

## **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE LASER DE FIBRA NA GERAÇÃO DE CAVIDADES PARA MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL**

### **STUDY OF THE INFLUENCE OF FIBER LASER PARAMETERS ON CAVITY GENERATION FOR RESIDUAL VOLTAGE MEASUREMENT**

Igor dos Santos Roik,  
Rodrigo Blödorn

**Resumo:** *Com o objetivo de realizar a medição de tensão residual pelo Método do Furo Cego através de furos produzidos pelo processo de laser, realizou-se uma análise de parâmetros utilizando-se uma liga de cobre e um aço inoxidável AISI 304. Utilizou-se um laser de fibra para gerar cavidades retangulares com comprimento de 2,5 mm e largura de 1,5 mm, tendo sua profundidade variada de acordo com os parâmetros selecionados. Os mesmos parâmetros foram analisados para cada tipo de material, mantendo-se a distância focal em 0,25 mm abaixo da superfície da peça, variando-se a quantidade de passadas que o laser realiza sobre a superfície da peça e a taxa de sobreposição. Utilizando-se um microscópio de variação de foco Alicona G5 realizou-se a análise geométrica das cavidades, podendo-se verificar a profundidade e rugosidade 3D, a fim de avaliar quais parâmetros apresentam maior influência na obtenção de melhores geometrias e quais devem ser considerados quando deseja-se atingir a profundidade desejada. Tendo sido possível verificar através de uma análise estatística de variância que uma maior quantidade de repetições do laser sobre a superfície implica em uma maior taxa de remoção de material, enquanto através dos gráficos e imagens pôde-se observar que uma menor taxa de sobreposição é mais recomendada para obter melhores acabamentos internos. Utilizando-se as considerações observadas neste trabalho é possível determinar os parâmetros ideais para ambos os materiais, sendo a configuração 20\_90, ou seja, 20 passadas e 90% de sobreposição, garantindo assim uma maior profundidade com um melhor acabamento no fundo das cavidades.*

Igor Dos Santos Roik, Rodrigo Blödorn. Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

**Palavras-chave:** Laser. Cavidades. Qualidade. Profundidade. Tensão Residual.

**Abstract:** *In order to measure residual stress using the Blind Hole Method through holes produced by the laser process, a parameter analysis was carried out using a copper alloy and an AISI 304 stainless steel. of fiber to generate rectangular cavities with a length of 2.5 mm and width of 1.5 mm, having their depth varied according to the selected parameters. The same parameters were analyzed for each type of material, keeping the focal distance at 0.25 mm below the surface of the piece, varying the number of passes that the laser performs over the surface of the piece and the rate of overlap. Using an Alicona G5 focus variation microscope, the geometric analysis of the cavities was performed, verifying the 3D depth and roughness, in order to assess which parameters, have the greatest influence on obtaining better geometries and which should be considered when you want to reach the desired depth. It was possible to verify through a statistical analysis of variance that a greater number of laser repetitions on the surface implies a higher material removal rate, while through the graphics and images it could be observed that a lower rate of overlap is more recommended for best interior finishes. Using the considerations observed in this work, it is possible to determine the ideal parameters for both materials, with the setting 20\_90, that is, 20 passes and 90% overlap, thus ensuring greater depth with a better finish at the bottom of the cavities.*

**Keywords:** Laser. Cavities. Quality. Depth. Residual Stress.

## 1. INTRODUÇÃO

Todos os processos tendem a gerar tensões residuais, podendo ser elas trativas ou compressivas, em alguns casos tendem a prejudicar a utilização dos materiais, em outros, elas auxiliam no aumento da vida em fadiga, pois as tensões geradas podem ser trativas ou compressivas, tendo sinal positivo para tensões trativas e negativo para tensões compressivas, logo, como o somatório das tensões tende a zero, quando as tensões com sinal negativo são introduzidas no material, elas tendem a se somar

## Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

com as tensões presentes e a reduzir as tensões totais do material, enquanto as tensões trativas quando somadas aos carregamentos de trabalho, aumentam as tensões causando a falha estrutural..

Segundo Blödorn (2014), o conhecimento das tensões residuais é extremamente necessário visando segurança e prevenção de falhas de equipamentos e peças. O autor também ressalta o crescente uso do Método do Furo Cego (MFC) para a realização da medição destas tensões em ambiente laboratorial e industrial, método este baseado na realização de um pequeno furo no material a ser analisado, e a partir das deformações geradas ao redor do furo, é possível determinar a tensão residual utilizando métodos ópticos para sua medição.

Alguns materiais apresentam maiores resistências mecânicas, dificultando a remoção controlada de material, outros tendem a aderir nas ferramentas caso não seja utilizada uma refrigeração correta, gerando arestas postiças e fazendo com que seja removido mais material do que o adequado, prejudicando também na qualidade da superfície usinada. As dificuldades de medição de tensões residuais devido à difícil usinabilidade de alguns materiais, a interferência do desgaste das ferramentas, problemas de fixação, falta de potência das máquinas, definição errônea de parâmetros aliadas ao crescente uso de processos a laser nas indústrias torna este uma alternativa interessante para utilização na realização de furos cegos para posterior medição de tensões residuais.

Porém, para isto deve-se analisar corretamente os parâmetros de processo, visando reduzir os danos gerados pelo laser, e assim obter uma geometria adequada e posteriormente conseguir realizar uma correta análise, a qual é orientada pela norma ASTM E837, que padroniza a medição de tensões residuais utilizando o Método do Furo Cego (MFC). Este método busca avaliar o perfil de tensão residual abaixo da superfície, e para isso deve-se realizar um furo menor que a espessura do material analisado. Além disso, algumas recomendações são incluídas, como por exemplo, a diferença da profundidade, que por sua vez é variável dependendo do tipo de roseta que será utilizada. Para rosetas do tipo A e B, a profundidade não deve ultrapassar o valor de 0,2 vezes o diâmetro do furo, já para rosetas do tipo C, não deve ultrapassar 0,24 vezes o diâmetro.

## Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

Devido a difícil usinabilidade de alguns materiais, processos a laser são utilizados como uma alternativa para facilitar a remoção de material, enquanto em outros casos, acabam substituindo alguns processos devido a sua precisão e velocidade.

Os processos a laser vêm sendo muito utilizados nas indústrias para a realização de cortes e marcações em peças metálicas, outra aplicação se dá no auxílio de processos de usinagem, nos quais o laser atua com o objetivo de realizar o aquecimento das peças e assim facilitar a remoção de material, este processo recebe o nome de (LAM) do inglês, *Laser Assisted Machining*, traduzida como usinagem assistida por laser.

Os processos a laser são divididos em laser contínuo e pulsado, apresentando benefícios e dificuldades. Dentro desta divisão estão presentes diferentes tecnologias de laser, possuindo aplicações distintas e similares, algumas possuem métodos de funcionamento com pequenas divergências. Neste trabalho utilizou-se um sistema de laser de fibra óptica para realização de ensaios com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros de processo na capacidade de produção de cavidades com geometria controlada. Tendo como principal objetivo identificar o quão intensamente cada parâmetro interfere nas características das cavidades geradas, com o intuito de replicar os ensaios para materiais distintos, e posteriormente realizar a medição de tensões residuais pelo método do furo cego (MFC). Para estes ensaios utilizou-se dois materiais, sendo eles um aço inoxidável AISI 304 e uma liga de cobre. Para a avaliação das cavidades geradas utilizou-se um microscópio de variação de foco – Alicona G5, realizando uma análise de profundidade e qualidade do fundo das cavidades. Com o intuito de identificar quais parâmetros apresentam maior influência no processo, realizou-se uma análise de variância, podendo assim confirmar quais os parâmetros são mais indicados para a correta realização do processo.

O desenvolvimento do presente trabalho está vinculado com uma dissertação de mestrado da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, tendo aproveitado alguns ensaios realizados com o objetivo de explicar a interferência dos parâmetros de processo na profundidade e na qualidade de cavidades geradas em dois materiais diferentes, sendo eles um aço inoxidável AISI 304 e o outro uma liga de cobre.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma breve revisão da literatura, com o intuito de facilitar o entendimento do tema abordado a fim de compreender sua importância tanto para o meio acadêmico quanto para o industrial.

### 2.1. Tecnologia laser

Segundo Hitz, Ewing e Hecht (2012), a palavra laser deriva do inglês, esta é um acrônimo de “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”, que traduzido para o português significa, Amplificação de Luz por Emissão de Radiação Estimulada. O laser nada mais é do que uma luz especial gerada através de uma fonte de alimentação elétrica, que gera um feixe de luz estreito que possui uma cor pura (monocromático) e ondas de luz alinhadas umas com as outras (colimado), em alguns casos a potência do sistema que gera esta luz é menor do que a potência de uma lanterna.

O processo a laser é dividido entre laser contínuo e pulsado, tendo aplicações distintas, mas ambos apresentam algumas características similares, pois este é um processo que utiliza uma grande quantidade de energia térmica concentrada para realizar processos de corte, marcação ou aquecimento do material, tendo como principais parâmetros a potência do laser e a velocidade de corte. Este processo apresenta como vantagens a velocidade e precisão, tendo como principal desvantagem o desenvolvimento de tensões residuais no local de corte.

Segundo Hitz *et al.* (2012), a energia gerada pelo laser pulsado é comprimida e liberada através de pulsos concentrados, sendo mais potente do que a energia liberada em um laser contínuo. Nesse caso, o laser pulsado libera uma quantidade de energia de tempos em tempos, enquanto o laser contínuo libera energia durante todo o processo, sendo assim recomendado para a realização de cortes, enquanto o laser pulsado é utilizado em processos de remoção de material, marcação ou como auxílio no processo de usinagem.

Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

A Figura 1 apresenta os efeitos causados pelas diferenças entre duração de pulso, em que nos pulsos curtos ocorre um maior equilíbrio entre o pulso de laser, resultando em menores impactos na superfície do material, enquanto para pulsos longos pode-se notar variações na superfície da peça e até mesmo a geração de micro trincas internas, para o laser contínuo esse fenômeno ocorre de forma mais agressiva ainda, pode-se notar também que pulsos curtos não afetam termicamente a superfície dos materiais.

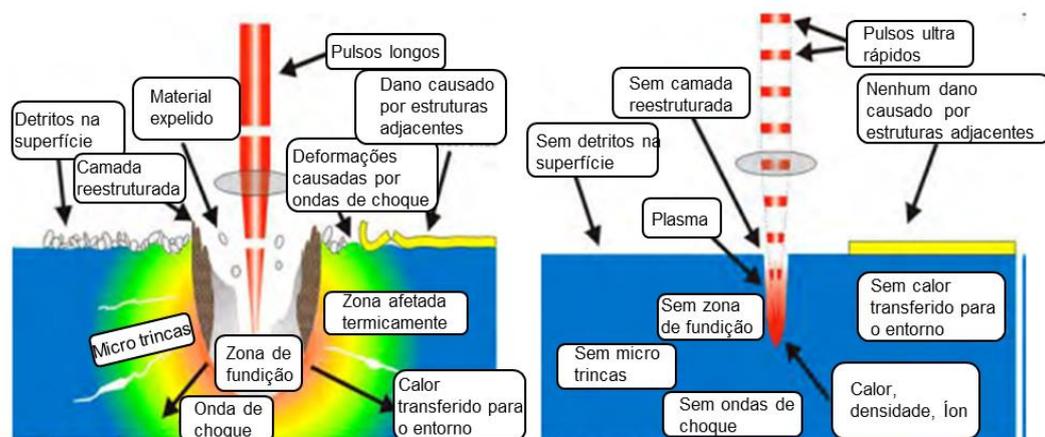


Figura 1. Diferença entre a duração dos pulsos laser (VIDAL, 2010).

Existem diferentes tecnologias de laser, sendo muito parecidas entre elas, mas cada uma possuindo alguma particularidade ou aplicação específica, podendo ser observados na Tab. 1 Os principais tipos de laser existentes são: ópticos não lineares que estendem as aplicações de lasers através do aumento do número de comprimento de onda disponível, podendo produzir comprimentos de onda maiores ou menores; laser de semicondutores que são popularmente conhecidos como laser de diodo, sendo presentes em diversos componentes, esse é um laser muito menor que os demais, além de ser mais leve e mais robusto, ele é formado pela junção de dois diferentes semicondutores, tendo a luz gerada diretamente da borda do bloco, da junção gerada; laser de estado sólido, sendo mais comum o Nd:YAG, seu meio ativo é um cristal hospedeiro passivo YAG e um íon ativo Nd, sendo estes os componentes que dão nome ao laser; laser de fibra, este que será abordado com maiores detalhes neste trabalho; laser de gás que possibilita o uso de diferentes gases, tendo como requisitos básicos um mecanismo de excitação, um tubo para conter o gás e um

**Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual**

ressonador óptico que gera o feixe, o mecanismo de excitação tem como função excitar o gás para produzir uma inversão; laser de dióxido de carbono e outros vibracionais que são lasers de gás que realizam a sua emissão de luz na transição entre níveis de energia vibracional, tendo algumas vantagens como comprimento de onda mais longo do que os lasers de gás citados anteriormente e uma maior eficiência, tendo o como o mais conhecido desta tecnologia o laser de dióxido de carbono; laser eximer, que é o único capaz de produzir uma saída de alta potência ultravioleta com boa eficiência elétrica, este tipo de laser opera com alta pressão dentro da câmara de laser, este laser tem sua energia entregue em pulsos, e por fim laser ultrarrápidos e sintonizáveis que são de frequência ajustável, adequados para aplicações práticas, os lasers sintonizáveis iniciam com uma largura de banda alta e posteriormente são utilizadas técnicas para obter essa redução, essas técnicas geralmente envolvem a manipulação da realimentação, já o laser ultrarrápido significa pulsos menores que um picosegundo (HITZ *et al.*, 2012).

Cada tecnologia de laser possui indicações ou restrições de aplicação, isso devido ao seu modo de funcionamento ou alguma limitação do processo, porém, diferentes métodos de funcionamento possibilitam inúmeros métodos de utilização. As aplicações de laser se dão desde leitura de gravações feitas em CD ou DVD, leitura do código de barras de produtos no supermercado, na telecomunicação gerando sinais ópticos por fibras ópticas, na medicina em procedimentos oftalmológicos, em gráficas, nas forças armadas como detectores de distância e designadores de alvos até na utilização como auxílio de mira ou na realização do processamento de materiais, neste último, pode-se considerar cortar, furar, soldar, tratar termicamente, alterar propriedades de metais e não metais e realizar marcações em peças (HITZ *et al.*, 2012).

Diferentes materiais utilizados, diferentes processos e aplicações requerem parâmetros de trabalhos distintos e específicos, logo, o conhecimento da tecnologia que se deseja utilizar é de extrema importância, pois somente assim é possível obter os melhores resultados possíveis.

Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

## 2.2. Laser de Fibra

Uma fonte a laser gera um feixe de energia, que é fornecido para a cabeça do sistema de laser através de um cabo de fibra óptica, esta fibra faz com que o feixe seja transferido com qualidade, atendendo de forma eficiente a tarefa solicitada (HYPERTHERM, 2021)

A Figura 2 evidencia um sistema de laser de fibra e todos os seus componentes necessários para o correto funcionamento.

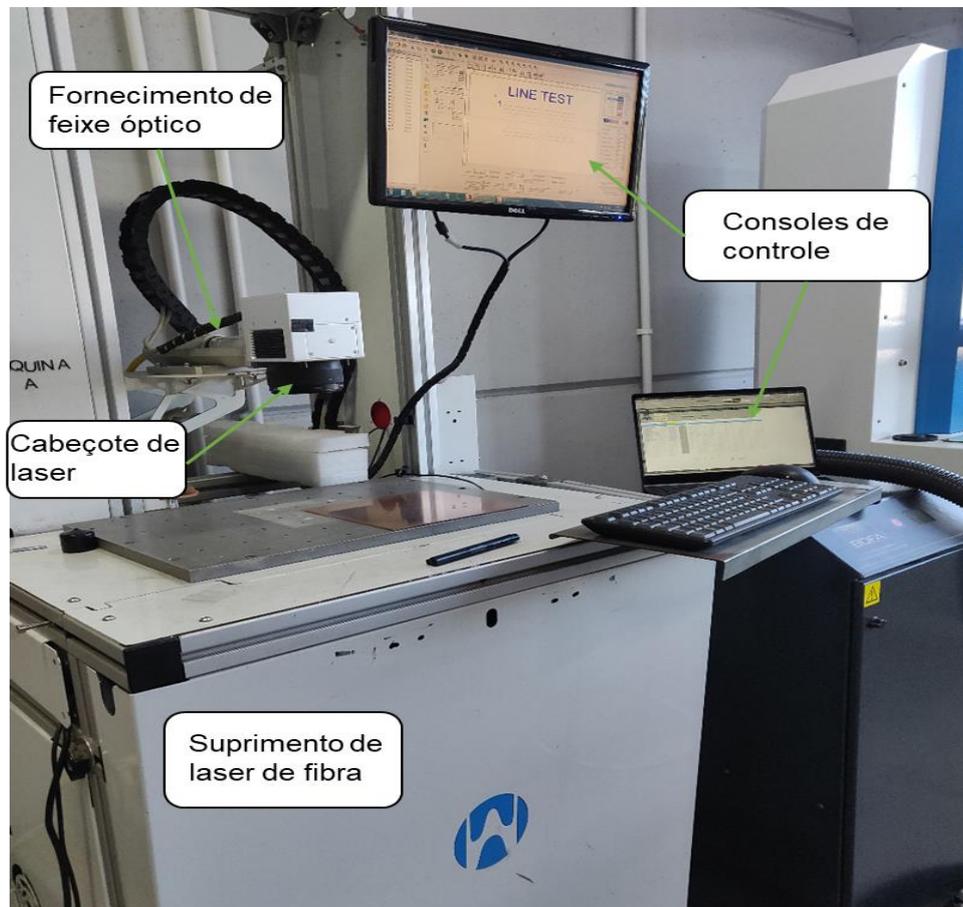


Figura 2. Sistema de laser de fibra.

Segundo Teles Technologies Inc (2020), o laser de fibra se baseia em um dispositivo que possui uma fibra óptica que utiliza elementos de terras raras para a realização do processo, sendo elas: érbio, itérbio, neodímio, disprósio, praseodímeo, túlio e hólmio. Uma grande característica dos lasers de fibra é a maior concentração

## Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

do feixe, suscitando um processo mais eficiente e preciso. Tornando o mesmo extremamente vantajoso para aplicações mais finas.

A fibra do laser é um filamento fino feito de vidro que possui dimensões que variam de vários micrometros até mais de um milímetro de diâmetro e metros de comprimento. Uma fibra simples possui duas camadas, sendo uma delas um núcleo que guia a luz e um revestimento, que envolve este núcleo, para guiar a luz (HITZ *et al.*, 2012).

Um amplo conhecimento de todo sistema de laser de fibra auxilia na correta utilização dele, gerando assim um menor desgaste da máquina e reduzindo as manutenções necessárias.

Segundo Hitz *et al.*, (2012), as bombas de radiação para lasers de fibra são acopladas nas extremidades da fibra, ficando presa por dentro da fibra, podendo ser absorvido por todo o comprimento, o autor também ressalta que lasers de fibra quase sempre são bombeados com lasers de diodo, devido a sua eficiência e a necessidade de uma pequena área, porém, alguns núcleos dos lasers de fibra são tão pequenos que fica difícil acoplar um diodo.

Existem formas de otimizar, melhorar ou corrigir erros gerados nos processos a laser de fibra, sendo uma delas a instalação de um par de espelhos normais nas extremidades da fibra com o objetivo de sustentar a oscilação dele, porém, isto exige um alinhamento extremamente cuidadoso (HITZ *et al.*, 2012).

O laser de fibra, por sua vez não necessita de componentes ópticos para a geração do laser, trazendo benefícios para o processo. Segundo Holdings (2021), devido a não utilização de componentes ópticos para gerar o laser, a não necessidade de limpeza ou troca desses componentes faz com que a longo prazo o laser de fibra se torne vantajoso do ponto de vista financeiro, quando comparado a um laser de CO<sub>2</sub>.

Na Figura 3 é possível observar um esquema de funcionamento de um sistema de laser de fibra utilizado em aplicações industriais.

Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

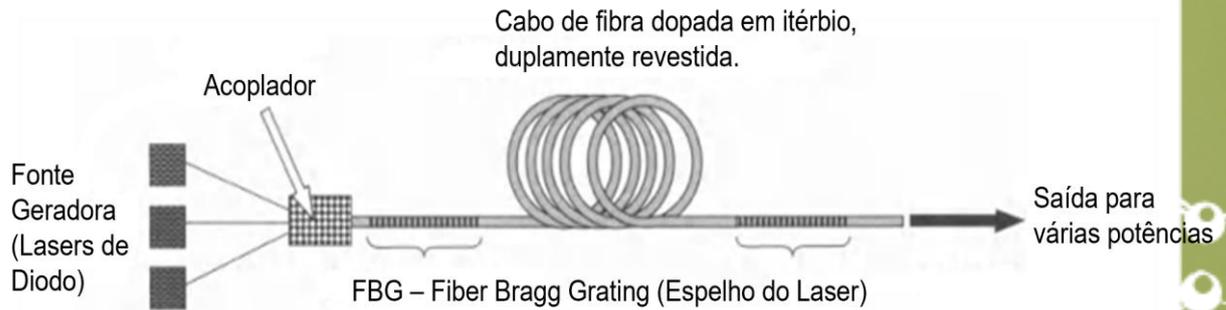


Figura 3. Sistema de laser de fibra utilizado em aplicações industriais (Hitz *et al.*, 2012).

Existem diferentes proporções de máquinas de laser de fibra, alguns modelos menores com foco em pesquisa ou pequenas operações e os modelos industriais. Segundo Hitz *et al.*, (2012), existem modelos de laser de fibra voltados para aplicações industriais, como soldagem de metal ou marcação, seu funcionamento se dá através de feixes de saída de múltiplos lasers de diodo que são combinados por um acoplador multimodo, que está acoplado ao revestimento da fibra de dupla camada. A fibra geralmente possui vários metros, com isso, ela é enrolada para que fique encaixada dentro de um recipiente de tamanho conveniente para a aplicação. Em ambas as extremidades estão instalados os FBGs (Fiber Bragg Gratings) que geram o *feedback* necessário para o correto funcionamento do laser e atingimento da potência de saída na faixa de quilowatts.

Alguns parâmetros são tidos como mais importantes e suficientes para buscar os melhores resultados quando se fala em laser de fibra, sendo eles: duração de pulso, frequência, velocidade e distância de sobreposição. O conhecimento destes parâmetros é necessário para dimensionar aplicações corretamente, para isso, alguns são estudados de maneira a entender seu funcionamento.

O parâmetro de velocidade corresponde à velocidade do avanço do laser enquanto ele está ativado, e a frequência nada mais é que a frequência de repetição dos pulsos de laser (WELLE LASER TECHNOLOGY, 2018).

Diversos autores realizaram estudos de parâmetros de processos a laser visando sua otimização. Uma diminuição na largura temporal dos pulsos resulta, por exemplo, em uma melhoria nas bordas da região usinada (MIRIM *et al.*, 2014).

Segundo Vidal (2010), não é possível realizar a retirada controlada de um volume de material utilizando pulso único, normalmente utiliza-se pulsos longos e a máxima energia disponível, em alguns casos utiliza-se a energia necessária para chegar na profundidade pretendida, quando os parâmetros de processo são conhecidos. Para isso recomenda-se a realização de ensaios visando entender os parâmetros e seu comportamento com diferentes materiais, podendo assim defini-los de maneira correta e eficiente.

### 2.3. Processos a Laser na Usinagem

O uso de processo a laser para auxílio na usinagem vem crescendo cada vez mais nas indústrias, possuindo diferentes formas de uso. Processos como furação e corte de materiais são alguns dos processos mais realizados com o uso de lasers, seja para materiais metálicos ou não metálicos (MARCICANO, 2002). Mas, para a correta realização deste processo, deve-se ter conhecimento dos parâmetros que mais impactam no processo.

Segundo Vidal (2010), a usinagem utilizando métodos a laser requer o uso de múltiplos pulsos, tornando muito importante um entendimento do comportamento da interação entre o laser e o material. Para isso, deve-se analisar o fator de fluência e determinar as regiões mais afetadas pelo processamento a laser, pois este entendimento auxilia na obtenção de uma melhor definição de parâmetros de processo (VIDAL, 2010). Com o objetivo de obter resultados satisfatórios nos processos de usinagem assistidos por laser, diversos ensaios são realizados, como os citados abaixo, por exemplo.

Mirim *et al.* (2014) avaliaram o limiar de ablação para pulsos sobrepostos, além do parâmetro de incubação do aço AISI 1045, e verificaram os efeitos na morfologia da superfície em função da variação dos parâmetros.

Vidal (2010) avaliou que o diâmetro dos danos causados pelos pulsos do laser tende a aumentar de acordo com o aumento da energia e quantidade de pulsos.

Através de ensaios é possível observar algumas características tidas como importantes para a realização do processo, e com isso entender melhor a influência

## Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

de cada uma nos processos realizados. Refletividade da superfície, condutividade térmica, calor específico e calor latente de fusão do material são algumas propriedades importantes para a realização do processo de usinagem por laser (MARCICANO, 2002).

O uso de lasers como auxílio na usinagem se mostra eficiente para a obtenção de resultados mais satisfatórios em vida de ferramenta, formação de cavaco e qualidade superficial, mas para isso é necessário entender de maneira eficiente os parâmetros do processo, com base nisso alguns pesquisadores realizaram ensaios com o intuito de verificar quais parâmetros apresentam maior interferência no processo.

Almeida *et al.* (2003) observaram que um número muito grande de parâmetros foi relevante no processo, porém, alguns apresentam maior influência na obtenção de uma melhor qualidade de corte, sendo eles: largura temporal do pulso, taxa de repetição, energia do pulso e potência média. A largura temporal de pulso é o tempo de duração de cada pulso, tornando ele um pulso curto ou longo de acordo com sua variação, a taxa de repetição é a quantidade de vezes que este laser percorre o mesmo trajeto, a energia do pulso é a energia medida após o pulso atingir a superfície que será trabalhada, e a potência média é a potência da fonte geradora do laser.

Além de conhecer os parâmetros e entender suas influências, deve-se levar em consideração algumas características do material que se deseja trabalhar. Segundo Marcicano (2002), algumas considerações de projeto devem ser adotadas para peças usinadas por laser, sendo elas: refletividade da superfície, a consideração de efeitos de elevadas temperaturas na superfície da peça e que cantos vivos devem ser evitados.

A Figura 4 demonstra um sistema de usinagem assistido por laser instalado em um centro de torneamento, sistema esse que foi utilizado por Dumitrescu *et al.* (2006) em seus ensaios.

Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

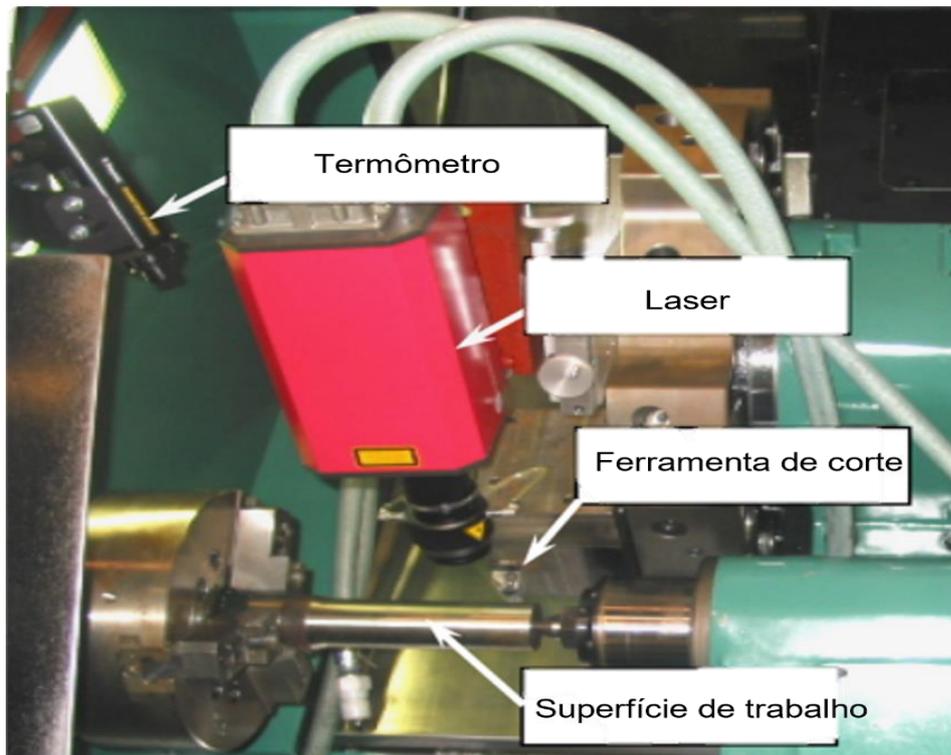


Figura 4. Sistema laser para auxílio na usinagem instalado (DUMITRESCU *et al.*, 2006).

Rossi *et al.* (2001) avaliaram o processo de micro furação a laser em chapas de aço inoxidável AISI 304, visando entender a influência dos parâmetros de intensidade do feixe de laser no processo de furação, na produção de furos passantes, observaram que quanto maior a intensidade do feixe, maiores os diâmetros iniciais obtidos nos ensaios, porém, quanto maior esta intensidade, mais próximos do ideal eram os diâmetros de saída, reduzindo assim a conicidade dos furos gerados.

Comportamento este que também foi observado por Junior *et al.* (2016) em seu trabalho, cuja avaliação foi realizada em chapas de aço inoxidável AISI 316L utilizando-se um laser pulsado Nd:YAG confirmando que quanto maior a potência, menor é a conicidade do furo. Porém, deve-se analisar a potência que se deseja utilizar, pois potências altas reduzem a conicidade, mas também causam danos na forma do furo, perdendo a circularidade. A Fig. 5 demonstra o perfil de um dos furos analisados nos ensaios, podendo verificar a conicidade causada no furo.

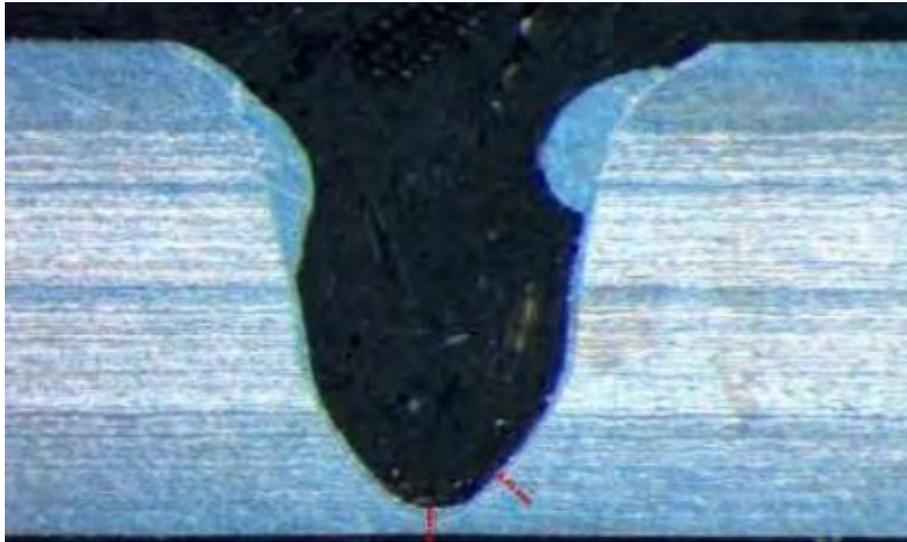


Figura 5. Perfil de furo gerado por laser pulsado (JUNIOR *et al.*, 2016).

Observou-se que o escoamento do material ocorreu da entrada para o fundo do furo, interferindo nos valores medidos de rugosidade, pois parte do material removido é vaporizado, enquanto uma pequena parcela deste retorna para o interior do furo causando um aumento na espessura do material ressolidificado, fenômeno este que se intensifica quando utilizada uma potência abaixo do ideal (JUNIOR *et al.*, 2016).

#### 2.4. Tensão Residual

Tensões residuais são consequências comuns geradas em todos os processos de fabricação, possuindo diferentes tipos e impactos nos materiais, seu conhecimento é extremamente importante para um correto dimensionamento de um sistema ou peça a ser produzida, e para isso existem diferentes métodos de medição, um deles é o MFC, método este que tem grande destaque em sua utilização.

Segundo Blödorn (2018), o MFC é baseado na medição de deformações geradas em uma superfície através de realização de um furo, com essas deformações, com a geometria do furo e as propriedades do material analisado é possível realizar os cálculos das tensões presentes no local analisado.

Ensaio de medição de tensão residual são extremamente importantes para a indústria, com base nisso, diversos pesquisadores visam entender esse fenômeno da melhor maneira possível, além de desenvolver os processos de medição.

Blödorn (2014 e 2018) avaliou a influência de processo de usinagem do furo cego sobre sua geometria. Foi observado que o processo de furação em cheio utilizando-se uma turbina pneumática de alta rotação produz furos com desvios geométricos e dimensionais muito superiores ao fresamento orbital em um centro de usinagem.

A correta realização dos furos possibilita em uma medição mais eficiente e precisa das tensões geradas no material, com base nisso alguns trabalhos foram realizados visando avaliar a geometria do furo cego fabricada pelo processo de fresamento orbital. Pessoa (2021) avaliou o MFC para dois materiais, sendo eles um aço ABNT 1020 e um DIN 16MnCr5, ambos cementados, obtendo incertezas de medição de perpendicularidade do fundo do furo em relação à parede de  $\pm 0,53^\circ$  e  $\pm 0,16^\circ$  respectivamente, apresentando bons resultados para qualidade dimensional, tornando o método possível para avaliação em materiais cementados.

Na Figura 6 é possível observar os valores de medição obtidos por Pessoa (2021) para ambos os materiais. O diâmetro do furo cego realizado em seus ensaios foi de 1,5 mm, tendo uma pequena variação no diâmetro medido para ambos os materiais, ficando próximos do diâmetro nominal, como pode ser visto na imagem.

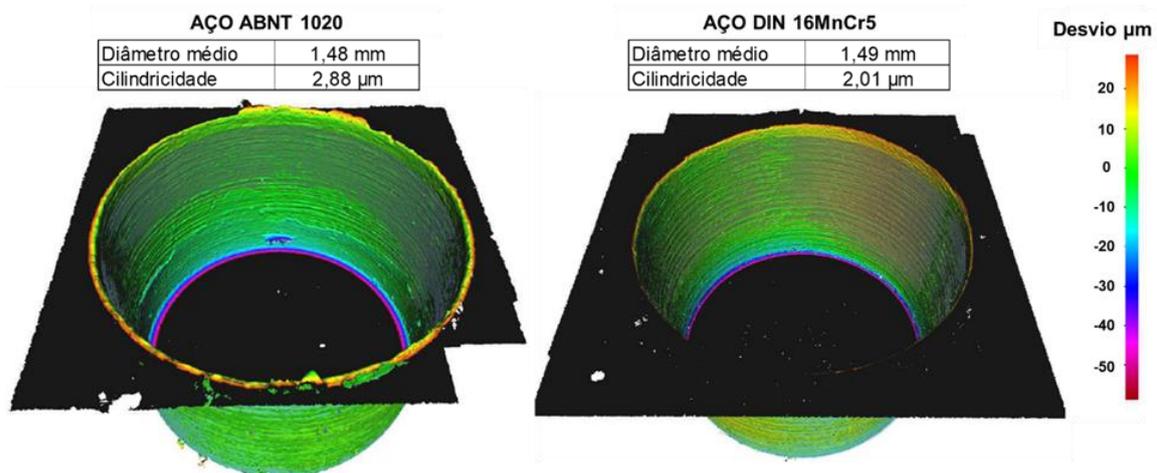


Figura 6. Desvios geométricos dos furos analisados (PESSOA, 2021).

O desgaste da ferramenta e difícil usinabilidade de materiais de alta dureza dificultam as medições de tensão residual pelo MFC, para isso, buscam-se alternativas eficientes em outros processos visando a correta realização do furo.

Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

Na Figura 7 Pode-se observar o comportamento no fundo das cavidades realizadas por Pedrini *et al.* (2015) em seu trabalho, obtendo diferentes comportamentos para diferentes formatos gerados, sendo eles apenas uma ranhura, um anel e uma cruz, variando tanto a profundidade quanto a espessura.

Pedrini *et al.* (2015) realizaram uma análise de tensão residual de revestimento cerâmico por ablação a laser e Holografia Digital, evidenciando que para tal análise deve possuir uma geometria sem erros de forma ou então sem defeitos no fundo das cavidades realizadas, podendo gerar interferências nos resultados obtidos.

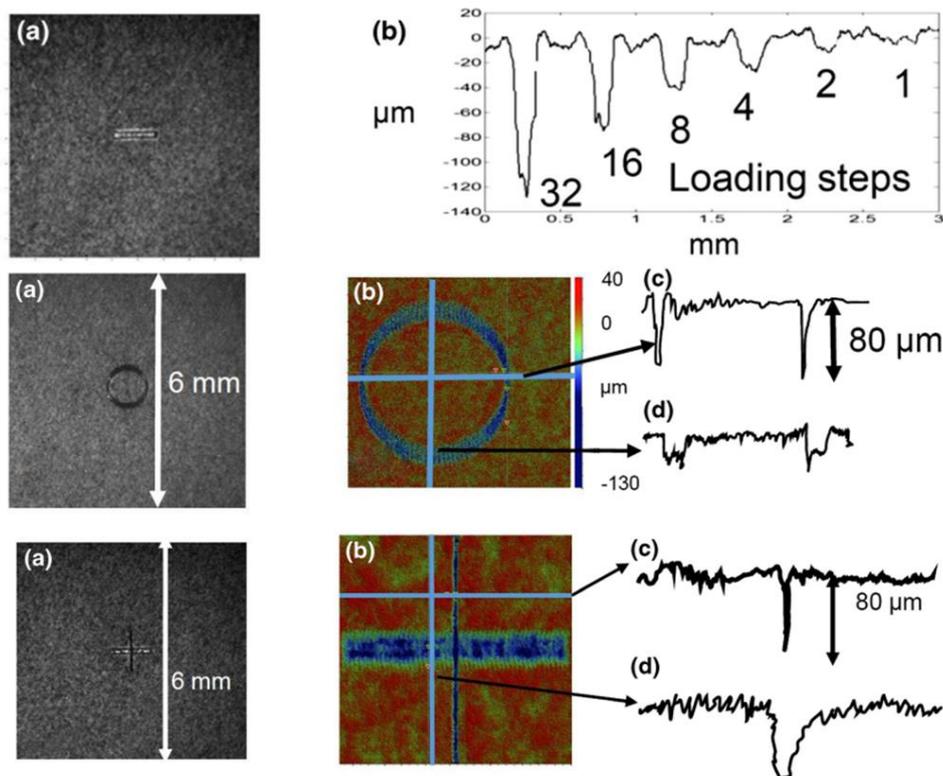


Figura 7. Diferença de comportamento para diferentes cavidades (Adaptado de PEDRINI *et al.* 2015).

É possível observar que quanto maiores as profundidades das cavidades geradas, mais irregulares são as regiões do fundo, variando também de acordo com o formato das cavidades geradas, devido à potência utilizada para atingir a profundidade em questão.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados utilizando-se um equipamento de laser de fibra YLPN-1-1x120-50-M, com comprimento de onda de 1064 nm, uma potência máxima de 50 W, duração de pulso ajustável em 8 posições, possuindo uma faixa de 1 a 120 ns, uma frequência nominal de pulso que varia de 2 a 5000 kHz, possuindo 7,6 mm de diâmetro do raio laser na saída do colimador. O sistema possui cinco eixos lineares (X, Y, Z, A e B), tendo 300 mm de curso e velocidade máxima de 150 mm/s nos eixos X e Y, já para o eixo Z, a velocidade máxima é de apenas 50 mm/s, mas possuindo um curso igual aos anteriores.

Na Figura 8 é possível observar o equipamento utilizado para a realização dos ensaios. Este encontra-se no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) da UFSC.



Figura 8. Equipamento laser utilizado para a realização dos ensaios, infraestrutura do LMP/UFSC (BAUMGRATZ, 2019).

As cavidades foram geradas em formato retangular, possuindo 2,5 mm de comprimento e 1,5 mm de largura, sendo sua profundidade resultante da combinação de parâmetros do equipamento laser. Foram utilizados dois materiais para as análises: um aço inoxidável AISI 304 e uma liga de cobre.

Os parâmetros utilizados podem ser observados na Tab. 1, sendo variado apenas o percentual de sobreposição de cada passe e a quantidade de passadas totais,

mantendo-se sempre padrão a altura de foco para 0,25 mm abaixo da superfície da peça.

Tabela 1. Parâmetros utilizados para a realização dos ensaios.

| <b>Altura de foco (mm)</b> | <b>Passadas</b> | <b>Sobreposição (%)</b> |
|----------------------------|-----------------|-------------------------|
| -0,25                      | 1               | 90, 94 e 97             |
| -0,25                      | 5               | 90, 94 e 97             |
| -0,25                      | 20              | 90, 94 e 97             |

Utilizou-se uma variação na taxa de sobreposição dos pulsos de 90, 94 e 97%, ou seja, o pulso seguinte cobre esse percentual de área do pulso anterior, deslocando-se apenas o percentual restante. Os valores de 1, 5 e 20 são a quantidade de vezes que o pulso do laser passou pela mesma região, ou seja, quantas vezes ele refez o trajeto de remoção de material. Os parâmetros utilizados foram definidos aleatoriamente, com o objetivo de avaliar a influência de cada um, devido ao pouco conhecimento acerca da máquina utilizada para a realização dos ensaios.

A Figura 9a demonstra o parâmetro de taxa de sobreposição, mostrando a região em que o pulso atual sobrepõe a região em que o pulso anterior passou, enquanto na Fig. 9b pode-se ver o trajeto percorrido pelo laser durante a realização do ensaio, ele avança da esquerda para a direita ativado e realiza o retorno desativado.

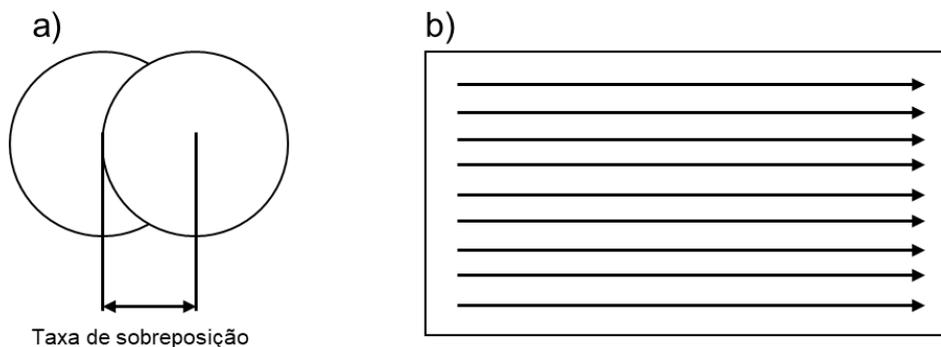


Figura 9. a) Representação da taxa de sobreposição do pulso laser; b) trajeto do pulso ao longo da amostra.

Após o processo de usinagem a laser das cavidades, utilizou-se o microscópio de variação de foco Alicona G5, do Centro Universitário de Brusque - UNIFEBE, que pode

Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

ser observado na Fig. 10, para a aquisição das imagens e posterior medição de profundidade e qualidade do fundo das cavidades. Para a realização da medição, utilizou-se uma lente de ampliação de 10X, para a aquisição da imagem posicionou-se a amostra na mesa do microscópio, selecionou-se a região desejada e definiu-se as configurações de brilho, contraste e resolução que atendessem às necessidades, gerando a imagem sem falhas e com uma boa repetibilidade.



Figura 10. Microscópio de variação de foco – Alicona G5.

Empregando ferramentas disponíveis no *software* do microscópio, foram realizadas medições de profundidade e, posteriormente, avaliou-se a qualidade do fundo das cavidades.

Para realizar as medições de profundidade das cavidades utilizou-se um plano para cortar a amostra no centro e, posteriormente, mediu-se a profundidade média da região, gerando duas linhas de referência (em vermelho na Fig. 11) a partir da seleção da superfície da cavidade e do fundo. O procedimento realizado pode ser notado na Fig. 11, onde a Fig. 11a ilustra o corte na cavidade, e na Fig. 11b, as linhas traçadas para a realização da medição de profundidade.

Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

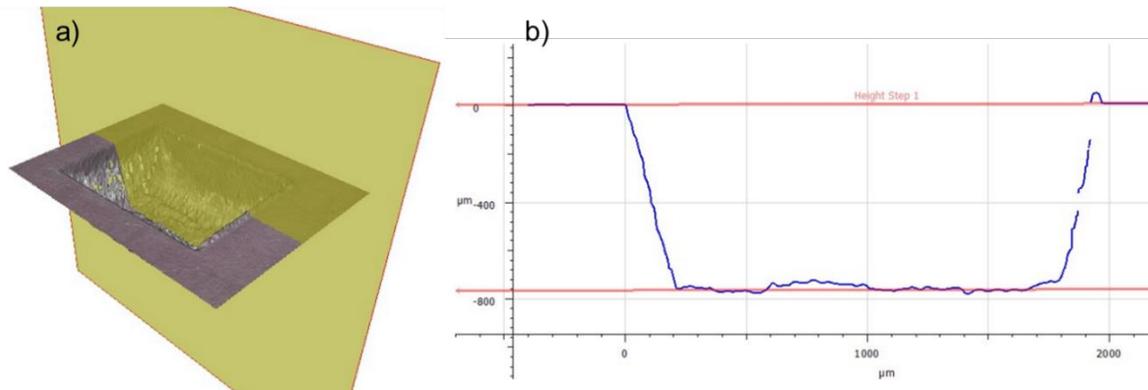


Figura 11. a) Plano traçado para geração do perfil da cavidade; b) Perfil gerado para medição de profundidade.

Para avaliar a qualidade do fundo das cavidades mediu-se os valores de pico máximo e de profundidade máxima da superfície selecionada. Os passos realizados para esta medição podem ser observados na Fig. 12. A partir da imagem 3D da cavidade gerada, realizou-se um corte do fundo dela, excluindo o restante da imagem, após isso, removeu-se a forma do fundo com o objetivo de eliminar possíveis erros oriundos do processo, e por fim, mediu-se a qualidade do fundo da cavidade, avaliando os parâmetros de máximos picos ( $S_p$ ) e máximos vales ( $S_v$ ).

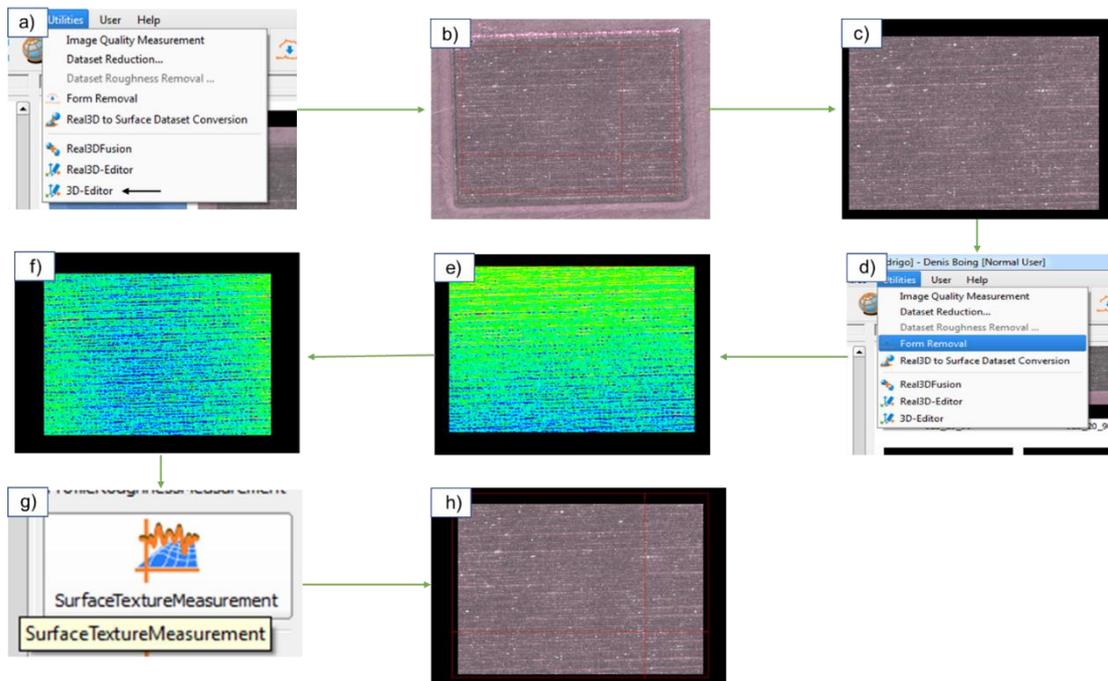


Figura 12. a) seleção da ferramenta de corte; b) seleção da área a ser mantida; c) área restante após o corte; d) seleção de ferramenta para remoção de forma; e) seleção da superfície; f) área

## Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

selecionada após remoção de forma; g) seleção de ferramenta para medição de superfície; h) seleção de região que será analisada.

Através destas medições realizou-se uma análise dos resultados e parâmetros visando obter as recomendações ideais para a geração de furos cegos para medição de tensões residuais. Visando facilitar a análise destes resultados, foram gerados gráficos no Excel que favorecem a visualização dos resultados e auxiliam no entendimento dos efeitos ocorridos, além da realização de uma análise ANOVA, que nada mais é do que uma análise de variância utilizando-se uma fórmula estatística para comparar as variâncias entre as médias de diferentes grupos, e assim, obter um melhor entendimento da influência de cada parâmetro no processo para os materiais analisados, podendo-se determinar quais parâmetros apresentam maior influência sobre a qualidade da cavidade.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados os resultados da avaliação da geometria das cavidades produzidas. Os valores analisados representam uma média da profundidade ao longo da região selecionada, para cada combinação de parâmetros.

A Figura 13 apresenta os valores de profundidade obtidos para a liga de cobre, tornando-se possível realizar uma avaliação de seus respectivos parâmetros para identificar qual apresenta maior influência na obtenção de uma determinada profundidade.

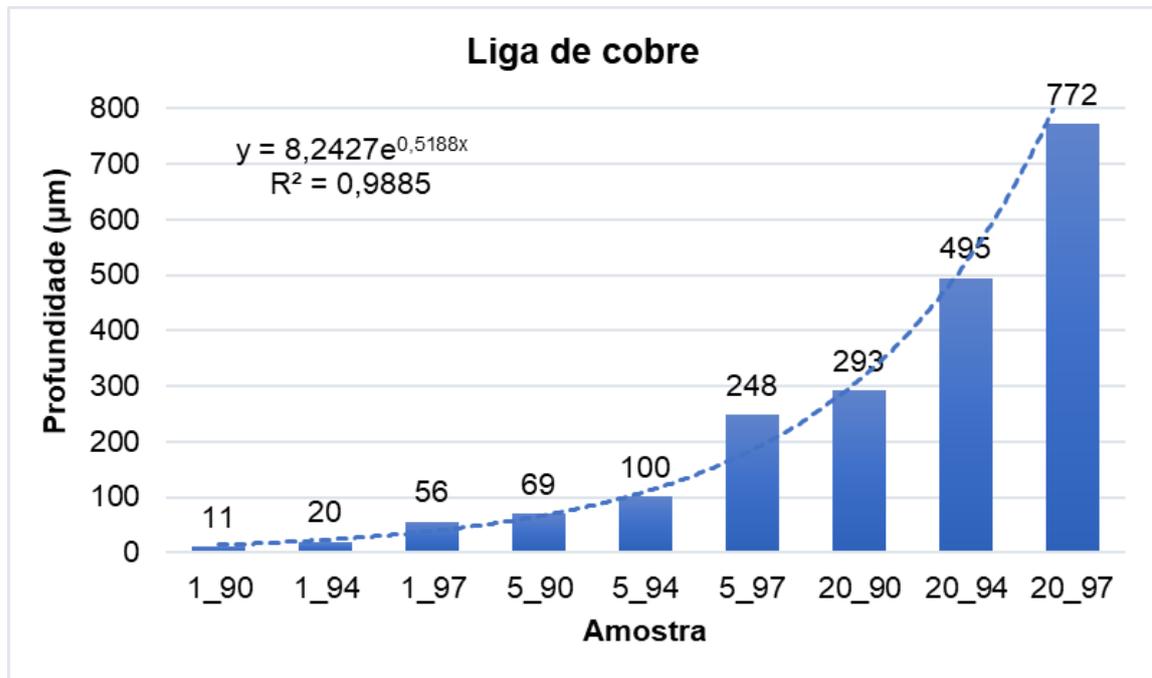


Figura 13. Gráfico com os resultados de profundidade obtidas para a liga de cobre.

Observa-se um crescimento exponencial da profundidade obtida, podendo-se realizar uma previsão do aumento desta profundidade variando-se os parâmetros de entrada. Pode-se notar também um grande salto nos valores obtidos com um maior número de passadas do laser. É possível notar que ambos os parâmetros apresentam influência na obtenção de maiores profundidades.

Os valores apresentaram um grande salto entre o segundo e terceiro ensaio, quando considerada apenas uma passada, e alterada a taxa de sobreposição de 94% para 97%, houve um aumento de quase 3 vezes nos valores obtidos. Comportamento similar foi observado para 5 passadas, quando houve uma variação na taxa de sobreposição igual ao anterior, obteve-se um aumento de quase 2,5 vezes, porém o efeito não se manteve no último caso, quando consideradas 20 passadas o aumento foi de apenas 1,5 vezes, valor próximo ao obtidos nas outras amostras.

Na Figura 14 é possível observar os resultados obtidos para o aço inoxidável AISI 304, apresentando a mesma tendência que para a liga de cobre, porém com um crescimento menor, tendo um grande salto no último ensaio.

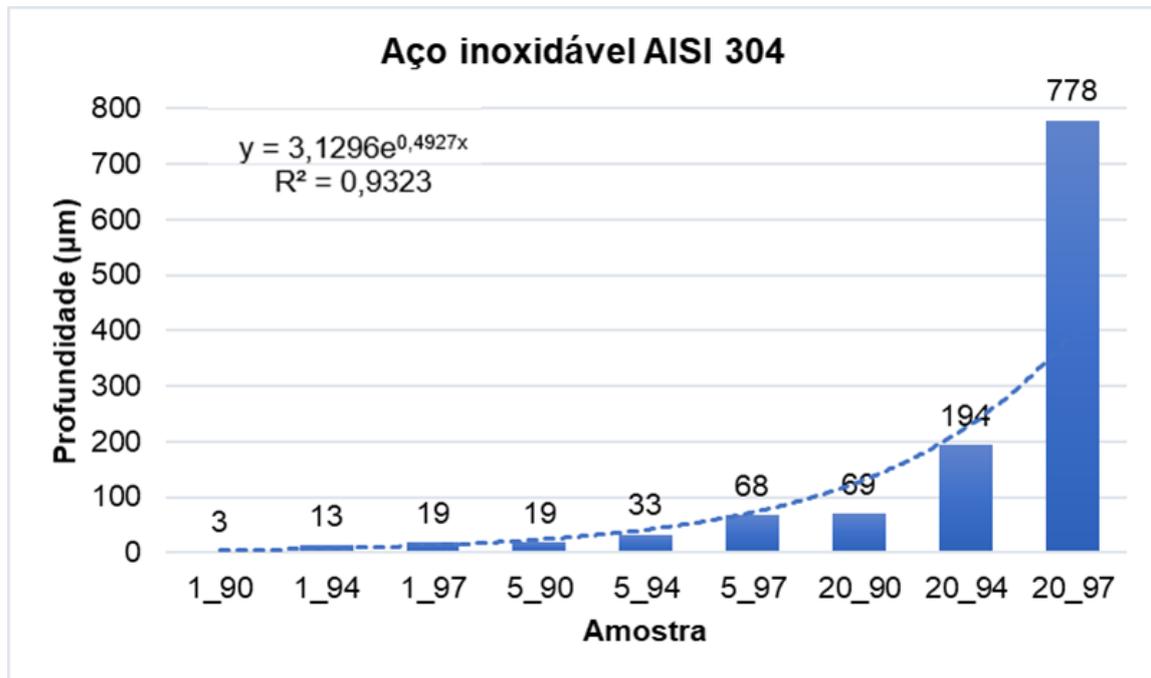


Figura 14. Gráfico com os resultados de profundidade obtida no aço inoxidável AISI 304.

Pode-se ajustar aos pontos experimentais plotados nas Fig. 13 e Fig. 14 uma equação exponencial de forma a permitir uma previsão de parâmetros, facilitando assim na obtenção de parâmetros ideais para atingir profundidades específicas. A curva é traçada considerando-se o crescimento exponencial de todas as amostras ensaiadas, porém, devido ao grande avanço do último ensaio utilizando-se o aço inoxidável AISI 304, considerou-se apenas até o penúltimo ensaio para a geração desta curva neste material, obtendo-se assim um melhor ajuste da equação.

Comparando-se os resultados entre os materiais, é possível notar que até o penúltimo ensaio, todos os valores de profundidade para a liga de cobre foram maiores do que para o aço inoxidável AISI 304, mas no último houve um grande crescimento para o aço inoxidável AISI 304, superando a maior profundidade da liga de cobre. Os baixos valores de profundidade obtidos são devido ao fenômeno observado por Junior *et al.* (2016) e Rossi *et al.* (2001), que observaram que baixas intensidades de energia fazem com que uma pequena parcela de material seja vaporizada, enquanto o restante volta para o fundo das cavidades e se ressolidifica.

Na Figura 15 nota-se o avanço da profundidade das cavidades realizadas na liga de cobre, este que manteve uma certa regularidade nas análises de profundidade, apresentando um crescimento mais controlado, diferente do aço inoxidável AISI 304,

Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

que apresentou um grande salto no último ensaio realizado, fenômeno que pode ser visto na Fig. 16.

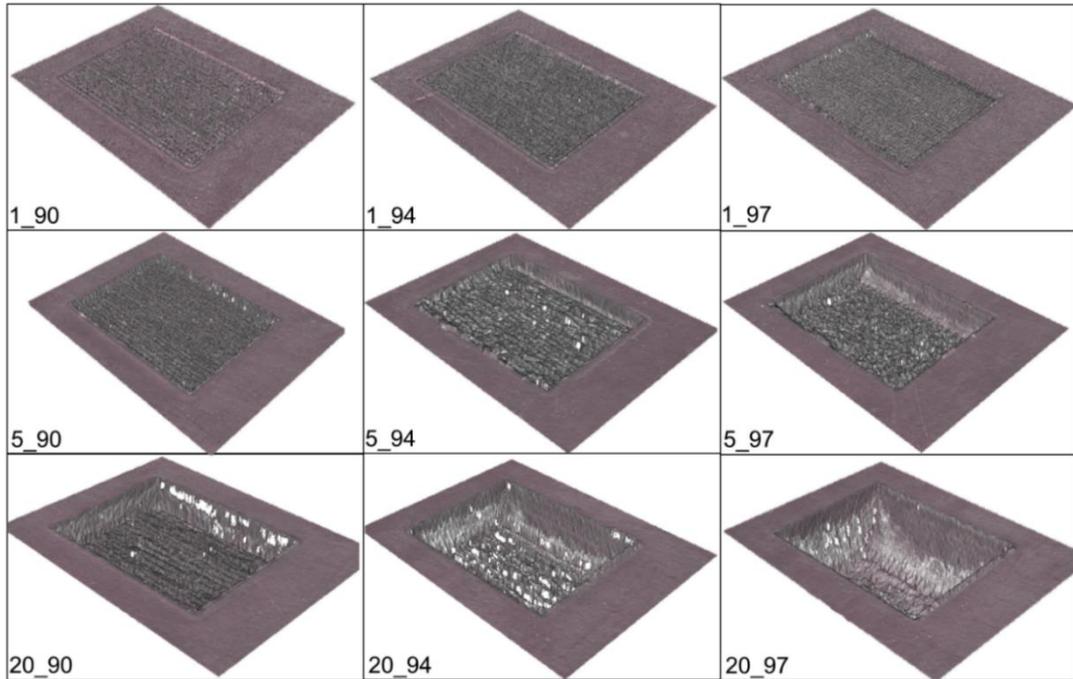


Figura 15. Progressão das cavidades geradas nos ensaios na liga de cobre.

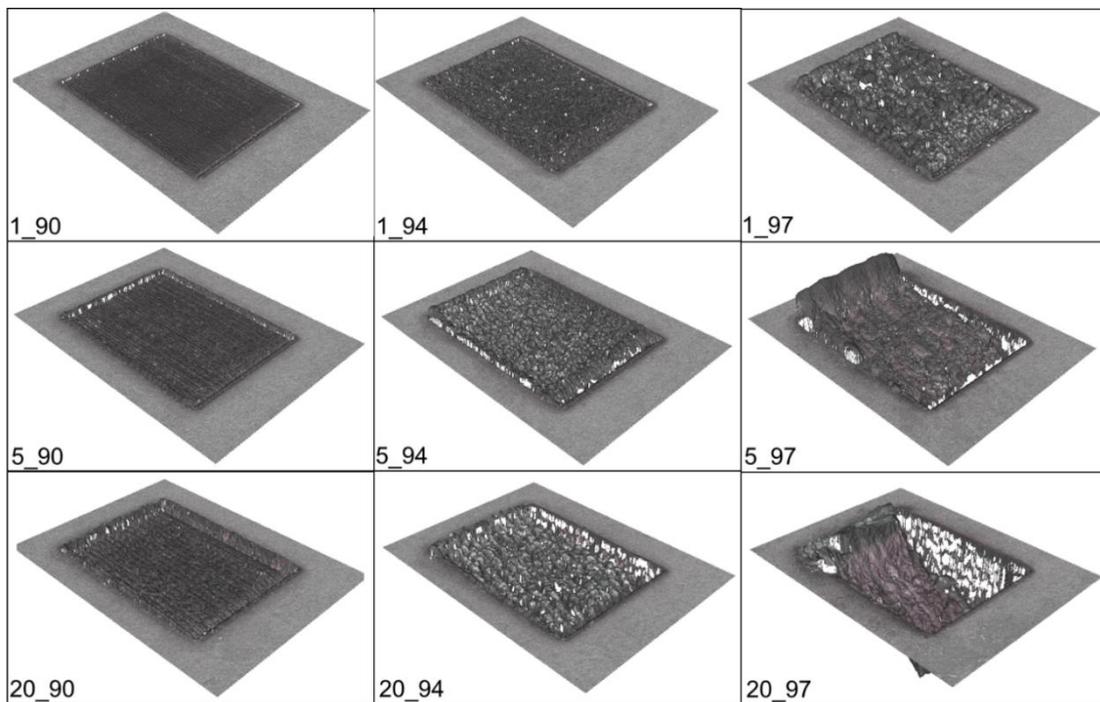


Figura 16. Progressão das cavidades geradas nos ensaios no aço inoxidável AISI 304.

Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

Nota-se uma maior qualidade no fundo das cavidades com menor taxa de sobreposição, além de uma maior uniformidade nas cavidades geradas, isso para ambos os materiais.

Pode-se observar na Fig. 17 as cavidades geradas nos últimos ensaios, com a configuração -0,25\_20\_97 de ambos os materiais. Observa-se uma não uniformidade no fundo da cavidade gerada no aço inoxidável AISI 304, mantendo uma grande quantidade de material no lado esquerdo, enquanto no lado direito, observa-se a maior profundidade obtida. Isso ocorre devido ao trajeto dos pulsos do laser, pois a região pela qual o laser já passou tende a resfriar primeiro, causando a ressolidificação desta região enquanto a região sobreposta posteriormente desloca material para as laterais. Isso faz com que o material seja jogado para trás, ou seja, para a região onde o laser já passou, mantendo assim uma certa quantidade de material que não será removida pelos próximos pulsos, enquanto para a liga de cobre nota-se uma profundidade mais uniforme, apenas podendo observar um pequeno arredondamento no canto da amostra. Ambos os efeitos são oriundos da energia gerada no processo, sendo diferentes entre eles por conta da resistência térmica de cada material analisado.

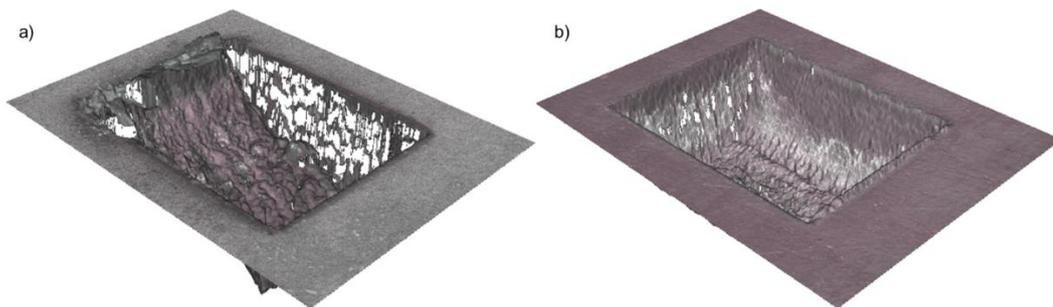


Figura 17. a) Maior cavidade gerada no aço inoxidável AISI 304; b) Maior cavidade gerada na liga de cobre.

Os resultados apresentaram comportamentos diferentes entre os materiais, devido as diferenças de características destes, como refletividade da superfície e condutividade térmica, como afirmado por Marcicano (2002).

A Figura 18 apresenta os resultados com a máxima altura de picos das regiões selecionadas ( $S_p$ ) nas cavidades produzidas na liga de cobre e no aço inoxidável AISI 304.

Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

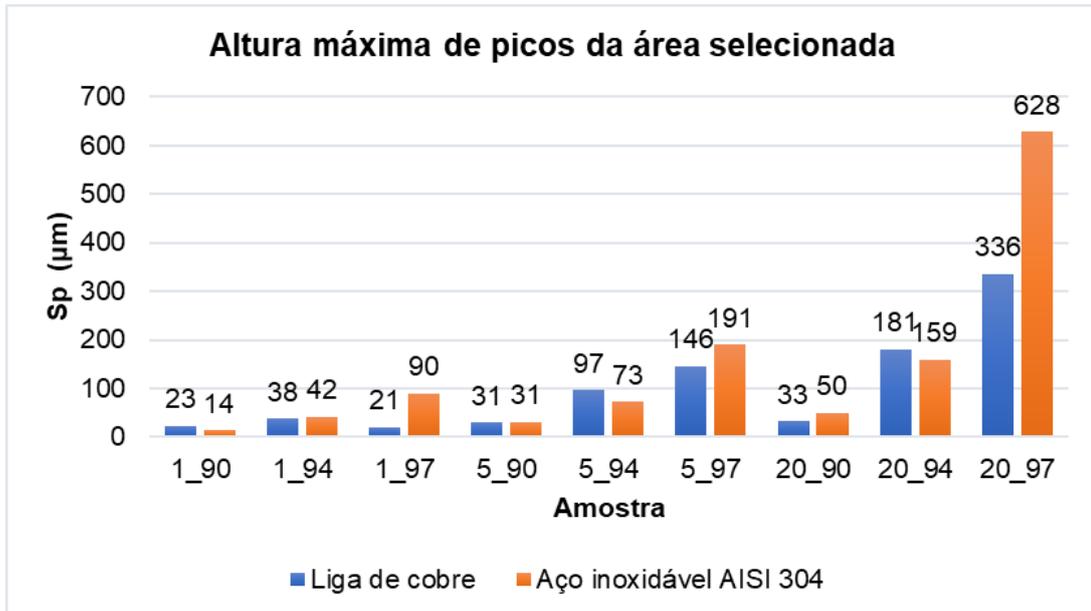


Figura 18. Gráfico com os valores máximos de picos (Sp) obtidos para a liga de cobre e para o aço inoxidável AISI 304.

Nota-se um aumento controlado e menor para a liga de cobre, porém, no aço inoxidável manteve-se um padrão, sempre aumentando os valores de acordo com o aumento da taxa de sobreposição.

A Figura 19 apresenta os resultados com a máxima profundidade das regiões selecionadas (Sv) nas cavidades produzidas na liga de cobre e no aço inoxidável AISI 304. Neste caso, nota-se que a taxa de sobreposição de 94% apresentou maiores valores em todos os casos da liga de cobre, enquanto para o aço inoxidável, os maiores valores foram obtidos com a taxa de sobreposição de 97%.

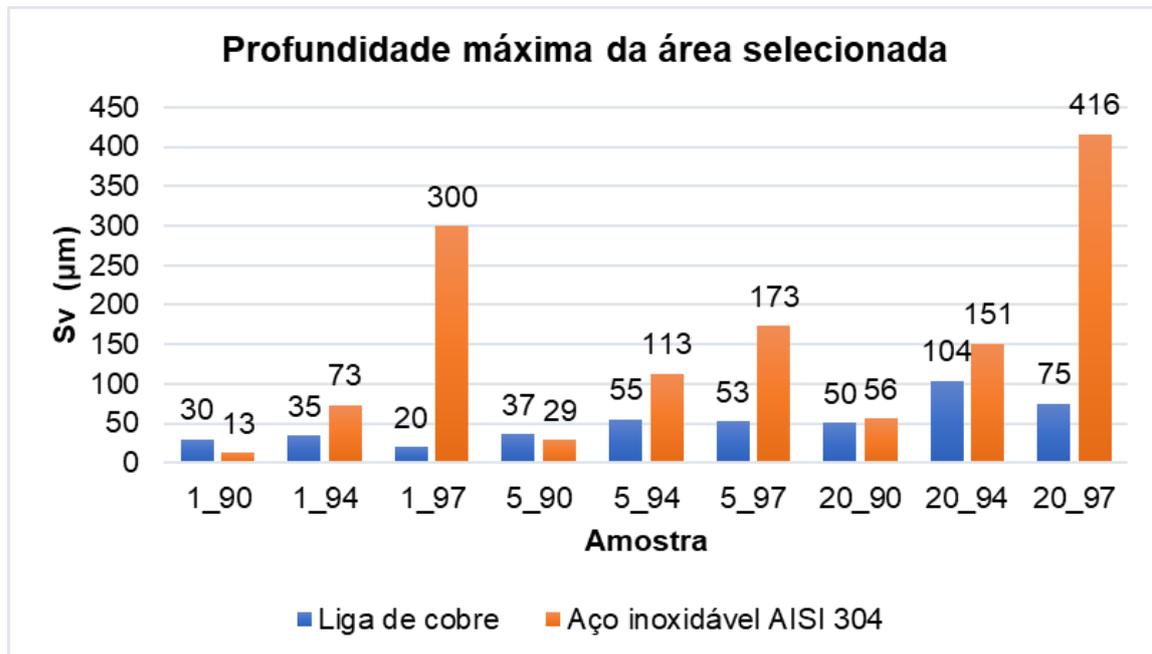


Figura 19. Gráfico com os valores máximos de profundidade (Sv) obtidos para a liga de cobre.

Observa-se uma grande variação nos valores de Sv entre o percentual de sobreposição para o aço inoxidável, tendo grandes aumentos para todos os ensaios quando se analisa a diferença entre 90% e 97%. O resultado observado na última amostra apresentou um valor elevado devido à alta energia gerada no processo, decorrente da influência da taxa de sobreposição aliada à quantidade de repetições do laser. Para o aço inoxidável pode-se observar um comportamento similar ao dos valores de máximos picos, em que a maior diferença se dá devido ao aumento da taxa de sobreposição, facilitando na análise da influência dos parâmetros

Nota-se em ambos os gráficos para os dois materiais que uma menor taxa de sobreposição gera menores valores de Sp e Sv, podendo assim inferir que uma menor taxa de sobreposição tende a gerar uma melhor qualidade no fundo das cavidades.

A influência dos parâmetros na geração das cavidades pode ser observada na Tab. 2, após a realização da análise estatística ANOVA, podendo-se concluir quais os parâmetros que apresentam maior influência para cada configuração de ensaio, e com isso determinar os parâmetros ideais para a realização das medições de tensão residual.

Tabela 2. Resultados de influência dos parâmetros obtidos após a realização de uma análise ANOVA.

Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

| Liga de cobre          |              |             |             | Aço inoxidável AISI 304 |              |             |             |
|------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------------------|--------------|-------------|-------------|
| Variável               | Profundidade | Sp          | Sv          | Variável                | Profundidade | Sp          | Sv          |
|                        | Valor-P      | Valor-P     | Valor-P     |                         | Valor-P      | Valor-P     | Valor-P     |
| Quantidade de passadas | 0,016324247  | 0,204347562 | 0,038134692 | Quantidade de passadas  | 0,195933093  | 0,343139295 | 0,678960066 |
| Taxa de sobreposição   | 0,568830064  | 0,310139001 | 0,531599239 | Taxa de sobreposição    | 0,462263223  | 0,199280922 | 0,012849422 |

Após avaliar os resultados obtidos pela análise ANOVA pode-se observar que para a liga de cobre, a quantidade de passadas é o parâmetro que apresenta maior influência no processo, porém, apenas para a profundidade da cavidade e para a profundidade máxima do fundo (Sv) obteve-se um valor considerável, ficando com o valor de P abaixo de 0,05. Nota-se também que para os valores de picos máximos, a influência não foi tão significativa, pois os valores ficaram acima do estipulado para obter uma significância de 95%. Nesse caso, recomenda-se um maior número de passadas e maior taxa de sobreposição, tendo como parâmetros ideais 20 passadas e 97% de sobreposição, porém, avaliando-se os valores individualmente, nota-se que a sobreposição de 90% é a mais recomendada para obter melhores resultados de qualidade, pois esta apresentou resultados melhores para os valores de Sp e Sv, porém réplicas são fundamentais para uma afirmação mais correta e precisa.

Para os ensaios realizados no aço inoxidável AISI 304 pode-se notar que a quantidade de passadas apresentou maior influência na profundidade das cavidades, enquanto a taxa de sobreposição influenciou nos valores de Sp e Sv. Porém, apenas para os valores de profundidade máxima no fundo (Sv) o resultado foi significativo, atingindo um valor de P menor que 0,05 e mantendo a significância de 95%. Neste caso, o parâmetro ideal é de 20 passadas com uma taxa de sobreposição de 90%, garantindo-se assim uma maior profundidade e obtendo-se uma melhor qualidade no fundo das cavidades.

Considerando-se os ensaios realizados por Pessoa (2021), em que os furos foram realizados com diâmetro e profundidade de 1,5 mm e 1 mm, respectivamente, a condição que mais se aproxima desta profundidade é a com maior número de passadas e maior taxa de sobreposição, sendo a configuração 20\_97 de ambos os materiais. Porém, considerando-se também a afirmação de Pedrini *et. al.* (2015) quanto a qualidade no fundo dos furos, pode-se notar que os resultados que apresentaram melhor qualidade foram utilizando-se uma menor taxa de sobreposição,

Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

tendo assim como parâmetro ideal para obter um furo com a maior profundidade e melhor qualidade a configuração 20\_90, para ambos os materiais.

A interferência da taxa de repetição na qualidade das cavidades geradas na liga de cobre apresentou comportamento análogo ao citado por Almeida *et al.* (2003). Este, por sua vez, afirmou que a taxa de repetição era um dos parâmetros que apresentavam maior interferência na qualidade das superfícies geradas.

A Figura 20 demonstra a diferença entre o fundo das cavidades analisadas, podendo-se observar a influência dos parâmetros no fundo.

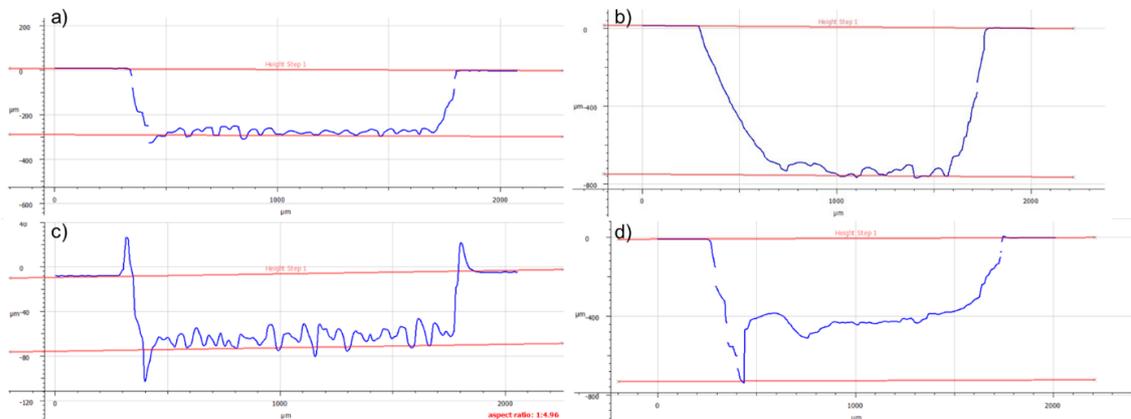


Figura 20. a) liga de cobre com 20 passadas e 90% de sobreposição; b) liga de cobre com 20 passadas e 97% de sobreposição; c) aço inoxidável AISI 304 com 20 passadas e 90% de sobreposição; d) aço inoxidável AISI 304 com 20 passadas e 97% de sobreposição.

Observa-se que as imagens da esquerda apresentam maior regularidade no fundo das cavidades, diferente das imagens da direita, que apresentam grandes desvios. Com isso, pode-se entender a influência da taxa de sobreposição no fundo das cavidades.

Para o aço inoxidável AISI 304 observou-se que a taxa de sobreposição apresentou maior interferência na qualidade das cavidades, diferente da liga de cobre. Porém, observa-se que para ambos os materiais a taxa de sobreposição de 90% apresentou os melhores resultados, tanto para alturas de picos máximos quanto para profundidades máximas. Nota-se também que o fundo das cavidades se manteve mais regular para os ensaios com menor taxa de sobreposição.

## 5. CONCLUSÕES

Observando-se os valores obtidos de profundidade, foi possível traçar uma curva exponencial e gerar uma equação de tendência, com isso pode-se realizar uma previsão de possíveis valores de profundidade para parâmetros futuros, podendo-se ajustá-los de acordo com a profundidade desejada, atendendo assim de maneira eficiente aos requisitos para a geração de furos cegos para a medição de tensão residual.

A tabela com os resultados de profundidade de ambos os materiais apresenta um mesmo comportamento, tendo como maior influência a quantidade de passadas do laser pela mesma posição, além de uma maior taxa de sobreposição. Nota-se que quanto maior for o número de passadas e a taxa de sobreposição, maior será a profundidade, isso para ambos os materiais analisados. Porém, a quantidade de vezes que o laser passa pela mesma região tem um impacto mais significativo.

Pode-se notar um comportamento diferente entre os materiais nas análises de picos e profundidades máximas. Para o caso do aço inoxidável AISI 304, este demonstrou uma repetibilidade nos efeitos de profundidade máxima e picos máximos, tendo sempre como maiores valores as maiores taxas de sobreposição, enquanto para a liga de cobre houve algumas divergências.

Analisando-se do ponto de vista da geometria ideal para medição de tensão residual e correta produção dos furos cegos, nota-se que se deve utilizar uma maior quantidade de repetições do laser visando atingir maiores profundidades, enquanto mantém-se uma menor taxa de sobreposição, podendo-se assim evitar erros de forma que venham a prejudicar as medições de tensão residual. Para os ensaios e avaliações realizadas obteve-se como condição ideal 20 passadas e 90% de sobreposição, assim sendo possível obter uma maior profundidade com melhor qualidade, aproximando-se do ideal, que é regulamentado pela norma ASTM E837 (2020).

Com os conceitos observados neste trabalho é possível aproximar-se de uma geometria ideal para medição de tensão residual no aço inoxidável AISI 304 e na liga de cobre, devido ao entendimento da influência de cada parâmetro no processo.

Entretanto, para materiais diferentes deve-se realizar outra análise de parâmetros visando compreender os efeitos, devido às diferentes características de cada material.

Sugere-se para trabalhos futuros a realização de uma análise de conicidade nas cavidades geradas, além de uma análise de parâmetros em aços de elevada dureza, na faixa de 60 à 65 HRC, pois estes apresentam dificuldades de serem usinados com ferramentas de geometria definida, podendo ter o processo a laser como uma alternativa viável para a realização dos furos cegos e posterior medição de tensões residuais.

## 6. AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, por todo o apoio ao longo dessa caminhada e por toda a paciência nos meus momentos de estresse.

Agradeço à minha noiva, que sempre esteve ao meu lado, foi parceira, compreensiva e sempre exigiu que eu desse o melhor de mim; agradeço por ela ter me incentivado desde o início e me ajudado a não desistir.

Agradeço a todos os meus amigos adquiridos ao longo desses anos de curso, por toda a parceria e troca de experiência.

Agradeço ao meu orientador, professor Rodrigo Blödorn, que ao longo dessa caminhada tornou-se um grande amigo. Estendo o agradecimento a todos os meus professores, pois todos contribuíram imensamente com seus conhecimentos e experiências.

Agradeço ao Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE, por deixar à disposição a utilização dos laboratórios e equipamentos, bem como a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, que disponibilizou a utilização do laser para a realização dos ensaios.

Agradeço ao professor Milton, pela oportunidade de realizar este trabalho em conjunto, e ao mestrando Fred, que disponibilizou algumas de suas amostras e auxiliou em alguns esclarecimentos acerca do processo.

Agradeço, por fim, aos integrantes da banca, por terem aceitado fazer parte deste momento tão especial para mim.

## 7. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Ivan Alves de; ROSSI, Wagner de; LIMA, Milton S. F.; BERETTA, José Roberto; MORATO, Spero Penha. **Corte de titânio por laser pulsado de neodímio:YAG**. In: congresso nacional de soldagem, 29., 2003, São Paulo. São Paulo: 2003.
- AMADA HOLDINGS. **Ressonador a laser de fibra série AJ**. Disponível em: <http://amada.com.br/engineering/ressonador-laser-de-fibra-serie-aj/baixo-consumo/>. Acesso em: 31 out. 2021.
- ASTM E837-20, **Método de Teste Padrão para Determinar Tensões Residuais pelo Método Strain Gage de Perfuração**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- BAUMGRATZ, Frederico **Marques. Micro usinagem de raio laser tridimensional: desenvolvimento e implementação**. 2019. 23 f. (Projeto de Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.
- BLÖDORN, R. **Estudo do Furo e Processo de Furação Empregado no Método do Furo Cego para Medição de Tensões Residuais**. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- BLÖDORN, R. **Efeito do fresamento orbital com fresa de topo e furação em cheio com broca helicoidal sobre os valores medidos da tensão residual pelo “método do furo cego”**. 2018. 242 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- DUMITRESCU, P.; KOSHY, P.; STENEKES, J.; ELBESTAWI, M.A. **High-power diode laser assisted hard turning of AISI D2 tool steel**. International Journal of Machine Tools And Manufacture, [S.L.], v. 46, n. 15, p. 2009-2016, dez. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.01.005>.
- HITZ, C. Breck; EWING, J.; HECHT, Jeff. **Introduction to laser Technology**. 4. ed. New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2012.
- HYPERTHERM. **Como lasers funcionam**. Disponível em: <https://www.hypertherm.com/pt/learn/cutting-education/laser-technology/how-lasers-work/>. Acesso em: 31 out. 2021.
- JUNIOR; VENTRELLA; GALLEGO. **Microfuração com laser pulsado Nd:YAG em chapas de aço inoxidável AISI 316L**. In: CBECimat, 22., 2016, Natal. Anais. Mato Grosso: 2016. p. 1-57.

Estudo Da Influência Dos Parâmetros De Laser De Fibra Na Geração De Cavidades Para Medição De Tensão Residual

MARCICANO, João Paulo Pereira. **Tópicos em Fabricação Mecânica**. São Paulo, 2001.

MIRIM, Denilson de Camargo; ROSSI, Wagner de; SAMAD, Ricardo Elgul; VIEIRA JÚNIOR, Nilson Dias; NEVES, Maurício David Martins das. **Ablação com laser de pulsos ultracurtos**: avaliação dos efeitos no aço aisi 1045. In: congresso anual da ABM, 69., 2014, São Paulo. Conference paper. São Paulo, 2014.

PEDRINI, G.; MARTÍNEZ-GARCÍA, V.; WEIDMANN, P.; WENZELBURGER, M.; KILLINGER, A.; WEBER, U.; SCHMAUDER, S.; GADOW, R.; OSTEN, W. **Residual Stress Analysis of Ceramic Coating by laser Ablation and Digital Holography**. Experimental Mechanics, [S.L.], v. 56, n. 5, p. 683-701, 29 dez. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11340-015-0120-3>.

PESSOA, Eduardo. **Avaliação da integridade de materiais cementados aplicados na indústria automotiva**. 2021. 20 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário de Brusque, Brusque, 2021.

ROSSI, Wagner de; BRITO, Roberto de; BERRETTA, José; ALMEIDA, Ivan Alves de; VIEIRA JUNIOR, Nilson Dias. **Microfuração a laser em chapa de aço inoxidável AISI 304**. In: COBEF, 1., 2001, Curitiba.

TELESIS TECHNOLOGIES INC. **Noções básicas sobre lasers**: o que é um laser de fibra? O que é um laser de fibra? 2020. Disponível em: <https://telesisis.com/pt/understanding-lasers-what-is-a-fiber-laser/>. Acesso em: 29 ago. 2021.

VIDAL, José Tort. **Desenvolvimento de um sistema opto-mecânico para micro usinagem com laser de femtosegundo**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear, Autarquia Associada A Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

WELLE LASER TECHNOLOGY. **Principais parâmetros para uma marcação a laser ideal**. 2018. Disponível em: <https://wellelaser.com/principais-parametros-para-uma-marcacao-a-laser-ideal/>. Acesso em: 16 set. 2021.