tabela 4 – Composição aço grau AISI 316L.....	28
Tabela 5 – Espectrografia do metal base	60
Tabela 6 – Espectrografia do metal ressolidificado	61

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A_{ij}	coeficiente de Einstein
AISI	American Iron and Steel Institute
Al	alumínio
B_{ij}	coeficiente de Einstein
C	Carbono
cg	com atmosfera protetora de argônio
Cr	Cromo
DL	direção de laminação
DTL	direção transversal a laminação
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
E_i	nível energético
h	constante de Planck
MEV	microscópio eletrônico de varredura
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
Nd	neodímio
Nd:YAG	neodymium-doped yttrium aluminium garnet
Nd^{+3}	neodímio trivalente
Ni	Níquel
N_i	população
O	oxigênio
P	Fósforo
S	Enxofre
sg	sem atmosfera protetora de argônio
Si	Silício
T	tempo
Unesp	Universidade Estadual Paulista
Y	ítrio
ν	frequência da onda

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

cm^2	centímetro cuadrado
J	Joule
J/cm^2	Joule por centímetro cuadrado
kW	quilowatt
mm	milímetro
mm^2	milímetro cuadrado
ms	milissegundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVO.....	14
3	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1	LASER.....	15
3.1.1	Componentes básicos do laser	18
3.1.2	Princípio físico da geração de laser	18
3.1.2.1	<i>Emissão espontânea.....</i>	<i>20</i>
3.1.2.2	<i>Absorção.....</i>	<i>20</i>
3.1.2.3	<i>Emissão estimulada.....</i>	<i>21</i>
3.1.2	Lasers de estado sólido.....	21
3.1.2.1	<i>Laser ND:YAG.....</i>	<i>22</i>
3.2	AÇOS INOXIDÁVEIS	26
3.2.1	Aços martensíticos	26
3.2.2	Aços ferríticos	26
3.2.3	Aços duplex	27
3.2.4	Aços endurecidos por precipitação (PH)	27
3.2.5	Aços austeníticos.....	27
3.2.5.1	<i>Aço AISI 316L</i>	<i>28</i>
3.3	MICROFURAÇÃO A LASER.....	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
6	CONCLUSÃO.....	63
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

O processo de furação é uma das operações de usinagem mais antigas registradas, embora tal processo tenha evoluído muito no decorrer de milênios ele não consegue superar barreiras físicas inerentes ao processo convencional, barreiras como as altíssimas rotações necessárias para alcançar as velocidades de corte em microfuros, dificuldade de furação de ligas endurecidas e superligas, furação em superfícies não planas ou fora da direção normal.

A furação a laser não enxerga tais barreiras para a execução de furos com diâmetros que variam de 5 μm a 1 mm com razões de aspecto de até 1:200. Geralmente a operação é realizada com um único pulso ou uma sequência de pulsos curtos, com banda temporal de 0,01 ms a 100 ms, e potências de pico que chegam a 50kW (ARRIZUBIETA et al, 2013).

A combinação de energia de pico e duração do pulso influencia o mecanismo de remoção de material, pulsos ultracurtos (menores que 100 fs) e altas densidades energéticas (maiores que 10^{16} W/cm²) o material é removido por ablação fria, desde que o material reaja com a energia do laser. Já com pulso longos (maiores que 100 μs) e densidades energéticas baixas (menores que 10^7 W/cm²) o material é removido por expulsão do fundido, onde há uma combinação de fusão e vaporização do material, este procedimento é o mais usado na indústria (SCHULZ: EPPELT: POPRAWE, 2013).

Furação por laser pulsado progrediu notavelmente ao longo dos anos para tornar-se uma ferramenta essencial para a geração de microfuros em muitos componentes utilizados na indústria (MEIJER, 2004; TIWAR; SARIN SUNDAR; SUNDARAJAN; JOSHI, 2005).

Um laser pulsado Nd:YAG produz radiação infravermelha de alta intensidade com comprimento de onda de 1,06 μm , com potências de saída compreendida entre 500 e 12.000 W. Devido ao seu comprimento de onda curto (em comparação com lasers de CO₂) permite o processamento de materiais altamente refletivos com menos potência do laser (BAGGER; OLSEN, 2001).

O Nd:YAG (granada de ítrio e alumínio dopado com neodímio; Nd:Y₃Al₅O₁₂) é um cristal que é utilizado como um meio ativo de lasers de estado sólido. O dopante, neodímio triplamente ionizado, Nd(III), substitui tipicamente uma pequena fração

(1%) dos íons de ítrio na estrutura cristalina hospedeira da granada de ítrio e alumínio (YAG), uma vez que os dois íons são de tamanho semelhante. É o íon de neodímio, que fornece a propriedade de emissão de laser no cristal, da mesma forma como o íon de cromo vermelho em lasers de rubi (KOECHNER, 1988).

A operação do laser de Nd:YAG foi demonstrado pela primeira vez por J.E. Geusic no Bell Laboratories em 1964.

Normalmente a indústria usa parâmetros dos fabricantes do equipamento para executar o processo sem ao menos saber o que cada parâmetro influência individualmente na qualidade do furo, tais como, circularidade, conicidade e rugosidade do furo, ou se a quantidade de pulso é realmente adequada à espessura do material.

2 OBJETIVO

A presente pesquisa investigou a possibilidade de uso de laser pulsado Nd:YAG para a usinagem de microfuros e como a variação dos parâmetros influenciou na qualidade dos mesmos relacionada a circularidade de entrada e saída e o formato em chapas de aço AISI 316L com espessura de 1 mm. Os parâmetros estudados foram a potência de pico, largura temporal e existência de atmosfera protetora.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 LASER

O laser é frequentemente agrupado com o transistor e o computador como invenções marco de meados do século 20, todas tecnologias que cresceram muito pós segunda guerra mundial (HECHT, 2010).

A palavra "laser" é um acrônimo para amplificação de luz por emissão estimulada por radiação em inglês. Ele foi primeiramente proposto por Schawlow e Townes em 1959 (STEEN; MAZUMDER, 2010).

A maioria dos níveis de energia atômica e molecular envolvidos no laser foi estudada e investigada na década de 30, no entanto, o desenvolvimento de sistemas que usassem o laser não foi imediato (MELO, 2007).

Somente em 1954 foi criado o "maser" por Charles Townes e colaboradores com a finalidade de amplificar micro-ondas por emissão estimulada de radiação. Em 1958 Townes e Schawlow sugeriram a utilização da emissão estimulada nas regiões do espectro da faixa do infravermelho e do visível retomando o interesse da comunidade científica e vários laboratórios que trabalharam para desenvolver o laser (READY, 1997; MELO, 2007; HECHT, 2010).

O nascimento do laser deve ser datado em 16 maio de 1960, que é a data da entrada no caderno de anotações por Maiman (1927-2007), considerado o pai do laser. O resultado de uma fonte de radiação óptica coerente, é universalmente atribuída a Maiman pois o resultado foi publicado na *Nature* datada de agosto de 1960, mostrada na Figura 1. Maiman observou e interpretou corretamente o estreitamento de uma linha espectral e um aumento de ordens de grandeza na intensidade da radiação. O dispositivo que ele desenvolveu continha todos os três componentes necessários e suficientes para a produção de radiação óptica coerente: um meio ativo para inversão de população (um cristal de rubi sintético), um sistema de bombeamento óptico, e um ressonador aberto que fornece retorno positivo e transforma o amplificador de radiação óptica em um gerador (SHCHERBAKOV, 2011).

Figura 1 – Fotocópia do artigo de Maiman de 1960 'Stimulated Optical Radiation in Ruby'

Stimulated Optical Radiation in Ruby

Schawlow and Townes¹ have proposed a technique for the generation of very monochromatic radiation in the infra-red optical region of the spectrum using an alkali vapour as the active medium. Javan² and Sanders³ have discussed proposals involving electron-excited gaseous systems. In this laboratory an optical pumping technique has been successfully applied to a fluorescent solid resulting in the attainment of negative temperatures and stimulated optical emission at a wave-length of 6943 Å.; the active material used was ruby (chromium in corundum).

A simplified energy-level diagram for triply ionized chromium in this crystal is shown in Fig. 1. When this material is irradiated with energy at a wave-length of about 5500 Å., chromium ions are excited to the 4F_2 state and then quickly lose some of their excitation energy through non-radiative transitions to the 2E state⁴. This state then slowly decays by spontaneously emitting a sharp doublet the components of which at 300° K. are at 6943 Å. and 6929 Å. (Fig. 2a). Under very intense excitation the population of this metastable state (2E) can become greater than that of the ground-state; this is the condition for negative temperatures and consequently amplification via stimulated emission.

To demonstrate the above effect a ruby crystal of 1-cm. dimensions coated on two parallel faces with silver was irradiated by a high-power flash lamp;

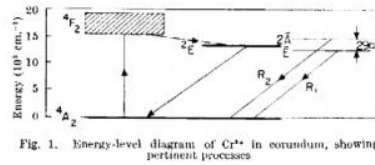


Fig. 1. Energy-level diagram of Cr^{3+} in corundum, showing pertinent processes

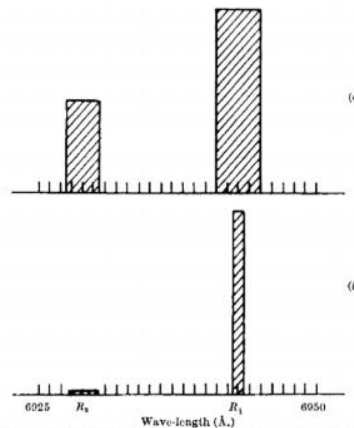


Fig. 2. Emission spectrum of ruby: a, low-power excitation; b, high-power excitation

the emission spectrum obtained under these conditions is shown in Fig. 2b. These results can be explained on the basis that negative temperatures were produced and regenerative amplification ensued. I expect, in principle, a considerably greater ($\sim 10^8$) reduction in line width when mode selection techniques are used¹.

I gratefully acknowledge helpful discussions with G. Birnbaum, R. W. Hellwarth, L. C. Levitt, and R. A. Satten and am indebted to I. J. D'Haenens and C. K. Asawa for technical assistance in obtaining the measurements.

T. H. MAIMAN

Hughes Research Laboratories,
A Division of Hughes Aircraft Co.,
Malibu, California.

¹ Schawlow, A. L., and Townes, C. H., *Phys. Rev.*, **112**, 1940 (1958).

² Javan, A., *Phys. Rev. Letters*, **3**, 87 (1959).

³ Sanders, J. H., *Phys. Rev. Letters*, **3**, 86 (1959).

⁴ Maiman, T. H., *Phys. Rev. Letters*, **4**, 564 (1960).

Fonte: (SHCHERBAKOV, 2011).

Em setembro de 1961 um laser foi lançado no Instituto Lebedev Physical (FIAN), então na URSS, por Galanin, Leontovich e Chizhikova. Percebe-se então que o laser advém de várias pesquisas paralelas, dificultando assim termos um referencial exato de sua criação, mas podemos dizer que a pedra fundamental foi colocada por Albert Einstein em 1916 com seu estudo de equilíbrio estatístico entre moléculas e a radiação térmica com a densidade de energia espectral espacial determinada pela fórmula de Planck (SHCHERBAKOV, 2011).

Na década de 1960 foram desenvolvidos praticamente todos os tipos de laser, além de surgirem possíveis aplicações práticas:

- Lasers de gás
- Lasers químicos
- Excimer lasers
- Laser de estado sólido
- Advanced Diode-Pumped Solid-State (DPSS)
- Dye Laser (Laser de corante)

A Tabela 1 cita algumas características dos lasers.

Tabela 1 – Tipos e características de processos de soldagem a laser

Tipos de Laser	Características do Laser
Laser de CO ₂	Comprimento de onda: 10,6µm Raio infravermelho distante Mídia: CO ₂ -N ₂ -He mistura Potência média: 50Kw (máximo), 1-15Kw (normal)
Laser Nd: YAG	Comprimento de onda: 1,06µm Raio infravermelho próximo Mídia: Nd ³⁺ :Y ₃ Al ₅ O ₁₂ , garnet (sólido) Potência média: 10Kw (máximo), 50W – 7Kw (normal), (eficiência: 1-4%)
Laser Diodo (LD)	Comprimento de onda: 0,8 – 1,1µm Raio infravermelho próximo Mídia: InGaAsP, etc. (sólido) Potência média: 10Kw (máximo pilha), 15Kw (máximo fibra), (eficiência: 20-60%)
Laser Diodo, bombeamento de estado sólido	Comprimento de onda: 1µm Raio infravermelho próximo Mídia: Nd ³⁺ :Y ₃ Al ₅ O ₁₂ , garnet (sólido) Potência média: 13,5Kw (máximo fibra), 6Kw (máximo placa)
Laser de Disco	Comprimento de onda: 1,03µm Raio infravermelho próximo Mídia: Yb ³⁺ : YAG ou YVO, sólido, etc. Potência média: 16Kw (máximo pilha), (eficiência: 15-25%)
Laser de Fibra	Comprimento de onda: 1,07µm Raio infravermelho próximo Mídia: Yb ³⁺ : SiO ₂ , sólido, etc. Potência média: 100Kw (máximo fibra), (eficiência: 20-30%)

Fonte: (KATAYAMA, 2013).

Nesse período foi observada a capacidade de o laser fundir e vaporizar pequenas porções de metal, trazendo o interesse em investigações da aplicação do laser em solda, corte e furação. As aplicações do laser eram bem claras, porém os equipamentos eram frágeis, não confiáveis e de baixa durabilidade, somente utilizados para demonstrações em laboratório. Na década de 1970, houve uma corrida para a melhora dos lasers para aplicações na indústria. Somente na década de 1990 ocorreram desenvolvimentos significativos, atualmente os equipamentos laser são utilizados em corte, solda, furação, marcação e em outros tipos de aplicações (MELO, 2007).

3.1.1 Componentes básicos do laser

Um laser deve ter os seguintes três componentes básicos:

- Meio ativo, o qual serve como amplificador da luz;
- Fonte de bombeamento, que é o excitador do meio ativo para o estado de amplificação e;
- Ressonador óptico, que fornece realimentação óptica.

O meio ativo pode ser qualquer material que seja sólido, líquido, gasoso ou de plasma (HÄNSCH; PERNIER; SCHAWLOW, 1971). Os meios ativos mais comuns incluem rubi, Nd:YAG e Nd:vidro (sólidos); corantes orgânicos, tais como rodamina 60, cumarina 2 e cumarina 30, dissolvidos em solventes tais como o álcool ou água (líquidos); e He-Ne, CO₂, argônio e nitrogênio (gases). Qualquer fonte de energia pode ser utilizada como uma fonte de bombeamento. As fontes de bombeamento mais comuns incluem lâmpadas flash (luz incoerente), lasers (luz coerente), elétrons (DC, RF ou de descarga de gás pulsada, feixe de elétrons), reações químicas, feixes de íons e fontes de raios-X (STEEN; MAZUMDER, 2010).

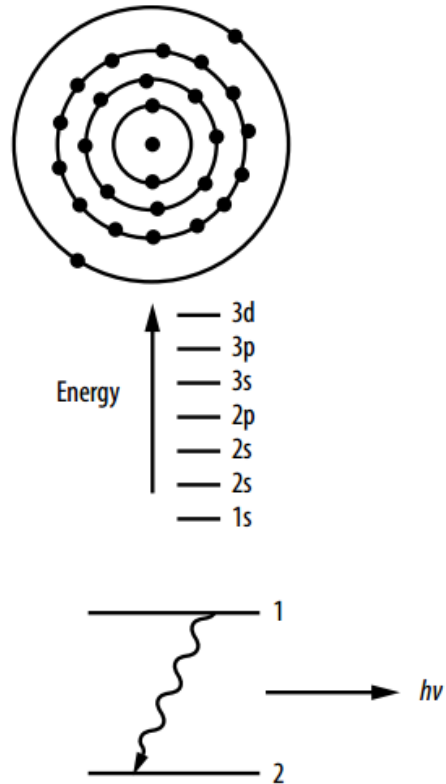
3.1.2 Princípio físico da geração de laser

Claramente, a amplificação de luz e a saída de laser são alcançados pela interação dos átomos e moléculas do meio ativo com o campo eletromagnético da fonte de bombeamento. Sistemas atômicos, tais como os átomos, íons, moléculas existem em certos estados, cada um dos quais é caracterizado por uma energia definida (excitação). Em um átomo, cada órbita ocupa certos níveis de energia. A transição entre estados de energia E_1 e E_2 resultam na emissão ou absorção de um fóton, a frequência ν_{12} é dada por:

$$h\nu_{12} = |E_1 - E_2| \quad (1)$$

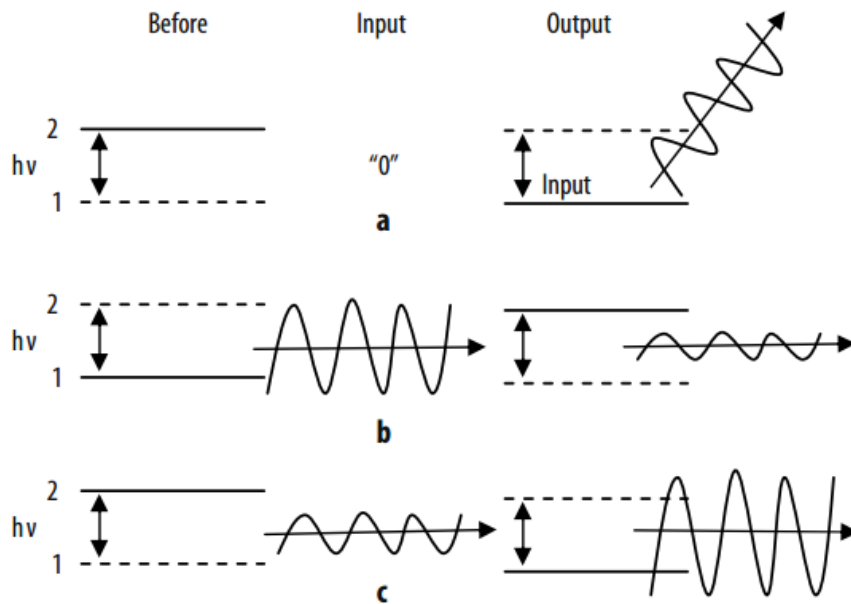
onde h é a constante de Planck.

Figura 2 – Níveis energéticos em um átomo



Fonte: (STEEN; MAZUMDER,2010).

Figura 3 – Processos radioativos em sistemas de dois níveis, (a) emissão espontânea, (b) absorção, (c) emissão estimulada



Fonte: (STEEN; MAZUMDER, 2010).

Um sistema em um estado inferior (terra) pode absorver fótons de uma frequência adequada e subir para um estado superior. Einstein identificou três processos principais através dos quais os átomos podem interagir com um campo eletromagnético:

- emissão espontânea (A_{21});
- absorção (B_{12}); e
- emissão estimulada (B_{21})

A_{ij} e B_{ij} são constantes para uma dada transição e são chamados coeficientes de Einstein.

Estes três processos são ilustrados na Figura 3 por um sistema de dois níveis separados por energia $h\nu$, onde h é a constante de Planck e ν é a frequência da onda. A viabilidade de um laser depende da relação entre os três processos acima mencionados, os coeficientes de Einstein, as condições de contorno de radiação de corpo negro e ampliação de vida (STEEN; MAZUMDER,2010).

3.1.2.1 Emissão espontânea

Neste processo, quando um átomo no nível 2 decai espontaneamente para o nível 1, ele libera o excesso de energia na forma de um fóton, com energia equivalente à $h\nu$, para a cavidade. Mas, por definição, para emissão espontânea, o fóton sai numa direção aleatória Figura 3(a). Isso significa que pode emitir fótons aleatoriamente em qualquer lugar no esferorradiano 4π sem qualquer polarização contribuir para o campo. Se a densidade populacional no nível 2 é N_2 a equação da taxa de decaimento deste estado é dada por:

$$\frac{dN_2}{dt}_{\text{espontâneo}} = -A_{21}N_2 \quad (2)$$

onde A_{21} é a constante de Einstein para este processo.

Se nenhum outro processo ocorre na cavidade, a população atômica irá constantemente mudar para o nível 1 com a constante de tempo τ .

$$\tau = (A_{21})^{-1} \quad (3)$$

Obviamente, a densidade de população de nível inferior (N_1) deve aumentar tão rapidamente como a densidade populacional da camada superior diminui (STEEN; MAZUMDER,2010).

3.1.2.2 Absorção

Neste processo, um átomo no estado 1 absorve um fóton do campo e, conseqüentemente, converte o átomo para o estado 2. A taxa à qual este processo ocorre depende do número de átomos de absorção e o campo a partir do qual eles extraem a energia. Assim, temos: $\rho(\nu)$

$$\frac{dN_2}{dt \text{ absor\c{c}ao}} = +B_{12}N_1\rho(v) = -\frac{dN_1}{dt \text{ absor\c{c}ao}} \quad (4)$$

onde $\rho(v)$ é a densidade de energia do campo ou a densidade de energia eletromagnética (Jm^{-3}), e B_{12} é o coeficiente de Einstein para este processo. Nota da Figura 3(b) que a onda diminui em amplitude e o átomo no estado 1 é convertido para o estado 2 e a parte da onda não absorvida continua ao longo do seu caminho (STEEN; MAZUMDER,2010).

3.1.2.3 Emissão estimulada

Este processo é o inverso da absorção. O átomo dá o seu excesso de energia, $h\nu$, para o campo, acrescentando de forma coerente com a intensidade. O fóton adicionado tem a mesma frequência, mesma fase, mesmo sentido de polarização e propaga-se na mesma direção que a onda que induziu o átomo de sofrer este tipo de transição.

Obviamente, a taxa é dependente do número de átomos estimulados e a força do campo estimulante:

$$\frac{dN_2}{dt \text{ emiss\c{a}o estimulada}} = -B_{21}N_2\rho(v) = -\frac{dN_1}{dt \text{ emiss\c{a}o estimulada}} \quad (5)$$

Emissão estimulada é o processo mais significativo para um laser, fornecendo a energia com a mesma frequência, mesma fase, mesmo sentido de polarização e que se propaga no mesmo sentido. Isto torna possível a amplificação e produção da luz. Só ocorrendo emissão estimulada com uma inversão de população, isto é, o número de átomos no nível 2 deve ser mais elevado do que no nível 1, que é uma situação instável por natureza (STEEN; MAZUMDER,2010).

3.1.2 Lasers de estado sólido

Lasers de estado sólido têm como meio ativo um cristal dielétrico isolante ou um vidro amorfo. A ação lasing vem de saltos energéticos entre níveis de energia eletrônicos discretos do dopante, como íons de terras raras. Os principais lasers industriais de estado sólido incluem $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$, $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$, $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$, rubi ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$), titânio safira ($\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) e alexandrita ($\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$). O material hospedeiro para o neodímio ou outro elemento de terras raras pode ser a granada de ítrio alumínio [YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)], fluoreto de ítrio lítio (YLF), perovskita ítrio de alumínio (YAP; YAlO_3), vanadato de ítrio (YVO_4) ou fosfato de vidro ou de sílica. Lasers de estado sólido têm a vantagem de possuírem tempos de vida relativamente longos para os estados excitados, o que permite o armazenamento de energia maior do que lasers de gás e, portanto, permite que eles usem Q-switched para operar com elevados picos em pulsos curtos (STEEN; MAZUMDER, 2010).

3.1.2.1 Laser ND:YAG

O $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ puro é um cristal opticamente isotrópico incolor com a estrutura cúbica de granada. Se cerca de 1% dos átomos de ítrio é substituído por neodímio a rede irá então conter íons de Nd^{3+} , mudando sua coloração como mostrado na Figura 4.

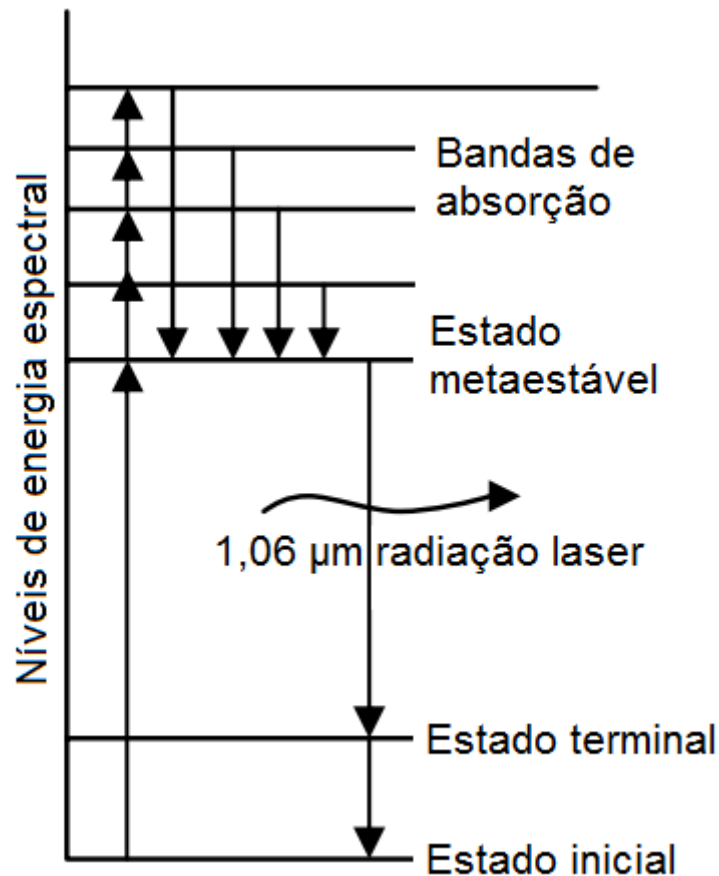
Figura 4 – Cristais Nd:YAG utilizados em lasers de estado sólido



Fonte: (DFNANO SUPPLIER, 2013).

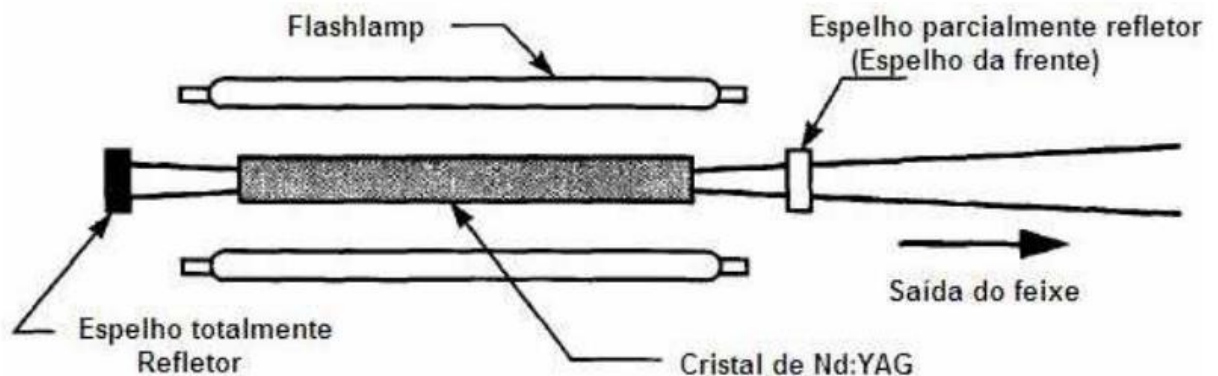
Estes íons podem sofrer transições mostradas na Figura 5. Os íons Nd^{3+} absorvem em bandas específicas de absorção, e o decaimento a um estado metaestável a partir do qual a ação lasing pode ocorrer para um estado terminal. Este estado terminal requer refrigeração para chegar ao estado fundamental. O resfriamento é geralmente atingido com água deionizada que flui em torno da haste YAG e a lâmpada flash. A haste e as lâmpadas flash estão situados em diferentes focos de uma cavidade elíptica reflexiva, que é banhada a ouro ou feita de alumina. A eficiência quântica é de 30-50%. Usando lâmpada de criptônio a eficiência operacional cai para cerca de 2% (STEEN; MAZUMDER, 2010).

Figura 5 – Níveis energéticos do Neodímio



Fonte: (STEEN; MAZUMDER, 2010). Modificado

O cristal de Nd:YAG é considerado, no caso dos lasers de meio ativo sólido, o mais comum em aplicações industriais. Fornece uma radiação com comprimento de onda de $1,06 \mu\text{m}$, a Tabela 2 mostra outras propriedades do Nd:YAG, sendo transmitida facilmente por fibras óticas flexíveis de quartzo e o meio ativo pode ser excitado tanto por luz de xenônio como de criptônio. Em comparação ao laser gasoso (CO_2), o sistema é consideravelmente simples e o comprimento de onda da radiação é mais facilmente absorvido pelos metais, fazendo com que tenha uma melhor eficiência, variando na faixa de 1 a 4%. Na Figura 6 é apresentado um desenho esquemático do laser sólido de Nd:YAG. O máximo valor da potência alcançada está diretamente limitada pelo comprimento da cavidade ressonante e pela eficiência do projeto e do sistema em remover o excesso de calor do cristal durante a excitação do mesmo (MELO, 2007).

Figura 6 – Diagrama esquemático de um laser de estado sólido de Nd:YAG

Fonte: (MELO, 2007).

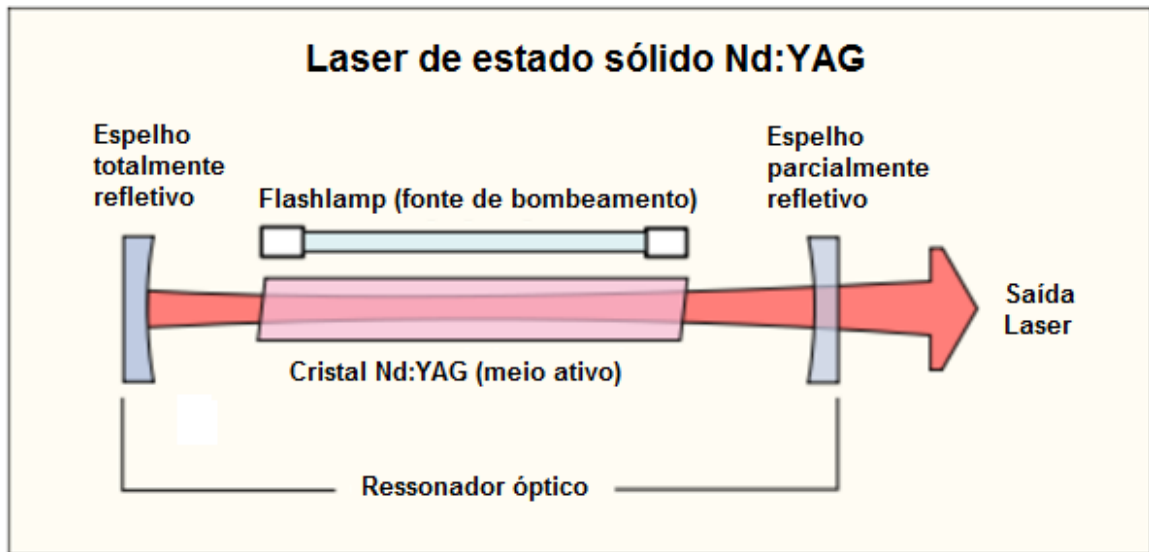
Tabela 2 – Propriedades do Nd:YAG

Propriedade	Valor
Formulação química	$\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$
Estrutura cristalina	Cúbica
Densidade	$4,56 \text{ g/cm}^3$
Dureza Mohs	8-8,5
Módulo Elástico	280 GPa
Resistência a tração	200 MPa
Ponto de fusão	$1970 \text{ }^\circ\text{C}$
Condutividade térmica	$10-14 \text{ W/(mK)}$
Coefficiente de expansão térmica	$7-8 \times 10^{-6}/\text{K}$
Parâmetro de resistência ao choque térmico	790 W/m
Dupla refração	Nenhuma (apenas induzida termicamente)
Índice de refração a 1064 nm	1,82
Dependência da temp. de índice de refração	$7-10 \times 10^{-6}/\text{K}$
Concentração típica de Nd dopado (%)	$1,36 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
Tempo de vida de fluorescência	$230 \text{ } \mu\text{s}$
Secção transversal de absorção a 808 nm	$7,7 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$
Secção transversal de emissão a 946 nm	$5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$
Secção transversal de emissão a 1064 nm	$28 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$
Secção transversal de emissão a 1319 nm	$9,5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$
Secção transversal de emissão a 1338 nm	$10 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$
Largura da banda	0,6 nm

Fonte: (PASCHOTTA; RUDIGER, 2012).

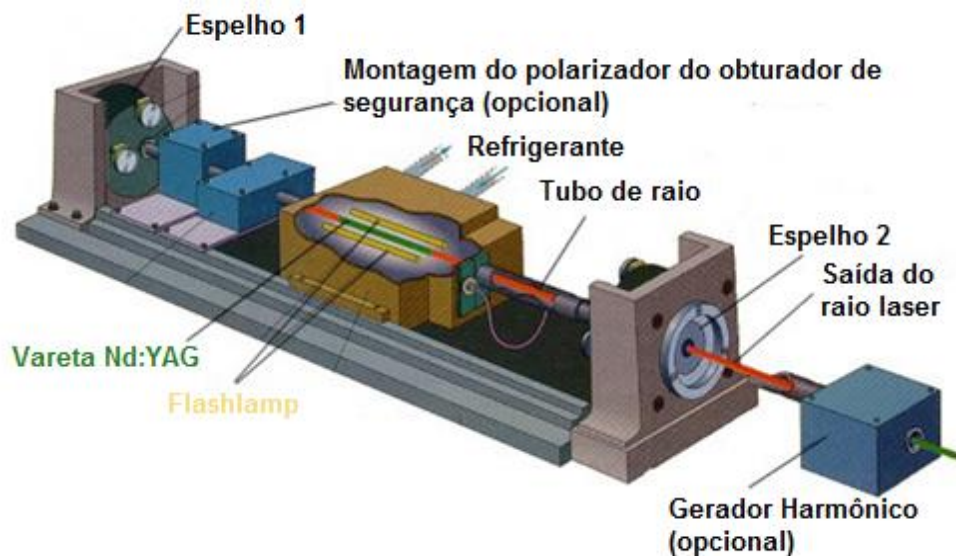
Os esquemas de construção do laser Nd:YAG podem ser vistos nas Figuras 7 e 8. Geralmente é formado por um par de espelhos em ambas as extremidades paralelos entre si que proporcionam a realimentação de luz. Os espelhos são revestimentos ópticos que determinam as propriedades reflexivas, tipicamente um é totalmente refletivo e outro parcialmente. O último é chamado de acoplador de saída, pois permite que uma parte da luz saia da cavidade para produzir o feixe de laser. A luz proveniente do meio, produzida pela emissão estimulada, é refletida pelos espelhos e volta para o meio onde é amplificada (KOECHNER, 1992).

Figura 7 – Diagrama esquemático de um sistema laser Nd:YAG



Fonte: (KOECHNER, 1992). Modificado

Figura 8 – Detalhamento em perspectiva isométrica de um sistema laser Nd:YAG



Fonte: (ExpertsMind, 2013). Modificado

O cristal é geralmente em forma de vareta e tem (dependendo da potência), um diâmetro de 10 mm e um comprimento de 150 mm. O Nd^{3+} é responsável pela emissão de luz com um comprimento de onda em torno de $1,06 \mu\text{m}$. Por haste podem ser gerados cerca de 500 W de potência, para obtenção de potências elevadas são necessárias várias outras hastes dispostas em série (LAC, 2005).

3.2 AÇOS INOXIDÁVEIS

Adições de cromo aumentam a resistência à oxidação e à corrosão do aço, com teores acima de 12% são comumente chamados de aços inoxidáveis. São aços de grande interesse para a engenharia graças a resistência a corrosão, propriedades mecânicas a altas temperaturas. A resistência a corrosão de ligas a base de Fe + Cr deve-se ao fenômeno da passivação, que é a formação de óxidos mistos como de ferro, de cromo e outros (SILVA; MEI, 2006).

As composições mais comuns dos aços inoxidáveis foram desenvolvidas acidentalmente no início do século XX, destas composições foram estudados os efeitos dos elementos de liga como carbono, níquel, molibdênio entre outros. Os aços inoxidáveis são separados em cinco grupos para fins de classificação e estudo de propriedades, estes grupos são martensíticos, ferríticos, ferrítico-austeníticos (duplex), endurecidos por precipitação (PH), austeníticos (SILVA; MEI, 2006).

3.2.1 Aços martensíticos

São ligas Fe-Cr contendo cromo entre 11,5% e 18,0% e podem ser endurecidos por têmpera (CHIAVERINI, 1998), podem ser subdivididos em:

- a) baixo carbono, chamado tipo “turbina”;
- b) médio carbono, chamado tipo “cutelaria”;
- c) alto carbono, chamado tipo “resistente ao desgaste”.

As principais características desses aços são:

- a) são ferromagnéticos;
- b) podem ser facilmente trabalhados, tanto a quente quanto a frio;
- c) apresentam boa resistência à corrosão quando expostos ao tempo, à ação da água e de substâncias químicas;
- d) o níquel melhora sua resistência à corrosão;
- e) a têmpera melhora a resistência à corrosão pois evita a formação de carbonetos.

Neste grupo encontram-se os aços grau AISI 403, 410, 414, 416, 416Se, 420, 420F, 422, 431, 440A, 440B e 440C (CHIAVERINI, 1998).

3.2.2 Aços ferríticos

São ligas Fe-Cr essencialmente ferríticas a todas as temperaturas e não são endurecidos por têmpera. Tem maiores teores de cromo e menores de carbono do que os martensíticos, os graus desse grupo são AISI 405, 430, 430F, 446, 502 (SILVA, MEI, 2006).

Os aços inoxidáveis ferríticos são utilizados na indústria automobilística, de eletrodomésticos e química, na decoração de interiores, equipamento de

restaurantes, produção de parafusos e porcas, radiadores, caldeiras, exaustores de automóveis (CHIAVERINI, 1998).

3.2.3 Aços duplex

Os aços duplex são utilizados quando se necessita de maior resistência à corrosão, maior resistência à oxidação e tenacidade adequada, eles têm uma estrutura bifásica ferrítico-austenítica, o teor de cromo deve variar entre 22% e 28% e o níquel entre 2% e 8%, outros elementos nesses aços são molibdênio, nitrogênio, cobre, tungstênio, manganês, silício, carbono, cobalto, nióbio, titânio e alumínio (CHIAVERINI, 1998).

São usados nas indústrias de processamento químico, de polpa e papel, de geração de energia fóssil e nuclear, de extração de petróleo e gás (CHIAVERINI, 1998).

3.2.4 Aços endurecidos por precipitação (PH)

São liga Fe-Cr(12-17%)-Ni(4-8%)-Mo(0-2%) com adições que permitam o endurecimento da martensita pela precipitação de compostos intermetálicos, tais como alumínio, cobre, titânio e/ou nióbio (SILVA; MEI, 2006).

Utilizados a princípio na área militar, são usados também na indústria aeronáutica, molas especiais e componentes similares (CHIAVERINI, 1998).

3.2.5 Aços austeníticos

Os aços austeníticos são os mais comuns entre os aços inoxidáveis, suas características são resistência à corrosão muito boa, elevada tenacidade e boa soldabilidade. A austenita é estabilizada à temperatura ambiente pela adição de níquel e outros estabilizadores como o manganês, muito usado tanto em aplicações criogênicas por não possuir transição dúctil-frágil, quanto em aplicações a altas temperaturas pela sua resistência ao amolecimento e a deformação a quente (SILVA; MEI, 2006).

A maioria dos aços inoxidáveis austeníticos são ligas Fe-Cr-Ni, mas durante a Segunda Guerra Mundial com a escassez de níquel parte deste, cerca de 4%, era substituído por manganês (7%) e nitrogênio (0,25%). Esses aços não são ferromagnéticos, não são endurecíveis, mas quando encruados tem um aumento de dureza muito maior do que qualquer outro tipo de aço (CHIAVERINI, 1998).

Esta família de aços apresenta os graus AISI 201, 202, 204, 301, 302, 304, 304L, 308, 316, 316L, 317, 321, 347.

Tabela 3 – Composição de alguns aços inoxidáveis austeníticos

Tipo AISI	C	Mn max.	P max.	S max.	Si max.	Cr	Ni	Mo	Outros
201	0,15 max.	5,5/7,5	0,060	0,03	1,00	16,0/18,0	3,5/5,5	-	N=0,25 max
202	0,15 max.	7,5/10,0	0,060	0,03	1,00	17,0/19,0	4,0/6,0	-	N=0,25 max
301	0,15 max.	2,0	0,045	0,03	1,00	16,0/18,0	6,0/8,0	-	-
302	0,15 max	2,0	0,045	0,03	1,00	17,0/19,0	8,0/10,0	-	-
304	0,08 max	2,0	0,045	0,03	1,00	18,0/20,0	8,0/10,5	-	-
304L	0,03 max	2,0	0,045	0,03	1,00	18,0/20,0	8,0/12,0	-	-
308	0,08 max	2,0	0,045	0,03	1,00	19,0/21,0	10,0/12,5	-	-
316	0,06 max	2,0	0,045	0,03	1,00	16,0/18,5	10,5/13,5	2,5/3,0	-
316L	0,03 max	2,0	0,045	0,03	1,00	16,0/18,5	11,0/14,0	2,5/3,0	-
317	0,08 max	2,0	0,045	0,03	1,00	18,0/20,0	11,0/15,0	3,0/4,0	-
321	0,08 max	2,0	0,045	0,03	1,00	17,0/19,0	9,0/12,0	-	Ti=5xC min; 0,8 max
347	0,08 max	2,0	0,045	0,03	1,00	17,0/19,0	9,0/12,0	-	Nb+Ta=10xC min; 1,0 max

Fonte: (CHIAVERINI, 1998).

3.2.5.1 Aço AISI 316L

O aço grau AISI 316L é um aço inoxidável austenítico com composição dada pela Tabela 4.

Tabela 4 – Composição aço grau AISI 316L

C	Mn max.	P max.	S max.	Si max.	Cr	Ni	Mo
0,03 max	2,0	0,045	0,03	1,00	16,0/18,5	11,0/14,0	2,5/3,0

Fonte: (CHIAVERINI, 1998).

O efeito de cada elemento na liga é mostrado na Quadro 1.

Quadro 1 – Efeitos específicos dos elementos de liga nos aços

Elemento	Principais funções
Mn	1. Contrabalança a fragilidade devido ao S;
P	1. Aumenta a resistência de aços de baixo C; 2. Aumenta a resistência à corrosão;
S	1. Forma FeS fragilizando o aço em trabalhos a quente.
Si	1. Desoxidante; 2. Elemento de liga para chapas elétricas e magnéticas; 3. Aumenta a resistência à oxidação.
Cr	1. Aumenta a resistência à corrosão e à oxidação; 2. Melhora a resistência a altas temperaturas.
Ni	1. Torna austeníticas liga Fe-Cr alto Cr.
Mo	1. Eleva a temperatura de crescimento do grão de austenita; 2. Eleva a dureza a quente, a resistência a quente e a fluência; 3. Melhora a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis; 4. Forma partículas resistentes à abrasão.

Fonte: (SILVA, MEI, 2006).

Nos últimos cinquenta anos, aços inoxidáveis têm sido amplamente utilizados em vários campos, variando de indústrias nucleares ou aeroespaciais à química ou de processamento de alimentos e bebidas, em particular o 316L por sua elevada ductilidade e a resistência a cargas termomecânicas complexas. Nas últimas décadas, aço inoxidável tipo 316L ganhou uma posição privilegiada entre os materiais empregados em dispositivos biomédicos, por exemplo, stents, filtros de veia cava, fios-guia para cateteres e marca-passo (AURICCHIO; CONSTANTINESCU; SCALET, 2014).

Outras aplicações do aço AISI 316L são para fabricação de válvulas e peças de tubulações, equipamentos hospitalares, trocadores de calor, equipamentos para indústrias químicas, petroquímicas, farmacêuticas, alimentícias, de celulose e papel, aeronáutica e elétrica, armações metálicas, peças para construção mecânica, parafusos, rebites e peças soldadas (SILVA; MEI, 2006).

3.3 MICROFURAÇÃO A LASER

Há muitas vantagens na utilização de laser para perfuração, e os mais importantes são: os furos podem ser localizados com precisão, uma grande razão de aspecto e diâmetros de orifícios muito pequenos podem ser alcançados, uma variedade de materiais pode ser perfurada, a perfuração é muito rápida, os furos podem ser feitos em ângulos de entrada difíceis, o processo pode ser automatizado,

o custo de funcionamento é baixo e sem o desgaste da ferramenta e ruptura, tornando-se uma alternativa barata para a perfuração, WEDM, brochamento ou outros métodos destrutivos de perfuração populares. Há algumas limitações, tais como: alto custo do equipamento, alguns defeitos, um furo cego de profundidade precisa é difícil de produzir, a espessura é restrita, o material aderente deve ser removido, a qualidade do furo determinada por características geométricas como diâmetro do furo, conicidade, relação de aspecto, e circularidade são de difícil controle; e características metalúrgicas: ZTA (zona termicamente afetada), camada ressolidificada, respingos e as microfissuras (BHARATISH et al., 2013; PETRONIĆ et al., 2010).

Perfuração a laser pulsado progrediu notavelmente ao longo dos anos para tornar-se uma ferramenta essencial para a perfuração de microfuros em muitos componentes utilizados nas indústrias tecnologicamente avançadas. O mecanismo básico de remoção de material na perfuração a laser baseia-se na absorção de energia laser a partir de uma série de pulsos de laser no mesmo local. O material é fundido e ejetado para formar um furo. A utilização de laser para micro perfurações ou a micro usinagem na indústria de fabricação pode ser atribuída a várias vantagens tais como uma elevada taxa de produção, aplicável a ambos os materiais condutores e não condutores, nenhum dano ou desgaste da ferramenta mecânica, devido ao processamento sem contato, aumento de qualidade do produto, baixo desperdício de material, baixo custo de produção, pequena zona termicamente afetada (ZTA), e tecnologia ecologicamente limpa (BISWAS et al., 2010).

Formação de conicidade e produção de orifícios não circulares são características da operação do laser em micro perfurações, mas é desejável que os furos sejam circulares e sem conicidade. O desenvolvimento de um modelo do processo é necessário para ser capaz de controlar estas duas características importantes, o que não é fácil para a perfuração laser uma vez que há um grande número de parâmetros de controle no processo (BISWAS et al., 2010).

Hoje em dia, o processo de perfuração a laser é o preferido em muitos setores como maquinaria pesada, na indústria aeronáutica para a fabricação de componentes de turbinas a gás como microfuros nas lâminas de ligas à base de níquel para o resfriamento, para componentes médicos de aço inoxidável remoção seletiva de camadas superficiais como a ablação dos óxidos condutores transparentes na produção de células solares, bem como na gravação de superfície de cilindros para aplicações de impressão, e automotivo para acabamento de peças de motores automotivos, como bicos injetores para maior eficiência devido às suas propriedades únicas, como ausência de força mecânica de corte, nenhuma natureza de contato, sem desgaste da ferramenta, alta flexibilidade e elevada taxa de usinagem. É amplamente aplicado na perfuração de placas de circuitos impressos, de coberturas de diamante depositados por vapor químico, embalagem microeletrônica e diodos super-luminescentes (TONGYU; GUOQUAN, 2008; ARRIZUBIETA et al., 2013; BHARATISH et al., 2013; DÖRING et al., 2013; RAJESH et al., 2015).

Diversos estudos foram feitos sobre microfuração e micro usinagem com laser pulsado Nd:YAG como Rodden que estudou micro furação em compósitos de fibra de carbono, Petronić na superliga NIMONIC 263, Tunna com sua pesquisa com alumínio e outra em microusinagem de cobre com diferentes comprimentos de onda

do laser, Biswas em gamma-titanium aluminide, Bharatish estudou a circularidade em cerâmicas de alumina, Tongyu com seu estudo dos aspectos de qualidade dos furos, Döring fez seu estudo com pulsos ultracurtos, Arrizubieta estudou o mecanismo de formação de furos por percussão, Girardot investigou as superligas a base de cobalto, Jackson e O'Neill observaram o uso de laser Nd:YAG para a microfuração de aços ferramenta, Kuar, Doloi e Bhattacharyya caracterizaram microfuros em zircônia, Doloi e Bhattacharyya também estudaram usinagem de micro ranhuras em cerâmicas de óxido de alumínio junto com Dhupal, Priyadarshini com a otimização dos processos de furação laser, Okasha com sua pesquisa em superligas aeroespaciais a base de níquel, Rajesh estudando microfuração em aço inoxidável austenítico, o mesmo tipo desta pesquisa, mas nesta estaremos estudando especificamente o aço grau AISI 316L.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado um laser pulsado Nd:YAG com uma potência máxima de 7 kW guiado por fibra óptica, com uma câmera instalada junto ao cabeçote para posicionamento adequado do laser e um bico de gás. O cabeçote possui deslocamento vertical e ajustes de angulação manuais.

Figura 9 – Sistema laser Nd:YAG pulsado, modelo UW-150A United Winners, montado no Laboratório de Soldagem



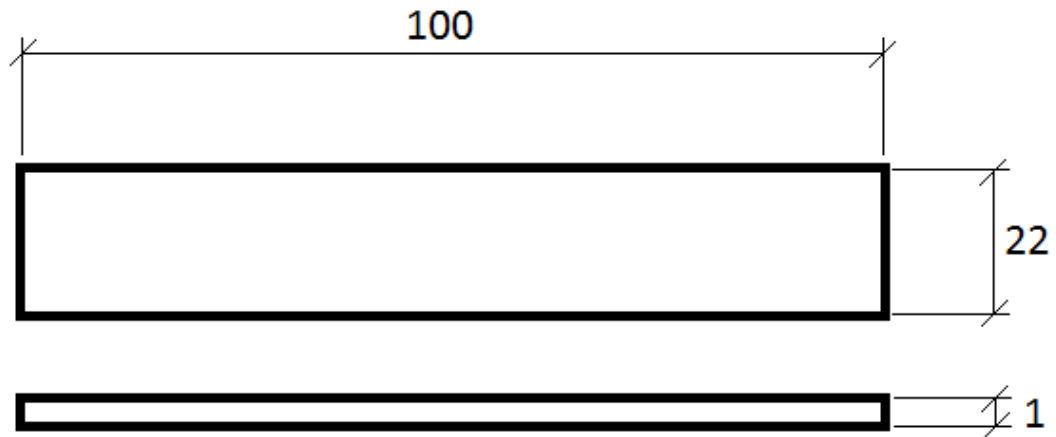
Fonte: Elaboração do próprio autor

Fez-se uso de um estereomicroscópio integrado a um sistema de captura de imagem e aquisição de dimensões para obtenção dos diâmetros de entrada e saída, e área dos furos.

Os corpos de prova foram apoiados em uma mesa que possui um fuso para deslocamento horizontal da mesma.

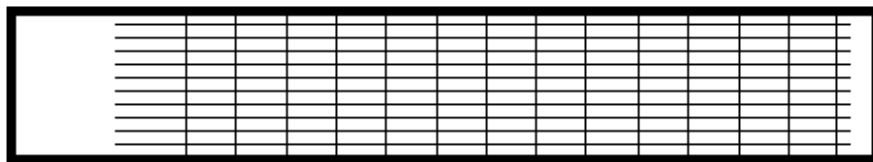
O metal utilizado no estudo foi o aço inoxidável AISI 316L na forma de chapas com 1mm de espessura.

Foram confeccionados corpos de prova na dimensão 22 mm por 100 mm.

Figura 10 – Dimensões do corpo de prova

Fonte: Elaboração do próprio autor

Nos corpos de prova traçamos linhas auxiliares para posicionamento do laser pois este não possuía controle de deslocamento por controle numérico. As linhas auxiliares foram espaçadas 2 mm na direção de laminação e 5 mm na direção transversal à laminação.

Figura 11 – Linhas auxiliares para posicionamento do laser

Fonte: Elaboração do próprio autor

A potência de pico e a largura temporal foram ajustadas como no Quadro 2.

Quadro 2 – Ajustes selecionados para potência de pico e largura temporal

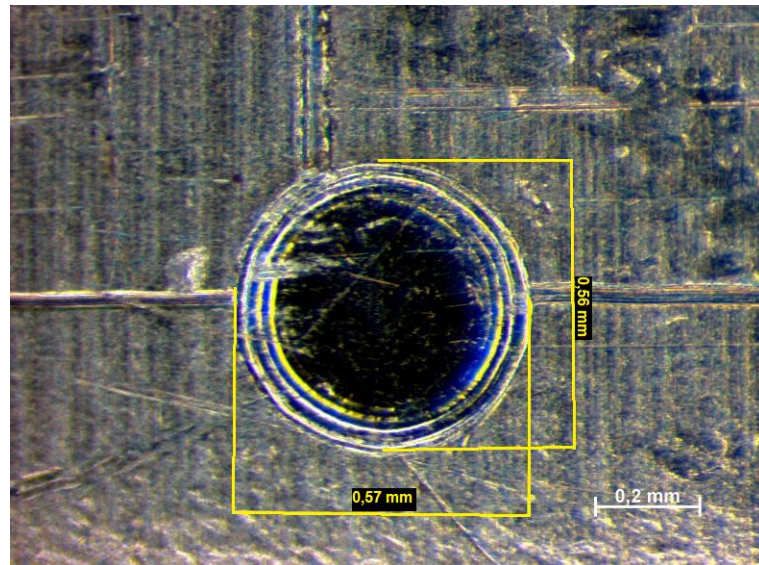
Potência de Pico (kW)	1	2	3	4	5	6	7	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	7
Largura Temporal (ms)	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Energia do Processo (J)	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14

Fonte: Elaboração do próprio autor

Para cada combinação fizeram-se 10 disparos com e sem atmosfera protetora de argônio a uma vazão de 22 l/min.

Após a execução dos disparos os corpos de prova foram levados ao estereomicroscópio e foram medidos seus diâmetros de entrada e de saída quando existiam, medidos na direção de laminação e na transversal a mesma.

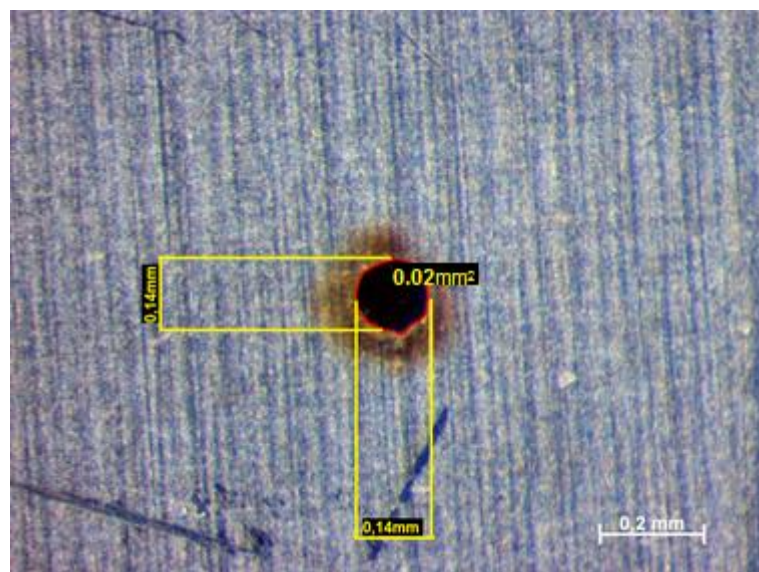
Figura 12 – Medição do diâmetro de entrada do disparo



Fonte: Elaboração do próprio autor

Também foram medidas as áreas de entrada e saída dos furos para comparar a sua circularidade.

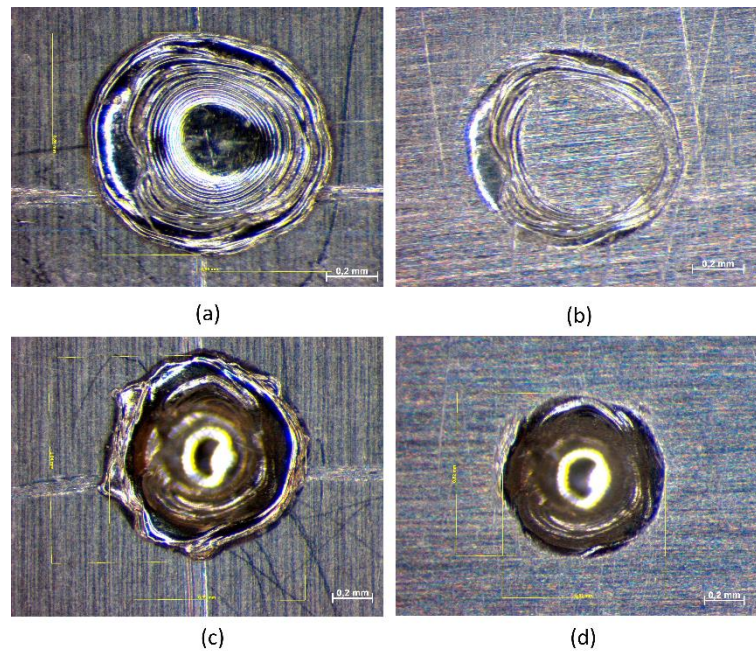
Figura 13 – Medição da área do furo



Fonte: Elaboração do próprio autor

Em seguida as medições os corpos de prova tiveram seus lados de disparo lixados para identificar quais disparos obtiveram alguma profundidade e quais apenas fundiram a superfície.

Figura 14 – Comparação antes e após lixamento, (a) e (b) 3 kW 1 ms com atmosfera protetora não obteve profundidade, (c) e (d) 7 kW 1 ms com atmosfera protetora

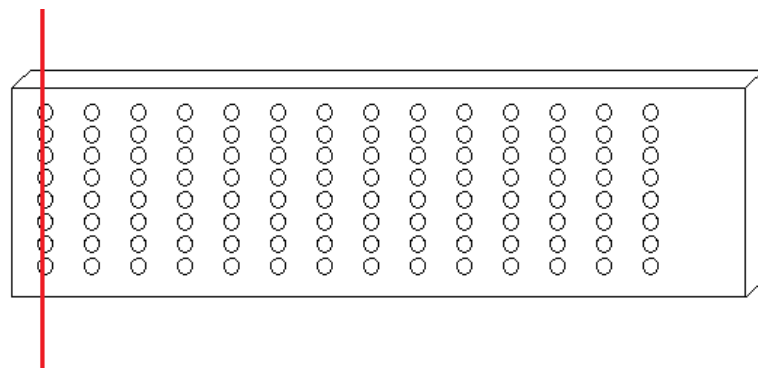


Fonte: Elaboração do próprio autor

A etapa seguinte é a medição dos novos diâmetros e áreas de entrada para termos as dimensões sem influência do metal expulso.

Para podermos analisar o perfil dos furos que efetivamente apresentaram profundidade os corpos de prova foram cortados na direção da espessura por um processo de eletroerosão a fio. Para não perdermos a parte central dos furos alinhou-se a fileira de furos com o fio da máquina e deslocou-se 0,25 mm.

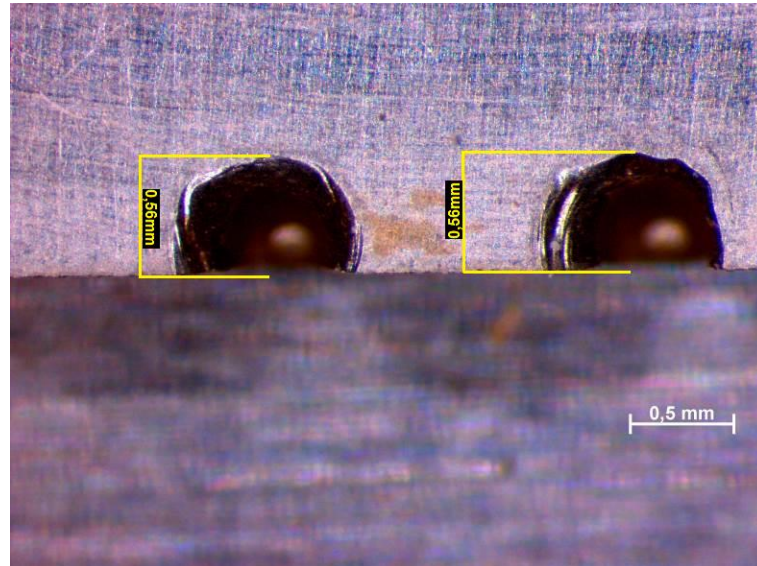
Figura 15 – Corte dos corpos de prova por eletroerosão a fio



Fonte: Elaboração do próprio autor

Mediu-se a distância entre a linha de corte e o quadrante superior do furo para determinar o quanto cada peça deveria ser lixada após o embutimento para atingirmos o centro do furo.

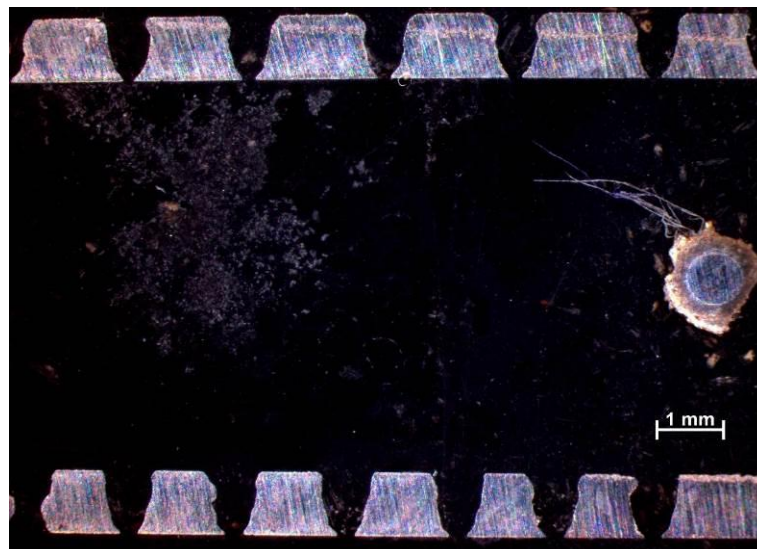
Figura 16 – Detalhe da medição



Fonte: Elaboração do próprio autor

Os corpos de prova foram embutidos em baquelite e lixados manualmente, tendo suas dimensões acompanhadas com o uso de um paquímetro para atingir a dimensão requerida.

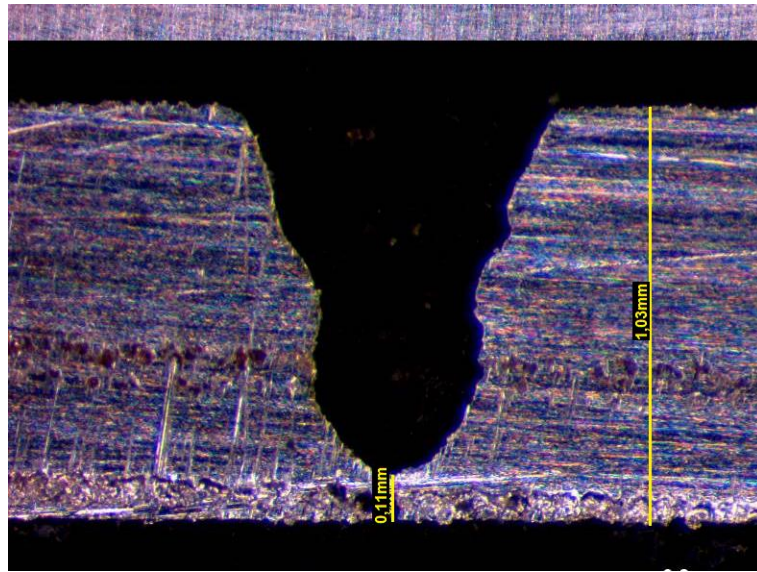
Figura 17 – Corpos de prova após embutimento e lixamento



Fonte: Elaboração do próprio autor

Com isso pode-se comparar os formatos e profundidades para cada condição.

Figura 18 – Medida de profundidade do furo



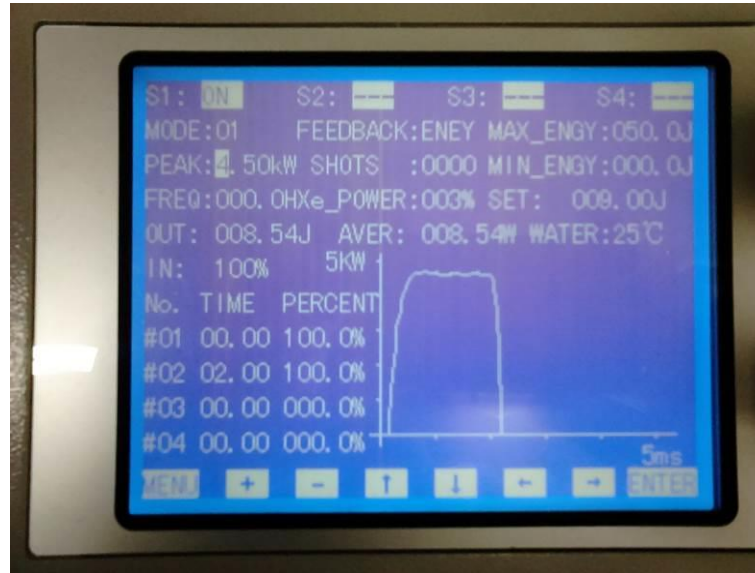
Fonte: Elaboração do próprio autor

Após a medição da profundidade as peças foram polidas e atacadas com o regente Vilella para podermos identificar a camada ressolidificada podendo assim medir sua espessura. Em seguida as amostras foram retiradas do embutimento de baquelite e observadas em um microscópio eletrônico de varredura para visualização da topologia dos furos e análise da composição química do metal base e do metal ressolidificado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 19 mostra o painel da unidade laser há a leitura da energia de saída de cada pulso onde vemos que difere da energia configurada.

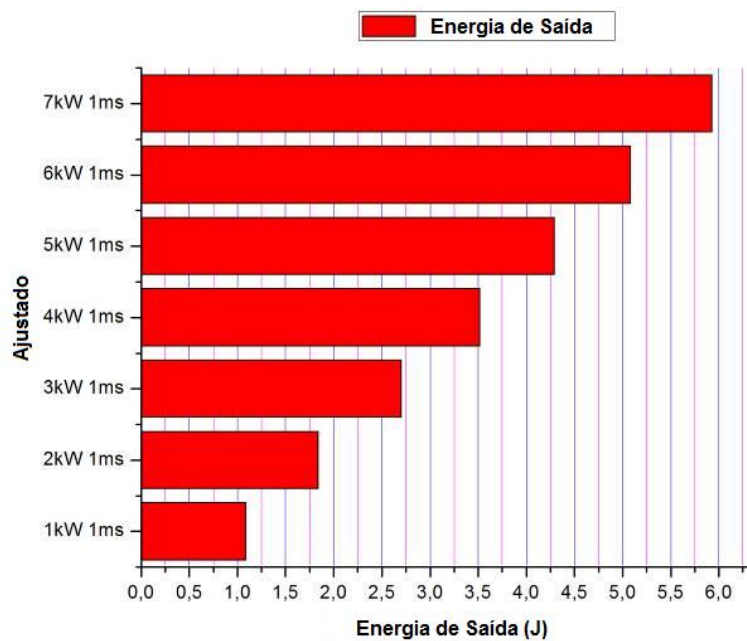
Figura 19 – Painel da unidade laser



Fonte: Elaboração do próprio autor

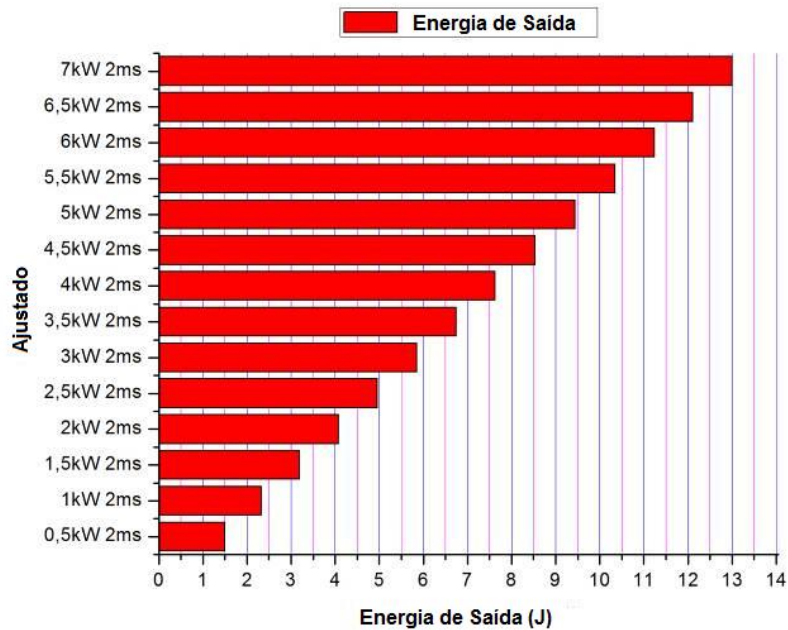
As Figuras 20 e 21 mostram os valores das energias de saída para 1 e 2 milissegundos.

Figura 20 – Energia medida para pulsos de 1ms



Fonte: Elaboração do próprio autor

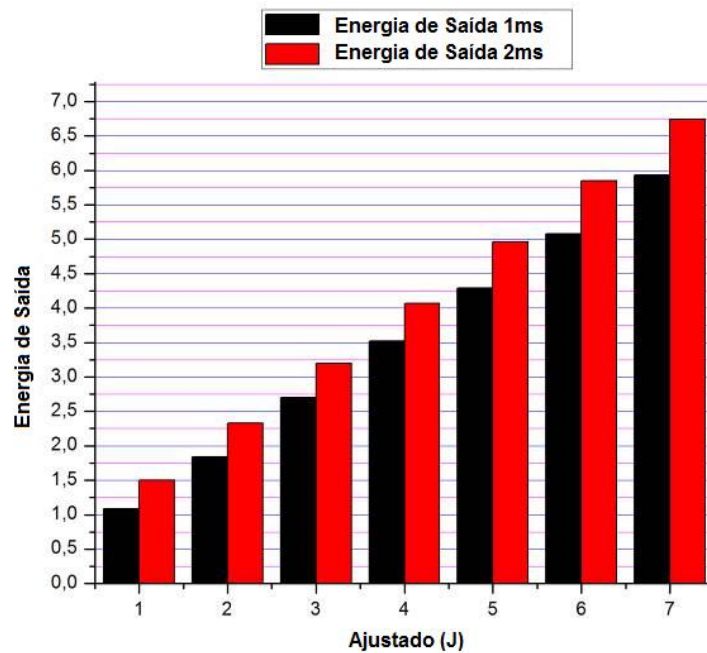
Figura 21 – Energia medida para pulsos de 2ms



Fonte: Elaboração do próprio autor

A figura a seguir compara as energias de saída para condições de 1 e 2 milissegundos.

Figura 22 – Comparação da energia de saída

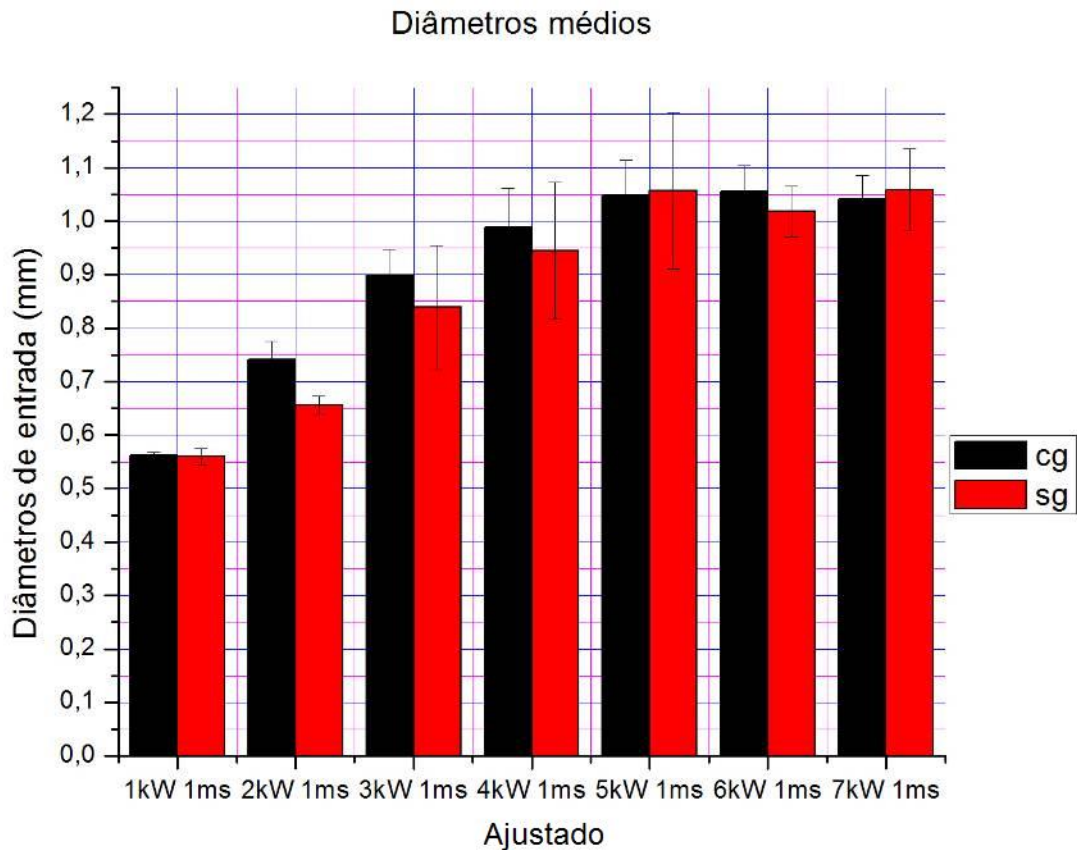


Fonte: Elaboração do próprio autor

Nota-se na Figura 22 que a energia de saída para largura temporal maior é sempre maior. O eixo das abscissas representa a energia configurada na fonte laser e o eixo das ordenas o valor medido pela própria fonte laser para a energia de saída.

A Figura 23 compara os diâmetros médios de entrada antes do lixamento para as condições com atmosfera protetora, cg, e sem atmosfera protetora, sg, para largura temporal de 1 milissegundo.

Figura 23 – Comparação de condições para 1ms

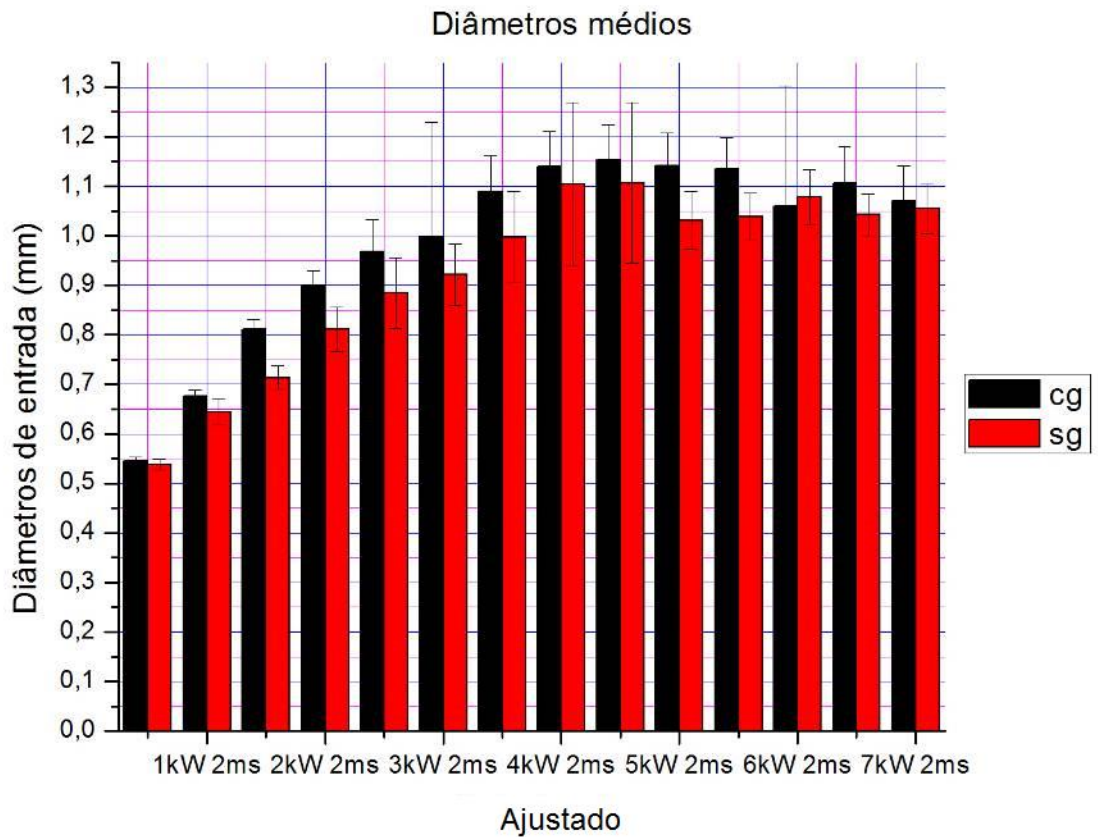


Fonte: Elaboração do próprio autor

Há uma predominância para que os diâmetros sejam maiores com o uso de atmosfera protetora, com uma largura temporal de 1 ms apenas nas condições de potência de pico de 5 e 7 kW sem atmosfera protetora os diâmetros são maiores do que com atmosfera protetora.

A Figura 24 mostra a mesma comparação para larguras temporais de 2 milissegundos.

Figura 24 – Comparação de condições para 2ms

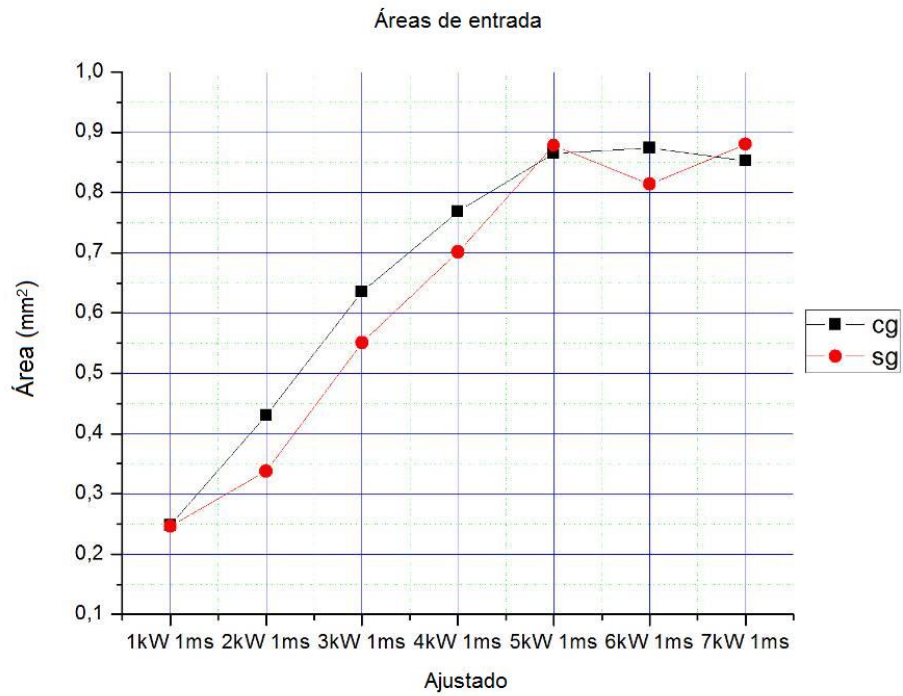


Fonte: Elaboração do próprio autor

Sendo mais característica esta predominância de maiores diâmetros como uso de argônio no processo com largura temporal de 2 ms, ocorrendo o inverso somente na condição de potência de pico de 6 kW obteve-se um diâmetro maior sem atmosfera protetora.

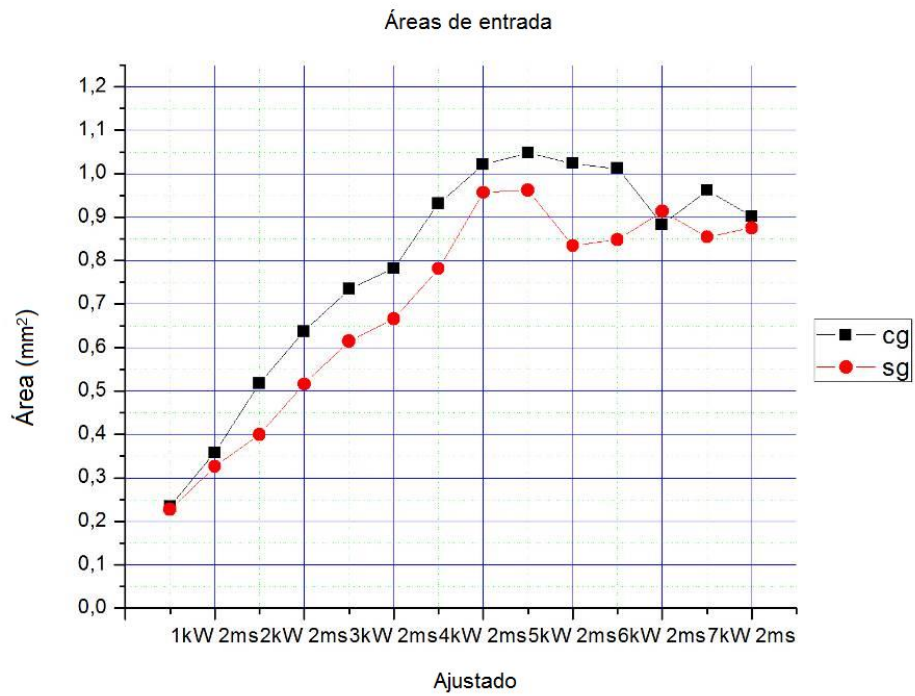
A partir da energia de saída medida e considerando-se áreas circulares calculadas usando o diâmetro médio temos a relação área e energia de pulso.

Figura 25 – Comportamento da área em relação a energia do pulso de 1ms



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 26 – Comportamento da área em relação a energia do pulso de 2ms

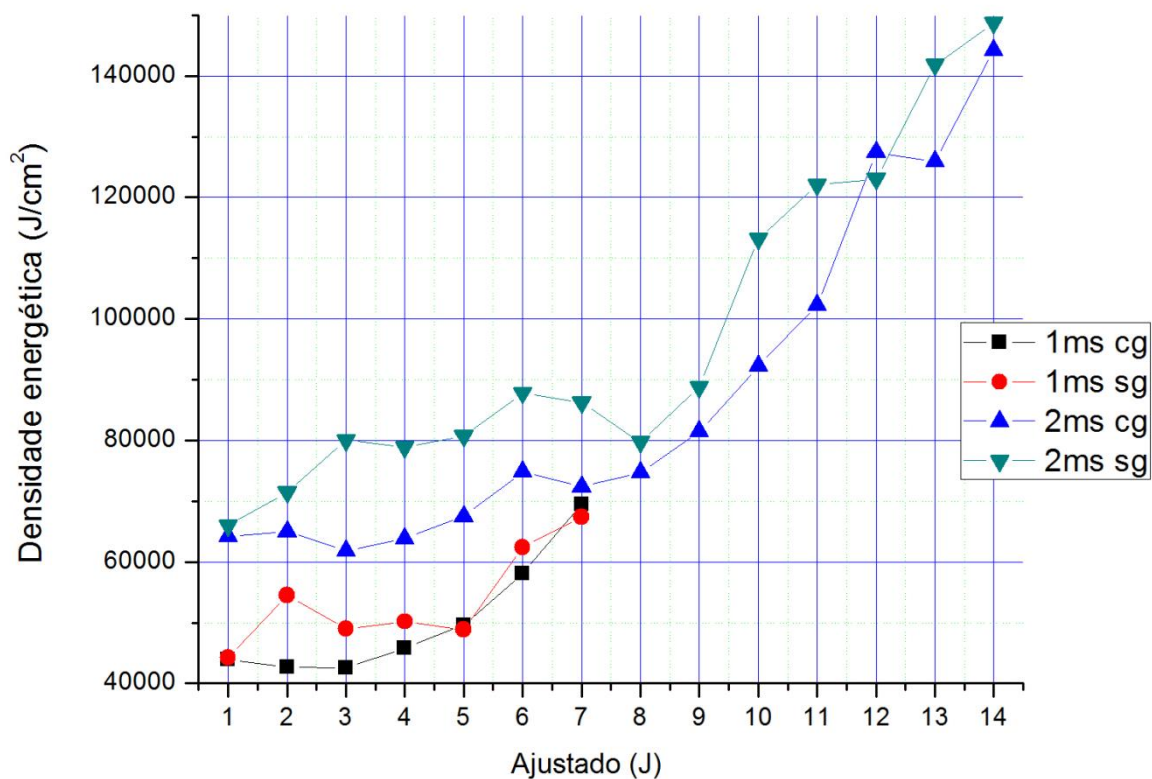


Fonte: Elaboração do próprio autor

Nota-se na Figura 25 que há um aumento da área com aumento da energia até aproximadamente 4,5J, o que foi mostrado no trabalho de TONGYU e GUOQUAN, 2008, após esse ponto ocorre uma inversão do fenômeno, na Figura 26 isso ocorre com 8,6J aproximadamente, RAJESH et al, 2015, em seu trabalho com aço inoxidável austenítico onde houve uma diminuição dos diâmetros de entrada com o aumento da corrente da lâmpada, ou seja, da energia do processo com consequente diminuição da área do furo.

A densidade energética do processo é observada a seguir.

Figura 27 – Densidade energética do processo

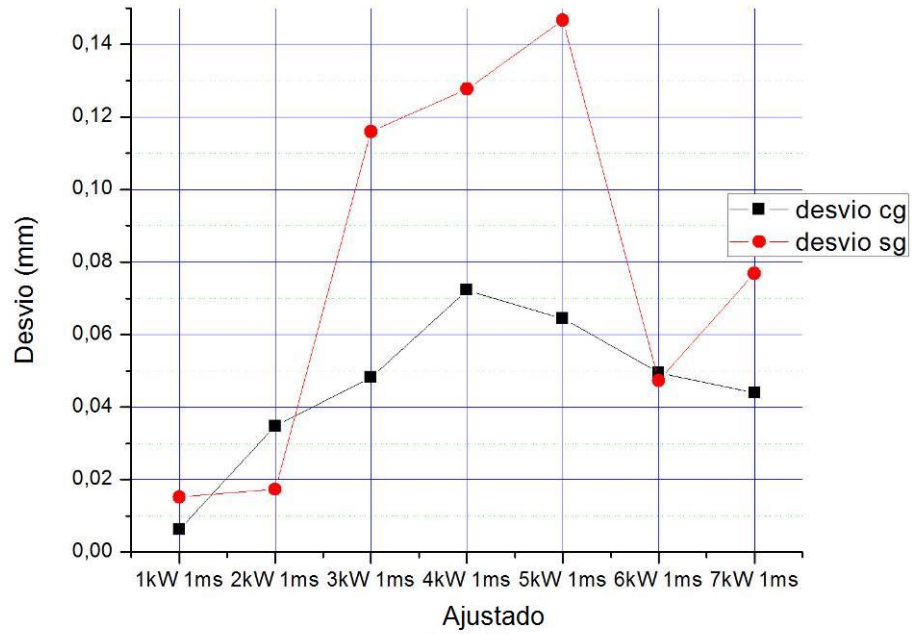


Fonte: Elaboração do próprio autor

As densidades com exceção de duas condições sempre se mostram maiores sem atmosfera protetora de argônio em relação ao processo com a presença da mesma. Os pulsos com largura temporal de 2ms mostram-se com densidades maiores, pois como mostrado na Figura 22 a energia real do processo a 2 ms é sempre maior do que a 1 ms quando configurada a mesma energia na máquina.

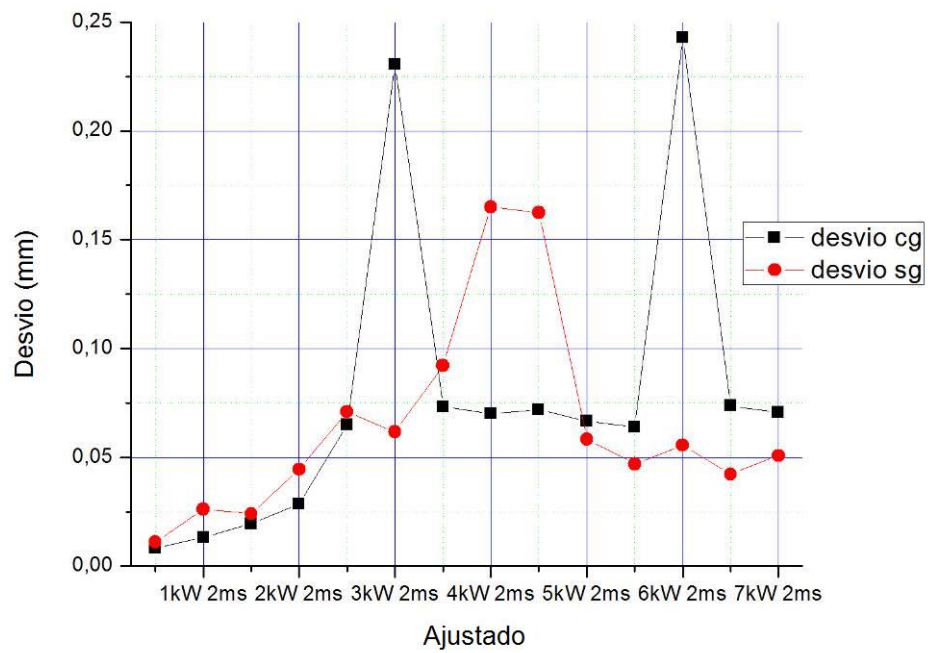
O desvio padrão dos diâmetros dos furos se mostram crescentes até uma determinada energia de processo, que se difere com a largura temporal.

Figura 28 – Desvio padrão para 1ms



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 29 – Desvio padrão para 2ms

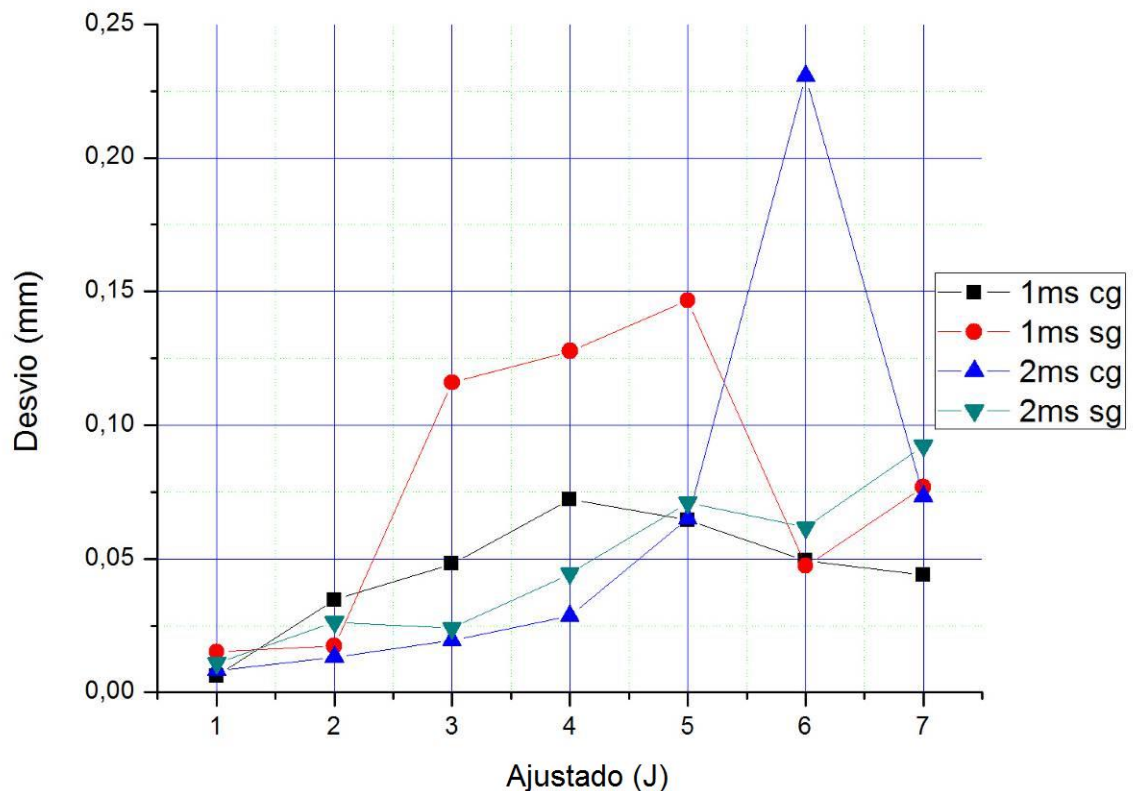


Fonte: Elaboração do próprio autor

A Figura 28 mostra que o desvio padrão tende a ser maior sem atmosfera protetora e é crescente até 5J onde começa a diminuir, na Figura 29 os desvios são crescentes até 9J, ponto onde os desvios sem atmosfera gasosa são maiores, a partir de 10J os desvios diminuem e há uma inversão do comportamento, os desvios com atmosfera protetora se mostram maiores.

Os desvios do trabalho de Tongyu e Guoquan (2008) em aço de alto carbono sempre aumentam com o aumento da energia do processo diferente do que ocorre o ANSI 316L onde o desvio apresentou um ápice e após uma redução, indicando uma melhor repetibilidade com o aumento da energia.

Figura 30 – Comparativo de desvios com base em largura temporal

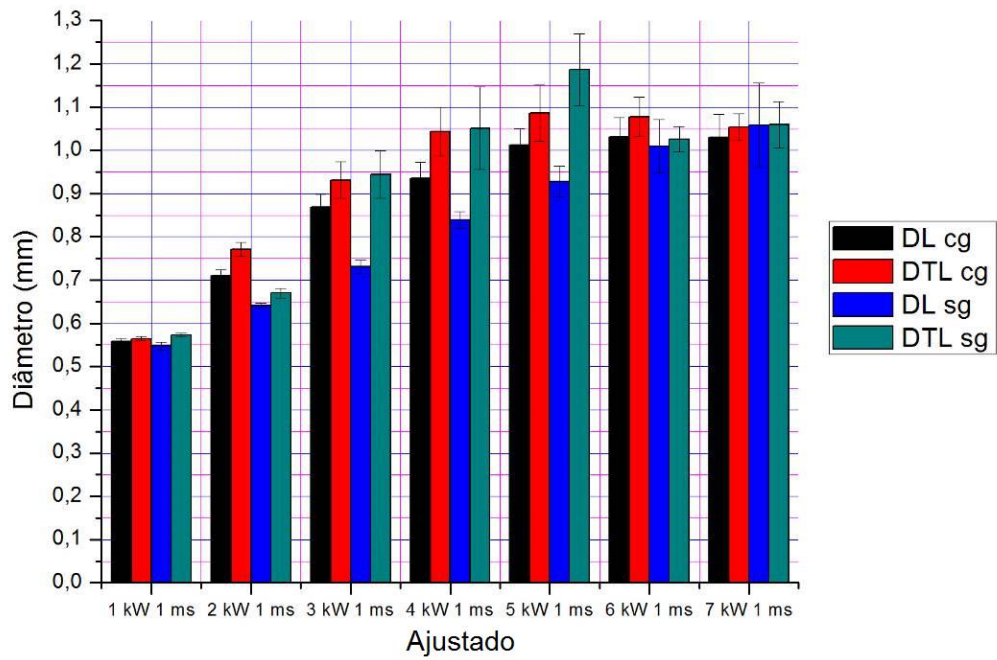


Fonte: Elaboração do próprio autor

Os processos com larguras temporais maiores tendem a ter repetibilidade maior, ou seja, desvios padrões menores, mas tempos menores com energias de pico maiores tem retorno desse repetibilidade ficando até melhor como mostra a Figura 30.

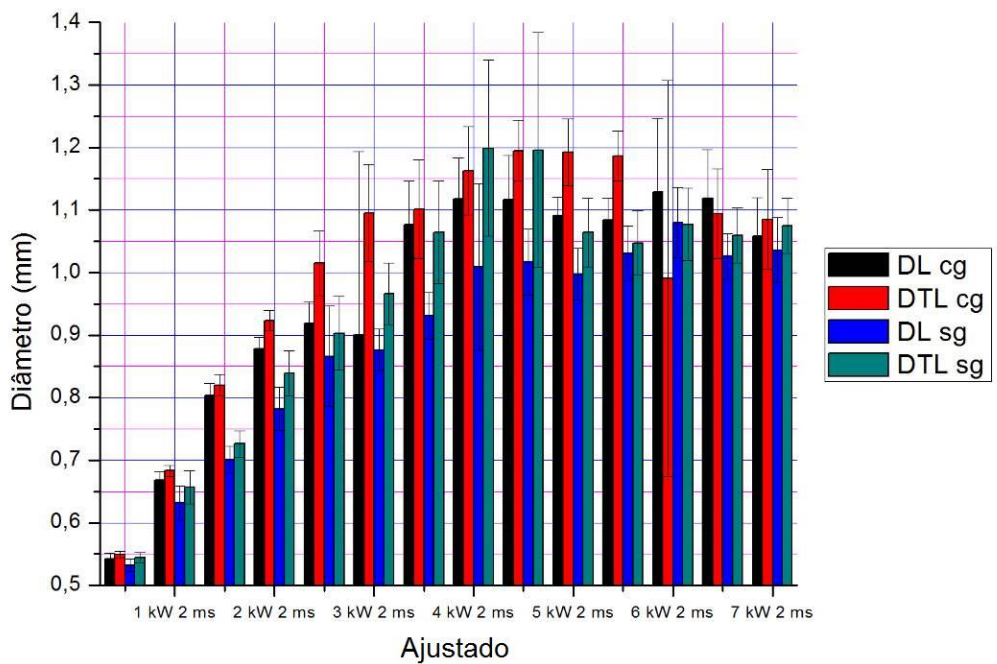
Note ainda que houve diferença nos diâmetros na direção de laminação e na direção transversal a laminação como mostram as Figuras 31, 32 e 33.

Figura 31 – Comparativos de diâmetros na direção e transversal a laminação 1ms



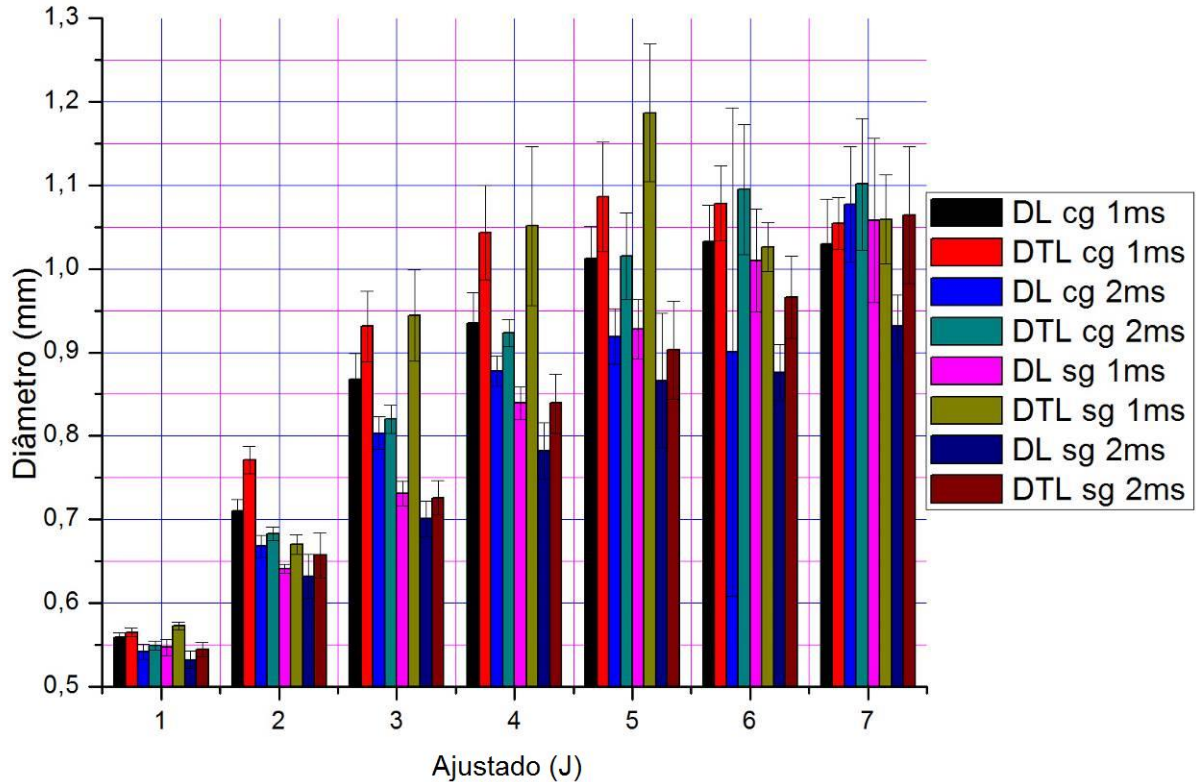
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 32 – Comparativos de diâmetros na direção e transversal a laminação 2ms



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 33 – Comparativo com larguras temporais diferentes



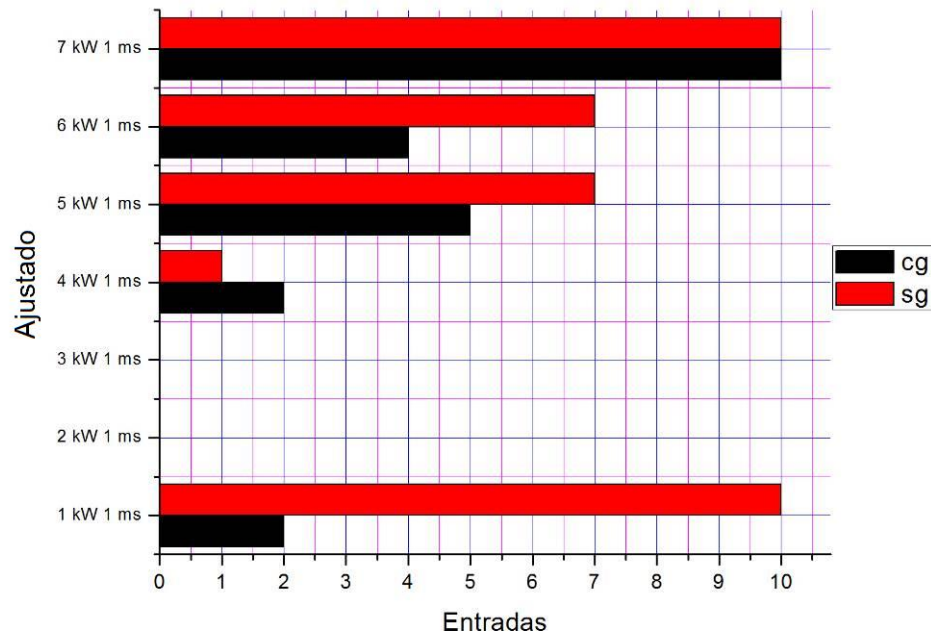
Fonte: Elaboração do próprio autor

Nota-se que com exceção da condição de 6kW 2ms sempre o diâmetro na direção transversal a laminação foi maior que na direção de laminação, fenômeno semelhante ao observado por Rodden et al. (2012), em compósitos de fibra de carbono onde os diâmetros apresentavam-se maiores na direção da fibra.

Além disso a diferença dos diâmetros, ou a perda circularidade aumenta com o aumento da energia do processo o que já havia sido demonstrado por BISWAS et al, 2010, em seu estudo.

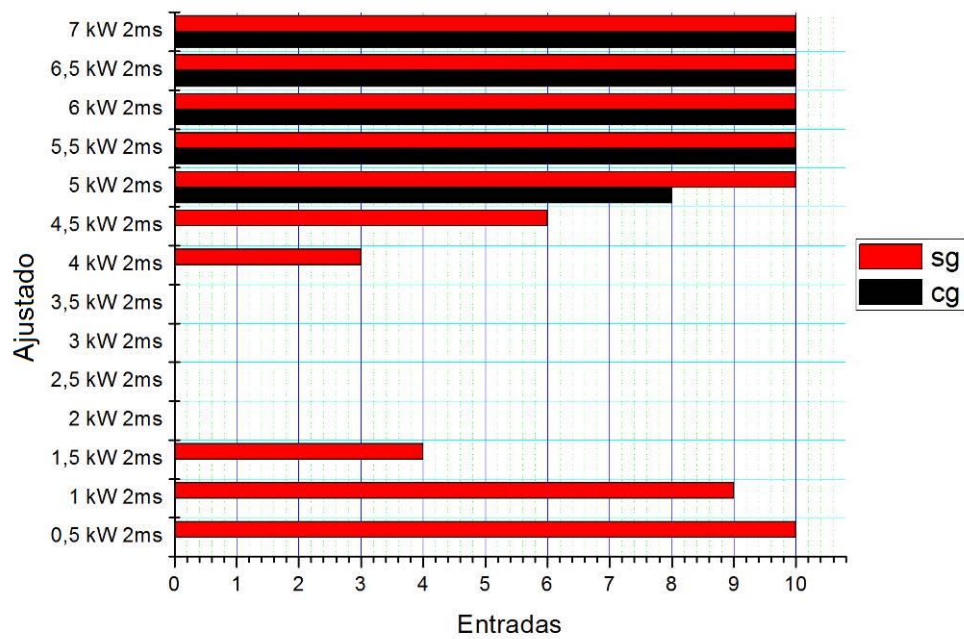
Após o lixamento da superfície de entrada temos as combinações que produziram furos, considerando furos os que não apresentavam material no centro, como exemplificado na Figura 14.

Figura 34 – Quantidade de furos para 1ms



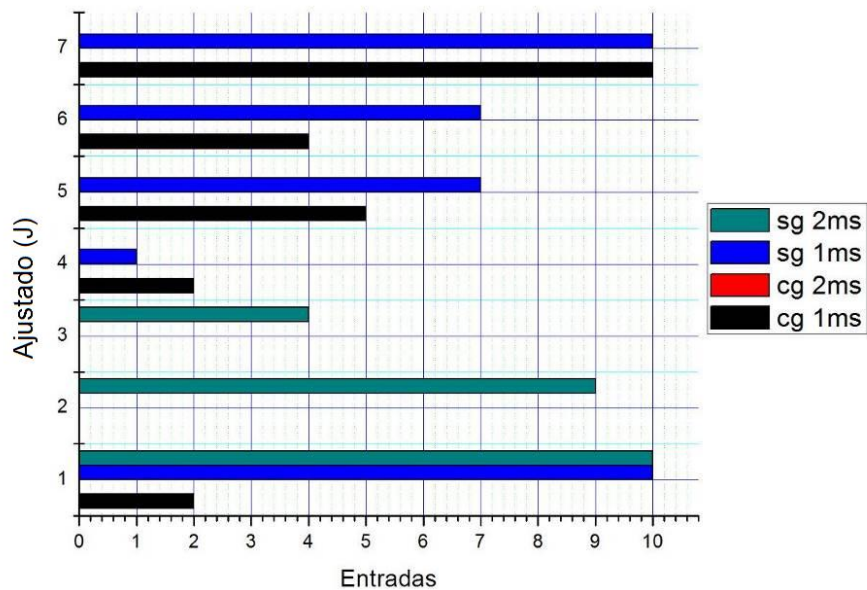
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 35 – Quantidade de furos para 1ms



Fonte: Elaboração do próprio autor

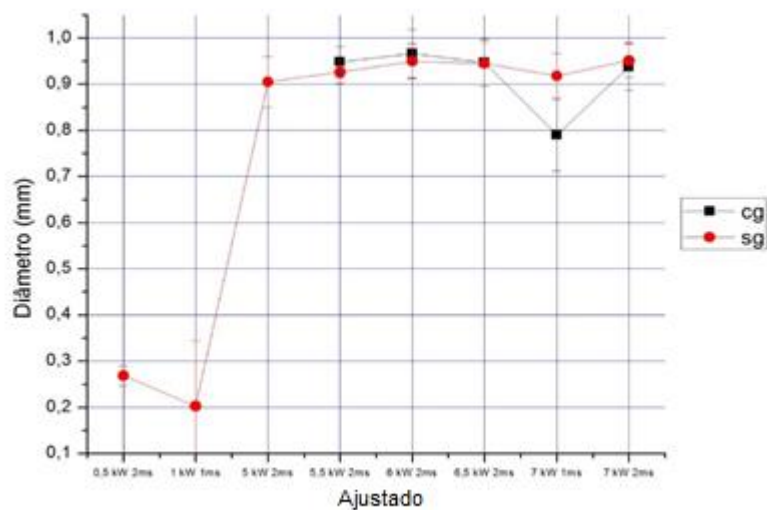
Figura 36 – Comparativo entre 1ms e 2ms



Fonte: Elaboração do próprio autor

Nota-se nas Figuras 34, 35 e 36 que na condição sem atmosfera protetora obteve-se uma maior quantidade de furos por condições com exceção de apenas uma, 4kW 1ms, considerando apenas as configurações que produziram dez furos obtiveram-se os diâmetros médios do processo após lixamento. Nota-se na Figura 37 que o diâmetro de entrada se estabiliza em torno de 0,95mm a partir de 5,5kW 2ms indicando que a partir deste ponto devemos ter um aprofundamento dos furos.

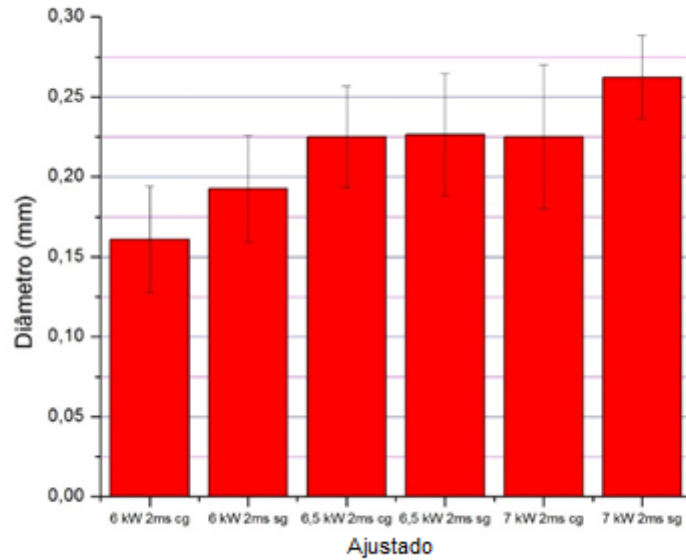
Figura 37 – Diâmetros médios



Fonte: Elaboração do próprio autor

Quando verificamos as saídas dos furos vemos que apenas seis condições alcançaram 1mm de profundidade, sendo que o ajuste de 6 kW 2ms cg só obteve cinco perfurações completas, e que o diâmetro de saída aumenta com a quantidade da energia do processo, exatamente o contrário do que foi mostrado por RAJESH et al, 2015, onde o diâmetro de saída diminuiu com o aumento da energia, e que processos sem atmosfera protetora apresentam diâmetros de saída maiores.

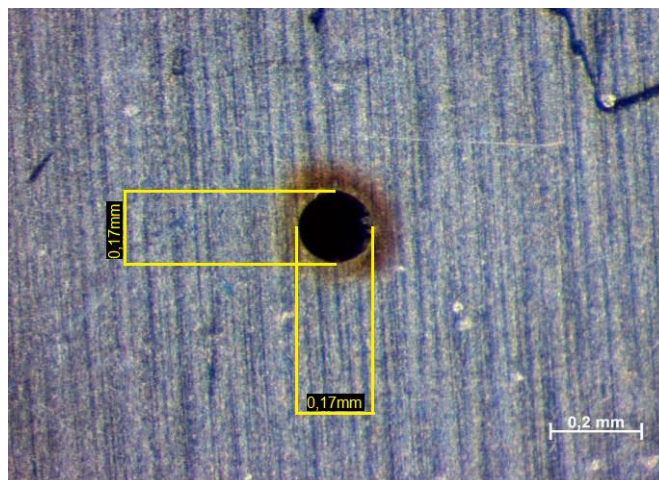
Figura 38 – Diâmetros de saída



Fonte: Elaboração do próprio autor

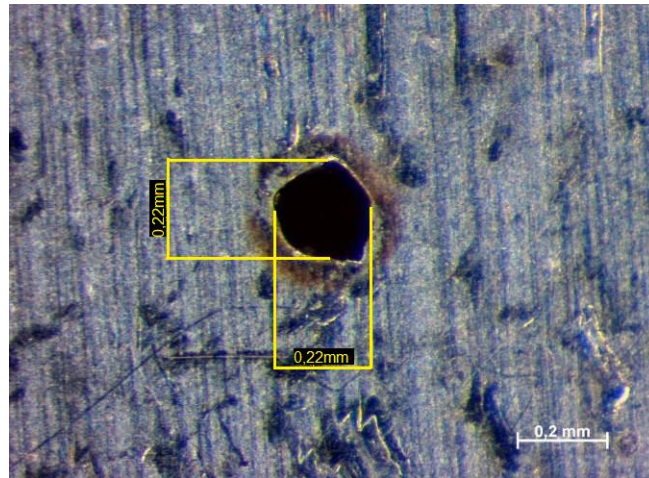
Com o aumento da energia de processo a saída do furo vai perdendo seu formato circular e começa a ter expulsão de material fundido na saída.

Figura 39 – Saída 6kW 2ms cg



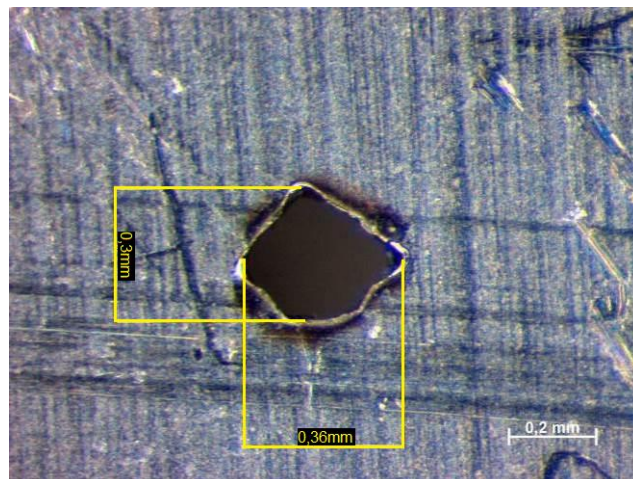
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 40 – Saída 6,5kW 2ms cg



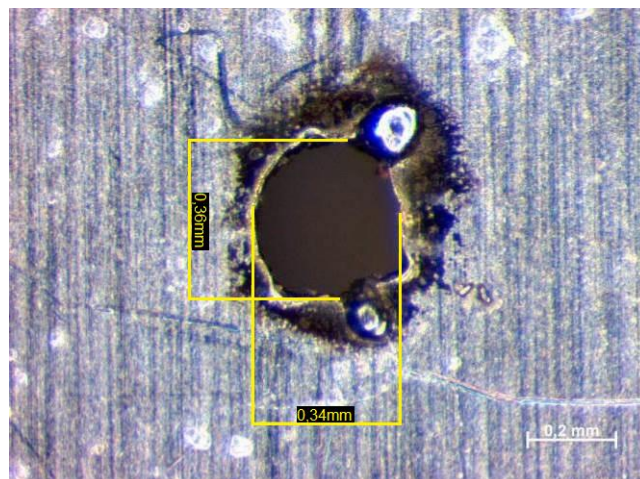
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 41 – Saída 7kW 2ms cg



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 42 – Saída 7kW 2ms sg

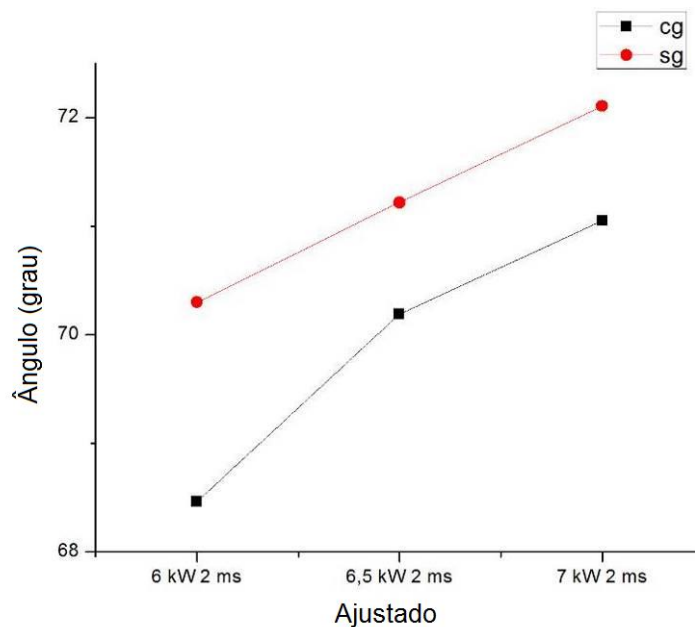


Fonte: Elaboração do próprio autor

A Figura 42 mostra que a expulsão de metal é maior em processos sem atmosfera protetora, o que pode ser inconveniente quando a superfície de saída não pode ser retrabalhada como em bicos aspersores e tubulações.

A conicidade foi calculada a partir dos diâmetros de entrada e saída e da espessura da chapa, quanto mais próximo de 90 graus menos cônico é o furo, quanto mais próximo de zero mais cônico é o furo, a Figura 43 mostra a conicidade obtida em cada condição que produziu furos passantes.

Figura 43 – Conicidade

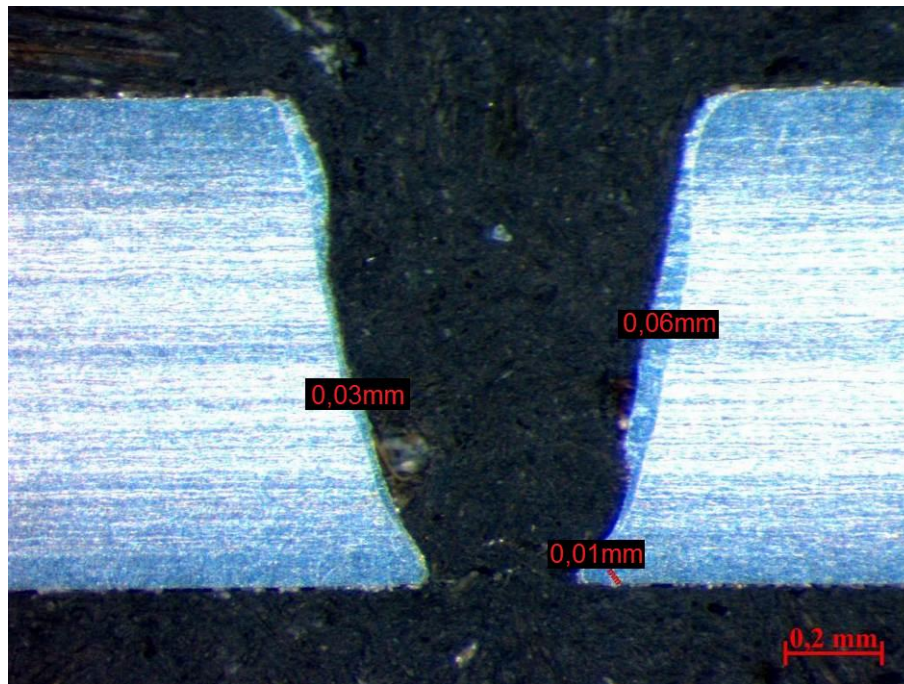


Fonte: Elaboração do próprio autor

Vemos que com o aumento da energia do processo a conicidade diminui, pois, os diâmetros de saída aumentam como visto na Figura 38, enquanto os diâmetros de entrada se estabilizam como mostrado na Figura 37, portanto a conicidade só reduziu porque o diâmetro de saída aumentou o que não é desejável quando se produz microfuros.

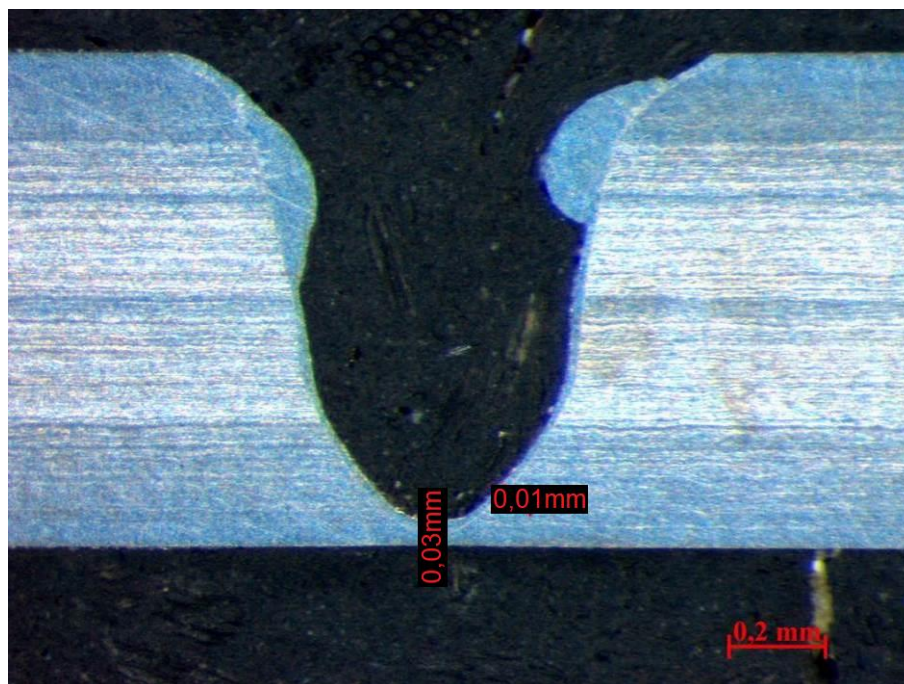
Ao analisarmos os perfis dos furos após serem expostos ao reagente Vilella pudemos identificar o material ressolidificado e medir sua espessura, notamos um comportamento semelhante em todas as condições apresentando uma espessura próxima a zero na saída dos furos passantes e aumentando sua espessura ao aproximar da entrada chegando a 0,06 mm que está apresentada na Figura 44. Nos furos que não passantes a camada ressolidificada apresentou uma espessura de 0,03 mm na parte mais baixa reduzindo rapidamente para 0,01 mm e aumentando sua espessura novamente na direção da entrada do furo como podemos ver na Figura 45.

Figura 44 – Perfil de furo passante após ataque químico



Fonte: Elaboração do próprio autor

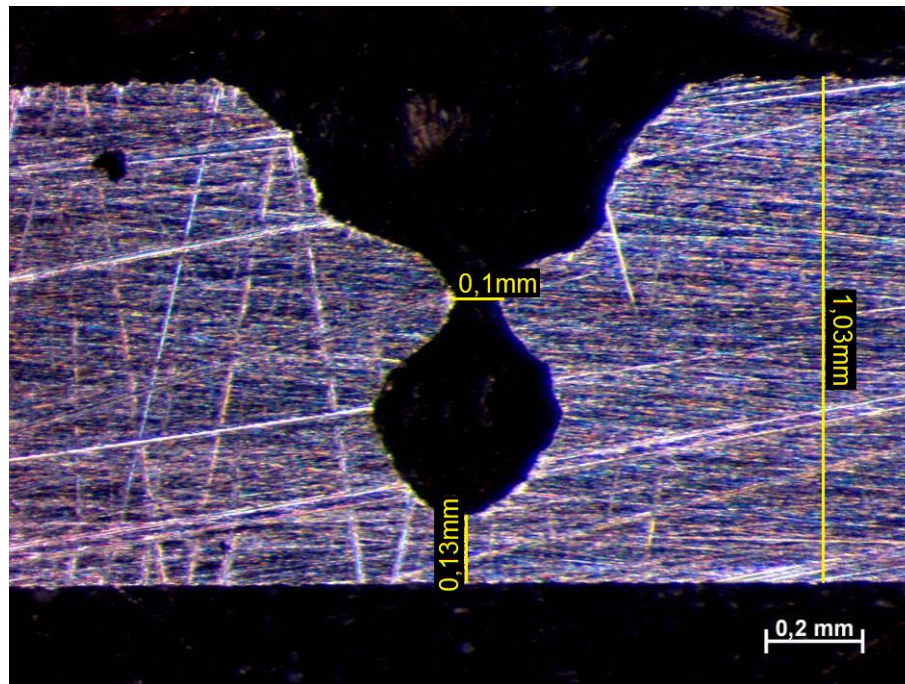
Figura 45 – Perfil de furo “cego” após ataque químico



Fonte: Elaboração do próprio autor

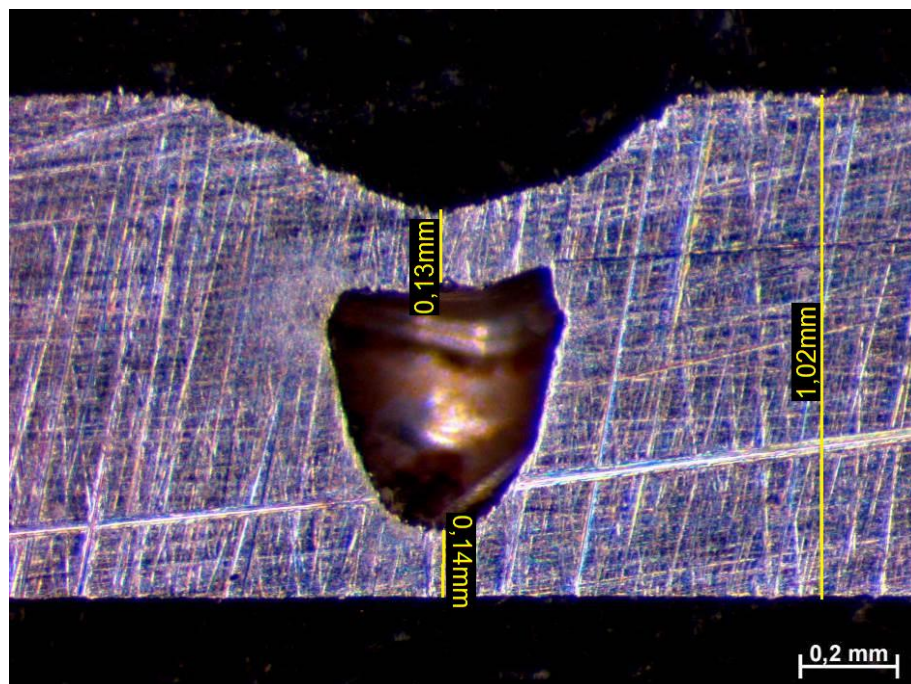
Ao observarmos os perfis dos furos identificamos um empescoçamento, que é uma redução do diâmetro do furo aproximadamente na sua altura média ou mesmo o fechamento completo do furo nessa altura demonstrado nas Figuras 46 e 47.

Figura 46 – Empescoçamento do furo



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 47 – Fechamento total do furo

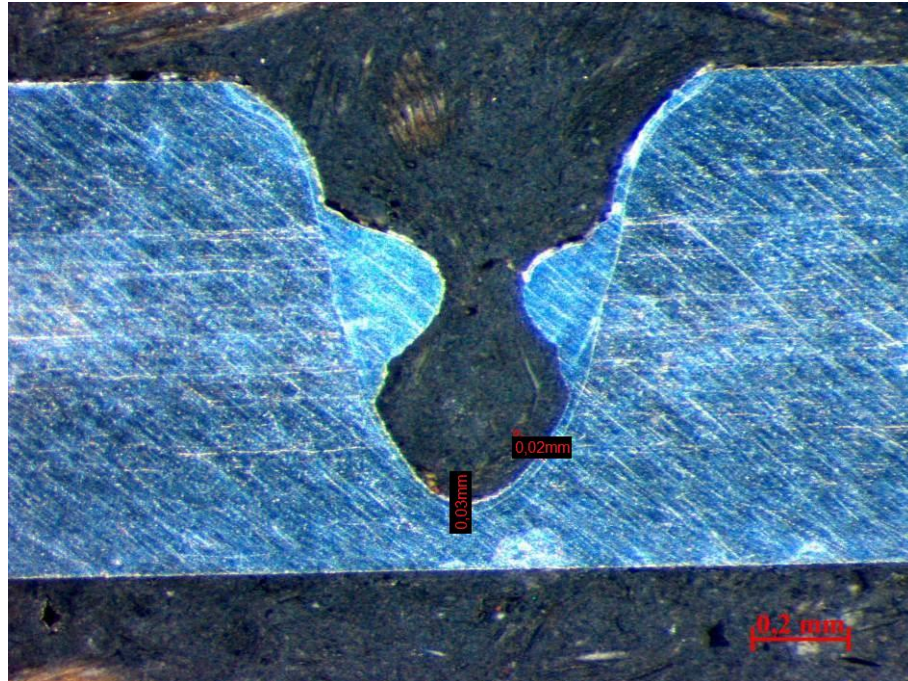


Fonte: Elaboração do próprio autor

Depois das amostras serem atacadas com Vilella podemos ver que o empescoçamento e o fechamento total dos furos é causado pelo material ressolidificado no processo, acredita-se que a vaporização/sublimação do material ocorra na região mais profunda do furo causando uma grande expansão do material expulsando a parte fundida que retorna para o furo e ressolidificando próximo a

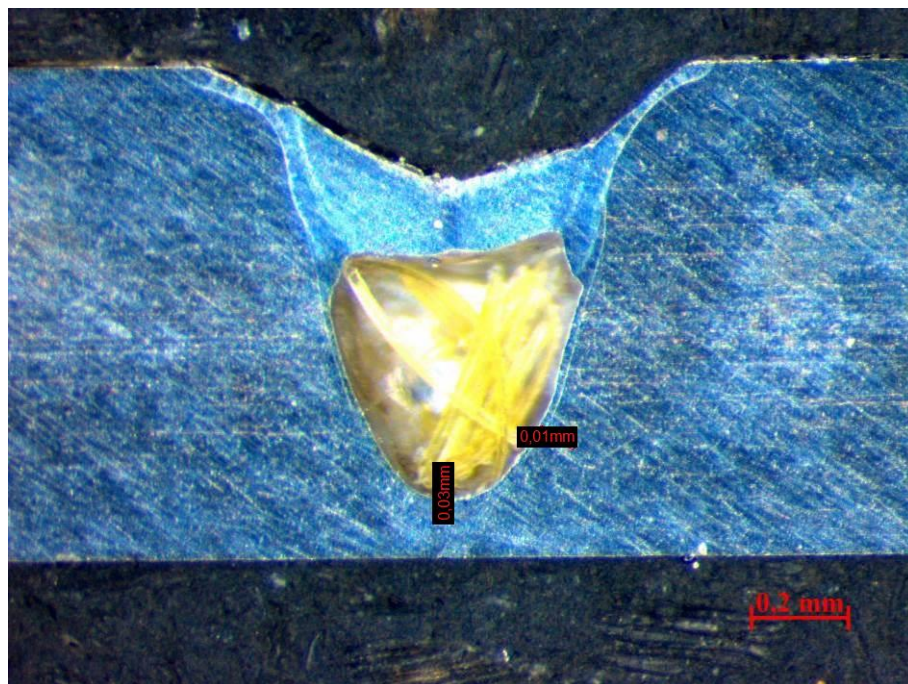
entrada, o que explica o empescoçamento e a maior espessura do material ressolidificado na entrada do furo, as Figuras 48 e 49 mostram esse efeito.

Figura 48 – Empescoçamento após ataque



Fonte: Elaboração do próprio autor

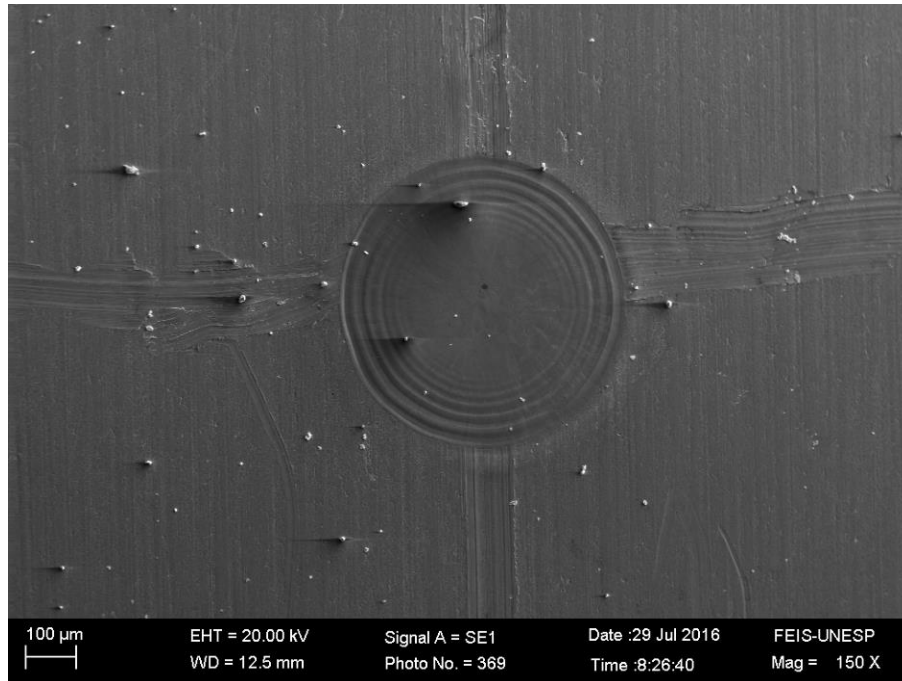
Figura 49 – Fechamento após ataque



Fonte: Elaboração do próprio autor

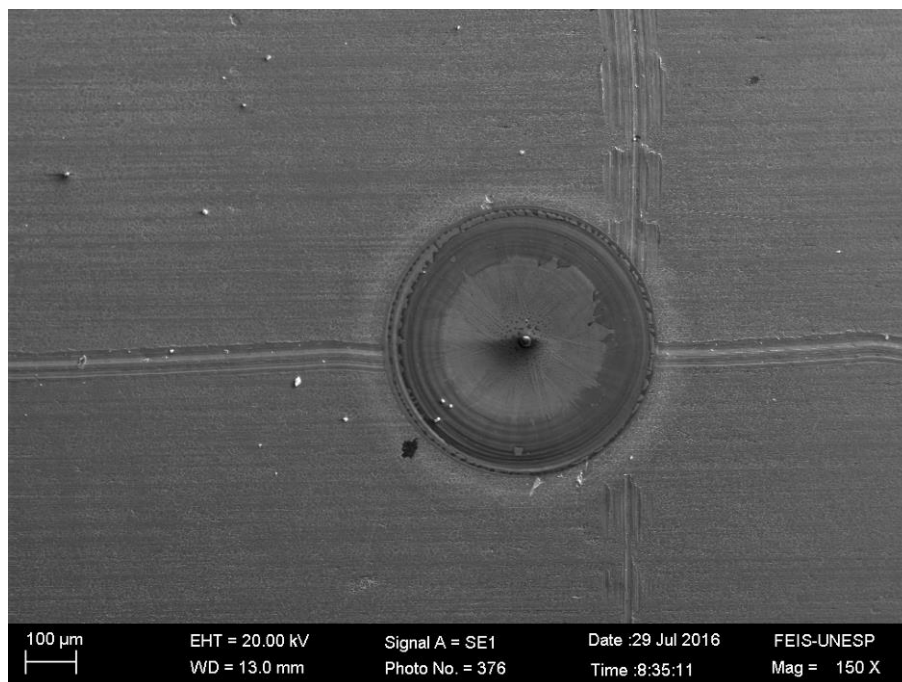
Com o uso do MEV podemos observar melhor os efeitos da variação de largura temporal e uso ou não de atmosfera protetora, vemos na Figura 50 que a marca deixada pelo pulso com atmosfera protetora apresenta relevo mais suave do que o pulso sem atmosfera protetora apresentada na Figura 51 que apresenta no centro o que aparenta ser o início da expulsão de fundido.

Figura 50 – Superfície após pulso de 1kW 1ms cg



Fonte: Elaboração do próprio autor

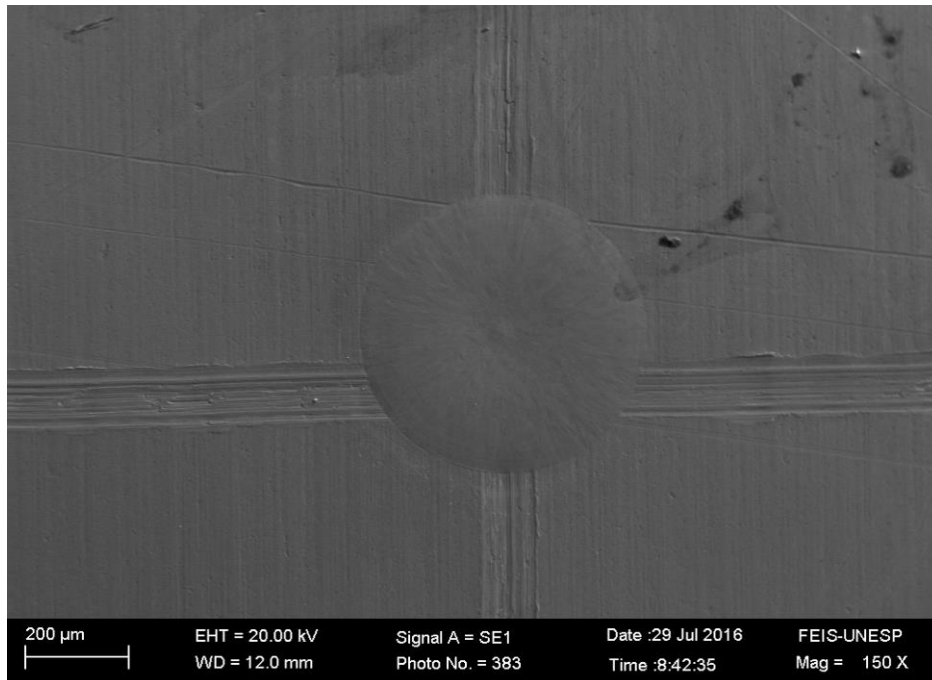
Figura 51 – Superfície após pulso de 1kW 1ms sg



Fonte: Elaboração do próprio autor

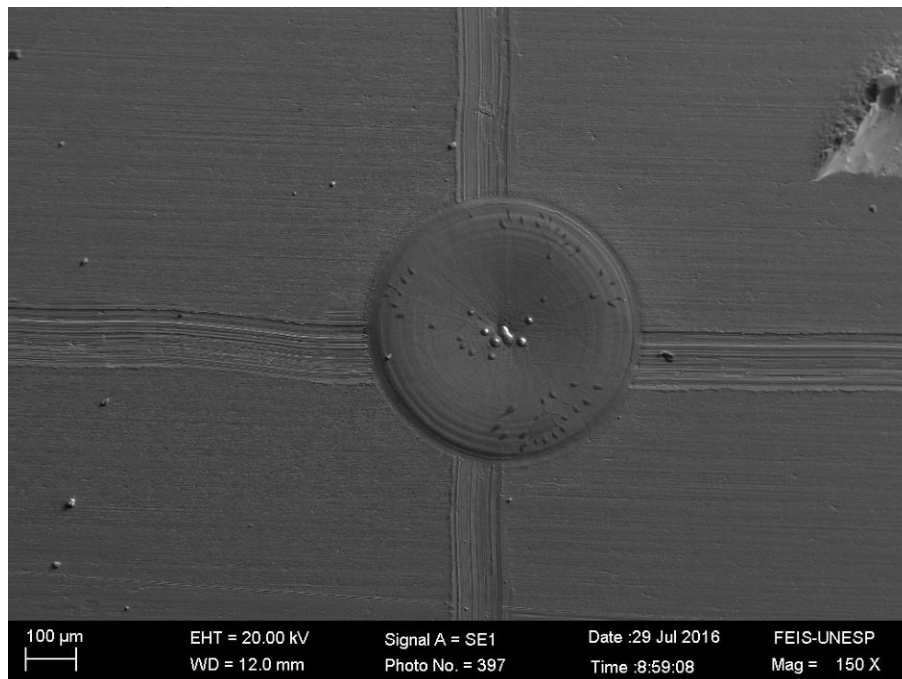
As Figuras 52 e 53 nos mostram que ao aumentarmos a largura temporal, mas mantendo a mesma energia do processo, os pulsos causaram menos efeito na superfície mantendo o mesmo comportamento com relação à atmosfera protetora.

Figura 52 – Superfície após pulso de 0,5kW 2ms cg



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 53 – Superfície após pulso de 0,5kW 2ms sg

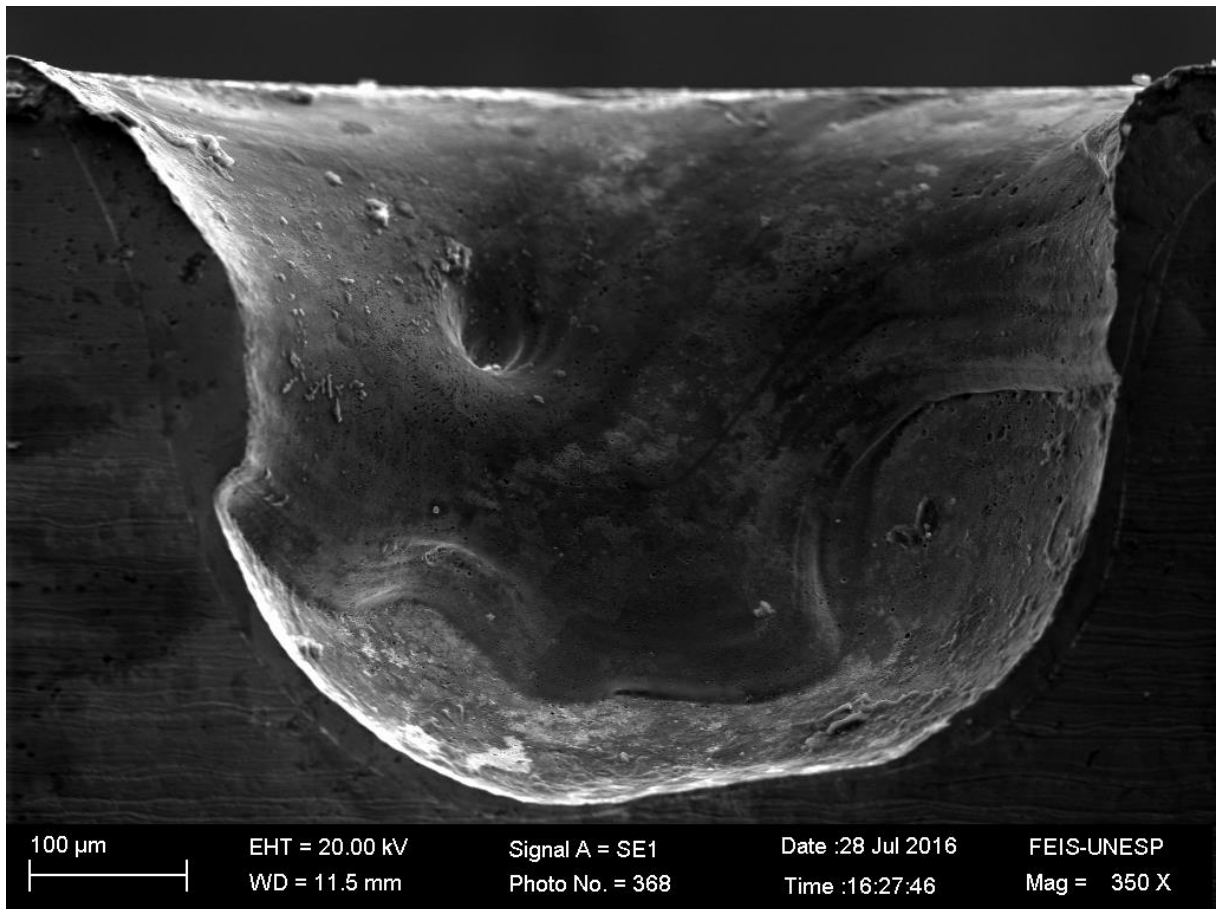


Fonte: Elaboração do próprio autor

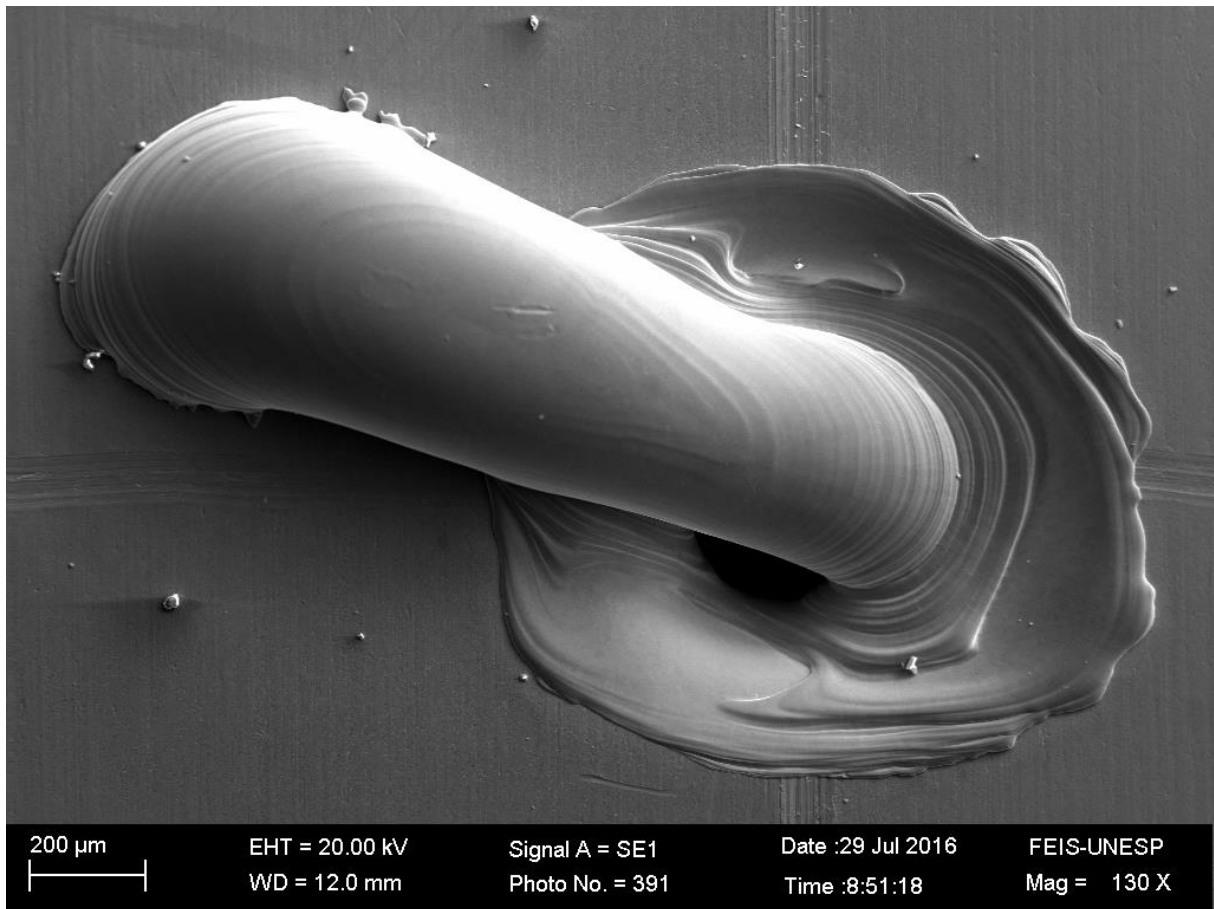
As imagens do MEV dos perfis nos furos nos mostram que baixa rugosidade não é algo que pode ser esperado no processo de micro furação a laser a Figura 54

exibe mudanças muito grande no relevo do furo indicando uma rugosidade alta no interior no furo, além disso podemos ver marcas de escoamento de material da região da entrada do furo para o fundo reforçando a ideia que a vaporização/sublimação ocorre abaixo da superfície expulsando o material e parte retorna para o interior do furo fazendo com que a espessura do material ressolidificado seja maior na entrada do furo e reduzindo em direção à saída. A Figura 55 ratifica essa ideia pois mostra o material expulso com ondas de escoamento em direção a parte interna do furo.

Figura 54 – Perfil do furo



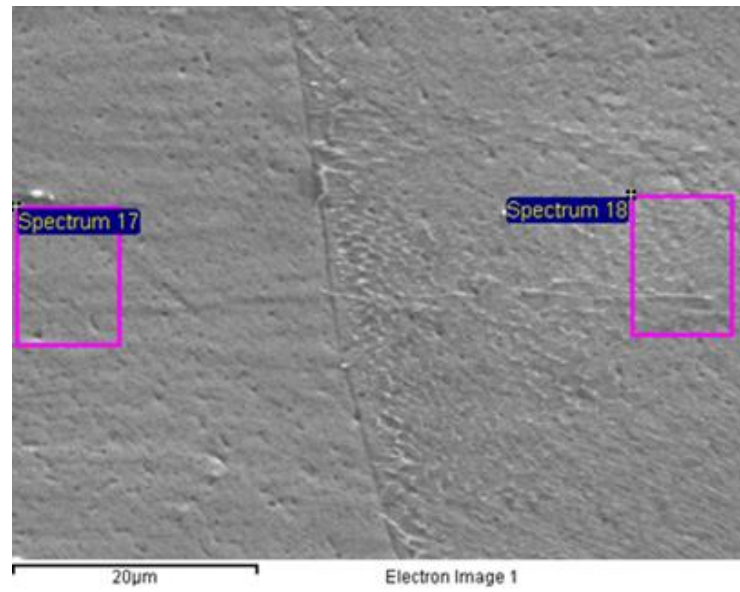
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 55 – Material expulso no processo

Fonte: Elaboração do próprio autor

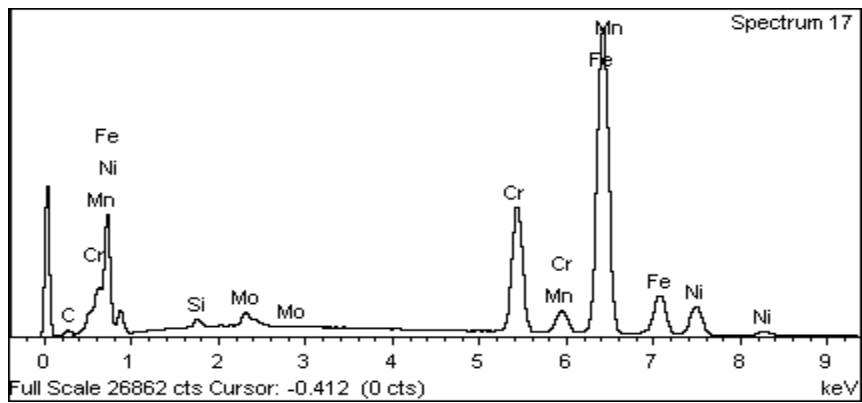
Realizando uma análise química pelo método EDS no metal base e na região ressolidificada observou-se que não houve variação dos elementos além das variações inerentes da liga em pontos distintos. A Figura 56 mostra as regiões onde foram realizadas as análises, as Figuras 57 e 58 mostram os resultados da espectrografia de forma gráfica e as Tabelas 5 e 6 os quantitativos de cada elemento. A análise apresenta quantidades de carbono muito mais elevadas do que a literatura indica, isso justifica-se pelo fato da amostra ter sido previamente embutida e depois retirada e ainda a amostra pode ter sido contaminada com material orgânico ao ser manuseada pelo operador. Todas as condições testadas neste estudo apresentaram resultados semelhantes.

Figura 56 – Regiões analisadas



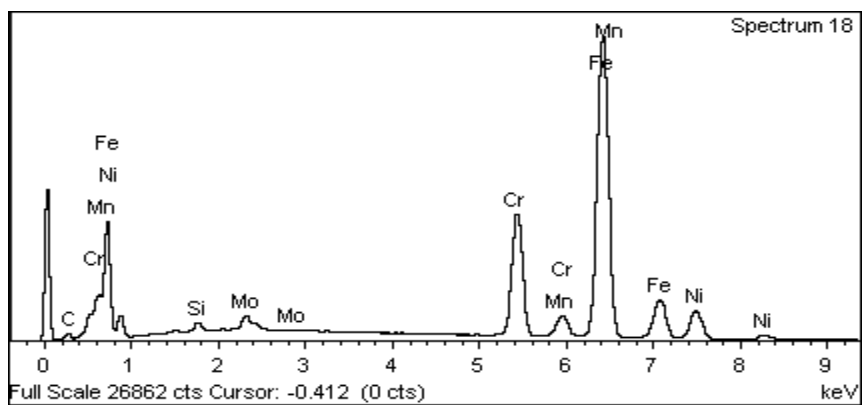
Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 57 – Espectrografia do metal base



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 58 – Espectrografia do metal ressolidificado



Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 5 – Espectrografia do metal base

Elemento	Massa%	Atômico%
C	2.90	12.15
Si	0.60	1.08
Cr	16.85	16.30
Mn	1.33	1.22
Fe	66.32	59.74
Ni	9.69	8.31
Mo	2.30	1.21
Totais	100.00	

Fonte: Elaboração do próprio autor

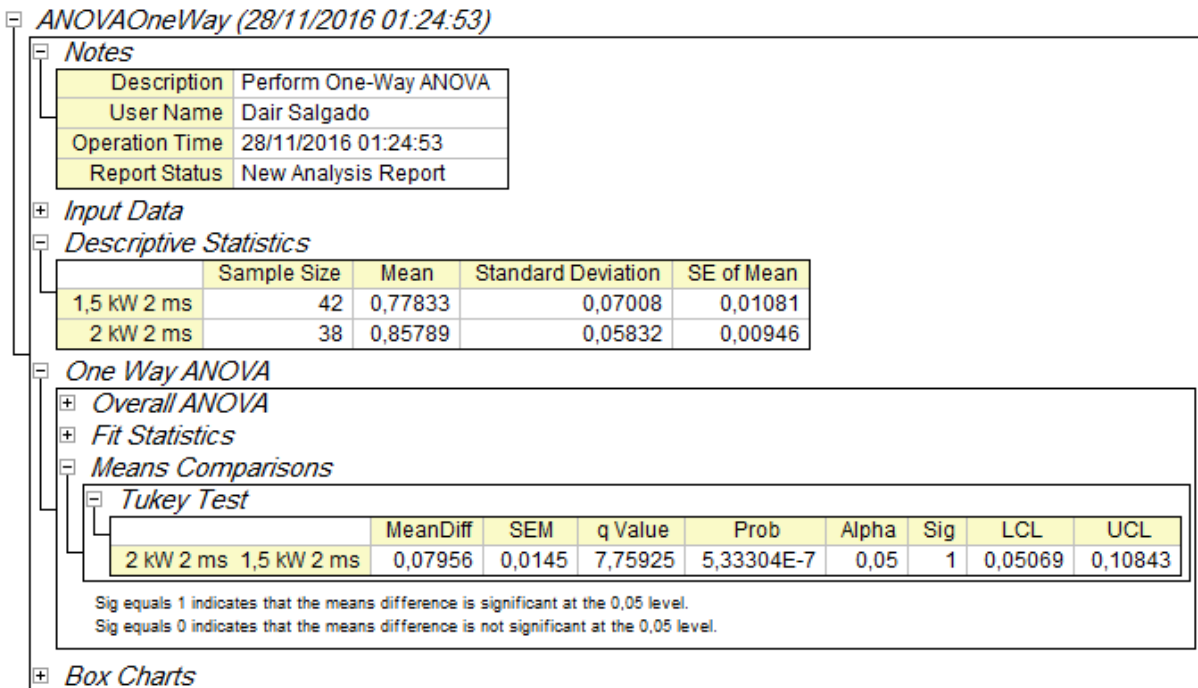
Tabela 6 – Espectrografia do metal ressolidificado

Elemento	Massa%	Atômico%
C	2.44	10.38
Si	0.57	1.04
Cr	16.92	16.62
Mn	1.41	1.31
Fe	66.68	60.95
Ni	9.87	8.58
Mo	2.10	1.12
Totais	100.00	

Fonte: Elaboração do próprio autor

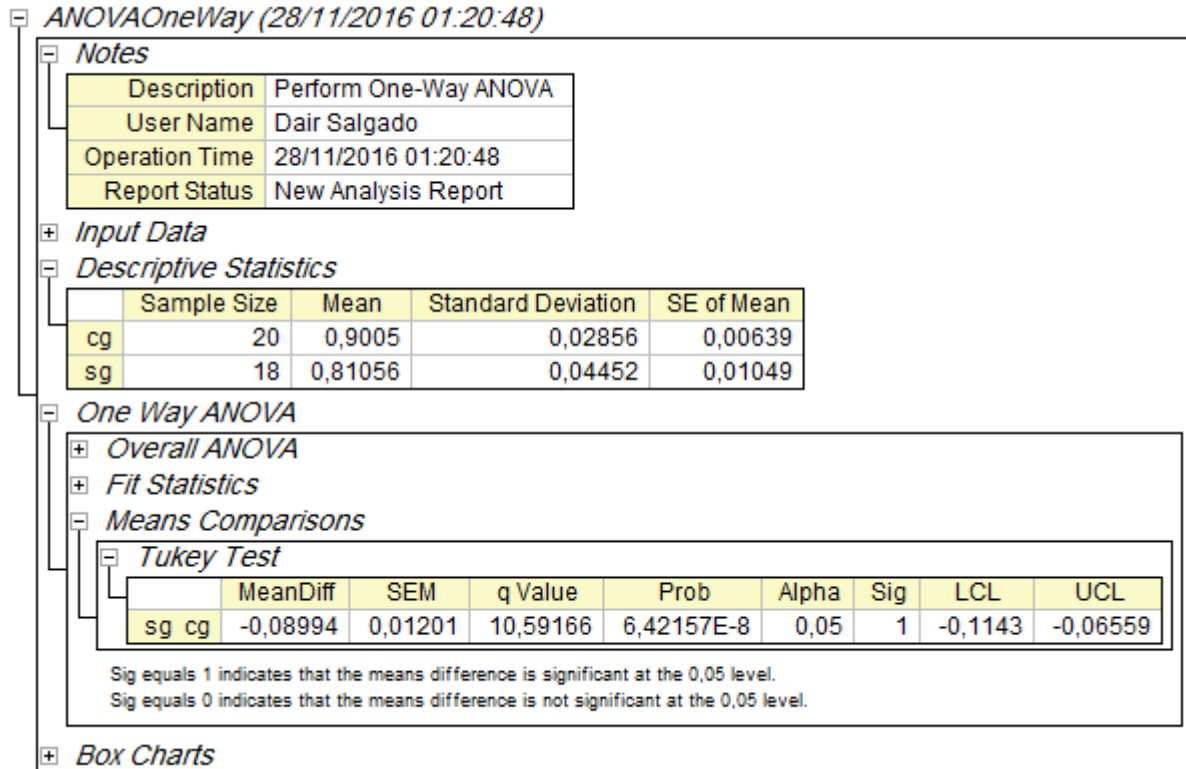
As Figuras 59 e 60 mostram análises de variância da potência de pico e de uso de atmosfera protetora, ambos mostraram diferenças significativas nas médias o que indica que variações na potência de pico são causa na variação dos diâmetros como esperado, mas também mostram que a utilização de atmosfera protetora tem influência no processo de microfuração.

Figura 59 – Análise de variância de potência de pico



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 60 – Análise de variância de atmosfera protetora



Fonte: Elaboração do próprio autor

6 CONCLUSÃO

O laser Nd:YAG na condição pulsado pode ser utilizado para obter microfuros em chapas de AISI 316L com espessura de 1mm. A condição ideal onde se obtém o menor diâmetro de saída, $0,19 \pm 0,03$ mm, é de uma potência de pico de 6 kW, largura temporal de 2 ms sem atmosfera protetora de argônio.

O uso de argônio nos obriga a usar maiores potências de pico para conseguir o mesmo resultado sem seu uso, pois por se tratar de um meio ativo em lasers de estado gasoso ele absorve parte da energia do laser.

Potências de pico excessivas deformam as saídas dos furos diminuindo a conicidade, mas há uma perda de circularidade da saída.

A partir de uma energia de processo de 7J o diâmetro de entrada se estabiliza em aproximadamente 0,95 mm.

A análise EDS não apresentou indícios de oxidação, então para microfuração em aço AISI 316L não é necessário uso de atmosfera protetora de argônio.

A vaporização do metal ocorre na região interna da chapa e sua expansão provoca a expulsão do material fundido da parte superior, em potências abaixo da ideal não há expulsão efetiva do metal fundido fazendo com que ele retorne para o interior do furo causando empescoamento ou completo fechamento do furo na altura média do mesmo.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como possíveis trabalhos futuros, pode-se apontar:

- Estudar o processo com outras espessuras de material, para verificar os efeitos das diferentes taxas de remoção de calor;
- Analisar a influência da posição do ponto focal do laser, que nesta pesquisa foi posicionado na superfície do material, posicionar no centro e parte inferior do material;
- Verificar o efeito de outros gases de proteção, de preferência gases que não são usados como meios ativos;
- Utilizar ligas diferentes para entender a influência dos elementos contidos no material;
- Estudar o material na condição recozido, para determinar se os alinhamentos dos grãos foram os responsáveis pela diferença de diâmetros nas direções de laminação e transversais a ela.

REFERÊNCIAS

- ARRIZUBIETA, I. et al. Internal characterization and hole formation mechanism, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Birmingham, v. 75, n. 1, p. 55-62, 2013.
- AURICCHIO, F.; CONSTANTINESCU, A.; SCALET, G. Fatigue of 316L stainless steel notched μm -size components. **International Journal of Fatigue**, Plymouth, v. 68, n. 1, p. 231–247, 2014
- BAGGER, C.; OLSEN, F. O. Pulsed mode laser cutting of sheets for tailored blanks, **Journal of Materials Processing Technology**, Dortmund, Germany, v. 115, n. 1, p.131-135, 2001.
- BHARATISH, A. et al. Characterization of hole circularity and heat affected zone in pulsed CO₂ laser drilling of alumina ceramics. **Optics & Laser Technology**, Benevento, v. 53, n. 1, p. 22–32, 2013.
- BISWAS, R. et al. A parametric study of pulsed Nd:YAG laser micro-drilling of gamma-titanium aluminide, **Optics & Laser Technology**, Benevento, v. 42, n. 1, p. 23–31, 2010.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos, 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1998. 599 p.
- DFNANO SUPPLIER. **What is nanotechnology**. Nanjing Jiangsu: [s.n.], 2013. Disponível em: <<http://what-is-nanotechnology.com/7Y3Al5O12-NdYAG-CrYAG-ErYAG-YbYAG-Ce-Tm-Ho-garnet.htm>>. Acesso em: 21 abr. 2016.
- DHUPAL, D.; DOLOI, B.; BHATTACHARYYA, B. Pulsed Nd:YAG laser turning of micro-groove on aluminum oxide ceramic (Al₂O₃). **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Birmingham, v. 48, n. 1, p. 236–248, 2008.
- DÖRING, S. et al. Hole formation process in ultrashort pulse laser percussion drilling, **Physics Procedia**, Massachusetts, v. 41, n. 1, p. 431–440, 2013.
- DUBEY, A. K.; YADAVA, V. Experimental study of Nd:YAG laser beam machining – an overview, **Journal of Materials Processing Technology**, Dortmund, v. 195, n. 1, p. 15-26, 2008.
- DUBEY, A. K.; YADAVA, V. Laser beam machining, **Review, International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Birmingham, v. 48, n. 1, p. 609-628, 2008.

EMMELMANN, C. **Introduction to industrial laser materials processing**, Hamburgo: Rofin-Sinar, 1998, 190 p.

EXPERTSMIND. **Construction of neodymium-yttrium-aluminium-garnet laser**, São Francisco: [s.n.], 2013. Disponível em: <<http://www.expertsmind.com/questions/construction-ofneodymium-yttrium-aluminium-garnet-laser-301103262.aspx>>. Acesso em: 21 set. 2016.

GHOREISHI, M.; NAKHJAVANI, O. B. Optimisation of effective factors in geometrical specifications of laser percussion drilled holes. **Journal of Materials Processing Technology**, Dortmund, v. 196, n. 1, p. 303-310, 2008.

GIRARDOT, J. et al. Investigation of delamination mechanisms during a laser drilling on a cobalt-base superalloy, **Journal of Materials Processing Technology**, Dortmund, v. 213, n. 1, p. 1682–1691, 2013.

HÄNSCH, T. A.; PERNIER, M.; SCHAWLOW, A. L. Laser action of dyes in gelatin, **IEEE Journal of Quantum Electron**, Provo, QE-7, n. 1, p. 47, 1971.

HECHT, J. Short history of laser development, **Optical engineering**, Ohio, v. 49, n. 9, p. 1-23, 2010.

JACKSON, M. J.; O'NEILL, W. Laser micro-drilling of tool steel using Nd:YAG lasers, **Journal of Materials Processing Technology**, Dortmund, v. 142, n. 1, p. 517–525, 2003.

KATAYAMA, S. **Handbook of laser welding technologies**. [S. l.]: Woodhead Publishing Limited, 2013. p. 30-631.

KOECHNER, W. **Solid-state laser engineering**, Berlim: Springer-Verlag, 1988. 606 p.

KOECHNER, W. **Solid-state laser engineering**. 3. ed. Berlim: Springer-Verlag, 1992. p. ISBN 0-387-53756-2.

KUAR, A. S.; DOLOI, B.; BHATTACHARYYA, B. Modelling and analysis of pulsed Nd:YAG laser machining characteristics during micro-drilling of zirconia (ZrO₂), **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Birmingham, v. 46, n. 1, p. 1301–1310, 2006.

LAC. **Design for laser**. Berlim: Laser Applicatie Centrum-LAC, 2005. Disponível em: <http://www.lac.nl/df12/ndyag_laser.html>. Acesso em: 21 abr 2016.

MELO, A. L. V. Análise das propriedades de chapas de ti astm grau 5 (Ti6Al4V) soldadas por laser Nd:YAG. 2007. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2007.

NG, G. K. L.; LI, L. The effect of laser peak power and pulse width on the hole geometry repeability in laser percursion drilling. **Optics & Laser Technology**, Benevento, v. 33, n. 1, p. 393-402, 2001.

OKASHA, M. M. et al. Sequential laser and mechanical micro-drilling of Ni superalloy for aerospace application. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Nottingham, v. 59, n. 1, p. 199–202, 2010.

PASCHOTTA, R. **YAG lasers**. Bad Dürkheim: RP-Photonics. 2012. Disponível em: <https://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html>. Acesso em: 21 abr 2016.

PETRONIĆ, S. et al. Analysis of geometrical characteristics of pulsed nd:yag laser drilled holes in superalloy nimonic 263 sheets. **Technical Gazette**, Slavonski Brod, v. 17, n. 1, p. 61-66, 2010.

PRIYADARSHINI, M. et al. Multi characteristics optimization of laser drilling process parameter using grey fuzzy reasoning method, **Materials Today: Proceedings**, Oxford, v. 2, n. 1, p. 1518–1532, 2015.

RAJESH, P. et al. Experimental and parametric studies of Nd:YAG laser drilling on austenitic stainless steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Nottingham, v. 169, n. 1, p. 38-44, 2015.

READY J. F. **Industrial applications of lasers**. 2. ed. Massachusetts: Academic Press, 1997. ISBN 0125839618.

RODDEN, W. S. O. et al. A comprehensive study of the long pulse Nd:YAG laser drilling of multi-layer carbon fibre composites. **Optics Communications**, Oxford, v. 210, n.1, p. 319–328, 2002.

SCHULZ, W., EPPELT, U.; POPRAWA, R. Review on laser drilling I. fundamentals, modeling, and simulation. **Journal of Laser Applications**, Melville, v. 25, n. 1, p. 1-17, 2013.

SHCHERBAKOV, I. Development history of the laser. **Physics Uspekhi**, Moscou, v. 54, n. 1, p. 65 -71, 2011.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**, 2. ed. São Paulo: Blucher, 2006. 646 p.

STEEN, W. M. *Laser material processing*. 3rd ed. London: Springer, 2009. ISBN 978-1-4471-3752-8.

STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. *Laser material processing*, 4. ed. London: Springer, 2010. ISBN 978-1-84996-062-5.

THAWARI, G.; SARIN SUNDAR, J. K.; SUNDARARAJAN, G.; JOSHI, S. V. Influence of process parameters during pulsed Nd:YAG laser cutting of nickel-base superalloys. **Journal of Materials Processing Technology**, Dortmund, v. 170, n. 1-2, p. 229-239, 2005.

TONGYU, W.; GUOQUAN, S. Geometric quality aspects of Nd:YAG laser drilling holes, In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS AND AUTOMATION, 5, 2008, Kagawa. **Proceedings...** Takamatsu: [s.n.], 2008. p. 442-446.

TUNNA, L. et al, Analysis of laser micro drilled holes through aluminium for micro-manufacturing applications, **Optics and Lasers in Engineering**, Singapore, v. 43, n. 1, p. 937–950, 2005.

TUNNA, L. et al, Micromachining of copper using Nd : YAG laser radiation at 1064, 532, and 355 nm wavelengths. **Optics & Laser Technology**, Benevento, v. 33, n. 1, p. 135–143, 2001.

WETTER, N. U.; ROSSI, W. **ICS lectures on industrial applications of lasers**. Viena: Unido Publication – Spero Penha Morato, 2000. 93 p.