

MANOEL KOLLING DUTRA

OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO DE MARCAÇÃO A LASER APLICADO EM
RASTREABILIDADE DE COMPONENTES

FLORIANÓPOLIS

2017

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS DE FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM MECATRÔNICA

MANOEL KOLLING DUTRA

OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO DE MARCAÇÃO A LASER APLICADO EM
RASTREABILIDADE DE COMPONENTES

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Milton Pereira, Dr. Eng.

Coorientador: Maurício Edgar Stivanello, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS

2017

CDD 629.8
D978o

Dutra, Manoel Kolling

Otimização de processo de marcação a laser aplicado em rastreabilidade de componentes [DIS] / Manoel Kolling Dutra; orientação de Milton Pereira; coorientação de Maurício Edgar Stivanello – Florianópolis, 2017.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Marcação a laser. 2. Processamento de imagens. 3. Rastreabilidade industrial. I. Pereira, Milton. II. Stivanello, Maurício Edgar. III. Título.

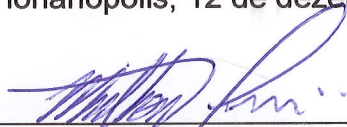
Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis
Catalogado por: Edinei Antonio Moreno CRB 14/1065

**OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO DE MARCAÇÃO A LASER APLICADO EM
RASTREABILIDADE DE COMPONENTES**

MANOEL KOLLING DUTRA

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Mecatrônica e aprovada na sua forma final pela banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

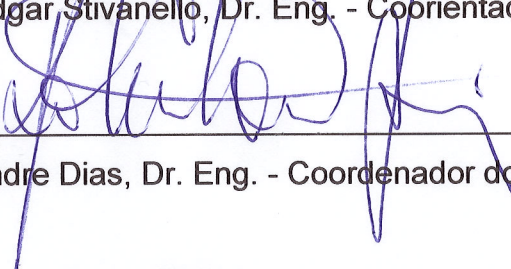
Florianópolis, 12 de dezembro de 2017.



Prof. Milton Pereira, Dr. Eng. - Orientador - UFSC

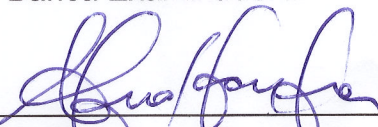


Prof. Mauricio Edgar Stivanello, Dr. Eng. - Coorientador - IFSC

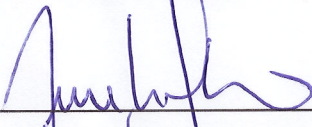


Prof. Roberto Alexandre Dias, Dr. Eng. - Coordenador do curso - IFSC

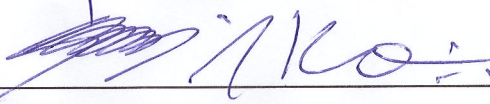
Banca Examinadora:



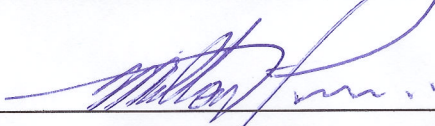
Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng. - Titular - IFSC



Prof. Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr. Eng. - Titular - IFSC



Prof. Fabio Antônio Xavier, Dr. Eng. - Titular - UFSC



Prof. Milton Pereira, Dr. Eng. - Presidente - UFSC

A meus familiares e amigos, especialmente à minha namorada, amiga e companheira Leandra.

Aos professores da educação básica e do ensino superior de todo Brasil.

E a todos os professores pesquisadores, que sejam fonte de inspiração aos acadêmicos que participam de projetos de pesquisa e iniciação científica.

AGRADECIMENTOS

A toda minha família e amigos, pelo apoio, em especial minha namorada e amiga, Leandra Formentão, pela compreensão e pelo incentivo diário durante o desenvolvimento desse trabalho.

A todos os professores do PPGM-IFSC, por terem de alguma forma contribuído para o desenvolvimento deste trabalho, pela sua paciência e pelos ensinamentos constantes, em especial ao meu coorientador professor Dr. Eng. Maurício Edgar Stivanello.

Aos membros e colegas do grupo de pesquisa do CSI-IFSC (Laboratório de Controle e Supervisão Inteligente) pelo apoio e contribuições nesta caminhada.

Ao meu orientador Dr. Eng. Milton Pereira pela compreensão, colaboração e orientação no desenvolvimento do trabalho e à toda a equipe do LMP-LASER do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

À empresa Welle LASER por me disponibilizar o uso de seu laboratório, necessários à execução dos experimentos com fonte LASER de fibra e também meus agradecimentos aos irmãos Gabriel e Rafael Bottos e aos colaboradores Virginia Paludo, Jone e Zair.

A todos os professores e colegas do IFSC, com os quais pude trocar ideias e receber sugestões para o aperfeiçoamento do trabalho.

RESUMO

O conhecimento das características físicas dos materiais metálicos processados com LASER, mais especificamente no processo de marcação aplicado em rastreabilidade industrial, é fundamental para a otimização e definição dos parâmetros a serem alterados na fonte de LASER, sendo determinante na quantificação da qualidade das marcações. Estudos mostram que o aquecimento da superfície onde será realizada uma marcação contribui diretamente na qualidade devido à zona termicamente afetada ter relação direta com a quantidade de material retirado (ablação) e, conseqüentemente, com o contraste gerado na marcação. Dessa forma, antes de definir os parâmetros de marcação a serem utilizados, são necessários ensaios de experimentação, que tem como principal função caracterizar as diversas superfícies que estarão marcadas. Através desse conceito, esse projeto tem por objetivo contribuir no crescimento da área de processamento de materiais a LASER, especificamente no processo de marcação, por meio do desenvolvimento de um estudo investigativo acerca da relação entre os parâmetros do LASER e as características das marcações, mais especificamente no contraste. A metodologia consiste na realização de ensaios que gerem resultados satisfatórios e, conseqüentemente, contribuam para a análise dos resultados. Entre as inovações tecnológicas propostas para esse estudo, destacam-se as principais: comparação dos parâmetros do LASER e a avaliação de sua relação com a qualidade da marcação através da análise de métrica qualitativa do contraste das marcações, obtidas através da utilização de técnicas de processamento de imagem. Além disso, trata-se de um projeto dentro do escopo de rastreabilidade industrial, bastante relevante para as demandas observadas na indústria atualmente.

Palavras-chave: Marcação LASER, Processamento de imagens, Rastreabilidade Industrial.

ABSTRACT

The knowledge of the physical characteristics of the metallic materials processed with LASER, more specifically in the marking process applied in industrial traceability, is fundamental for the optimization and definition of the parameters to be altered in LASER source, being determinant in the quantification of quality of the markings. Studies show that the heating of the surface where a marking will take place contributes directly to the quality because the thermally affected area is directly related to the amount of material removed (ablation) and, consequently, to the contrast generated in the marking. Thus, prior to defining the marking parameters to be used, experimental tests are required, whose main function is to characterize the various surfaces that will be marked. Through this concept, this project aims to contribute to the growth of the area of materials processing to LASER, specifically in the marking process, through the development of an investigative study about the relationship between the parameters of the LASER and the characteristics of the markings, more specifically in contrast. The methodology consists of performing tests that generate satisfactory results and, consequently, contribute to the analysis of the results. Among the technological innovations proposed for this study, we highlight the main ones: comparison of the LASER parameters and the evaluation of their relation with the quality of the marking through the qualitative metric analysis of the contrast of the markings, obtained through the use of processing techniques of image. In addition, it is a project within the scope of industrial traceability, quite relevant to the demands observed in the industry today.

Keywords: LASER Marking, Image Processing, Industrial Traceability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo de ablação com LASER	25
Figura 2 - Alterações físicas do processamento com LASER	27
Figura 3 - Parâmetros de processo para gravação, ablação e mudança de cor por recozimento.....	29
Figura 4 - Parâmetros do LASER aplicados na marcação	32
Figura 5 - Espaçamento Lateral (a) e longitudinal (b)	33
Figura 6 - Exemplo de configuração simplificada de sistema de inspeção/marcação em linha.....	36
Figura 7 - Exemplo de ferramenta de verificação de qualidade de marcação no sistema AutoVISON®	39
Figura 8 - Exemplo de ferramenta de verificação de qualidade de marcação no sistema NI Vision Builder®	39
Figura 9 - Geometrias propostas.....	43
Figura 10 - Características dos parâmetros do LASER associadas ao processo de marcação.....	44
Figura 11 - Parâmetros e suas características na marcação	45
Figura 12 - Equipamento utilizado.....	48
Figura 13 - Tela de Parametrização do equipamento	49
Figura 14 - Avaliação das marcações no microscópio	50
Figura 15 - Geometria do ponto	50
Figura 16 - Sobreposição dos pontos.....	51
Figura 17 - Fluxo do método proposto	53
Figura 18 - Histograma de intensidades.....	54
Figura 19 - Sistema de visão computacional desenvolvido.....	55
Figura 20 - Amostra de peça marcada	56

Figura 21 - Bancadas empregadas nas aquisições	56
Figura 22 - Tela do sistema desenvolvido	57
Figura 23 - Tela Sistema AutoVISION®	57
Figura 24 - Tela Sistema NI Vision Builder®	58
Figura 25 - Gráfico de comparação	61
Figura 26 - Matriz de simulação	63
Figura 27 - Valores de contraste (C em %), tempo (t em s) e sobreposição (X e Y em %) para amostras marcadas	65
Figura 28 - Comparação densidade do ponto para Marcação 25 kHz (a), 60 kHz (b) e sem marcação (c).....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação dos Parâmetros e suas características na marcação.....	45
Tabela 2 – Especificações equipamento utilizado.....	47
Tabela 3 – Contraste (%) das amostras marcadas	60
Tabela 4 - Comparação sobreposições e contrastes	67
Tabela 5 - Parâmetros de marcação por amostra e suas características	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	-----	<i>American Iron and Steel Institute</i>
LMP	-----	Laboratório de Mecânica de Precisão
NI	-----	<i>National Instruments</i>
CSI	-----	Controle e Supervisão inteligente
UFSC	-----	Universidade Federal de Santa Catarina
ISO	-----	<i>International Organization for Standardization</i>
IEC	-----	<i>International Electrotechnical Commission</i>
NBR	-----	<i>Norma Brasileira Regulamentadora</i>
ABNT	-----	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IFSC	-----	Instituto Federal de Santa Catarina
ZTA	-----	Zona Termicamente Afetada
YAG	-----	Yttrium Aluminium Garnet
IHM	-----	Interface Homem Máquina

LISTA DE SIMBOLOS

C	[%]	Contraste
P	[mm]	Preenchimento
V	[mm/s]	Velocidade
D	[μm]	Diâmetro
S	[%]	Sobreposição
F	[Hz]	Frequência
Bf	[%]	Brilho de Fundo
Bi	[%]	Brilho da Imagem
Ee	[J/cm ²]	Energia Entrada
Er	[J/cm ²]	Energia Refletida
Ea	[J/cm ²]	Energia Absorção
Et	[J/cm ²]	Energia Transmissão
t	[s]	Tempo
g(x,y)	[I]	Imagem Binarizada
T	[I]	Limiar
f(x,y)	[px]	Imagem Original

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivo específico	18
1.2	Justificativa e relevância	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	Conceitos de LASER	21
2.1.1	Aplicação do processo de ablação LASER	24
2.1.2	LASER para marcação de superfícies	27
2.1.3	Influência dos parâmetros LASER aplicados em marcação	30
2.2	Visão computacional aplicada na avaliação de processamentos de marcação LASER	34
2.2.1	Qualidade das marcações utilizando visão computacional	37
2.3	Projeto e análise de experimentos	41
2.3.1	Ensaio experimentais de marcação por LASER	41
3	MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1	Problema de pesquisa	43
3.2	Metodologia de pesquisa	47
3.3	Procedimento experimental	47
3.3.1	Avaliação de métricas de contraste por visão computacional	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	Análise da avaliação de contraste por visão computacional	58
4.2	Experimentação e análise dos parâmetros do LASER e suas características	65
5	CONCLUSÃO	74
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

1 INTRODUÇÃO

A indústria moderna, com intuito de resguardar, alavancar e ampliar o valor de suas atividades devido ao aumento da competitividade industrial, utiliza diversos métodos para obtenção de características de rastreabilidade dos produtos em seus processos produtivos. Este esforço é empregado não só para redução das tentativas de falsificação e fraudes, mas também para aumentar a qualidade e segurança de seus produtos. Nesse contexto, a marcação direta a LASER é amplamente utilizada por ser um método flexível de se obter marcas permanentes em peças com informações de rastreabilidade e identificação como: códigos alfanuméricos, caracteres, logos, códigos de barra e códigos bidimensionais como o QRCode e o *DataMatrix* (VELOTTI *et al.*, 2016).

Em alguns ramos industriais, como as da área metalmeccânica, e aeroespacial, para se implementar identificação e rastreabilidade dos produtos e componentes são necessários a alta repetitividade, métodos não invasivos e métodos de marcação com alto grau de resistência ao desgaste (LI *et al.*, 2016).

A marcação LASER quando comparada com os processos tradicionais de marcação, como micropuncionamento e impressão por jato de tinta, oferece várias vantagens como: inexistência de contato com a área de trabalho, alta repetitividade, alta velocidade de escaneamento, dimensão de marca comparável com a dimensão do feixe de LASER, alta flexibilidade, não desgasta ferramentas, não exigência de insumos consumíveis e apresenta alta capacidade de automação de processos (STEEN; MAZUMDER, 2010).

Para garantir a qualidade das marcações é muito importante que a estabilidade das marcações seja garantida em diversas condições, como por exemplo, quando os componentes são submetidos à operação em ambientes agressivos, que contém agentes que causam fenômenos como oxidação e corrosão.

Dentre os fatores que influenciam a qualidade da marcação LASER características da marcação são afetadas principalmente pela fonte de LASER e pelos parâmetros do processo, como potência, frequência de pulso, duração de pulso e velocidade de escaneamento (ANGELOVA, 2016; LEONE *et al.*, 2010; TRUMPF, 2013). Tais parâmetros são importantes para que a marcação tenha uma boa

qualidade e, conseqüentemente, possa ter suas informações extraídas com maior confiabilidade.

Desta maneira, o presente trabalho tem como objetivo investigar as características das marcações feitas por processamento de material com LASER, correlacionando o quão sensível são os parâmetros do LASER em relação às características das marcações, com enfoque na avaliação do contraste obtido nas marcações. Esta avaliação é baseada no uso de sistemas de visão computacional.

A presente dissertação foi organizada de acordo com a estrutura que se apresenta a seguir.

Primeiramente na Revisão da Literatura são apresentados os conceitos e processos de LASER, os aspectos referentes a características físicas das marcações e os princípios de processamento de materiais por LASER. Além disso, são abordados ainda os princípios de visão computacional.

No item Método Experimental são apresentados todos os procedimentos empregados para a execução e experimentação das marcações. Para o desenvolvimento, dividiu-se em marcação com LASER, parâmetros referentes ao LASER e aspectos da estrutura de visão computacional. Para cada tópico serão abordados, os equipamentos, processos e parâmetros utilizados e a justificativa de sua utilização, adequando a proposta aos temas discutidos sobre a viabilidade do projeto.

No capítulo de Resultados e Discussão, são apresentados, analisados e discutidos os ensaios realizados para obter as marcações.

O fechamento do trabalho é feito com a apresentação das principais conclusões e constatações fornecidos pelos diversos ensaios. Ao final do trabalho é identificada a importância que este projeto trará ao meio científico, bem como o benefício industrial relativo ao desenvolvimento da aplicação da rastreabilidade e do uso do LASER nas indústrias Metalmeccânica.

Por fim são apresentadas Perspectivas Futuras e possibilidades de implementação aos ensaios com uso do LASER de fibra, além de melhorias que devem ser implementadas a fim de obter um ganho ainda mais significativo nos resultados de marcação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliação da qualidade gerada no processamento de marcação a LASER utilizado na obtenção de características de rastreabilidade, utilizando como base marcações com o código *DataMatrix*. Dar-se-á ênfase principalmente na relação entre as características físicas inerentes à qualidade da marcação e os parâmetros de configuração do LASER.

1.1.2 Objetivos específicos

A fim de alcançar o êxito no cumprimento do objetivo geral, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma pesquisa bibliográfica para definir o estado da arte e verificar as características importantes a serem analisadas em uma marcação LASER;
- Desenvolver e validar um sistema de visão adequado para extrair características das marcações do tipo *DataMatrix* a fim de realizar a qualificação das mesmas e orientar a seleção dos parâmetros em que sejam obtidos maior contraste;
- Avaliar a qualidade da marcação para validação dos parâmetros do LASER utilizados;
- Realizar testes experimentais utilizando aço INOX AISI 304 empregados industrialmente na rastreabilidade; e
- Desenvolver um método de qualificação/otimização da marcação.

1.2 Justificativa e relevância

A aplicação de marcações feitas com LASER, como no uso do código *DataMatrix*, por exemplo, vêm se tornando cada vez mais popular nos mais diversos ramos industriais. Isto se deve à crescente demanda da indústria por implementar rastreabilidade em seus processos produtivos.

A rastreabilidade de componentes visa aprimorar o processo produtivo em diversos aspectos como produtividade, segurança do trabalho, requisitos ambientais, eficiência energética e controle de qualidade. O emprego da rastreabilidade em sistemas industriais é concebido e projetado para que as variáveis do processo possam ser consultadas e resgatadas em qualquer etapa deste. É necessário conhecer bem o processo para que seus procedimentos de operação possam ser padronizados, identificando problemas e avaliando quais variáveis serão controladas (GROOVER, 2011).

Neste sentido desenvolvimentos são decorrentes da grande preocupação das empresas em ganhar mercado e garantir qualidade e confiabilidade de seus produtos sem perder seus ganhos em produção e, conseqüentemente, gerar uma maior aceitação do seu produto. Com o intuito de se manter mais competitiva e presente no mercado global, busca-se a melhoria na qualidade de serviços e produtos, redução de custos e aperfeiçoamento contínuo em seus processos (VELOTTI et al., 2016).

Para se ter um sistema de rastreabilidade que execute tais tarefas, uma ferramenta importante que deve ser levada em consideração é a marcação, a qual contém todas as informações de interesse do sistema de rastreamento (BALLUFF, 2014).

Desta forma, os parâmetros do processo de marcação necessitam de um controle de tal forma a determinar suas influências individuais ou de interação dependendo da aplicação para que, posteriormente, possam ser otimizados para aplicações relacionados aos diversos materiais empregados. O tipo de LASER, os seus respectivos parâmetros e ajustes são os principais responsáveis para se atingir as diversas geometrias propostas e conseqüentes características de qualidade como contraste por exemplo. Entretanto tais ajustes que permitam uma aplicação confiável e segura para os diversos tipos de materiais, com mais ou menos contraste, não é tarefa das mais fáceis, exigindo por parte dos profissionais envolvidos, conhecimentos técnicos específicos associados a muitos testes práticos (BALLUFF, 2014).

2 REVISÃO DE LITERATURA

Com a revisão de literatura busca-se apresentar, de forma sucinta, o conhecimento base para auxiliar nas discussões e análise dos resultados dessa dissertação. Basicamente, esses conceitos essenciais serão divididos em subitens que apresentam uma fundamentação sobre o processamento de materiais por LASER, especificamente abordando aspectos do processo de marcação a LASER, uma fundamentação sobre sistemas de visão, com enfoque na aplicação pretendida e alguns aspectos sobre o projeto de experimentos.

2.1 Conceitos de LASER

Conforme recordado por Dahotre e Harimkar (2008), LASER é um acrônimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que em português significa Amplificação da Luz pela Emissão Estimulada de Radiação.

O processo de estimulação, que é a essência da ação do LASER, foi descrito por Einstein em 1916 em um de seus três trabalhos sobre a teoria quântica da radiação. Ele se baseia na capacidade apresentada por alguns materiais de, quando estimulados, liberarem uma parcela de energia na forma de radiação eletromagnética que possui uma característica muito específica de comprimento de onda emitido.

Em complemento a este fenômeno de emissão estimulada, a amplificação da energia gerada se baseia no princípio de que dois refletores paralelos formam uma cavidade óptica, na qual qualquer radiação que fique aprisionada por reflexão ao longo do eixo óptico dentro desta cavidade, irá oscilar de volta até que seja absorvida ou saia por difração da cavidade (LAWRENCE et al., 2010).

O primeiro LASER produzido funcionando por este princípio foi demonstrado por Theodore Harold Maiman, usando um cristal rubi como meio ativo de estimulação da emissão em 1960. Desde 1963, a interação da luz LASER com matéria e suas aplicações no campo de processamento de materiais estão sob estudos investigativos.

Atualmente, existe uma grande gama de possibilidades de processamento de materiais por LASER que são aplicados na produção industrial, tais como soldagem, corte, texturização, limpeza, micro-usinagem e marcação, entre outras. Embora o processamento de materiais por luz LASER seja usado por engenheiros e técnicos em diversas aplicações industriais, ainda existem diversas linhas de pesquisa e campos de atuação a serem explorados, o que irá difundir ainda mais esta tecnologia. Estas são as razões pelas quais o processamento de materiais por LASER foi incorporado como campo de estudo fundamental entre as ciências da engenharia (POPRAWA, 2011).

O LASER é uma fonte de energia oriunda de um dispositivo que gera um feixe de luz monocromática, em uma única cor, ou seja, pertencendo a um único comprimento de onda (STREEK; REGENFUSS; EXNER, 2013). É coeso e praticamente colimado (raios de luz paralelos) o que, por si só, possui potencial limitado de aplicação. Entretanto, quando o feixe é conduzido, manipulado e focado em uma peça de trabalho, adquire características que o tornam ideal para o processamento dos materiais como marcação, corte, soldagem e texturização. Além disso, sua alta estabilidade favorece seu uso em equipamentos automáticos (HAVRILLA; ANTHONY, 1999).

O LASER industrial, para uso em processos de fabricação, é predominantemente uma fonte de calor concentrada que pode ser contínua ou pulsada. Dependendo da energia que é fornecida, bem como da duração e da intensidade dos pulsos, as aplicações são múltiplas, o que torna o LASER uma "ferramenta flexível".

O feixe de luz com propriedades específicas pode ser focado num pequeno ponto, proporcionando uma fonte com alta densidade de energia, que então pode promover um aquecimento intenso e localizado nos materiais ou se espalhar em um padrão difuso de aquecimento visando tratamento de superfícies (POPRAWA, 2011).

Nas aplicações com pulsos extremamente curtos, a interação entre os fótons do feixe de LASER e os átomos do material permite que os processos sejam realizados sem aquecimento de regiões adjacentes às regiões tratadas, gerando uma Zona Termicamente Afetada (ZTA) pequena quando comparada a outros processos.

O feixe pode ser utilizado com diferentes combinações de componentes ópticos para realizar uma série de operações, seja simultaneamente ou ligado entre os locais de processamento de forma sequencial (ION, 2005).

De acordo com Steen e Mazunder (2010), os sistemas mais populares para o processamento de materiais são baseados em fontes de CO₂, Nd:YAG e fibra. LASERs de estado sólido bombeados por lâmpadas foram desenvolvidas nos primeiros anos após o surgimento do LASER. Devido às limitações físicas dos bastões de meio ativo e também devido à configuração e potência de bombeamento disponível nas lâmpadas especiais, que limitam as dimensões dos ressonadores empregados. A potência é limitada e, por isso, a tecnologia de LASERs nesta configuração não tem muita margem para evoluir.

Nos últimos anos, entretanto, aconteceram mudanças que contribuíram para um rápido desenvolvimento nas fontes de LASER de estado sólido bombeadas por diodos LASER (POPRAWA, 2011). Devido ao princípio de funcionamento destes diodos emissores de luz LASER, estas fontes oferecem uma capacidade de eficiência muito maior e tamanho menor do que os LASERs de potência de saída semelhante, bombeados por lâmpada. A melhor eficiência reduz a quantidade de calor que tem de ser removida, de modo que os equipamentos acessórios, tal como os trocadores de calor refrigeradores, são também muito mais compactos. Modelos comerciais de LASERs de estado sólido bombeados por diodos têm sido disponibilizados para compra nos últimos anos, como os LASER de fibra (HERRMANN et al., 2012).

Cabos de fibra óptica são usualmente utilizados juntamente com LASERs para transmitir informações digitais para locais remotos em alta velocidade. Além de seu uso em telecomunicações, eles têm sido utilizados para muitas outras aplicações, tais como a condução de feixes LASER para o processamento de materiais e como sensores. A fibra óptica constitui uma guia de onda óptica. Na sua forma mais simples, é formada por um pequeno volume de material transparente com um índice de refração mais elevado do que o do material circundante, ou seja, o material do núcleo é revestido por outro material com menor índice de refração. A luz no interior do material de maior índice de refração tende a permanecer presa pelo fenômeno da reflexão interna total. Se o material se encontra em uma forma longa (metros a quilômetros) e estreita (dezenas de micrometros), o filamento torna-se flexível e passa

a ser denominado de fibra óptica. A luz inserida numa extremidade da fibra será transmitida ao longo do comprimento da fibra com baixa perda e emerge até a outra extremidade (READY, 2001).

Segundo Steen e Mazumder (2010), a invenção da fibra dopada como meio ativo para emissão de LASER viabilizou a construção de um LASER de alta luminosidade, compacto, leve e eficiente. O custo intrínseco de tais LASERs é baixo, uma vez que há relativamente pouco trabalho de construção em seus projetos, que são baseados principalmente em diodos de estado sólido e fibras dopadas. Como o preço de tais LASERs vem baixando, é possível prever que o mercado vai se expandir e cada vez mais as empresas aplicarão o LASER em seus processos produtivos. Porém, a tecnologia necessária para a construção de um LASER de fibra é complexa e dominada por pouquíssimos fabricantes.

LASERs de Diodo, de disco e de fibra bombeados por diodos são os que apresentam o maior potencial para o futuro, destacando-se o de fibra. Diodos são eficientes, compactos e simples de operar, de modo que poderá torná-los o dispositivo do futuro. Além do LASER, a óptica utilizada na parte objetiva para feixes de alta potência tem de ser adequada para cada aplicação específica, o que torna o LASER uma tecnologia com elevado índice de inovação e há ainda um caminho a percorrer.

2.1.1 Aplicação do processo de ablação LASER

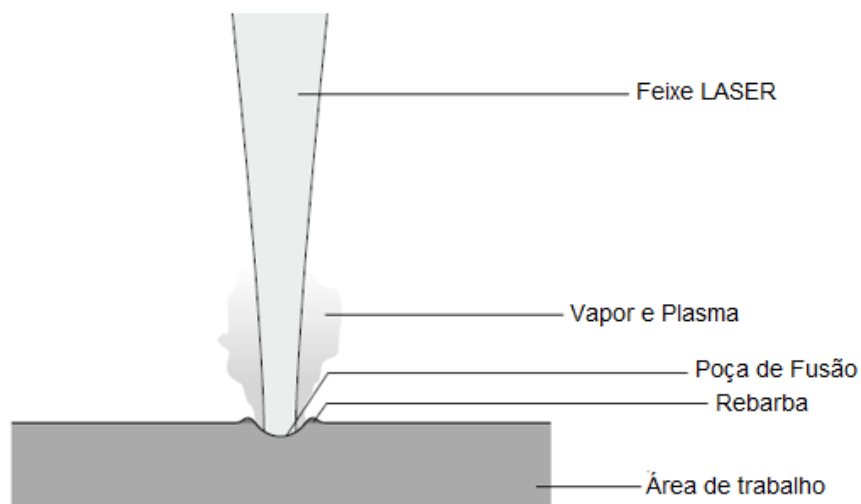
O interesse da ablação como um processo se tornou importante a partir da introdução de pulsos de LASER muito potentes e curtos, mas de baixa energia (POPRAWA, 2011).

O princípio referente a este fenômeno está relacionado ao fato de que estes pulsos podem entregar energia em uma taxa na qual o material a absorve, transforma imediatamente em energia térmica e, por não haver tempo hábil para que esta energia seja transferida por condução para as regiões vizinhas da área que recebeu a emissão, este material aquece, funde, evapora e sublima localmente, com tudo ocorrendo numa fração muito pequena de tempo.

Com a vaporização e sublimação de uma parcela do material, forma-se uma região de grande pressão pelo efeito de expansão causado nesta mudança de estado. Se, no momento em que esta pressão é elevada, contendo parte do material na forma do vapor e parte do material em forma de líquido, a energia do LASER é subitamente interrompida, há um colapso desta bolha de vapor sobre a região contendo material fundido, o que gera uma onda de choque e causa expulsão de boa parte do metal líquido para fora da peça. Portanto, o material é removido, deixando uma pequena área termicamente afetada. Este processo é utilizado cada vez mais como uma ferramenta de precisão, que, quando sob parâmetros adequados de processo, possibilita a operação em estruturas frágeis causando como resultado pequenos danos químicos ou mecânicos (STEEN; MAZUMDER, 2010).

O processo de ablação é apresentado esquematicamente na Figura 1 e possibilita a remoção por irradiação de material sólido ou, ocasionalmente, líquido. (POPRAWA, 2011).

Figura 1 - Processo de ablação com LASER



Fonte: Trumpf, 2010

Tem sido usado em grande variedade de aplicações, como produção de componentes eletrônicos, micro usinagem, texturização, limpeza e marcação/gravação, por exemplo.

A maioria destes processos tem uma característica em comum: têm de operar em pequenas áreas de trabalho. O LASER se destaca nestas situações por ter capacidade de ter muito bem definida e controlada a sua posição sobre a superfície de trabalho e por aplicar uma baixa energia térmica, o que permite a obtenção dos resultados de processamento sem alterar as propriedades da área total da amostra (POPRAWA, 2011).

O processo de ablação LASER em superfícies é capaz de gerar as seguintes características, segundo Diels e Rudolph (2006):

- Precisão micrométrica em relação à profundidade;
- Escala nanométrica em relação à profundidade de entrada do cabeçote;
- Precisão micrométrica lateral;
- Escala sub-micrométrica em dimensões laterais mediante técnicas especiais de processamento.

Em processos de marcação por LASER o mecanismo de ablação é o mais utilizado para se realizar marcações. A precisão da etapa de posicionamento é independente da ferramenta de trabalho e tem um alcance aproximado de 1 nm, com pequenas velocidades de posicionamento. Com o intuito de se aumentar a produtividade, velocidades maiores a 1 m/s são requeridas e hoje consegue-se chegar a limites de precisão de posicionamento de 100-300 nm (POPRAWA, 2011).

O processamento de materiais por ablação torna possível a geração de estruturas com tamanhos na faixa entre 10 e 100 μm . Com as novas estratégias de tecnologia, estruturas menores que 1 μm são viáveis (TRUMPF, 2013).

2.1.2 LASER para marcação de superfícies

O processo de marcação por LASER constitui uma das principais aplicações industriais para fontes LASER. A Figura 2 apresenta a interação da radiação do LASER com a superfície de trabalho, constituída pela entrada de energia (E_e), reflexão (E_r), absorção (E_a) e transmissão (E_t) do feixe do LASER no material processado.

No que diz respeito ao processamento de materiais por LASER uma característica muito importante é o índice de absorvidade. Para cada configuração a absorvidade é dada pela combinação de parâmetros do LASER – comprimento de onda e ângulo de incidência, por exemplo. Para se ter um maior valor de absorvidade significa que se terá maior radiação do LASER sendo utilizado (SOBOTOVA; DEMEC, 2015).

Figura 2 - Alterações físicas do processamento com LASER



Fonte: Sobotova e Demec, 2015

O processo de marcação pode ser implementado por diferentes processos físicos através da interação do feixe de LASER com o substrato. Diferentes tipos de LASER e sistemas de entrega ópticas para transporte e desvio do feixe são usados para marcação de metais, cerâmicas, polímeros e outros tipos de materiais (SOBOTOVA; DEMEC, 2015). Dentre as diversas aplicações com marcação LASER, as mais utilizadas são os códigos alfanuméricos e os códigos bidimensionais como o *DataMatrix* 2D, feitos na superfície do produto visando conter algumas informações como data de fabricação, número de série, entre outros (LAZOV; DENEVA; NARICA, 2015).

A marcação LASER, comparada com outros métodos de marcação tradicional, tem não apenas maior qualidade e flexibilidade no processo, mas também alto índice de automatização e integração nas linhas de produção. As principais vantagens da marcação LASER são, conforme Ready, *et.al.* (2001):

- Durabilidade do Processo;
- Inexistência de contato com a área de trabalho;
- Precisão no foco do feixe;
- Alta velocidade;
- Alta qualidade no processamento;
- Alta flexibilidade para integração e automação com processos da manufatura;
- Alta repetitividade.

O processo de marcação por fonte LASER está inserido no campo da interação entre energia e material por meio de radiação (POPRAWA, 2011). A marcação superficial com LASER pode ser definida como um processo que, pela liberação local de energia na superfície, modifica sua aparência permanentemente. Esta interação pode ser manifestada de forma mecânica (ablação do material), termo-física (mudanças na estrutura cristalina) ou química (oxidação). Os efeitos dependem do material processado e das características da radiação, ou seja, dos parâmetros regulados no LASER (FORESTI, 2012).

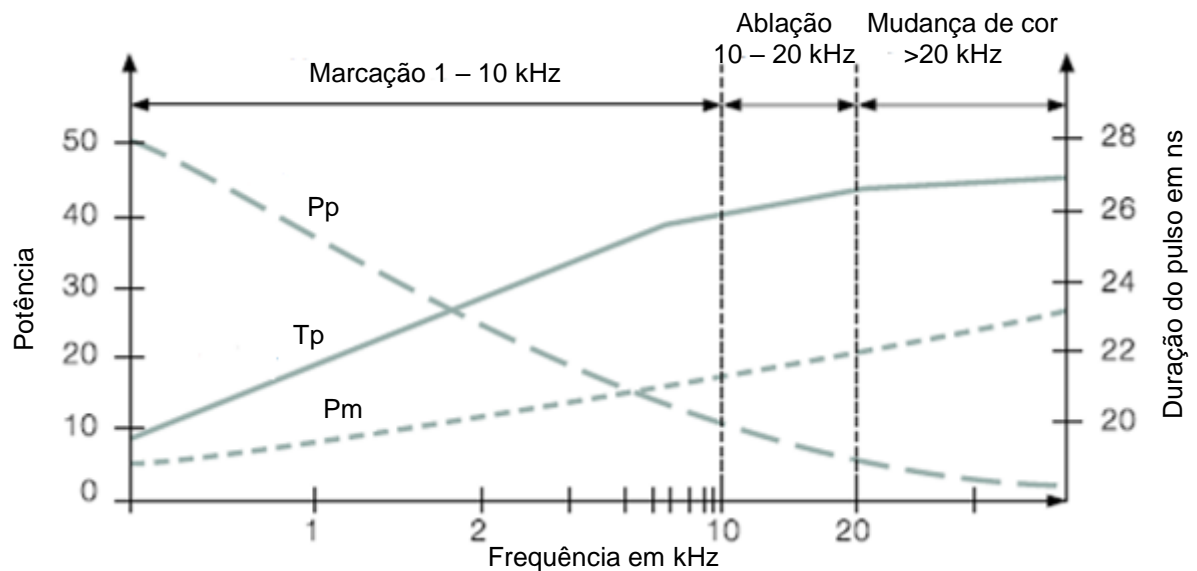
Com base nos efeitos obtidos pela interação entre o LASER e o material processado, o resultado do processamento pode ser dividido em dois grupos: marcação e gravação. Na gravação, a superfície da área de trabalho é fundida e evaporada, gerando remoção do material, o que resulta numa cavidade com a vantagem de se ter um processo mais permanente e duradouro. Na marcação, podem ocorrer diferentes processos, como remoção de um revestimento, ou modificação de coloração e recozimento do substrato processado com a vantagem de ser mais rápido o processamento de marcação. Dependendo do material e dos requisitos de qualidade, cada processo destes tem suas vantagens e desvantagens. (LAZOV; DENEVA; NARICA, 2015).

As marcações tipicamente trabalham com pequenos pulsos de alta potência, ilustrado na Figura 3. Para definir os parâmetros, é necessário saber que tipo de processo é usado para marcar um determinado material (LI et al., 2016).

Conforme a Figura 3 alterar a cor de um material metálico por recozimento demanda maior uso de energia e maior densidade de potência do que alterar a cor de um polímero, por exemplo.

A potência, duração e frequência dos pulsos determinam a energia disponível e a sua interação entre o feixe de LASER e o material. A potência do pulso é geralmente dada em quilowatts. Dependendo destes parâmetros, se define a ocorrência ou não do fenômeno da ablação e também se define o regime de ablação obtido, os seja, se possui mais ou menos volume de material fundido, evaporado ou sublimado (TRUMPF,2010).

Figura 3 - Parâmetros de processo para gravação, ablação e mudança de cor por recozimento



Pp = Frequência de pulso (kW) Tp = Duração de pulso (ns) Pm = Potência média de saída (W)

Fonte: Trumpf, 2010

Com o intuito de assegurar visibilidade da marcação, bem como características que mantenham uma boa qualidade de impressão em todo o tempo de vida do componente marcado, são necessárias características específicas na marcação ou gravação, como a profundidade da região processada e os níveis de sobreposição, para que se obtenha um bom contraste (POPRAWA, 2011).

Desta forma, os melhores resultados de marcação são obtidos somente quando existe uma combinação apropriada de parâmetros do LASER, como potência de

pulso, pulso de energia, frequência, preenchimento e velocidade. Uma escolha ou variação errada destes parâmetros pode gerar marcações com baixa qualidade. Com o objetivo de encontrar as melhores combinações de parâmetros para otimizar o processo e adquirir a qualidade desejada, é importante definir adequadamente e analisar os critérios de qualidade da marcação (ANGELOVA, 2016; TRUMPF, 2010).

2.1.3 Influência dos parâmetros LASER aplicados em marcação

A relação entre os parâmetros do LASER e a qualidade do processamento da marcação LASER, mais especificamente, códigos 2D como *DataMatrix*, foi estudado nos últimos 20 anos. Diversos pesquisadores têm investigado a resposta do processamento de marcação por LASER mediante a mudança de parâmetros neste, como destacado na Figura 4, que apresenta o levantamento feito por Viana (2014), apontando os principais parâmetros analisados por alguns trabalhos mais relevantes na área de marcação a LASER.

Entre os principais parâmetros do LASER aplicados em marcação destacam-se a velocidade de deflexão dos espelhos, duração do pulso, pico de potência, diâmetro do LASER, distância focal, velocidade do scanner e a taxa de preenchimento (SOBOTOVA; DEMEC, 2015; KIM et al., 2011). Com o aumento do interesse industrial, cresce a necessidade por investigações científicas que permitam elucidar e melhor compreender os fenômenos que envolvem o respectivo processo. Sendo assim, tais observações colocam os parâmetros do LASER como uma linha de pesquisa atual e de relevância científica.

Segundo Hayakawa (2000), o processamento de marcação LASER de códigos 2D em vidro, variando a corrente e frequência do LASER, determinam um resultado com alto contraste e alta definição.

De forma geral, os resultados mostram que a duração de pulso, a frequência de pulso, a velocidade de processamento, o sincronismo entre espelhos e feixe do LASER, e a taxa de preenchimento se caracterizam como parâmetros importantes para o emprego da marcação. Assim, os principais parâmetros que alteram as

características de marcação como o contraste, por exemplo, serão melhor caracterizados a seguir.

A duração de pulso é uma medida do tempo no qual a energia do LASER continua sendo emitida sobre o material em processamento. Para se obter regime de ablação para marcação ou gravação, comumente se emprega duração ou largura de pulso na ordem de grandeza de nanosegundos.

A frequência de pulso, através da qual aumenta ou diminui os tempos entre pulsos, define fundamentalmente em que período a energia é distribuída. A energia de pulsos resulta da capacidade de bombeamento e da frequência da cadência destes. A potência de pico dos pulsos e a sua energia determinam a intensidade com a qual o feixe LASER atua sobre o material (TRUMPF, 2013). Nos diversos processamentos pode-se aumentar ou diminuir o efeito pretendido atuando sobre este parâmetro. Correspondentemente, o efeito será inferior com uma potência menor. Pode-se citar como exemplo a gravação por remoção, marcação superficial com mudança de cor e remoção de camadas (KELLER, 2004).

Figura 4 - Parâmetros do LASER aplicados na marcação

Referências	Parâmetros do Laser utilizados										Tipo de Laser / Remoção / Material				
	Desfocagem (mm)	Potência (Kw)	Velocidade (m/s)	Frequência (KHz)	Energia Pulso (Mj/cm ²)	Pulso (m j)	Impulso frequência (ns)	Pulso (ns)	Fluência (Mj/cm ²)	Focal (cm)	Ponto com diâmetro (µm)	Laser 800 n m	Laser ND:YAG 1064 n m	Tipo de remoção	Material
VILHENA, L.; SEDLACEK, M. ODGORNIK, 2009	x	x	x	x	x	x							x	Ablação	100Cr6 steel
SHIN, H. CHOI, S. KIN, 2009	x	x	x	x										Ablação	SCM 440H
LAMRAQUI, A.; COSTIL, S. LANGRADE, C. 2010	x	x	x	x								x		Ablação	Al 2017
DING, Q.; WANG, L. WANG, Y. 2010	x		x	x		x								x	TI-6Al-4V
PAITAL, S.; SAMEER W. HE, DAHOTRE, N. 2010	x	x	x	x										x	INCOX PVD
IANG, J.; XUE, L. WANG, S. 2011	x	x	x										x		AlSI 1045 steel
HSIAO, W. TSENG, S. HUANG, D. 2011		x		x	x	x	x	x							
CHEN, C.; CHUNG, C. WU, B. 2012	x	x	x	x	x		x		x	x	x			x	TI-6Al-4V
VANCONI, L. DEMIR, A. PREVITALI, B. 2012	x	x	x		x	x						x		x	Ablação
HU, T.; HU, L. DING, K. 2012	x	x	x	x										x	TiN and WDC
Ocorrência	8	9	9	8	4	4	2	3	1	1	1	1	1	1	5
Porcentagem	80%	90%	90%	80%	40%	40%	20%	30%	10%	10%	10%	10%	10%	80%	50%

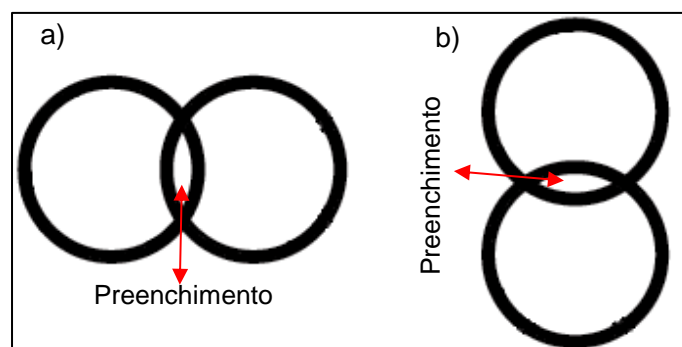
Fonte: Viana, 2014

Deve-se tomar cuidado para não confundir os conceitos de duração de pulso e frequência de pulso. Eles não possuem uma relação direta. O tempo de interação do LASER determinado pela duração do pulso é, para aplicações típicas de marcação e gravação, muito menor do que o tempo existente entre um pulso e outro, decorrente do ajuste da frequência de pulso. Há um limite de frequência máxima atingível na emissão de pulsos sucessivos. Em contrapartida, a largura de pulso é comumente definida como um parâmetro fixo das fontes de LASER.

A velocidade de processamento indica quão rápido o feixe LASER focado é varrido através da superfície da peça de trabalho, dada em (mm/s), o que determina a duração do processo. A velocidade, associada à frequência de pulso, define o espaçamento obtido entre pulsos sucessivos sobre a superfície de trabalho e também quanto tempo leva para processar uma determinada área de interesse sobre a peça de trabalho. Portanto, havendo uma qualidade exigida em termos de marcação, existe um limite máximo para a velocidade (TRUMPF, 2013).

Apesar de não ter sido citado nas revisões de literatura, outro parâmetro relevante é a taxa de preenchimento. O preenchimento indica o espaçamento entre linhas paralelas de um ponto a outro em milímetros, determinando assim a sobreposição lateral dos pontos no percurso (TRUMPF, 2010). O preenchimento define também características de contraste (mais ou menos escuro) da marcação. Um aumento no preenchimento ocasiona um aumento do contraste. A Figura 5 ilustra os espaçamentos laterais e longitudinais, onde o encontro dos dois anéis representa o percentual de preenchimento e sobreposição.

Figura 5 - Espaçamento Lateral (a) e longitudinal (b)



Estes espaçamentos são as diretrizes de referência para maiores ou menores índices de sobreposição. Diminuindo os espaçamentos entre os pontos seja lateralmente ou longitudinalmente aumenta-se a sobreposição nos eixos.

2.2 Visão computacional aplicada na avaliação de processamentos de marcação LASER

Visão de máquina, sistemas orientados e aplicações orientadas por visão computacional têm crescido ao longo das últimas décadas com o progresso das tecnologias de sistemas de visão, se tornando cada vez mais presentes nas atividades diárias. Os ambientes computacionais vêm evoluindo cada vez mais em função disso, como o aumento massivo da capacidade de processamento dos processadores. A crescente capacidade de armazenamento de grandes volumes de informação, assim como o fato das câmeras 2D e 3D estarem em todos os lugares, habilitando visão de máquina em diversos equipamentos. Para resolver uma grande gama de problemas do mundo real como avaliação de qualidade seja para processos de manufatura ou até mesmo avaliação de qualidade para processamento de materiais com LASER (KITA; ISHIKAWA; MASUDA, 2017).

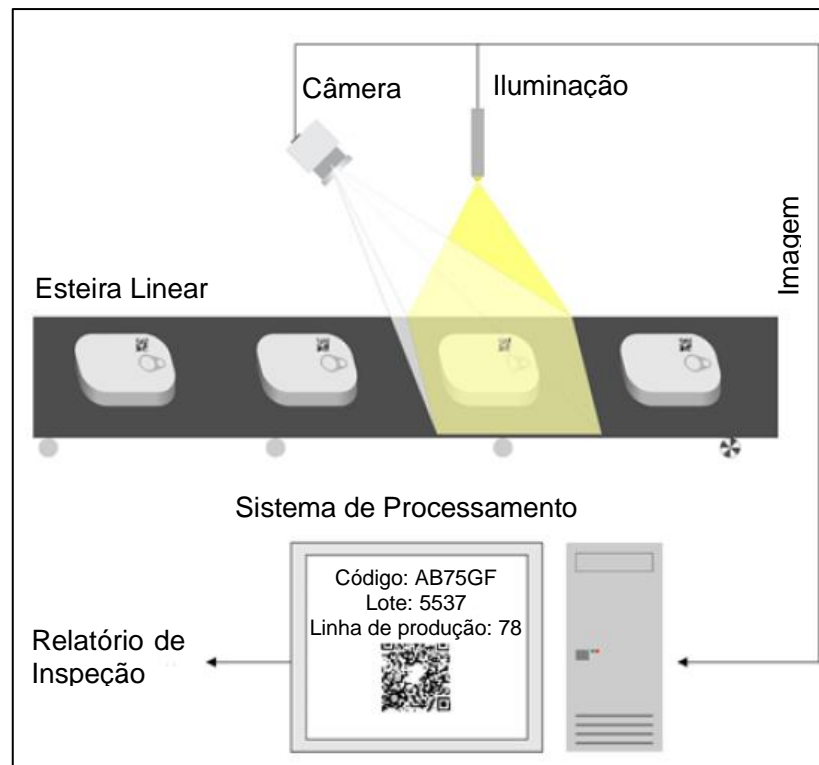
Um sistema de inspeção automatizada pode assumir diferentes configurações, dependendo da aplicação para qual foi desenvolvido. Entretanto, uma configuração muito empregada é composta por um sistema de aquisição e por um sistema de processamento. Na Figura 6 é apresentada uma ilustração simplificada de um sistema de inspeção de marcação para a indústria. Nesta configuração, uma imagem é capturada pelo sistema de aquisição. Esta imagem é transmitida ao sistema de processamento, onde um computador, executando um software especificamente desenvolvido, analisa as imagens a fim de extrair dados importantes. Após o processamento, o sistema envia as informações ao usuário pela Interface Homem Máquina (IHM). No que se refere ao software, dentre as etapas principais do fluxo de processamento do sistema temos:

- 1) **Aquisição e Pré-processamento:** Esta etapa consiste em adquirir as imagens do produto a ser inspecionado. Adicionalmente, nesta etapa pode ser

necessário algum tipo de pré-processamento das imagens obtidas com o objetivo de melhorar a qualidade destas e, assim, torná-las mais adequadas ao processamento subsequente. Dentre os processamentos comumente empregados nesta etapa podem ser citados os filtros de realce e restauração e de conversão de cor.

- 2) **Segmentação / Detecção:** É neste momento que deverão ser isoladas e localizadas as regiões das imagens correspondentes aos defeitos, componentes de interesse ou artefatos do objeto inspecionado. Para isso são empregadas tanto técnicas espaciais como frequências, principalmente baseadas na variação de intensidade ou cores observadas nas imagens.
- 3) **Descrição:** Na etapa de descrição, cada objeto ou artefato identificado é descrito e transformado da forma que for mais conveniente para a interpretação. Descrições muito empregadas são a área, posição e a forma (contorno) do objeto.
- 4) **Interpretação:** Por fim, são utilizadas as informações obtidas nos passos anteriores para geração de informações de mais alto nível. Com base no contorno que descreve um artefato localizado na imagem processada, por exemplo, pode-se estimar qual o tipo ou presença de defeitos fazendo uso de um reconhecedor de padrões. A partir desta etapa são registradas estatísticas de inspeção, ou ainda enviados os sinais a atuadores caso a inspeção esteja sendo realizada em linha.

Figura 6 - Exemplo de configuração simplificada de sistema de inspeção/marcação em linha



Fonte: O Autor, 2017

A presença de funcionalidades que implementem técnicas de processamento para cada uma destas etapas é essencial para que seja possível realizar a inspeção ou medição, independente do cenário de utilização.

2.2.1 Qualidade das marcações utilizando visão computacional

A tecnologia de códigos 2D é baseada no reconhecimento de padrões gravados, nas células e espaços ou em uma matriz modular, da marcação, com dimensões definidas. Desta maneira é importante que se tenham indicadores de qualidade para estes códigos 2D. A Norma ABNT NBR ISO/IEC 15415 define estes indicadores de qualidade para códigos de duas dimensões. Esta norma apresenta tais indicadores que são relevantes para uma análise de qualidade de um código 2D. Dentre estes indicadores pode-se citar o contraste. Estes critérios de qualidade são

referências para que se possa adequar o sistema de marcação de modo que a qualidade alcançada seja satisfatória (ISO, 2011; TRUMPF, 2010). No caso da marcação LASER, os melhores resultados de marcações são conseguidos somente quando existe uma combinação de determinados parâmetros, tais como: frequência de pulso, energia de pulso, duração do pulso, preenchimento e velocidade do processo.

O contraste C é determinado pela diferença entre o brilho de fundo (Bf) e o brilho da imagem (Bi), dividido pelo brilho de fundo (Bf) em percentual (TRUMPF, 2010):

$$C = \frac{Bf - Bi}{Bf} \times 100\% \quad (1)$$

A marcação tem certo limite de contraste, o qual pode ser percebido. Este limite de contraste é diferente quando a marcação é percebida visualmente e automaticamente via dispositivos eletrônicos.

Instrumentos científicos como instrumentos de visão computacional são projetados para trabalhar como um sensor óptico.

De acordo com Pratt, (2001) uma boa marcação para percepção do olho humano é quando existe um limite de contraste em 50%. Instrumentos científicos, como espectrômetros e câmeras, são desenvolvidos para mensurar as características de diversas peças e processamentos de superfícies como marcações. Um mínimo de 20% de contraste contra o fundo é suficiente para fazer a leitura por um dispositivo eletrônico de uma marcação 2D (DAPRAMARKING, 2017).

Diversas opções de ferramentas de visão computacional voltadas ao setor industrial estão disponíveis no mercado, com funcionalidades que vão da detecção automatizada de defeitos ao controle e rastreabilidade de produtos manufaturados. Estas ferramentas são geralmente compostas por módulos de software e hardware integrados. O módulo de hardware normalmente é composto por câmeras e componentes de iluminação de diferentes tipos que permitem adequar o sistema de aquisição das imagens ao cenário de utilização.

Já o módulo de software disponibiliza um conjunto de ferramentas que permite configurar tarefas de inspeção como contagem, medição, comparação, leitura de

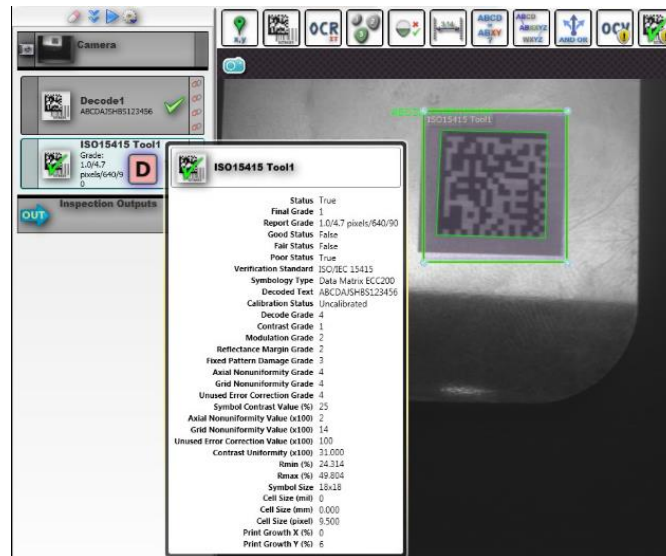
códigos e textos, dentre outras. As ferramentas podem ser combinadas e ajustadas para diferentes cenários na inspeção de produtos.

Como exemplos pode-se citar a verificação da integridade de lacres ou presença de contaminantes em frascos na indústria de envase, avaliação da homogeneidade de superfícies na detecção de nós e trincas na indústria madeireira, leitura de símbolos, textos e marcações de rótulos na indústria gráfica, verificação de marcações em tecidos, dentre outros casos (PRATT, 2001).

Um exemplo de produto comercial encontrado no mercado é o AutoVISION® (MICROSCAN, 2012), desenvolvido pela empresa MicroScan e o NI Builder® (NATIONAL INSTRUMENTS, 2013) desenvolvido pela empresa *National Instruments*. Os produtos são comercializados como soluções completas, composta tanto por componentes de software como de hardware. Estes sistemas trazem ferramentas de software que disponibilizam uma série de funcionalidades customizáveis de inspeção. O conjunto também traz câmeras com iluminação embutida, de alta resolução, com autofoco e com possibilidade de utilizar gatilhos que permitem sincronizar a aquisição com sensores externos. Além disso, é fornecido um conjunto de componentes de iluminação de diferentes formatos e modelos que possibilitam adequar a aquisição de imagens nas mais diversas aplicações.

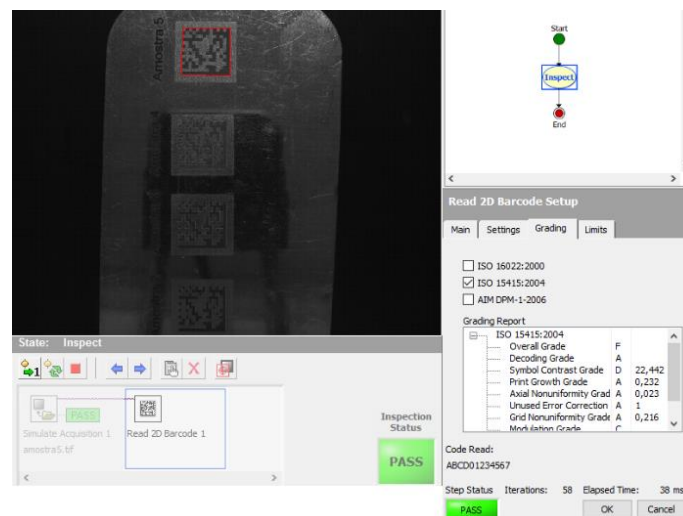
Nas Figuras 7 e 8 são apresentados exemplos de funcionalidades disponíveis nas ferramentas aplicadas na verificação da qualidade de marcação. Nos exemplos de inspeção de qualidade, as ferramentas se baseiam na norma ISO IEC 15415, que determina algumas características de qualidade das marcações do tipo 2D, mais especificamente o *DataMatrix*. O software faz uma análise comparando as características lidas na marcação atual com as referências da norma.

Figura 7 - Exemplo de ferramenta de verificação de qualidade de marcação no sistema AutoVISON®



Fonte: Microscan, 2012

Figura 8 - Exemplo de ferramenta de verificação de qualidade de marcação no sistema NI Vision Builder®



Fonte: National Instruments, 2013

A vantagem deste tipo de ferramenta é a facilidade de utilização, que não requer conhecimentos aprofundados de técnicas de processamento de imagens e visão computacional. A maioria das funcionalidades pode ser utilizada com pouca ou nenhuma configuração de parâmetros. As ferramentas mostram-se bastante flexíveis, podendo ser configuradas para a inspeção de características de diferentes tipos de produtos. Como desvantagens tem-se que são tecnologias proprietárias e de custo

relativamente alto. Observa-se ainda que a compatibilidade do software normalmente está restrita aos módulos de hardware do próprio fabricante.

Em se tratando da criação de soluções personalizadas para inspeção ou leitura de códigos por visão computacional encontram-se disponíveis ferramentas e bibliotecas para processamento de imagens que facilitam o trabalho de desenvolvimento. Entretanto, um maior conhecimento e maior esforço associado à programação e parametrização das técnicas é requerida na utilização destes recursos.

2.3 Projeto e análise de experimentos

Define-se um experimento como um teste ou vários testes em série em que mudanças são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema com o objetivo de observar e identificar a forma como as respostas desse sistema são afetadas em função das mudanças provocadas nas variáveis de entrada. Assim, a experimentação se caracteriza como uma parte fundamental na análise das diversas aplicações de engenharia para o método científico (RUSHING; KARL; WISNOWSKI, 2013).

2.3.1 Ensaios experimentais de marcação por LASER

Todo e qualquer estudo, pesquisa e/ou projeto de engenharia requer, para sua viabilização, conhecimento das características e propriedades, além do comportamento de determinados materiais ou processos disponíveis. De acordo com Li, (2014), os parâmetros ajustados na fonte LASER são fatores primordiais para os resultados esperados de marcações 2D. A definição dos parâmetros apropriados passa pela realização de ensaios ou experimentos que se realizam para levantar dados importantes ao projeto, principalmente as influências físicas destes parâmetros na própria marcação.

Os ensaios ou experimentos são fundamentais para que se estabeleça uma caracterização e uma experimentação para conhecimento de características inerentes ao processo. Contudo, mesmo os ensaios sendo ferramentas essenciais, nem todos os executam. Ocorre, muitas vezes, uma pequena variabilidade dos resultados, pois nem todos os fatores e características de faixas ambientais podem ser controlados de forma tão eficiente (ROMANA; ALEXANDRU; TRANSILVANIA, 2017).

Estes ensaios ou experimentos são uma ferramenta direcionadora para a análise dos resultados de correlação entre os parâmetros do LASER e características das marcações, pois através deles consegue-se resultados mais rápidos, onde as medições de contraste são realizadas através de visão computacional, ou seja, uma câmera faz a captura da amostra e o software executa o processamento, como explorado no item 2.2.

Diversas pesquisas têm sido feitas e publicadas visando o estudo dos fenômenos do processamento de marcação por LASER, utilizando diferentes materiais e variações de parâmetros (ANGELOVA, 2016; SOBOTOVA; DEMEC, 2015). A vantagem dos procedimentos de laboratório é, de fato, entregar um resultado para as indústrias de forma mais rápida para que essas possam ser orientadas nos seus projetos.

Outra justificativa relevante para a realização dos ensaios de laboratórios é que muitos testes não podem ser feitos *in loco* por vários motivos como espaço físico inadequado para comportar os equipamentos, efeitos ambientais indesejáveis, demanda de linhas de produção cada vez mais rápidas, entre outros (LAAKSO et al., 2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, se descreve o método experimental utilizado a partir dos conceitos apresentados na Revisão de Literatura. Para que o processo estudado seja tratado de modo sistêmico, o método a ser definido para a pesquisa visa obter informações objetivas de cunho científico. Sendo assim, o capítulo inicia com uma reafirmação do problema de pesquisa, para, em seguida, definir o método experimental e finalmente descrever os equipamentos utilizados. Os ensaios foram baseados na comparação com parâmetros usuais consolidados do LASER e na busca por parâmetros otimizados a partir da análise proveniente da literatura no que diz respeito à qualidade das marcações e sua relação com os parâmetros da fonte LASER, alinhando as ideias com os objetivos propostos desta dissertação.

3.1 Problema de pesquisa

Este projeto tem seu escopo definido nas seguintes condições:

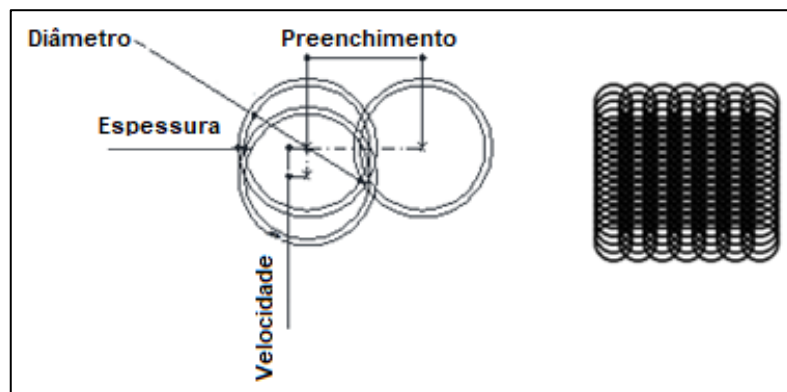
- O processo de marcação estudado envolveu a aplicação de um LASER de fibra, com potência nominal de 20 watts, em placas de aço inox AISI 304 (18% de Cromo (Cr) e 8% de Níquel (Ni)). Portanto, os resultados obtidos não podem ser extrapolados para outros materiais e processos;
- Os parâmetros de processos analisados neste trabalho foram: velocidade de aplicação do LASER, frequência de pulso e distância entre linhas (preenchimento). Outras variáveis, como a potência e a duração de pulso foram consideradas como parâmetros fixos;
- Para os resultados grandezas do processo, este trabalho propõe a comparação do comportamento do contraste da marcação em relação às variações de parâmetros (frequência de pulso, velocidade e preenchimento);

Este trabalho propõe a investigação das influências dos parâmetros, e discute algumas características físicas relacionadas à sobreposição dos pontos do LASER. Dado ao escopo deste trabalho não serão estudadas as propriedades como dureza, microestrutura e zona termicamente afetada (ZTA) não foram analisadas.

Assim, devido à natureza de existência de múltiplas variáveis para a configuração do equipamento, buscou-se a identificação da combinação dos parâmetros que permitam marcar matrizes de pontos previamente definidas com características de sobreposição específicas tanto no eixo X como no eixo Y, para garantir, em seu ajuste final, os níveis adequados de qualidade e produtividade.

Na Figura 9 os anéis representam o resultado visual proveniente de cada emissão individual do feixe de LASER sobre a superfície processada. Uma análise em microscópio do resultado obtido por pulsos individuais possibilita determinar o diâmetro e a espessura destes anéis utilizados para simular a distribuição da marcação sobre a superfície processada.

Figura 9 - Geometrias propostas



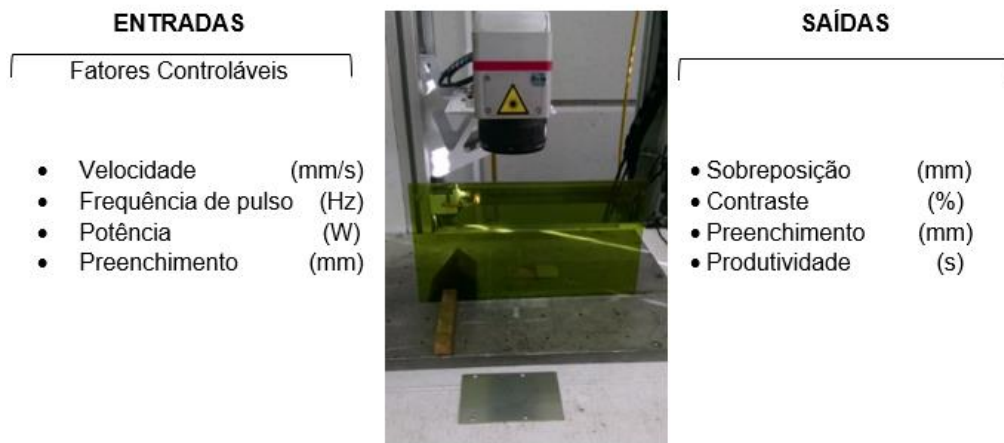
Fonte: O Autor, 2017

O parâmetro de preenchimento define diretamente a distância lateral entre linhas sucessivas de emissão de pulsos. Já o parâmetro de velocidade associado à frequência de pulsos possibilita definir o espaçamento longitudinal obtido entre cada pulso sucessivo sobre a superfície processada.

Em função do que se pretende analisar em termos de aplicações do processo, percebe-se que a marcação a LASER é caracterizada como um processo de natureza multivariada (múltiplas variáveis e múltiplas respostas), conforme indicado na Figura 10.

Desta forma, uma abordagem científica para este tipo de problema se torna importante para que as ferramentas de análise sejam corretamente definidas, permitindo que os resultados alcançados sejam coerentes e significativos.

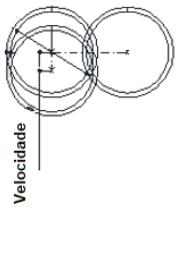
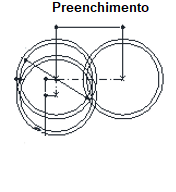
Figura 10 - Características dos parâmetros do LASER associadas ao processo de marcação



Fonte: O Autor, 2017

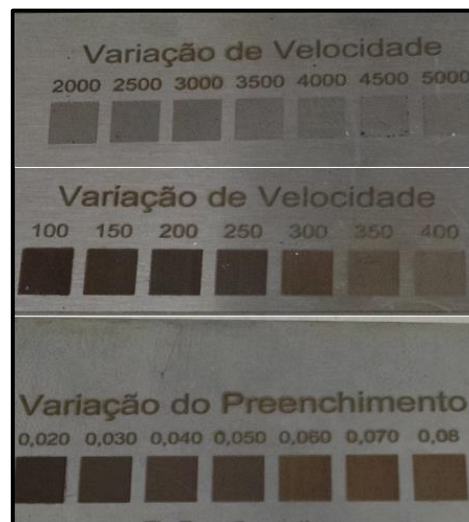
Conforme indicado na Figura 10, há diversas variáveis do processo que podem ser escolhidas para a otimização, o que gera dificuldade ao analisar a influência de todos estes parâmetros, e que exigem a necessidade da realização de testes preliminares para identificar quais seriam os parâmetros mais significativos na caracterização da qualidade (contraste) das marcações geradas. A Tabela 1 e a Figura 11 mostram que os níveis de fixação dos parâmetros avaliados nesta primeira etapa de avaliação foram aleatórios, e os testes realizados, bem como as geometrias observadas no resultado final da marcação, apresentam certas características de contraste visual.

Tabela 1 - Relação dos Parâmetros e suas características na marcação

Parâmetro	UN	Análise
Velocidade (frequência de pulsos e preenchimento fixos)	mm/s	
Preenchimento (velocidade e frequência de pulsos fixos)	mm	

Fonte: O Autor, 2017

Figura 11 - Parâmetros e suas características na marcação



Fonte: O Autor, 2017

Os resultados com as avaliações empíricas preliminares obtidos juntamente com as observações realizadas permitiram verificar que, dentre os parâmetros do processo de marcação a LASER utilizado, o preenchimento, a velocidade e a frequência são os

parâmetros mais influentes na caracterização da sobreposição dos pontos e valores de contraste. Entretanto, a influência destes fatores na caracterização geométrica do material marcado não é totalmente conhecida, o que dificulta o ajuste do processo com o objetivo de obter uma determinada geometria. Dado o exposto, este trabalho aprofundará a análise da influência dos parâmetros selecionados na obtenção de uma determinada característica de contraste da marcação. Para isso, o procedimento experimental, bem como os testes a serem realizados se baseiam na realização de experimentos para, em uma primeira fase, trabalhar com a análise dos efeitos dos parâmetros no contraste. Finalmente, a última etapa culmina com a avaliação das respostas no sentido de se obter a melhor geometria marcada.

3.2 Metodologia de pesquisa

O método de pesquisa utilizado foi concebido e fundamentado baseando-se em uma pesquisa experimental, sendo dividido em duas etapas:

1. Metodologia de experimentos e análise da influência dos parâmetros no contraste das marcações;
2. Análise para determinação dos parâmetros ideais para as respostas.

3.3 Procedimento experimental

Para a execução do procedimento experimental foi utilizada uma bancada experimental constituída por um equipamento de marcação a LASER que permite a ablação de material da superfície, gerando a modificação necessária para a formação do código 2D do tipo *DataMatrix*. O equipamento utilizado foi um LASER do tipo Fibra (comprimento de onda de 1064 nm) com potência nominal de 20 watts. A Tabela 2 exibe as demais especificações do equipamento.

O processo de marcação direta a LASER utilizado é bastante flexível e permite o ajuste dos seguintes parâmetros: Preenchimento, desfocagem, potência,

velocidade, frequência dos pulsos, energia de pulso, pulso, distância focal e diâmetro do foco.

Tabela 2 – Especificações do equipamento utilizado

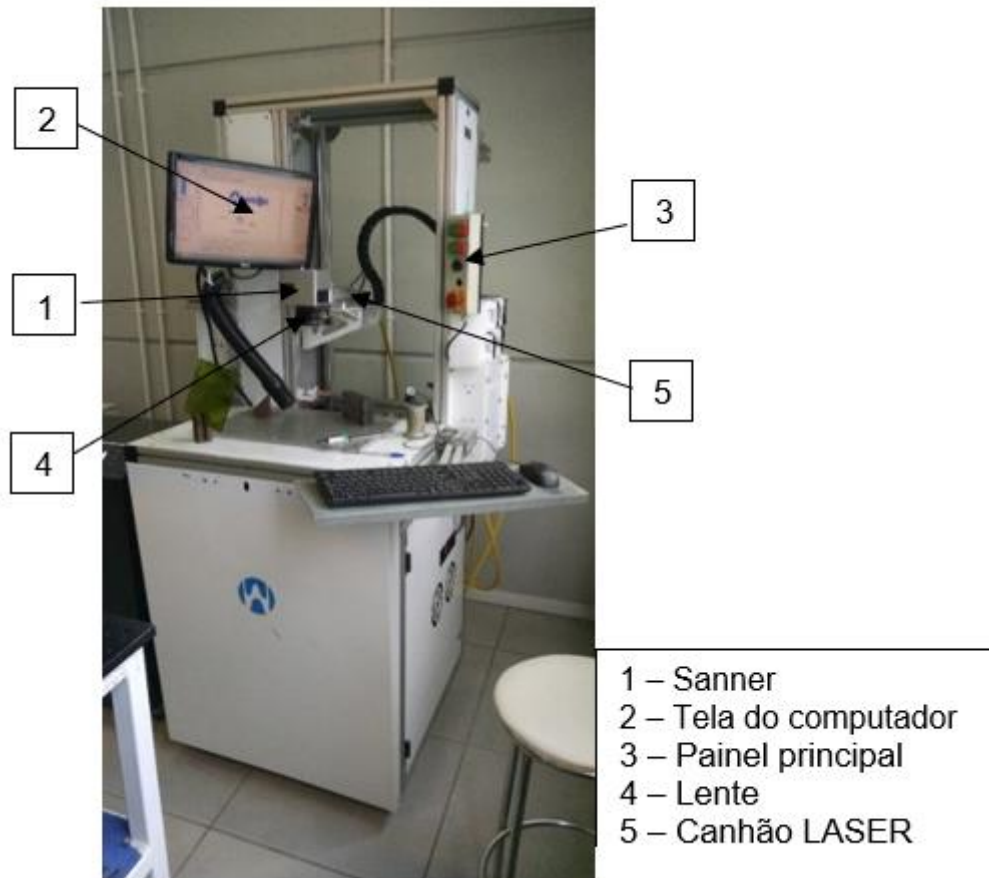
Sistema LASER Fibra LS 2000	Valores
Comprimento de onda	1064 nm
Tipo de ressonador	Fibra
Qualidade do Feixe	$M^2 < 1,8$
Tamanho do campo de marcação	45mm a 290 mm
Frequência de repetição do pulso	1 – 60 kHz
Potência do LASER	20 watts
Largura de pulso	60 ns

Fonte: O Autor, 2017

Os experimentos foram executados na empresa Welle Tecnologia LASER, localizada em Palhoça/SC, utilizando o equipamento mostrado pela Figura 12, que apresenta as características apresentadas na Tabela 2.

O equipamento é caracterizado por um cabeçote com deslocamento vertical e scanner galvanométrico de precisão que incide o foco de LASER na peça a ser trabalhada. Nos sistemas galvanométricos, o feixe é apontado para dois espelhos rotativos, altamente dinâmicos e de baixa inércia. Estes são movidos por galvanômetros. Por praticamente não haver aceleração de massas, o feixe de LASER pode assim ser guiado sobre a peça a velocidades extremamente elevadas, com alta precisão e repetitividade. As dimensões da área de marcação são definidas pelo ângulo de deflexão e pela distância focal dos elementos ópticos.

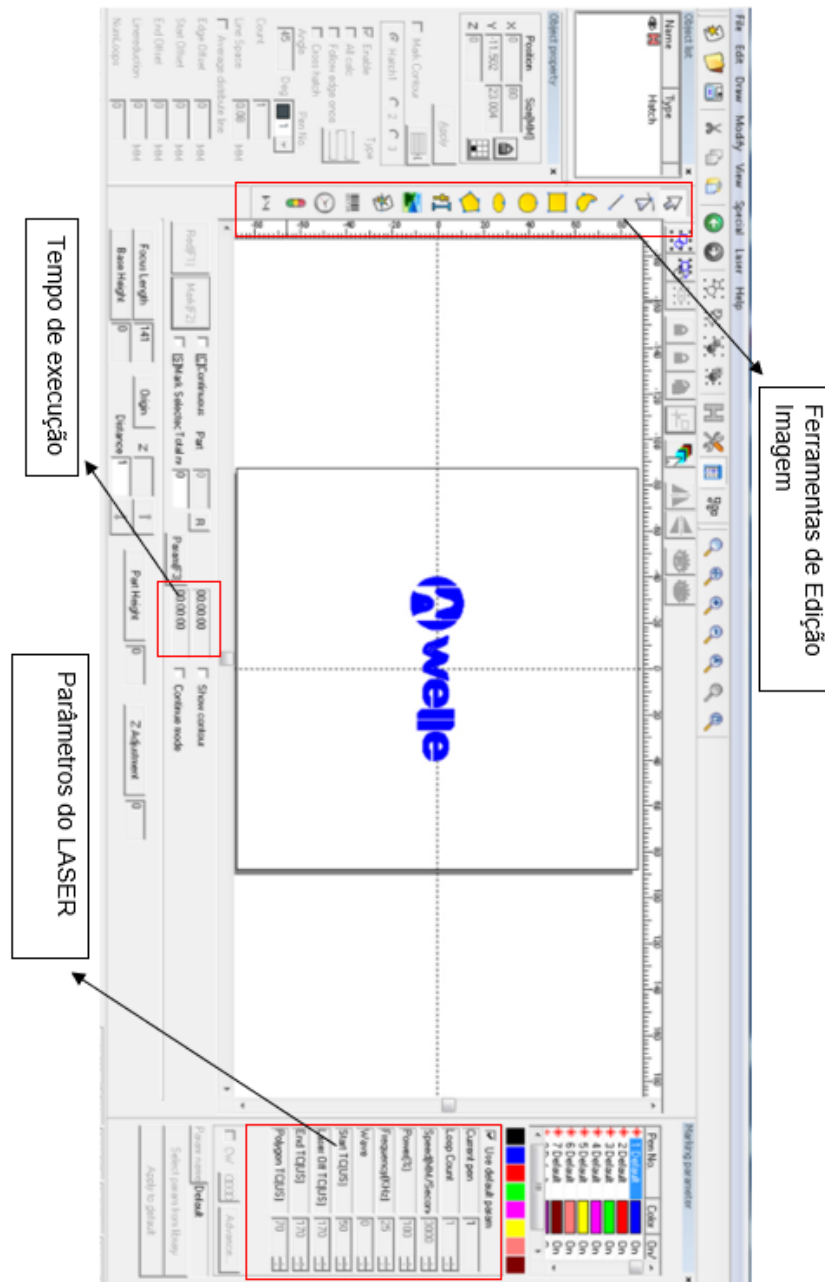
Figura 12 - Equipamento utilizado



Fonte: O Autor, 2017

A partir de um arquivo do tipo (.EZCAD) contendo a especificação da marcação são ajustadas definições de características do desenho como forma geométrica. Então são ajustados os parâmetros de marcação no software do equipamento que permitem trabalhar arquivos em outros computadores, utilizando o controle da máquina em outros computadores não conectados às máquinas de marcação e inicia-se o processo de marcação, conforme mostra a Figura 13.

Figura 13 - Tela de Parametrização do equipamento

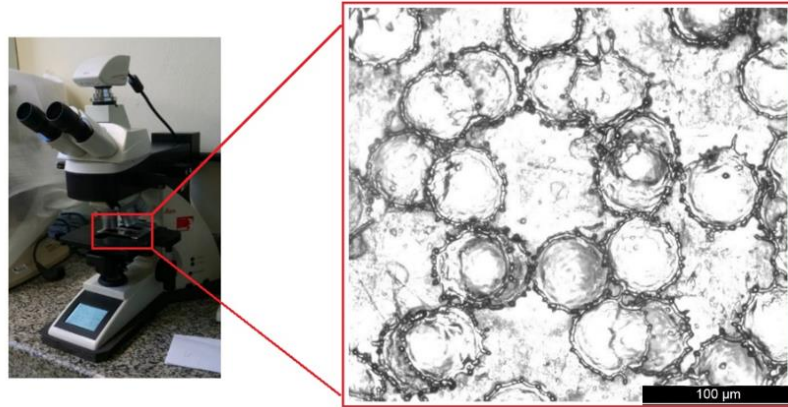


Fonte: O Autor, 2017

A medição da geometria dos pontos do LASER foi realizada com a finalidade de obter a resposta para os parâmetros relevantes, utilizando o Microscópio vertical versátil para análise de materiais Leica DM 4000 M LED, localizado no Laboratório de

Materiais do IFSC, conforme ilustrado na Figura 14 os corpos de prova foram posicionados no dispositivo para realização da medição.

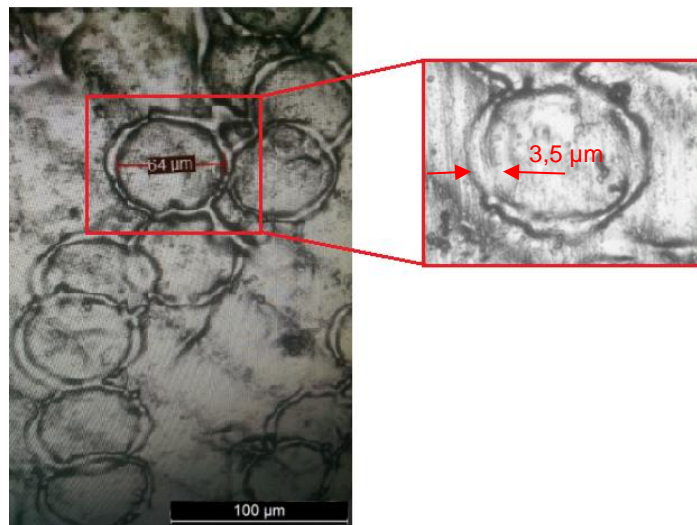
Figura 14 - Avaliação das marcações no microscópio



Fonte: O Autor, 2017

Para a realização da medição foi utilizada uma ampliação de 200 vezes e uma escala de 100 µm, conforme ilustrado na Figura 15. Os valores médios do diâmetro (65 µm) e da espessura (3,5 µm) dos anéis gerados em cada pulso foram medidos com o microscópio e esses valores foram usados como referência para simular graficamente o resultado da sobreposição de pulsos a partir da definição dos parâmetros de espaçamento lateral e velocidade associada à frequência de pulsos.

Figura 15 - Geometria do ponto

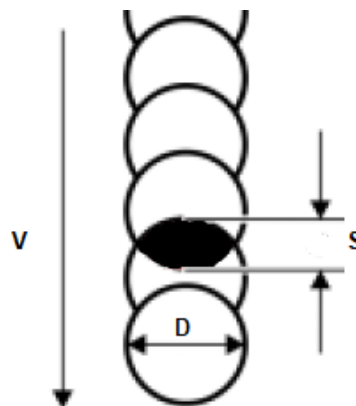


Fonte: O Autor, 2017

A medição da marcação real possibilita determinar e confirmar o efeito geométrico das características relacionadas à frequência de pulso e ao espaçamento entre linhas. Se a potência do LASER, a posição do foco, a duração do pulso e a velocidade de processamento forem definidas de modo fixo, o aumento da frequência dos pulsos induz a um aumento na densidade dos pontos, ou seja, aumenta a sobreposição de pontos no percurso, o que causa uma diferença significativa no contraste aparente da região processada. A Figura 16 ilustra, de forma esquemática, a sobreposição dos pontos (S).

Mantendo todos os parâmetros fixos, inclusive a velocidade (V), uma maior frequência de pulsos resultará numa diminuição do espaçamento entre pulsos sucessivos (S), o que influi no contraste obtido.

Figura 16 - Sobreposição dos pontos



Fonte: Trumpf, 2013

O desafio consiste em encontrar um conjunto de parâmetros que gere um contraste adequado, mas que permita obter o menor tempo de processamento possível, o que influi diretamente na produtividade do processo.

3.3.1 Avaliação de métricas de contraste por visão computacional

Para medir o contraste das amostras na superfície do material processado, com intuito de avaliar e caracterizar as sobreposições existentes, foi desenvolvido um

ambiente com sistema de visão computacional. As imagens foram processadas e analisadas através de softwares comerciais (AutoVISION® e NI Vision Builder®) e um software dedicado desenvolvido no Laboratório de Controle e Supervisão Inteligente (CSI-IFSC).

Para o desenvolvimento do software empregou-se uma abordagem de fluxo linear, considerando que os requisitos de processamento de imagem eram bem definidos, como apresentado posteriormente. Além disso, o sistema deve possuir uma configuração de hardware e software aberta para integração com outros sistemas automatizados de manufatura. Para alcançar estas características, foi utilizada a linguagem C++ combinada com a biblioteca OpenCv. A OpenCv é uma biblioteca de software compatível com diferentes linguagens de programação que disponibiliza uma série de estruturas e funções de processamento de imagens, visão computacional e inteligência artificial (BRADSKI; KAEHLER, 2008). Esta biblioteca tem sido amplamente utilizada no meio acadêmico ou mesmo comercial nos mais variados temas envolvendo imagens, como robótica, diagnóstico por imagem, interface humano-computador, interpretação de imagens de satélite, dentre outros. Apesar da vantagem de já trazer uma série de técnicas implementadas, a sua utilização ainda exige conhecimento aprofundado das mesmas e também de programação de computadores para que estas possam ser combinadas a fim de que os resultados esperados sejam alcançados.

Com base no cenário apresentado, o desenvolvimento da primeira versão do sistema descrito no presente trabalho foi orientado pelos seguintes requisitos funcionais principais (PRESSMAN, 2011):

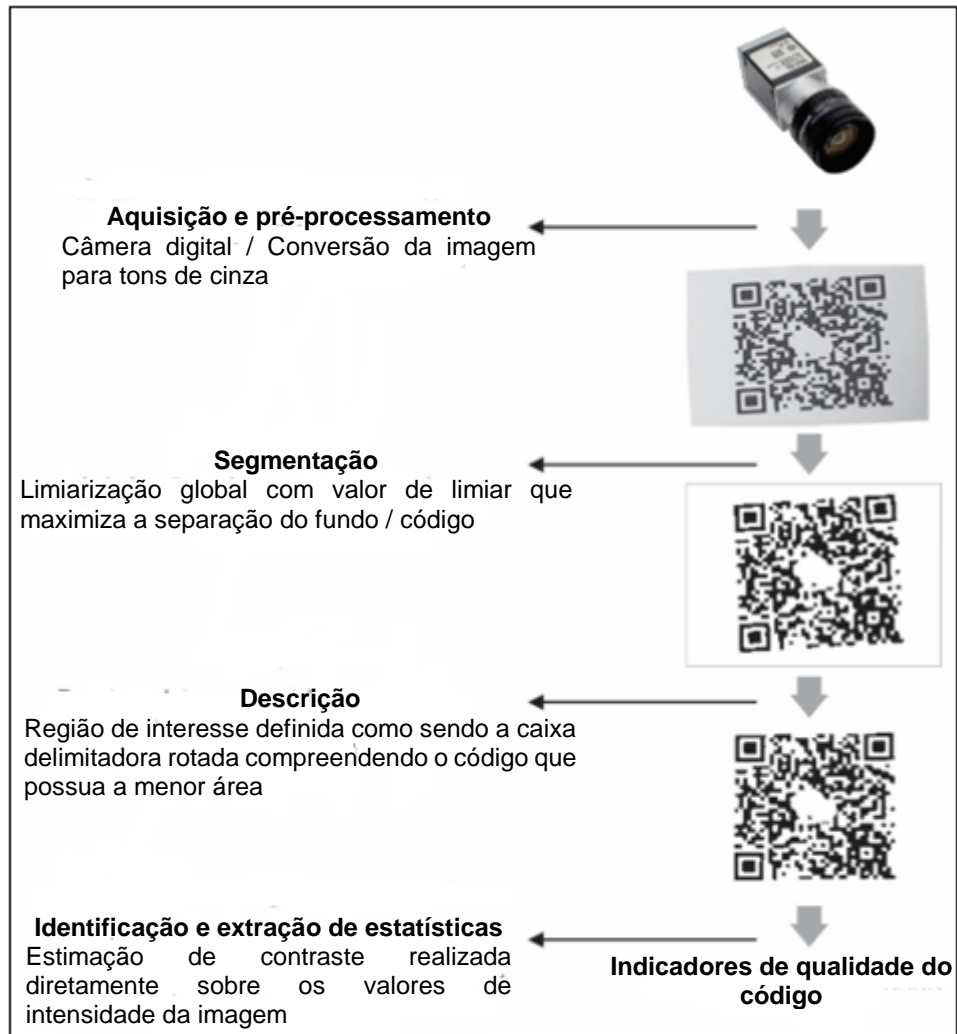
- O sistema deve realizar a extração de descritores de qualidade de marcações baseados em contraste;
- O sistema deve permitir a aquisição de imagens tanto por dispositivos de aquisição como por arquivos de imagens.

Além disso, os seguintes requisitos não funcionais foram selecionados:

- O sistema deve ser implementado fazendo uso de componentes de baixo custo;
- O sistema deve ser implementado empregando tecnologias abertas;
- O sistema deve ser de fácil utilização.

De modo a atender aos requisitos descritos, foram selecionadas técnicas para cada uma das etapas existentes em um sistema de visão computacional, conforme descrito no Item 2.2. Na Figura 17 é apresentado de forma simplificada o fluxo de processamento existente no método proposto.

Figura 17 - Fluxo do método proposto

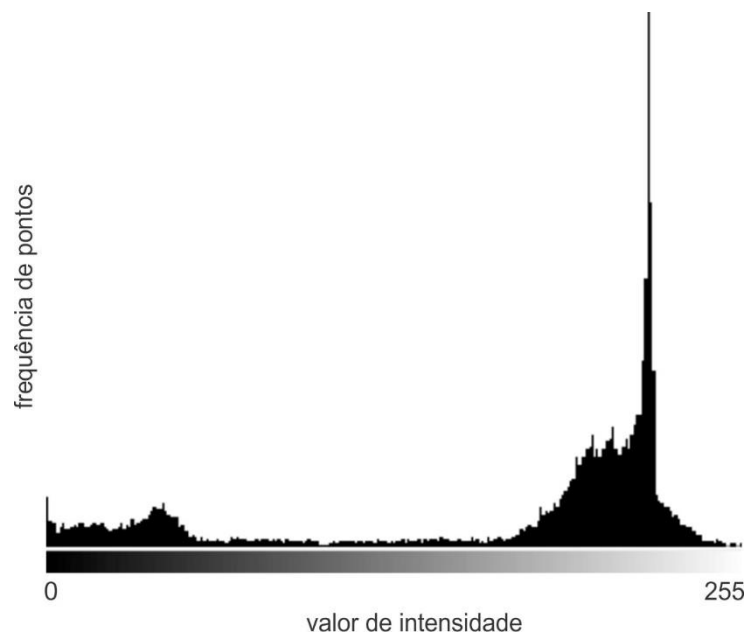


Fonte: O Autor, 2017

Na etapa de aquisição é utilizada uma câmera digital que captura uma imagem da peça contendo o código a ser avaliado. Como pré-processamento é realizada a conversão da imagem para tons de cinza.

Na etapa de segmentação é empregada a técnica de limiarização global para separar os pixels correspondentes ao código dos pixels ao fundo. Na Figura 18 é apresentado o histograma que apresenta a frequência dos valores de intensidade para os pixels que compõem uma imagem de uma gravação sobre uma peça metálica. Nessa Figura é possível observar a existência de dois picos que representam as intensidades em torno da média do valor da fase de fundo e da média do valor da fase da marcação.

Figura 18 - Histograma de intensidades



Fonte: O Autor, 2017

Desta forma, pode-se convenientemente ser selecionado um valor de intensidade limiar que separe as fases. A imagem binarizada $g(x,y)$ resultante da segmentação da imagem original $f(x,y)$ para um dado valor limiar T é dada por:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{se } f(x,y) \geq T \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

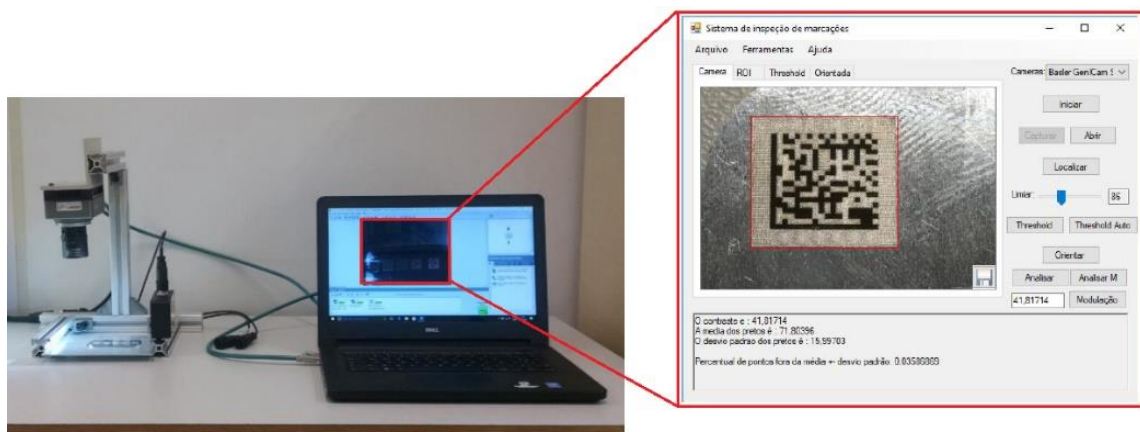
A imagem binarizada obtida na etapa de segmentação é utilizada como a máscara que separa os limites entre a marcação e o fundo. A partir desta máscara, a descrição do código presente na imagem é realizada através da localização da região

de interesse da imagem que contenha a marcação. Esta região é obtida pelo cálculo da caixa delimitadora rotada de menor área que contenha o código presente na imagem. Esta descrição é conveniente pois elimina transformações geométricas 2D de translação e rotação decorrentes do posicionamento da peça contendo o código no campo de visão da câmera.

Por fim, a identificação e extração de estatística de qualidade do código é obtida pelo cálculo do valor de contraste descrito pela Equação 1, realizado diretamente sobre os pontos que compõe a região da marcação na imagem.

Com base no fluxo de processamento descrito, foi implementado um sistema de visão computacional conforme Figura 19.

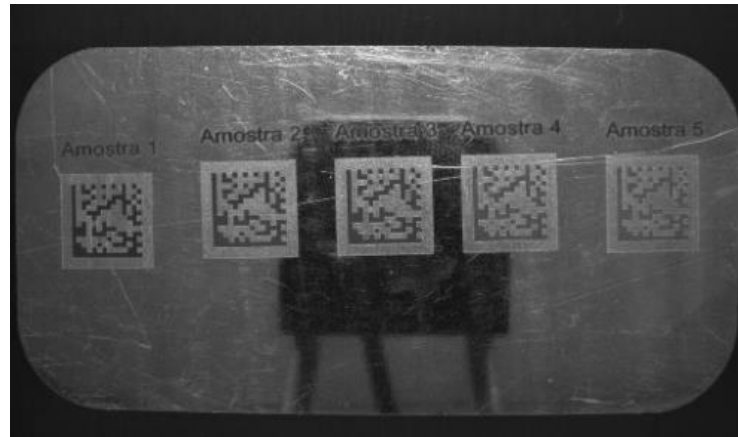
Figura 19 - Sistema de visão computacional desenvolvido



Fonte: O Autor, 2017

A ferramenta foi proposta e concebida para atender a todos os requisitos funcionais e não funcionais listados nesta seção. Para validar a utilização do sistema desenvolvido na extração de parâmetros de qualidade de códigos 2D (*DataMatrix*) foram criados ensaios para qualificação destas marcações. A título de comparação, para estes mesmos ensaios, foram utilizados os sistemas comerciais AutoVISION® e NI Vision Builder® descritos no item 2.2. Os ensaios foram realizados em peças de INOX marcadas com LASER e com variações de parâmetros conforme sugerido pela experiência da equipe da Welle LASER. As amostras foram processadas e obtidas como mostrado na Figura 20.

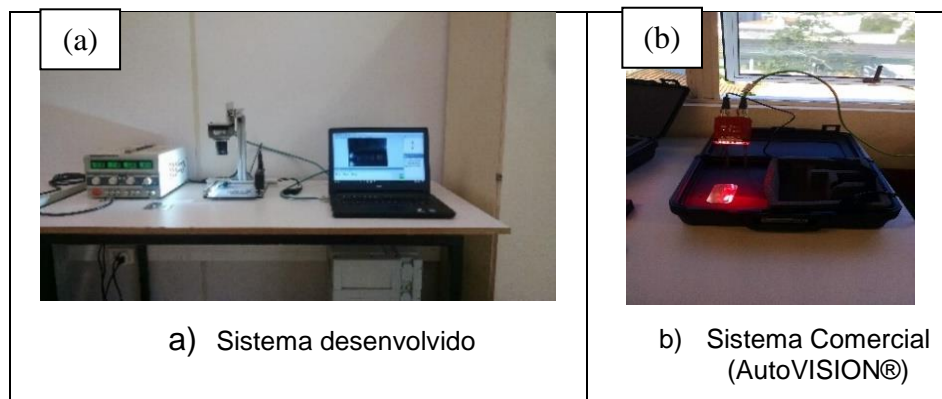
Figura 20 - Amostra de peça marcada



Fonte: O Autor, 201

Na Figura 21 são apresentadas as bancadas utilizadas para as aquisições, tanto com o sistema desenvolvido (a) como com o sistema comercial (b).

Figura 21 - Bancadas empregadas nas aquisições



Fonte: O Autor, 2017

No sistema desenvolvido, as análises de qualidade das marcações foram executadas a partir de um fluxo linear de aquisição, segmentação, descrição e identificação e extração, conforme explicado no Item 2.2. Na Figura 22 é apresentada

a tela do sistema desenvolvido durante a inspeção de uma amostra com marcação, onde é possível verificar suas funcionalidades e aquisição de dados como contraste.

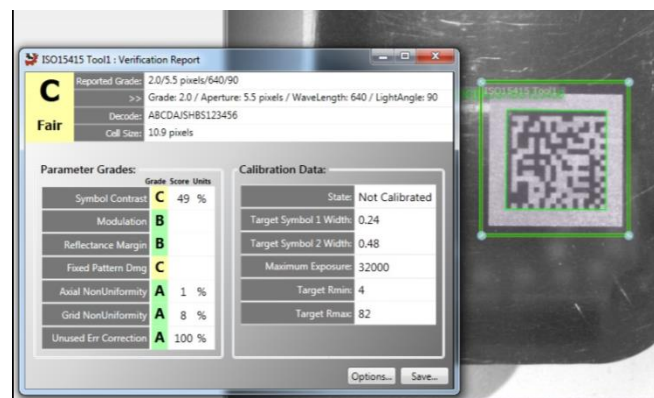
Figura 22 - Tela do sistema desenvolvido



Fonte: O Autor, 2017

Na Figura 23 é apresentada a tela do sistema AutoVISION® durante a inspeção de uma amostra marcada, onde pode se verificar o processamento e resultados da ferramenta comercial.

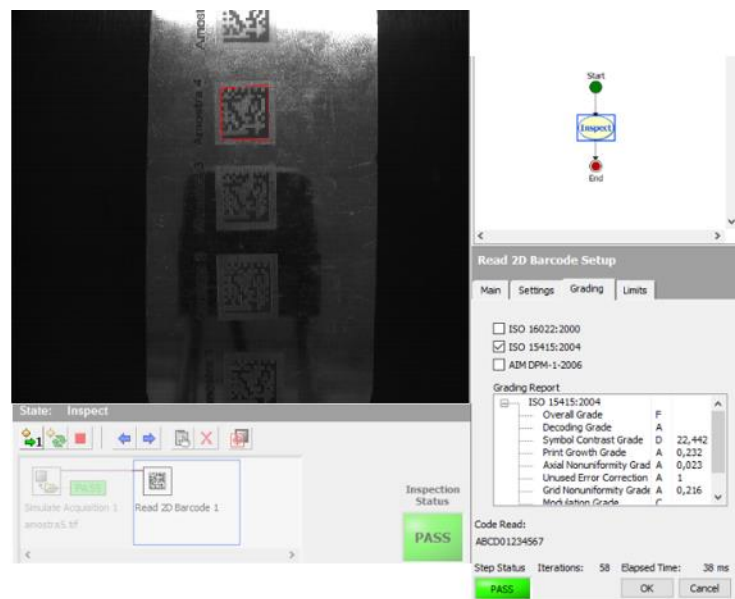
Figura 23 - Tela Sistema AutoVISION®



Fonte: Microscan, 2012

No NI Vision Builder®, os testes foram realizados com as ferramentas proprietárias de avaliação de códigos 2D da própria National Instruments. A Figura 24 apresenta a tela de funcionamento do NI Vision Builder® durante etapa de inspeção de uma amostra marcada, onde os processamentos e resultados da ferramenta comercial podem ser vistos.

Figura 24 - Tela Sistema NI Vision Builder®



Fonte: National Instruments, 2013

Para a avaliação das amostras foram feitos 5 ensaios, cada ensaio é composto por uma marcação, com variações nos seguintes parâmetros: P (Preenchimento), V (Velocidade) e F (Frequência de pulso). As amostras foram marcadas em uma fonte LASER de 20 watts, a exemplo das marcações apresentadas na Figura 20. Cada imagem foi inspecionada em ambos os sistemas, desenvolvido e comerciais (AutoVISION® e NI Vision Builder®), os quais devem localizar a imagem na bancada. Após localizar a marcação, o sistema deve verificar qualitativamente os valores de contraste.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O projeto partiu de uma necessidade vinculada à demanda das empresas que buscam implementar sistemas de rastreabilidade em seus processos de produção. A ideia foi explorar a marcação feita com fonte LASER devido às suas características e vantagens bem como sua grande aplicabilidade em sistemas de manufatura avançada ou indústria 4.0.

A seguir são apresentados os resultados relacionados à ferramenta de visão computacional desenvolvida para qualificar as marcações realizadas a LASER e um estudo dos parâmetros para buscar definir as melhores condições para obtenção de uma marcação de qualidade.


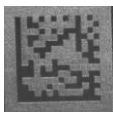
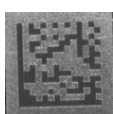
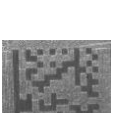
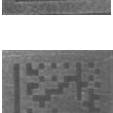
4.1 Análise da avaliação de contraste por visão computacional

A motivação principal para o desenvolvimento da ferramenta de visão computacional é disponibilizar uma ferramenta aberta que permita extrair características de qualidade das marcações. Estes dados servirão para orientar a combinação e configuração dos parâmetros existentes no processo de marcação LASER, de modo que se possa obter o melhor compromisso entre qualidade e velocidade de marcação.

Além da combinação de técnicas adequadas para a detecção do conjunto de características de interesse nos produtos inspecionados, a configuração e utilização do sistema representa um aspecto importante na criação da solução proposta. Uma característica importante da solução é a possibilidade de verificação rápida da qualidade de marcações, a definição do fluxo de processamento deve ser facilmente configurável.

Também é importante a utilização de tecnologia aberta, de menor custo, com características operacionais adequadas ao controle de pequenas séries (portabilidade, flexibilidade, baixo tempo de configuração, etc.). É desejável que um sistema como este seja projetado e construído de modo flexível, de forma que possa ser adaptado a diferentes tipos de processos seriados. Os resultados obtidos pelos dois sistemas são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Contraste (%) das amostras marcadas

Amostras	Parâmetros LASER	Microscan	National	Visual Studio
01 	P = 40 μ m V = 250 mm/s F = 25 kHz	30%	27%	28%
02 	P = 40 μ m V = 300 mm/s F = 30 kHz	32%	28%	29%
03 	P = 56 μ m V = 350 mm/s F = 35 kHz	36%	32%	33%
04 	P = 64 μ m V = 400 mm/s F = 40 kHz	29%	26%	26%
05 	P = 72 μ m V = 450 mm/s F = 45 kHz	24%	22%	24%

Fonte: O Autor, 2017

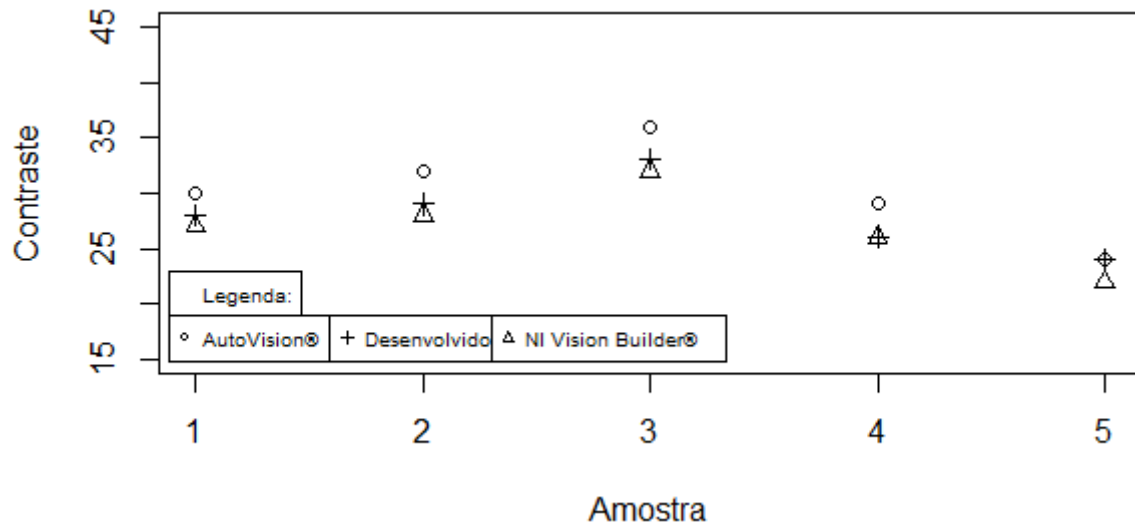
Como pode ser observado, as variações de contraste permanecem em torno de um mesmo ponto. Isto se deu uma vez que as variações de parâmetros seguiram um padrão linear. Estes ensaios foram úteis para avaliar os sistemas de inspeção de qualidade de marcação que apresentaram resultados muito próximos entre si. A variação verificada ficou dentro de uma faixa de $\pm 3\%$.

A detecção ou localização da região da marcação na imagem foi executada com sucesso pelo sistema desenvolvido.

Uma outra característica que foi avaliada foi a qualidade do contraste, pois é um indicador importante para avaliação de características das marcações, conforme norma ISO IEC 15415. Estes resultados são apresentados na Figura 25, onde são

comparados os resultados para o sistema AutoVISION®, NI Vision Builder® e o sistema desenvolvido.

Figura 25 - Gráfico de comparação



Fonte: O Autor, 2017

A ferramenta que foi desenvolvida neste estudo teve como objetivo contribuir para a disseminação e adoção da tecnologia de inspeção baseada em imagens. Neste sentido, foi concebida de forma que esta possa ser adaptada a diferentes cenários de uso sem que haja necessidade de codificação.

Os resultados obtidos nos testes realizados se mostraram similares aos alcançados por dois sistemas comerciais. Desta forma, fica comprovada a viabilidade de desenvolvimento de soluções de baixo custo. Neste caso o sistema desenvolvido teve um custo 10 vezes menor que os sistemas comerciais, muito abaixo do custo de aquisição de uma câmera industrial de 600 dólares, para inspeção de qualidade de marcações 2D empregando visão computacional e processamento de imagens.

4.2 Experimentação e análise dos parâmetros do LASER e suas características

Baseado nos estudos, experimentos e resultados apresentados para a geometria do ponto do LASER e para sua relação com os valores adquiridos de

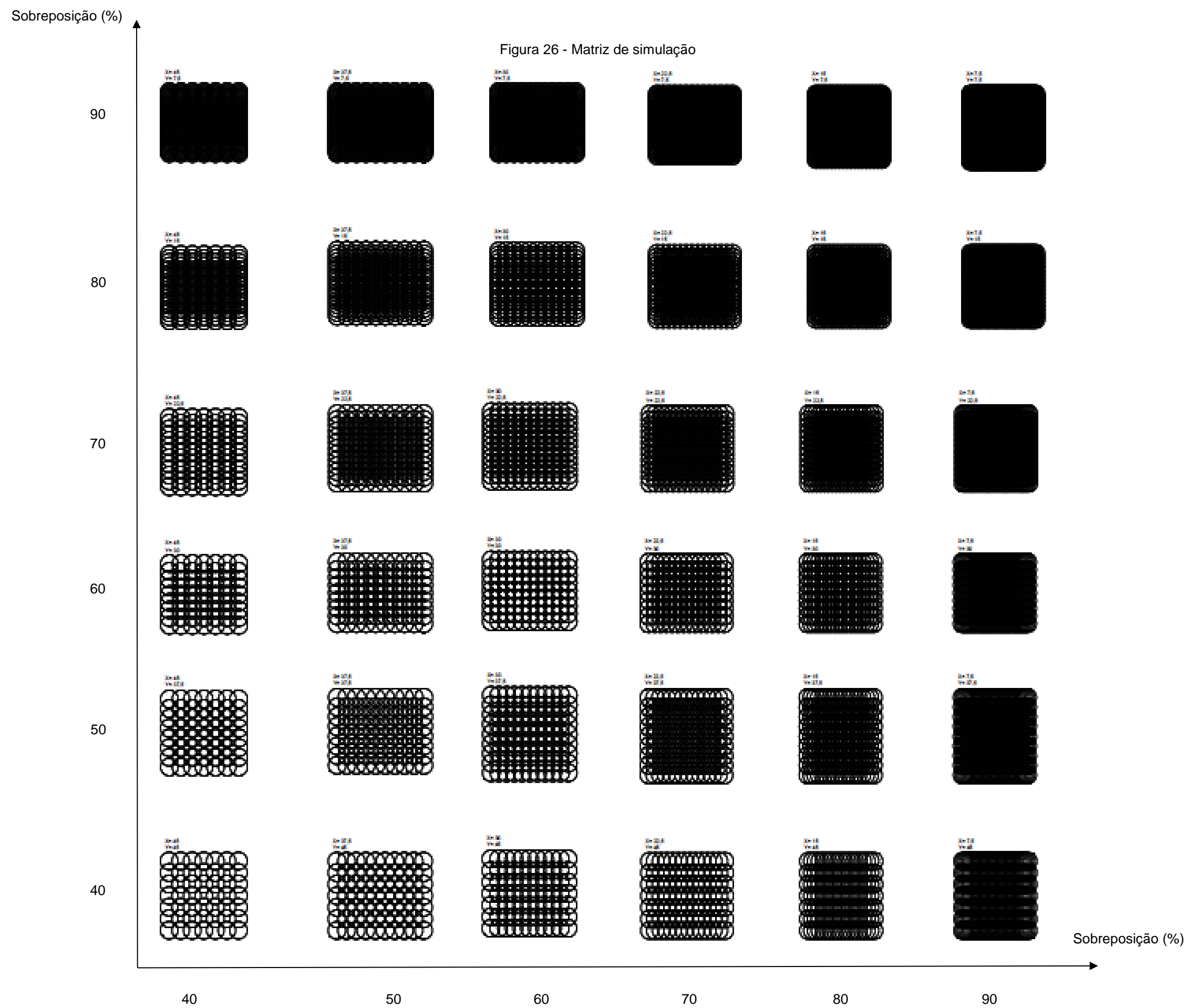
contraste do sistema de visão, foram propostos e observados novos ensaios para verificar a relação entre estas características.

A máquina de marcação LASER e software do próprio equipamento foram usados nos testes de experimentação para o material aço inox AISI 304, já mencionado anteriormente, com a variação de parâmetros.

Durante a etapa de planejamento experimental, baseada nos resultados anteriores de contraste, foi simulada uma matriz de marcações para encontrar os melhores parâmetros a serem testados. A Figura 26 apresenta a simulação da matriz de marcações, onde cada campo apresenta uma combinação de parâmetros.

A simulação se deu da seguinte forma: a partir da dimensão de um anel, foi projetado obter sobreposições nas duas direções (X e Y). Essas sobreposições foram determinadas para que se tivessem resultados variando de 40 a 90% de sobreposição.

Vale salientar que esta simulação mostrada representa uma ampliação de 200 vezes (Escala de 100 μm) com relação a uma marcação real.



A partir da simulação proposta e de acordo com os diferentes efeitos visuais das amostras (mais escura e mais clara), foi executada a mesma matriz para as mesmas variações de parâmetros em marcações reais, com 36 combinações, conforme Figura 27.

Depois de realizar os experimentos, as amostras foram avaliadas seguindo as etapas abaixo:

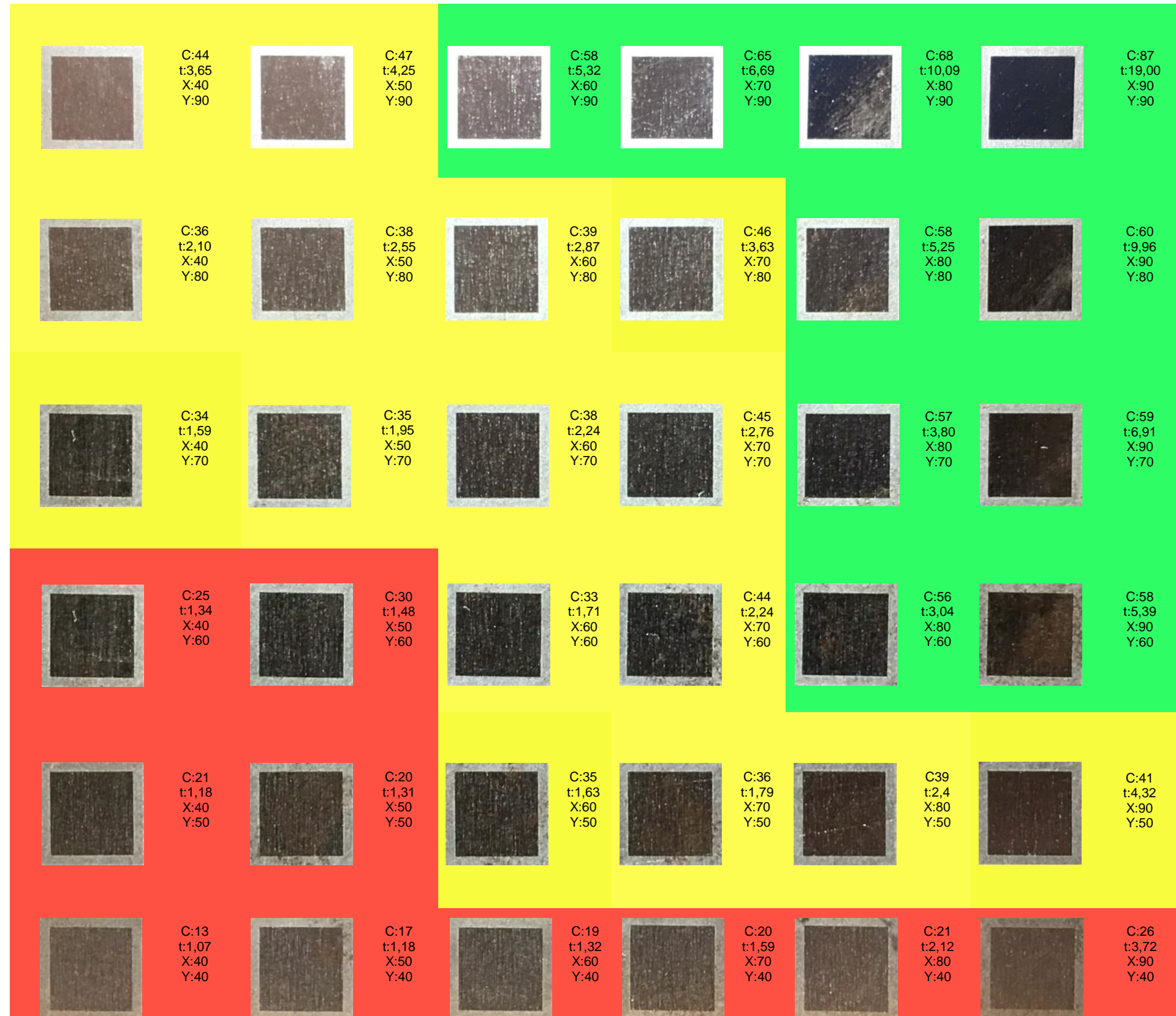
- Contraste, ou seja, a intensidade da cor preta;
- As relações entre os parâmetros os valores de contraste e tempo de execução.

A avaliação das amostras evidencia que o LASER com sobreposições em torno de 40% perde muito na qualidade de contraste, onde seu pico de energia gira em torno do ponto de 90% confirmando o que foi apresentado por Sobotova e Demec, (2015). Isto acontece, pois, menores velocidades, com a mesma frequência de pulsos, acarretam em maior densidade de pontos.

As mudanças na intensidade de preto são percebidas morfologicamente no material, dependendo da sobreposição dos pontos do LASER.

Fica claro perceber que em regiões de maior sobreposição o tempo de execução também é maior, entretanto um contraste mais adequado é gerado. Assim, de acordo com a produtividade de marcações, pode ser escolhido a melhor zona de trabalho que apresente a melhor relação entre tempo e contraste, já que são diretamente proporcionais (maior o tempo, maior o contraste). Isso se deve pela regularidade entre o preenchimento (espaçamento entre linhas) e a velocidade, é possível definir espaçamentos específicos entre linhas (maior ou menor sobreposições) com a alteração destes parâmetros durante a realização de uma marcação. Assim a Figura 27 apresenta uma diretriz de partida para definir as melhores relações entre parâmetros de corte, produtividade e regularidade das marcações.

Figura 27 - Valores de contraste (C em %), tempo (t em s) e sobreposição (X e Y em %) para amostras marcadas
 Onde: vermelho representa contrastes $\leq 30\%$; amarelo representa contrastes entre 31% e 50%; verde representa contrastes $> 50\%$

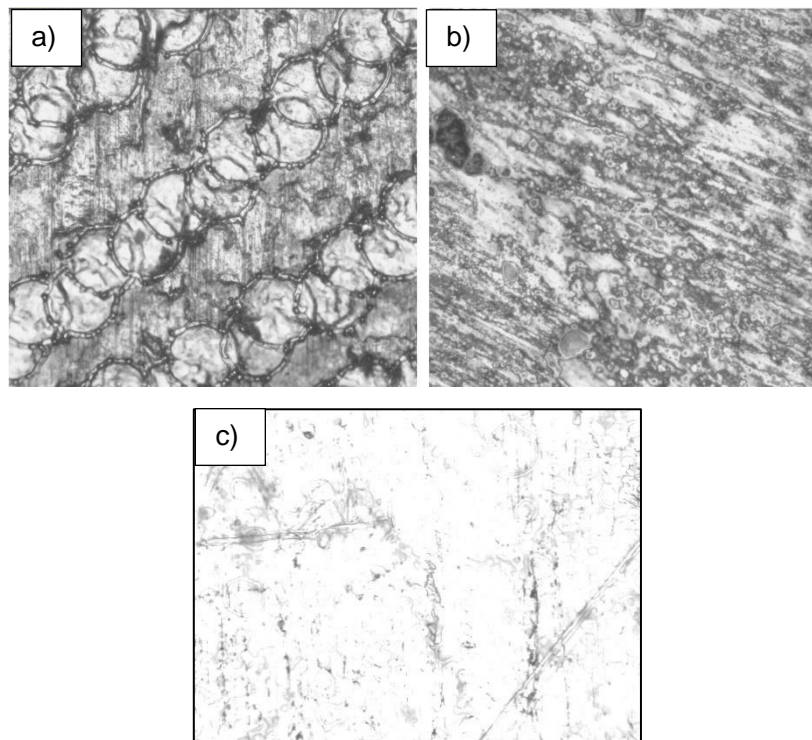


Fonte: O Autor, 2017

A partir dos resultados apresentados anteriormente é possível ainda perceber que em marcações onde se atribui altos valores de frequência é observada uma perda muito grande na entrega de energia, pois o processo de ablação é realizado de maneira diferente, e que por sua vez também altera o contraste na peça. Apesar da frequência trabalhar numa faixa considerada alta (60 kHz neste caso), se procurou adequar a velocidade para atingir uma mesma sobreposição. As marcações partem de uma mesma simulação de espaçamentos x e y seguindo o padrão de sobreposições propostos na Figura 26.

A Figura 28 mostra a diferença de densidade do ponto para marcações com frequências de 25 kHz, 60 kHz e sem marcação.





Figura 28 - Comparação densidade do ponto para Marcação 25 kHz (a), 60 kHz (b) e sem marcação (c)



Fonte: O Autor, 2017

Para os resultados apresentados na Figura 27 foram selecionados os parâmetros que melhor apresentam valores de contraste. Para cada marcação foi analisado também o tempo de execução da mesma, cujo resultado é apresentado na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 - Comparação sobreposições e contrastes

Amostras	Sobreposições X e Y	Contraste	Tempo
	X = 60% Y = 90%	58%	5,32 s
	X = 70% Y = 80%	46%	3,63 s
	X = 70% Y = 70%	45%	2,76 s
	X = 80% Y = 60%	56%	3,04 s

Fonte: O Autor, 2017

Como pode ser observado, as marcações tiveram uma variação de valores de contraste. O contraste aumenta conforme aumenta a sobreposição entre os pontos. Isto se deve ao parâmetro de preenchimento (espaçamento entre linhas), que foi alterado de maneira que se preenchesse uma lacuna de 40 a 90% de sobreposição. Por outro lado, a detecção de contraste da região da marcação na imagem pode sofrer influência externa de iluminação e de contaminação da peça, onde pode ocorrer diferenciação em seus valores.

Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros utilizados na fonte LASER para marcar cada amostra e as demais características inerentes ao processo, como valores de contraste, tempo de execução e sua relação com os percentuais de sobreposição. Cada amostra apresentada na Figura 27 foi numerada de 1 a 36 e os dados de cada uma são apresentados na Tabela 5, como citado anteriormente.

Tabela 5 - Parâmetros de marcação por amostra e suas características

Amostra	Parâmetros LASER					Contraste (%)	Tempo de execução (s)
	Preenchimento (μm)	Sobreposição em X (%)	Velocidade (mm/s)	Frequência (kHz)	Sobreposição em Y (%)		
01	45	40	2700	60	40	13	1,07
02	37,5	50	2700	60	40	17	1,08
03	30	60	2700	60	40	19	1,32
04	22,5	70	2700	60	40	20	1,59
05	15	80	2700	60	40	21	2,12
06	7,5	90	2700	60	40	26	3,72
07	45	40	2250	60	50	21	1,18
08	37,5	50	2250	60	50	20	1,31
09	30	60	2250	60	50	35	1,63
10	22,5	70	2250	60	50	36	1,79
11	15	80	2250	60	50	39	2,41
12	7,5	90	2250	60	50	41	4,32
13	45	40	1800	60	60	25	1,34
14	37,5	50	1800	60	60	30	1,48
15	30	60	1800	60	60	33	1,71
16	22,5	70	1800	60	60	44	2,24
17	15	80	1800	60	60	56	3,04
18	7,5	90	1800	60	60	58	5,39
19	45	40	1350	60	70	34	1,59
20	37,5	50	1350	60	70	35	1,95
21	30	60	1350	60	70	38	2,24
22	22,5	70	1350	60	70	45	2,76
23	15	80	1350	60	70	57	3,80
24	7,5	90	1350	60	70	59	6,91
25	45	40	900	60	80	36	2,10
26	37,5	50	900	60	80	38	2,55
27	30	60	900	60	80	39	2,87
28	22,5	70	900	60	80	46	3,63
29	15	80	900	60	80	58	5,25
30	7,5	90	900	60	80	60	9,96
31	45	40	450	60	90	44	3,65
32	37,5	50	450	60	90	47	4,25
33	30	60	450	60	90	58	5,32
34	22,5	70	450	60	90	65	6,69
35	15	80	450	60	90	68	10,09
36	7,5	90	450	60	90	87	19,00

Fonte: O Autor, 2017

O estudo experimental esteve focado na análise das inter-relações entre os parâmetros do processo de marcação a LASER de aço INOX AISI 304. As vantagens

da marcação a LASER dão um motivo para acreditar que se trata de um método adequado para diversas aplicações. Conferem a este método uma grande versatilidade, qualidade e rapidez, que os qualifica para diversas aplicações. O principal problema é definir a combinação ótima dos parâmetros do LASER para obter os melhores resultados para um material específico. Com base nos resultados gráficos resultantes do contraste, pode-se confirmar que o contraste de marcação aumenta com o aumento das sobreposições, diminuição do parâmetro de preenchimento (espaçamento entre linhas). Já para o aumento da velocidade de processamento, o contraste diminui muito. Isso pode ser explicado pela redução no tempo em que o LASER entra em contato com a peça, reduzindo a sobreposição dos pontos longitudinalmente. Para valores pequenos de velocidade e patamar de pulso, respectivamente, altos valores da frequência de repetição de pulsos, há um contraste gravado muito baixo, pois, a amostra não apresenta diferença de brilho. Com estes resultados é possível fornecer uma ferramenta para definir a combinação ótima dos parâmetros.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados e discutidos ao longo do tópico anterior, estabelecem-se, para o presente trabalho, as seguintes conclusões:

- Todos os parâmetros analisados apresentaram influência significativa sobre os resultados do processo de marcação a LASER. Onde o preenchimento altera diretamente o espaçamento lateral e a relação entre velocidade e frequência de pulso altera o espaçamento longitudinal entre os anéis do LASER;
- A ferramenta de visão computacional desenvolvida para as respostas de contraste mostrou-se confiável, uma vez que apresentou resultados similares em relação às ferramentas comerciais.

Para os efeitos dos parâmetros na obtenção dos resultados desejados, foi verificado que: menores tempos e, conseqüentemente, aumento de produtividade, podem ser obtidos com o aumento da velocidade e da frequência de pulso, enquanto que menores contrastes são alcançados aumentando-se a velocidade de varredura do LASER.

A análise das interações entre os parâmetros se mostrou um elemento importante para o controle do processo, onde a ação conjunta de parâmetros com pouca influência sobre uma dada resposta pode conduzir a efeitos significativos. Portanto, esta análise não pode ser negligenciada.

A correlação entre parâmetros da máquina e valores de contraste da marcação a LASER em material de aço Inox AISI 304 foi considerada satisfatória.

Após a avaliação dos parâmetros do equipamento, verificou-se que a marcação com melhor contraste é alcançada com o emprego da seguinte combinação dos parâmetros: velocidade em torno de 900 mm/s a 1000 mm/s; frequência de 60000 Hz; preenchimento em torno entre 15 μm e 30 μm . Nesta condição, são obtidas as seguintes respostas contraste em torno de 45% e tempo de execução em torno de 5 s (sobreposições em torno de 70%).

Os resultados aqui obtidos fazem deste estudo uma ferramenta útil para um adequado controle do processo, na medida em que níveis satisfatórios de contraste podem ser correlacionados com os parâmetros selecionados.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para estudos futuros, são apresentadas as seguintes considerações:

- Análise de diferentes frequências de emissão e correlação com a energia entregue.
- Análise das marcações de “Branco”.
- Efeito no processamento para a Limpeza a LASER.
- Análise e teste de processamento de marcação para outros materiais.
- Análise de processamento de marcação relacionado alteração de dureza em função da ZTA (Zona Termicamente Afetada).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGELOVA, Y. **Effect of CuBr LASER Parameters on the Contrast when Marking a textile Fabric**. 16th Romanian Textiles and Leather Conference – CORTEP 2016. **Anais**,2016.

BRADSKI, G.; KAEHLER, A. **Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library**. [s.l.] O'Reilly Media, Inc., 2008.

BALLUFF. **Traceability in Manufacturing: Industrial identification to improve your process chain**. Florence, Kentucky: 2014.

DAHOTRE, N. B.; HARIMKAR, S. P. Basics of LASERs 1.1. **Nature**, 2008.

DAPRAMARKING. **2D Data Matrix Code Products**. Disponível em: <www.dapramarking.com/data-matrix.htm>. Acesso em: 11 abr. 2017.

FORESTI, N. Fast Marking by Solid State LASER : Development of a LASER Source Optimized to the Highest Process Productivity. 2012.

GROOVER, M. **Automação Industrial e sistemas de manufatura**. São Paulo: Pearson, 2011.

HAVRILLA; ANTHONY. **Process fundamentals of industrial LASER welding and cutting**. Rofin-Sinar, 1999.

HAYAKAWA, H. A LASER method for marking bar codes on glass substrates. v. 4088, p. 363–366, 2000.

HERRMANN, T. R. W. et al. **EAU Guidelines on LASER Technologies**. European Association of Urology, 2014. Disponível em <<https://uroweb.org/wp-content/uploads/EAU-Guidelines-LASERs-2014.pdf>>. Acesso em 26 set 2017.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO/IEC 15415**: Information technology — Automatic identification and data capture techniques — Bar code symbol print quality test specification — Two-dimensional symbols. 2011.

INSTRUMENTS, N. **NI Vision Builder for Automated Inspection Tutorial**. National Instruments. Austin, 2011. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/373379h.pdf>>. Acesso em: 30 mai 2017.

ION, J. C. Chapter 2 - Evolution of LASER Material Processing. **LASER Processing of Engineering Materials**, v. 1505, p. 12–40, 2005.

KIM, K. et al. LASER scanner stage on-the-fly method for ultrafast and wide area fabrication. **Physics Procedia**, v. 12, n. PART 2, p. 455–461, 2011.

KITA, Y.; ISHIKAWA, H.; MASUDA, T. Guest Editorial: Machine Vision Applications. **International Journal of Computer Vision**, v. 122, n. 2, p. 191–192, 2017.

LAAKSO, P. et al. Relation of LASER parameters in color marking of stainless steel. p. 15, 2009.

LAWRENCE et al. **Advances in LASER materials processing: Technology, research and applications**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010.

LAZOV, L.; DENEVA, H.; NARICA, P. LASER Marking Methods. **Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference**, v. 1, p. 108-115. 2015.

LEONE, C. et al. AISI 304 stainless steel marking by a Q-switched diode pumped Nd:YAG LASER. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 10, p. 1297–1303, 2010.

LI, X. S. et al. LASER direct marking applied to rasterizing miniature Data Matrix Code

on aluminum alloy. **Optics and LASER Technology**, v. 77, p. 31–39, 2016.

LI, C. L. OFAT Experimental Study of LASER Durect-Part Marking of Data Matrix Symbols on Titanium Alloys. **Advanced Materials Research**, v. Vols 915-9, p. pp 1027-1031, 2014.

MICROSCAN. **Visão de máquina e ID automática Soluções de acompanhamento, rastreamento e controle de aquisição e dados precisos**. Renton, WA 98057 Estados Unidos. 2012.

POPRAWA, R. **Tailored Light 2: LASER Application Technology**. Aachen, Germany: Springer, 2011.

PRATT, K. W. **Digital Image Processing**. Los Altos, USA: Piks Inside, 2001.

PRESSMAN, R. S. **Engenharia de Software**. Porto Alegre: BookMan, 2011.

READY J.F. et al. **LIA Handbook of LASER materials processing**. New York, Springer Verlag, 2001.

ROMANA, R.; ALEXANDRU, P.; TRANSILVANIA, U. Influence of the LASER cladding parameters and solar heat treatment on the properties of biocompatible inconel 718 coatings. **Romanian journal of materials**, v. 47, n. 2, p. 157-165, 2017.

SOBOTOVA, L.; DEMEC, P. LASER Marking of metal materials. **MM Science Journal**, p. 665–669, 2015.

STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. **LASER Material Processing**. Michigan: Springer, 2010.

STREEK, A.; REGENFUSS, P.; EXNER, H. Fundamentals of energy conversion and dissipation in powder layers during LASER micro sintering. **Physics Procedia**, v. 41,

p. 858–869, 2013.

TRUMPF. **LASER as a Tool**. DITZINGEN: 2010.

TRUMPF. **Trumpf LASER**. Disponível em: <<http://www.trumpf-laser.com/>>. Acesso em: 11 out. 2017.

VELOTTI, C. et al. LASER Marking of Titanium Coating for Aerospace Applications. **Procedia CIRP**, v. 41, n. December, p. 975–980, 2016.

VIANA, C. V. **Otimização dos parâmetros LASER na texturização de anéis de pistão com cobertura em PVD através da utilização do DOE**. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2014.