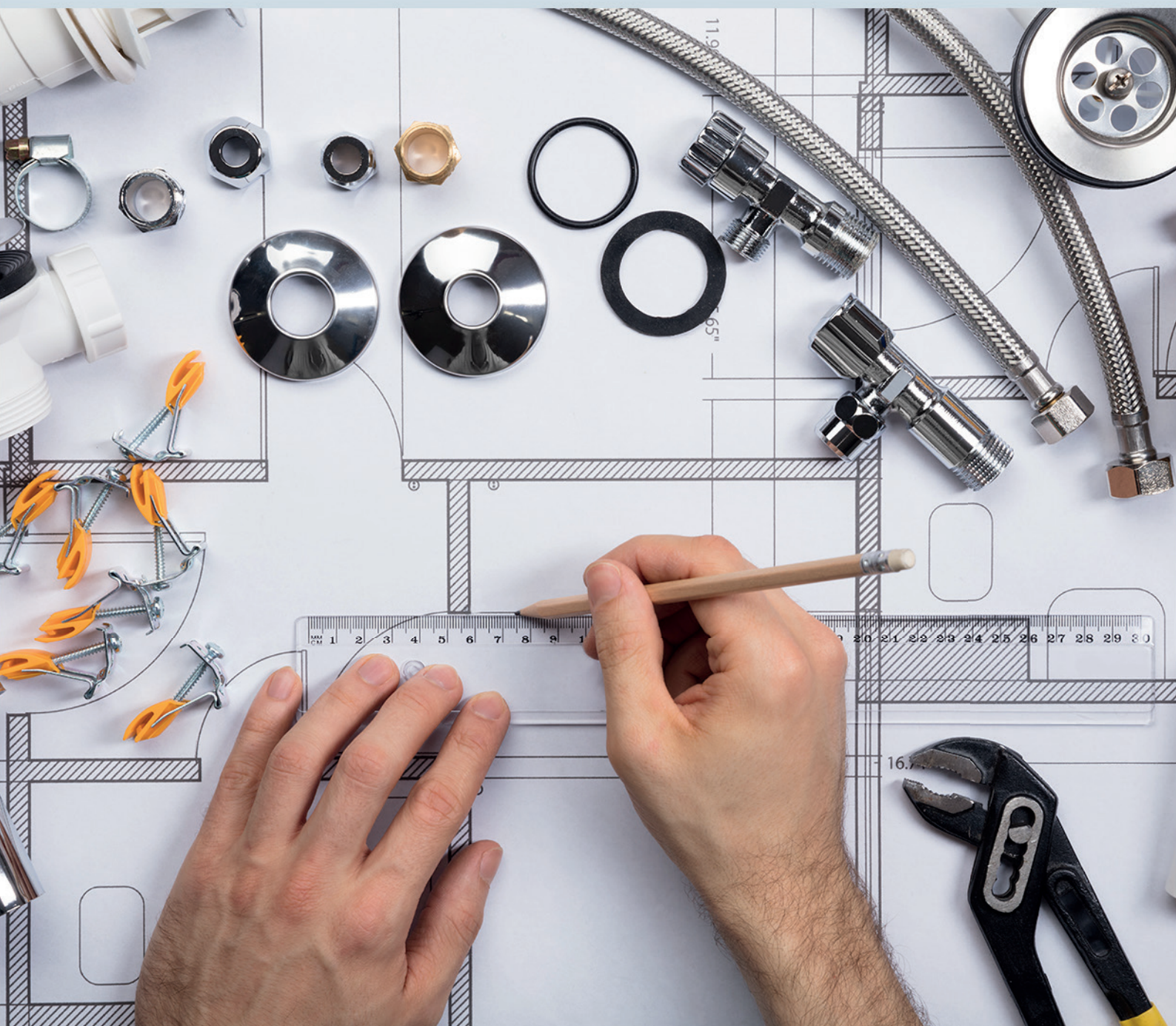


Ciência e Engenharia de Materiais

2

Marcia Regina Werner Schneider Abdala
(Organizadora)



Atena
Editora

Ano 2018

MARCIA REGINA WERNER SCHNEIDER ABDALA

(Organizadora)

Ciência e Engenharia de Materiais

2

Atena Editora

2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

C569 Ciência e engenharia de materiais 2 [recurso eletrônico] / Marcia Regina Werner Schneider Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. – (Ciência e Engenharia de Materiais; v. 2)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-85107-63-5

DOI 10.22533/at.ed.635183010

1. Engenharia. 2. Materiais I. Abdala, Marcia Regina Werner Schneider. II. Série.

CDD 620.11

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

Você já percebeu a importância dos materiais na sua vida diária? Os materiais estão provavelmente mais imersos na nossa cultura do que a maioria de nós imagina. Diferentes segmentos como habitação, saúde, transportes, segurança, informação/comunicação, vestuário, entre outros, são influenciados em maior ou menor grau pelos materiais.

De fato a utilização dos materiais sempre foi tão importante que os períodos antigos eram denominados de acordo com os materiais utilizados pela sociedade primitiva, como a Idade da Pedra, Idade do Bronze, Idade do Ferro, etc.

A humanidade está em constante evolução, e os materiais não são exceções. Com o avanço da ciência e da tecnologia a cada dia surgem novos materiais com características específicas que permitem aplicações pormenorizadas e inovação nas mais diferentes áreas.

Todos os dias centenas de pesquisadores estão atentos ao desenvolvimento de novos materiais e ao aprimoramento dos existentes de forma a integrá-los em tecnologias de manufatura economicamente eficientes e ecologicamente seguras.

Estamos entrando em uma nova era caracterizada por novos materiais que podem tornar o futuro mais fácil, seguro e sustentável. O campo da Ciência e Engenharia de Materiais aplicada está seguindo por novos caminhos. A iminente escassez de recursos está exigindo inovações e ideias criativas.

Nesse sentido, este livro evidencia a importância da Ciência e Engenharia de Materiais, apresentando uma coletânea de trabalhos, composta por quatro volumes, que permitem conhecer mais profundamente os diferentes materiais, mediante um exame das relações entre a sua estrutura, as suas propriedades e o seu processamento.

Considerando que a utilização de materiais e os projetos de engenharia mudam continuamente e que o ritmo desta mudança se acelera, não há como prever os avanços de longo prazo nesta área. A busca por novos materiais prossegue continuamente...

Boa leitura!

Marcia Regina Werner Schneider Abdala

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CARBETO DE VANÁDIO NA MOAGEM E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AISI 52100, PRODUZIDO POR METALURGIA DO PÓ	
<i>Leandra Fernandes de Oliveira</i>	
<i>Bruna Horta Bastos Kuffner</i>	
<i>Daniela Sachs</i>	
<i>Gilbert Silva</i>	
<i>Geovani Rodrigues</i>	
CAPÍTULO 2	12
INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM INNERSHIELD NAS CARACTERÍSTICAS DA SOLDA DE UM AÇO ESTRUTURAL ASTM – A36	
<i>Waldemir dos Passos Martins</i>	
<i>Paulo Victor Cunha Caetano</i>	
<i>Valdemar Silva Leal</i>	
<i>Valter Alves de Meneses</i>	
CAPÍTULO 3	25
CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO AÇO INOXIDÁVEL 17-4 PH NITRETADO UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS	
<i>Ane Caroline Celestino Silva</i>	
<i>Lucas da Silva Vicente</i>	
<i>Christian Egídio da Silva</i>	
<i>Cristina de Carvalho Ares Elisei</i>	
<i>Cirlene Fourquet Bandeira</i>	
<i>Sérgio Roberto Montoro</i>	
CAPÍTULO 4	32
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO BAIXO CARBONO APÓS PROCESSO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA	
<i>Vanessa Moura de Souza</i>	
<i>Vinicius Martins</i>	
CAPÍTULO 5	43
COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS MATRIZES METÁLICAS DO SISTEMA FE-CU-NB OBTIDAS POR Prensagem a quente	
<i>Hellen Cristine Prata de Oliveira</i>	
<i>Marcello Filgueira</i>	
CAPÍTULO 6	58
ESTUDO DO EFEITO DA VIBRAÇÃO NA SOLIDIFICAÇÃO DA LIGA 356.0	
<i>Laura Ferrazza Kirch</i>	
<i>Amanda Yuki Shimosaka</i>	
<i>Dalmarino Setti</i>	
CAPÍTULO 7	65
ESTUDO SOBRE O PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO DAS MATRIZES METÁLICAS DE FE-CU-25%NB E FE-CU-25%CO DURANTE A Prensagem a quente	
<i>Hellen Cristine Prata de Oliveira</i>	
<i>Adriano Corrêa Batista</i>	
<i>Luis Guerra Rosa</i>	
<i>Paulo Santos Assis</i>	

CAPÍTULO 8	84
TRANSIÇÃO OBSERVADA ENTRE OS MODOS DE DESGASTE MICRO-ABRASIVO POR “RISCAMENTO” E POR “ROLAMENTO” EM WC-CO P20 E AÇO-FERRAMENTA M2	
<i>Ronaldo Câmara Cozza</i>	
CAPÍTULO 9	92
ANÁLISE DA DUREZA E MICROESTRUTURA DO AÇO ABNT 1045 APÓS TÊMPERA E REVENIMENTO	
<i>João Paulo Montalván Shica</i>	
<i>Matheus Henryque Almeida e Silva</i>	
CAPÍTULO 10	105
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE RIGIDEZ SOBRE AS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE PLACAS DE ALUMÍNIO	
<i>Pietro Olegário da Silva</i>	
<i>Adriana Amaro Diacenco</i>	
CAPÍTULO 11	118
ANÁLISE DA MICRODUREZA E CORROSÃO NO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW NA CHAPA DE AÇO DOBRADA TIPO U	
<i>Josemairon Prado Pereira</i>	
<i>Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves</i>	
CAPÍTULO 12	129
ANÁLISE DO CICLO TÉRMICO DE UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA BAIXA LIGA UTILIZANDO MÉTODO DIRETO E EQUAÇÕES DE SOLDAGEM	
<i>Thyálita Coêlho Moreira Mousinho</i>	
<i>Thaís Spíndola Garcêz</i>	
<i>José Francisco dos Reis Sobrinho</i>	
<i>Nelson Guedes de Alcântara</i>	
CAPÍTULO 13	138
MICROFURAÇÃO COM LASER PULSADO ND:YAG EM CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L	
<i>Dair Ferreira Salgado Junior</i>	
<i>Vicente Afonso Ventrella</i>	
<i>Juno Gallego</i>	
CAPÍTULO 14	153
ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE LÂMINAS DE SERRA NO CORTE DA MADEIRA COM APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	
<i>Daniel Villas Bôas</i>	
<i>Elder Jesus Lima Machado</i>	
<i>Vanessa Ferreira Neves</i>	
CAPÍTULO 15	160
O EFEITO DE DIFERENTES TIPOS DE HOMOGENEIZAÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO EM DEFORMAÇÃO A FRIO DAS LIGAS TI-35NB E TI-35NB-0,15SI	
<i>Késia Filadélfia Dionizio Silva Ramos</i>	
<i>Helton José Rodrigues Cabral</i>	
<i>Reinan Tiago Fernandes dos Santos</i>	
<i>Wilton Walter Batista</i>	
CAPÍTULO 16	173
LIGA DE MAGNÉSIO AZ91D: AVALIAÇÃO DA BIODEGRABILIDADE E DO COMPORTAMENTO MECÂNICO	
<i>Ronaldo Veronês Nascimento</i>	
<i>Ângela Beatriz Coelho Arnt</i>	
<i>Marcio Roberto da Rocha</i>	
<i>Steferson Luiz Stares</i>	

CAPÍTULO 17	184
INFLUÊNCIA DO PH E DO TEMPO DE IMERSÃO NA SILANIZAÇÃO JUNTO DE TANINOS PARA PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE AÇOS GALVANIZADOS	
<i>Bruno Pienis Garcia</i> <i>Álvaro Meneguzzi</i>	
CAPÍTULO 18	194
A NEW PROCEDURE TO DETERMINE THE PERMITTIVITY OF RADAR ABSORBING MATERIALS	
<i>Tamara Indrusiak Silva</i> <i>Iaci Miranda Pereira</i> <i>Jorge A. Mitrione Souza</i> <i>Marbey Manhães Mosso</i> <i>Ângelo M. Leite Denadai</i> <i>Jéferson Gomes da Silva</i> <i>Alan Reis de Oliveira</i> <i>Bluma Guenther Soares</i>	
CAPÍTULO 19	204
DESENVOLVIMENTO DE UM REVESTIMENTO A BASE DE NIÓBIO PARA PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO DE AÇO-CARBONO (SAE 1020)	
<i>Paloma Detlinger</i> <i>Brian Utri</i> <i>Guilherme Arielo Rodrigues Maia</i> <i>Rodrigo Helleis</i> <i>Cynthia Beatriz Fürstenberger</i> <i>Everson do Prado Banczek</i>	
CAPÍTULO 20	213
CORROSÃO E BIOCORROSÃO EM AÇO CARBONO	
<i>Diana Magalhães Frazão</i> <i>Ivanilda Ramos de Melo</i> <i>Severino Leopoldino Urtiga Filho</i>	
SOBRE A ORGANIZADORA	218

MICROFURAÇÃO COM LASER PULSADO ND:YAG EM CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L

Dair Ferreira Salgado Junior

Instituto Federal De Mato Grosso - Campus
Primavera Do Leste
Primavera Do Leste - MT

Vicente Afonso Ventrella

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS
– UNESP

Ilha Solteira - SP

Juno Gallego

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS
– UNESP

Ilha Solteira - SP

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. O presente estudo observou 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, conicidade

e formatos observados em estereomicroscópio e microscópio eletrônico de varredura, como também possíveis mudanças na composição do material.

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 the pulsed laser drilling method, 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 based on their format. The present study observed how variations in peak power, temporal pulse width and the existence or absence of protective atmosphere can change the sizes, shapes and depths in micro holes. Combinations of the parameters that were used to obtain holes in 1 mm thick AISI 316L steel plates were made using an Nd: YAG pulsed laser source and analyzing the properties in each combination, such as inlet and outlet diameters exit, depth, conicity and shapes observed in stereomicroscope and scanning electron microscope, as well as possible changes in the composition of the material.

KEYWORDS: Micro Hole, Laser, Nd: YAG, AISI 316L, Peak Power, Time Width.

1 | INTRODUÇÃO

O processo de furação é uma das operações de usinagem mais antigas, embora tenha evoluído muito no decorrer de milênios ele não consegue superar barreiras como as altíssimas rotações necessárias para alcançar as velocidades de corte em micro furos, dificuldade de furação de ligas endurecidas, 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 $5\ \mu\text{m}$ a 1 mm com razões de aspecto de 1:200. Geralmente a operação é realizada com um único pulso ou uma sequência de pulsos curtos, com potências de pico que chegam a 50kW (Arrizubieta, 2013).

A combinação de energia e duração do pulso influencia o mecanismo de remoção, pulsos ultracurtos (menores que 100 fs) e altas densidades energéticas (maiores que $10^{16}\ \text{W/cm}^2$) o material é removido por ablação fria. Já com pulso longos (maiores que 100 μs) e densidades energéticas baixas (menores que $10^7\ \text{W/cm}^2$) o material é removido por expulsão do fundido, este procedimento é o mais usado na indústria (Schulz, 2013).

Um laser pulsado Nd:YAG produz radiação infravermelha de alta intensidade com comprimento de onda de $1,06\ \mu\text{m}$, com potências de saída compreendida entre 500 e 12.000 W. Devido ao seu comprimento de onda curto (comparado com lasers de CO_2) permite o processamento de materiais altamente refletivos com menos potência do laser (Bagger, 2001).

O Nd:YAG (granada de ítrio e alumínio dopado com neodímio; $\text{Nd:Y}_3\text{A}_{15}\text{O}_{12}$) é um cristal que é utilizado como gerador de lasers de estado sólido. É o íon de neodímio, que fornece a propriedade de emissão de laser no cristal, 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 influencia 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 | MICROFURAÇÃO A LASER

Há vantagens da utilização de laser para perfuração, as mais importantes são: os furos são localizados com precisão, grande proporção de aspecto e diâmetros de orifícios muito pequenos são alcançados, variedade de materiais pode ser perfurada, a perfuração é muito rápida, os furos podem ser perfurados em ângulos de entrada difíceis, o processo pode ser automatizado, o custo de funcionamento é baixo e sem o desgaste da ferramenta e a ruptura, tornando-se uma alternativa barata para a perfuração em relação a processos como 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 é determinada por características geométricas: o diâmetro do furo, conicidade, relação de aspecto, e circularidade; e características metalúrgicas: ZTA (zona termicamente afetada), camada ressolidificada, respingos e as microfissuras (Bharatish, 2013; Petronić, 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 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, 2010).

Hoje em dia, o processo é o preferido em muitos setores como maquinaria pesada, na indústria aeronáutica para a fabricação de componentes de turbinas de 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, 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 (Arrizubieta, 2013; Bharatish, 2013; Tongyu, 2008; Rajesh, 2015; Döring, 2013).

3 | 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 para a expulsão do material.



Figura 1 – Sistema laser Nd:YAG pulsado, modelo UW-150A United Winners, montado no Laboratório de Soldagem

Fez-se uso de um estereoscópio 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 1 mm de espessura. Foram confeccionados corpos de prova na dimensão 22 mm por 100 mm.

Como a potência de pico e a largura temporal foram ajustadas como no Quadro 1.

Potência (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 (ms)	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Energia (J)	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14

Quadro 1 – Ajustes selecionados para potência de pico e largura temporal

Para cada combinação fizeram-se 10 disparos com e sem atmosfera protetora com argônio a uma vazão de 22 l/min.. Após a execução dos disparos os corpos de prova foram levados ao estereoscópio e foram medidos seus diâmetros de entrada e de saída quando existiam medidos na direção de laminação e na transversal a mesma.

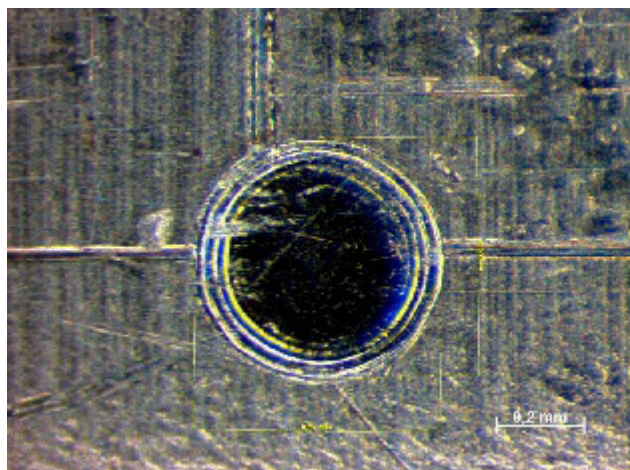


Figura 2 – Medição do diâmetro de entrada do disparo

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

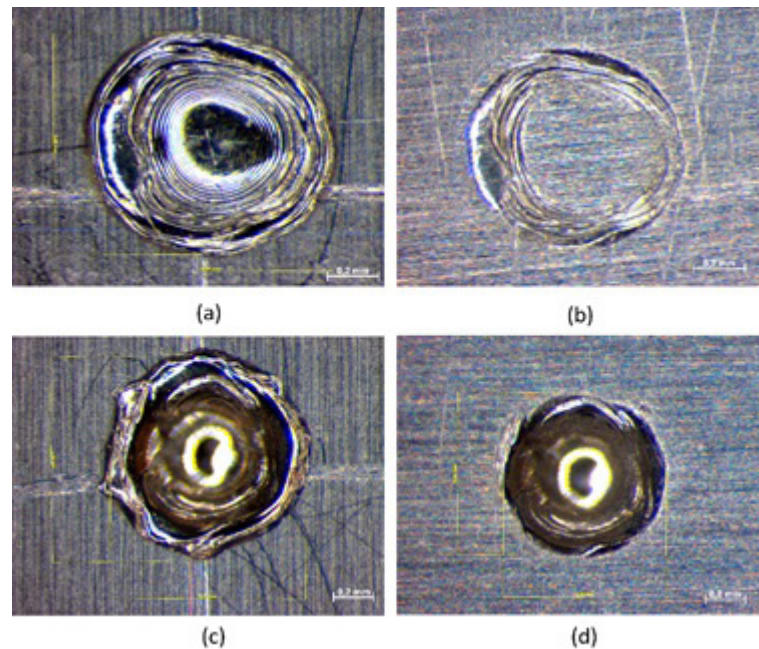


Figura 3 – Comparação antes e após lixamento, (a) e (b) 3 kW 1 ms com atmosfera protetora não obteve profundidade, (c) e (d) 7 kW 1 ms com atmosfera protetora

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.

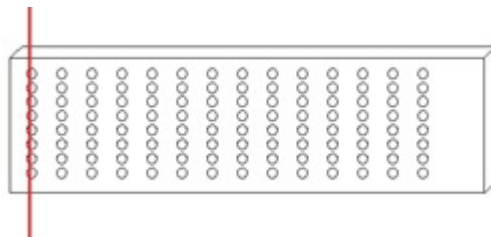


Figura 4 – Corte dos corpos de prova por eletroerosão a fio

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.

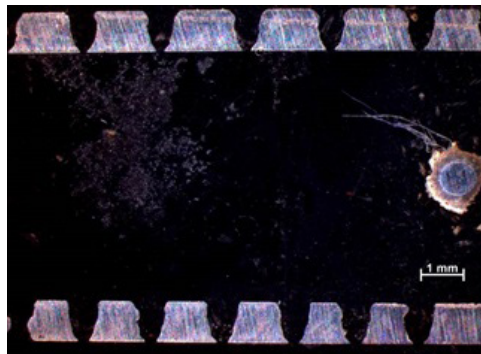


Figura 5 – Corpos de prova após embutimento e lixamento

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

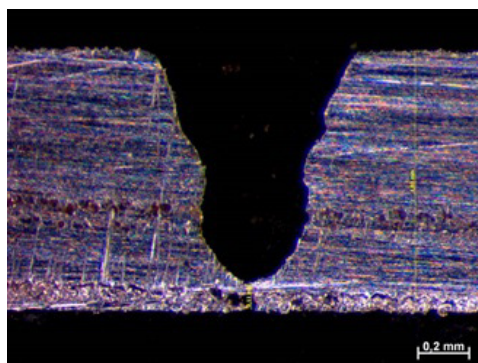


Figura 6 – Medida de profundidade do furo

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.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 7 compara os diâmetros médios de entrada antes do lixamento para as diferentes condições para largura temporal de 2 milissegundos.

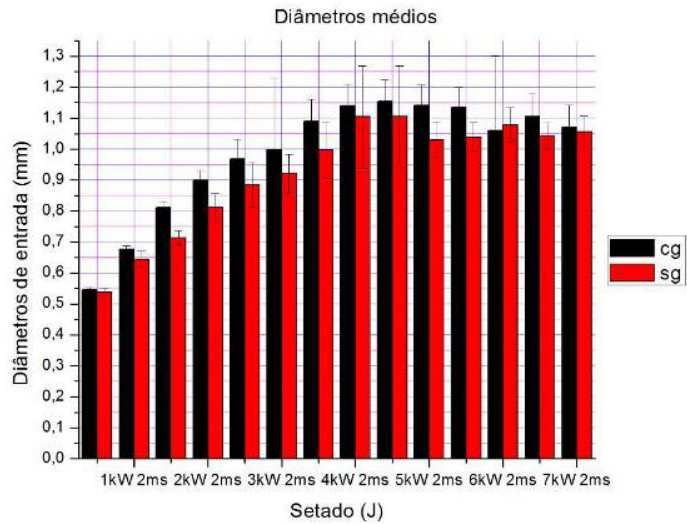


Figura 7 – Comparação de condições para 2ms

Nota-se que apenas 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 áreas circulares calculadas usando o diâmetro médio temos a relação área e energia de pulso.

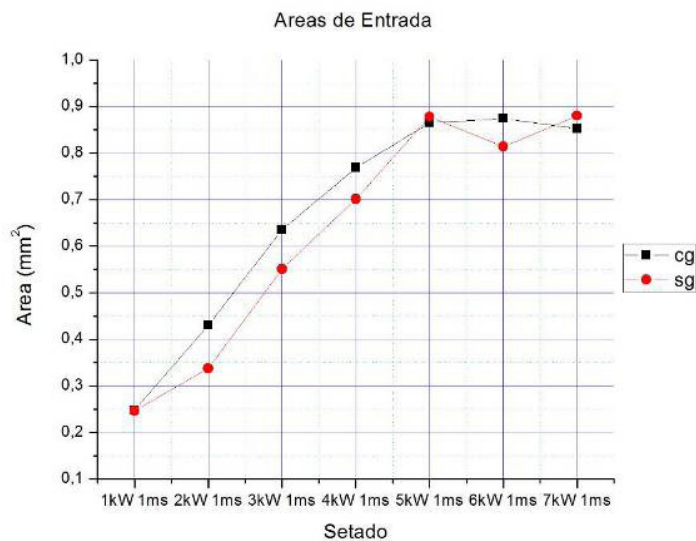


Figura 8 – Comportamento da área em relação a energia do pulso de 1ms

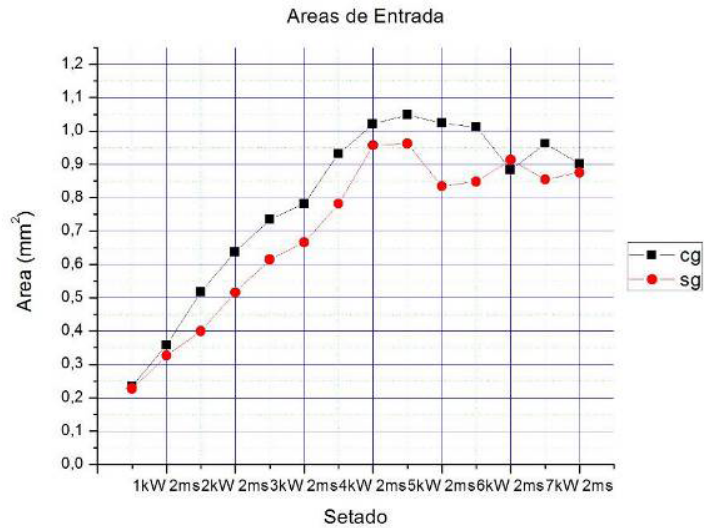


Figura 9 – Comportamento da área em relação a energia do pulso de 2ms

Pode-se ver na Figura 8 que há um aumento da área com aumento da energia até aproximadamente 4,5J, o que foi mostrado no trabalho de Tongyu⁽²⁴⁾, após esse ponto ocorre uma inversão do fenômeno, na Figura 9 isso ocorre com 8,6J aproximadamente, Rajesh⁽²⁵⁾, em seu trabalho com aço inoxidável austenítico onde também houve uma diminuição dos diâmetros de entrada com o aumento da corrente da lâmpada, ou seja, da energia do processo com conseqüente diminuição da área do furo. Note ainda que houve diferença nos diâmetros na direção de laminação e na direção transversal a laminação como mostra a Figura 10.

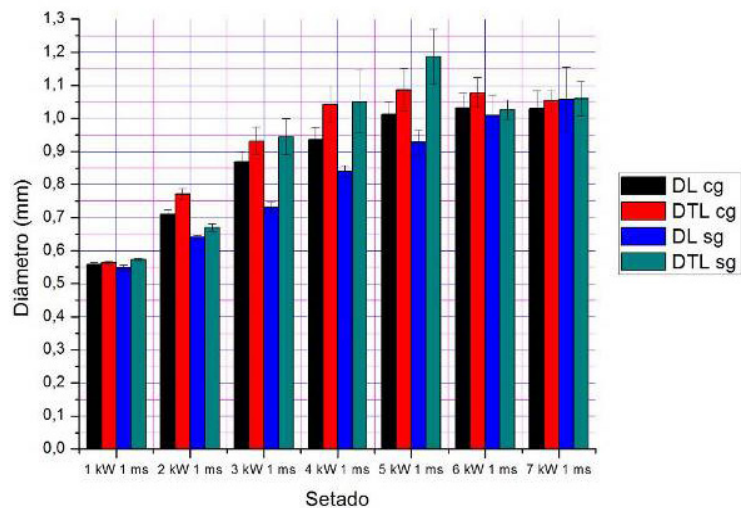


Figura 10 – Comparativos de diâmetros na direção e transversal a laminação 1ms

Além disso a diferença dos diâmetros, ou a perda de circularidade aumenta com o aumento da energia do processo o que já havia sido demonstrado por Biswas⁽²⁷⁾ em seu estudo.

Quando verificamos as saídas dos furos vemos que apenas seis condições alcançaram 1 mm de profundidade e que o diâmetro de saída aumenta com a quantidade da energia do processo, exatamente o contrário do que foi mostrado por Rajesh⁽²⁵⁾, onde o diâmetro de saída diminuiu com o aumento da energia, e que processos sem atmosfera protetora apresentam diâmetros de saída maiores.

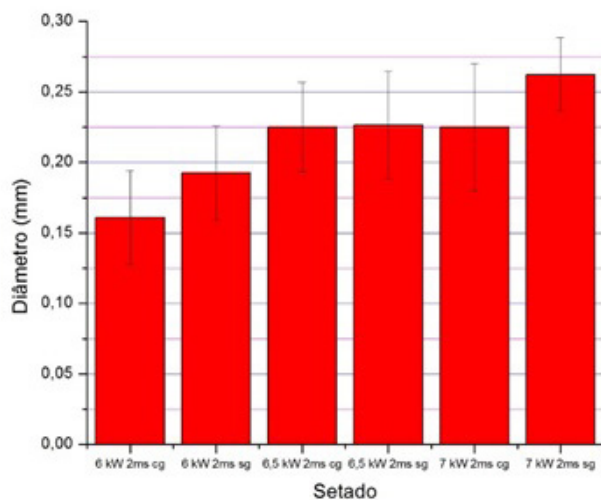


Figura 11 – Diâmetros de saída

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.

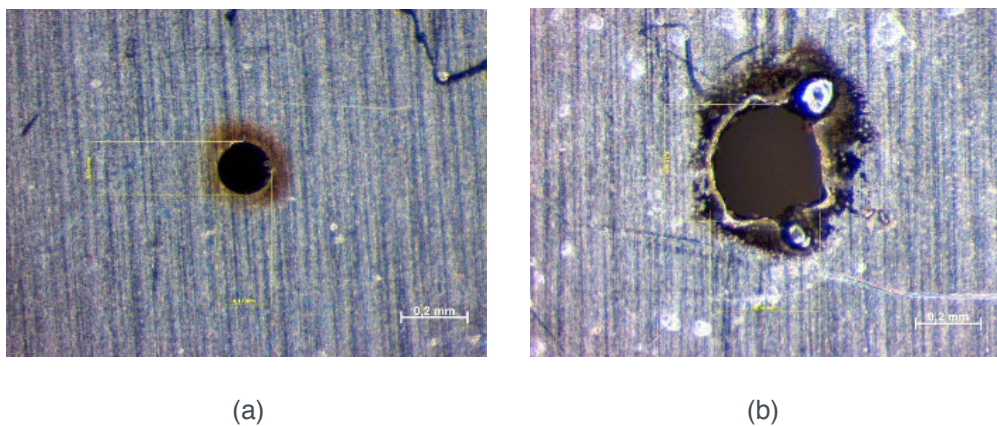


Figura 12 – (a) Saída 6kW 2ms cg, (b) Saída 7kW 2ms sg

A Figura 12 (b) 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. 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 14 mostra a conicidade obtida em cada condição que produziu furos passantes.

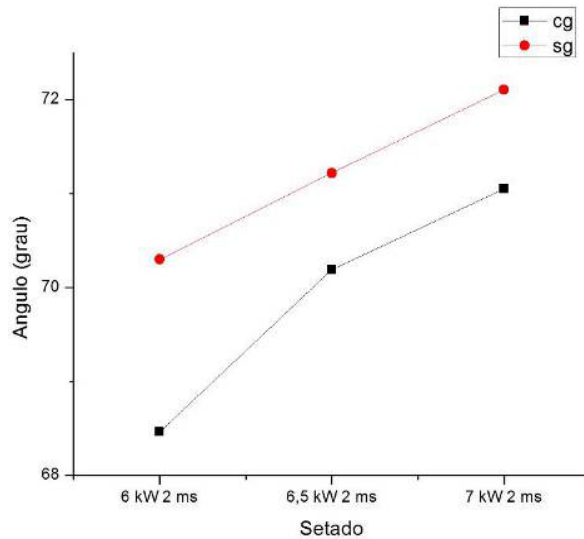


Figura 14 – Conicidade

Vemos que com o aumento da energia do processo a conicidade diminui, pois, os diâmetros de saída aumentam como visto na Figura 11, enquanto os diâmetros de entrada se estabilizam como mostrado na Figura 7, portanto a conicidade só reduziu porque o diâmetro de saída aumentou o que não é desejável quando se produz micro furos.

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 15 (a). Nos furos “cegos” da chapa 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 vemos na Figura 15 (b).

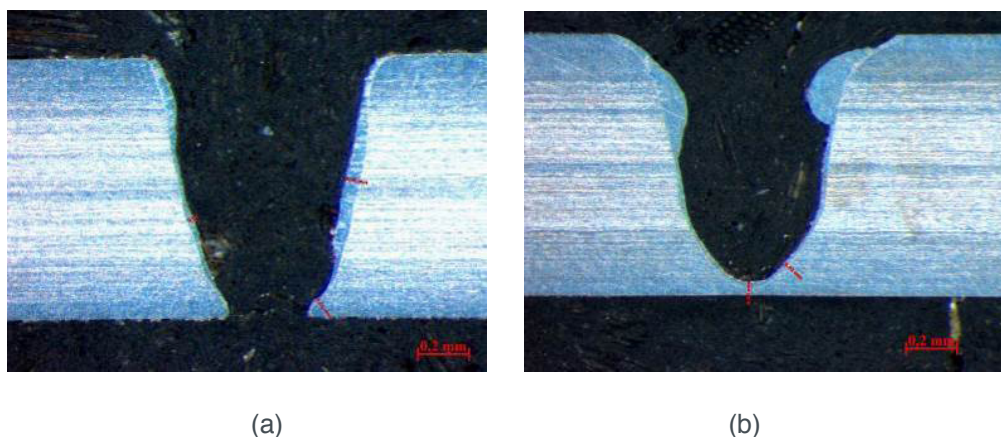
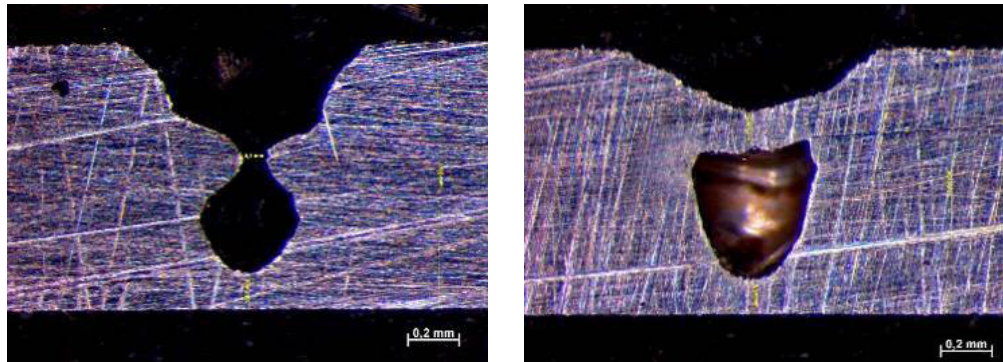


Figura 15 – (a)Perfil de furo passante e (b) cego após ataque químico

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 Figura 16.

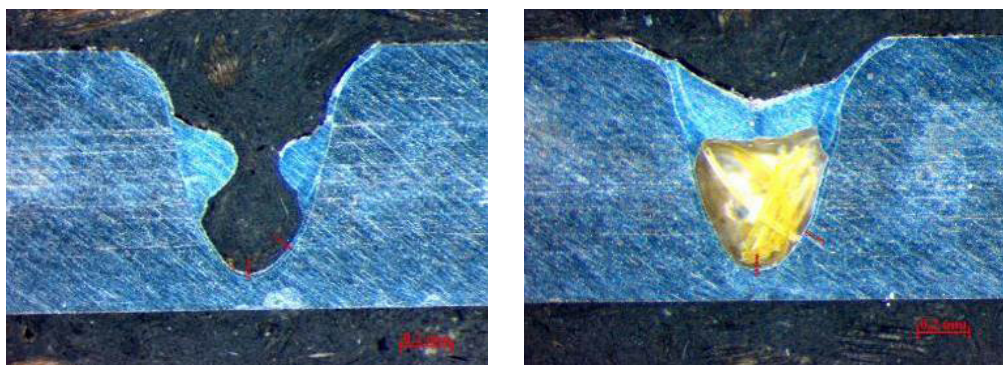


(a)

(b)

Figura 16 – (a)Empescoçamento e (b)fechamento total do furo

Depois do ataque com Vilella vemos que o empescoçamento e o fechamento dos furos é causado pelo material ressolidificado, acredita-se que a vaporização/sublimação do material ocorra na região mais profunda do furo causando uma grande expansão expulsando a parte fundida que retorna para o furo, o que explica o empescoçamento e a maior espessura do material na entrada do furo, as Figura 17 mostra esse efeito.



(a)

(b)

Figura 17 – Empescoçamento após ataque

Com o uso do MEV (microscópio eletrônico de varredura) observamos melhor os efeitos da largura temporal e uso ou não de atmosfera protetora, a Figura 18 (a) que a marca do pulso com atmosfera protetora apresenta relevo mais suave do que o pulso sem visto na Figura 18 (b) que apresenta no centro o que aparenta ser o início da expulsão de fundido.

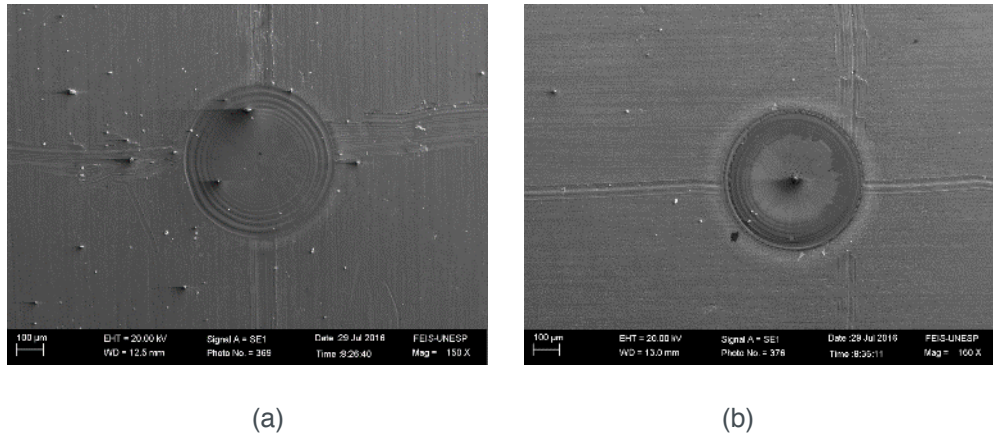


Figura 18 – Superfície após pulso de (a) 1kW 1ms cg e (b) 1kW 1ms sg

A Figura 19 nos mostra que o aumento a largura temporal, mas com a mesma energia do processo, os pulsos causaram menos efeito na superfície mantendo o mesmo comportamento com relação à atmosfera protetora.

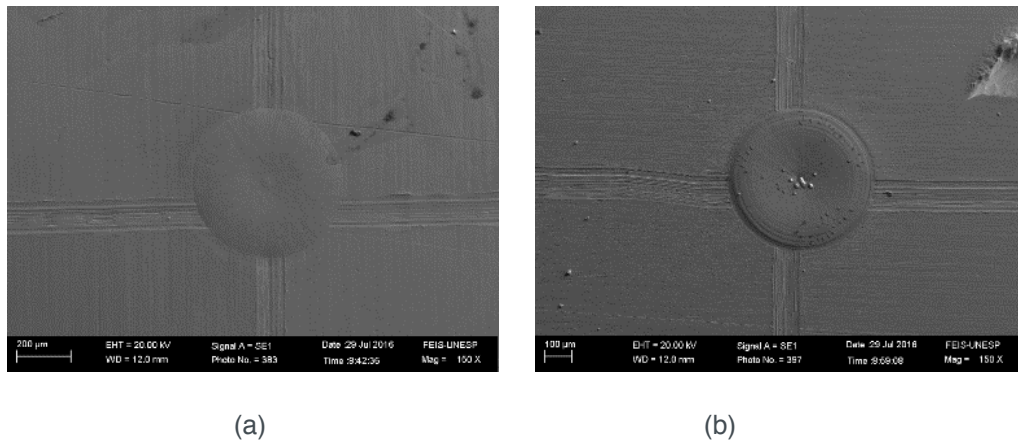


Figura 19 – Superfície após pulso de (a) 0,5kW 2ms cg e (b) 0,5kW 2ms sg

Esse menor efeito quando empregada em atmosfera protetora provavelmente ocorre porque o argônio também é um meio ativo para produção de laser possuindo bandas de absorção de radiação e por não haver realimentação do sistema ele não produz a ampliação somente a absorção reduzindo assim a potência do laser.

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 20 exhibe mudanças muito grande no relevo do furo indicando uma rugosidade alta no interior no furo, além disso podemos ver o 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 de material ressolidificado seja maior na entrada do furo e reduzindo em direção à saída. A Figura 21 ratifica essa ideia pois mostra o material expulsa com ondas de escoamento em direção a parte interna do furo.

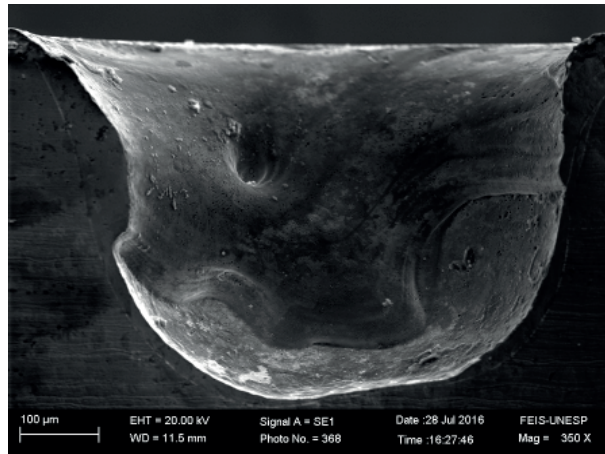


Figura 20 – Perfil do furo

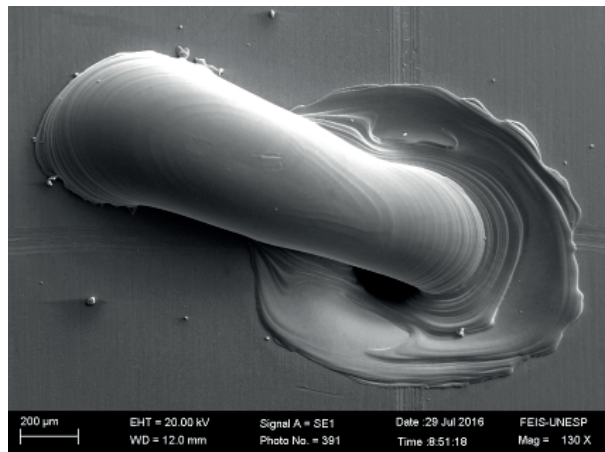


Figura 21 – Material expulso no processo

Realizando uma análise química pelo método EDS (energy dispersive x-ray detector) 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 22 mostra as regiões onde foi realizado EDS, as Figuras 23 e 24 mostram os resultados da espectrografia de forma. Todas as condições testadas neste estudo apresentaram resultados semelhantes.

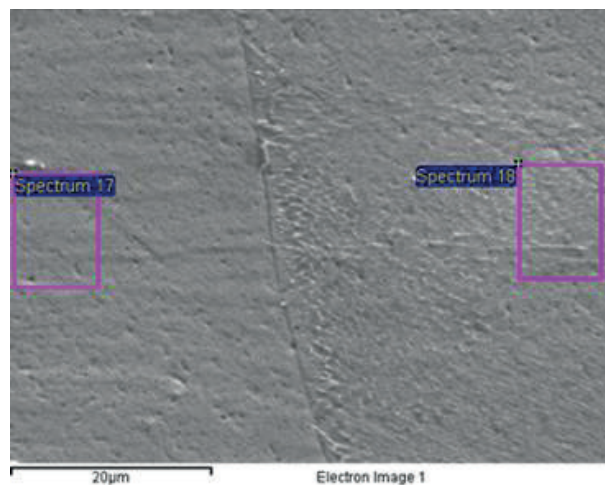


Figura 22 – Regiões analisadas

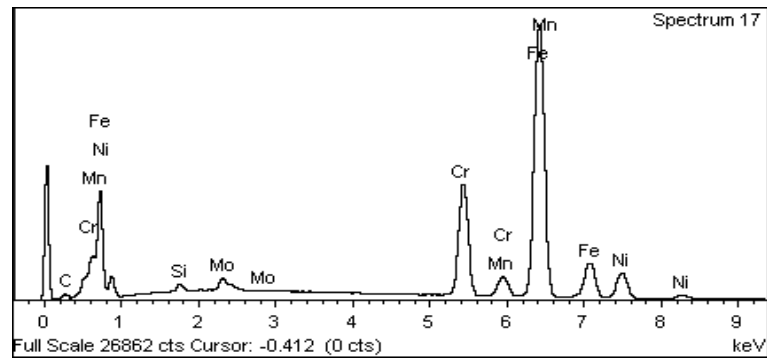


Figura 23 – Espectrografia do metal base

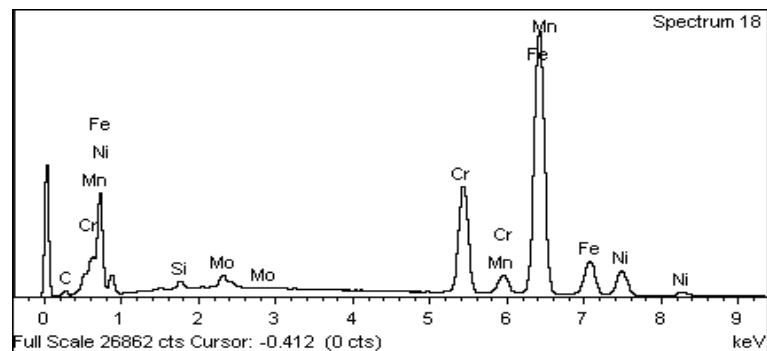


Figura 24 – Espectrografia do metal ressolidificado

5 | CONCLUSÃO

A condição ideal onde se obtém o menor diâmetro de saída, 0,22 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 pois ele absorve parte da energia do laser.

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

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 empescoçamento ou completo fechamento do furo na altura média do mesmo.

REFERÊNCIAS

- (01) ARRIZUBIETA, I. et al, **Internal Characterization and Hole Formation Mechanism**, International Journal of Machine Tools & Manufacture 75, 55-62, 2013.
- (02) SCHULZ, W., EPPELT, U., POPRAWA, R. **Review on laser drilling I. Fundamentals, modeling, and simulation**, Journal of Laser Applications 25, 2013.
- (04) BAGGER, C., OLSEN, F. O. **Pulsed Mode Laser Cutting Of Sheets For Tailored Blanks**, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 115, 1, pp.131-135, 2001.
- (05) KOECHNER, W. **Solid-State Laser Engineering**, Springer-Verlag, 606 pgs, 1988.
- (21) BHARATISH, A. et al, **Characterization of hole circularity and heat affected zone in pulsed CO₂ laser drilling of alumina ceramics**, Optics & Laser Technology 53, 22–32, 2013.
- (22) PETRONIĆ, S. et al, **Analysis of geometrical characteristics of pulsed Nd:YAG laser drilled holes in superalloy nimonic 263 sheets**, Technical Gazette 17, 61-66, 2010.
- (23) BISWAS, R. et al, **A parametric study of pulsed Nd:YAG laser micro-drilling of gamma-titanium aluminide**, Optics & Laser Technology 42, 23–31, 2010.
- (24) TONGYU, W., GUOQUAN, S., **Geometric quality aspects of Nd:YAG laser drilling holes**, Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 442-446, 2008.
- (25) RAJESH, P. et al, **Experimental and parametric studies of Nd:YAG laser drilling on austenitic stainless steel**, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015.
- (26) DÖRING, S. et al, **Hole formation process in ultrashort pulse laser percussion drilling**, Physics Procedia 41, 431–440, 2013.
- (27) BISWAS, R. et al, **A parametric study of pulsed Nd-YAG laser micro-drilling of gamma-titanium**, Optics & Laser Technology 42, 23–31, 2010.

SOBRE A ORGANIZADORA:

Marcia Regina Werner Schneider Abdala: Mestre em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Graduada em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Possui experiência na área de Educação a mais de 06 anos, atuando na área de gestão acadêmica como coordenadora de curso de Engenharia e Tecnologia. Das diferentes atividades desenvolvidas destaca-se a atuação como professora de ensino superior atuando em várias áreas de graduações; professora de pós-graduação *lato sensu*; avaliadora de artigos e projetos; revisora de revistas científicas; membro de bancas examinadoras de trabalhos de conclusão de cursos de graduação. Atuou como inspetora de Aviação Civil, nas áreas de infraestrutura aeroportuária e segurança operacional em uma instituição federal.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-85107-63-5

