

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**MURILO TEIXEIRA RIBAS**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PULSO, VELOCIDADE DE  
TREPANAÇÃO E ENERGIA DE PULSO NA FURAÇÃO À LASER POR  
TREPANAÇÃO DE UMA LIGA DE INCONEL 718**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2015**

**MURILO TEIXEIRA RIBAS**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PULSO, VELOCIDADE DE  
TREPANAÇÃO E ENERGIA DE PULSO NA FURAÇÃO À LASER POR  
TREPANAÇÃO DE UMA LIGA DE INCONEL 718**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná/ Campus Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz

**PONTA GROSSA**

**2015**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Ponta Grossa  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Departamento Acadêmico de Mecânica  
Bacharelado em Engenharia Mecânica



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PULSO, VELOCIDADE DE TREPANAÇÃO E ENERGIA DE PULSO NA FURAÇÃO À LASER POR TREPANAÇÃO DE UMA LIGA DE INCONEL 718**

por

**MURILO TEIXEIRA RIBAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 2 de dezembro de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz**  
Orientador

**Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin**  
Membro Titular

**Prof. Dr. Aldo Braghini Junior**  
Membro Titular

**Prof. Me. Marcos Eduardo Soares**  
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Laercio Javarez Junior**  
Coordenador do Curso

## RESUMO

RIBAS, Murilo Teixeira. **Análise da Influência do Tempo de Pulso, Velocidade de Trepanação e Energia de Pulso na Furação à Laser por Trepanação de uma Liga de Inconel 718**. 2015. 68. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

Os processos de furação por Laser despontam como um dos mais importantes para a fabricação de furos de pequeno diâmetro (entre 0,18 e 2 mm). A fabricação de componentes com furos com pequeno diâmetro é de grande importância para várias áreas como a indústria médica e a indústria aeroespacial. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência dos parâmetros de entrada do processo na produtividade, nas características dimensionais, na zona termicamente afetada e na composição química nos canais dos furos obtidos por furação à Laser por trepanação em corpos de prova de Inconel 718. Foram realizados ensaios de furação à Laser por trepanação em corpos de prova de Inconel 718 utilizando um planejamento composto central para o estudo da variação dos parâmetros de tempo de pulso, velocidade de trepanação e energia de pulso. Através de medições realizadas durante os ensaios, da preparação metalográfica das amostras e da obtenção de imagens por microscopia eletrônica de varredura foi possível avaliar as características de diâmetro dos furos, taxa de remoção de material (TRM) e tamanho de zona termicamente afetada (ZTA). Através da técnica de espectroscopia de energia dispersiva de raios-x foi possível analisar a composição química das regiões internas dos canais e da região de topo próximas aos orifícios. Os aumentos do tempo e energia de pulso causaram o aumento da dilatação de diâmetro, da TRM do processo e do tamanho de ZTA. O aumento da velocidade de trepanação causou diminuição da dilatação de diâmetro, aumento da TRM e não causou efeito significativo sobre o tamanho de ZTA. O oxigênio como gás de assistência no processo de furação à Laser implica na formação de uma camada de óxidos nos canais dos orifícios obtidos e inclusões de óxidos na região da ZTA.

**Palavras-chave:** Furação à Laser. Zona termicamente afetada. Inconel 718.

## ABSTRACT

RIBAS, Murilo Teixeira. **Analysis of Pulse Width, Trepanning Speed and Pulse Energy Influences Obtained by Trepanning Laser Drilling Process of Inconel 718 Sheets.** 2015. 68. Conclusion Course Work of Mechanical Engineering - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2015.

The manufacturing of small diameter holes is essential for many industrial purposes like aerospace components and medical instruments fabrication. The Laser drilling processes are very important for the small diameter holes manufacturing (between 0.18 and 2mm). The objective of this study was to evaluate the influence of the process input parameters on productivity, dimensional characteristics, heat affected zone and chemical composition in the inner surfaces of the holes obtained by Trepanning Laser drilling of Inconel 718 test specimens. Trepanning Laser drilling tests were performed in Inconel 718 specimens using a central composite design to study the variation of the following parameters: pulse width, trepanning speed and pulse energy. Through measurements taken during testing, metallographic sample preparation and imaging by scanning electron microscopy (SEM) was possible to evaluate the diameters of holes obtained, material removal rate (MRR) and heat affected zone (HAZ) size. Through Energy Dispersive Spectroscopy X-ray was possible to analyze the chemical composition of the channel and inner regions of the entrances of holes. Increasing the pulse time and pulse energy causes an increase of the expansion diameter, the MRR process and HAZ size. The increased trepanning speed causes decreased dilatation in diameter, increase of MRR, and has no significant effect on the size of the HAZ. The oxygen as assist gas in laser drilling process involves the formation of an oxide layer in the channels of the holes and oxide inclusions in the HAZ region.

**Keywords:** Laser drilling. Heat Affected Zone. Inconel 718.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática dos fenômenos: (a) emissão espontânea, (b) emissão estimulada e (c) absorção.....	16
Figura 2 - Representação esquemática dos principais componentes da fonte de Laser.....	17
Figura 3 - Técnicas de furação por Laser.....	18
Figura 4 - Técnica de Furação à Laser por Trepanação.....	20
Figura 5 - Variação da refletividade em relação ao comprimento de onda para vários metais.....	21
Figura 6 - Representação esquemática dos mecanismos de remoção de material na furação por Laser pulsado.....	22
Figura 7 - Representação esquemática dos mecanismos de remoção de material no corte (trepanação) por Laser pulsado.....	23
Figura 8 - Representação das características do sistema de lentes.....	24
Figura 9 - Exemplos de formatos de pulso.....	25
Figura 10 – Exemplos de padrões de interferência dos modos transversais.....	26
Figura 11 - Microtrincas presentes na entrada de um orifício produzido por furação à Laser por trepanação.....	28
Figura 12 - Zona termicamente afetada na entrada de um orifício produzido por furação por Laser pulsado.....	29
Figura 13 - (a) respingos e (b) escória em furos obtidos por furação por Laser pulsado.....	29
Figura 14 - Representação das combinações de parâmetros variáveis nos ensaios de furação por Laser.....	33
Figura 15 - Serra de precisão Buehler IsoMet 4000.....	34
Figura 16 - Fluxograma de execução do ensaio de furação à Laser.....	35
Figura 17 - Balança analítica digital Shimadzu AW220.....	35
Figura 18 - Representação da disposição dos furos executados no ensaio de furação à Laser.....	36
Figura 19 - Esquema da sequência de preparação das amostras e análises das características dos orifícios.....	36
Figura 20 - Equipamento utilizado para limpeza por ultrassom.....	37
Figura 21 - Lixadeira e politriz Buehler Beta.....	38
Figura 22 - Microscópio Eletrônico de Varredura Tescan Vega 3.....	39
Figura 23 - Medição do diâmetro de entrada do orifício.....	40
Figura 24 - Medição da ZTA.....	40
Figura 25 - Comparação das dilatações de diâmetro de entrada obtidas na combinação central de parâmetros correspondente aos furos 15, 16 e 17.....	43
Figura 26 - Comparação das dilatações de diâmetro de entrada com relação ao parâmetro de tempo de pulso.....	45
Figura 27 - Comparação das dilatações de diâmetro de entrada com relação ao parâmetro de velocidade de trepanação.....	46

Figura 28 - Comparação das dilatações de diâmetro de entrada com relação ao parâmetro de energia de pulso.....	47
Figura 29 - Comparação das taxas de remoção de material obtidas na combinação central de parâmetros correspondente aos furos 15, 16 e 17. ....	49
Figura 30 - Comparação das taxas de remoção de material com relação ao parâmetro de tempo de pulso.....	51
Figura 31 - Comparação das taxas de remoção de material com relação ao parâmetro de velocidade de trepanação. ....	52
Figura 32 - Comparação das taxas de remoção de material com relação ao parâmetro de energia de pulso.....	53
Figura 33 - Comparação dos tamanhos de zona termicamente afetada obtidos na combinação central de parâmetros correspondente aos furos 15, 16 e 17. ....	55
Figura 34 - Comparação dos tamanhos de zona termicamente afetada com relação ao parâmetro de tempo de pulso.....	56
Figura 35 - Imagens da zona termicamente afetada da região de entrada dos furos 9 (a) e 10 (b) obtidas por microscópio eletrônico de varredura. ....	57
Figura 36 - Comparação dos tamanhos de zona termicamente afetada com relação ao parâmetro de velocidade de trepanação. ....	58
Figura 37 - Imagens da zona termicamente afetada da região de entrada dos furos 11 (a) e 12 (b) obtidas por microscópio eletrônico de varredura. ....	59
Figura 38 - Comparação dos tamanhos de zona termicamente afetada com relação ao parâmetro de energia de pulso.....	60
Figura 39 - Imagens da zona termicamente afetada da região de entrada dos furos 13 (a) e 14 (b) obtidas por microscópio eletrônico de varredura. ....	61
Figura 40 - Regiões da borda do furo 14 analisadas por espectroscopia de energia dispersiva de raios-X. ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades Termo físicas do Inconel 718 .....	30
Tabela 2 – Parâmetros fixos relacionados ao equipamento utilizado: KLS 246 Lasag .....	31
Tabela 3 - Combinações de parâmetros variáveis das furações realizadas no ensaio. ....	32
Tabela 4 - Efeitos principais e de interação na dilatação do diâmetro de entrada dos orifícios.....	49
Tabela 5 - Efeitos principais e de interação na taxa de remoção de material. ....	54
Tabela 6 - Efeitos principais e de interação na zona termicamente afetada. ....	61
Tabela 7 - Composição química das regiões avaliadas por EDS.....	63

## LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

EDS	<i>Energy-dispersive X-ray Spectroscopy</i>
Laser	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Nd:YAG	<i>Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet</i>
TEM	<i>Transverse Electromagnetic Modes</i>
TRM	Taxa de Remoção de Material
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ZTA	Zona Termicamente Afetada

## LISTA DE SÍMBOLOS

$t_p$	Tempo de pulso
$v_t$	Velocidade de trepanação
$e_p$	Energia de pulso
$d_f$	Diâmetro do ponto focal
$f_l$	Comprimento de foco
$\theta$	Ângulo total de divergência do feixe
$P_p$	Potência de pico
$\alpha$	Ângulo de conicidade do orifício
$d_{ent}$	Diâmetro de entrada do orifício
$d_{saída}$	Diâmetro de saída do orifício
$e$	Espessura do material
$\rho_s$	Densidade teórica
$\rho_1$	Densidade real
$T_f$	Temperatura de fusão
$T_v$	Temperatura de vaporização
$c_{ps}$	Calor específico à pressão constante do sólido
$c_{pl}$	Calor específico à pressão constante do líquido
$L_f$	Calor latente de fusão
$L_v$	Calor latente de vaporização
$X_f$	Matriz de parâmetros do planejamento fatorial
$X_a$	Matriz de parâmetros do planejamento axial
$Y_{k \rightarrow n}$	Matriz de resultados dos furos $k$ à $n$
$E_f$	Matriz de efeitos relativos ao planejamento fatorial
$E_a$	Matriz de efeitos relativos ao planejamento axial

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Objetivo geral.....	14
1.2.2 Objetivos específicos .....	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>15</b>
2.1 INTRODUÇÃO À RADIAÇÃO LASER .....	15
2.1.1 Excitação, Absorção, Emissão Espontânea e Emissão Estimulada .....	15
2.1.2 Inversão de População e Amplificação .....	16
2.2 PROCESSO DE FURAÇÃO POR LASER.....	17
2.2.1 Técnicas de Furação à Laser.....	18
2.2.1.1 Furação por pulso único.....	18
2.2.1.2 Furação por Laser pulsado .....	19
2.2.1.3 Furação por trepanação.....	19
2.2.1.4 Furação helicoidal .....	20
2.2.2 Interação do Laser com os Materiais e Mecanismos de Remoção de Material 20	
2.2.3 Principais Parâmetros do Processo .....	23
2.2.3.1 Gás de assistência.....	23
2.2.3.2 Características das Lentes.....	23
2.2.3.3 Parâmetros do pulso de Laser .....	24
2.2.3.4 Velocidade tangencial do bocal.....	26
2.2.4 Defeitos Resultantes.....	26
2.2.4.1 Defeitos geométricos e dimensionais.....	26
2.2.4.2 Rugosidade do canal do orifício e micro trincas.....	27
2.2.4.3 Camada refundida, zona termicamente afetada (ZTA) .....	28
2.2.4.4 Respingos e escória.....	29
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS .....	30
3.2 CARACTERÍSTICAS E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	33
3.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE FURAÇÃO À LASER.....	34
3.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	36
3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X .....	38
3.6 MEDIÇÕES DOS DIÂMETROS DE INÍCIO E FIM DE USINAGEM E TAMANHO DA ZTA .....	39
3.7 CÁLCULO DA TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL E DILATAÇÃO DOS ORIFÍCIOS .....	41
3.8 CÁLCULO DOS EFEITOS PRINCIPAIS E DE INTERAÇÃO.....	41

<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>43</b>
4.1 ANÁLISE DE DILATAÇÃO DE DIÂMETRO DE INÍCIO DE USINAGEM .....	43
4.2 ANÁLISE DA TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL .....	49
4.3 ANÁLISE DE TAMANHO DE ZONA TERMICAMENTE AFETADA .....	54
4.4 ANÁLISE DE COMPOSIÇÃO POR ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X .....	62
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A fabricação de componentes com furos com pequeno diâmetro é de grande importância para várias áreas como a indústria médica e a indústria aeroespacial. Os processos de furação por Laser despontam como um dos mais importantes para a fabricação de furos de pequeno diâmetro (entre 0,18 e 2mm).

Na indústria médica a aplicação da furação à Laser passa por vários componentes como agulhas de biópsia, sondas e filtros. São componentes delicados que exigem alta precisão em sua fabricação e têm grande responsabilidade em sua aplicação.

Na indústria aeroespacial a aplicação mais comum da furação à Laser é a fabricação de furos de refrigeração em componentes de turbinas à gás. A eficiência e potência de saída de uma instalação de potência à gás aumenta com o aumento de temperatura de entrada na turbina. Esse fato levou ao desenvolvimento de turbinas com temperatura de trabalho cada vez maior. As turbinas modernas operam com fluidos em temperaturas superiores às temperaturas de fusão dos materiais empregados em seus componentes, então necessitando da aplicação de métodos de resfriamento dos seus componentes. Os três métodos de resfriamento utilizados em componentes de turbinas são: o resfriamento impingente, o resfriamento por passagem interna e o resfriamento por filme externo. Esses três métodos envolvem a utilização de furos de refrigeração por onde escoar parte do ar da etapa de compressão.

Para a execução dos furos pelo processo de furação por Laser é necessário conhecer a influência dos parâmetros de entrada do processo no desempenho do processo e nas características dos furos obtidos. Este trabalho tem o intuito de realizar uma análise das características dos orifícios e da sua relação com os parâmetros de entrada do processo.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Os sistemas de potência à gás são de grande importância e utilizados tanto para instalações de geração de energia elétrica quanto para propulsão aeroespacial. O desenvolvimento dos processos de furação de componentes de turbinas é

essencial para fabricação e reparo desses componentes para obter produtividade e qualidade satisfatórias. Dentre os processos de maior relevância nesta aplicação está a furação por Laser. Sendo assim o conhecimento da influência dos parâmetros de entrada do processo nas características dos furos é essencial para obter o máximo de desempenho do processo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência dos parâmetros de entrada do processo na produtividade e nas características dos furos obtidos por furação à Laser por trepanação em corpos de prova de Inconel 718.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência dos parâmetros de tempo de pulso, velocidade de trepanação e energia de pulso na dilatação de diâmetro de entrada e no tamanho da ZTA dos furos produzidos pelo processo de furação à Laser por trepanação em chapas de Inconel 718.

- Avaliar a influência dos parâmetros de tempo de pulso, velocidade de trepanação e energia de pulso na taxa de remoção de material do processo de furação à Laser por trepanação em chapas de Inconel 718.

- Avaliar a presença de óxidos na camada interna dos orifícios pela utilização do oxigênio como gás de assistência no processo de furação à Laser por trepanação e possíveis alterações de composição química do material na camada termicamente afetada pelo processo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 INTRODUÇÃO À RADIAÇÃO LASER

Conforme citado por Hecht, a palavra Laser é um acrônimo de "*light amplification by stimulated emission of radiation*", que significa radiação de luz amplificada por emissão estimulada (1992).

A radiação Laser é caracterizada por um alto grau de monocromaticidade, coerência, direcionalidade e brilho (SVELTO, 2011). Além dessas características pode fornecer ampla faixa de potência de saída contínua (de microwatts até kilowatts), alta potência de pico (terawatts) e energia de pulso (centenas de joules) por pulso nos casos de laser de saída pulsada e capacidade de ser focado em um pequeno ponto focal com difração limitada (da ordem do comprimento de onda da luz) (LUXON; PARKER, 1985).

É conveniente advertir que o termo Laser é utilizado para se referir à radiações eletromagnéticas que se situam no espectro entre as regiões de ultravioleta e infravermelho (comprimento de onda entre 0,1 e 1000 $\mu\text{m}$ ), enquanto o termo *Maser* é utilizado para se referir a um dispositivo que opera com os mesmos princípios do Laser em radiações que se situam na região de micro-ondas do espectro eletromagnético (LUXON; PARKER, 1985).

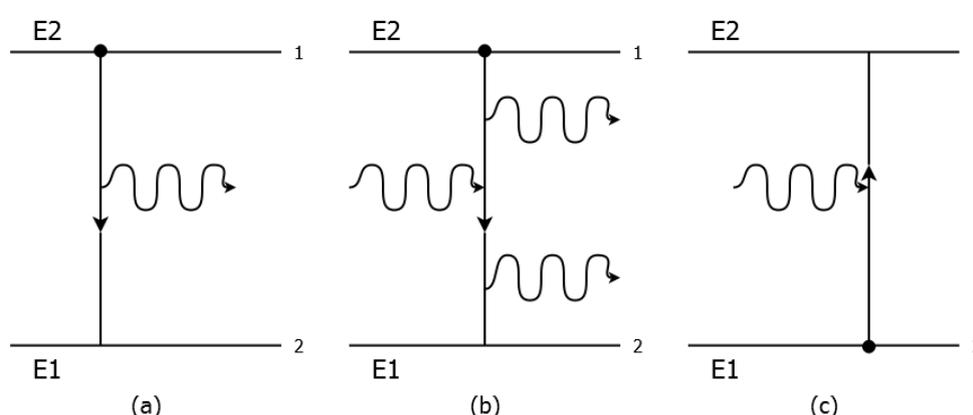
#### 2.1.1 Excitação, Absorção, Emissão Espontânea e Emissão Estimulada

O Laser explora três fenômenos fundamentais que ocorrem quando ondas eletromagnéticas interagem com a matéria sendo estes: a emissão espontânea, a emissão estimulada e a absorção (SVELTO, 2011).

A excitação consiste no processo de elevação da energia de um átomo de um nível mais baixo para um nível mais alto (HECHT, 1992). Existem vários mecanismos de excitação possíveis, entre eles: a absorção de fótons, colisões entre elétrons e átomos, reações químicas, aceleração de elétrons, etc. (HECHT, 1992).

Átomos excitados podem liberar seu excesso de energia por processos não radioativos como a colisão com outros átomos ou emitindo um fóton (HECHT, 1992). A emissão de um fóton pode ser espontânea (Figura 1a) ou estimulada (Figura 1b),

sendo que no primeiro caso ocorre sem intervenção externa quando um átomo vai para um nível mais baixo de energia após um tempo de decaimento (HECHT, 1992). Na emissão estimulada um fóton passando suficientemente perto de um átomo em estado excitado fazendo com que este passe por uma transição eletromagnética antes que a emissão ocorra espontaneamente (LUXON; PARKER, 1985). A absorção (Figura 1c) ocorre quando um fóton com diferença de energia igual a diferença entre dois níveis de energia é absorvido e gerando assim excitação (LUXON; PARKER, 1985).



**Figura 1 - Representação esquemática dos fenômenos: (a) emissão espontânea, (b) emissão estimulada e (c) absorção.**

**Fonte: adaptado de (HECHT, 1992)**

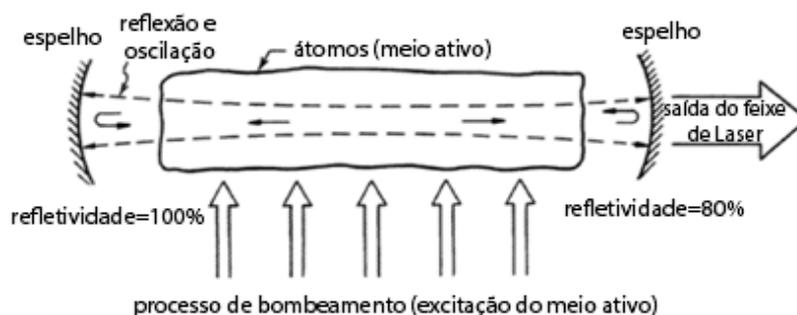
### 2.1.2 Inversão de População e Amplificação

Quando a maioria dos átomos do material do meio ativo está em um nível mais baixo de energia (representado por E1 na Figura 1) o meio ativo se comporta como absorvedor enquanto está sendo excitado (SVELTO, 2011). Para que a emissão estimulada ocorra é necessário que o meio ativo esteja em um estado de inversão de população em que a maioria dos átomos foi excitado à um estado de energia mais elevado (representado por E2 na Figura 1) (HECHT, 1992).

A geração de Laser inicia com o estabelecimento de um estado de inversão de população de um meio ativo por meio de excitação (LUXON; PARKER, 1985). Fótons são emitidos espontaneamente e viajam através do meio ativo podendo estimular os átomos da vizinhança provocando o fenômeno de emissão estimulada (LUXON; PARKER, 1985). Um ressonador óptico promove o fenômeno de

amplificação (HECHT, 1992) e uma saída extremamente unidirecional (LUXON; PARKER, 1985).

A composição básica de uma fonte de Laser consiste em um ressonador formado por um par de espelhos arranjados em paralelo sendo um deles totalmente refletivo e outro parcialmente entre os quais está o meio ativo (HECHT, 1993). A estimulação ocorre à medida que a luz oscila entre os espelhos e luz que escapa pelo espelho parcialmente refletivo formará o feixe de luz Laser (HECHT, 1993). O processo de bombeamento que é utilizado para iniciar a inversão de população no meio ativo. A fonte de energia é composta por lâmpadas de *flash* ou Laser de diodo para meios ativos sólidos enquanto que para meios ativos gasosos a energia elétrica é utilizada (SVELTO, 2011). A Figura 2 é uma representação esquemática dos principais componentes de uma fonte de Laser.



**Figura 2 - Representação esquemática dos principais componentes da fonte de Laser.**  
**Fonte: adaptado de (SIEGMAN, 1986)**

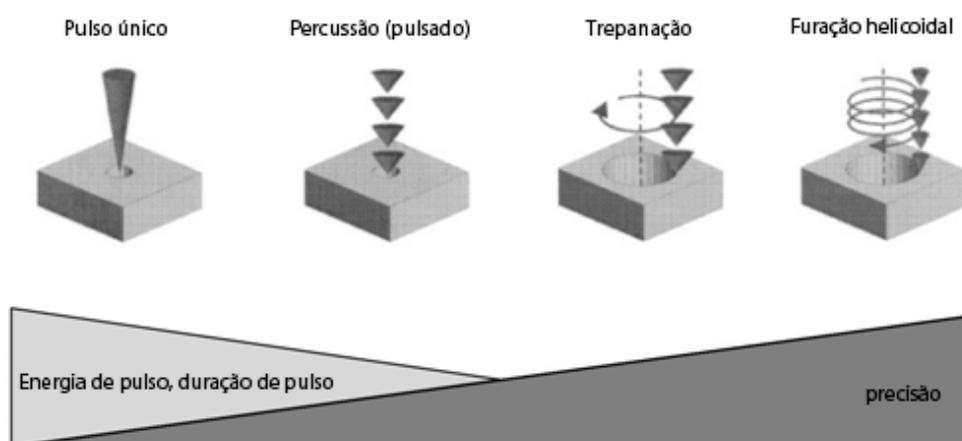
## 2.2 PROCESSO DE FURAÇÃO POR LASER

A furação por Laser é um processo de usinagem que utiliza a fusão e vaporização do material da peça usando um feixe de laser de alta potência (MAJUMDAR; MANNA, 2011). Os tipos de Laser mais comumente utilizados em são os de meio ativo de CO<sub>2</sub> ou Nd:YAG (LUXON; PARKER, 1985) sendo o segundo tipo mais frequentemente utilizado que o primeiro (MAINI, 2013).

Cabe salientar que a furação designa a operação em que o diâmetro do furo ou padrão de corte é menor que a espessura do material (MAINI, 2013).

## 2.2.1 Técnicas de Furação à Laser

As técnicas de furação por Laser mais utilizadas são: a furação por pulso único, a furação por feixe pulsado (também designada furação por percussão) e a furação por trepanação (MAINI, 2013). A técnica desenvolvida mais recentemente com o objetivo de melhorar a qualidade dos orifícios foi a furação helicoidal (MAINI, 2013). A Figura 3 mostra um esquema que relaciona as técnicas de furação por Laser com os parâmetros de energia de pulso, duração e precisão do processo.



**Figura 3 - Técnicas de furação por Laser**  
 Fonte: adaptado de (DAUSINGER; HUGEL; KONOV, 2003)

### 2.2.1.1 Furação por pulso único

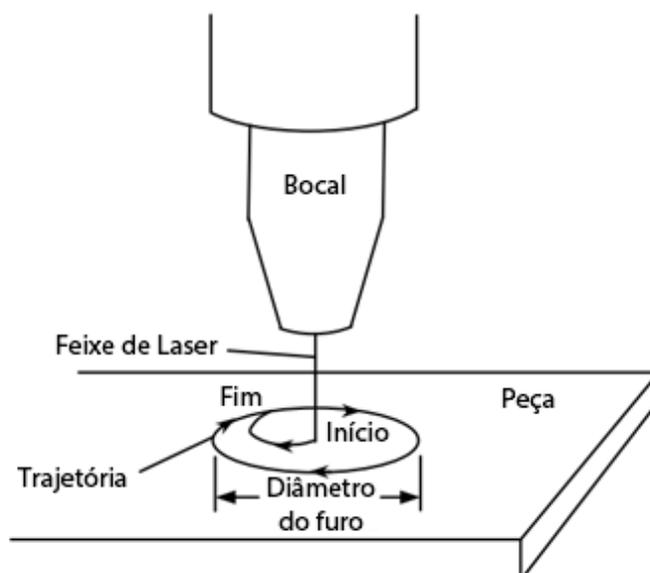
A furação de pulso único utiliza um único pulso de laser para produzir o orifício na peça sendo dos métodos de microfuração o que possui maior energia e duração do pulso (READY; FARSON, 2001). Por essa técnica obtém-se pior qualidade do furo quando comparada aos outros métodos (READY; FARSON, 2001). É uma técnica utilizada em microfurações de pequeno diâmetro e em peças com pequena espessura quando a produtividade é mais importante que a qualidade obtida (MISAWA; JUODKAZIS, 2006). A furação por pulso único é uma técnica de furação de alta velocidade sendo capaz de produzir furos cegos ou passantes (MAINI, 2013).

### 2.2.1.2 Furação por Laser pulsado

Na furação por Laser pulsado o bocal e a peça estão estacionários e uma série de pulsos curtos de laser é direcionada ao mesmo ponto da peça para a realização do orifício (MAINI, 2013). Cada pulso de laser contribui para remoção de uma certa quantidade de material sendo o número de pulsos determinado pela espessura do material e energia de pulso (BANDYOPADHYAY et al. 2002). Em comparação com o processo de pulso único a técnica de Laser pulsado pode utilizar menor energia de pulso (SONA, 1987) e produzir furos com maior relação de profundidade por diâmetro (100 vezes para furos passantes e 20 vezes para furos cegos) (READY; FARSON, 2001). A furação por Laser pulsado é usada para fabricação de furos na faixa de 20 a 1200  $\mu\text{m}$  (MAINI, 2013).

### 2.2.1.3 Furação por trepanação

Na técnica de furação por trepanação o processo é iniciado com a produção de um furo guia central pela técnica de Laser pulsado e em seguida o bocal de trabalho (ou a peça) movimenta-se até o diâmetro de furação e realiza o corte no diâmetro de furo desejado (GIERING; BECK; BAHNMULLER, 2000). A grande vantagem desse método é a possibilidade de produzir furos de diâmetro maior que o diâmetro do feixe de laser (GIERING; BECK; BAHNMULLER, 1987). Deve-se levar em conta que esse processo é incapaz de produzir furos cegos, ou seja, é possível somente a produção de furos passantes (READY; FARSON, 2001). Observa-se que os furos obtidos por trepanação têm menos defeitos metalúrgicos e melhor circularidade devido ao fato que este processo requer menor energia por pulso (MISAWA; JUODKAZIS, 2001). A Figura 4 é uma representação do movimento da técnica de furação por trepanação.



**Figura 4 - Técnica de Furação à Laser por Trepanação**  
**Fonte: adaptado de (CORCORAN et al. 2002)**

#### 2.2.1.4 Furação helicoidal

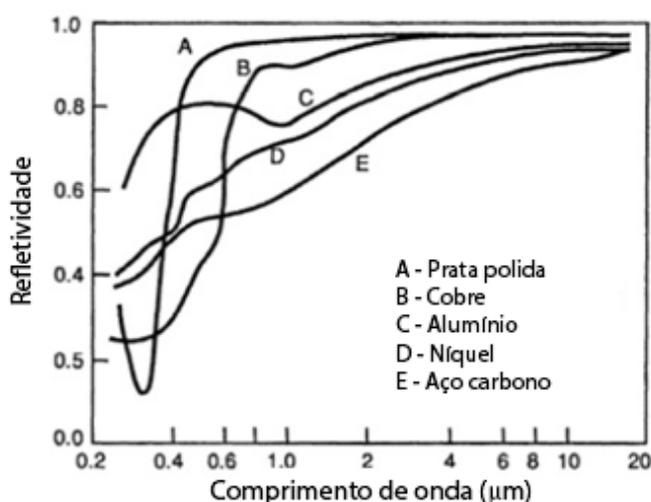
A técnica de furação helicoidal é um processo de ablação do material onde o bocal movimenta-se em espiral com pequenos passos de avanço (DAUSINGER; HUGELI; KONOVA, 2003). Com essa técnica é possível obter furos com respingos e camada termicamente afetada muito reduzidos, mas é uma técnica mais lenta que as descritas anteriormente necessitando de maior desenvolvimento para sua aplicação (DAUSINGER; HUGELI; KONOVA, 2003).

#### 2.2.2 Interação do Laser com os Materiais e Mecanismos de Remoção de Material

Um feixe de laser incidente em um corpo é absorvido, transmitido e refletido segundo as propriedades ópticas do material (VON ALLMEN; BLATTER, 1995). Em materiais opacos pode-se desconsiderar a ocorrência de transmissão, neste caso toda a energia do feixe é absorvida ou refletida pelo corpo (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2008). A absorvidade e a refletividade são parâmetros importantes que indicam a capacidade do material de absorver a energia do feixe de laser (VON ALLMEN; BLATTER, 1995). Esses parâmetros dependem não somente das características ópticas do material, mas também de características da radiação eletromagnética, das características da superfície do corpo, do ângulo de incidência

do feixe, da polarização do feixe de laser e da temperatura (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2008).

A Figura 5 mostra a variação da refletividade de metais com diferentes comprimentos de onda da radiação eletromagnética. Observa-se que os metais em geral tendem a ter maior absortividade com menores comprimentos de onda (READY, 1997). Desse fato conclui-se que do ponto de vista de eficiência energética as fontes de laser de Nd:YAG que possuem em torno de 1,064  $\mu\text{m}$  de comprimento de onda são mais apropriadas para o processamento de materiais metálicos que as fontes de  $\text{CO}_2$  que por sua vez possuem comprimentos de onda de 10,6  $\mu\text{m}$  (READY, 1997).



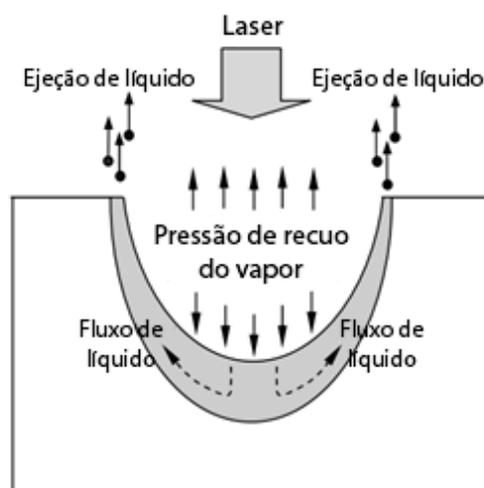
**Figura 5 - Variação da refletividade em relação ao comprimento de onda para vários metais.**  
**Fonte: adaptado de (READY, 1997)**

A radiação incidente absorvida pelo material é transformada em calor e transferida para o corpo por condução. À medida que este processo ocorre a temperatura na região de interação entre laser e peça aumenta causando a fusão e posteriormente a vaporização do material processado (VON ALLMEN; BLATTER, 1995).

A interação de um feixe de Laser que possui densidade de potência na faixa de  $10^6$   $\text{W}/\text{cm}^2$  ou maior é capaz de produzir a rápida vaporização do material (na faixa de microssegundos) e formação de uma frente de vaporização que se move em direção ao material seguida por uma frente de líquido (LUXON; PARKER, 1985).

No processo de furação por Laser pulsado existem basicamente dois mecanismos de remoção de material: a vaporização e a ejeção de líquido (VON

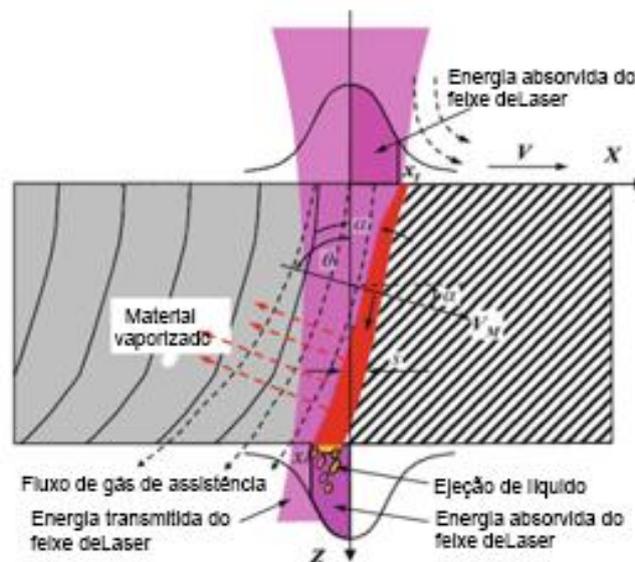
ALLMEN; BLATTER, 1995). A vaporização ocorre quando a temperatura de ebulição do material é atingida despreendendo o vapor da superfície de material fundido (VON ALLMEN; BLATTER, 1995). À medida que a vaporização ocorre é formada uma cratera na superfície do material onde a pressão de vapor aumentará (YLBAS, 1995). A alta pressão do vapor no interior da cavidade faz com que o líquido movendo-o pelas paredes do orifício até que seja ejetado (YLBAS, 1995). A Figura 6 ilustra um esquema desse processo.



**Figura 6 - Representação esquemática dos mecanismos de remoção de material na furação por Laser pulsado.**  
**Fonte: Adaptado de (SUCHATAWAT, 2011)**

Além dos mecanismos descritos anteriormente a remoção de material pode ocorrer pela ejeção de material fundido para fora da cavidade por meio da explosão de bolhas de vapor nucleadas abaixo da superfície de líquido (YLBAS, 1995). Apesar desse mecanismo proporcionar um processo mais eficiente, este torna o controle dos parâmetros do processo mais difícil para obter a dimensão de furo requerida (YLBAS, 1995).

Se consideramos o processo de corte (como ocorre na furação por trepanação) o gás de assistência tem a função de arrastar o material fundido para saída do orifício (LUXON; PARKER, 1985). Na maioria das aplicações o gás de assistência utilizado é o oxigênio devido à grande quantidade de calor cedido pela oxidação do material (de 60 a 70% da energia de corte é fornecida pela oxidação na furação de aço carbono) (LUXON; PARKER, 1985). A Figura 7 é uma representação dos mecanismos de remoção de material durante o movimento de trepanação.



**Figura 7 - Representação esquemática dos mecanismos de remoção de material no corte (trepanação) por Laser pulsado.**

Fonte: adaptado de (POWELL; PETRING; KUMAR, 2008)

### 2.2.3 Principais Parâmetros do Processo

#### 2.2.3.1 Gás de assistência

No processo de furação o gás de assistência em geral é utilizado um fluxo de gás de assistência coaxial ao feixe de laser. Os objetivos da utilização do gás de assistência são: facilitar a remoção de material, proteger a parte a parte ótica do equipamento dos detritos ejetados no processo, remover a camada de reformação no topo e dentro da cavidade e promover um arrefecimento da região de interação (EL-HOFY, 2005). O oxigênio puro causa rápida oxidação e liberação de calor (por se tratar de uma reação exotérmica) ocasionando aumento da eficiência do processo (EL-HOFY, 2005).

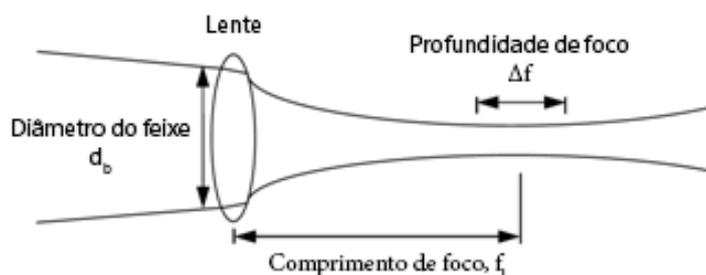
#### 2.2.3.2 Características das Lentes

O diâmetro de ponto focal, a posição e profundidade de foco são os dois principais parâmetros do processo de furação à Laser. Estes parâmetros estão diretamente relacionados à distribuição de intensidade do feixe e do diâmetro do ponto focal projetado na superfície do material (WILSON; HAWKES, 1987). A

relação entre o comprimento e a profundidade de foco é dada pela equação (WILSON; HAWKES, 1987):

$$d_f = f_l \theta$$

onde  $d_f$  é o diâmetro do ponto focal,  $f_l$  é o comprimento de foco e  $\theta$  é o ângulo total de divergência do feixe. A Figura 8 é uma representação das principais características do sistema óptico de focagem do feixe.



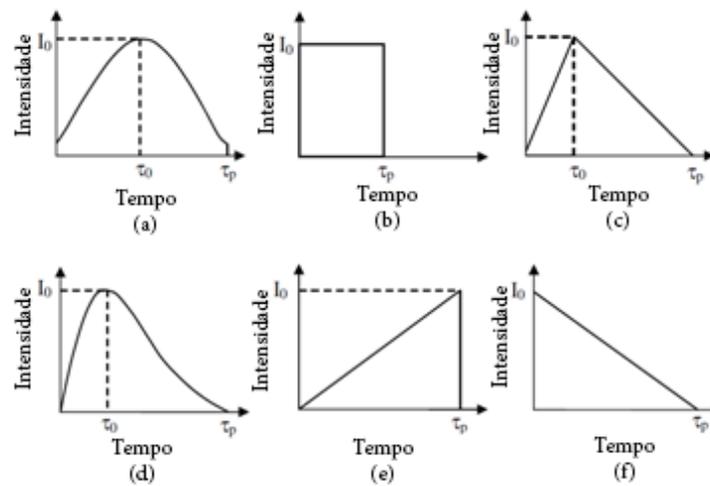
**Figura 8 - Representação das características do sistema de lentes.**  
**Fonte: Adaptado de (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008)**

Usualmente em furação por Laser a posição do foco está na superfície do material ou abaixo da superfície no interior do material (WILSON; HAWKES, 1987).

### 2.2.3.3 Parâmetros do pulso de Laser

O processo de furação por Laser é resultado da interação de um feixe de Laser com o material, então as características do feixe estão entre os parâmetros mais importantes para o processo. Entre estes parâmetros estão: a potência de pico, a potência média, a frequência de pulso, a energia de pulso, o tempo de pulso, o formato de pulso, comprimento de onda do feixe e o modo transversal eletromagnético.

O parâmetro de formato de pulso refere-se ao padrão do perfil temporal da intensidade do feixe de Laser. Na Figura 9 estão alguns exemplos de formatos de pulso possíveis. No instante de intensidade máxima do feixe obtida no ciclo do formato de pulso utilizada a potência do feixe é igual à potência de pico. A energia de pulso é a energia total emitida pelo feixe durante um ciclo de formato de pulso. O tempo de pulso está compreendido dentro do tempo de ciclo de intensidade do feixe onde a intensidade não é nula. O valor médio de potência ao longo do ciclo de intensidade do feixe é definido como é a potência média.



**Figura 9 - Exemplos de formatos de pulso.**  
**Fonte: adaptado de (LIN; SHI, 2007)**

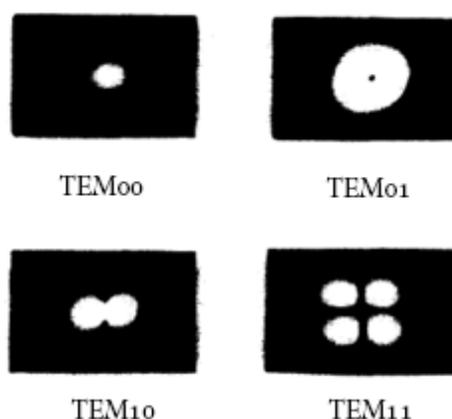
Para uma fonte de Laser com formato de pulso retangular a relação entre potência de pico, energia de pulso e tempo de pulso é dada por:

$$P_p = \frac{e_p}{t_p}$$

sendo:  $P_p$  a potência de pico,  $e_p$  a energia de pulso e  $t_p$  o tempo de pulso.

Para materiais opacos a transmissividade é nula sendo a refletividade a única característica que descreve a quantidade de energia do feixe incidente absorvida (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2008). O comprimento de onda do feixe afeta diretamente a refletividade do material assim como o ângulo de incidência do feixe (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2008).

À medida que a radiação de Laser é amplificada, pode ter direções de amplificação criando um caminho fechado. Esse efeito causa a ocorrência padrões de "pontos de luz" na secção transversal do feixe que são designados por modos transversais (TEM - *transverse electromagnetic modes*) (WILSON; HAWKES, 1987). O modo TEM<sub>00</sub> (também conhecido por distribuição gaussiana) é utilizado na grande maioria dos casos em furação por Laser (WILSON; HAWKES, 1987). A Figura 10 ilustra alguns exemplos de padrões de interferência provocados pelos modos transversais.



**Figura 10 – Exemplos de padrões de interferência dos modos transversais.  
Fonte: adaptado de (WILSON; HAWKES, 1987)**

#### 2.2.3.4 Velocidade tangencial do bocal

A velocidade de trepanação é a velocidade tangencial relativa entre a peça e o bocal durante o movimento de trepanação. Este parâmetro somente está presente quando as técnicas de trepanação ou helicoidal são utilizadas. O parâmetro de velocidade tangencial é um dos mais importantes parâmetros para definir o tempo de processo, pois define o tempo em que o movimento de trepanação ocorrerá.

Existem estudos como os de (CHIEN; HOU, 2007) que buscam relacionar a influência desse parâmetro nas características de qualidade dos orifícios. Sendo assim, a determinação da velocidade de trepanação passa necessariamente por uma análise que leva em conta a qualidade requerida pelos orifícios e a produtividade desejada.

#### 2.2.4 Defeitos Resultantes

##### 2.2.4.1 Defeitos geométricos e dimensionais

Os dois principais defeitos geométricos e dimensionais são a dilatação de diâmetro e a conicidade dos orifícios. A dilatação de diâmetro pode ser compreendida como a diferença entre o diâmetro real obtido e o diâmetro de ponto focal para furação por Laser pulsado ou a diferença entre o diâmetro real obtido e o diâmetro externo do movimento de trepanação para furação à Laser por trepanação (MCNALLY; FOLKES; PASHBY, 2004). A conicidade do orifício resulta da diferença

de diâmetros de início de usinagem (entrada) e fim de usinagem (saída) causando o formato não cilíndrico no canal do orifício (MCNALLY; FOLKES; PASHBY, 2004). O ângulo de conicidade pode ser calculado pela equação abaixo:

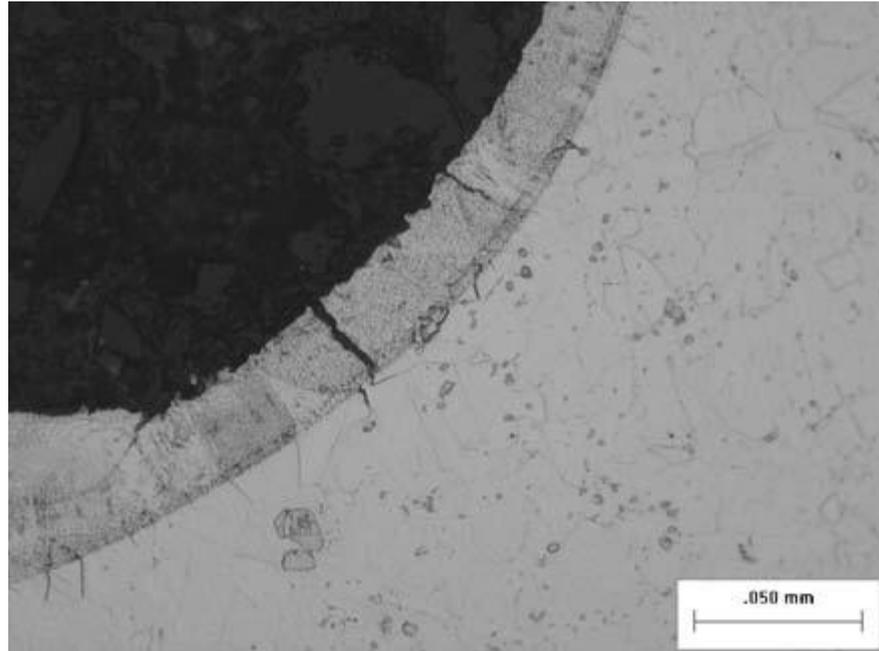
$$\alpha = \arctan\left(\frac{d_{ent} - d_{saída}}{2e}\right)$$

sendo:  $\alpha$  o ângulo de conicidade do orifício,  $d_{ent}$  o diâmetro de entrada do orifício,  $d_{saída}$  o diâmetro de saída do orifício e  $e$  a espessura do material.

#### 2.2.4.2 Rugosidade do canal do orifício e micro trincas

A rugosidade do canal é uma característica da superfície interna induzida pelo processo de furação à Laser. Essa característica é resultado do processo de solidificação da camada refundida, que é afetada diretamente pelos parâmetros do processo.

Da interação entre o feixe de Laser e o material da peça surgem tensões residuais entre material base e camada refundida e induzem a formação de microtrincas na superfície do canal. Em geral, as microtrincas se iniciam na camada refundida, e podem se propagar para o material base causando o enfraquecimento do componente. A Figura 11 é uma micrografia que ilustra a presença de microtrincas na região de entrada de um orifício obtido por furação à Laser.



**Figura 11 - Microtrincas presentes na entrada de um orifício produzido por furação à Laser por trepanação.**

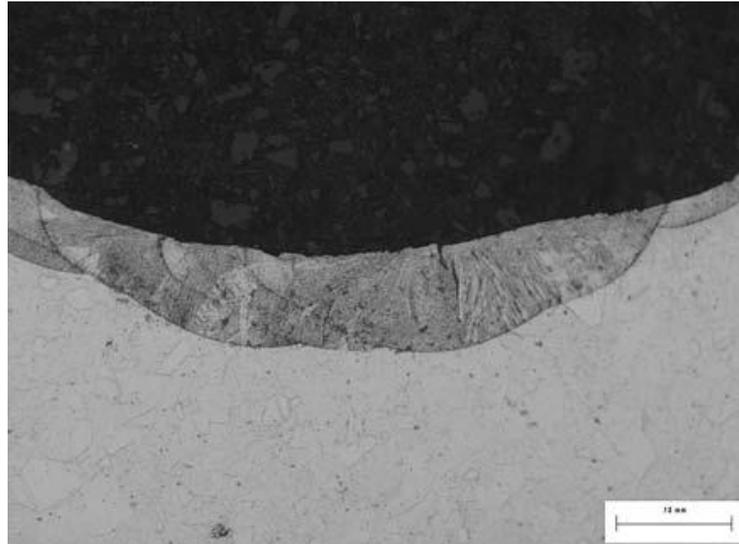
**Fonte: adaptado de (CHIEN; HOU, 2007)**

#### 2.2.4.3 Camada refundida, zona termicamente afetada (ZTA)

Por se tratar de um processo térmico, a furação por Laser induz a efeitos metalúrgicos adversos durante o processo. Entre esses efeitos estão a formação da zona (ou camada) termicamente afetada (ZTA), da camada refundida e de microtrincas no canal do orifício.

A ZTA é a área dos arredores do canal do orifício não removida pelo processo, mas onde ocorreu a alteração da microestrutura e propriedades pelo calor fornecido pelo feixe de Laser. A condutividade do material e a quantidade de calor cedido pelo feixe são fatores determinantes para a formação da ZTA.

A camada refundida é a região dos arredores do canal que sofreu ressolidificação no processo não sendo removida do material. Esta pode ser compreendida como parte da zona termicamente afetada (RYKALIN; UGLOV; KOKORA, 1978). A Figura 12 é uma micrografia que ilustra a camada termicamente afetada pelo processo de furação à Laser.

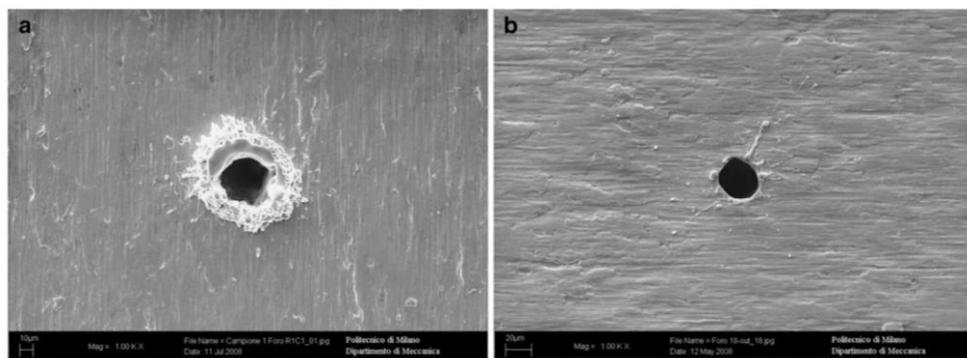


**Figura 12 - Zona termicamente afetada na entrada de um orifício produzido por furação por Laser pulsado.  
Fonte: adaptado de (CHIEN; HOU, 2007)**

#### 2.2.4.4 Respingos e escória

Os respingos são outro efeito da interação do feixe de Laser com o material da peça. Estes são formados pela parte do material fundido que é expelida para fora da cavidade durante o processo e depositado e ressolidificado ao redor da região de entrada do orifício (RYKALIN; UGLOV; KOKORA, 1978).

A escória é formada nas bordas da saída do canal do orifício e é formada por material ressolidificado no processo. A escória está presente em menor quantidade e possui menor adesão ao material de base que os respingos (RYKALIN; UGLOV; KOKORA, 1978). A Figura 13 é uma micrografia que ilustra a presença de respingos e escória em um furo obtido por furação à Laser.



**Figura 13 - (a) respingos e (b) escória em furos obtidos por furação por Laser pulsado.  
Fonte: adaptado de (BIFFI et al. 2011)**

### 3 METODOLOGIA

Com o objetivo de analisar a influência dos parâmetros do processo de furação à Laser foram realizados ensaios de furação utilizando o planejamento composto central descrito na próxima seção.

As características do processo e dos orifícios analisadas foram a dilatação de diâmetro, a taxa de remoção de material, o tamanho de zona termicamente afetada e a análise qualitativa da presença de óxidos nos canais dos orifícios. Para a análise das características dos orifícios foram utilizadas as técnicas de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva de raios-x. Para a análise do tamanho de zona termicamente afetada foi necessário realizar a preparação metalográfica das amostras descrita nas próximas seções.

Foram feitos os cálculos dos efeitos dos parâmetros para a verificação do grau de influência dos parâmetros variáveis de entrada nos resultados.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

O material escolhido para os corpos de prova foi o Inconel 718 devido à sua larga utilização em aplicações onde é exigida resistência à altas temperaturas e aplicação de furos de refrigeração. As propriedades termofísicas do Inconel 718 estão descritos na Tabela 1:

**Tabela 1 - Propriedades Termo físicas do Inconel 718**

<b>Propriedades termo físicas</b>	<b>Inconel 718</b>
$\rho_s(\text{kg.m}^{-3})$	$8,90 \times 10^3$
$\rho_l(\text{kg.m}^{-3})$	$7,90 \times 10^3$
$T_f(\text{K})$	1728
$T_v(\text{K})$	3188
$C_{ps}(\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1})$	452
$C_{pl}(\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1})$	620
$L_f(\text{J.kg}^{-1})$	$2,92 \times 10^5$
$L_v(\text{J.kg}^{-1})$	$6,40 \times 10^6$
<b>Energia específica teórica para fusão (<math>\text{J.m}^{-3}</math>)</b>	$0,83 \times 10^{10}$
<b>Energia específica teórica para vaporização (<math>\text{J.m}^{-3}</math>)</b>	$6,61 \times 10^{10}$

Fonte: Adaptado de (BANDYOPADHYAY et al. 2002)

O meio ativo do da fonte de Laser utilizada será o Nd:YAG e a técnica utilizada será a furação à Laser por trepanação. O diâmetro externo do movimento de trepanação é de 0,9 mm. A Tabela 2 mostra os parâmetros do processo que se manterão constantes durante todo o ensaio.

**Tabela 2 – Parâmetros fixos relacionados ao equipamento utilizado: KLS 246 Lasag**

<b>Item</b>	<b>Parâmetros</b>
<b>Tipo do Laser</b>	Nd:YAG
<b>Comprimento de Onda (nm)</b>	1064
<b>Técnica de furação</b>	Trepanação
<b>Gás de Assistência</b>	O <sub>2</sub>
<b>Diâmetro do Bocal (mm)</b>	1,2
<b>Pressão do Gás de Assistência (bar)</b>	5,52
<b>Diâmetro da Lente Focal (mm)</b>	100
<b>Distância Entre Bocal e Peça (mm)</b>	0,8
<b>Frequência (Hz)</b>	85
<b>Diâmetro de ponto Focal (mm)</b>	0,6
<b>Ângulo entre feixe de Laser e peça (°)</b>	90 (perpendicular)

**Fonte: autoria própria**

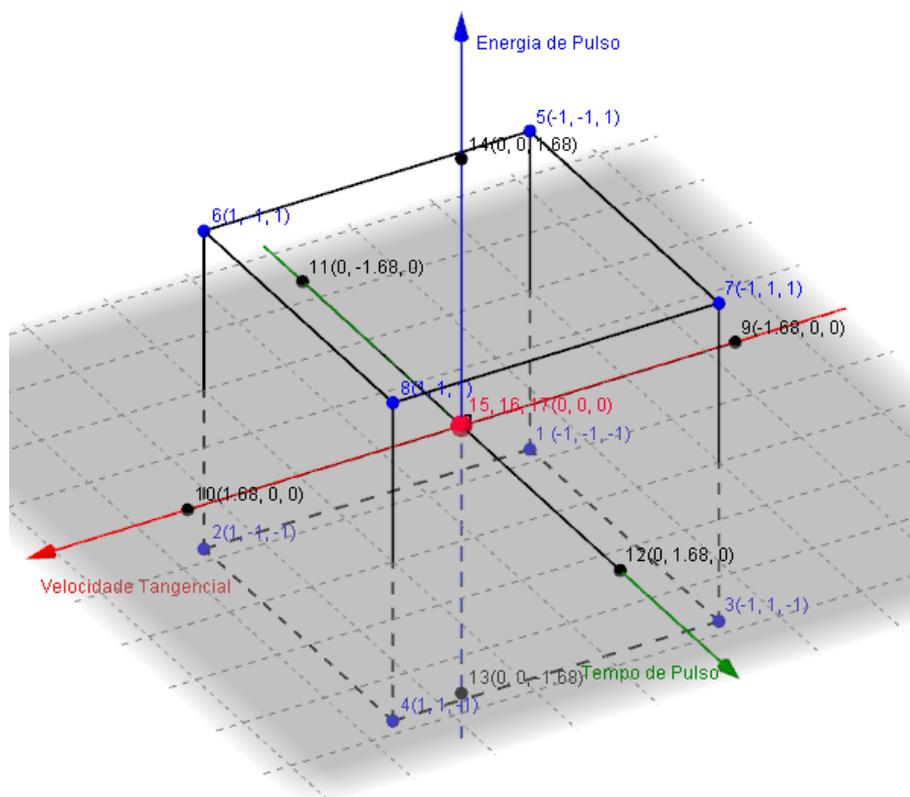
Os parâmetros variados na execução do ensaio foram: a energia de pulso, o tempo de pulso e a velocidade tangencial do movimento de trepanação. Os parâmetros foram variados em cinco níveis de magnitude.

A determinação da combinação dos parâmetros utilizou a composição de um planejamento fatorial de 2<sup>3</sup> utilizando os níveis -1 e +1 de todos os parâmetros com um planejamento axial onde existe variação entre os níveis -1,68 e +1,68 para um dos parâmetros mantendo o nível 0 como centro e a repetição do nível 0 por três vezes para todos os parâmetros. O resultado dessa composição foi um planejamento que prevê 17 furos a ser realizados por amostra. A Figura 14 é uma representação espacial das combinações entre os parâmetros variáveis utilizadas nos ensaios de furação por Laser. Na Tabela 3 estão relacionados as combinações de parâmetros variáveis referentes aos furos realizados no ensaio de furação à Laser.

**Tabela 3 - Combinações de parâmetros variáveis das furações realizadas no ensaio.**

<b>Número do Furo</b>	<b>Velocidade Tangencial (mm/min) (nível)</b>	<b>Tempo de Pulso (ms) (nível)</b>	<b>Energia (J) (nível)</b>
1	(-1)	(-1)	(-1)
2	(+1)	(-1)	(-1)
3	(-1)	(+1)	(-1)
4	(+1)	(+1)	(-1)
5	(-1)	(-1)	(+1)
6	(+1)	(-1)	(+1)
7	(-1)	(+1)	(+1)
8	(+1)	(+1)	(+1)
9	(-1,68)	(0)	(0)
10	(+1,68)	(0)	(0)
11	(0)	(-1,68)	(0)
12	(0)	(+1,68)	(0)
13	(0)	(0)	(-1,68)
14	(0)	(0)	(+1,68)
15	(0)	(0)	(0)
16	(0)	(0)	(0)
17	(0)	(0)	(0)

**Fonte: autoria própria**



**Figura 14 - Representação das combinações de parâmetros variáveis nos ensaios de furação por Laser.**  
**Fonte: autoria própria**

### 3.2 CARACTERÍSTICAS E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

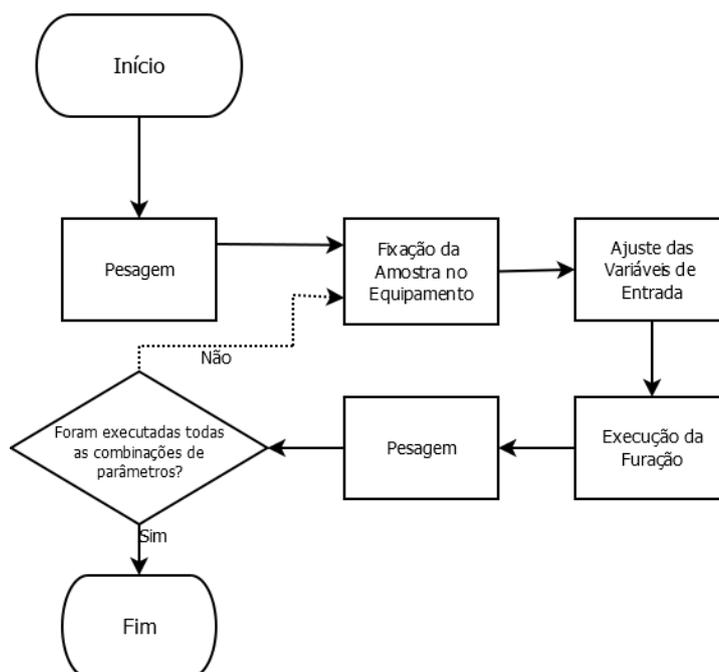
Os ensaios de furação à Laser foram realizadas em amostras de Inconel 718 com dimensões de 30x160x2,47mm. O material base das amostras foi recebido com acabamento bruto de laminação e, antes do seccionamento das amostras nas dimensões especificadas, passou por lixamento com lixas d'água de granulometria 80. No seccionamento das amostras foi utilizada uma serra de precisão Buehler IsoMet 4000 (Figura 15). A preparação dos corpos foi realizada no Laboratório de Preparação Metalográfica da UTFPR - Câmpus Ponta Grossa.



**Figura 15 - Serra de precisão Buehler IsoMet 4000.  
Fonte: autoria própria**

### 3.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE FURAÇÃO À LASER

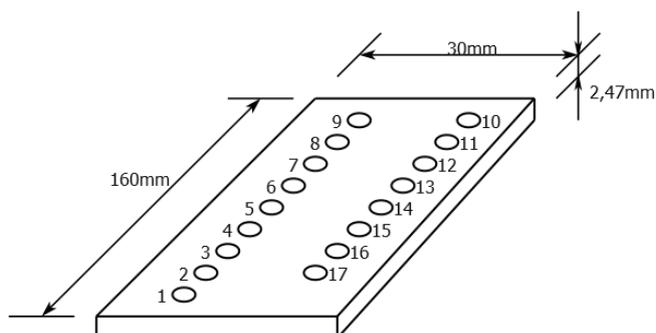
A fonte de Laser empregada na realização dos orifícios foi o Rofin KLS 246. Os ensaios foram realizados na empresa LaserTools situada na cidade de São Paulo. O ensaio foi realizado em duas amostras: uma principal e uma réplica. O procedimento utilizado no ensaio está representada em forma de fluxograma na Figura 16. O procedimento é iniciado com a pesagem das amostras utilizando uma balança analítica da marca Shimadzu modelo AW220 (Figura 17) de propriedade da UTFPR que foi transportada ao local do ensaio. Foram realizadas três medições para cada operação de pesagem descrita. Após as pesagens as amostras são fixadas no equipamento na direção perpendicular ao bocal e é realizado o ajuste das variáveis de entrada no equipamento. O bocal é posicionado no local desejado da amostra e o furo é executado pelo equipamento. Após a furação as amostras passam por pesagem novamente e o ensaio prossegue até a furação de todas as combinações de parâmetros variáveis planejados. Na Figura 18 está uma representação da disposição das furações realizadas nas amostras.



**Figura 16 - Fluxograma de execução do ensaio de furação à Laser.**  
**Fonte: autoria própria**



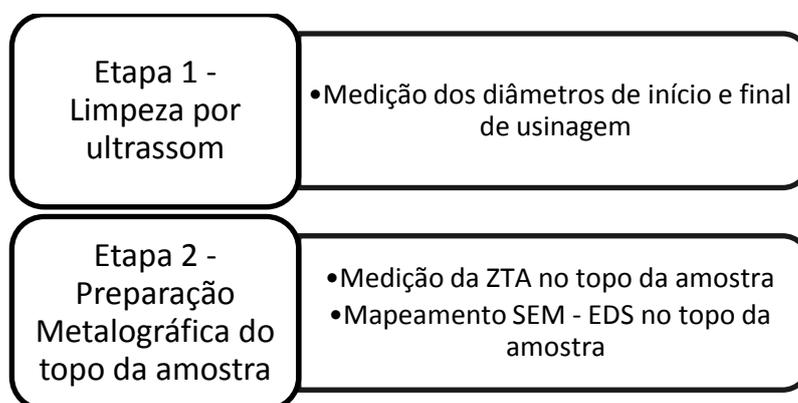
**Figura 17 - Balança analítica digital Shimadzu AW220.**  
**Fonte: autoria própria**



**Figura 18 - Representação da disposição dos furos executados no ensaio de furação à Laser.**  
**Fonte: autoria própria**

### 3.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A metodologia de obtenção dos resultados utilizou duas etapas de preparação das amostras entre as quais foram possíveis as devidas avaliações das características dos orifícios obtidos no ensaio. A preparação das amostras foi realizada no Laboratório de Preparação Metalográfica da UTFPR - Câmpus Ponta Grossa. A Figura 19 é um esquema que relaciona as etapas de preparação das amostras com as análises das características de qualidade que cada etapa possibilita.



**Figura 19 - Esquema da sequência de preparação das amostras e análises das características dos orifícios.**  
**Fonte: autoria própria**

Para a limpeza por ultrassom (Etapa 1) das amostras foi utilizado o equipamento da marca Thornton modelo T7 (Figura 20) por aproximadamente cinco minutos utilizando água como fluido de limpeza. Após a limpeza foram possíveis as medições de diâmetros de início e final de usinagem, as medições de área e altura de respingos e posteriormente o cálculo da conicidade dos canais dos orifícios.



**Figura 20 - Equipamento utilizado para limpeza por ultrassom.**  
**Fonte: autoria própria**

Na preparação metalográfica de topo (Etapa 2) as amostras foram submetidas ao processo de lixamento e polimento onde foi utilizada a lixadeira e politriz Buehler Beta (Figura 21). No processo de lixamento foram utilizadas lixas de granulometria de 220, 320, 400, 600, 800 e 1200 mesh de maneira progressiva e rotação de 250 rpm por cinco minutos aproximadamente para cada amostra e granulometria de lixa. No polimento foram utilizadas suspensões de diamante de granulometria de 3  $\mu\text{m}$ , 0,25  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$  de maneira progressiva. Após o polimento as amostras foram submetidas ao ataque químico por fricção com algodão embebido na solução *Acetic Glyceregia* (15ml HCl + 10ml HNO<sub>3</sub> + 10ml Ácido Acético + 2 a 3 gotas de glicerina) por aproximadamente dois minutos.



**Figura 21 - Lixadeira e polítriz Buehler Beta.**  
Fonte: autoria própria

### 3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada para a geração de imagens para medição de diâmetros e medição da Zona Termicamente Afetada (ZTA) pelo processo de furação à Laser.

A técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-x (EDS - *Energy-dispersive X-ray spectroscopy*) para realização da análise elementar e caracterização da região de entrada do orifício no topo das amostras.

Para ambas as técnicas foi utilizado o microscópio eletrônico da varredura modelo Vega 3 da marca Tescan (Figura 22).



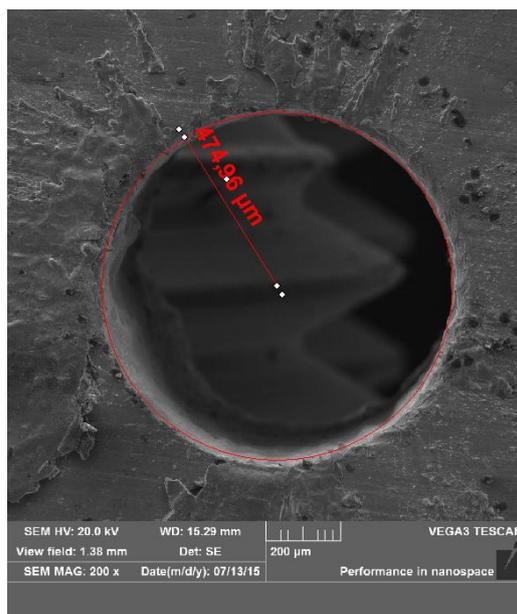
**Figura 22 - Microscópio Eletrônico de Varredura Tescan Vega 3.  
Fonte: autoria própria**

### 3.6 MEDIÇÕES DOS DIÂMETROS DE INÍCIO E FIM DE USINAGEM E TAMANHO DA ZTA

Para a realização das medições de diâmetros e tamanho da ZTA foram utilizadas imagens obtidas por MEV com ampliação de 200x para medição de diâmetros e de 2000x para medição de espessura de ZTA. Foi utilizado o programa *Zeiss AxioVision* versão 4.9.1.0 para execução das medições.

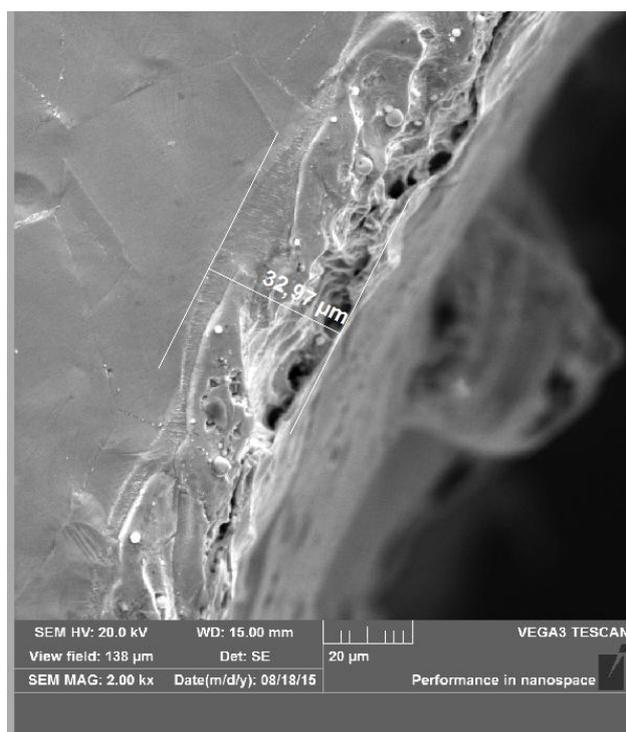
Na medição dos diâmetros (Figura 23) foram tomadas três medidas ao todo por orifício na região de entrada (início de usinagem). A ferramenta utilizada para a medição de diâmetros foi a *diameter by points* sendo que, para cada medição, foram delimitados pelo menos cinco pontos nas bordas ao redor do orifício.

Para medição da ZTA (Figura 24) foram tomadas três medidas de regiões diferentes da borda do furo na região de topo da amostra com a ferramenta *length* do programa utilizado. Não foi possível mensurar a camada refundida no processo devido às suas pequenas dimensões e à dificuldade de distinção. Por isso, neste trabalho a ZTA designa a totalidade da camada afetada pelo processo sendo medido juntamente com a camada refundida pelo processo.



(a)

**Figura 23 - Medição do diâmetro de entrada do orifício.  
Ampliação 200x.  
Fonte: autoria própria**



**Figura 24 - Medição da ZTA.  
Ampliação 2000x.  
Fonte: autoria própria**

### 3.7 CÁLCULO DA TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL E DILATAÇÃO DOS ORIFÍCIOS

A partir das medições de peso das amostras realizadas durante os ensaios e tempo de processo dado pelo equipamento foi possível executar os cálculos de taxa de remoção de material (TRM) do processo. A equação utilizada para o cálculo da TRM foi:

$$TRM (mg/min) = \frac{Massa\ antes\ da\ furação(mg) - Massa\ depois\ da\ furação(mg)}{Tempo\ de\ furação(min)}$$

A análise de dilatação de diâmetro dos orifícios foi realizada através da medição dos diâmetros de entrada nas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura. A dilatação de diâmetro é definida como a diferença entre o diâmetro medido e o diâmetro de referência. O diâmetro de ponto focal externo do movimento de trepanação foi considerado como referência e seu valor nos ensaios realizados foi de 0,9 mm.

### 3.8 CÁLCULO DOS EFEITOS PRINCIPAIS E DE INTERAÇÃO

Após a obtenção dos resultados foi possível calcular os efeitos principais e de interação nos resultados assim como descrito na obra de Barros Neto, Scarminio e Bruns (2010). Através dessa análise podem-se determinar os efeitos médios provocados pela variação dos parâmetros de entrada ou combinações nos resultados obtidos.

O cálculo dos efeitos foi dividido em duas partes: uma para os resultados do planejamento fatorial e outra para o planejamento axial. Isto foi feito em razão da diferença de amplitude de variação dos parâmetros nos dois casos (de -1,68 a +1,68 para o planejamento axial e de -1 a +1 para o planejamento fatorial). Todavia os efeitos do planejamento axial foram corrigidos pelo fator de multiplicação 1/1,68 na equação 5 para a amplitude de variação do planejamento fatorial. Desse modo os valores de efeitos fatorial e axial podem ser comparados. Cabe salientar que o cálculo dos efeitos para combinações de parâmetros não é possível, pois este tipo de planejamento se concentra somente na análise de parâmetros isolados.

O cálculo dos efeitos utilizou as matrizes de níveis de parâmetros e combinações ( $X_f$  para o planejamento fatorial e  $X_a$  para o planejamento axial) e as

matrizes de resultados ( $Y_{k \rightarrow n}$ ). As colunas das matrizes de resultados representam os níveis de determinado parâmetro ou combinações de parâmetros (somente no caso do efeito fatorial), enquanto as linhas representam o número dos experimentos (Furos 1 a 8 para o planejamento fatorial e 9 a 14 para o planejamento axial). As matrizes de resultados  $Y_{k \rightarrow n}$  são formadas por uma coluna e nas linhas estão os resultados obtidos (indicados pelos índices  $k$  e  $n$ ) de acordo com a equação (3).

Para o cálculo dos efeitos dos planejamentos fatorial e axial foram utilizadas as equações (4) e (5) respectivamente. O resultado são as matrizes de efeitos ( $E_f$  e  $E_a$ ), que são formadas por uma única coluna e dispões em suas linhas os efeitos em relação aos parâmetros na ordem em que Estão dispostos nas colunas das matrizes de parâmetros ( $X_f$  e  $X_a$ ).

$$X_f = \begin{matrix} & t_p & v_t & e_p & t_p v_t & v_t e_p & t_p e_p \\ \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & +1 \\ -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \end{bmatrix} & & & & & & \end{matrix} \quad (1)$$

$$X_a = \begin{matrix} & t_p & v_t & e_p \\ \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & +1 \end{bmatrix} & & & \end{matrix} \quad (2)$$

$$Y_{k \rightarrow n} = \begin{bmatrix} y_k \\ y_{k+1} \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

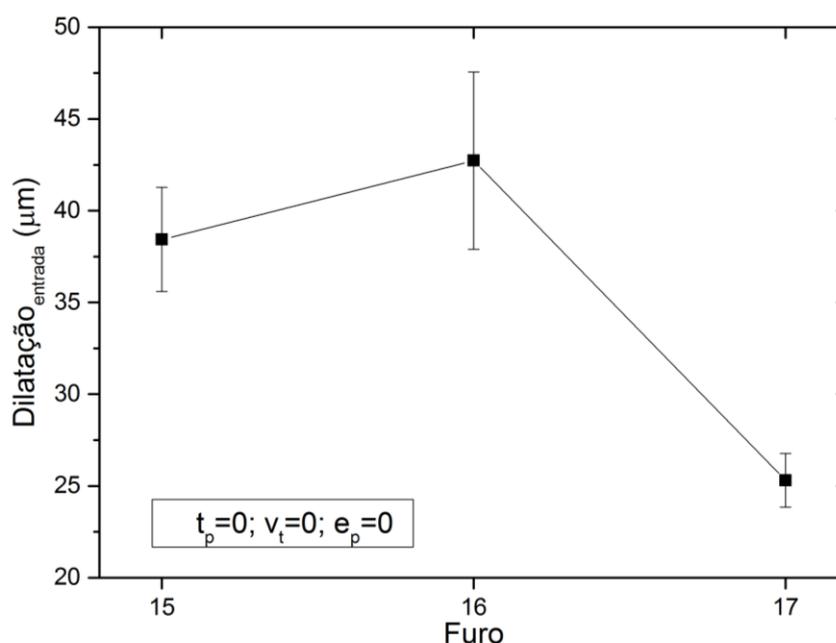
$$E_f = \frac{1}{4} \cdot X_f^t \cdot Y_{1 \rightarrow 8} \quad (4)$$

$$E_a = \frac{1}{1,68} \cdot X_a^t \cdot Y_{9 \rightarrow 14} \quad (5)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE DE DILATAÇÃO DE DIÂMETRO DE INÍCIO DE USINAGEM

A Figura 25 é um gráfico que compara os resultados de dilatação medidas para a combinação de parâmetros central do planejamento, que foi executada três vezes durante o ensaio. Foi observado uma grande variabilidade no processo e grande influência de variáveis não controladas nos resultados. Entre estas variáveis estão as condições superficiais da amostra na região furada e variações na espessura da amostra.



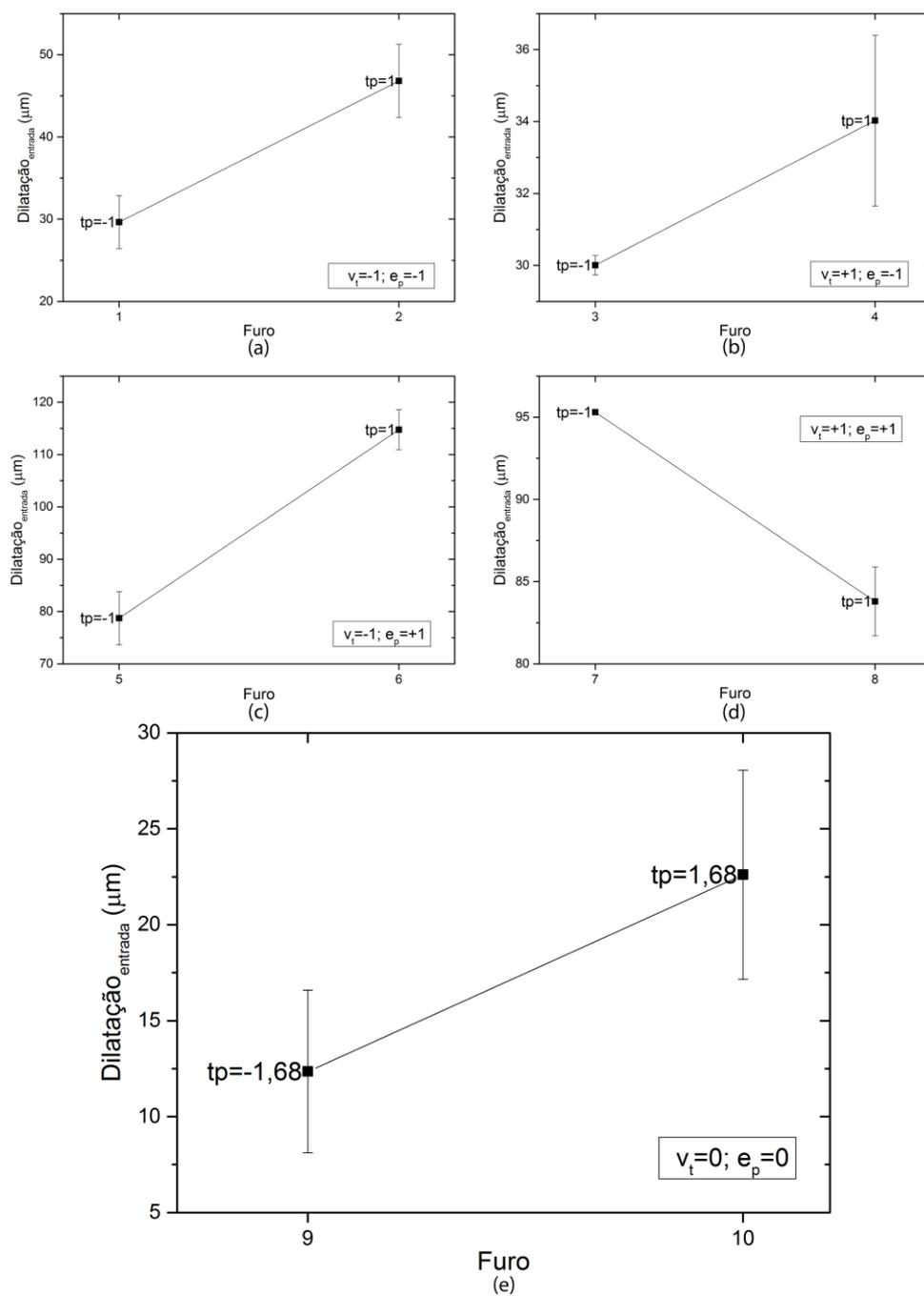
**Figura 25 - Comparação das dilatações de diâmetro de entrada obtidas na combinação central de parâmetros correspondente aos furos 15, 16 e 17.**

**Fonte: autoria própria**

As Figura 26, Figura 27 e Figura 28 são gráficos que comparam os resultados de dilatação obtidos em combinações de parâmetros semelhantes excetuando o parâmetro de influência a ser analisada.

Não foi possível determinar claramente a influência dos parâmetros de tempo de pulso e velocidade de trepanação na dilatação dos furos pertencentes às combinações correspondentes ao planejamento fatorial, sendo que não foi verificada a tendência conclusiva de aumento ou diminuição da dilatação com a variação desses parâmetros.

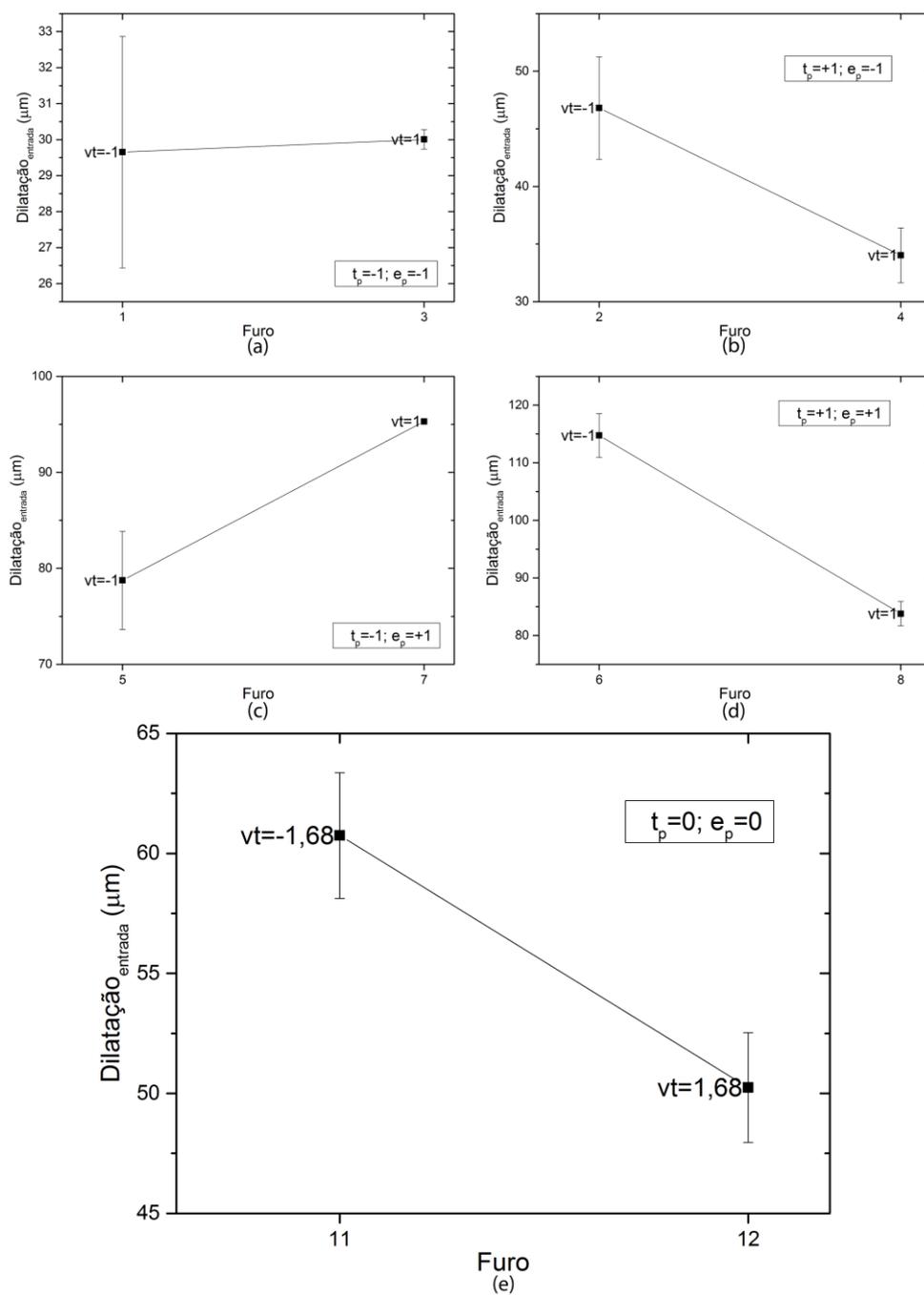
Nos resultados correspondentes ao planejamento axial (onde existe uma maior variação do parâmetro em análise), pode-se verificar mais às tendências presentes em estudos anteriores por Biffi (et al. 2011). O aumento do tempo de interação entre feixe de Laser e peça e, conseqüentemente, do tempo de exposição à reação de oxidação provocou o aumento da dilatação do orifício. O aumento da velocidade de trepanação e, conseqüentemente, diminuição da exposição do material à reação de oxidação durante a furação causou a diminuição da dilatação dos orifícios.



**Figura 26 - Comparação das dilatações de diâmetro de entrada com relação ao parâmetro de tempo de pulso.**

Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são referentes ao planejamento fatorial e o gráfico (e) é referente ao planejamento axial.

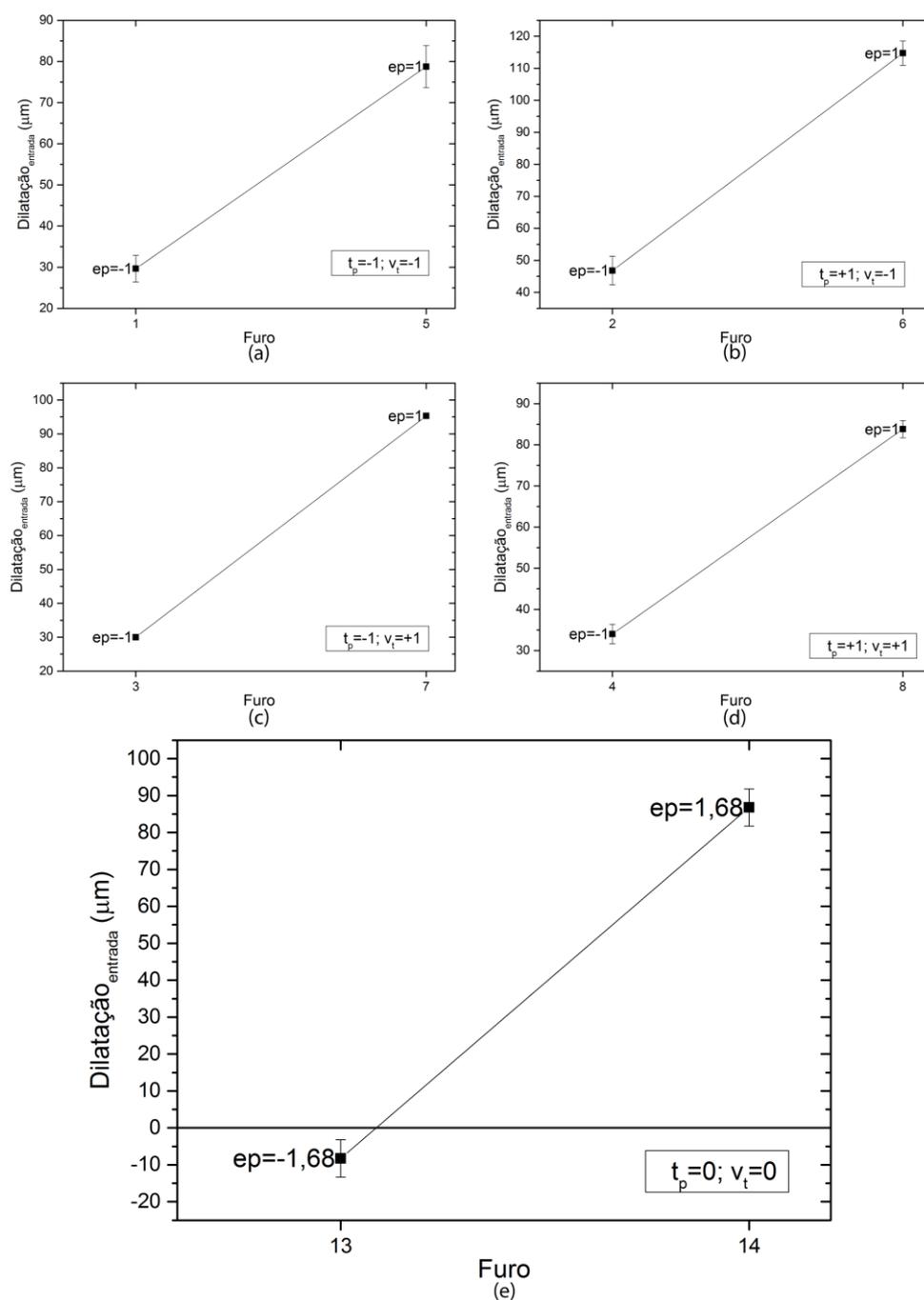
Fonte: autoria própria



**Figura 27 - Comparação das dilatações de diâmetro de entrada com relação ao parâmetro de velocidade de trepanação.**

Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são referentes ao planejamento fatorial e o gráfico (e) é referente ao planejamento axial.

Fonte: autoria própria



**Figura 28 - Comparação das dilatações de diâmetro de entrada com relação ao parâmetro de energia de pulso.**

Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são referentes ao planejamento fatorial e o gráfico (e) é referente ao planejamento axial.

Fonte: autoria própria

Foi observada a tendência de aumento da dilatação do furo com o aumento da energia de pulso. Na Figura 28 observa-se essa tendência para todas as comparações de combinações de parâmetros realizadas. Em estudos anteriores (HASÇALIK; AY, 2012) também verificou o aumento da dilatação de corte com o

aumento da energia de pulso. Nesse caso o aumento da energia cedida ao material causou o aumento na quantidade de material removida e da dilatação do material.

A Tabela 4 apresenta os efeitos principais e de interação na dilatação de diâmetro de entrada dos orifícios.

Os parâmetros de tempo de pulso e energia de pulso apresentaram maior influência nos resultados como parâmetros isolados, porém o parâmetro de velocidade de trepanação apresentou grande relevância nos fatores combinados. Essa grande relevância do parâmetro de velocidade de trepanação mostra que este afeta diretamente a transferência de energia para o material.

A combinação dos parâmetros de tempo de pulso e velocidade de trepanação provocou a diminuição da dilatação de diâmetro pela maior distribuição da energia cedida ao material na trajetória do movimento de trepanação. O mesmo ocorreu na atenuação do efeito da energia de pulso combinada com os parâmetros de tempo de pulso e velocidade de trepanação.

Os efeitos de planejamento fatorial da velocidade de trepanação e energia de pulso apresentaram grande similaridade com os do planejamento fatorial. Isto indica comportamento linear da dilatação de orifícios com relação a estes parâmetros. A energia de pulso demonstrou atenuação de sua influência na dilatação de diâmetro no planejamento axial.

Os resultados mostram que a maior distribuição de energia cedida pelo feixe ao longo do movimento de trepanação aumenta a dilatação até certo ponto como indica o efeito de tempo de pulso. Após alcançar esse limite a maior distribuição de energia causa o efeito contrário de acordo com os efeitos combinados com a velocidade de trepanação.

Tabela 4 - Efeitos principais e de interação na dilatação do diâmetro de entrada dos orifícios.

Parâmetro/Combinação	Dilatação ( $\mu\text{m}$ )	
	Fatorial (Furos 1 a 8)	Axial (Furos 9 e 10)
$t_p$	11,42	6,11
$v_t$	-6,70	-6,25
$e_p$	58,02	56,58
$t_p \times v_t$	-15,16	-
$v_t \times e_p$	-0,49	-
$t_p \times e_p$	0,83	-

Fonte: autoria própria

#### 4.2 ANÁLISE DA TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL

Já que a taxa de remoção de material está diretamente relacionada a dilatação de diâmetro e o parâmetro de velocidade de trepanação pode-se relacionar as causas dos seus resultados.

A Figura 26 está a comparação das taxas de remoção de material para a combinação de parâmetros central do planejamento, que foi executada três vezes durante o ensaio. A taxa de remoção de material obtida na execução dos orifícios correspondentes a combinação central de parâmetros apresentou variabilidade significativa, assim como a dilatação de diâmetro.

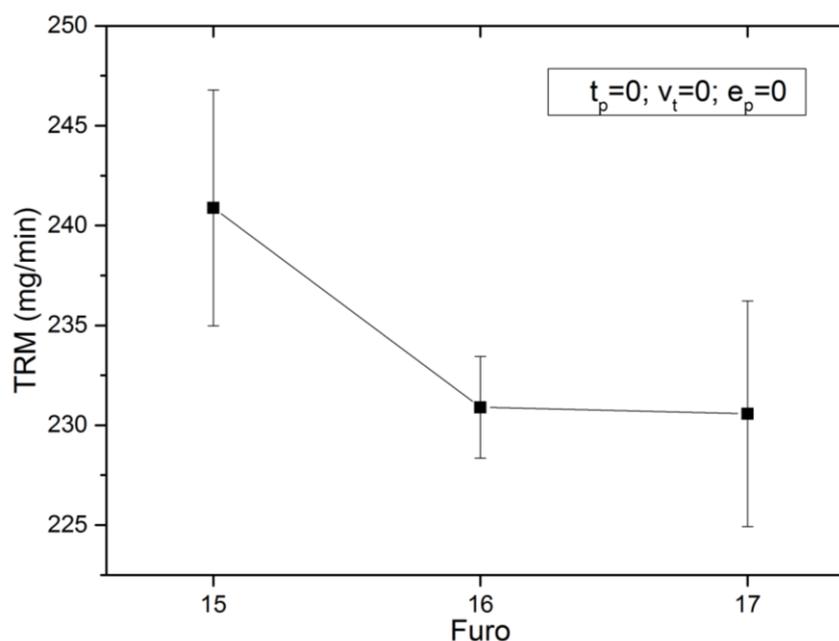


Figura 29 - Comparação das taxas de remoção de material obtidas na combinação central de parâmetros correspondente aos furos 15, 16 e 17.

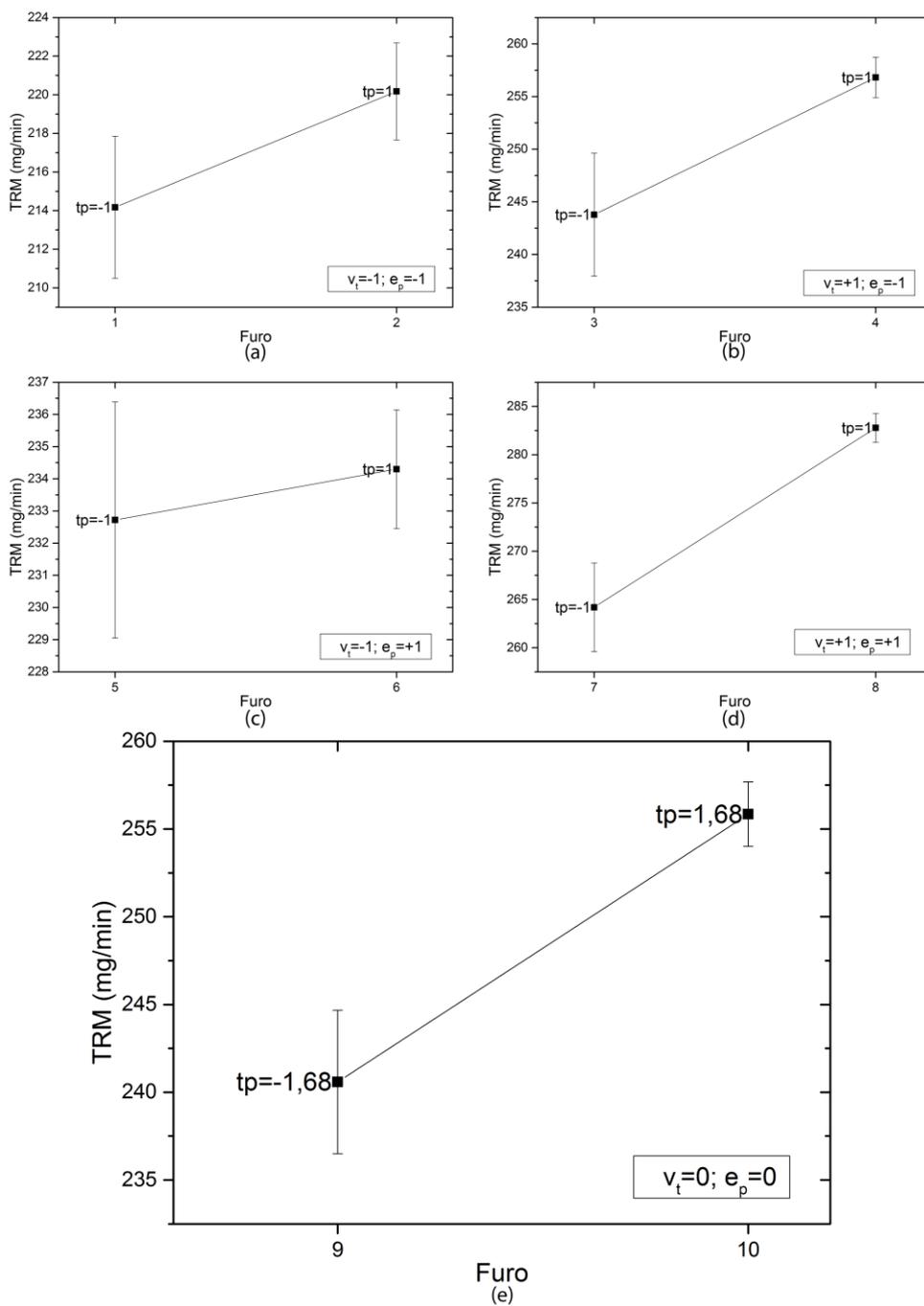
Fonte: autoria própria

As Figura 30, Figura 31 e Figura 32 são gráficos que comparam os resultados de dilatação obtidos em combinações de parâmetros semelhantes excetuando o parâmetro de influência a ser analisada.

Não foi verificada tendência conclusiva de aumento ou diminuição da taxa de remoção de material através da variação do parâmetro de tempo de pulso.

Foi verificado o aumento da taxa de remoção de material com o aumento da velocidade de trepanação. Apesar da tendência de diminuição do diâmetro obtido e, conseqüentemente, da quantidade de material removida, a diminuição do tempo de processo teve maior influência na taxa de remoção de material.

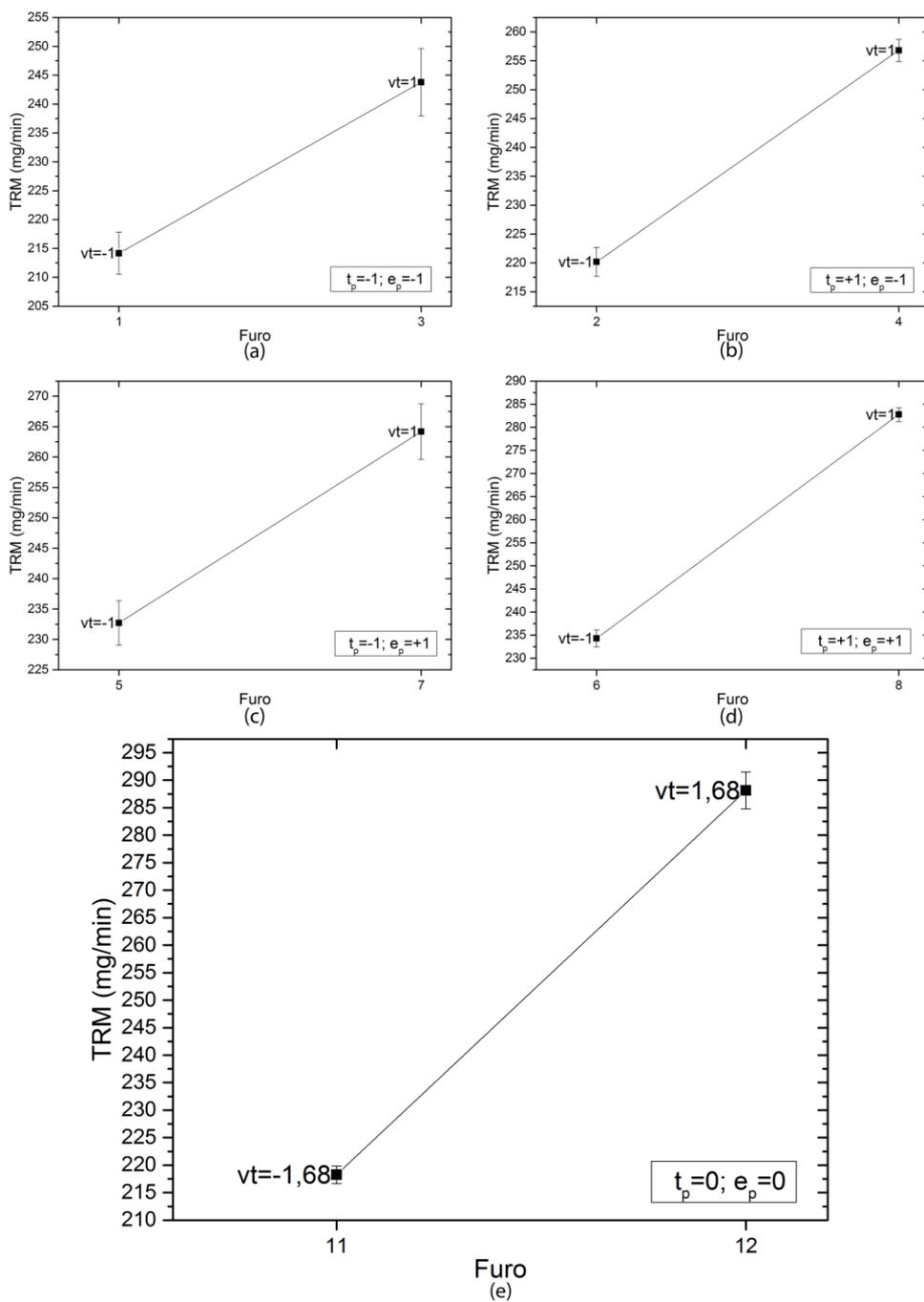
A TRM teve tendência de aumento com o aumento da energia de pulso. Este resultado está em concordância com o obtido em relação a dilatação dos orifícios obtidos, pois o aumento do diâmetro dos orifícios acompanha o aumento da quantidade de material removida e, conseqüentemente, aumento da taxa de remoção de material.



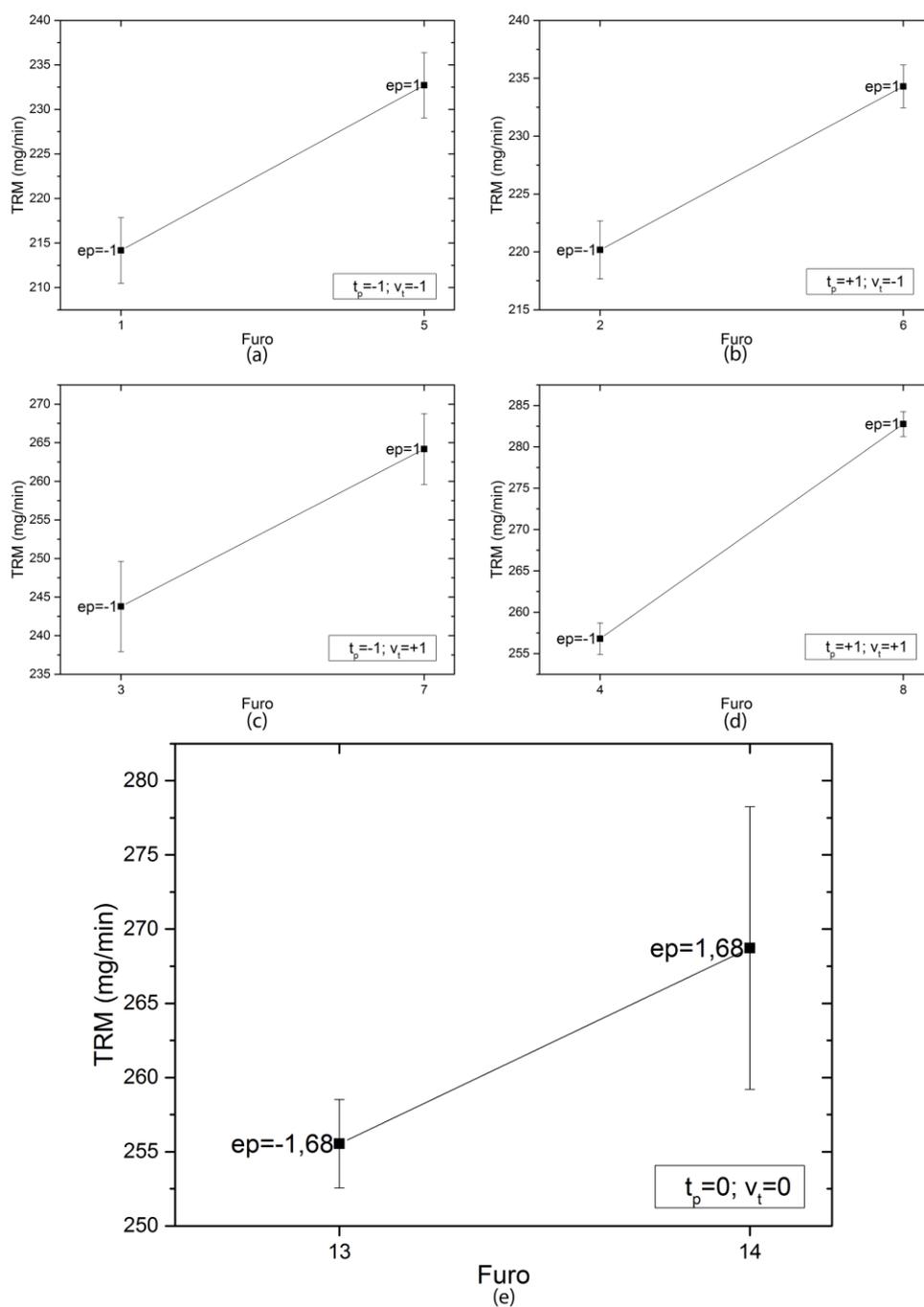
**Figura 30 - Comparação das taxas de remoção de material com relação ao parâmetro de tempo de pulso.**

Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são referentes ao planejamento fatorial e o gráfico (e) é referente ao planejamento axial.

Fonte: autoria própria



**Figura 31 - Comparação das taxas de remoção de material com relação ao parâmetro de velocidade de trepanação.**  
 Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são referentes ao planejamento fatorial e o gráfico (e) é referente ao planejamento axial.  
 Fonte: autoria própria



**Figura 32 - Comparação das taxas de remoção de material com relação ao parâmetro de energia de pulso.**  
Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são referentes ao planejamento fatorial e o gráfico (e) é referente ao planejamento axial.  
Fonte: autoria própria

A Tabela 5 apresenta os efeitos principais e de interação na taxa de remoção de material do processo.

O parâmetro de velocidade de trepanação apresentou efeito de aumento de taxa de remoção de material. Isto se deve a diminuição do tempo de processo

causado pelo aumento da velocidade, apesar do fato que o aumento da velocidade causou diminuição da dilatação. Dessa forma o efeito sobre o tempo de processo foi preponderante na taxa de remoção de material.

Da mesma forma os parâmetros que causaram o aumento da dilatação de diâmetro causaram aumento da taxa de remoção de material como consequência.

O parâmetro de velocidade de trepanação apresentou similaridade de efeitos referentes aos planejamentos axial e fatorial devido ao comportamento linear do tempo de processo (principal influência do parâmetro de velocidade na taxa de remoção de material) com a sua variação.

Os parâmetros apresentaram pouco efeito de interação nos resultados em comparação com os efeitos dos parâmetros de velocidade de trepanação e energia de pulso isolados.

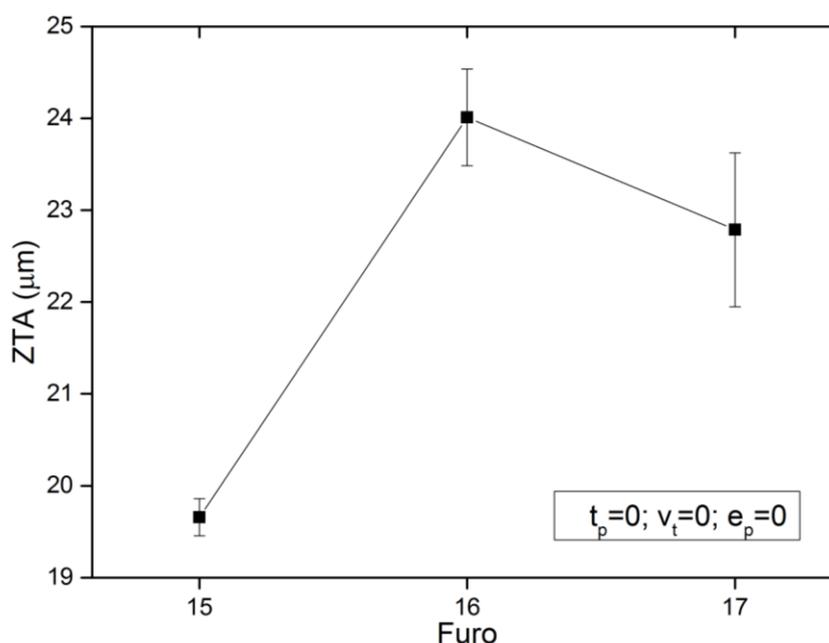
**Tabela 5 - Efeitos principais e de interação na taxa de remoção de material.**

Parâmetro/Combinação	TRM (mg/min)	
	Fatorial (Furos 1 a 8)	Axial (Furos 11 e 12)
$t_p$	5,92	9,08
$v_t$	35,92	40,12
$e_p$	21,14	6,36
$t_p \times v_t$	4,88	-
$v_t \times e_p$	2,05	-
$t_p \times e_p$	2,16	-

Fonte: autoria própria

#### 4.3 ANÁLISE DE TAMANHO DE ZONA TERMICAMENTE AFETADA

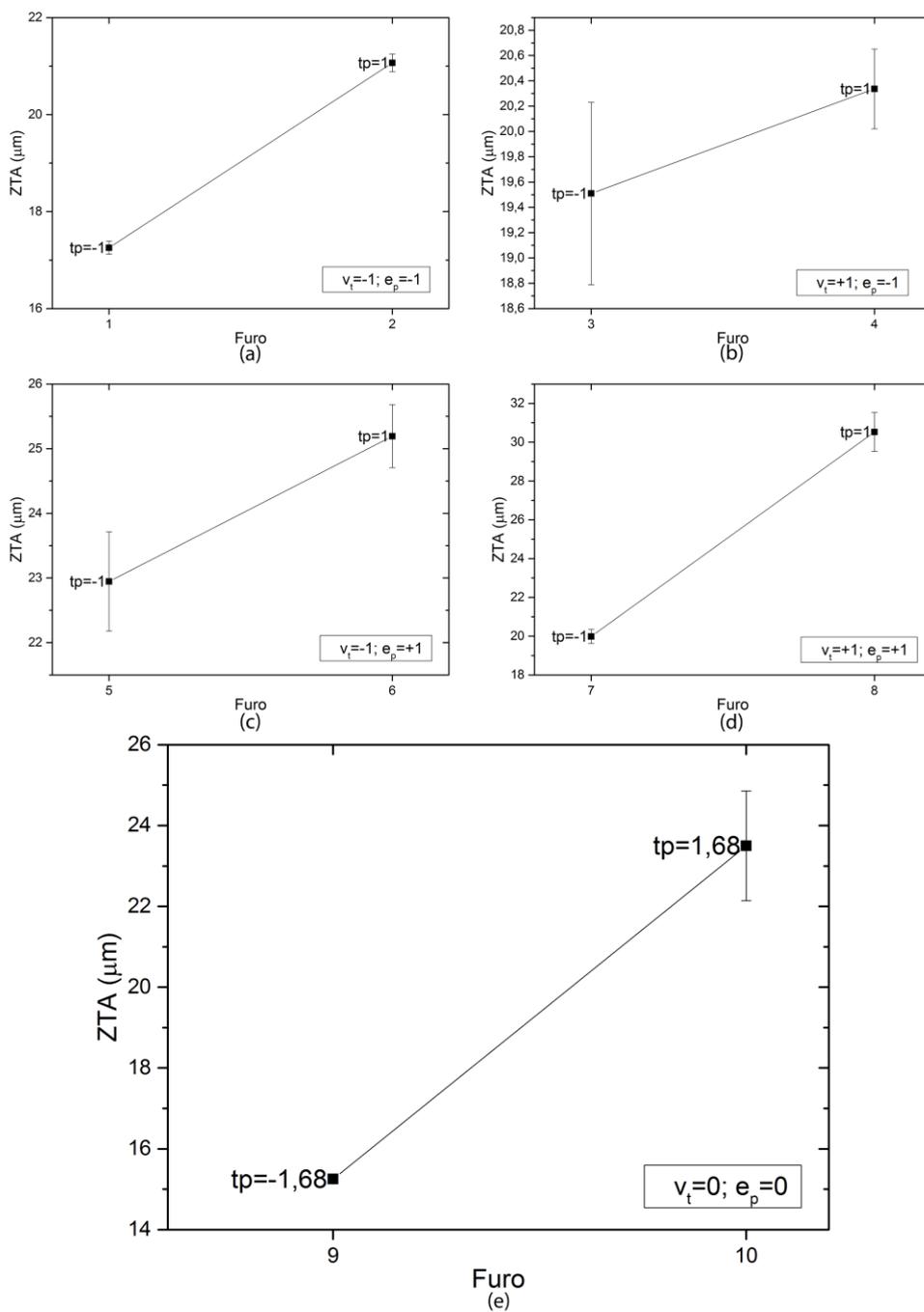
A Figura 33 é um gráfico que compara os resultados de tamanho de zona termicamente afetada para os furos 15, 16 e 17, que foram executados com a mesmas combinações de parâmetros. Pode-se observar uma significativa variação nos resultados obtidos que se deve à variabilidades à que o processo está sujeito.



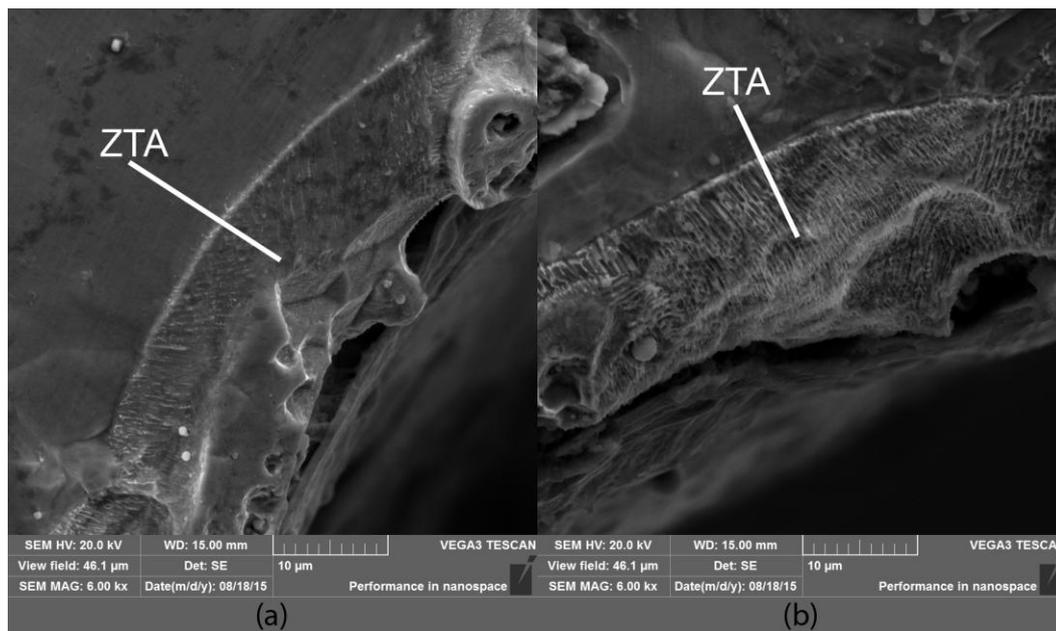
**Figura 33 - Comparação dos tamanhos de zona termicamente afetada obtidos na combinação central de parâmetros correspondente aos furos 15, 16 e 17.**  
**Fonte: autoria própria**

As Figura 34, Figura 36 e Figura 38 são gráficos que comparam os resultados de tamanho de zona termicamente afetada em combinações de parâmetros semelhantes excetuando o parâmetro de tempo de pulso, possibilitando a análise de sua influência. As Figura 35, Figura 37 e Figura 39 foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura e ilustram as regiões de ZTA na entrada dos orifícios.

Foi observado que o aumento do tempo de pulso teve efeito de aumento da camada termicamente afetada. O aumento do tempo de pulso acompanha o aumento do tempo de interação entre o feixe de Laser e a peça, diminuindo a potência de pico. Esses efeitos causam a diminuição da vaporização e aumento da quantidade de calor difundido para a peça durante o processo, então causando aumento da zona termicamente afetada.



**Figura 34 - Comparação dos tamanhos de zona termicamente afetada com relação ao parâmetro de tempo de pulso.**  
Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são referentes ao planejamento fatorial e o gráfico (e) é referente ao planejamento axial.  
Fonte: autoria própria

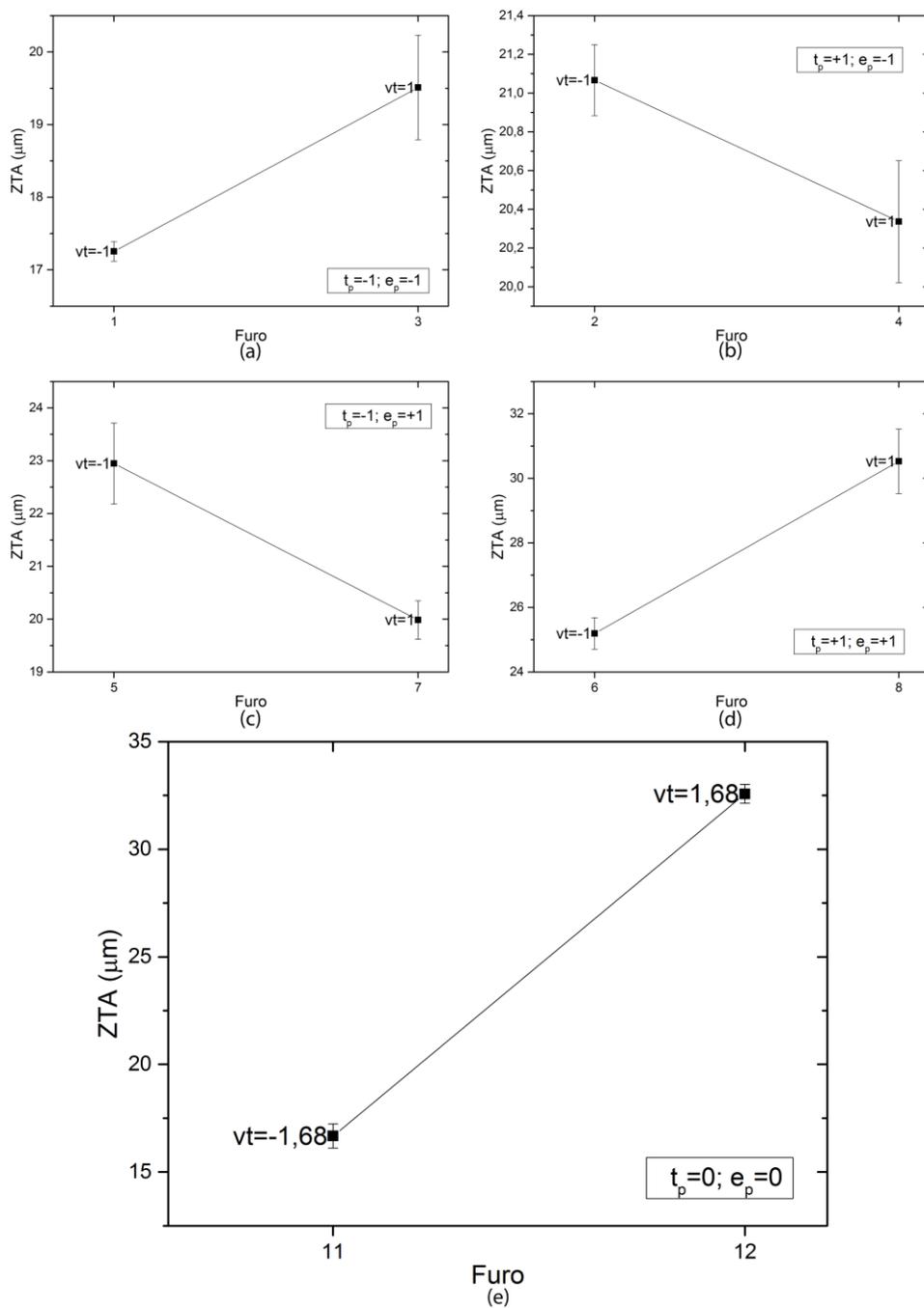


**Figura 35 - Imagens da zona termicamente afetada da região de entrada dos furos 9 (a) e 10 (b) obtidas por microscópio eletrônico de varredura.**

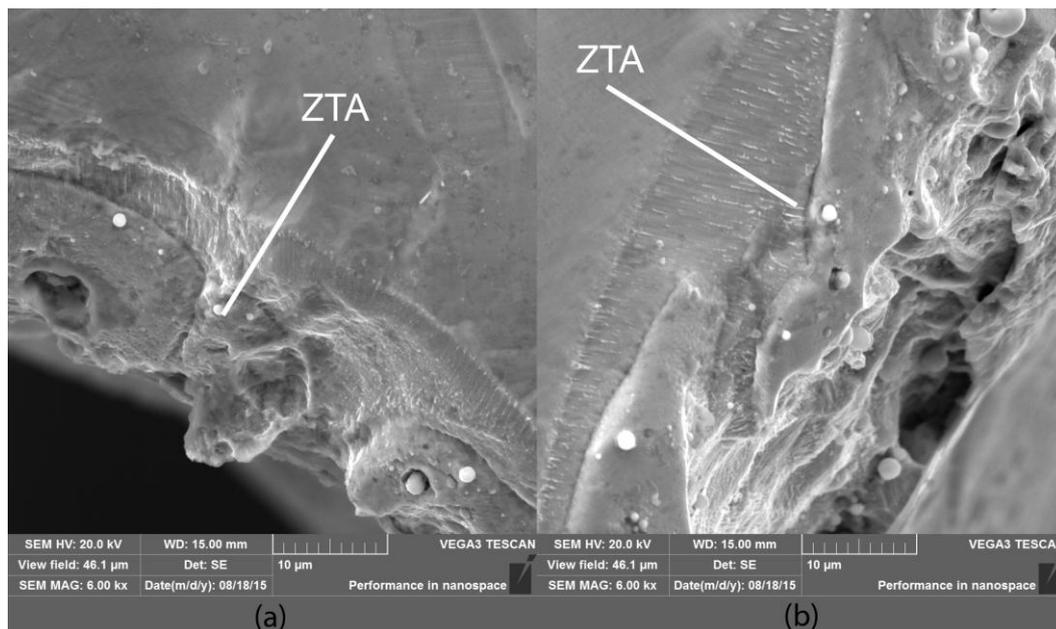
**Ampliação 2000x.**

**Fonte: autoria própria**

Os resultados obtidos mostram que o aumento da velocidade de trepanação causou o aumento da ZTA. O aumento da velocidade de trepanação provoca a diminuição da exposição do material aquecido pelo feixe de Laser ao oxigênio, diminuindo a remoção do material aquecido e causando o aumento da zona termicamente afetada pela difusão do calor para a peça. Esse efeito também foi observado nos estudos de Chien e Hou (2007).



**Figura 36 - Comparação dos tamanhos de zona termicamente afetada com relação ao parâmetro de velocidade de trepanação. Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são referentes ao planejamento fatorial e o gráfico (e) é referente ao planejamento axial. Fonte: autoria própria**

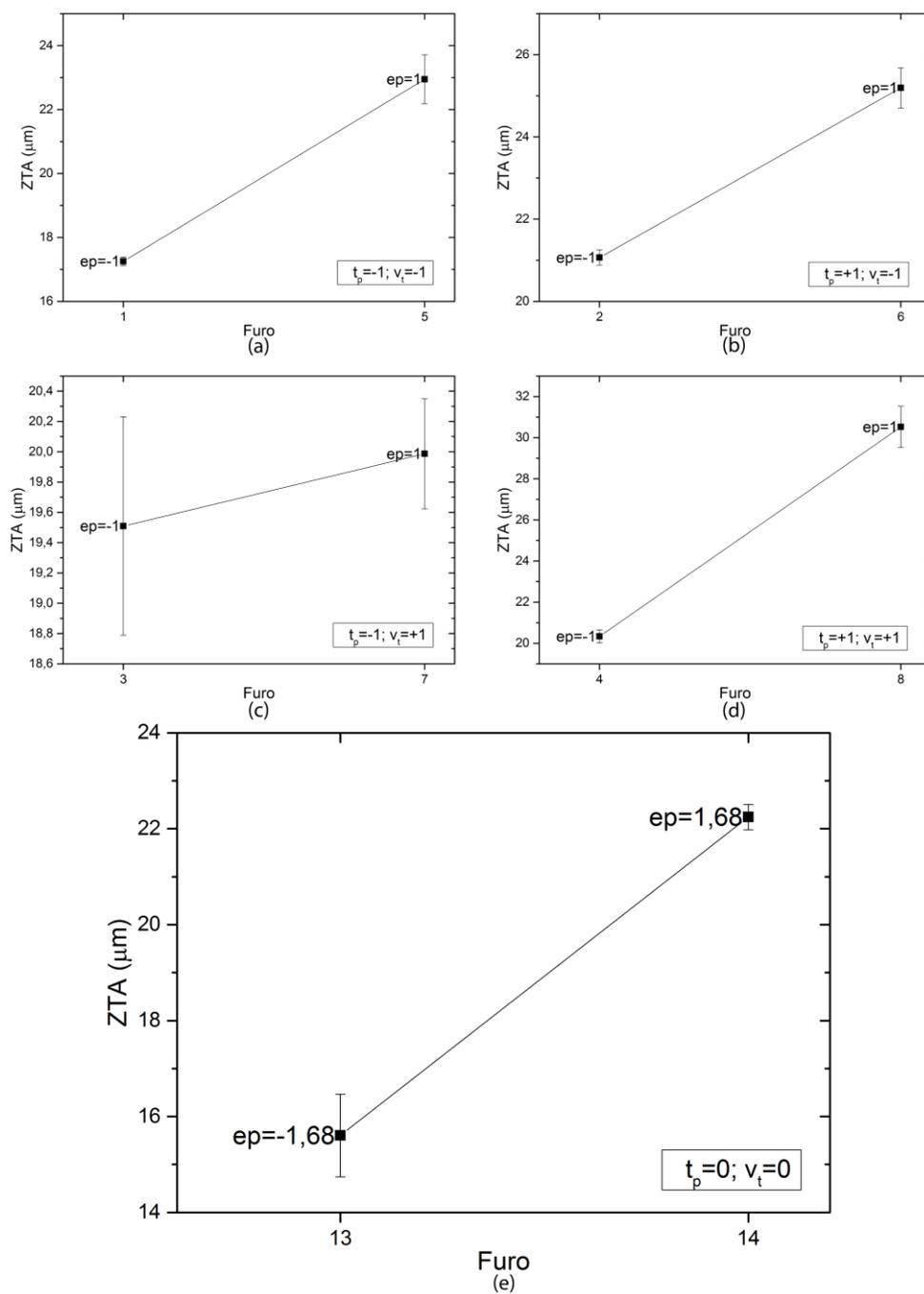


**Figura 37 - Imagens da zona termicamente afetada da região de entrada dos furos 11 (a) e 12 (b) obtidas por microscópio eletrônico de varredura.**

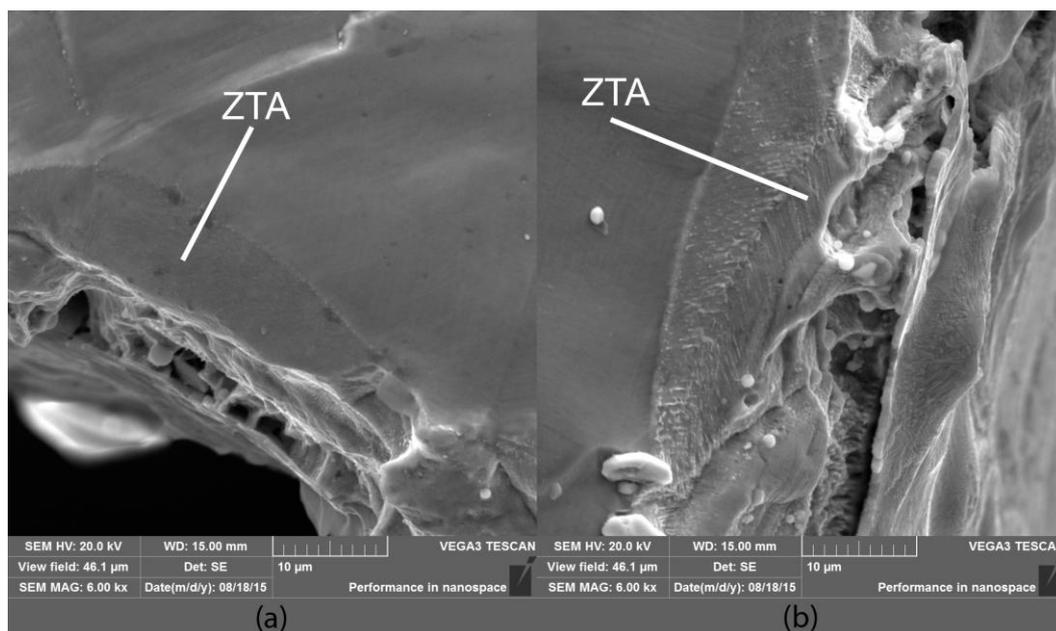
**Ampliação 2000x.**

**Fonte: autoria própria**

Foi observado que houve o aumento da ZTA com o aumento do tempo de pulso. O aumento da ZTA, neste caso, se deveu ao aumento de energia cedida ao material. Alguns estudos como os de Chien e Hou (2007), demonstram o efeito contrário para intervalos de potência de pico superiores a 10kW (neste trabalho a potência de pico varia entre 1,5 e 3kW). Esse efeito pode ser explicado pelo aumento do fenômeno de vaporização a partir de determinada faixa de energia de pico. Com o aumento significativo da vaporização, as condições de remoção de material fundido pelo gás de assistência seriam melhores causando rápida remoção e diminuição do calor cedido ao material base e diminuição da ZTA.



**Figura 38 - Comparação dos tamanhos de zona termicamente afetada com relação ao parâmetro de energia de pulso.**  
**Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são referentes ao planejamento fatorial e o gráfico (e) é referente ao planejamento axial.**  
**Fonte: autoria própria**



**Figura 39 - Imagens da zona termicamente afetada da região de entrada dos furos 13 (a) e 14 (b) obtidas por microscópio eletrônico de varredura.**

**Ampliação 2000x.**

**Fonte: autoria própria**

A Tabela 6 apresenta os efeitos principais e de interação na zona termicamente afetada dos orifícios.

Os parâmetros de tempo de pulso e energia de pulso apresentaram maiores efeitos principais nos pontos do planejamento fatorial. No planejamento axial a velocidade de trepanação despontou com maior influência. Os resultados mostram que a velocidade de trepanação apresenta maior influência para amplitudes de variação maiores (referentes ao planejamento axial) do que menores (referentes ao planejamento fatorial). Os parâmetros de tempo e energia de pulso apresentaram efeitos fatorial e axial semelhantes.

**Tabela 6 - Efeitos principais e de interação na zona termicamente afetada.**

Parâmetro/Combinação	ZTA ( $\mu\text{m}$ )	
	Fatorial (Furos 1 a 9)	Axial (Furos 11 e 12)
$t_p$	4,36	4,91
$v_t$	0,98	9,46
$e_p$	5,12	3,95
$t_p \times v_t$	1,33	-
$v_t \times e_p$	0,21	-
$t_p \times e_p$	2,04	-

**Fonte: autoria própria**

#### 4.4 ANÁLISE DE COMPOSIÇÃO POR ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X

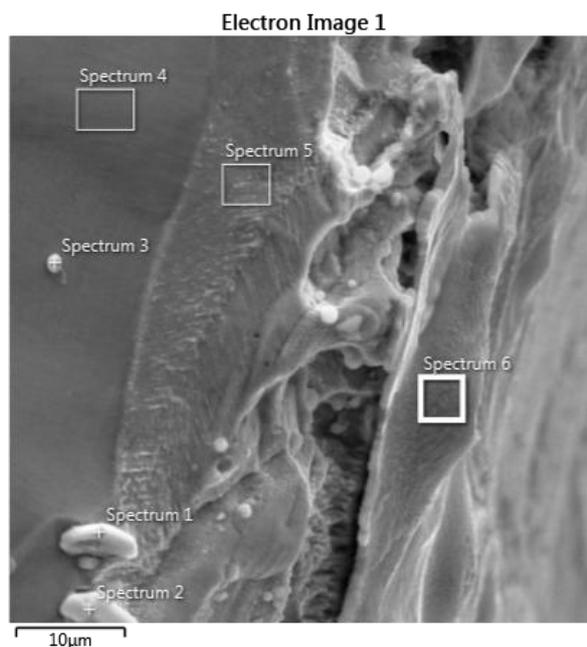
Através de espectroscopia de energia dispersiva de raios-x pode-se realizar a análise de elemental da borda do furo 14 com o objetivo de caracterizar a região de entrada do orifício. A Figura 40 foi obtida por microscopia eletrônica de varredura e mostra os pontos e regiões analisadas por EDS. Na Tabela 7 estão as composições químicas presentes nas regiões representadas na Figura 40.

Os pontos 1 e 2 (*Spectrum 1* e 2) apresentam grande concentração de nióbio e carbono indicando a presença de carbeto de nióbio presentes entre a zona termicamente afetada e o material base. A presença desses carbeto pode ser verificada em toda a extensão do material base. Pode ser verificada a presença significativa de óxidos pela grande concentração de oxigênio.

A região 3 (*Spectrum 3*) possui alta concentração de ferro em relação ao material base, indicando que o ponto em questão é um glóbulo de fase  $\sigma$ . Segundo Donachie e Donachie (2002) a presença dessa fase na forma de glóbulos é comum em superligas de ferro-níquel (como o Inconel 718).

A região 5 (*Spectrum 5*) apresenta composição semelhante ao material base (*Spectrum 4*), porém com a presença de inclusões de óxidos indicados pela concentração de 2,1% de oxigênio na ZTA. O trabalho de Sezer (et al. 2006) também notou a presença de inclusões de óxidos no processo de Furação por Laser pulsado, porém em quantidade maior (cerca de 9% de oxigênio presente na zona termicamente afetada e arredores do material base).

A região 6 (*Spectrum 6*) é caracterizada pela grande quantidade de óxidos resultantes da oxidação ocorrido durante o processo de furação. Os resultados obtidos por Sezer (et al. 2006) também indicam a formação da camada de óxidos no interior dos furos.



**Figura 40 - Regiões da borda do furo 14 analisadas por espectroscopia de energia dispersiva de raios-X.**

**Fonte: autoria própria**

**Tabela 7 - Composição química das regiões avaliadas por EDS.**

Elementos	Composição											
	Região 1		Região 2		Região 3		Região 4		Região 5		Região 6	
	Wt(%)	$\sigma$	Wt(%)	$\sigma$	Wt(%)	$\sigma$	Wt(%)	$\sigma$	Wt(%)	$\sigma$	Wt(%)	$\sigma$
<b>Ni</b>	12,4	0,2	4,3	0,2	51,5	0,3	53,1	0,3	51,3	0,3	14,6	0,5
<b>Cr</b>	4,4	0,1	1,7	0,1	18,8	0,2	19,4	0,2	19,1	0,2	25,8	0,5
<b>Fe</b>	4,3	4,3	1,5	0,1	18,9	0,2	19,3	0,2	18,8	0,2	13,4	0,4
<b>Nb</b>	56,6	0,5	61,4	0,7	4,2	0,2	4,2	0,2	3,3	0,2	6,4	0,5
<b>Mo</b>	-	-	-	-	2,4	0,2	2,8	0,2	2,1	0,2	-	-
<b>Ti</b>	5,4	0,1	4,7	0,1	0,9	0,1	0,9	0,1	0,9	0,1	1,2	0,1
<b>Al</b>	-	-	-	-	0,3	0,1	0,4	0,1	0,3	0,0	1,0	0,2
<b>O</b>	11,8	0,4	7,7	0,5	1,1	0,2	-	-	2,1	0,1	37,6	0,7
<b>C</b>	5,0	0,5	18,6	0,9	1,7	0,3	-	-	2,1	0,3	-	-

**Fonte: autoria própria**

## 5 CONCLUSÃO

Através do planejamento e execução dos ensaios e das análises descritas nesse trabalho foi possível a análise da influência dos parâmetros de tempo e energia de pulso e velocidade de trepanação nas características dos furos obtidos por furação à Laser por trepanação.

O aumento do tempo de pulso causa o aumento da dilatação de diâmetro e consequentemente da taxa de remoção de material do processo. Da mesma forma, com o aumento do tempo de pulso a taxa a zona termicamente afetada é aumentada. O aumento da velocidade de trepanação causa a diminuição da dilatação de diâmetro obtido e o aumento da taxa de remoção de material do processo. A variação da velocidade de trepanação não apresenta influência significativa no tamanho da zona termicamente afetada dentro da amplitude de variação e condições descritas neste trabalho. Com o aumento da energia de pulso no processo de furação à Laser por trepanação ocorre o aumento da dilatação de diâmetro, da taxa de remoção de material e da zona termicamente afetada pelo processo.

A utilização de oxigênio como gás de assistência no processo de furação à Laser implica na formação de uma camada de óxidos nos canais dos orifícios obtidos. A técnica de furação à Laser por trepanação induz a presença de inclusões de óxidos na região da camada termicamente afetada.

## REFERÊNCIAS

AL-HADHRAMI, Luai M.; SHAAHID, S.m.; AL-MUBARAK, Ali A.. Jet Impingement Cooling in Gas Turbines for Improving Thermal Efficiency and Power Density. In: BENINI, Ernesto et al (Ed.). **Advances in Gas Turbine Technology**. Rijeka: Intech, 2011. Cap. 9. p. 191-210.

BANDYOPADHYAY, S et al. Geometrical features and metallurgical characteristics of Nd: YAG laser drilled holes in thick IN718 and Ti-6Al-4V sheets. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 127, n. 1, p.83-95, set. 2002. Elsevier BV. DOI: 10.1016/s0924-0136(02)00270-4. Disponível em: <<http://api.elsevier.com/content/article/PII:S0924013602002704?httpAccept=text/xml>>. Acesso em: 22 nov. 2015.

BARROS NETO, Benício de; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como Fazer Experimentos**. 4. ed. Campinas: Bookman, 2010.

BIFFI, Carlo Alberto et al. Fiber laser microdrilling of titanium and its effect on material microstructure. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 54, n. 1-4, p.149-160, 7 set. 2010. Springer Science + Business Media. DOI: 10.1007/s00170-010-2918-6.

BROWN, Matthew S.; ARNOLD, Craig B.. Fundamentals of Laser-Material Interaction and Application to Multiscale Surface Modification. In: SUGIOKA, Koji; MEUNIER, Michel; PIQUÉ, Alberto. **Laser Precision Microfabrication**. [s. L.]: Springer, 2010. Cap. 4. p. 91-120.

CHIEN, Wen-tung; HOU, Shiann-chin. Investigating the recast layer formed during the laser trepan drilling of Inconel 718 using the Taguchi method. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 33, n. 3-4, p.308-316, 13 abr. 2006. Springer Science + Business Media. DOI: 10.1007/s00170-006-0454-1.

CORCORAN, A. et al. The laser drilling of multi-layer aerospace material systems. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 123, n. 1, p.100-106, abr. 2002. Elsevier BV. DOI: 10.1016/s0924-0136(01)01123-2. Disponível em: <<http://api.elsevier.com/content/article/PII:S0924013601011232?httpAccept=text/xml>>. Acesso em: 22 nov. 2015.

DAHOTRE, Narendra B.; HARIMKAR, Sandip. **Laser Fabrication and Machining of Materials**. [s. L.]: Springer-verlag Us, 2008. 558 p.

DONACHIE, Matthew J.; DONACHIE, Stephen J.. **Superalloys: A Technical Guide**. 2. ed. [s. L.]: Asm International, 2002. 402 p.

EL-HOFY, Hassan. **Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes**. [s. L.]: Mcgraw-hill, 2005. 253 p.

HASÇALIK, Ahmet; AY, Mustafa. CO2 laser cut quality of Inconel 718 nickel – based superalloy. **Optics & Laser Technology**, [s.l.], v. 48, p.554-564, jun. 2013. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.optlastec.2012.11.003. Disponível em: <http://api.elsevier.com/content/article/PII:S0030399212005208?httpAccept=text/xml> >. Acesso em: 22 nov. 2015.

HECHT, Jeff. **The Laser Guidebook**. 2. ed. New York: Mcgraw-hill, 1992. 512 p.

INCROPERA, Frank et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Rio de Janeiro: Ltc, 2008.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED LASER TECHNOLOGIES, 5147., 2003, Moscow. **Micromachining with ultrashort laser pulses: from basic understanding to technical applications**. Moscow: Spie, 2003. 106 p.

LUXON, James T.; PARKER, David E.. **Industrial Lasers and their Applications**. New Jersey: Prentice-hall, 1985.

MAINI, Anil K.. **Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and Applications**. [s. L.]: Wiley, 2013. 636 p.

MAJUMDAR, J. Dutta; MANNA, I.. Laser material processing. **International Materials Reviews**, [s.l.], v. 56, n. 5/6, p.341-388, nov. 2011. Maney Publishing. DOI: 10.1179/1743280411y.0000000003.

MCGEOUGH, J.a.. **Advanced Methods of Machining**. [s. L.]: Springer, 1988. 250 p.

MCNALLY, C.a.; FOLKES, J.; PASHBY, I.r.. Laser drilling of cooling holes in aeroengines: state of the art and future challenges. **Materials Science And Technology**, [s.l.], v. 20, n. 7, p.805-813, jul. 2004. Maney Publishing. DOI: 10.1179/026708304225017391.

MISAWA, Hiroaki; JUODKAZIS, Saulius. **3D Laser Microfabrication: Principles and Applications**. [s. L.]: Wiley-vch, 2006. 403 p.

POWELL, J et al. Laser–oxygen cutting of mild steel: the thermodynamics of the oxidation reaction. **Journal Of Physics D: Applied Physics**, [s.l.], v. 42, n. 1, p.015504-015511, 12 dez. 2008. IOP Publishing. DOI: 10.1088/0022-3727/42/1/015504.

READY, John F.. **Industrial Applications of Lasers**. San Diego: Academic Press, 1997.

READY, John F.. **LIA Handbook of Laser Materials Processing**. Orlando: Laser Institute Of America, 2001.

ROFIN-SINAR LASER. **Process Fundamentals of Industrial Laser Welding and Cutting**. [s. L.]: Rofin, 1999.

ROHDE, H.; MEINERS, E.. Trepan drilling of fuel injection nozzles with a TEM00 Nd: YAG slab laser. **Journal Of Laser Applications**, [s.l.], v. 8, n. 2, p.95-101, 1996. Laser Institute of America. DOI: 10.2351/1.4745409.

RYKALIN, N.; UGLOV, A.. **Laser Machining and Welding**. [s. L.]: Elsevier, 1980. 312 p.

SEZER, H.k. et al. Effect of beam angle on HAZ, recast and oxide layer characteristics in laser drilling of TBC nickel superalloys. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, [s.l.], v. 46, n. 15, p.1972-1982, dez. 2006. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.01.010. Disponível em: <http://api.elsevier.com/content/article/PII:S0890695506000101?httpAccept=text/xml> >. Acesso em: 22 nov. 2015.

SHARMA, Amit; YADAVA, Vinod; RAO, Raghavendra. Optimization of kerf quality characteristics during Nd: YAG laser cutting of nickel based superalloy sheet for straight and curved cut profiles. **Optics And Lasers In Engineering**, [s.l.], v. 48, n. 9, p.915-925, set. 2010. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2010.03.005. Disponível em: <http://api.elsevier.com/content/article/PII:S0143816610000485?httpAccept=text/xml> >. Acesso em: 22 nov. 2015.

SHI, Frank G.. Minimization of welding-induced alignment distortion in butterfly laser module packages: a study of laser pulse shape. **Optical Engineering**, [s.l.], v. 46, n. 4, p.044302-044307, 1 abr. 2007. SPIE-Intl Soc Optical Eng. DOI: 10.1117/1.2726884.

SIEGMAN, Anthony E.. **Lasers**. [s. L.]: University Science Books, 1986. 1283 p.

SILFVAST, William T.. **Laser Fundamentals**. 2. ed. [s. L.]: Cambridge University Press, 2008. 674 p.

SONA, A.. **Metalic Materials Processing: Cutting and Drilling in Applied Laser Tooling**. Boston: Nijhoff, 1987.

SUCHATAWAT, Maturose. **MATHEMATICAL MODELLING OF MULTIPLE PULSED LASER PERCUSSION DRILLING**. 2011. 162 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mechanical Engineering, University Of Manchester, Manchester, 2011.

SVELTO, Orazio. **Principles of Lasers**. 3. ed. [s. L.]: Plenum, 1989.

VON ALLMEN, Martin; BLATTER, Andreas. **Laser-Beam Interactions with Materials**. 2. ed. [s. L.]: Springer, 1995.

WILSON, J.; HAWKES, J. F. B.. **Lasers Principles and Applications**. [s. L.]: Prentice Hall, 1987. 320 p.

YILBAS, Bekir S.. Study of liquid and vapor ejection processes during laser drilling of metals. **Journal Of Laser Applications**, [s.l.], v. 7, n. 3, p.147-157, 1995. Laser Institute of America. DOI: 10.2351/1.4745388.