



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Claudio Abilio da Silveira

**Análise da movimentação síncrona e simultânea entre *scanner* galvanométrico e eixos
lineares em aplicações *laser***

Florianópolis
2020

Claudio Abilio da Silveira

Análise da movimentação síncrona e simultânea entre *scanner* galvanométrico e eixos lineares em aplicações *laser*

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silveira, Claudio Abilio da

Análise da movimentação síncrona e simultânea entre scanner galvanométrico e eixos lineares em aplicações laser / Claudio Abilio da Silveira ; orientador, Milton Pereira, coorientador, Walter Lindolfo Weingaertner, 2020.

148 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Processamento a laser. 3. Automação de processos. 4. Sistemas de movimentação. 5. Mecatrônica. I. Pereira, Milton. II. Weingaertner, Walter Lindolfo. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título

Claudio Abilio da Silveira

Análise da movimentação síncrona e simultânea entre *scanner* galvanométrico e eixos lineares em aplicações *laser*

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Luís Gonzaga Trabasso, Ph.D.
Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer, Dr.-Ing.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fabio Antonio Xavier, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutor em engenharia mecânica.

Prof. Andrey Ricardo da Silva, Ph.D.
Coordenador do Programa

Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.
Orientador

Florianópolis, 2020.

À Rosa e Abilio.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rosa e Abilio, aos meus irmãos e familiares pelo apoio e compreensão.

Aos orientadores deste trabalho, Prof. Milton Pereira e Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, que atuaram no direcionamento e suporte às atividades desenvolvidas. Ao Prof. Rolf B. Schroeter pelo incentivo, críticas e discussões.

Aos colegas Felipe Hugo C. de Oliveira pela colaboração na montagem do gabinete elétrico, Daniel Pereira pela colaboração na programação de microcontroladores, Jhonattan Gutjahr pela colaboração no projeto da estrutura de enclausuramento, Francisco Ratusznei pela colaboração na usinagem de componentes mecânicos e Guilherme Oliveira Neves pelo auxílio nos processos de aquisição. À Caroline Martendal pelo compartilhamento de informação relacionadas a sua pesquisa em microrremoção.

Aos colegas que colaboraram ao longo do trabalho com sugestões, discussões e revisões, em especial, Adriano de Souza P. Pereira, Fernando Bordin, Max Baranenko Rodrigues e Rafael G. Nunes Silva.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), ao Departamento de Engenharia Mecânica (EMC) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Ao Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) e sua divisão de pesquisas em *laser* (LMP - *LASER*). Ao Laboratório de Materiais (LabMat), que destinou recursos financeiros para a aquisição dos equipamentos que compõem a bancada experimental apresentada neste trabalho, no âmbito do projeto que institui o Laboratório de Prototipagem e Produção de Lotes Pilotos (LP³), parceria firmada entre a UFSC e a Empresa Brasileira de Compressores (Embraco), com participação do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES).

Ao Laboratório de Usinagem e Comando Numérico (USICON) pela colaboração na usinagem de componentes mecânicos e ao Instituto de Soldagem e Mecatrônica (LABSOLDA) pelo auxílio prestado na soldagem da estrutura metálica presente na bancada experimental.

“When we are no longer able to change a situation, we are challenged to change ourselves.”

(Viktor E. Frankl, 1946)

RESUMO

A constante evolução da tecnologia *laser* tem permitido seu emprego em diferentes áreas. Fontes de *laser* cada vez mais eficientes e a redução de custo promovem grande expansão de uso no processamento de materiais. *Scanners* galvanométricos são comumente utilizados para atingir velocidades de deslocamentos de vários metros por segundo na movimentação do feixe de *laser*. No entanto, estes dispositivos apresentam um alcance de processamento limitado a dezenas ou centenas de milímetros na maioria dos casos. Este trabalho aborda a influência dos parâmetros e da estratégia de varredura em um sistema de movimentação síncrona e simultânea composto por um *scanner* galvanométrico 2D e dois eixos lineares. Foram realizados ensaios para verificar a influência dos parâmetros de movimentação sobre o tempo total de processamento. Para investigar a influência da estratégia de varredura, foi medida a variação da temperatura ao longo do perfil longitudinal de uma amostra. A análise da distribuição de temperatura ao longo do percurso de processamento tem objetivo de avaliar a entrega da energia pelo *laser* em função do caminho percorrido pelo feixe. Os resultados mostram que o tempo de processamento depende da relação entre a área de atuação do *scanner* e a amplitude dos elementos geométricos processados. Quando os vetores de movimentação são superiores a área de atuação do *scanner*, a demanda por movimentação dos eixos lineares aumenta. Nesta condição, a velocidade limitada dos eixos lineares pode apresentar maior significância sobre o tempo de processamento que a própria velocidade do *scanner*. A estratégia de varredura, por sua vez, apresenta influência direta sobre a distribuição espacial e temporal da energia entregue. Estratégias com varreduras do tipo bidirecional apresentam equilíbrio entre o tempo de processamento e a concentração de energia que resulta na elevação pontual da temperatura. A estratégia espiral permite atingir tempos de processamento cerca de 10 % inferiores se comparada com as estratégias anteriores, porém com picos de temperatura 40 % maiores. Estratégias baseadas na subdivisão da área a ser processada em áreas menores ou na execução aleatória dos vetores demandam tempos de processamento em média 67 % maiores, contudo, promovem ao menos 15 % de redução nos patamares de concentração de energia se comparadas as estratégias bidirecionais. A combinação dos parâmetros de movimentação bem como a estratégia de varredura utilizadas são importantes fatores que contribuem para o correto desempenho da movimentação síncrona e simultânea entre *scanner* galvanométrico e eixos lineares.

Palavras-chave: Movimentação síncrona. Cabeçote Galvanométrico. Galvo. Microrremoção.

ABSTRACT

The constant evolution of laser technology has allowed its use in different areas. More efficient laser sources and cost reduction promote major expansion of its use in materials processing. Galvanometer scanners are commonly used to achieve displacement speeds of several meters per second for moving the laser beam. However, these devices have a processing range limited to tens or hundreds of millimeters in most cases. This thesis analyses the influence of the parameters and scanning strategy in a synchronous and simultaneous motion system consisting of a galvanometer scanner 2D and two linear stages. Tests are performed to verify the influence of movement parameters on the total processing time. To investigate the influence of the scanning strategy, the temperature variation along the longitudinal profile of a sample was measured. The temperature distribution analysis along the processing path evaluates the delivery of energy by the laser depending on the path taken by the laser beam. The results show that the processing time depends on the relationship between the scanner's operating area and the amplitude of the processed geometric elements. When motion vectors are larger than the scanner's area, the demand for linear stage motion increases. In this condition, the limited speed of the linear stage may be more significant to the processing time than the scanner speed itself. The scanning strategy has a direct influence on the spatial and temporal distribution of the energy delivered during processing. Strategies with bidirectional scanning present a balance between the processing time and the energy concentration that results in the temperature rise. The spiral strategy, achieves processing time about 10 % lower compared to previous strategies, but with 40 % higher temperature peaks. Strategies based on the subdivision of the area to be processed or on the random execution of the vectors require 67 % longer processing times, however, promote at least 15 % reduction in energy concentration levels when compared to bidirectional strategies. The combination of the movement parameters as well as the scanning strategy used are important factors that contribute to the correct performance of synchronous and simultaneous movement between galvanometer scanner and linear stages.

Keywords: *Synchronous movement. Galvanometric head. Galvo. Micromachining.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de processamentos com <i>laser</i> em células de painéis fotovoltaicos.....	23
Figura 2 – Exemplos de superfícies texturizadas com <i>laser</i> em moldes e de variação das texturas empregadas.	24
Figura 3 – Ilustração dos componentes de uma fibra óptica em um <i>laser</i> de fibra.	31
Figura 4 – Construção de um <i>laser</i> de fibra empregando: a) fibras de bombeamento e b) pacotes de <i>laser</i> de diodo.....	32
Figura 5 – Padrões da remoção de <i>lasers</i> com secção transversal circular e retangular.	37
Figura 6 – Princípio de um galvanômetro com espelho acoplado a bobina móvel.....	39
Figura 7 – Galvanômetros com espelho acoplado ao eixo e um sistema de <i>scanner</i> 2D.....	39
Figura 8 – Comparativo entre o sinal de comando (excitação) e as respostas obtidas em um atuador galvanométrico.	41
Figura 9 – Quadrados marcados sobre placa de alumínio com diferentes controles de movimento e gráfico comparativo entre geometria gerada e a geometria desejada.....	42
Figura 10 – Efeito <i>deep marking</i> presente no fundo de uma cavidade processada com <i>laser</i>	43
Figura 11 – Imagem de um disco multifacetado (a) e representação de funcionamento de um <i>scanner</i> poligonal (b).....	44
Figura 12 – Feixe de <i>laser</i> focalizado através de: a) lente convencional, b) lente de planificação e c) lente <i>F-theta</i>	45
Figura 13 – Representação gráfica de uma distribuição gaussiana com linha de referência para intensidade igual a $1/e^2$ do valor de pico.	47
Figura 14 – Malha de controle de um sistema síncrono de <i>scanner</i> 2D e um eixo linear.....	49
Figura 15 – Trajetórias descritas por um sistema de movimentação com diferentes valores de tempo de aceleração (T_a).....	51
Figura 16 – Influência da rampa de aceleração e desaceleração sobre a velocidade de deslocamento do feixe sobre a amostra.	52
Figura 17 – Representação esquemática de pulsos <i>laser</i> individuais com: a) emissão dos pulsos iniciada durante a aceleração do eixo do <i>scanner</i> e b) emissão iniciada com atraso em relação à movimentação do eixo do <i>scanner</i>	54
Figura 18 – Exemplo da utilização de percursos extras para aceleração e desaceleração do <i>scanner</i>	54

Figura 19 – Representação esquemática da marcação de pulsos <i>laser</i> individuais com relação à posição inicial processada: a) sem <i>sky-writing</i> , b) com <i>sky-writing</i> e c) com sincronização do trem de pulso.	55
Figura 20 – Sincronização do comando de marcação com a velocidade atual do <i>scanner</i> , sinal de acionamento do <i>laser</i> e modulação da taxa de repetição de pulso do <i>laser</i>	56
Figura 21 – Áreas processadas em condições: a) convencional, b) <i>sky-writing</i> e c) com taxa de repetição de pulsos adaptativa.	57
Figura 22 – Abordagem unidirecional e bidirecional em uma estratégia do tipo <i>raster</i>	58
Figura 23 – Estratégia empregando preenchimento e contorno da área processada.	59
Figura 24 – Representação do ângulo θ entre direções do padrão de varredura entre camadas consecutivas.	60
Figura 25 – Estratégias de varredura do tipo espiral interna e espiral externa.	60
Figura 26 – Curvas de Hilbert e Peano-Gosper aplicadas em estratégias de varredura na manufatura aditiva em leito de pó.	61
Figura 27 – Detalhe das linhas geradas na estratégia de varredura conhecida como Helix.	61
Figura 28 – Modelo de distribuição de temperatura para uma fonte de calor em movimento.	64
Figura 29 – Comportamento da temperatura em um plano perpendicular ao eixo de aquecimento em função do tempo para diferentes raios isotérmicos.	65
Figura 30 – Componentes do sistema de movimentação: a) eixo ECO165LM-300, b) eixo PRO115SL-300 e c) <i>scanner</i> galvanométrico AGV-14HPO. (Proporções aproximadas).	69
Figura 31 – Exemplos de remoção e alteração de materiais empregando o <i>laser</i> pulsado.	70
Figura 32 – Exemplos de soldagens obtidas com utilização do <i>laser</i> contínuo.	70
Figura 33 – Espectro óptico de saída da fonte de <i>laser</i> YLPN.....	71
Figura 34 – Espectro óptico de saída do <i>laser</i> YLR.....	73
Figura 35 – CAD do conjunto mecânico da bancada experimental.	75
Figura 36 – Opções de reconfiguração da bancada experimental.	76
Figura 37 – Volumes disponíveis para processamento com o feixe de <i>laser</i> nas diferentes configurações de montagem da bancada experimental.	77
Figura 38 – Detalhe da interface do <i>scanner</i> (a) e montagem dos componentes em conjunto com a estrutura de suporte do <i>scanner</i> (b).....	79
Figura 39 – Procedimento de realização das linhas e resultado após a correção de colinearidade entre <i>scanner</i> e eixos lineares.	80
Figura 40 – Bancada experimental com sua estrutura de enclausuramento.	81
Figura 41 – Representação do circuito de intertravamento de segurança.	82

Figura 42 – Interligação dos componentes do sistema de movimentação e fontes de <i>laser</i>	83
Figura 43 – Visão externa e interna do gabinete elétrico da bancada experimental.	85
Figura 44 – Sequência de processamento na condição <i>step and scan</i>	90
Figura 45 – Condição de processamento utilizando movimentação síncrona e simultânea....	91
Figura 46 – Representação esquemática das estratégias de varredura empregadas.	93
Figura 47 – Dimensões da chapa de aço inoxidável AISI 316L empregada como amostra e posicionamento dos termopares.....	94
Figura 48 – Representação da distribuição dos termopares sob a amostra para as diferentes condições de movimentação.	95
Figura 49 – Sistema de aquisição USB 6218 e termopares instalados em uma amostra.	97
Figura 50 – Procedimento de união dos fios do termopar empregando descarga capacitiva...	98
Figura 51 – Sequência de operações para fixação dos termopares na face inferior da amostra por meio de descarga capacitiva.	99
Figura 52 – Gráfico de Pareto com os valores dos parâmetros de movimentação mais significativos sobre a resposta (tempo total de processamento).	101
Figura 53 – Gráfico de efeitos principais dos parâmetros de movimentação sobre a média do tempo total de processamento.....	102
Figura 54 – Gráfico de interação entre os fatores do experimento fatorial realizado.	104
Figura 55 – Evolução da temperatura empregando estratégia bidirecional na condição de movimentação <i>step and scan</i>	105
Figura 56 – Temperaturas medidas em termopares sequenciais sobre uma linha, exibidas em painéis individuais, para a estratégia do tipo bidirecional.	107
Figura 57 – Evolução da temperatura empregando estratégia bidirecional alternada na condição de movimentação <i>step and scan</i>	108
Figura 58 – Temperaturas exibidas em painéis individuais para a estratégia bidirecional alternada sob movimentação <i>step and scan</i>	109
Figura 59 – Evolução da temperatura empregando estratégia espiral externa na condição de movimentação <i>step and scan</i>	110
Figura 60 – Evolução individual das temperaturas na estratégia espiral externa sob a condição de movimentação <i>step and scan</i>	111
Figura 61 – Evolução da temperatura empregando estratégia xadrez.	112
Figura 62 – Temperaturas exibidas em painéis individuais para a estratégia xadrez na condição de movimentação <i>step and scan</i>	113
Figura 63 – Evolução da temperatura empregando estratégia aleatorizada.	114

Figura 64 – Evolução individual da temperatura empregando estratégia aleatorizada.	115
Figura 65 – Estratégia bidirecional no modo de movimentação síncrona e simultânea.....	116
Figura 66 – Curvas individuais de temperatura para a estratégia bidirecional com movimentação síncrona e simultânea.	117
Figura 67 – Temperaturas coletadas na condição de movimentação síncrona e simultânea para a estratégia bidirecional alternada.	118
Figura 68 – Visão individual das temperaturas para estratégia bidirecional alternada sob movimentação síncrona e simultânea.	119
Figura 69 – Evolução das temperaturas obtidas em ensaio parcial (somente 1º passe concluído) para a estratégia espiral externa com movimentação síncrona e simultânea.....	120
Figura 70 – Visão individual das temperaturas para estratégia espiral externa sob movimentação síncrona e simultânea.	121
Figura 71 – Efeito do processamento realizado com feixe de <i>laser</i> nas extremidades da área de alcance da lente <i>F-theta</i>	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Larguras de pulso e taxas de repetição de pulsos disponíveis na fonte de <i>laser</i> YLPN.....	72
Tabela 2 – Fatores, níveis e respectivos valores adotados no ensaio de influência dos parâmetros de movimentação.	88
Tabela 3 – Experimento fatorial multinível para determinar influência dos parâmetros de movimentação.....	88
Tabela 4 – Valores de temperatura máxima e tempos de processamento para cada estratégia de varredura empregada nos ensaios realizados.....	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AuxOFF</i>	<i>Auxiliar Emission OFF</i>
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
A/D	Conversão analógica para digital
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DB25	Conector do tipo DB com 25 pinos
DB9	Conector do tipo DB com 9 pinos
EE	<i>Emission Enable</i>
EM	<i>Emission Modulation</i>
EMBRACO	Empresa Brasileira de Compressores
EMC	Departamento de Engenharia Mecânica
EWT	<i>Emitter Wrap Through</i>
IFOV	<i>Infinite Field Of View</i>
LabMat	Laboratório de Materiais
LABSOLDA	Instituto de Soldagem e Mecatrônica
<i>LASER</i>	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
LP ³	Laboratório de Prototipagem e Produção de Lotes Pilotos
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
OLED	<i>Organic Light-Emitting Diode</i>
POSMEC	Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica
PRR	<i>Pulse Repetition Rate</i>
QBH	Tipo de conector para fibras ópticas
RG	<i>Red Guide</i>
RS232	Tipo de protocolo empregado na comunicação serial
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VCSEL	<i>Vertical Cavity Surface Emitting Laser</i>

YAG	<i>Yttrium Aluminum Garnet</i>
YLPN	Modelo de fonte de <i>laser</i> de emissão pulsada
YLR	Modelo de fonte de <i>laser</i> contínuo

LISTA DE SÍMBOLOS

E_p	μJ	Energia ideal de pulso
H_0	J/cm^2	Pico de fluência do <i>laser</i>
H_{opt}	J/cm^2	Fluência ideal
H_{th}	J/cm^2	Limiar de fluência do material
P_{abs}	W	Potência absorvida
P_{av}	W	Potência média
P_r	W	Potência refletida
P_t	W	Potência transmitida
f_p	kHz	Taxa de repetição de pulsos
q_v	W/cm^3	Densidade de energia superfície irradiada
q_{v0}	W/cm^3	Densidade de energia emitida pela fonte de radiação
w_0	μm	Raio do feixe
w_f	μm	Mínimo raio de cintura do feixe
w_p	μm	Diâmetro do feixe
ϑ_0	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura inicial da peça
\varnothing	mm	Diâmetro de entrada do feixe de <i>laser</i> no <i>scanner</i> galvanométrico
c	J/gK	Calor específico
T_a	ms	Tempo de aceleração
θ	$^{\circ}$	Ângulo de inclinação entre vetores
λ	J/cmKs	Condutividade térmica
π	adm	3,14159265359
ρ	g/cm^3	Densidade
A	adm	Absortividade
D	μm	Diâmetro da área de ablação
P	W	Potência total incidente
f	mm	Distância focal da lente
o	%	Sobreposição entre pulsos
p	μm	Distância entre pulsos
r	mm	Raio de isoterma
v	mm/s	Velocidade relativa do feixe de <i>laser</i>
y	mm	Distância no eixo Z

z	mm	Distância no eixo Z
α	m^{-1}	Coefficiente de absorção
θ	°	Ângulo de rotação do espelho
λ	nm	Comprimento de onda
σ	μm	Diâmetro do ponto focal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	MOTIVAÇÃO.....	25
1.2	OBJETIVOS.....	27
1.2.1	Objetivo Geral	27
1.2.2	Objetivos Específicos.....	27
1.3	CONTRIBUIÇÕES DA TESE.....	27
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1	<i>LASER</i>	30
2.2	MICRORREMOÇÃO A <i>LASER</i>	33
2.3	<i>SCANNER</i> GALVANOMÉTRICO	38
2.3.1	Origem e evolução	38
2.3.2	Características e limitações	40
2.3.3	Lentes <i>F-theta</i>.....	45
2.4	SINCRONIZAÇÃO ENTRE <i>SCANNER</i> E EIXOS LINEARES.....	47
2.5	ESTRATÉGIAS DE PROCESSAMENTO	53
2.5.1	Estratégias associadas ao funcionamento do <i>scanner</i>	53
2.5.2	Estratégias associadas com a movimentação do feixe de <i>laser</i>	58
2.6	MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA	62
2.7	CONSIDERAÇÃO FINAIS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	65
3	BANCADA EXPERIMENTAL DE PROCESSAMENTO COM <i>LASER</i>.....	67
3.1	REQUISITOS DA BANCADA EXPERIMENTAL	67
3.2	SOLUÇÕES ADOTADAS	68
3.2.1	Sistema de movimentação.....	68
3.2.2	Fontes de <i>laser</i> e ampliação da capacidade de processamento.....	69
3.2.2.1	<i>Fonte de laser YLPN – pulsado</i>	71
3.2.2.2	<i>Fonte de laser YLR – contínuo</i>	73
3.2.3	Integração.....	74
3.2.3.1	<i>Integração mecânica</i>	75
3.2.3.2	<i>Integração eletroeletrônica</i>	81
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	86
4.1	EXPERIMENTOS.....	86

4.1.1	Experimentos de influência dos parâmetros de movimentação.....	86
4.1.2	Experimento de influência da estratégia de varredura	89
4.2	PARÂMETROS DE PROCESSO E FONTE DE <i>LASER</i>	95
4.3	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS	96
4.3.1	Placa de aquisição de sinais	96
4.3.2	Termopares e seu método de fixação.....	97
5	RESULTADOS	100
5.1	INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE MOVIMENTAÇÃO	100
5.2	INFLUÊNCIA DA ESTRATÉGIA DE VARREDURA SOBRE O COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA	104
5.2.1	Condição com movimentação <i>step and scan</i>	104
5.2.2	Condição síncrona e simultânea.....	115
5.3	RESUMO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE MOVIMENTAÇÃO E DAS ESTRATÉGIAS DE VARREDURA.....	122
5.4	CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS.....	125
5.4.1	Movimentação síncrona e simultânea com lentes não telecêntricas	125
5.4.2	Amostra movimentada <i>versus scanner</i> movimentado.....	126
5.4.3	Uso em sistemas de alimentação contínua.....	127
6	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	129
6.1	CONCLUSÕES.....	129
6.2	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	131
	REFERÊNCIAS	132
	APÊNDICE A – PARÂMETROS PARA MICRORREMOÇÃO	141
	ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DA LENTE F-<i>THETA</i>	142
	ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO	143
	ANEXO C – ESPECIFICAÇÃO DO <i>LASER</i> YLPN	145
	ANEXO D – ESPECIFICAÇÃO DO <i>LASER</i> YLR	148

1 INTRODUÇÃO

Os processos produtivos evoluem constantemente ao longo dos anos pelo amadurecimento e melhoria das tecnologias empregadas. O *laser* é um exemplo destas tecnologias em evolução, devido à disponibilidade de fontes cada vez mais potentes, com pulsos cada vez mais curtos e qualidades de feixe cada vez melhores. Além disto, a redução progressiva dos custos, o aumento de eficiência das fontes e a versatilidade de utilização também contribuem para a crescente aplicação do *laser* nos processos industriais.

Tal expansão, segundo alguns autores fará do *laser* uma ferramenta que impulsionará novas aplicações não somente nesta década, mas por todo este século (Schmidt *et al.*, 2018). Contudo, em função da aplicação final, pode ser necessário mais do que apenas uma unidade de geração *laser* para realização do processo. Além de a energia ser emitida em condições determinadas, a radiação luminosa também demanda sistemas distintos de entrega do feixe de *laser* à área de trabalho. Estes sistemas são encarregados de adequar e movimentar o feixe, permitindo que incidência sobre o objeto tenha as características necessárias que permitam a

A movimentação do feixe de *laser* engloba aspectos básicos como a velocidade e capacidade de posicionamento dos dispositivos utilizados. Além destes, aspectos particulares como o momento de acionamento e desligamento do *laser* (Oehler *et al.*, 2017) e sua distribuição espacial e temporal de energia (Homburg e Mitra, 2012) também estão envolvidos. Para garantir o correto processamento dos materiais, todas as variáveis influentes no processo devem estar rigorosamente sincronizadas, tornando as aplicações não triviais.

Dentre os dispositivos que podem ser empregados para a movimentação de feixes de *laser*, os chamados *scanners* galvanométricos apresentam destaque. *Scanners* galvanométricos são dispositivos eletromecânicos contendo espelhos de alta refletividade, usados para defletir o feixe de *laser* sobre a área de trabalho. A posição do foco do feixe pode ser corrigida, ou não, dependendo da aplicação. A movimentação do ponto de incidência do feixe de *laser* sobre o componente resultante apresenta como características principais a velocidade elevada (Jaeggi *et al.*, 2016) (se comparada à movimentação com eixos cartesianos ou robóticos convencionais) e a resolução de posicionamento em determinados casos na ordem de nanômetros.

Contudo, a movimentação angular dos espelhos em um *scanner* galvanométricos é limitada a uma dezena de graus, o que restringe a dimensão máxima da área que é varrida sobre o objeto. Normalmente, o deslocamento do feixe está limitado a uma centena de milímetros. A área de alcance pode ser ampliada pelo emprego de lentes com maior distância focal, contudo,

ao custo da perda de resolução de posicionamento e prejuízo a capacidade de focalização do feixe de *laser* (Kim *et al.*, 2014).

Quando uma determinada aplicação apresenta uma área a ser processada maior que a área de atuação do *scanner* galvanométrico se faz necessária uma forma de expansão da área de processamento. Esta expansão pode ser obtida combinando a movimentação do feixe pelo *scanner* galvanométrico com a movimentação efetuada por outros sistemas. A movimentação final pode ser realizada em etapas sucessivas de processamento, ou de forma síncrona, combinando a movimentação do *scanner* com a movimentação complementar. As soluções complementares podem abranger a movimentação linear convencional ou robotizada em um ou mais eixos.

A área processada pode tanto ser composta por um padrão ininterrupto quanto por elementos individuais repetitivos ou não. O processamento de elementos individuais representa as situações onde o componente pode ser unicamente processado por ação do *scanner*, mas que logo em seguida precisa ser deslocado para dar início a outro componente.

Em ambas as situações, a expansão de movimentação é requerida. Contudo, na movimentação onde é impreterível a continuidade do padrão há maiores exigências quanto a exatidão de sincronização entre *scanner* e eixos lineares. Os parâmetros selecionados na programação podem deteriorar ou impossibilitar o atendimento deste requisito, resultando em diferentes defeitos conforme a aplicação.

Um exemplo de aplicação com grande área de processamento (quando comparada a área de atuação de *scanners* galvanométricos convencionais) é a produção de *displays* utilizados em dispositivos eletrônicos como *notebooks* e televisores. Atualmente é cada vez mais frequente a utilização de diodos orgânicos emissores de luz (OLED - *Organic Light-Emitting Diode*) nestes *displays*. Na fabricação destes elementos, o *laser* é utilizado para irradiar os substratos, alterar as propriedades dos materiais envolvidos e propiciar o corte dos *displays*. Estes dispositivos precisam ser processados muito rapidamente para propiciar competitividade econômica em sua produção (LAND, 2018). Normalmente são empregados substratos extensos onde, de uma única vez, são produzidos dezenas destes *displays*. A movimentação síncrona e simultânea permitiria o processamento em velocidade e área adequadas as dimensões destes substratos.

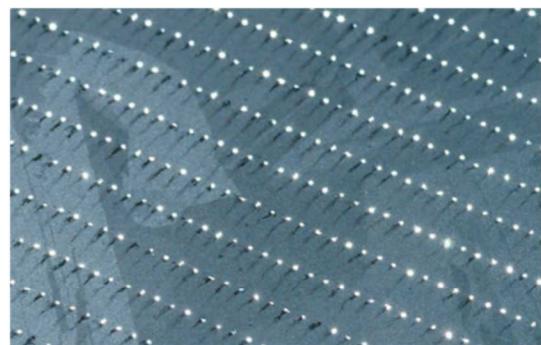
Outro exemplo de aplicação com grande área de processamento é a manufatura de painéis fotovoltaicos, onde frequentemente as células se estendem sobre uma superfície de mais de um metro quadrado. As etapas de união dos interconectores e conectores, bem como a execução de trilhas sobre as células individuais exigem deslocamentos sobre grandes trajetórias

e processamentos rápidos e localizados. Este processamento em larga escala exige uma perfeita sincronização dos movimentos do *scanner* e dos eixos complementares, bem como um controle apurado da interação entre os materiais semicondutores e a radiação *laser* (Sygletou *et al.*, 2017). Sincronizar de forma ininterrupta a movimentação do feixe de *laser* sobre uma grande extensão é um dos fatores necessários para viabilizar a produção mais eficiente, rápida e com baixo custo destes painéis fotovoltaicos. A Figura 1 exhibe alguns dos processamentos a *laser* realizados nestas células.

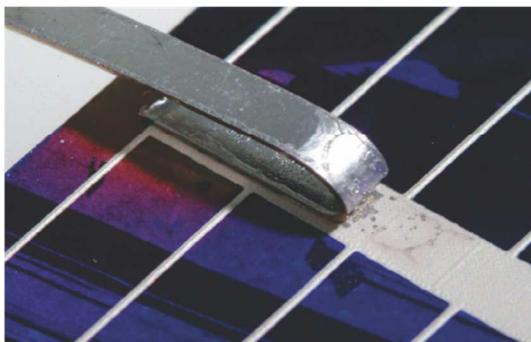
Figura 1 – Exemplos de processamentos com *laser* em células de painéis fotovoltaicos.



a) soldagem de interconectores presentes nas células



b) furação em alta velocidade para células do tipo EWT



c) soldagem do conector da célula



d) linha removida em uma camada de nitreto de silício

Fonte: adaptada de FRAUNHOFER INSTITUTE FOR *LASER* TECHNOLOGY (2017).

Esta movimentação do feixe de *laser* em grandes áreas também se faz presente na texturização de superfícies para indústria de moldes e matrizes. Em alguns casos, o padrão geométrico desejado deve ser transmitido integralmente à superfície da peça. Esta exigência demanda sistemas de entrega do feixe capazes de atingirem toda a extensão do molde, permitindo o processamento da superfície sem interrupções na textura reproduzida. Observa-se neste caso também uma demanda por flexibilidade do sistema produtivo devido à variedade de

texturas e de complexidade geométrica exigidas pelos moldes, como mostram alguns dos exemplos apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Exemplos de superfícies texturizadas com *laser* em moldes e de variação das texturas empregadas.



Fonte: adaptada de GF Machining Solutions (2018), GF Machining Solutions (2019).

Diferentes formas de sincronização podem correlacionar a movimentação entre *scanner* e eixos lineares (Pereira e Thombsen, 2015). O objetivo final é permitir que a velocidade e resolução do *scanner* sejam expandidas à extensão de atuação que pode ser alcançada com uso de sistemas complementares de movimentação. Determinadas abordagens permitem que os dois elementos efetuem a movimentação de forma síncrona e simultânea (Kim *et al.*, 2014), ou seja, seus movimentos são interligados e efetuados ao mesmo tempo.

Esta última concepção, um equipamento híbrido de movimentação, traz consigo a exigência de uma nova abordagem. A movimentação do ponto de fornecimento de energia sobre o objeto está condicionada ao funcionamento de dispositivos distintos que apresentam consideráveis diferenças em termos de desempenho e alcance. Embora combinados para formar um sistema único de movimentação, as limitações intrínsecas (como a reduzida área de alcance do *scanner* e menor velocidade dos eixos lineares) ainda estão presentes. Em cada momento do processamento, a demanda pelo funcionamento tanto do *scanner* quanto dos eixos lineares deve ser condizente com suas características.

1.1 MOTIVAÇÃO

O Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), por meio de sua divisão de pesquisas aplicadas em *laser* (LMP – *LASER*), vem atuando no desenvolvimento e expansão dos processos produtivos baseados em tecnologia *laser*. Esta atuação, muitas vezes, ocorre alinhada com os interesses de outros laboratórios, os quais se beneficiam do *laser* em aspectos particulares dentro das suas linhas de pesquisa.

O Laboratório de Materiais (LabMat), por meio do projeto que originou o Laboratório de Prototipagem e Produção de Lotes Pilotos (LP³), desenvolve pesquisas que visam aumentar eficiência energética e sustentabilidade na produção de compressores. Dentro do escopo deste projeto, cujos recursos são oriundos da Empresa Brasileira de Compressores (EMBRACO) e do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), o LMP atuou na seleção, desenvolvimento e integração de componentes destinados a obtenção de uma bancada de processamento de materiais com *laser*.

A bancada visa atender a demanda pelo processamento de materiais usados para criação da infraestrutura produtiva (moldes e matrizes) e diretamente nos componentes aplicados nos compressores. Este processamento é executado por um feixe de *laser*, que deve ter suas características ópticas e de movimentação devidamente adequadas e fornecidas sobre a região de interesse por meio de um sistema de entrega de feixe.

Dentre as possibilidades de entrega deste feixe de *laser* à região de interesse, foi realizada a opção pelos sistemas com *scanner* galvanométricos. Estes apresentam destaque quando os requisitos envolvem exatidão e velocidade de movimentação elevadas, sendo aplicados em muitos equipamentos destinados ao processamento com *laser*. Logo, o desenvolvimento e aperfeiçoamento de uso dos *scanners* galvanométricos apresenta

importância significativa para as áreas de aplicação industrial que empregam este meio para movimentação de feixes de *lasers*.

Os *scanners* apresentam uma área de trabalho limitada, função da deflexão limitada dos espelhos e do conjunto de lentes empregado. Em aplicações que demandam o processamento de áreas maiores esta característica acaba por se tornar uma limitação. Para superar este impedimento os *scanners* galvanométricos são combinados com outros elementos de movimentação. Sistemas mais simples movimentam o objeto em etapas incrementais e sistemas mais sofisticados combinam simultaneamente os movimentos do *scanner* com o sistema complementar. Para promover o melhor desempenho do sistema, destaca-se a importância da integração entre os diferentes dispositivos, bem como uma estratégia de movimentação que objetive uma maior flexibilidade nos processos produtivos.

A combinação dos dispositivos de movimentação pode gerar descontinuidades nas trajetórias desenvolvidas sobre a área processada caso não seja estabelecida uma condição de sincronização adequada entre os elementos envolvidos. Estas descontinuidades se manifestam nas fronteiras das áreas discretamente processadas pelo *scanner*, produzindo os chamados erros de costura entre as regiões (Kim *et al.*, 2011). Tais defeitos na superfície processada (ou no volume) podem prejudicar a função descrita para o componente. Por exemplo, na texturização de uma superfície destinada a interação com líquidos, uma descontinuidade apresentará uma modificação na funcionalidade de hidrofobia ou hidrofília ao longo de sua extensão. No caso de marcações e gravações com finalidade estética, a descontinuidade de geometrias e caracteres é interpretada como indicativo de baixa qualidade por parte do consumidor. Conciliar as vantagens oferecidas pelo *scanner* em termos de velocidade e exatidão com a expansão da área de trabalho alcançada pelo mesmo representa um avanço no processamento de materiais com *laser*.

Para alcançar o correto desempenho de sincronização dos movimentos do *scanner* com o sistema de movimentação linear (ou espacial) são necessárias estratégias que promovam relação adequada entre os parâmetros de movimentação (como aceleração e velocidade, por exemplo). Desta forma é possível combinar o deslocamento do feixe de *laser* pelo *scanner* e, por exemplo, eixos lineares que expandem a área de processamento. O estabelecimento correto desta relação permite alcançar maiores garantias de continuidade do padrão geométrico imposto, bem como o desempenho do sistema em relação ao tempo de processamento. A principal motivação deste trabalho é entender como a movimentação síncrona e simultânea entre *scanner* galvanométrico e eixos lineares é afetada por estes parâmetros e estratégias de varredura.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho, divididos em objetivo geral e objetivos específicos, são apresentados a seguir:

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento de diferentes estratégias de varredura de um feixe de *laser* sobre um objeto quando aplicadas na movimentação síncrona e simultânea entre *scanner* galvanométrico e eixos lineares.

1.2.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos:

- a) identificar características e limitações de utilização em métodos e tecnologias baseados em *scanner*;
- b) identificar a influência de parâmetros de movimentação sobre o tempo total de processamento empregando *scanner* galvanométrico e eixos lineares em condições de sincronização e simultaneidade;
- c) avaliar a distribuição da energia entregue pelas estratégias de varredura do feixe de *laser* por meio da medição da temperatura do corpo da amostra;
- d) analisar diferentes estratégias de varredura quando aplicadas na movimentação síncrona e simultânea entre *scanner* galvanométrico e eixos lineares;
- e) propor estratégias de varredura na utilização de sistemas de movimentação síncronas e simultâneas entre *scanners* galvanométricos e eixos lineares.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A produção de painéis fotovoltaicos e texturização de moldes citadas anteriormente são apenas algumas das aplicações nas quais a expansão de movimentação do *scanner* galvanométrico representa mais flexibilidade ao processamento de materiais. A demanda se estende aos casos onde a área a ser processada apresenta uma ou mais de suas dimensões superiores ao alcance intrínseco do *scanner* galvanométrico. Sendo assim, demais áreas também podem ser beneficiadas pelos sistemas de movimentação síncrona e simultânea, tais como a marcação a *laser*, processos de manufatura aditiva, entre outras.

Definir a influência dos parâmetros de movimentação (como velocidade, aceleração, áreas de atuação, estratégias de varredura, etc.) permite estabelecer recomendações de utilização para atingir o correto funcionamento do sistema. A determinação destes parâmetros evita o surgimento de defeitos muitas vezes associados aos próprios princípios de funcionamento do *scanner* ou dos eixos lineares e contribui para o pleno desempenho do sistema. Neste contexto, o desempenho do sistema corresponde a atingir as funções de movimentação, por exemplo, alcançar a velocidade selecionada para o processamento e executar as trajetórias com a exatidão geométrica exigida.

A análise das estratégias sob a óptica da sincronização com eixos lineares pode ser extrapolada para outros sistemas síncronos e simultâneos. Os princípios básicos podem ser validados para aplicações que sincronizam *scanners* e outros elementos de movimentação, como sistemas robóticos. Desta forma, tais sistemas podem ter seu desempenho melhorado, ampliando sua capacidade intrínseca sem redução da qualidade alcançada. A realização de processos com menor incidência de defeitos também é uma contribuição tendo em vista os custos que podem estar envolvidos com retrabalho e refugo.

Outra contribuição desta tese é fornecer uma visão sobre a distribuição de energia *laser* entregue ao objeto processado. O padrão de varredura gera alterações no grau de interação entre *laser* e material. Estratégias específicas podem resultar em concentrações de energia que elevam a temperatura do substrato de forma localizada. Isto resultaria em gradientes térmicos acentuados causando deformações ao objeto. Adotando uma estratégia de varredura, por exemplo, distanciando os vetores entre si, se pode atingir uma distribuição uniforme da energia, mas pode também levar a um aumento significativo do tempo de processamento. A adoção da estratégia de varredura mais adequada, nestes casos, está condicionada a uma solução de compromisso entre qualidade do resultado final e tempo de processamento.

A principal contribuição desta tese é complementar o conhecimento científico associado à utilização de diferentes estratégias de varredura quando aplicadas em sistemas de movimentação síncrona e simultânea. Na literatura atual, as estratégias são propostas, aplicadas e avaliadas em sistemas predominantemente baseados nos *scanners*, sem emprego de eixos adicionais para movimentação síncrona e simultânea.

A bancada experimental de movimentação síncrona e simultânea entre *scanner* e eixos lineares, construída de forma modular, permite acoplar fontes *laser* distintas. Desta forma, outra contribuição desta tese é ampliar a capacidade de atuação em diferentes frentes de pesquisa no LMP. São exemplos de pesquisas que podem ser desenvolvidas com base na bancada experimental: fusão seletiva a *laser*, marcação, gravação, microrremoção, microsoldagem, microcorte e

tratamento térmico de superfícies. Este leque de atuação permite a ampliação da capacidade do laboratório em termos de processamento de materiais com *laser*.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é constituído de seis capítulos numerados, incluindo esta Introdução, onde estão listadas a motivação do trabalho, os objetivos, a contribuição da tese, bem como esta descrição da estrutura do trabalho.

O segundo capítulo, Revisão Bibliográfica, aborda os conceitos relacionados a utilização de *laser*, principalmente aqueles baseados em fibra óptica. Um tópico particular aborda a microrremoção a *laser*. São apresentadas as características e limitações dos *scanners*, bem como a sua sincronização com eixos lineares. As estratégias de processamento são apresentadas segundo sua relação com o funcionamento do *scanner* galvanométrico e com a movimentação do feixe de *laser* em si. Na sequência é realizada uma contextualização breve de modelos de distribuição de temperatura associados a fontes de calor em movimento.

No capítulo três é apresentada a concepção da Bancada Experimental de Processamento com *Laser*, com ênfase nas soluções adotadas para integração dos diferentes componentes envolvidos. São descritos os requisitos estabelecidos para a bancada, o sistema de movimentação, as fontes de *laser*, além da integração mecânica e eletroeletrônica.

Materiais e Métodos corresponde ao quarto capítulo do trabalho. Nele são descritos os tipos de ensaios propostos, o projeto de experimentos utilizado, os parâmetros de processo, o sistema de aquisição de sinais e o método aplicado para a fixação dos transdutores de temperatura ao corpo da amostra.

No capítulo cinco são apresentados e discutidos os Resultados, obtidos por meio dos experimentos realizados. Os resultados descrevem a influência dos parâmetros de movimentação e da estratégia de processamento empregada. Também são apresentadas outras considerações adicionais acerca da utilização de sistemas síncronos e simultâneos.

O sexto capítulo sintetiza os resultados alcançados para definir a Conclusão e apresenta as Propostas para Trabalhos Futuros.

Completam o trabalho três capítulos não numerado destinados a apresentação das Referências bibliográficas utilizadas, o Apêndice com os parâmetros empregados no processo de microrremoção utilizado e os Anexos com informações sobre o sistema óptico do *scanner* galvanométrico, sistema de movimentação e especificações das fontes de *laser*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica composta por uma introdução sobre a geração de luz *laser*, em especial os chamados *lasers* de fibra, a aplicação de microrremoção a *laser* e destaque especial para os *scanners* galvanométricos, com seu princípio de funcionamento e características. É abordada a forma de sincronização dos *scanners* com outros dispositivos e a estratégias de movimentação do feixe de *laser* que são empregadas. Por fim, uma breve introdução sobre modelos de distribuição de temperatura é realizada para descrever o comportamento de uma fonte de calor em movimento.

2.1 LASER

Laser é o acrônimo utilizado para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que em uma tradução direta corresponde à amplificação de luz por emissão estimulada de radiação.

Em sua essência é um dispositivo destinado a provocar o fenômeno de emissão estimulada de fótons contidos em um meio ativo. Estes fótons emitidos apresentam mesma direção, fase e frequência. Esta característica permite a obtenção de uma luz coerente, colimada e monocromática com capacidade de ser concentrada e propagada sem divergência considerável.

A construção efetiva deste dispositivo é datada de 1960, atribuída ao físico norte-americano Theodore Harold Maiman. O primeiro *laser* era constituído por um cristal cilíndrico de rubi com duas faces paralelas revestidas com prata e irradiado lateralmente por uma lâmpada de alta intensidade (Maiman, 1960).

A evolução das fontes de geração de luz *laser* permitiu sua expansão para diferentes áreas de aplicação. O *laser* é empregado em processos industriais de corte, união, marcação, gravação, micro e nano remoção, furação, tratamentos térmicos, entre outros (Lawrence, 2010, Steen, 2013). Contribuições expressivas do *laser* também encontradas nos campos da medicina, metrologia, telecomunicações, aeroespacial, astronomia, entre outras.

Diferentes meios ativos podem ser adotados para emissão de luz *laser*. Segundo Poprawe (2011) os mais comuns são os de estado sólido baseados em cristais de *Yttrium Aluminum Garnet* (YAG) ou fibras de sílica fundida, dopados com neodímio (Nd) ou itérbio (Yb). A luz *laser* também é emitida por meios ativos baseados em gases, sendo o CO₂ o mais

aplicado em processos industriais. Outros *lasers* são baseados na utilização de meios semicondutores, também sendo conhecidos como *lasers* de diodo.

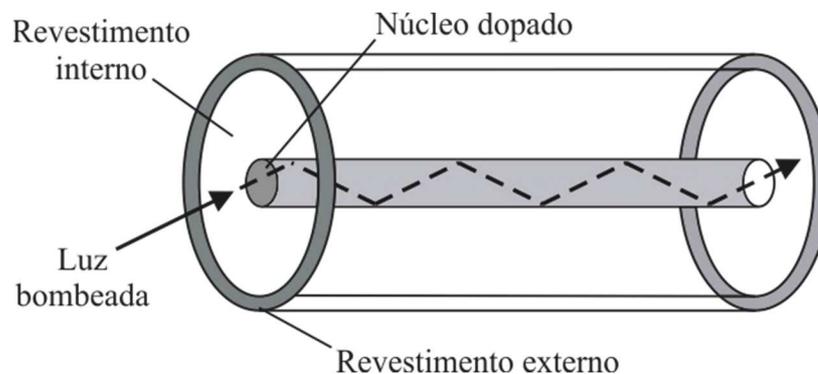
Além dos já citados, outros meios podem ser utilizados para emitir radiação *laser*, contudo, neste trabalho é enfatizado o *laser* de fibra. *Laser* de fibra é uma denominação utilizada para dispositivos nos quais o ressonador é constituído de uma fibra óptica, que atua como meio para a geração da radiação luminosa. A fibra óptica dopada constitui-se como local para o fenômeno de emissão estimulada, sendo o componente central da fonte de *laser* de fibra.

A construção das fibras ópticas de um *laser* de fibra é dividida em três elementos básicos: núcleo (*core*), revestimento interno (*cladding*) e cobertura (*coating*). O núcleo atua como meio ativo para geração a luz *laser*, ocupando o papel de ressonador. O revestimento da fibra óptica pode ser do mesmo material do núcleo, contudo com uma variação nas suas propriedades ópticas para proporcionar um índice de refração diferente do anterior. Esta diferença entre os índices de refração permite que a energia introduzida no revestimento seja transferida para o núcleo, mas impede a saída da radiação pelas paredes do mesmo.

Já a cobertura (ou revestimento externo) tem a função de proteger mecanicamente o núcleo revestido da fibra óptica. Sua construção pode incluir camadas metálicas ou poliméricas conforme a exposição ao meio ambiente e solicitações impostas.

A energia necessária para provocar a emissão estimulada no núcleo da fibra é bombeada para dentro do revestimento da fibra central, como ilustrado na Figura 3. Em função do princípio de reflexão total, a energia luminosa bombeada se mantém aprisionada na fibra do núcleo.

Figura 3 – Ilustração dos componentes de uma fibra óptica em um *laser* de fibra.



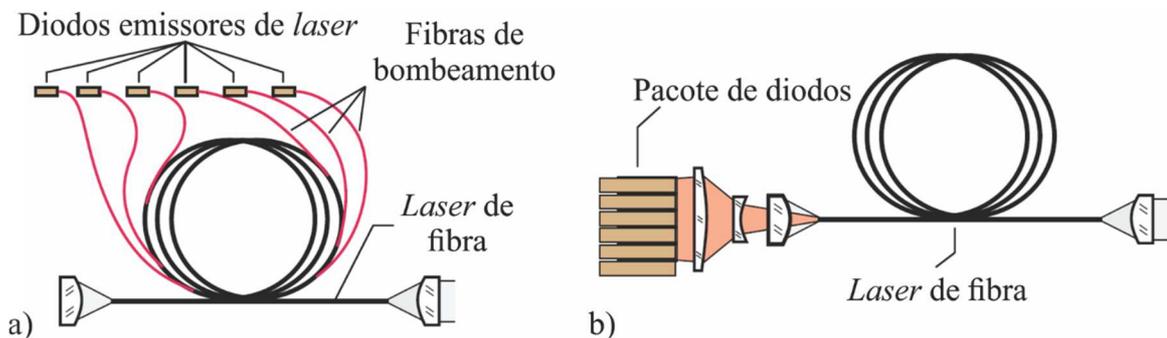
Fonte: adaptada de Dong e Samson (2016).

A fibra óptica presente na fonte de *laser* de fibra apresenta um núcleo dopado com íons de terras raras, principalmente os de érbio (Er), neodímio (Nd), itérbio (Yb), túlio (Tm) ou

praseodímio (Pr) (Paschotta, 2019a). Embora a utilização de Nd seja largamente difundida pelo seu uso inicial nos primeiros *lasers* de estado sólido, nos *lasers* de fibra há um interesse particular pelo uso de Yb. Comparado ao Nd, os íons de Yb apresentam melhor eficiência de conversão elétrica-óptica e maior possibilidade de alteração da emissão dentro da faixa de comprimento de onda emitido em torno 1 μm (Ter-Mikirtychev, 2016).

A fonte de bombeamento é atualmente um conjunto de diodos *lasers* (VCSEL – *Vertical Cavity Surface Emitting Laser*) (Paschotta, 2019b). A luz emitida por estes diodos é conduzida por fibras de bombeamento que são acopladas diretamente ao revestimento da fibra ativa (Figura 4a). A estimulação também pode ser focada a partir de um pacote de diodos *laser* em uma das extremidades da fibra ativa (Figura 4b). A utilização de diodos *laser* permite atingir maior eficiência global em comparação aos outros meios de bombeamento. Os *lasers* de fibra tem eficiência de conversão elétrica-óptica na ordem de 25 % a 30 % (Paschotta, 2019c), com algumas fontes atingindo mais de 50 % (Dong e Samson, 2016).

Figura 4 – Construção de um *laser* de fibra empregando: a) fibras de bombeamento e b) pacotes de *laser* de diodo.



Fonte: adaptada de Poprawe (2011).

Embora os *lasers* de diodo isoladamente possuam maior eficiência de conversão elétrica-óptica, os *lasers* de fibra apresentam melhores características de qualidade do feixe da luz emitida. Devido ao diâmetro reduzido e elevado comprimento do núcleo da fibra, a distribuição da energia é quase gaussiana, ao passo que nos diodos, devido ao seu princípio construtivo, apresentam uma distribuição irregular da energia.

Nas extremidades do núcleo do *laser* de fibra se encontram as grades de Bragg. As grades de Bragg são defeitos produzidos transversalmente à fibra e que refletem parte da luz incidente. Elas estão espaçadas entre si por um múltiplo de meio comprimento de onda do comprimento de onda de interesse, tornando as extremidades refletores quase absolutos. O

número de grades de Bragg em uma extremidade da fibra ativa é menor que na outra, tornando esta extremidade a saída do feixe de *laser*.

A fibra ativa tem alguns décimos de milímetros de diâmetro e vários metros de comprimento, o que contrasta com outras fontes de estado sólido. Em uma fonte de *laser* de Nd:YAG, por exemplo, os cristais do núcleo dopado têm de (8 a 10) mm de diâmetro e de (100 a 200) mm de comprimento. Isto confere à fibra óptica uma maior relação superfície-volume, que associada ao rendimento mais elevado, permite o arrefecimento desta fibra por circulação de ar. Em comparação, num *laser* de Nd:YAG o arrefecimento do núcleo exige o uso de meios líquidos para atingir a remoção necessária de calor.

O elemento mais susceptível de um *laser* de fibra são as grades de Bragg nas extremidades, que perdem sua eficiência ao longo do tempo limitando a utilização do *laser*. Contudo, a manutenção do *laser* de fibra é simplificada, por não serem necessários elementos secundários, como os trocadores de calor com líquido, necessários no *laser* de Nd:YAG. Estas fontes de fibra também dispensam os sistemas complexos de elementos ópticos, como espelhos, na condução do feixe de *laser*. Tais vantagens, aliadas à facilidade de manipulação da fibra óptica, conferiram aos *lasers* de fibra crescimento de destaque na sua utilização industrial.

Fibras ópticas ativas ou de alimentação (*feeding fibers*) onde ocorre a geração *laser* são geralmente disponíveis em diâmetros do núcleo de 50 μm , 100 μm , 150 μm e 200 μm . Cada uma destas fibras pode gerar individualmente potências de 600 a 900 W, mas o acoplamento de diversas fibras permite a construção de fontes com mais de 100 kW de potência *laser* de saída (Shcherbakov *et al.*, 2013). Fibras de processo (*process fibers*) responsáveis pela condução do *laser*, são encontradas entre 100 μm e 1000 μm de diâmetro do núcleo e alcançam até 100 m de comprimento (IPG Photonics, 2019).

A condução da energia óptica do *laser* da fonte até o local de uso é efetuada por meios que levam em consideração o comprimento de onda da luz emitida. Nas clássicas aplicações do *laser* de CO₂ com um comprimento de onda de aproximadamente 10 μm , o transporte é efetuado por sistemas ópticos reflexivos. Para o comprimento de onda em torno de 1 μm o transporte da luz pode ser feito por fibras ópticas.

2.2 MICRORREMOÇÃO A LASER

Nas décadas recentes, houve uma demanda pela redução e miniaturização de componentes e sistemas para diferentes aplicações. O consumo cada vez maior de eletrônicos como aparelhos celulares, *tablets* e *laptops*, tem gerado grande campo de aplicação para os

circuitos microeletrônicos. Componentes mecânicos também são alvo de redução de escala possibilitando a criação de sistemas micro eletromecânicos (*Micro-Electro-Mechanical Systems* – MEMS) na construção de sensores e atuadores.

As primeiras aplicações industriais de *laser* no corte e na soldagem podem ser consideradas grosseiras se comparadas com as potenciais aplicações miniaturizadas oferecidos pelas novas gerações de fontes. A disponibilidade de fontes pulsadas com potência cada vez mais elevadas e tempos de pulso mais curtos permite concentrar a energia em volumes cada vez menores, tornando o efeito térmico cada vez mais localizado e restrito.

Na microrremoção de material é comum o emprego de *lasers* pulsados, onde a energia é entregue em pacotes concentrados em curtos intervalos de tempo. Esta emissão por curtos intervalos de tempo é obtida por chaveamentos mecânicos, eletro-ópticos, eletroacústicos ou pela modificação do caminho do feixe em prismas de rotação da polarização (Nolte, Schrempel e Dausinger, 2016). Cada ciclo de emissão ou pulso de *laser* é caracterizado principalmente pelo seu tempo de duração, também denominado de largura de pulso.

Como o *laser* permite a concentração de energia em áreas de alguns micrometros quadrados é possível processar volumes igualmente reduzidos. Tal parcela ínfima de material ao receber a energia concentrada da radiação *laser* pode ser removida pela sua sublimação (passagem direta do estado sólido para o gasoso). Este tipo de remoção permite que a energia inserida pelo pulso *laser* não afete a peça por completo. A remoção de material pela vaporização de material induzida por pulsos *laser* recebe o nome de ablação (Dowding, 2010) e permite obter estruturas em escala micrométrica e até nanométrica (Poprawe, 2011).

Em função das características da luz *laser* é possível obter pontos focais com diâmetros de ordem submicrométrica (Jonuaskas *et al.*, 2018). Além das imposições dadas pelo sistema óptico (como a distância focal das lentes, diâmetro do feixe após colimação, aberrações, etc.), o tamanho do ponto focal está associado ao comprimento de onda característico emitido pelo *laser*. Quanto menor o comprimento de onda em questão, mais concentrado o feixe pode ser através de lentes e demais estágios ópticos (Jenoptik, 2019). Nestes casos, o sistema de movimentação deve apresentar dinâmica de movimentação, resolução e repetibilidade de posicionamento igualmente compatíveis com o *laser* empregado.

A concentração do feixe de *laser* também promove uma densidade de energia que pode atingir milhares de watts por centímetros quadrados. Este fato permite (ou exige) que o sistema de movimentação desloque o feixe de *laser* com velocidades elevadas e mesmo assim ainda se obtenha a alteração das propriedades do material exposto a sua passagem. Para aplicações com fontes de *laser* pulsado, taxas de repetição de pulso elevadas (na ordem de MHz) irão demandar

uma velocidade igualmente elevada situada em dezenas de m/s a fim de garantir o espaçamento desejado entre os pulsos (Jaeggi *et al.*, 2014).

Outra característica da luz *laser* é permite a ablação de diferentes materiais. Na indústria microeletrônica o *laser* é empregado no processamento de silício, base para a fabricação de circuitos eletrônicos. Materiais que não podem ser facilmente usinados por processos convencionais, como diamante (Wu *et al.*, 2018), vidro (Shin e Kim, 2018) e cerâmica (Oblov *et al.*, 2015) também podem ser processados com *laser*.

Entre as variáveis de entrada do processo *laser* que são controladas, as mais comuns são a potência, velocidade de deslocamento do feixe e a taxa de repetição de pulso (*Pulse Repetition Rate* - PRR). Outros parâmetros, porém, não configuráveis em todos os tipos de equipamentos, são a largura de pulso, comprimento de onda e as características do sistema óptico. A magnitude dos parâmetros variáveis de entrada dos *lasers* empregados na microrremoção variam segundo uma série de fatores.

A interação fornecida pelo *laser* depende do material a ser processado. A refletividade, absorção e transmitância em um dado material varia conforme o comprimento de onda empregado. O *laser* de fibra, devido à emissão característica situada em 1 μm , encontra sua aplicação mais frequente no processamento dos materiais metálicos.

A taxa de ablação (volume removido por unidade de tempo) aumenta de forma não linear com o aumento da fluência, que corresponde a energia óptica fornecida por unidade de área, comumente fornecida na unidade J/cm^2 . Com o aumento da fluência, a remoção de material não será mais incrementada a partir de determinado ponto. Segundo Schille *et al.* (2017), para um feixe gaussiano, a máxima eficiência da ablação ocorre quando

$$H_{opt} = e^2 \cdot H_{th} \quad (1)$$

em que a H_{opt} [J/cm^2] é a fluência ideal e H_{th} [J/cm^2] o limiar de fluência do material processado, que corresponde a mínima energia necessária para que ocorra o fenômeno de ablação. Para o aço inoxidáveis, o limiar de fluência é 0,1 J/cm^2 (Schille *et al.*, 2017).

Segundo Jaeggi *et al.* (2013b), o limiar de fluência H_{th} em associação com o raio de feixe de *laser* w_0 [mm] no ponto focal, permite a determinação da energia ideal de pulso E_p [μJ], calculada como

$$E_p = \frac{\pi \cdot w_0^2}{2} \cdot H_{th} \cdot e^2 \quad (2)$$

A energia ideal de pulso, em associação com a taxa de repetição de pulsos (f_p) [kHz], permite determinar qual a potência média P_{av} [W] que deve ser entregue pela fonte de *laser*

(Jaeggi *et al.*, 2012). A potência média, que é normalmente o parâmetro a ser selecionado nos equipamentos de microrremoção, é calculado por

$$P_{av} = E_p \cdot f_p \quad (3)$$

Segundo Schille *et al.* (2010) existe uma relação logarítmica entre o pico da fluência de *laser* H_0 [Jcm²] e o limiar de fluência do material H_{th} que permite estimar o diâmetro da área que sofre ablação D [μm] empregando a relação

$$D^2 = 2w_0^2 \cdot \ln\left(\frac{H_0}{H_{th}}\right) \quad (4)$$

Além da energia de cada pulso individual, outro fator considerado para obter uma determinada taxa de remoção por unidade de comprimento é a sobreposição entre pulsos (*overlap*). Este fator define quão próximos ou espaçados estão os pulsos consecutivos ao longo do deslocamento do feixe de *laser*. Segundo Poprawe (2011), a sobreposição o [%] é calculada como função da velocidade relativa do feixe v [mm/s], da taxa de repetição de pulso f_p [kHz] e do diâmetro do feixe w_p [μm] na região de processamento, representada por meio da equação

$$o = 1 - \frac{v}{2 \cdot f_p \cdot w_p} \quad (5)$$

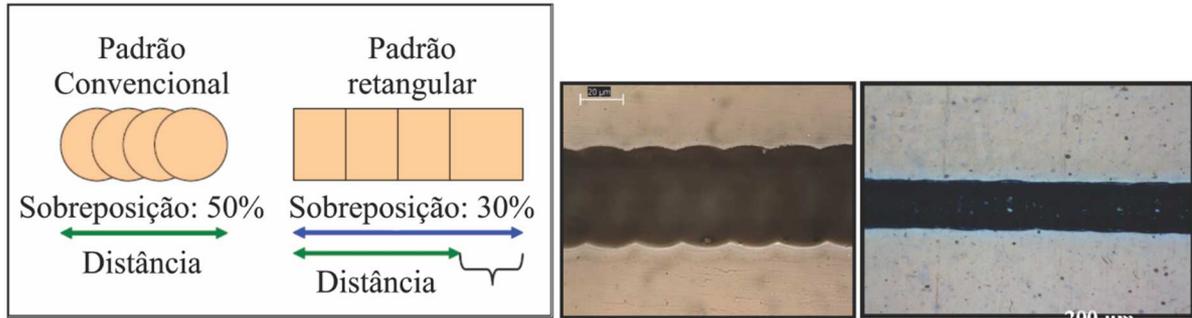
A sobreposição também pode ser obtida com base na distância de pulso a pulso p [%], também chamada de *pitch* (Jaeggi *et al.*, 2016), associada com o raio do feixe de *laser* w_0 seguindo a relação

$$o = \frac{2 \cdot w_0 - p}{2 \cdot w_0} \quad (6)$$

As Equações (5) e (6) consideram que a secção transversal do feixe de *laser* é normalmente circular. A utilização de feixes circulares origina um padrão com formato ondulado nas bordas da remoção resultante da sobreposição dos círculos gerados pela incidência dos pulsos. O formato ondulado é mais perceptível quando a sobreposição de pulsos é inferior a 70 %. As intersecções dos círculos nas bordas que apresentam este padrão podem gerar fragilidade nas camadas removidas e maior estresse mecânico.

Uma alternativa aos feixes de *laser* com formatos circulares são as distribuições com formato retangular. Nelas, os danos causados pelos pulsos quando alinhados geram ranhuras lisas se comparadas ao processamento obtido com feixes circulares. A Figura 5 compara estas duas formas de distribuição de energia. O formato retangular do feixe também permite que a sobreposição dos pulsos seja reduzida, sem prejuízos à integridade das bordas. Como consequência, há maior rendimento no processo (Homburg e Mitra, 2012).

Figura 5 – Padrões da remoção de *lasers* com secção transversal circular e retangular.



Fonte: adaptada de Homburg e Mitra (2012).

Uma vez definidos os parâmetros de taxa de repetição e sobreposição entre pulsos é possível estabelecer a velocidade do *scanner*. Quanto maior a quantidade de pulsos por segundo ou maior for a distância desejada entre os pulsos (menor sobreposição), mais rápido necessita ser o deslocamento do feixe *laser*. Esta relação entre a velocidade relativa do feixe de *laser* (v), taxa de repetição de pulso (f_p) e sobreposição (o) se relacionada na forma de

$$v = f_p \cdot 2 \cdot w_0 \cdot (1 - o) \quad (7)$$

para um dado feixe de *laser* com raio w_0 (Jaeggi *et al.*, 2016).

A taxa de repetição de pulso está relacionada com as características da fonte de *laser*. Conforme sua capacidade e sofisticação elétrica, eletrônica e óptica, as taxas de repetição variam na ordem de kHz a GHz. Neste cenário, a faixa de velocidade alcançada pelos *scanners* pode ser um fator limitante para assegurar uma sobreposição constante entre os pulsos.

Uma maior sobreposição entre os pulsos resulta um aumento da entrega de energia para um mesmo intervalo de tempo. O resultado é um acúmulo térmico que altera o regime de remoção do material. Segundo Mincuzzi *et al.* (2018) este acúmulo térmico pode se manifestar na forma de ranhuras profundas com bordas irregulares durante o processo de remoção.

Em alguns casos a taxa de ablação com altas taxas de repetição de pulsos são reduzidas devido aos efeitos de escudo (*shielding effects*), resultados da interação do feixe de *laser* com particulados de material ejetados pelos pulsos anteriores. (Schille *et al.*, 2010). Taxas de repetição elevadas também podem resultar em acumulação de calor sobre a peça.

Outro fator que contribui na acumulação de calor são as repetidas varreduras concentradas em uma determinada área. Se as remoções ocorrem uma após a outra sem um intervalo para resfriamento do material, a remoção seguinte encontrará um substrato pré-aquecido, numa condição diferente remoção anterior. Isto altera o processo de remoção devido

a existência de aquecimento prévio, favorecendo o aparecimento de rebarbas causadas por material ressolidificado (Martendal *et al.*, 2019).

2.3 SCANNER GALVANOMÉTRICO

O *scanner* galvanométrico é dispositivo empregado para a deflexão de feixes de *laser* por meio de seus espelhos. Contudo, sua origem (galvanômetro) remete a outras finalidades e devido a sua natureza eletromecânica apresenta uma série de características e limitações próprias que influenciam sua atual utilização.

2.3.1 Origem e evolução

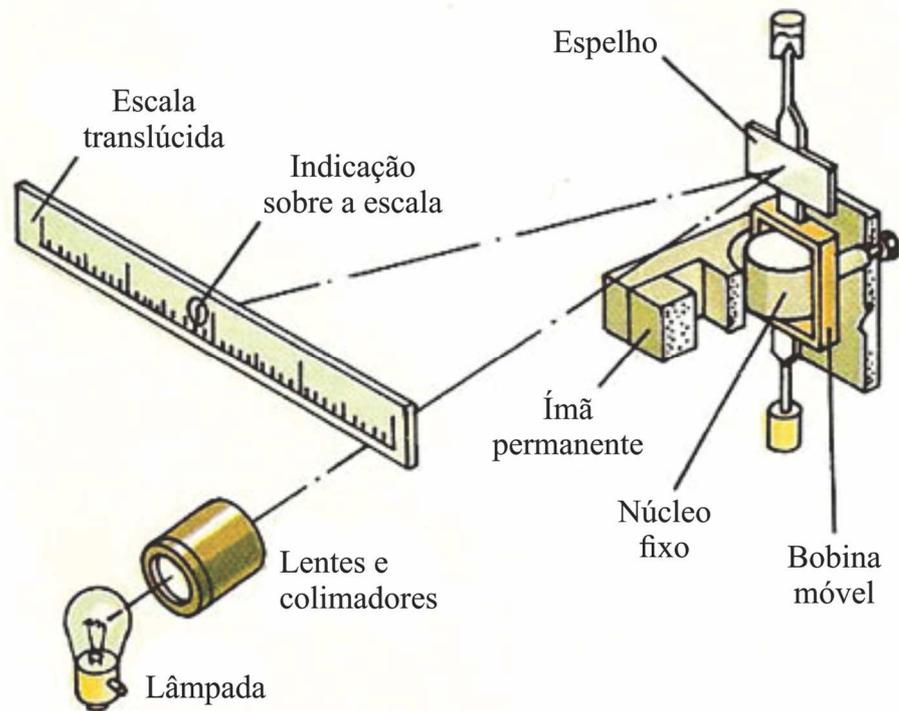
O princípio de funcionamento dos galvanômetros foi concebido em estudos no início do século XIX. Johann Salomo Christof Schweigger em 1820 e Johann Christian Poggendorff em 1821, ambos na Alemanha, e James Cumming em 1821, na Inglaterra, trabalhavam independentemente no desenvolvimento de um instrumento que respondesse a um campo magnético acompanhado de uma corrente elétrica (Keithley, 1999).

O princípio mais comum de um galvanômetro é baseado em uma bobina móvel, apoiada sobre um sistema de suspensão. A bobina é mantida em uma posição definida sob influência do campo magnético de um ímã e um torque aplicado ao eixo da articulação por uma mola espiralar. O campo magnético, gerado pela passagem de corrente na bobina interage com o campo do ímã. A interação entre os campos resulta em um deslocamento angular do conjunto articulado que leva a bobina a atingir uma posição de equilíbrio. Uma agulha conectada a bobina indica em uma escala o deslocamento sofrido, que está associado com a intensidade da grandeza elétrica aplicada sobre o galvanômetro (Keithley, 1999).

Em 1858 Lord Kelvin construiu um galvanômetro em que substituiu a agulha por um espelho acoplado a bobina. Um feixe de luz colimada incidente sobre o espelho é refletido para uma escala distante e tornou possível medir variações ínfimas da corrente pelo deslocamento do feixe sobre a escala (Northrop, 2014). Uma ilustração do princípio proposto por Lord Kelvin é apresentada na Figura 6.

O princípio da deflexão da luz empregado por Kelvin em seu instrumento de medição é utilizado para transformar o galvanômetro em um atuador. Controlando a corrente que passa pela bobina é possível determinar o ângulo de rotação do espelho. O giro controlado do espelho é então utilizado para defletir um feixe de *laser* sobre uma região a ser processada.

Figura 6 – Princípio de um galvanômetro com espelho acoplado a bobina móvel.



Fonte: adaptada de Darling (2016?).

Os sistemas de deflexão modernos, como os apresentados na Figura 7, se baseiam no princípio desenvolvido por Lord Kelvin. Neles, dois galvanômetros (com seus respectivos espelhos acoplados) são combinados para movimentar o feixe de *laser* sobre uma área de trabalho. Tais sistemas são conhecidos como *scanners* galvanométricos, cabeçotes galvanométricos ou simplesmente “*galvos*”.

Figura 7 – Galvanômetros com espelho acoplado ao eixo e um sistema de *scanner* 2D.



Fonte: SCANLAB (2019)

Além das aplicações que combinam espelhos acionados por galvanômetros e *laser* em processos industriais, *scanners* também são amplamente empregados em outras áreas, como por exemplo, o escaneamento e captura de imagens visando medição tridimensional em aplicações espaciais e terrestres (Laurin *et al.*, 1999, Samson *et al.*, 2004).

2.3.2 Características e limitações

Os *scanners* galvanométricos são sistemas que combinam componentes eletrônicos e mecânicos em sua constituição. Esta combinação resulta na presença de erros inerentes ao sistema e aos componentes em particular. As limitações presentes em *scanners* são resumidas em (Mirtchev, Weeks e Minko, 2010):

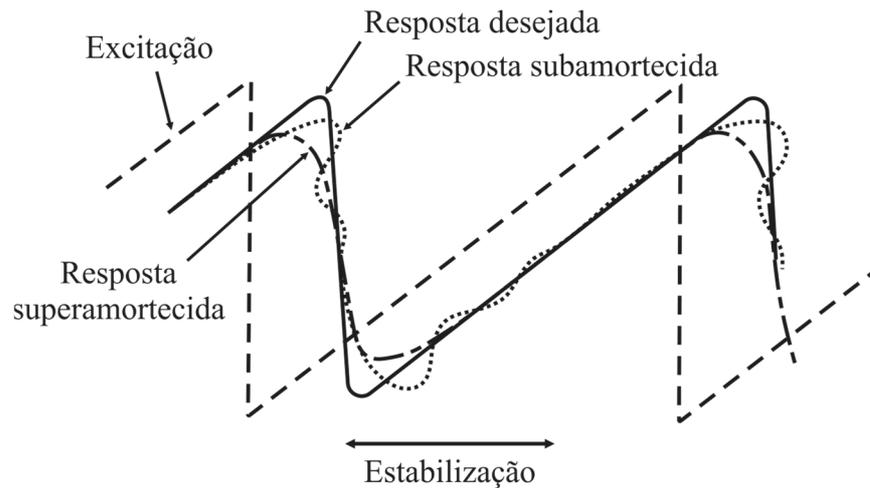
- a) ressonâncias torcionais: ressonância criada pelo aumento da velocidade entre o rotor do galvanômetro e o espelho;
- b) dissipação de calor: em função do tamanho, velocidade e frequência da movimentação o calor gerado pelas bobinas pode se tornar excessivo sendo necessária sua dissipação;
- c) *drifts* (derivas): variações elétricas e mecânicas provocadas principalmente por variações térmicas oriundas de fontes internas ou externas ao sistema;
- d) não linearidades: provocadas principalmente por instâncias elétricas, atrito e desalinhamento mecânico no sensor angular;
- e) ruído: acumulação dos ruídos elétricos que resulta em prejuízo no controle e desempenho do galvanômetro.

Outros erros importantes são: erros induzidos pelos espelhos (montagem, deformação dinâmica, erosão da superfície do espelho, deformações térmicas etc.); erros de repetibilidade (resultado do ruído proveniente dos galvanômetros, rolamentos e histerese); e erros associados a parte eletrônica (deriva dos componentes, ruído elétrico etc.).

Blais (1988) descreve como uma das fontes de incerteza para *scanners* galvanométricos a influência da inércia por parte da construção mecânica. O sinal de excitação (comando elétrico) é instantaneamente transmitido pelo sistema de controle, contudo, a movimentação do eixo do galvanômetro precisa vencer a inércia associada à sua própria massa. Devido a esta particularidade surge então um atraso entre comando e a efetiva movimentação do galvanômetro. O atraso pode ser simplificado como um valor constante, neste caso a resposta desejada seria um reflexo da excitação acrescida de um deslocamento temporal, como exibido na Figura 8. Contudo, a resposta desejada nem sempre pode ser atingível, sendo a resposta

efetiva função dos parâmetros de controle adotados. Conforme a configuração do sistema de controle, a resposta efetiva pode apresentar diferentes comportamentos. É o caso das respostas do tipo superamortecida e subamortecida representadas na Figura 8.

Figura 8 – Comparativo entre o sinal de comando (excitação) e as respostas obtidas em um atuador galvanométrico.



Fonte: adaptada de Blais (1988).

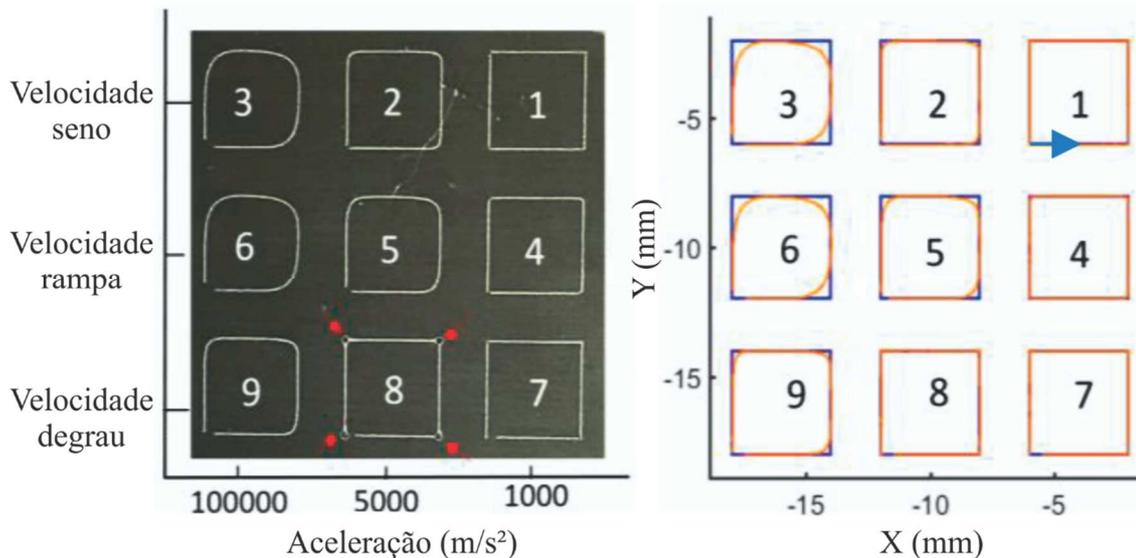
Devido à resposta dinâmica do sistema, existe a necessidade de controlar a sincronização entre a movimentação efetiva dos espelhos e o acionamento do feixe de *laser*. Os comandos para execução da movimentação e disparo do *laser* não podem ser simplesmente realizados simultaneamente. É necessário considerar a influência da inércia associada aos elementos mecânicos do conjunto. Embora os *scanners* sejam tidos como dispositivos com elevada relação entre torque e inércia, mesmo a massa de um espelho de poucos centímetros quadrados causa influência sobre o funcionamento dinâmico do sistema.

A resposta do sistema mecânico apresenta características próprias, que devem ser consideradas no controle da movimentação dos espelhos para garantir a exatidão espacial e temporal. A exatidão espacial está associada com o correto posicionamento geométrico do feixe de *laser*, ao ponto que a exatidão temporal corresponde ao feixe atingir a posição designada no tempo designado (Yeung *et al.*, 2018).

Uma das opções de controle de movimento é a definição perfil de velocidade empregado. O perfil de velocidade do tipo degrau é encontrado na maior parte dos sistemas comerciais, assume que o sistema apresenta aceleração infinita, que é impossível de ser obtida pela movimentação dos espelhos (Yeung *et al.*, 2018). Outras opções utilizadas são o perfil de velocidade em rampa e seno, onde o aumento do valor da velocidade descreve um crescimento

linear ou senoidal, respectivamente. A Figura 9 exibe a geometria obtida por estes diferentes perfis de velocidade.

Figura 9 – Quadrados marcados sobre placa de alumínio com diferentes controles de movimento e gráfico comparativo entre geometria gerada e a geometria desejada.



Fonte: adaptada de Yeung *et al.* (2018).

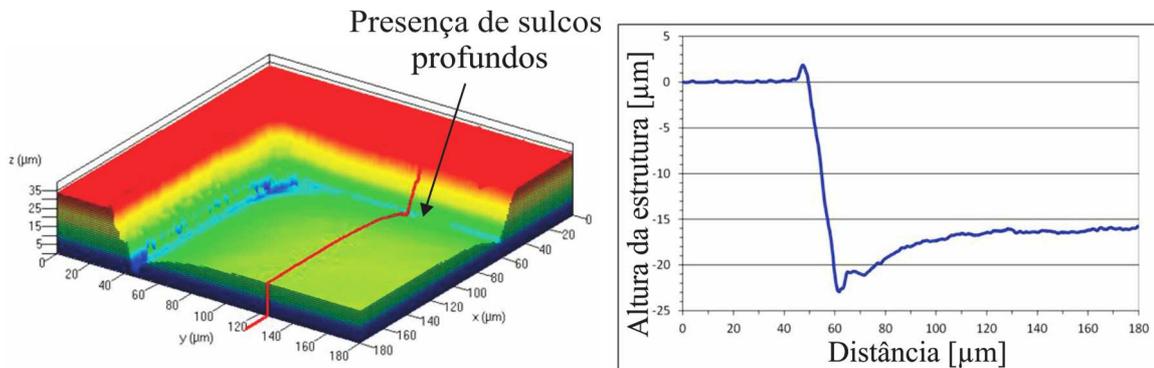
As distorções apresentadas na Figura 9 ocorrem quando a movimentação do próximo segmento começa antes que a posição alvo do segmento anterior seja atingida. Para garantir que a posição desejada seja atingida é possível incluir um tempo de espera e evitar a distorção geométrica. Porém, se o tempo de espera é excessivo, o material será exposto a radiação *laser* de forma prolongada, gerando sobreaquecimento da região.

No início da movimentação angular do espelho ocorre a etapa de aceleração até que se alcance velocidade angular constante deste elemento mecânico. De forma análoga, no fim da movimentação ocorre a desaceleração até a parada completa do espelho. Caso a emissão de *laser* seja acionada durante a etapa de aceleração do *scanner* (onde a velocidade ainda não atingiu seu valor constante) um maior tempo de interação ocorre entre o feixe de *laser* e a região atingida por ele. Esse maior tempo de interação provoca um efeito denominado de *deep marking* (Jaeggi *et al.*, 2012).

O efeito de *deep marking* se manifesta sob a forma de sulcos profundos próximos aos contornos dos elementos processados, como exposto na Figura 10. O mesmo efeito ocorre se o *laser* permanece acionado na etapa de desaceleração do espelho, onde também ocorre a

incidência de uma maior concentração de energia decorrente do maior tempo de exposição ao *laser* em relação ao que ocorre na condição com velocidade constante.

Figura 10 – Efeito *deep marking* presente no fundo de uma cavidade processada com *laser*.



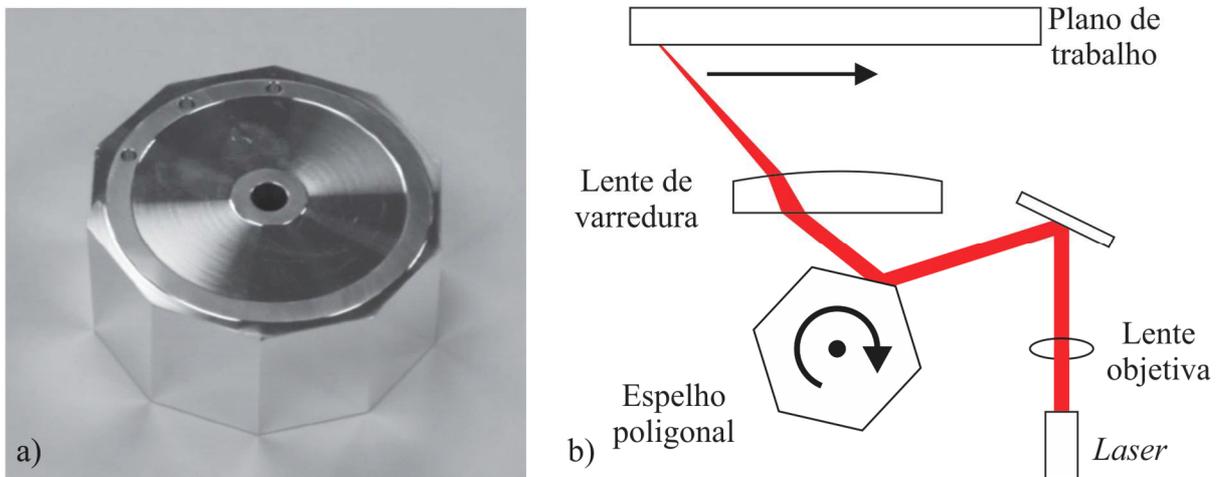
Fonte: adaptada de Jaeggi *et al.* (2012).

Em algumas abordagens se procura melhorar o desempenho do *scanner* por meio dos algoritmos aplicados no controle dos galvanômetros (Wang e Chen, 2018). Em outra proposta foi aplicado o método de dinâmica inversa (Duy *et al.*, 2017). Ou seja, com base no comportamento dinâmico do *scanner*, foi gerado um comando de trajetória modificado que ao ser executado atinge a trajetória desejada. As estratégias de utilização associadas ao funcionamento dos *scanners* baseados em galvanômetros são discutidas com mais detalhes no item 2.5.1.

Além dos *scanners* baseados em galvanômetros, os *scanners* poligonais também são dispositivos de deflexão empregados no processamento com *laser*. Estes são construídos na forma de um disco especular multifacetado como o exibido na Figura 11a (Marshall e Stutz, 2018). O disco é rotacionado com uma velocidade definida, à medida que a face se movimenta em função da rotação, o feixe que incide sobre ela é defletido e passa a se movimentar em uma direção, como ilustra a Figura 11b. Ao encontrar a interseção de duas faces do espelho, o *laser* é desligado para logo em seguida iniciar um novo percurso, defletido pela face seguinte.

Scanners poligonais, segundo seu princípio base, são dispositivos que defletem o feixe de *laser* em uma única direção. Por produzir a movimentação em uma linha unidirecional, estes dispositivos recebem usualmente o nome de *raster scan* (De Loor, 2013). Para processar uma área com este sistema, é necessário que ocorra um deslocamento transversal do material em relação a linha produzida pela rotação do espelho. A movimentação do material pode ser obtida por meio de eixos lineares, possibilitando assim a marcação de linhas paralelas.

Figura 11 – Imagem de um disco multifacetado (a) e representação de funcionamento de um *scanner* poligonal (b).



Fonte: adaptados de Marshall e Stutz (2018) e Helser (2016).

Uma das características dos *scanners* poligonais é não apresentar período de aceleração e desaceleração, pois a rotação do espelho poligonal é constante. Como o feixe de *laser* é acionado em uma condição em que seu deslocamento já se encontra em velocidade constante é evitada a ação de efeitos como o *deep marking* (Jaeggi *et al.*, 2014). Este acionamento do *laser* é realizado quando a face do espelho está na posição que irá direcionar o feixe para o local correto sobre a área de trabalho.

Outra característica é a capacidade de atingir velocidades de deslocamento de feixe superiores à alcançadas nos *scanners* galvanométricos. A velocidade de deslocamento do feixe em *scanners* galvanométricos comuns é situada entorno de 10 m/s, em modelos de alto desempenho alcança 30 m/s (Mincuzzi *et al.*, 2018). Os *scanners* poligonais por sua vez atingem velocidades de deslocamento do feixe entre 25 m/s e 100 m/s (De Loor, 2013).

No entanto, quando as dimensões das estruturas a serem processadas são significativamente menores que a extensão da linha produzida pelo *scanner* poligonal, o tempo de processamento deixa de ser otimizado. Nesta condição, embora somente um pequeno segmento seja processado, ainda é necessário aguardar a completa varredura da linha antes que o próximo segmento se encontre em posição. Considerando esta afirmação, a utilização de *scanners* galvanométricos (confrontada a de *scanners* poligonais) ainda é interessante para processar peças onde há predomínio de geometrias com partes pequenas e variáveis (Zimmermann, Jaeggi e Neuenschwander, 2015). Embora largamente empregados em impressoras e copiadoras, os *scanners* poligonais ainda não são dispositivos convencionalmente utilizados na indústria (Jaeggi *et al.*, 2016).

2.3.3 Lentes F-*theta*

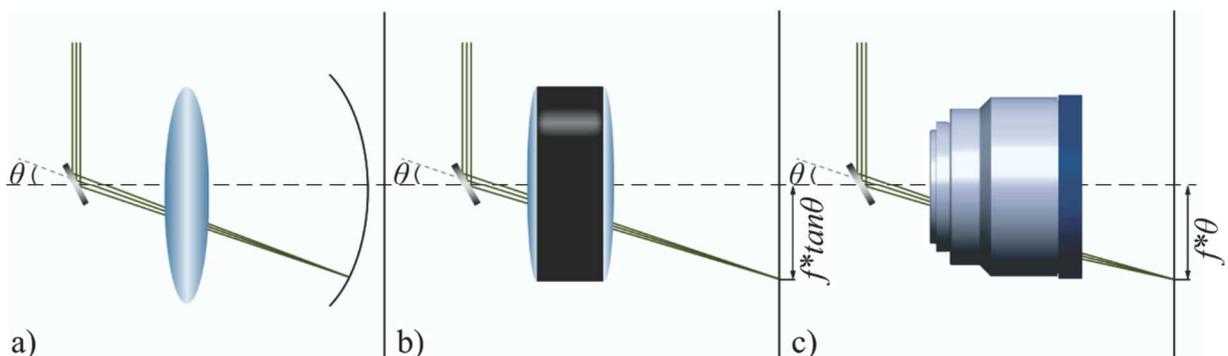
Um sistema de deflexão de feixe para o processamento de materiais com *laser* apresenta mais que apenas espelhos em sua composição óptica. O feixe de *laser* ao ser inserido de forma colimada no *scanner* ainda necessita ser convergido para um ponto focal. Este processo de focalização pode empregar espelhos cônicos ou parabólicos, embora a utilização de lentes de focalização seja amplamente difundida.

As lentes convencionais promovem a focalização do feixe de *laser* a uma distância focal fixa. Quando um espelho é rotacionado, a posição do foco do *laser* no espaço se desloca sob uma trajetória circular, como exposto na Figura 12a. Em um sistema com dois espelhos, o que permite a deflexão em duas direções, o deslocamento deste foco no espaço se dará na forma de uma calota esférica (Jenoptik, 2019).

Para que o ponto focal se desloque sobre uma área de trabalho plana é necessário o uso de lentes planificadoras. Neste caso, o ponto focal do feixe de *laser* se desloca sobre uma trajetória retilínea. O deslocamento sofrido pelo feixe sobre o plano está relacionado com a rotação do espelho. Neste caso, a posição do ponto focal em relação ao centro do plano corresponde a distância focal da lente (f) multiplicada pela tangente do ângulo *theta* de rotação do espelho (θ), como ilustra a Figura 12b.

As lentes de planificação podem ser otimizadas para fornecer uma relação matemática mais simples entre o deslocamento do foco e rotação do espelho. Desta forma, a lente fornece uma relação correspondente a distância focal multiplicada pelo o ângulo *theta* ($f \cdot \theta$), como exposto na Figura 12c. Esta relação também dá nome a ao componente óptico: lente F-*theta*.

Figura 12 – Feixe de *laser* focalizado através de: a) lente convencional, b) lente de planificação e c) lente F-*theta*.



Fonte: adaptada de Jenoptik (2019).

Uma característica das lentes *F-theta* comuns é a presença da telecentricidade. Nesse caso, quando direcionado para as bordas da área de alcance da lente, o eixo central do feixe de *laser* deixa de estar perpendicular ao plano de trabalho. A inclinação do centro do feixe em relação ao eixo óptico da lente ocasiona uma distorção geométrica do ponto focal. A telecentricidade pode ser reduzida utilizando lentes *F-theta* do tipo telecêntricas, que são mais complexas em termos ópticos. Lentes telecêntricas garantem uma telecentricidade tipicamente abaixo de 2° (Nolte, Schrempel e Dausinger, 2016).

A focalização executada pelas lentes permite ao feixe de *laser* ser reduzido a uma determinada dimensão mínima do foco. Este valor é influenciado pela característica da luz *laser* e pelo sistema óptico utilizado. O mínimo raio de cintura w_f [μm] que é obtido a partir de um feixe gaussiano colimado com raio w_0 e comprimento de onda λ , para uma lente de distância focal f , é calculado por

$$w_f = \frac{\lambda f}{\pi w_0} \quad (8)$$

No entanto, a Equação (8) é válida para as lentes convencionais, com distância de foco simples. Nos *scanners* galvanométricos que empregam lentes do tipo *F-theta*, segundo o fabricante Jenoptik (2019), o diâmetro do ponto focal σ [μm] é dado por

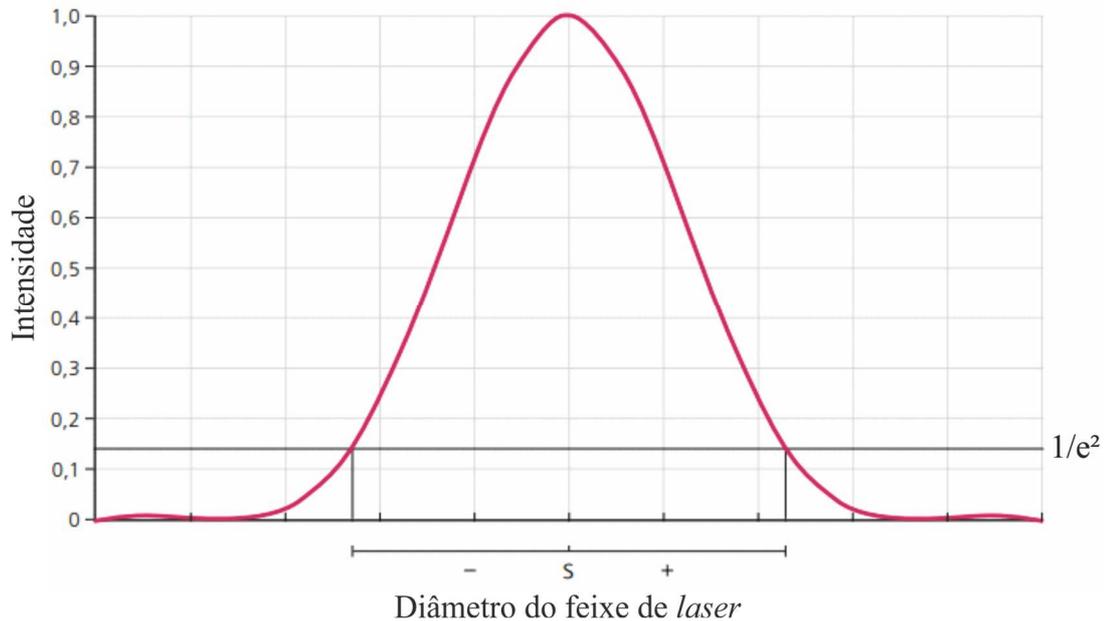
$$\sigma = 1,83 \cdot \frac{\lambda f}{\emptyset} \quad (9)$$

em que \emptyset [mm] corresponde ao diâmetro de entrada do feixe de *laser*, λ [μm] ao comprimento de onda e f [mm] a distância focal efetiva da lente *F-theta*.

Cabe ressaltar que mesmo que o raio (ou diâmetro) de um feixe gaussiano em teoria seja infinito, uma vez que uma distribuição gaussiana nunca termina, em determinado ponto, a energia *laser* é reduzida a um valor irrisório e considerada nula.

Para expressar a dimensão do feixe de *laser* em termos práticos é comumente empregada a relação $1/e^2$. Nesta relação, o diâmetro do feixe corresponde à distância entre dois pontos geometricamente opostos em uma distribuição gaussiana. Estes pontos de referência correspondem a posição onde a intensidade do feixe de *laser* é igual a $1/e^2$ do seu próprio pico de intensidade. Ao se empregar esta relação, se considera que apenas 86 % da energia proveniente da fonte luminosa é efetivamente contabilizada para definir o diâmetro do feixe de *laser*. A Figura 13 é uma representação gráfica do método $1/e^2$, a linha vermelha representa do perfil de distribuição de intensidade do feixe de *laser*.

Figura 13 – Representação gráfica de uma distribuição gaussiana com linha de referência para intensidade igual a $1/e^2$ do valor de pico.



2.4 SINCRONIZAÇÃO ENTRE SCANNER E EIXOS LINEARES

Os *scanners*, tanto galvanométricos quanto poligonais, podem ser combinados com outros dispositivos para atender determinadas aplicações ou atingir características específicas desejadas. Em certos casos, a movimentação desempenhada pelo *scanner* precisa se adaptar ou exerce algum tipo de influência sobre o comportamento de outros componentes presentes no sistema.

Em determinadas técnicas de microscopia confocal (Pawley, 2016) e tomografia (Samsonov *et al.*, 2008), por exemplo, existe sincronização entre *scanner* e detectores de imagem. Outro exemplo é a sincronização entre a movimentação um feixe de *laser* direcionado por um *scanner* para aquecer superfícies e a captura de imagens com câmera térmica, de modo a revelar discontinuidades e trincas em peças metálicas (An, Kim e Sohn, 2013). Já a sincronização entre *scanner* e contadores de fótons é requerida em aplicações como a técnica de luminescência óptica (Ahmed *et al.*, 2016).

A sincronização também pode ser destinada a expandir a área de atuação do *scanner* quando esta é insuficiente para o propósito da aplicação. Por exemplo, na usinagem de nano estruturas são utilizadas lentes que permitem ao feixe atingir pontos focais submicrométricos (Jonuaskas *et al.*, 2018). Contudo, o alcance proporcionado por estas lentes se limita a poucas

centenas de μm . Neste caso, somente a sincronização com outros sistemas de movimentação pode expandir o campo de atuação limitado que o sistema óptico isoladamente fornece. Isto acaba se tornando requisito para permitir a criação de estruturas em mesoescala (termo que descreve estruturas com micro ou nano elementos que se estendem por vários milímetros) (Schille *et al.*, 2017).

Se tratando da utilização de *scanners* galvanométricos em situações onde a área a ser processada superar o alcance deste dispositivos, diferentes estratégias podem ser aplicadas para aprimorar a entrega do feixe de *laser* de modo a contemplar toda a zona de interesse do processo (Pereira e Thombansen, 2015), dentre elas:

- a) movimentação do *scanner* para processar áreas discretas;
- b) movimentação do *scanner* com sobreposição entre as áreas discretas;
- c) movimentação contínua do *scanner* sobre a peça;
- d) uso de múltiplos *scanners*.

A movimentação com áreas discretas refere-se à sequência: processamento com atuação do *scanner*, pausa do processamento, movimentação do *scanner*, reinício do processamento e assim por diante. Contudo, esta movimentação do tipo processa-avança-processa, também denominada de *step and scan* (Rizvi e Apte, 2002), *step and scanning*, (Kim *et al.*, 2012) ou *step and repeat* (Park, Ryu e Hwang, 2013), implica no acréscimo do tempo total de execução. Além disto, a posição exata de incidência do *laser* pode não ser atingida ocasionando pontos desalinhados nas fronteiras entre áreas discretas processadas, defeitos também denominados de erros de costura (Kim *et al.*, 2011).

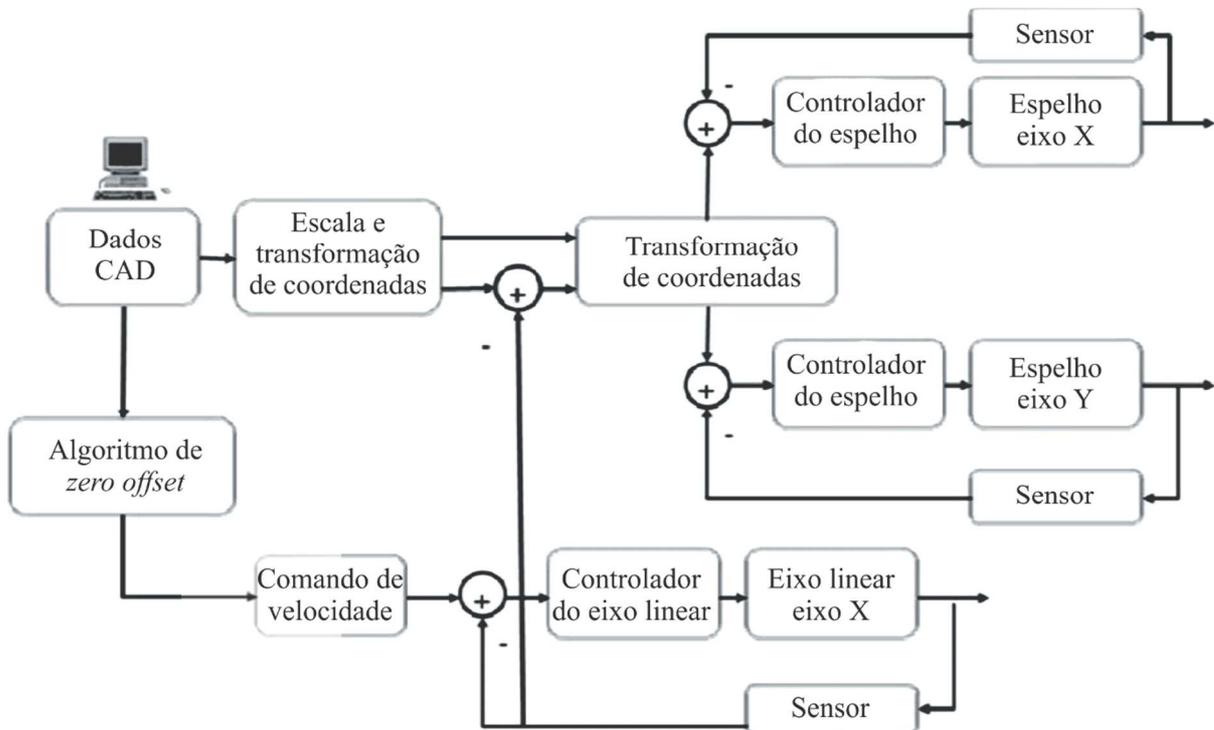
Para minimizar ou até evitar estes erros pode ser realizada a movimentação síncrona e simultânea entre *scanner* e os eixos lineares, ou seja, diferentemente da movimentação *step and scan*, não existem posicionamentos discretos ou paradas de processamento. Esta técnica foi inicialmente chamada de *sync scan* por Rizvi e Apte (2002). Outras denominações como *on-the fly* (Kim *et al.*, 2011) e *Infinite Field Of View* (IFOV[®]) (Jonusauskas *et al.*, 2018) também são encontradas na literatura.

Porém, como os sistemas de movimentação empregados apresentam diferentes características intrínsecas a sua concepção, linguagem de programação e forma de conversão dos sinais elétricos do comando em movimento relativo entre o ponto de incidência do feixe de *laser* e o objeto, sua configuração influencia o comportamento global do sistema com movimentação síncrona. *Scanners* são elementos que permitem movimentação rápida do feixe, mas com área de varredura limitada. Já os eixos lineares alcançam extensões de curso maiores, contudo, as velocidades e acelerações são menores que as dos *scanners*.

A técnica de movimentação síncrona e simultânea busca reduzir as limitações e combinar vantagens presentes nos dispositivos de movimentação que compõem o sistema. A área limitada do *scanner* pode ser expandida, sem comprometimento da sua resolução de posicionamento, até o curso disponível nos eixos lineares. Enquanto que simultaneamente a velocidade limitada dos eixos lineares é compensada pela maior velocidade proporcionada pela deflexão dos espelhos do *scanner*.

Kim *et al.* (2011) descrevem a sincronização entre um *scanner* 2D e um eixo linear como um método que visa justamente atingir alta velocidade e grandes áreas de processamento. O sistema é baseado em uma placa de controle que calcula a movimentação a partir dos dados CAD originais. Estes dados sofrem uma transformação de coordenadas e de escala que os torna compatíveis com movimento angular dos espelhos. Os dados são então comparados com a informação de posição e velocidade do eixo para determinar a movimentação final dos espelhos. O comando de velocidade do eixo linear, por sua vez, é definido com base nos dados CAD e de um algoritmo específico, como exposto na malha apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Malha de controle de um sistema síncrono de *scanner* 2D e um eixo linear.



Fonte: adaptada de Kim *et al.* (2011).

O comando de velocidade utiliza um algoritmo do tipo *zero offset*. Este basicamente procura manter uma distância igual a zero entre o centro da área do *scanner* e o local a ser

processado. Para isto, os eixos movem o substrato para manter tal distância o mais próximo possível do valor zero. Kim *et al.* (2011) apresentam exemplos de fabricantes que já utilizam a tecnologia em suas placas de movimentação, mas salientam que estas aplicações são destinadas a operações marcação, e que seu trabalho foca em aplicações de corte para placas de circuito impresso flexível.

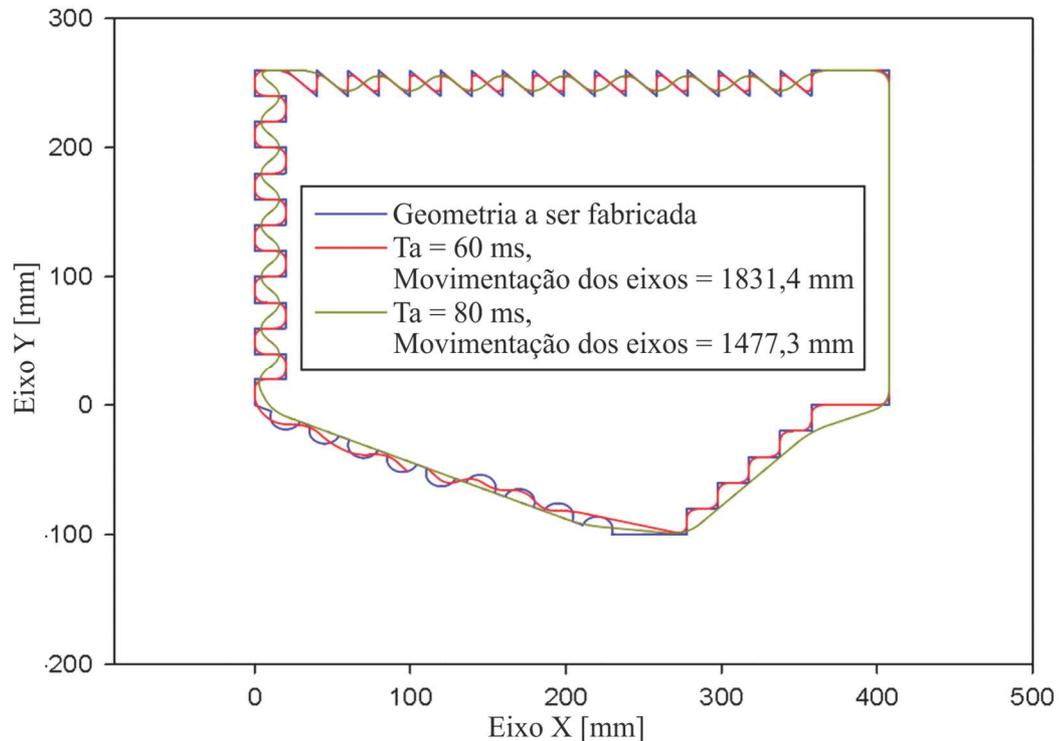
Na movimentação síncrona e simultânea, o controle deve lidar com os perfis de deslocamento e velocidade executados por cada componente do sistema. Quando o processamento ocorre com alta frequência de movimentos e rápidas mudanças de velocidade, o *scanner* galvanométrico apresenta desempenho superior ao dos eixos lineares por apresentar melhor dinâmica (Kim *et al.*, 2014). Na mesma condição, a movimentação propiciada por eixos lineares convencionais é depreciada pela ação da própria inércia, o que limita sua capacidade de aceleração.

Nos sistemas síncronos e simultâneos, estas considerações sobre o desempenho individual de eixos lineares e *scanner* podem definir as estratégias de comando. É possível induzir os eixos a fazerem uma trajetória não necessariamente comprometida com a geometria a ser executada. O controlador pode executar uma trajetória que priorize a movimentação suave dos eixos, enquanto as rápidas variações de movimento ficam a cargo do *scanner*.

Uma técnica introduzida por Kim *et al.* (2012) é determinar que os tempos de aceleração e desaceleração (T_a) sejam intencionalmente aumentados durante a movimentação dos eixos lineares. Desta forma as movimentações com variações bruscas de trajetória vão assumir o formato de uma parábola quando executadas pelos eixos, como ilustrado nas curvas da Figura 15. Quanto maior o tempo destinado à aceleração, mais suavizada é a movimentação e menor o deslocamento exercido pelos eixos.

A aceleração do eixo linear estabelece o tempo de movimentação em regime transitório e influencia o resultado do efeito produzido pelo deslocamento do feixe de *laser* sobre a superfície de trabalho. Para uma aceleração elevada, o tempo em regime transitório de movimentação da amostra é baixo, pois a aceleração permite deslocamento ágil entre as posições. No entanto, uma aceleração elevada dos eixos leva a movimentações abruptas da amostra. Considerando a atuação da inércia da massa dos eixos sob aceleração, espera-se uma diminuição da repetibilidade de parada. Consequentemente, no resultado de trabalho, podem ocorrer variações dimensionais nas regiões processadas onde ocorreram alterações bruscas de movimentação, como nas trajetórias compostas por segmentos com ângulos retos ou agudos entre si.

Figura 15 – Trajetórias descritas por um sistema de movimentação com diferentes valores de tempo de aceleração (T_a).



Fonte: adaptada de Kim *et al.* (2012).

Além dos valores de tempos de aceleração e desaceleração, o tipo de rampa empregado também pode ser alvo de modificação. Diferentes formatos que definem a curva característica de aceleração podem ser empregados, alguns exemplos destes formatos de rampas de aceleração são (Aerotech, 2019):

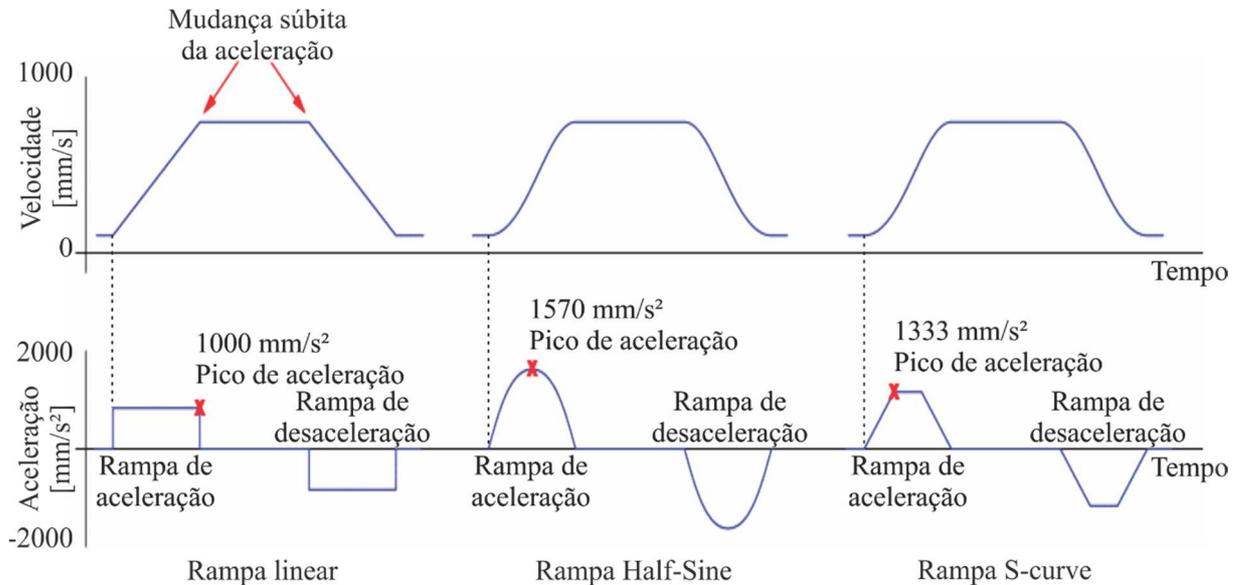
- a) rampa linear: configuração que apresenta o menor pico de aceleração, porém apresenta mudanças repentinas da aceleração na mudança entre segmentos;
- b) rampa senoidal *half-sine*: apresenta maior pico de aceleração sem a ocorrência de mudanças repentinas de aceleração;
- c) rampa *s-curve*: apresenta pico de aceleração intermediário sem a ocorrência de mudanças repentinas de aceleração.

A Figura 16 mostra os perfis de velocidade (ideais) para diferentes tipos de rampas de aceleração. No exemplo, as três movimentações apresentadas no gráfico utilizam como referências uma velocidade de 1000 mm/s e uma taxa de aceleração de 1000 mm/s².

Em casos particulares, como a sincronização entre *scanners* poligonais e eixos lineares, outras variáveis são adicionadas ao contexto. Neste caso, o sistema de controle é

encarregado de sincronizar a velocidade de rotação do espelho multifacetado com a frequência de repetição do *laser*, do controle do eixo linear e o acionamento do *laser* (De Loor, 2013).

Figura 16 – Influência da rampa de aceleração e desaceleração sobre a velocidade de deslocamento do feixe sobre a amostra.



Fonte: adaptada de Aerotech (2019).

A sincronização de movimento também pode ser aplicada entre *scanners* (poligonais ou galvos) e eixos rotativos. Os principais desafios são reproduzir a correta localização dos pontos individuais e, manter a posição do padrão produzidos após um grande número de rotações (Kramer *et al.*, 2018). O controle pode ser tal que a velocidade do *scanner* se adapte à velocidade informada por um *encoder* integrado ao eixo rotativo, ou por um sistema que opta pelo controle ativo da rotação.

Além do processamento de estruturas, a movimentação síncrona e simultânea também apresenta contribuições para a realização de furações. Uma grade perfurada, por exemplo, pode ser obtida pela execução individual dos furos. No entanto, para evitar o acúmulo de calor é necessário reduzir a taxa de repetição de pulsos aplicados, que conseqüentemente torna o processo lento. Outra opção é realizar a movimentação do feixe continuamente, aplicando um pulso de *laser* somente quando o feixe passa sobre o local destinado ao furo. Dessa forma os furos são produzidos simultaneamente e o processo repetido até atingir a profundidade desejada (Jaeggi *et al.*, 2013a). Uma maior taxa de furação é obtida pois o período de aceleração e desaceleração entre os furos foi removido. Além disto, há uma melhor distribuição de calor

quando comparada a furação por percussão (Patwa *et al.*, 2013), com a realização de pulsos sucessivos no mesmo ponto.

2.5 ESTRATÉGIAS DE PROCESSAMENTO

Devido à resposta dinâmica oferecida pelo sistema eletromecânico dos *scanners* existe a necessidade de controlar a sincronização entre movimentação dos espelhos e o acionamento do feixe de *laser*. Este fato dá origem ao uso de diferentes estratégias de processamento que são associadas diretamente ao *scanner* e seu funcionamento.

As estratégias de processamento também podem ser abordadas em um aspecto mais amplo. Além das características intrínsecas ao *scanner*, a escolha pelo caminho descrito pelo *laser* influencia o resultado final. As estratégias, neste caso, estão associadas com o caminho percorrido pelo feixe.

2.5.1 Estratégias associadas ao funcionamento do *scanner*

Embora *scanners* sejam tidos como dispositivos com elevada relação torque e inércia, mesmo a massa de um eixo com um espelho de poucos centímetros quadrados causa influência sobre a resposta dinâmica do sistema. Um comando de movimentação enviado ao *scanner* não pode ser instantaneamente alcançado devido a inércia existente. A etapa de aceleração do espelho se faz presente até que seja alcançada sua velocidade angular constante.

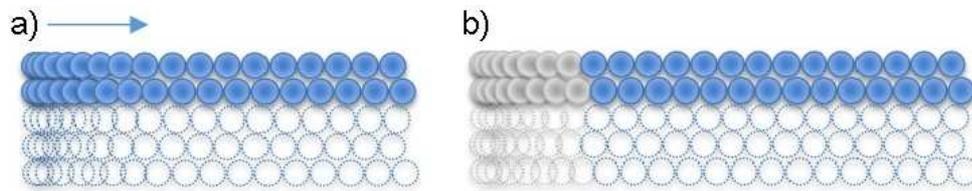
Numa situação onde a emissão de *laser* é acionada imediatamente junta ao comando de movimentação ocorre um acúmulo de energia sobre a peça durante a etapa de aceleração do *scanner*. O mesmo efeito é válido na etapa de desaceleração do espelho, onde também ocorre o acúmulo resultante da exposição ao *laser* em uma condição com velocidade não constante. Esta característica causa um dano a superfície conhecido como marcação profunda ou *deep marking* (Jaeggi *et al.*, 2012), previamente citado na secção 2.3.2.

Diferentes estratégias podem ser adotadas para evitar o acúmulo de pulsos durante a fase de aceleração, como o ilustrado na Figura 17a. A mais convencional é a utilização de atrasos intencionais. Nesta estratégia é adicionado um atraso (*delay*) entre o comando de movimentação e o acionamento do *laser*. O objetivo é suprimir a emissão do *laser* durante a fase de aceleração do espelho, como apresentado na Figura 17b. De forma análoga, no final da movimentação é incluída uma antecipação do desligamento do *laser* de forma a evitar

incidência de energia durante a desaceleração do espelho (Oehler *et al.*, 2017). Este atraso é normalmente na ordem de milissegundos ou microssegundos.

Na Figura 17a a movimentação efetuada pelo *scanner* corresponde ao próprio vetor que deve ser marcado. A inclusão de um atraso no acionamento do *laser*, neste caso, pode suprimir a marcação de parte deste comprimento, representada pela região clara com pontos empilhados da Figura 17b.

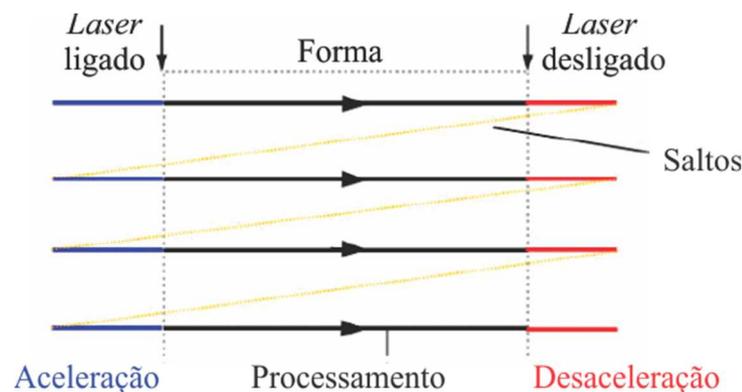
Figura 17 – Representação esquemática de pulsos *laser* individuais com: a) emissão dos pulsos iniciada durante a aceleração do eixo do *scanner* e b) emissão iniciada com atraso em relação à movimentação do eixo do *scanner*.



Fonte: Oehler *et al.* (2017).

Schille *et al.* (2010) sugerem a utilização de seguimentos extras de movimentação antes e após o comprimento que deve ser processado. Os percursos extras permitem ao *scanner* acelerar e desacelerar fora da região de processamento, como esquematizado na Figura 18. O acionamento do *laser* se dá apenas durante a etapa com velocidade angular constante. O resultado é a eliminação da marcação profunda ocasionada pela acumulação de pulsos na fase de aceleração e desaceleração dos espelhos.

Figura 18 – Exemplo da utilização de percursos extras para aceleração e desaceleração do *scanner*.

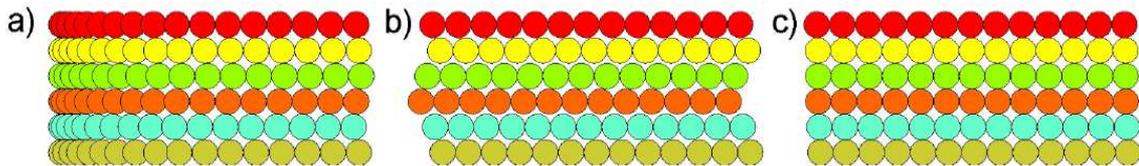


Fonte: adaptada de Schille *et al.* (2010).

Técnica semelhante foi denominada de *sky-writing* e descrita em detalhes por Jaeggi *et al.* (2012). Esta estratégia consiste em posicionar o espelho antes do ponto de partida convencional, assegurando assim curso extra no qual a aceleração pode ser desenvolvida. Quando a velocidade se encontra constante e a posição do espelho coincide com o início da estrutura o *laser* pode ser acionado. O *laser* é desligado sobre o ponto final da marcação e somente então ocorre o período de desaceleração do espelho.

A estratégia *sky-writing* elimina o acúmulo de pulsos quando o *laser* é emitido sob a região de aceleração do *scanner*. O acúmulo de energia é retratado no desenho da Figura 19a pelos círculos sobrepostos na extremidade esquerda. A distribuição uniforme dos pulsos (Figura 19b) é o indicativo de emissão em regime constante de velocidade. Contudo, pode surgir o desalinhamento relativo entre as linhas marcadas. Nesta condição o pulso inicial ocorre antes ou depois do ponto exato de início. Este fato é suprimido quando sistema apresentar também sincronização entre movimentação e emissão do trem de pulsos, caso retratado na Figura 19c.

Figura 19 – Representação esquemática da marcação de pulsos *laser* individuais com relação à posição inicial processada: a) sem *sky-writing*, b) com *sky-writing* e c) com sincronização do trem de pulso.



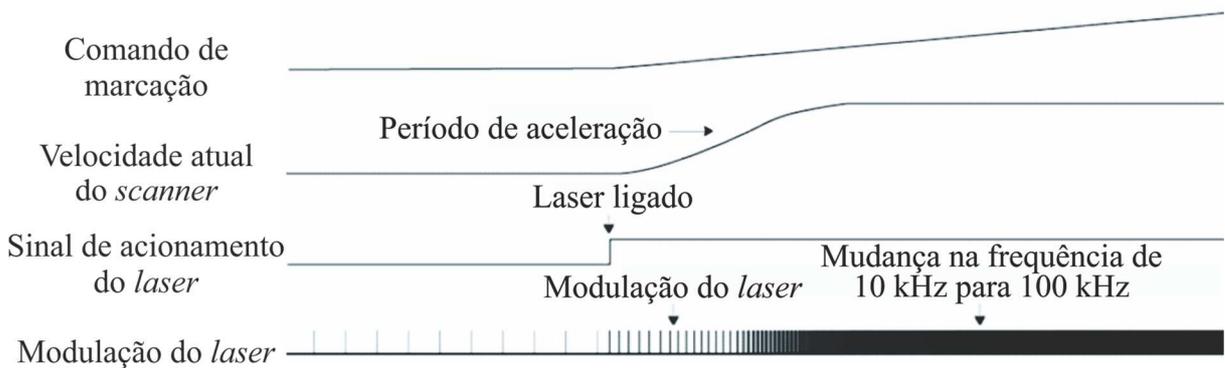
Fonte: Jaeggi *et al.* (2012).

Embora a estratégia *sky-writing* seja eficiente ao promover a remoção do material de forma constante sobre toda a superfície processada, ela está associada à um aumento do tempo de processamento. Este aumento de tempo é resultado da adição das etapas de aceleração e desaceleração, nas quais não se efetua nenhum processamento. Em uma tarefa com milhares de vetores de aceleração e desaceleração a estratégia *sky-writing* leva a um aumento significativo do tempo de processamento, mesmo que cada vetor individualmente represente apenas uma duração de milissegundos (De Loor, 2013).

Contudo, se houver um controle específico da entrega de energia fornecida pelo *laser*, as etapas de aceleração e desaceleração podem ser aproveitadas no processamento. Um exemplo, é modificar a taxa de repetição de pulsos em função da velocidade do *scanner* durante o período de aceleração (Luo, Li e Lucas, 2017), de forma que a energia fornecida por unidade

de comprimento percorrido sobre a amostra seja mantida constante, Figura 20. Neste caso, quando o *scanner* está em baixa velocidade a frequência de pulsos é reduzida. Durante o período de aceleração do *scanner* a taxa de repetição é aumentada proporcionalmente. O resultado é uma manutenção, mesmo que aproximada, da energia por unidade de comprimento, ou seja, uma distribuição uniforme dos pulsos.

Figura 20 – Sincronização do comando de marcação com a velocidade atual do *scanner*, sinal de acionamento do *laser* e modulação da taxa de repetição de pulso do *laser*.



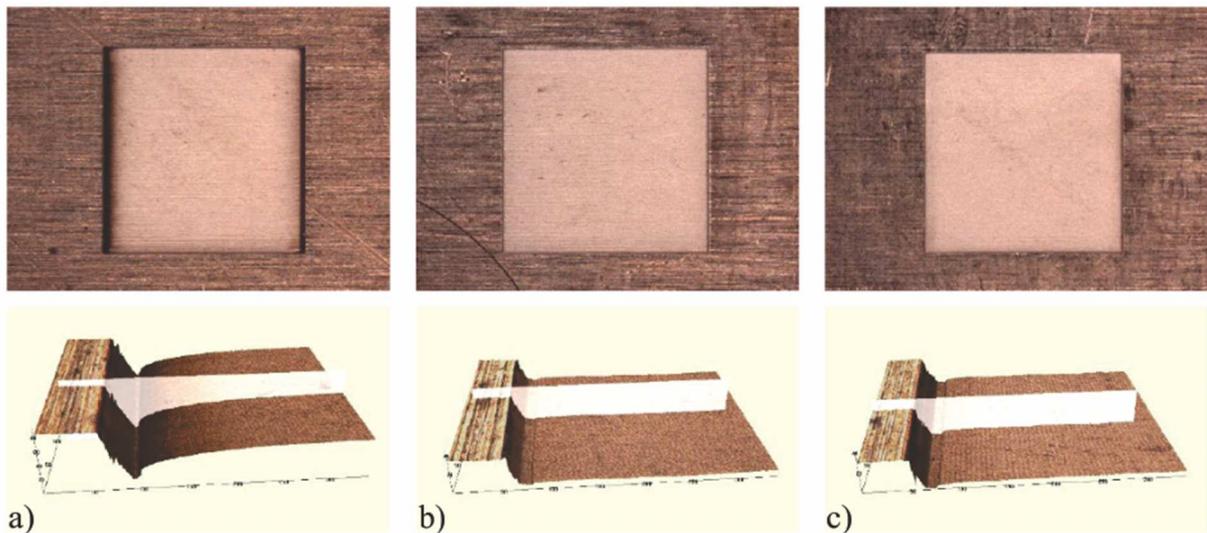
Fonte: adaptada de Luo, Li e Lucas (2017).

Oehler *et al.* (2017) compararam o resultado e o tempo de processo para diferentes condições: convencional, ou seja, com os períodos de aceleração atuando no processamento; *Sky-writing*, onde há segmentos extras para aceleração/desaceleração e processamento unicamente em velocidade constante; E, utilizando taxa de repetição de pulsos adaptativa em função da velocidade, permitindo o processamento na região de aceleração. Os resultados da utilização destas condições são respectivamente apresentados na Figura 21 e mostram que tornar as etapas de aceleração e desaceleração aptas a processar o material acrescenta vantagens ao processo.

O método convencional, no qual durante a fase de aceleração é mantida a mesma taxa de repetição de pulsos, resulta em uma profundidade de marcação no início de cada linha de marcação do feixe (efeito *deep marking*). Empregando tanto o método *sky-writing*, quanto o método de taxa de repetição de pulsos adaptativa, a profundidade de marcação no início de cada linha é menor se comparada a estratégia convencional. Contudo, a execução realizada com o método *sky-writing* é 50% mais lenta que as demais. Neste contexto, a utilização de um método de controle das variáveis do *laser* em função aceleração do *scanner* se apresenta como uma solução de compromisso entre tempo e qualidade do processamento.

Apesar de o método que emprega a variação da taxa de repetição de pulso se apresentar como uma solução otimizada, nem sempre a função de variação da taxa de repetição de pulso está acessível em todos os equipamentos. Fontes de *laser* pulsado podem apresentar uma frequência de repetição dos pulsos única ou estritamente limitada. Com isto, o espaçamento entre os pulsos pode não ser mantido em concordância com a velocidade do feixe.

Figura 21 – Áreas processadas em condições: a) convencional, b) *sky-writing* e c) com taxa de repetição de pulsos adaptativa.



Fonte: adaptado Oehler *et al.* (2017).

O controle da sincronização entre *laser* e movimentação também pode ser obtido pela alteração das características do pulso do *laser*. O formato do pulso (tempo e amplitude) é modificado para induzir determinado comportamento sobre o material processado. Um exemplo são as aplicações de soldagem que empregam emissão pulsada. Nestas aplicações, a forma do pulso é caracterizada por uma subida inicial da intensidade destinada à fase de aquecimento, seguida por um patamar responsável pela fusão e soldagem e por fim uma rampa de descida durante a qual ocorre a solidificação e resfriamento (Durr *et al.*, 2004).

Além do tempo e amplitude, outras condições do pulso também podem ser alteradas. Algumas fontes de *laser* específicas permitem a emissão de uma série rápida e contínua de pulsos, ao invés de um único pulso. Esta “rajada” de pulsos de *laser* permite obter uma maior taxa de remoção de material em comparação com a emissão convencional de pulsos individuais e sequenciais (Jaeggi *et al.*, 2018).

2.5.2 Estratégias associadas com a movimentação do feixe de *laser*

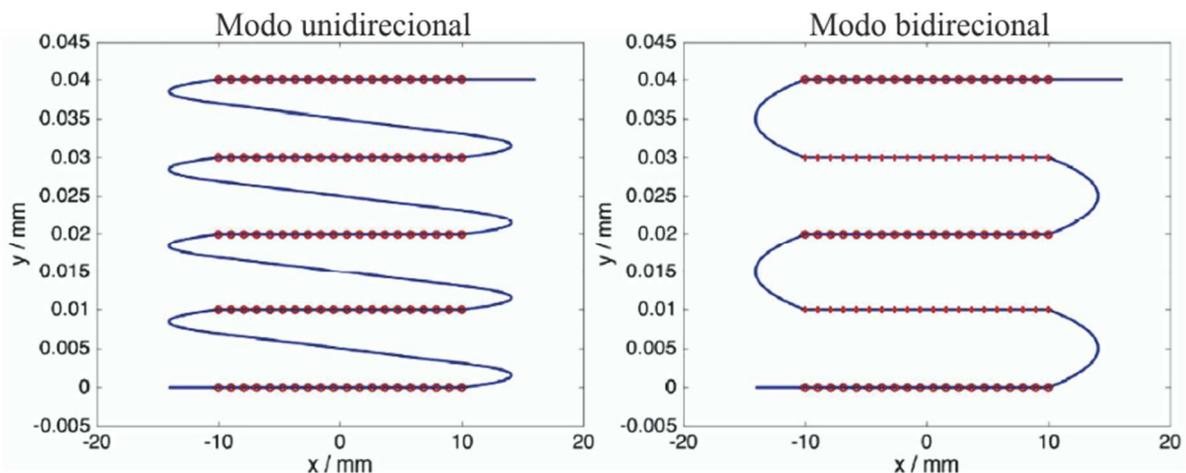
As estratégias de movimentação do feixe de *laser* durante o processamento são compostas basicamente por vetores de marcação e vetores de salto. Os vetores de marcação definem as movimentações assistidas por *laser*, durante as quais ocorrem as alterações no material que está sendo processado. Os vetores de salto definem as movimentações do sistema em que não há emissão de *laser*, empregadas com intuito de reposicionar o feixe desligado.

A estratégia mais simples para o processamento de área utilizando *scanners* galvanométricos consiste em executar uma varredura ou *raster*, onde a área a ser processada é preenchida por linhas retas e paralelas entre si. O espaçamento que separa as linhas consecutivas define a densidade de linhas sobre determinada área.

Dois abordagens distintas são utilizadas durante a varredura de uma área: a varredura unidirecional, quando a linha é executada sempre na mesma direção, e a varredura bidirecional, em que o *laser* é acionado nas duas direções de varredura. A Figura 22 mostra esquematicamente as duas estratégias, onde a linha contínua representa o caminho percorrido pelo feixe de *laser* e os pontos representam as efetivas emissões ou pulsos de *laser*.

A abordagem bidirecional é considerada mais eficiente, pois os pulsos são emitidos tanto na ida, quanto no retorno do feixe, diminuindo o tempo de ciclo (Jaeggi *et al.*, 2016). Em aplicações onde é exigida também uma elevada exatidão geométrica do percurso realizado pelo feixe é necessário também que o comprimento da linha e posição de início em ambas as direções sejam igualmente bem definidos (Zimmermann, Jaeggi e Neuenschwander, 2015).

Figura 22 – Abordagem unidirecional e bidirecional em uma estratégia do tipo *raster*.



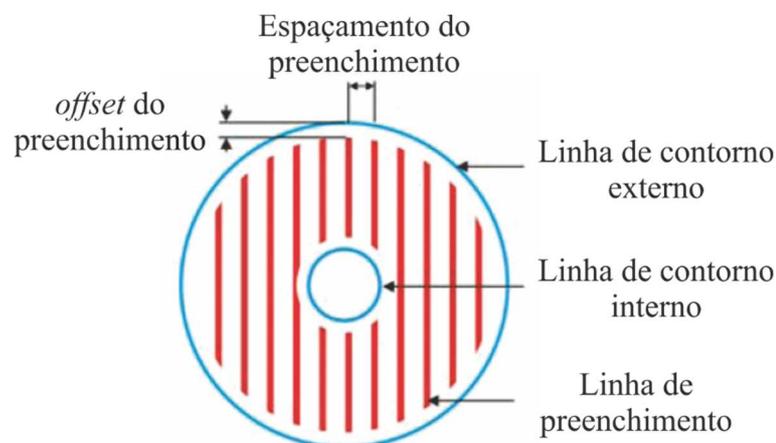
Fonte: adaptada de Jaeggi *et al.* (2016).

Além das estratégias de movimentação do feixe aplicadas na marcação e na remoção de material, outras estratégias de movimentação de *laser* empregando *scanner* são encontradas nos processos de manufatura aditiva. Nestes casos, se busca correlacionar os resultados obtidos com a trajetória utilizada para gerar as camadas sucessivas que produzem os componentes.

Nos processos de deposição em leito de pó verifica-se uma estratégia dividida entre etapas de preenchimento e de contorno. Um procedimento padrão, segundo Stamp *et al.* (2009), consiste em executar o preenchimento de uma região de uma camada por meio de linhas de varredura paralelas entre si e então circundá-las por um contorno. A otimização do preenchimento é obtida tanto pela definição da distância entre as linhas, bem como pelo espaçamento das extremidades destas em relação ao contorno, como apresentado na Figura 23.

A execução do contorno objetiva aumentar a definição do desenho sobre a superfície da camada em execução no componente. Dentro deste contexto ainda são estudadas a utilização de diferentes parâmetros de fornecimento de energia pelo *laser* para núcleo e para o contorno (Cloots *et al.*, 2017) ou da espessura de camada (Brandt, 2016).

Figura 23 – Estratégia empregando preenchimento e contorno da área processada.

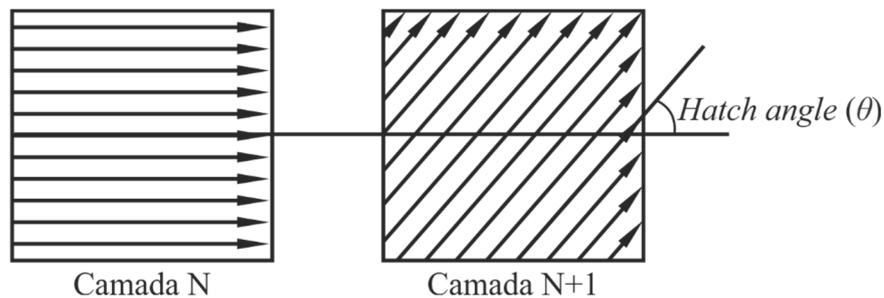


Fonte: adaptada de Stamp *et al.* (2009).

Na fabricação aditiva em leito de pó, além da execução individual da camada, verifica-se uma preocupação em garantir o adequado preenchimento do volume do componente ao longo da sua construção. Na execução das camadas subsequentes as linhas de preenchimento são executadas numa direção angular distinta à orientação da camada anterior. O ângulo entre as direções de varredura (*hatch angle* - θ), apresentado na Figura 24, pode apresentar diferentes valores. A adoção de um ângulo θ de 90° significa que a cada 4 camadas a posição das linhas será a mesma da primeira camada. Nesta condição a anisotropia das propriedades mecânicas é

mais acentuada. Para um ângulo de 105° são necessárias 24 camadas sobrepostas até que as orientações da primeira e última camada se alinhem novamente. Os componentes produzidos com ângulo de 105° apresentam propriedades mecânicas satisfatórias para a maiorias das aplicações (Hanzl *et al.*, 2015).

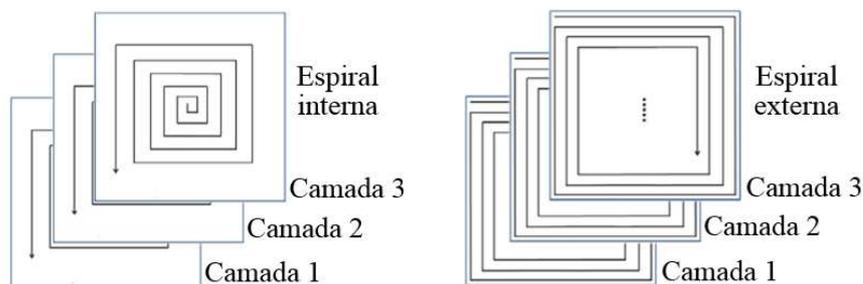
Figura 24 – Representação do ângulo θ entre direções do padrão de varredura entre camadas consecutivas.



Fonte: adaptada de Hanzl *et al.* (2015).

A varredura pode também apresentar mudanças na direção dos vetores utilizados. Estratégias espirais podem assumir configurações com vetores que partem do centro para a periferia (espiral interna) ou que iniciam no contorno externo em direção ao centro da área processada (espiral externa), conforme mostrado na Figura 25. Nestes casos, a direção de varredura do *laser* muda constantemente de X para Y e vice-versa, resultando em uma distribuição de energia que difere das estratégias com direções preferenciais (Cheng, Shrestha e Chou, 2016).

Figura 25 – Estratégias de varredura do tipo espiral interna e espiral externa.

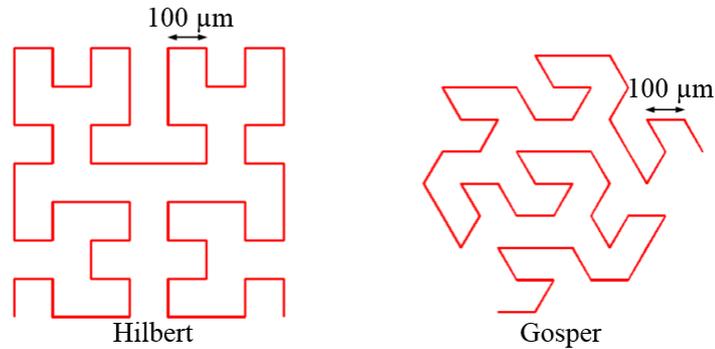


Fonte: adaptada de Cheng, Shrestha e Chou (2016).

Em determinadas estratégias se recorre ao uso de varredura fractal que pode ser baseada, por exemplo, nas curvas de Hilbert e Peano-Gosper (Catchpole-Smith *et al.*, 2017)

exibidas na Figura 26. Estas curvas apresentam a características de serem contínuas, compostas por segmentos que se repetem indefinidamente ocupando o espaço em que estão contidas.

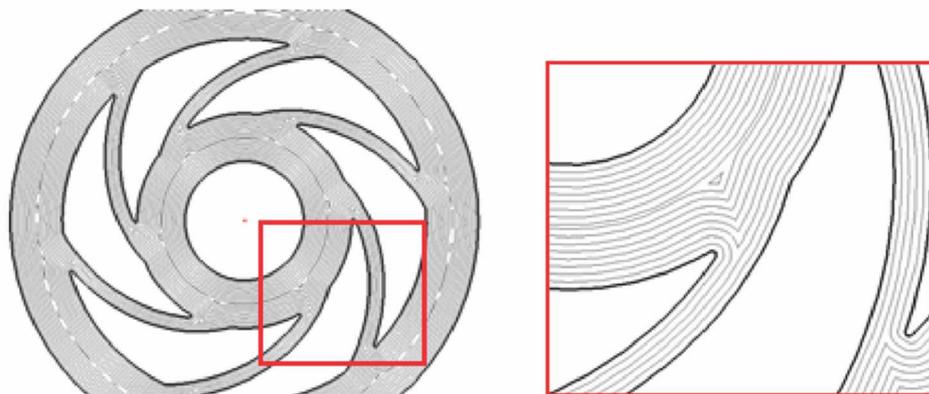
Figura 26 – Curvas de Hilbert e Peano-Gosper aplicadas em estratégias de varredura na manufatura aditiva em leito de pó.



Fonte: Catchpole-Smith *et al.* (2017).

As linhas que compõem a estratégia de varredura também podem ser delimitadas pela forma do objeto processado. Neste caso, os vetores de marcação são reflexo do modelo CAD do componente. Um exemplo é o uso de algoritmo Voronoi para decompor o espaço ocupado por uma camada em linhas igualmente espaçadas a partir das bordas do modelo. A Figura 27 exhibe o aspecto destas linhas, numa estratégia nomeada de Helix por Bo *et al.* (2012).

Figura 27 – Detalhe das linhas geradas na estratégia de varredura conhecida como Helix.



Fonte: adaptada de Bo *et al.* (2012)

No caso anterior, uma das vantagens associadas à estratégia que segue o modelo CAD é o contorno homogêneo ao longo da peça. A varredura do feixe de *laser* ocorre sempre paralela a fronteira que delimita o modelo. Contudo, a mesma característica pode também representar uma desvantagem. A medida que as linhas são executadas de fora para dentro, por uma redução

progressiva do contorno, em dado momento haverá uma concentração das linhas no centro da peça. A concentração de linhas levará a manutenção do *laser* por período prolongado em uma mesma área, resultando em maior concentração de energia.

2.6 MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA

O resultado da interação *laser*-material se encontra diretamente relacionada com a quantidade de energia que é absorvida pela peça. No processamento de metais, a quantidade de energia absorvida pela peça não corresponde ao valor emitido pela fonte. Pela particularidade destes materiais serem, na maioria dos casos, reflexivos a radiação eletromagnética, apenas parte da energia é aproveitada. A absorção nos metais está condicionada, entre outros fatores, à (Poprawe, 2011):

- a) constantes ópticas do material;
- b) condição da superfície (rugosidade etc.);
- c) composição química da superfície (camadas de óxido etc.);
- d) a temperatura do material, que por sua vez, influencia os fatores anteriores.

A capacidade de absorver a radiação pode ser representada pela absorvidade A , um fator determinado pela parcela de potência absorvida pela peça P_{abs} [W] e a potência total incidente P [W], descrita como (Poprawe, 2011)

$$A = \frac{P_{abs}}{P} \quad (10)$$

A parcela absorvida P_{abs} é dependente dos valores de potência que são não aproveitados devido a energia que é refletida ou transmitida através do material. A potência absorvida é resultado da potência total incidente menos a parcela de energia refletida P_r [W] e a energia transmitida P_t [W], seguindo a relação (Poprawe, 2011)

$$P_{abs} = P - P_r - P_t \quad (11)$$

Esta radiação absorvida apresenta diferentes mecanismos pela qual é convertida em energia térmica que provoca o aquecimento da peça. O estágio inicial de interação entre *laser* e metais, por exemplo, pode ser descrito com base no modelo de elétrons livres. Neste modelo o fluxo de luz incidente é totalmente absorvido em interação com os elétrons condutores na camada de superfície com 10^{-4} a 10^{-5} cm. Os elétrons condutores ao absorverem a luz sofrem um aumento de energia, parte deste energia é transmitida para a estrutura cristalina do material (Rykalin, Uglov e Kokora, 1978).

Em casos práticos, a densidade da potência da radiação absorvida varia no volume de um sólido de acordo com a Lei e Bouguer (Rykalin, Uglov e Kokora, 1978), descrita por

$$q_v(z) = q_{v0}(1 - R)\exp(1\alpha z) \quad (12)$$

em que $q_v(z)$ corresponde a potência da radiação por unidade de volume (W/cm^3) a uma distância z da superfície do corpo irradiado e q_{v0} a densidade originada na fonte que emite a radiação. O termo $1 - R$ corresponde a absorvidade e α ao coeficiente de absorção.

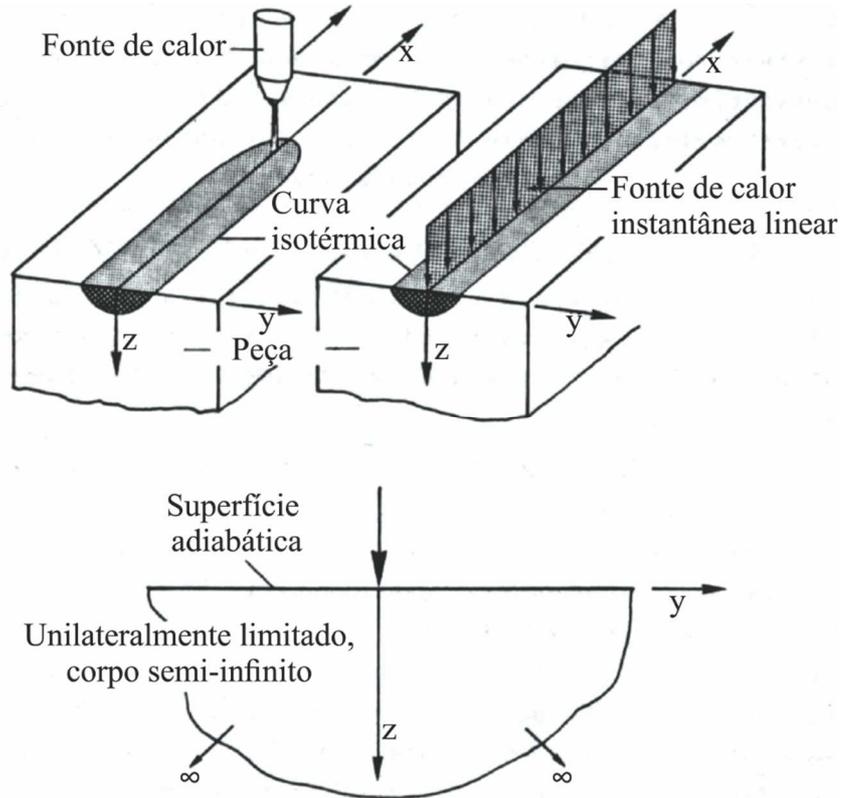
Excluindo a parte da luz incidente sobre a superfície que é refletida ou diretamente transmitida, o restante do fluxo de luz é absorvido pela massa do material. Este processo é equivalente a existência de uma fonte de calor com uma certa distribuição espacial e temporal na superfície e dentro do material (Rykalin, Uglov e Kokora, 1978).

No início do século XX Carslaw estabeleceu a base matemática necessária para descrever o comportamento da temperatura em sólidos para fontes de calor em movimento (Weingaertner, 1983). Contudo, os modelos de temperatura criados aumentam sua complexidade conforme as condições de contorno iniciais são expandidas e a não linearidade das propriedades dependentes da temperatura são consideradas. A aplicação de modelos complexos demanda o conhecimento da dependência da temperatura das variáveis individuais, como condutividade térmica, densidade e calor específico. Se os valores médios determinados por meio de um intervalo de temperatura forem utilizados para estas variáveis dependentes da temperatura, uma simplificação dos modelos poderá ser alcançada no caso de temperatura geral (Weingaertner, 1983).

Nos modelos de fluxo de calor em sólidos infinitos, onde as superfícies isotérmicas são planos paralelos em $x=0$ e o fluxo é linear, as linhas de fluxo são paralelas ao eixo X . Os resultados produzidos por estes modelos se adequam aos corpos com secção transversal pequena, onde não há perdas de calor da superfície. Em muitos casos as propriedades térmicas são assumidas como independentes da posição e da temperatura para simplificar os termos envolvidos (Carslaw e Jaeger, 1959).

Weingaertner (1983) aplicou esta simplificação das propriedades térmicas para determinar a distribuição da temperatura para uma fonte de calor concentrada, empregada na usinagem de aços assistida por plasma. O modelo pressupõe que para a velocidade empregada pela fonte de calor, a energia é distribuída uniformemente ao longo da linha de aquecimento, permitindo uma interpretação bidimensional no plano transversal da peça. Esta interpretação bidimensional é representada pelas curvas isotérmicas presentes no plano formado pelos eixos z e y na Figura 28.

Figura 28 – Modelo de distribuição de temperatura para uma fonte de calor em movimento.



Fonte: adaptada de Weingaertner (1983).

Ao assumir uma superfície de transferência de calor pontual, exibida na Figura 28, o aquecimento com a fonte de calor em questão corresponde ao efeito de uma transferência de calor instantânea linear. Além disto, outras simplificações são assumidas no modelo:

- a fonte de calor instantânea de fonte única é infinita e tem uma densidade constante de fluxo de calor acima do seu comprimento;
- o corpo aquecido deve ser considerado como semi-infinito ou unilateralmente limitado;
- a superfície do corpo deve ser considerada adiabática;
- as propriedades físicas do corpo quente são consideradas constantes.

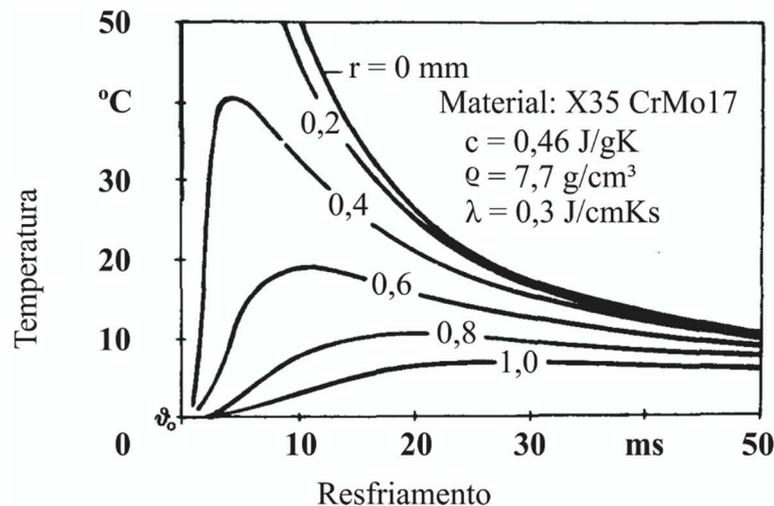
No ponto imediatamente acima da linha de atuação da fonte de calor, supondo uma fonte linear de calor, a temperatura local é infinitamente alta e exibirá um decaimento exponencial a medida que a fonte de calor se afasta. Qualquer outra região que não esteja na linha de atuação da fonte de calor é aquecida a uma temperatura máxima a partir da temperatura inicial e depois resfria. O tempo para atingir a temperatura máxima aumenta com o quadrado da distância do ponto em questão e a linha de aquecimento (Weingaertner, 1983).

As curvas isotérmicas representadas no plano formados pelos eixos z e y presentes na Figura 28 são representadas neste modelo como meias conchas cilíndricas cujo raio r é descrito pela função

$$r = (y^2 + z^2)^{1/2} \quad (13)$$

A Figura 29 exibe um exemplo da distribuição de temperatura como uma função do tempo de resfriamento para diferentes valores destes raios isotérmicos. O gráfico de resfriamento é válido para o material X35 CrMo17, que apresenta determinado calor específico c , densidade ρ e condutividade térmica λ .

Figura 29 – Comportamento da temperatura em um plano perpendicular ao eixo de aquecimento em função do tempo para diferentes raios isotérmicos.



Fonte: adaptada de Weingaertner (1983).

Raios isotérmicos diferentes modificam o tempo de resfriamento da peça. Quanto maior o raio isotérmico, menor é a densidade de energia sobre a superfície da peça, conseqüentemente, menor o patamar de temperatura atingido.

2.7 CONSIDERAÇÃO FINAIS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No tocante as estratégias de processamento associadas a movimentação do feixe de *laser* observam-se diferentes propostas. As mais comuns empregam linhas retilíneas, que são organizadas de forma paralela e varrem toda a extensão da área a ser processada. Dentre deste contexto, diferentes variações de organização das linhas são empregadas.

Os estudos que avaliam o emprego de estratégias de varredura são encontrados principalmente em aplicações voltadas à manufatura aditiva. Há grande preocupação nos efeitos da distribuição espacial e temporal do *laser* sobre as camadas originadas e sua correlação com as propriedades mecânicas, funcionais e estéticas dos componentes finais.

Contudo, a utilização de sistemas síncronos e simultâneas não é diretamente correlacionada com as estratégias de processamento. Em geral, os estudos encontrados aplicam as estratégias em áreas de processamento contidas dentro da área de atuação do *scanner*, sem a presença de outros elementos de movimentação complementar.

A maior parte das publicações que abordam a movimentação síncrona e simultânea está concentrada na sincronização de eixos lineares e *scanners* do tipo poligonal. Neste caso, o processo é caracterizado pelo deslocamento contínuo do eixo linear, de forma a deslocar a linha processada em função da rotação do disco multifacetado. Como o princípio de funcionamento dos *scanners* poligonais promove apenas deslocamentos unidirecionais do feixe de *laser*, estas publicações não abordam situações onde o processamento envolve mudanças no sentido de movimentação dos eixos e do *scanner*.

Sendo assim, a aplicação das estratégias normalmente utilizadas em sistema que possuem unicamente a movimentação do *scanner* não é igualmente observada nos sistemas que combinam mais eixos de movimentação. Nesse sentido, este trabalho busca complementar o conhecimento associado a utilização de diferentes estratégias em sistemas dotados de movimentação síncrona e simultânea.

3 BANCADA EXPERIMENTAL DE PROCESSAMENTO COM *LASER*

A bancada experimental é composta pelo sistema de movimentação, pelas fontes de *laser*, componentes mecânicos e eletroeletrônicos, bem como os demais periféricos necessários. Também se inclui na composição da bancada a integração mecânica e eletroeletrônica, a qual permite a interligação dos elementos de forma a executar suas funções.

A função primária da bancada experimental é permitir a movimentação síncrona e simultânea entre o *scanner* galvanométrico e os eixos lineares. Neste contexto, a bancada se constitui como ferramenta de geração de dados que permite relacionar parâmetros e estratégias à sua própria capacidade de movimentação.

Contudo, sua concepção também envolve atender requisitos definidos pelos clientes e usuários finais do sistema. Estes por sua vez, terão a bancada como instrumento para a pesquisa e desenvolvimento de processamentos à *laser*, após conclusão deste trabalho.

Os tópicos a seguir apresentam e esclarecem os requisitos da bancada experimental e as soluções adotadas na sua concepção.

3.1 REQUISITOS DA BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental apresenta como principais clientes o Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) e seus respectivos colaboradores. Com base nas expectativas desses clientes foram estabelecidos requisitos relacionados à funcionalidade e desempenho da bancada experimental. A listagem final destes requisitos é a seguinte:

- a) possuir reconfigurabilidade para ser integrada a outros sistemas do laboratório;
- b) possuir montagem de componentes que potencialize uso do curso de movimentação dos eixos para o processamento de materiais;
- c) possibilitar a utilização de mais de uma fonte de *laser* para o mesmo *scanner*;
- d) possuir operação segura para os operadores e demais instalações;
- e) permitir acesso e possibilidade de alteração de parâmetros associados ao sistema de movimentação e emissão *laser*;
- f) realização de múltiplos tipos de processamentos de material empregando *laser*.

Com base nestes requisitos foram estabelecidas soluções de projeto que permitissem a concepção da bancada experimental de forma a atender tanto sua função primária quanto os requisitos estabelecidos pelos clientes. Os itens a seguir apresentam as soluções adotadas para sua concepção final.

3.2 SOLUÇÕES ADOTADAS

A bancada experimental é baseada na integração de sistemas fornecidos por diferentes fabricantes. O sistema de movimentação é fornecido pela empresa Aerotech. As fontes de *laser* são fabricadas pela empresa IPG Photonics. A estrutura de sustentação, enclausuramento e gabinete elétrico são desenvolvimentos do Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP). Nos tópicos a seguir é feita a descrição destes itens, bem como a sua integração.

3.2.1 Sistema de movimentação

O sistema de movimentação é composto por cinco eixos. Três eixos lineares são responsáveis pelo deslocamento nas direções X, Y e Z. Os dois eixos restantes, A e B, fazem referência a movimentação do feixe de *laser* obtida por meio do *scanner* galvanométrico 2D.

Os eixos lineares X e Y são compostos por duas unidades ECO165LM (Figura 30a), baseadas no uso de motor linear e de guias lineares de esferas recirculantes. Ambos os eixos possuem curso de 300 mm e velocidade máxima de 150 mm/s. A aceleração no eixo X é limitada a 2000 mm/s² e no eixo Y a 4000 mm/s². Estes eixos atuam na movimentação do objeto a ser processado.

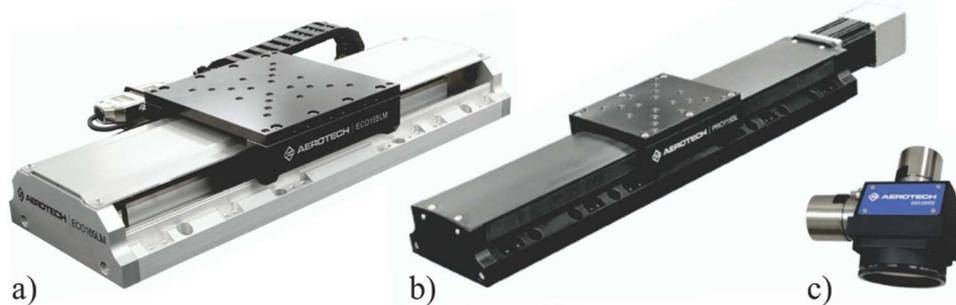
O eixo Z, modelo PRO115SL (Figura 30b) é baseado no uso de fuso e guias lineares com esferas recirculantes. Possui 300 mm de curso, velocidade de 50 mm/s e aceleração de 1000 mm/s². Este eixo, posicionado verticalmente, é responsável pelo ajuste da altura do *scanner* em relação ao plano formado pelos eixos X e Y. Conseqüentemente, sua movimentação permite ajustar a distância relativa entre o ponto focal do *laser* e a amostra.

A movimentação do feixe de *laser* em si é realizada pelo *scanner* 2D, modelo AGV-14HPO (Figura 30c). O *scanner* possui uma abertura de 14 mm de diâmetro para entrada do feixe. A deflexão é realizada por dois espelhos planos de berílio com revestimento dielétrico próprio para o comprimento de onda na faixa de 1064 nm. A movimentação de cada espelho desloca o feixe em uma direção sobre a área de atuação do *scanner*.

A lente *F-theta* que equipa o *scanner* é fabricada por Jenoptik e o modelo utilizado possui a denominação JENar™ 170-1030...1080-170. Seu comprimento focal é de 170 mm, o que permite uma área de alcance de 111 x 111 mm². A velocidade máxima de deslocamento do feixe é de 8000 mm/s (válida para a lente *F-theta* em questão) com aceleração de 850000 mm/s² para ambos os eixos.

Mais detalhes sobre a lente *F-theta* estão disponíveis no ANEXO A e especificações complementares do sistema de movimentação encontram-se disponíveis no ANEXO B.

Figura 30 – Componentes do sistema de movimentação: a) eixo ECO165LM-300, b) eixo PRO115SL-300 e c) *scanner* galvanométrico AGV-14HPO. (Proporções aproximadas).



Fonte: Aerotech (2017a), Aerotech (2017c), Aerotech (2018).

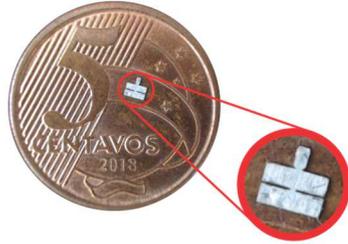
3.2.2 Fontes de *laser* e ampliação da capacidade de processamento

Para atender ao requisito de realizar múltiplos tipos de processamento a *laser* e expandir a capacidade produtiva do LMP, a bancada experimental apresenta a possibilidade de atuação com duas fontes *laser* distintas. Esta característica permite que diferentes processos possam ser realizado no mesmo equipamento.

A fonte de *laser* com emissão pulsada apresenta a possibilidade de atuar nos processos de remoção de material, corte, gravação, marcação e texturização de superfícies. A Figura 31 exhibe exemplos dos processamentos relacionados a remoção de material e alteração de superfície realizados na bancada experimental.

A integração da fonte de *laser* contínuo YLR permite a realização dos processos de soldagem de materiais. A Figura 32 exhibe exemplos de soldagens autógenas realizadas. São apresentados cordões obtidos por meio do deslocamento retilíneo do feixe sobre o material, onde na imagem da secção transversal é possível observar o formato característico obtido na soldagem a *laser*. Em uma variante do processo, o deslocamento do feixe sobre a amostra é executado sobre a forma de um movimento oscilatório (*wobble*). O caso exibido corresponde a movimentos oscilatórios que descrevem uma trajetória com geometria circular. A frequência desta oscilação, na ordem de centenas de Hz, é possível graças à atuação do *scanner* galvanométrico, que permite atingir a velocidade e a aceleração necessárias. Também é exibida a soldagem autógena de uma tela de aço inoxidável com espessura de 120 μm que não seria facilmente obtida em processos convencionais de soldagem a arco.

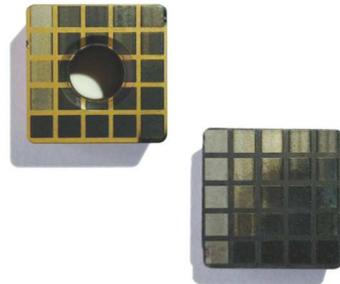
Figura 31 – Exemplos de remoção e alteração de materiais empregando o *laser* pulsado.



Corte por remoção em chapa com espessura de 100 μm



Corte de cilindros de poliuretano



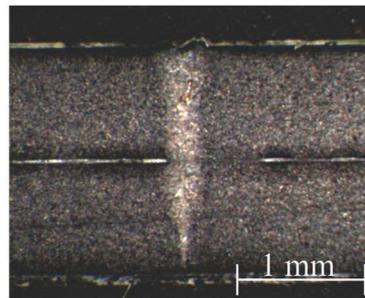
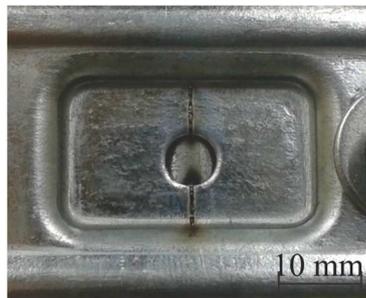
Texturização em insertos de metal duro



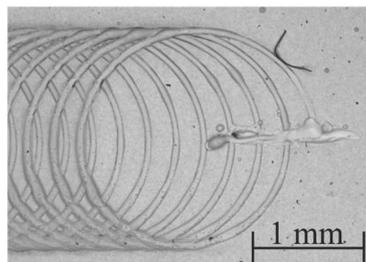
Remoção de tinta

Fonte: elaborada pelo autor (2020).

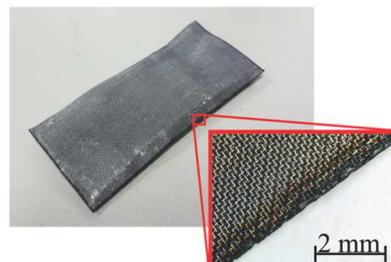
Figura 32 – Exemplos de soldagens obtidas com utilização do *laser* contínuo.



Soldagem autógena empregando potência de 358W e velocidade de 1500 mm/min



Oscilação do feixe (amplitude de 2 mm a 200 Hz)



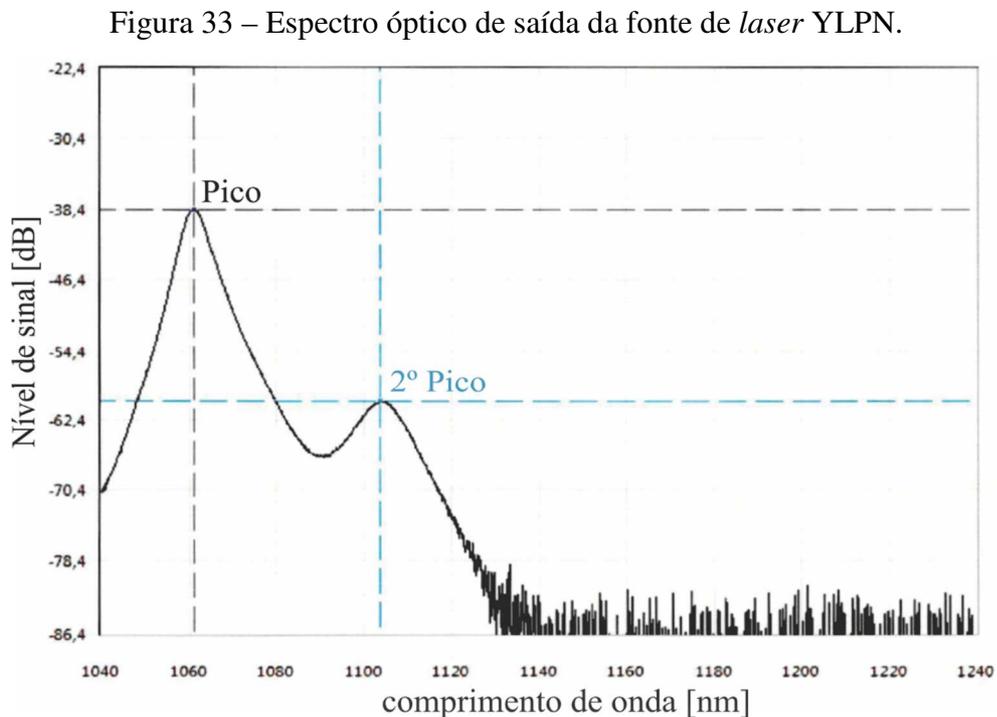
Soldagem de telas com espessura de 120 μm

Fonte: elaborada pelo autor (2020).

As características técnicas destas duas fontes de *laser* que equipam a bancada experimental são descritas nos itens a seguir:

3.2.2.1 Fonte de laser YLPN – pulsado

A fonte de *laser* YLPN é fabricada por IPG Photonics, modelo YLPN-1-1x120-50-M. Uma de suas características é a emissão de *laser* na forma pulsada. A potência nominal é de 50 W. O comprimento de onda emitido é de 1061,3 nm, embora o espectro óptico apresente um segundo pico de emissão. A emissão secundária ocorre em 1103,8 nm. O gráfico na Figura 33 apresenta esse espectro óptico de saída da fonte YLPN.



Fonte: adaptada de IPG Photonics ([2017]).

A fonte de *laser* em questão permite a seleção da duração dos pulsos emitidos. Há disponíveis oito larguras de pulso predefinidas, com possibilidade de variação da taxa de repetição de pulsos utilizada. A faixa de frequência disponível varia conforme a duração de pulso escolhida. A Tabela 1 resume os parâmetros disponível para seleção na fonte de *laser* em questão.

A fonte possui uma fibra óptica de condução do feixe com 2 m de comprimento. Na extremidade da fibra encontra-se um conjunto óptico (colimador) responsável por colimar o feixe. Fibra e colimador vêm acoplados de fábrica e não podem ser desconectados. O diâmetro

do feixe de *laser* na saída do colimador é de 7,6 mm, considerando o método $1/e^2$. Segundo as informações fornecida pelo fabricante, a qualidade do feixe (parâmetro M^2) é de 1,8. Estas e outras características do *laser* YLPN estão disponíveis no ANEXO C.

Tabela 1 – Larguras de pulso e taxas de repetição de pulsos disponíveis na fonte de *laser* YLPN.

Duração de pulso (ns)	Taxa de repetição de pulso (kHz)		
	Mínima	Nominal	Máxima
1	120	5000	5000
2	60	3000	5000
4	30	1500	5000
8	15	750	5000
16	8	400	5000
30	4	220	2200
50	3	150	1500
120	2	50	505

Fonte: IPG Photonics ([2017])

O diâmetro do ponto focal, em função das características da luz *laser*, configuração do sistema óptico e por aplicação da Equação (9), apresenta um valor de 78 μm .

O controle dos parâmetros é realizado por meio de dois conectores elétricos localizados na fonte de *laser*. O conector do tipo DB9 oferece uma interface de comunicação serial com protocolo RS232 e o conector do tipo DB25 constitui a interface de controle digital.

A interface de comunicação serial (DB9) é dedicada ao controle da fonte de *laser* via protocolo de comunicação RS232. Por meio deste protocolo é possível enviar comandos do tipo leitura (*read*) ou configuração (*set*). Os comandos de leitura (*read*) são utilizados para obter da fonte de *laser* o estado atual de determinada variável, por exemplo, a temperatura do equipamento, o modo de operação, a potência selecionada, a largura de pulso atual, entre outros. Os comandos de configuração (*set*) são usados para alterar valores de parâmetros e executar ações, por exemplo, ligar e desligar a emissão do *laser*, definir a taxa de repetição dos pulsos, reconhecer alarmes, entre outros.

Já na interface de controle digital (DB25) estão localizadas as entradas responsáveis pela seleção da potência de saída. Neste modelo de fonte de *laser*, a potência é definida com base no estado de oito entradas digitais. Cada uma das oito entradas pode assumir valor

digital 0 ou 1. A combinação dos estados possíveis gera uma faixa de valores de 0 a 255 (8 bits), onde 0 corresponde à 0 watts e 255 à potência nominal da fonte de *laser*.

Outras entradas presentes na interface de controle digital são destinadas a habilitar a fonte de *laser* (*Emission Enable* - EE), comandar a emissão (*Emission Modulation* - EM) e possibilitar o controle externo da taxa de repetição de pulsos (*Sync*). Também consta nesta interface a entrada para habilitar o *laser* vermelho (*Red Guide* - RG), utilizado como indicador de posição do feixe, uma vez que o *laser* de processamento (infravermelho) não é visível ao operador.

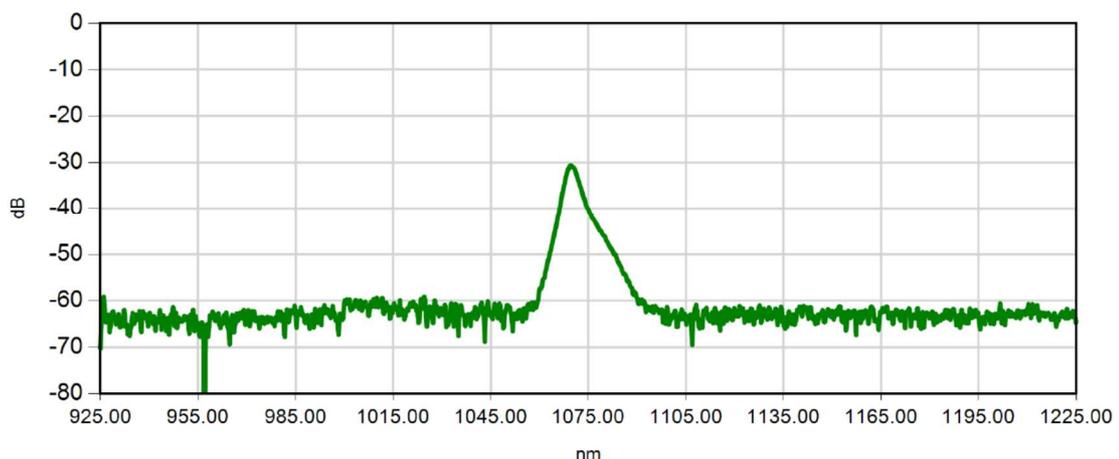
A interface de controle digital apresenta uma entrada denominada *Auxiliar Emission OFF* (*AuxOFF*). Sua função é atuar como um comando auxiliar capaz de desligar todos os estágios ópticos da fonte de *laser*, independente de outros sinais de comando. Isto permite suprimir rapidamente a emissão *laser* em condições de emergência ou de operação inadvertida do equipamento.

3.2.2.2 Fonte de *laser* YLR – contínuo

A fonte de *laser* YLR apresenta uma emissão contínua com potência máxima de 400 W. A denominação completa do modelo utilizado é YLR-400-AC-Y14. O comprimento de onda emitido está centralizado em 1069,9 nm, como apresentado espectro óptico na Figura 34.

Figura 34 – Espectro óptico de saída do *laser* YLR.

FWHM: 3.868nm, Central Wavelength: 1069.889nm



Fonte: IPG Photonics (2014).

O feixe de *laser* é conduzido por uma fibra óptica com 10 m de comprimento. Um conector do tipo QBH ocupa a extremidade da fibra, o que permite sua conexão a diferentes

sistemas ópticos. Na bancada experimental o conector QBH está acoplado a um colimador IPG, modelo D25-AC. Consta na folha de resultados de testes fornecida pelo fabricante que o parâmetro M^2 do feixe de *laser* é de 1,2 após a saída deste colimador.

Considerando ainda que o feixe de *laser* colimando apresenta diâmetro de 6,8 mm, que o comprimento focal da lente *F-theta* é de 170 mm e a Equação (9), o diâmetro do ponto focal obtido com uso do *laser* YLR é de 58 μm . Outras características da fonte de *laser* YLR estão disponíveis no ANEXO D.

A interface de sinais desta fonte de *laser* é formada por dois conectores. O conector de 7 pinos disponibiliza o *status* de operação do dispositivo e a conexão direta aos contatos do botão de emergência presente no painel frontal da fonte. Esta última conexão é utilizada para que emergências acionadas diretamente na fonte sejam reconhecidas por outros sistemas nos quais a fonte encontra-se integrada.

O segundo conector, de 24 pinos, apresenta uma série de funções. Estão presentes sinais para comunicação serial e para saída analógica, que permitem monitorar a potência *laser* emitida. Também estão presentes sinais para habilitar o modo de operação remota (*Remote Key Switch*) e para inicialização remota do circuito de geração (*Remote Star Button*). Na operação remota a fonte é comandada por um sistema externo que não seja o painel frontal da própria fonte. Estão presentes ainda a entrada analógica para seleção do valor de potência emitida (*Analog Input to Control Current*), comando para disparo (*Modulation +*) e acionamento do *laser* de emissão vermelha (*Guide Control*).

O conector de 24 pinos também apresenta entradas dedicadas para desligamento emergencial do *laser*. Estas entradas, denominadas *interlock*, estão conectadas ao sistema interno de intertravamento de segurança da fonte de *laser*, que permitem o desligamento a distância em caso de emergência. O acionamento do *interlock* da fonte YLR é realizado por meio de dois canais (Ch1 e Ch2). Cada canal apresenta dois pinos de entrada, que devem ser conectados entre si para permitir a liberação do funcionamento da fonte de *laser* em questão.

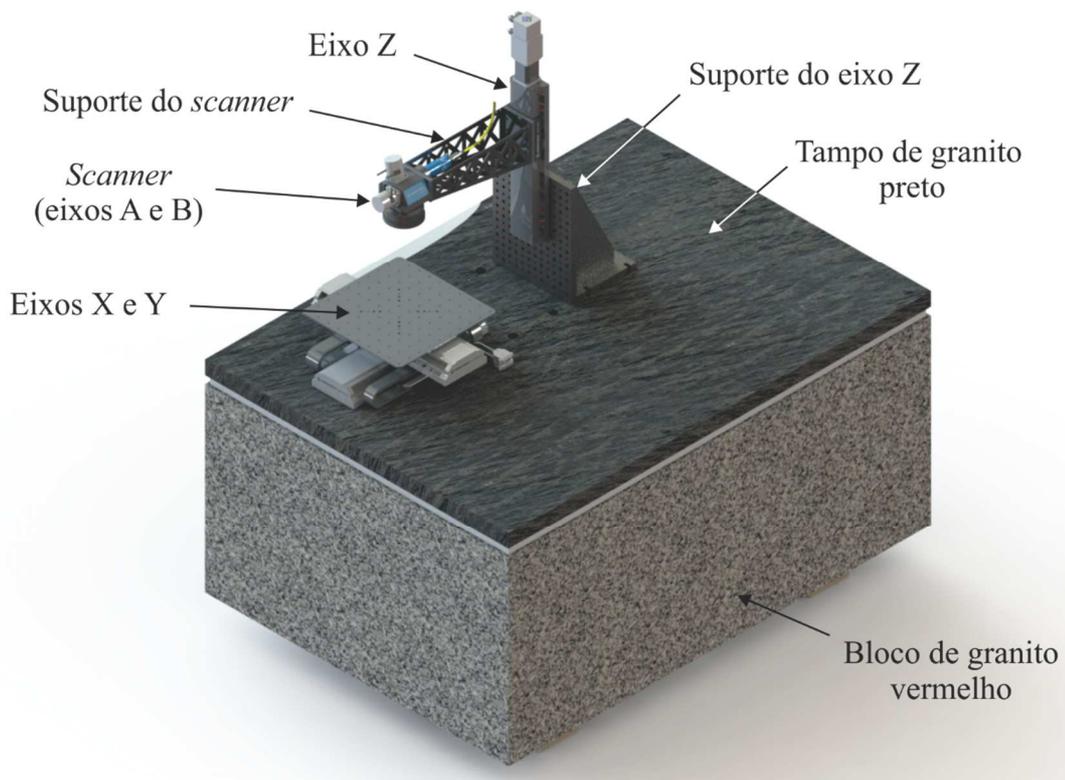
3.2.3 Integração

A integração consiste na disposição e interligação dos componentes de diferentes fabricantes que compõem a bancada experimental. As soluções de integração adotadas e exibidas a seguir têm como objetivo, além de permitirem a movimentação síncrona e simultânea, atingir os requisitos estabelecidos pelos clientes.

3.2.3.1 Integração mecânica

Um bloco de granito vermelho com tampo de granito preto foi utilizado como estrutura de sustentação da bancada experimental. A massa acrescentada pelo promove a estabilidade dinâmica e dimensional (térmica) ao equipamento (STOETERAU, 1999). Furos com diâmetro 40 mm foram realizados no tampo para embutir insertos de aço com rosca interna. Estes insertos roscados atuam como pontos de fixação para os componentes do sistema de movimentação. A Figura 35 apresenta um modelo dos itens mecânicos mencionados anteriormente.

Figura 35 – CAD do conjunto mecânico da bancada experimental.



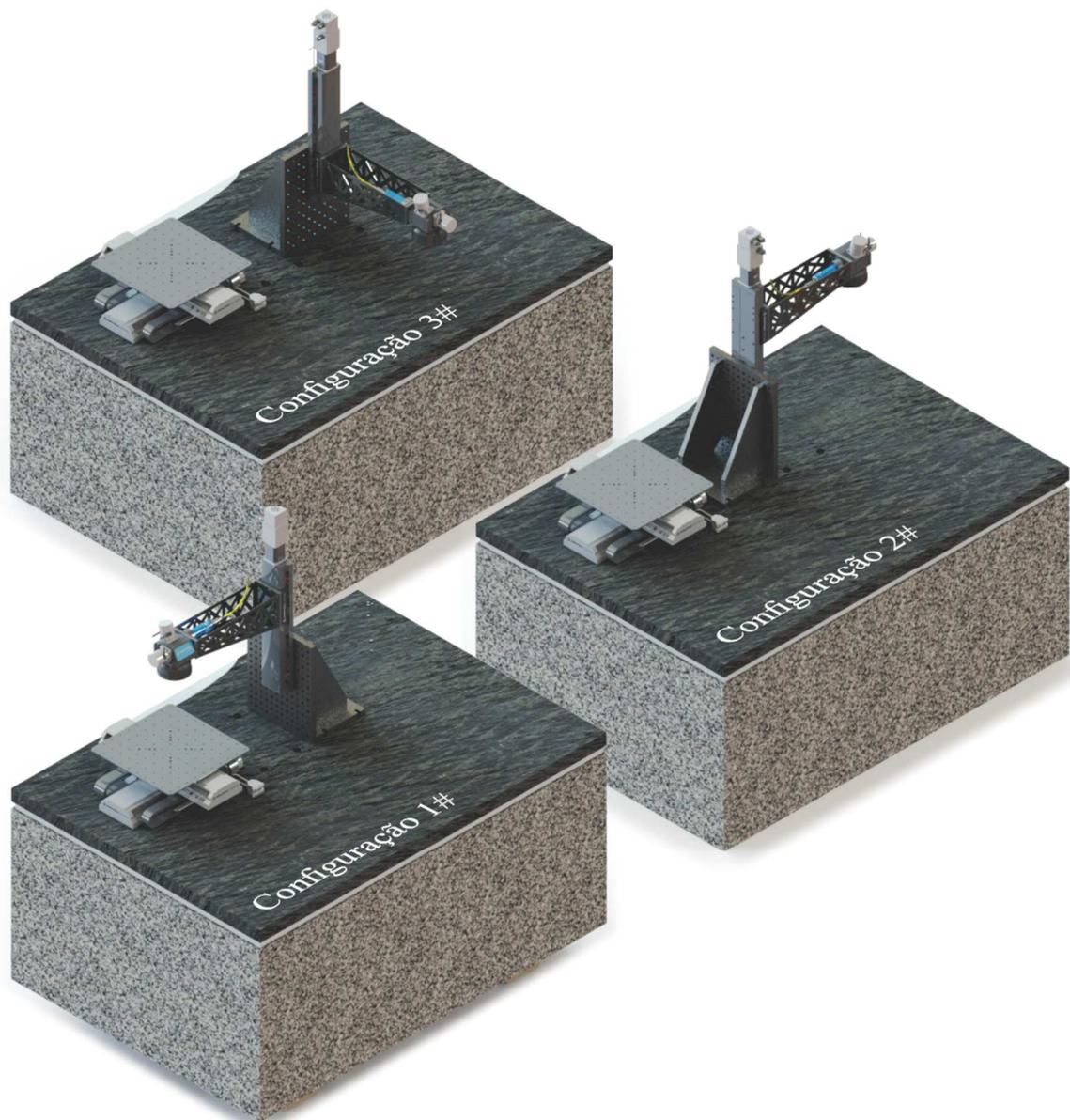
Fonte: elaborada pelo autor (2020).

O conjunto de eixos X e Y é fixado diretamente sobre o tampo por meio dos insertos roscados. O eixo Z é montado verticalmente com auxílio de um suporte em formato de L com nervuras de reforço. Uma estrutura de suporte construída em aço é empregada para sustentar o *scanner* galvanômetro acima da área de trabalho. A estrutura de suporte do *scanner* por sua vez está conectada ao carro móvel do eixo Z.

Para atender ao requisito de reconfigurabilidade a bancada foi projetada para possuir diferentes postos de trabalho. A furação de fixação do sistema de movimentação ao tampo de

granito preto apresenta múltiplas opções de utilização. Desta forma o sistema de movimentação do feixe de *laser* pode ser realocado ao menos em três diferentes configurações sobre a bancada experimental. Estas configurações de posicionamento, apresentadas na Figura 36, permitem o processamento de materiais tanto sobre os atuais eixos X e Y, quanto sobre aplicações e dispositivos que futuramente podem compor a bancada experimental.

Figura 36 – Opções de reconfiguração da bancada experimental.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

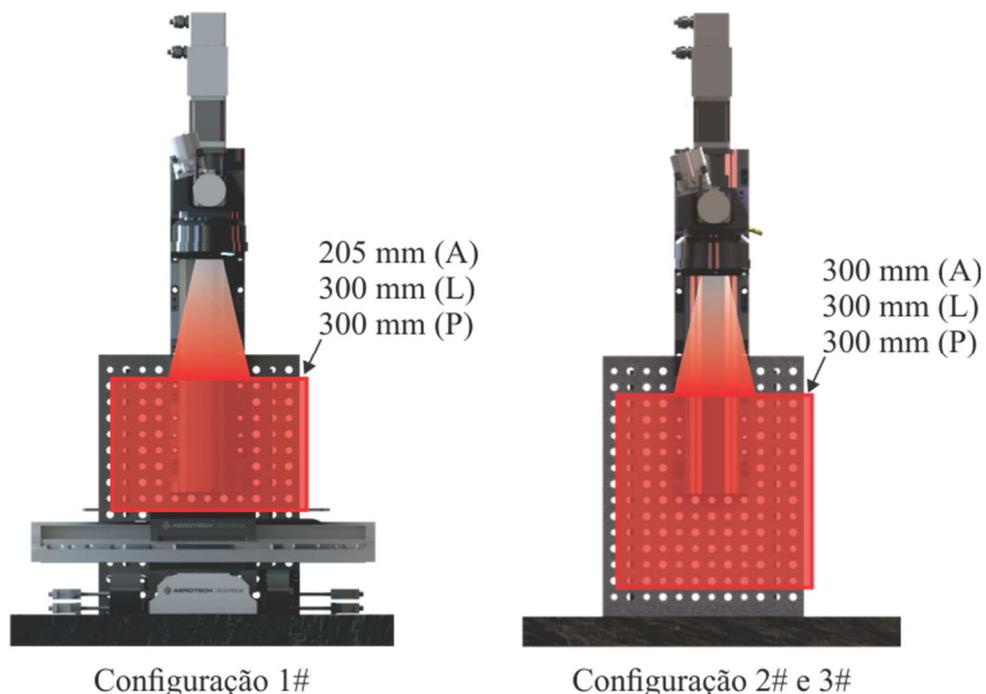
A primeira configuração (1#) posiciona o feixe de *laser* defletido pelos espelhos do *scanner* galvanométrico sobre o conjunto formado pelos eixos X e Y. A configuração 2# permite que o *scanner* galvanométrico seja posicionado em direção a extremidade oposta do

tampo de granito preto. A terceira configuração (3#) disponibiliza o feixe de *laser* sobre uma área mais ao centro do tampo.

Embora não representado na Figura 36, ainda é possível dispor a bancada em uma configuração que projeta o *scanner* galvanométrico para fora da área sobre o tampo de granito preto. Seria uma posição oposta a configuração de número três. Nesta condição seria possível a operação do *scanner* sobre uma estação de processamento adjacente ao bloco de granito vermelho. Tal configuração também permitiria processar componentes cuja altura supera a máxima distância entre o ponto focal e a superfície do tampo.

O requisito de montagem que potencializasse o uso do curso dos eixos de movimentação considera as três configurações anteriormente apresentadas na Figura 36. Na condição que envolve processamento sobre os eixos X e Y o volume acessível ao ponto focal do feixe de *laser* possui dimensões de 300 x 300 x 205 mm³. Esta última dimensão é atingida pela elevação total do eixo Z. A Figura 37 exhibe a representação dos volumes de trabalho atingíveis para as diferentes configurações de montagem.

Figura 37 – Volumes disponíveis para processamento com o feixe de *laser* nas diferentes configurações de montagem da bancada experimental.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

O processamento nas configurações 2# e 3# da Figura 37 dispõe da área total atingível pelos eixos lineares. Contudo, o volume de 300 x 300 x 300 mm³ está situado 37 mm acima da

superfície do tampo de granito preto. Havendo necessidade explícita de processamentos imediatamente próximo ao tampo é possível modificar a posição de fixação do eixo Z. Como o suporte em L apresenta uma série de furações em sua face vertical o eixo Z pode ser reposicionado em uma posição mais abaixo.

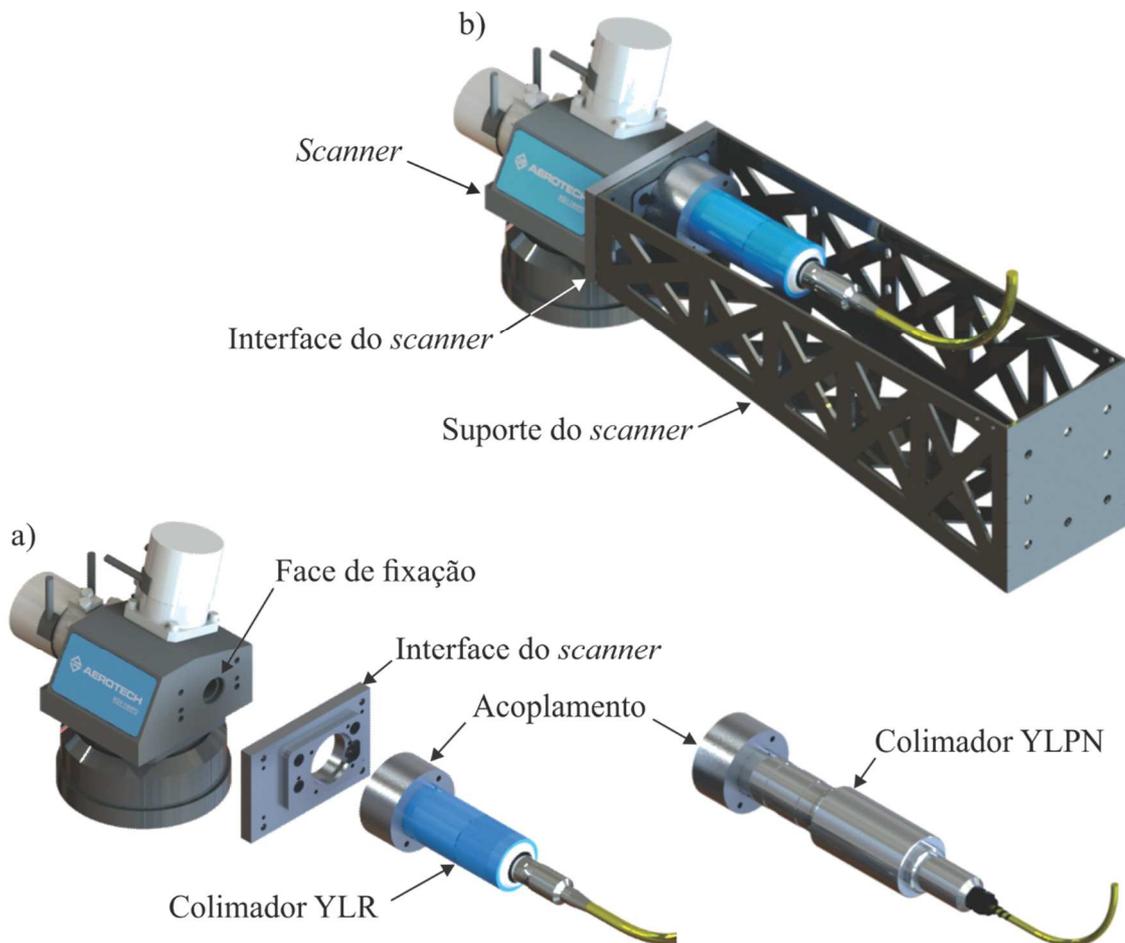
Para atingir o requisito de possibilitar a utilização de mais de uma fonte de *laser* foi concebido um componente denominado interface do *scanner*. Presente entre o *scanner* e seu suporte, a interface permite a fixação de um componente denominado acoplamento. O acoplamento, como o nome sugere, tem a função de acoplar o colimador a interface do *scanner*. Seu diâmetro externo e posição das furações são por projeto fixos, contudo, o diâmetro interno do acoplamento pode ser alterado conforme o diâmetro do colimador empregado. Desta forma, uma nova fonte de *laser* que venha a ser utilizada na bancada experimental pode ter sua óptica de saída conectada ao *scanner*.

A Figura 38a exibe em vista explodida a montagem composta por *scanner*, interface do *scanner*, acoplamento e colimador da fonte de *laser* YLR. O colimador da fonte de *laser* YLPN também é apresentado com seu respectivo acoplamento. Na Figura 38b é possível observar a montagem dos itens anteriores em conjunto com o suporte do *scanner*. O espaço existente no interior da estrutura do suporte do *scanner* permite acomodar o colimador e propicia a saída da fibra óptica.

A interface do *scanner* também foi concebida para permitir correções no posicionamento relativo entre o plano formado pela face de fixação do *scanner* e os planos formados pelos eixos X e Y. As correções são obtidas com ajuste de parafusos que alteram o espaçamento entre a interface do *scanner* e o suporte do *scanner* em diferentes pontos. No entanto, outros erros de montagem podem comprometer o alinhamento do sistema, prejudicando por exemplo a colinearidade entre *scanner* e eixos lineares.

A colinearidade corresponde ao alinhamento entre os sistemas de coordenadas do *scanner* e dos eixos lineares X e Y. Esta característica é necessária para atingir um correto padrão de movimentação síncrona e simultânea, associado ao alinhamento entre os sistemas de coordenadas (Zimmermann, Jaeggi e Neuenschwander, 2015). A colinearidade pode ser corrigida por meio de um procedimento de alinhamento. Este procedimento é baseado na movimentação dos eixos para produzir uma marcação com *laser*. A marcação é avaliada para fornecer um valor quantitativo do alinhamento atual. O resultado pode ser aplicado no *software* de movimentação para corrigir um eventual desalinhamento entre os envolvidos.

Figura 38 – Detalhe da interface do *scanner* (a) e montagem dos componentes em conjunto com a estrutura de suporte do *scanner* (b).



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

O procedimento consiste em marcar uma linha com determinado comprimento utilizando um dos eixos do *scanner* (A ou B). Uma segunda linha de mesmo comprimento é marcada sem sentido posto ao anterior utilizando o eixo linear corresponde (X para A ou Y para B). Os sistemas de coordenada estão alinhados quando a distância entre as extremidades das linhas é zero. Caso contrário, um ângulo θ será observado entre as duas linhas, sendo seu valor em graus determinado por (Aerotech, 2017b):

$$\theta = \text{acos} \left[1 - 0,5 \cdot \left(\frac{\text{distância entre extremidades}}{\text{comprimento da linha}} \right)^2 \right] \quad (14)$$

O valor de θ pode ser aplicado em uma função chamada “*Galvo Rotation*”, presente no *software* de controle de movimento. A função promove uma rotação no sistema de coordenadas do *scanner* equivalente ao ângulo θ . Esta correção compensa o desalinhamento mecânico do *scanner* em relação aos eixos lineares.

Um ensaio de colinearidade foi realizado após a montagem do sistema de movimentação sobre o bloco de granito. Duas linhas foram marcadas sobre uma chapa de aço inoxidável e sua imagem obtida em microscópio óptico. A distância entre as extremidades das linhas, medida no *software* ImageJ, indicou o valor de $(140,87 \pm 1,34) \mu\text{m}$. Este valor quando aplicado na Equação (14), juntamente com o comprimento da linha (50 mm), resulta em ângulo θ de $0,16^\circ$. Após aplicada a correção da colinearidade foi possível observar a coincidência das linhas traçadas com *scanner* e eixos lineares. A Figura 39 apresenta o procedimento de marcação para obtenção do ângulo θ e o resultado atingido após a correção da colinearidade ser implementada em *software*.

Figura 39 – Procedimento de realização das linhas e resultado após a correção de colinearidade entre *scanner* e eixos lineares.

Procedimento de obtenção do ângulo θ :

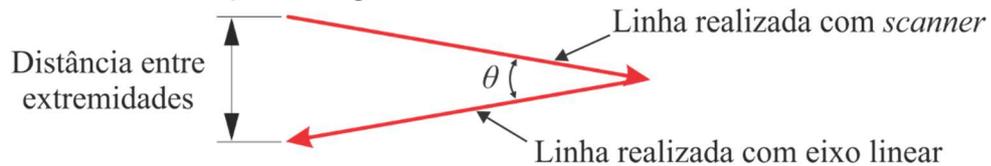


Imagem das extremidades das linhas produzidas:



Antes da correção de colinearidade

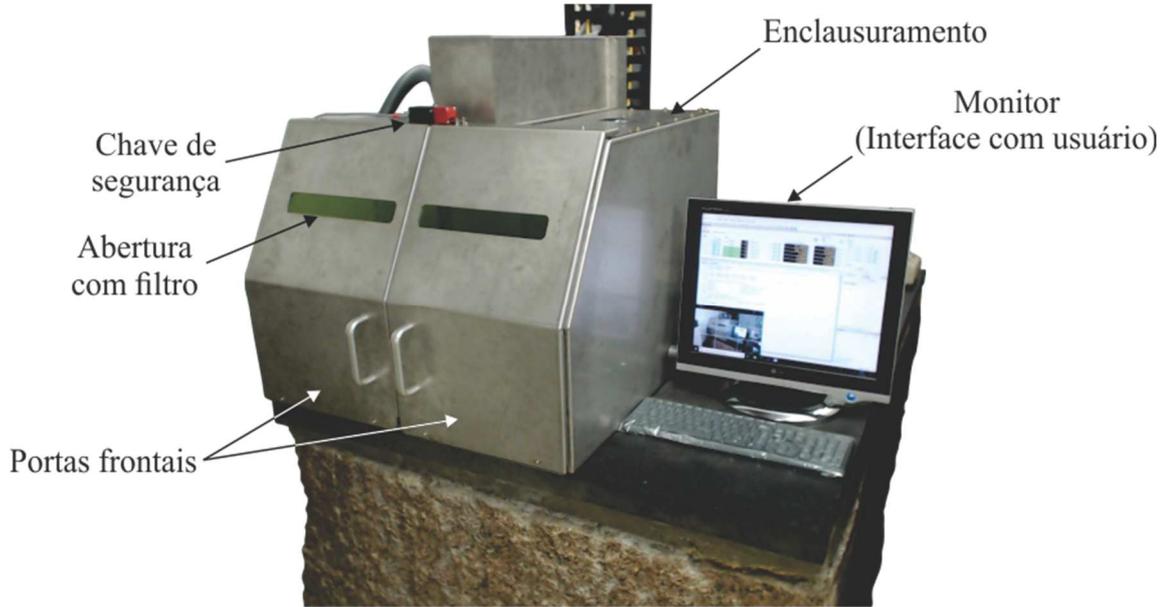


Após correção de colinearidade

Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Para atender os requisitos de operação segura foi projetada, construída e montada uma estrutura de enclausuramento. Sua função é proteger o ambiente e sobretudo o operador da incidência direta e reflexiva da radiação *laser* que é direcionada pelo *scanner* galvanométrico. O enclausuramento é composto por chapas metálicas recortadas e dobradas. O acesso ao volume de trabalho é realizado por meio das portas frontais, cujo o fechamento é monitorado por uma chave de segurança. Para visualização segura do processo foram incluídas aberturas equipadas com filtros de policarbonato específicos para o comprimento de onda da luz *laser* utilizada. A Figura 40 exibe a bancada com a sua estrutura de enclausuramento acompanhada do monitor utilizado como interface com o usuário.

Figura 40 – Bancada experimental com sua estrutura de enclausuramento.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

3.2.3.2 Integração eletroeletrônica

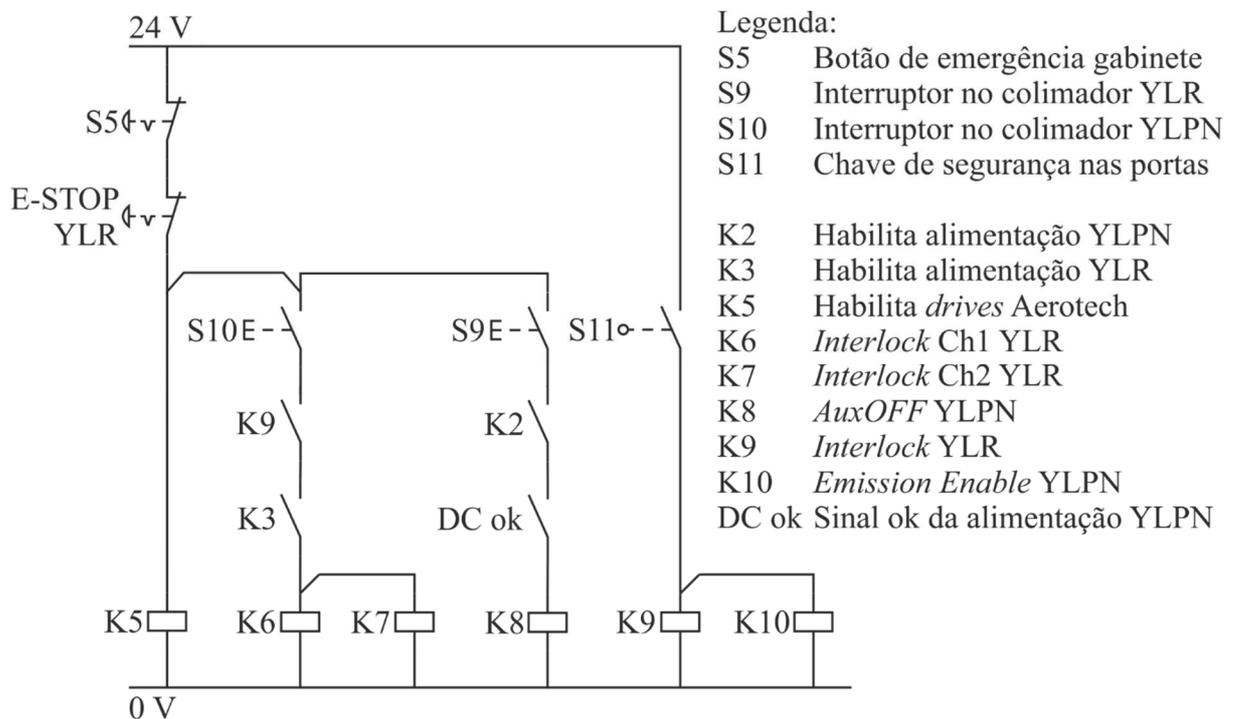
Outra solução técnica adotada para assegurar a operação segura, porém associada a integração eletroeletrônica, foi a inclusão do circuito de intertravamento de segurança. Este circuito garante que a emissão da radiação *laser* será efetuada apenas quando determinadas condições de funcionamento são atendidas. Uma destas condições é o fechamento da estrutura de enclausuramento, que é monitorada pela chave de segurança localizada na parte superior das portas frontais.

Uma condição de funcionamento que também deve ser atendida é a seleção correta da fonte de *laser* a ser utilizada no processamento. Como a bancada conta atualmente com duas fontes *laser*, o operador poderia inadvertidamente selecionar a fonte não acoplada ao *scanner* galvanométrico. Para evitar que esta seleção acione uma fonte de *laser* indevida, foi implementado um interruptor em cada acoplamento dos colimadores. Desta forma, mesmo que selecionada determinada fonte de *laser*, somente caso esta possua seu colimador conectado ao *scanner*, haverá emissão luminosa da fonte em questão.

A bancada apresenta dois botões de emergência, um deles localizado no painel de comando, situado junto ao gabinete elétrico e outro situado no painel frontal da fonte de *laser* YLR. O não acionamento destes botões de emergência também é condição necessária para a emissão de *laser*.

As condições de funcionamento citadas (fechamento das portas, conexão do colimador ao *scanner* e liberação dos botões de emergência) e outros sinais elétricos são encadeados em um circuito lógico. Quando todas as condições de funcionamento seguro e apropriado são atendidas, o circuito lógico habilita os blocos responsáveis por alimentar e/ou liberar sinais que ativam os circuitos de potência responsáveis pela efetiva geração de luz *laser*. Esta ligação lógica que compõe o circuito de intertravamento de segurança é apresentada na Figura 41.

Figura 41 – Representação do circuito de intertravamento de segurança.



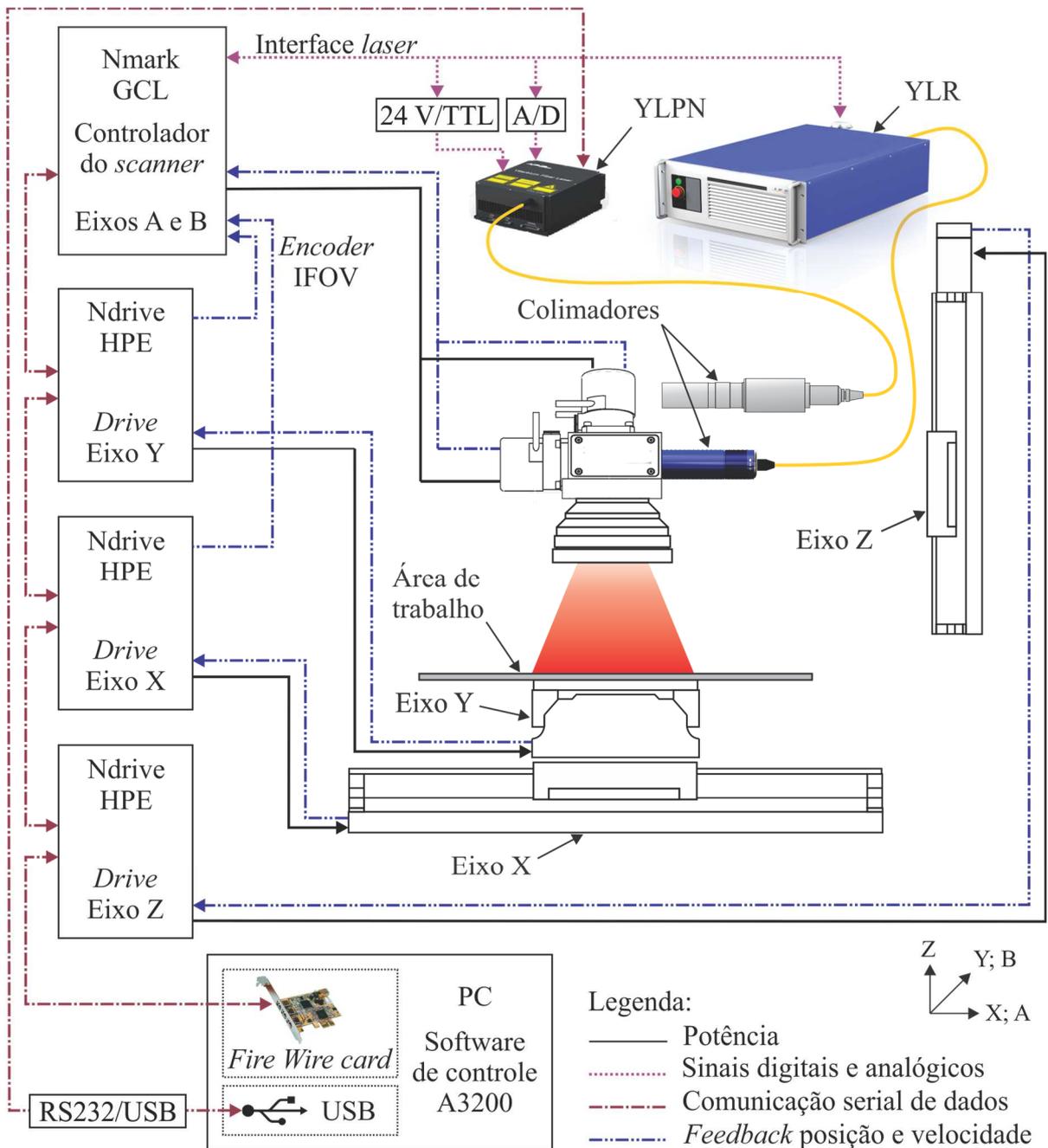
Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Para obter a movimentação síncrona e simultânea, o controlador do *scanner*, modelo Nmark GCL, adquire a posição real dos espelhos utilizando a informação fornecida pelo sensor de posição de cada um dos eixos do *scanner* galvanométrico. A informação de posicionamento real dos eixos lineares X e Y também é obtida de cada *drive* Ndrive HPE. Todos estes sinais de realimentação permitem estabelecer a posição na qual o ponto focal do *laser* se encontra, e determinar o comando para emissão do feixe de *laser*.

A posição do eixo Z não é realimentada diretamente para o controlador do *scanner*, uma vez que a dinâmica elevada é requerida nos eixos X e Y. O eixo Z é considerado um auxílio para o posicionamento do *scanner* na sua altura de trabalho em relação a peça. Nesta abordagem, o eixo Z não é incluído no escopo da movimentação síncrona e simultânea.

É utilizado um *software* de controle de movimento baseado em computador denominado A3200, que gerencia o funcionamento dos componentes do sistema e atua como interface com o usuário. Os elementos de controle dos eixos lineares e do *scanner* compartilham um barramento de comunicação formando uma rede baseada no padrão *FireWire*. A interligação entre os itens eletroeletrônicos do sistema de movimentação e das fontes de *laser* é apresentada na Figura 42.

Figura 42 – Interligação dos componentes do sistema de movimentação e fontes de *laser*.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

O controle da potência e da emissão do feixe de *laser* é realizado pelo controlador do *scanner* (Nmark GCL). Este apresenta entradas e saídas de sinal controladas pelo *software* A3200. Uma saída analógica com tensão de 0 V a 10 V presente neste componente determina a intensidade da potência *laser* que deve ser emitida.

Para a fonte de *laser* YLR o valor de tensão é diretamente recebido na sua entrada analógica *Analog Input to Control Current*. No entanto, a fonte de *laser* YLPN tem sua potência de saída determinada por um conjunto de oitos pinos digitais (entrada de 8 bits) e exige uma etapa de conversão analógica para digital (representada pelo bloco A/D na Figura 42). A fonte de *laser* YLPN também se comunica com computador por meio um conversor (representado pelo bloco RS232/USB na Figura 42) que interliga a interface de comunicação serial RS232 ao barramento USB. Esta ligação permite a alteração completa da gama de parâmetros disponíveis para configuração na fonte de *laser* pulsado.

O comando para a emissão do feixe de *laser* está atrelado a uma saída digital que assume 0 V em nível lógico baixo e 24 V em nível lógico alto. Os valores de tensão são adequados para a entrada *Modulation +* que comanda emissão no *laser* YLR. Porém a fonte de *laser* YLPN possui entradas com nível lógico do tipo TTL que operam com valores de 0 V e 5 V. Desta forma, é necessário um circuito divisor da tensão (representado pelo bloco 24 V/TTL na Figura 42) para adequar o comando de emissão enviado para o *laser* YLPN.

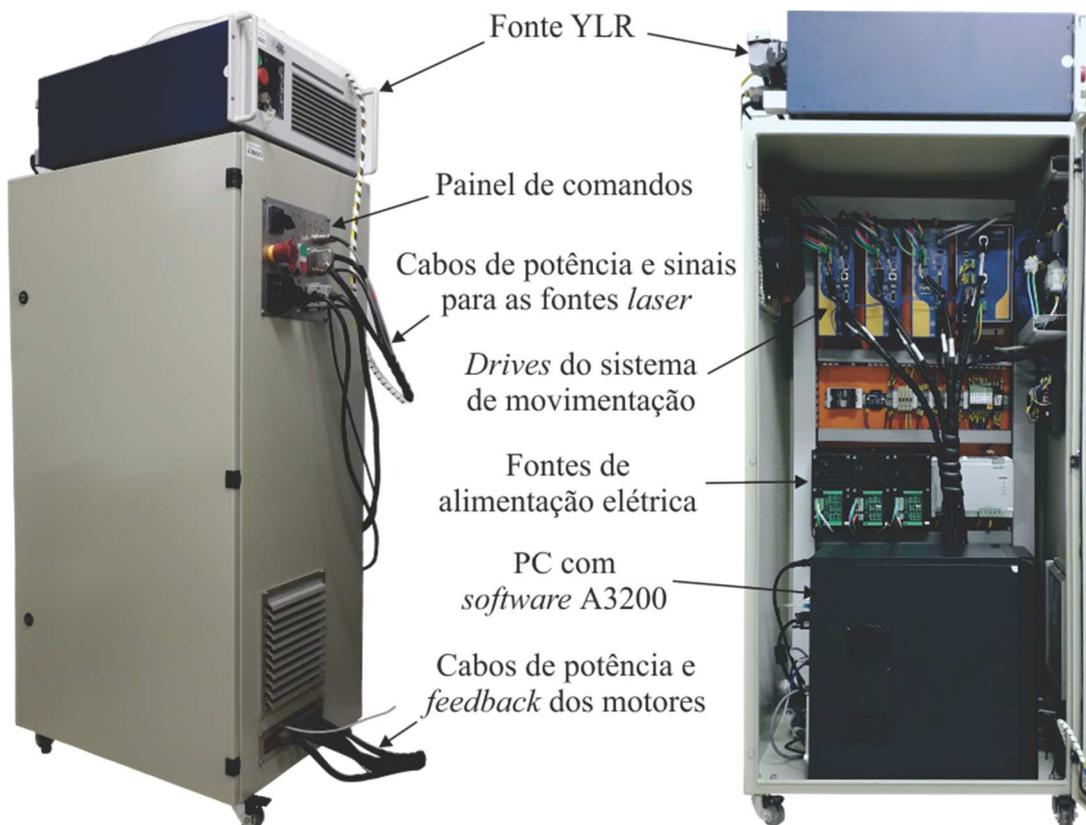
Cada *drive* conecta-se ao seu respectivo motor fornecendo a potência (sinais elétricos com tensão e corrente suficientes para realizar a movimentação) e recebendo o *feedback* de posição e velocidade (sinal proveniente do *encoder* embutido nos motores). No caso específico do *drive* Y e X, cada um possui uma saída auxiliar denominada *Encoder IFOV* que se conecta ao controlador do *scanner*. Estas saídas disponibilizam a posição atual dos eixos, informação utilizada para sincronização entre estes eixos lineares e o *scanner*.

Os componentes eletroeletrônicos foram organizados e dispostos em um gabinete elétrico, apresentado na Figura 43. Externamente o gabinete apresenta um painel de comandos, no qual se localizam a chave geral, botão ligar/desligar, botão de emergência, chave seletora de fonte de *laser* para operação, *start* e *reset* das fontes de *laser*. O painel de comando também apresenta conectores de entrada e saída que disponibilizam alimentação de potência e sinais para as fontes de *laser*. A fonte YLR está localizada acima do gabinete elétrico.

No interior do gabinete estão localizados os *drives* que compõem o sistema de movimentação Aerotech, como indicado na Figura 43. São indicadas também as fontes de alimentação elétrica de 24 V e ± 48 V, que suprem a fonte de *laser* YLPN e os motores

galvanométricos do *scanner*, respectivamente. O interior do gabinete ainda comporta o computador responsável pela execução do *software* de controle de movimento.

Figura 43 – Visão externa e interna do gabinete elétrico da bancada experimental.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os itens a seguir descrevem a proposta de experimentos para avaliar o efeito dos parâmetros de movimentação e das diferentes estratégias de varredura em um sistema de movimentação que combina *scanner* galvanométrico e eixos lineares. Os materiais empregados, parâmetros de processo e o sistema de aquisição de sinais utilizados também são apresentados.

4.1 EXPERIMENTOS

Neste item são descritos os experimentos propostos para avaliar a influência de diferentes parâmetros variáveis de entrada sobre o resultado obtido com a movimentação síncrona entre *scanner* e eixos lineares. As variáveis de entrada consideradas estão associadas com a velocidade, aceleração e curso que podem ser alcançados pelos eixos, bem como a estratégia de varredura adotada.

Além do desempenho eletromecânico dos componentes em questão, outros aspectos contribuem para o resultado final do trabalho de processamento do material. Considerando as estratégias de movimentação, diferentes abordagens levam ou não à um resultado satisfatório obtidas ao sincronizar os movimentos.

4.1.1 Experimentos de influência dos parâmetros de movimentação

A concepção da bancada experimental de movimentação síncrona e simultânea para a aplicação *laser* proposta utilizará um *scanner* e um sistema de movimentação linear, ambos de duas coordenadas. As capacidades destes dois sistemas determinarão as características de desempenho que a movimentação final poderá atingir.

Para avaliar a influência de parâmetros de movimentação sobre o sistema, configurado para atuar de forma síncrona e simultânea, foi montado um experimento fatorial. Os fatores estabelecidos foram:

- a) velocidade do *scanner*;
- b) área varrida pelo *scanner*;
- c) aceleração dos eixos lineares;
- d) velocidade dos eixos lineares;
- e) tipo de rampa de aceleração.

A velocidade do *scanner* corresponde a velocidade com que o ponto focal do *laser* é deslocado sobre a área de trabalho, em função da deflexão dos espelhos. Como valores para os níveis deste fator, foram consideradas as velocidades de 1000 mm/s e 2000 mm/s. Estes níveis estão situados dentro do intervalo que o fabricante do *scanner* sugere como velocidade empregada para o processamento de materiais com *laser*.

Área varrida pelo *scanner* neste experimento representa o máximo alcance do feixe, obtido unicamente pela movimentação dos espelhos. Está área, em situações convencionais, seria basicamente restrita ao alcance máximo fornecido pela lente *F-theta* empregada em conjunto com o *scanner*. Quanto maior a distância focal da lente *F-theta*, maior a área de trabalho entregue pela mesma. Contudo, a alteração da área varrida pelo *scanner* nos experimentos realizados neste trabalho foi obtida por meio de limitação configurada em *software*. Desta forma, mesmo sem alterações ópticas, é possível simular o uso de uma lente *F-theta* com menor área de processamento disponível. Foram empregados como referência para escolha dos níveis deste fator valores próximos a área máxima alcançada pela lente *F-theta* em questão ($100 \times 100 \text{ mm}^2$) e metade do seu valor lateral ($50 \times 50 \text{ mm}^2$).

A escolha pelo valor da aceleração dos eixos lineares como fator do experimento visa estabelecer as relações existentes entre a participação dos eixos e a movimentação síncrona e simultânea. Foram adotados como níveis para este fator os valores de metade (1000 mm/s^2) e máxima (2000 mm/s^2) aceleração disponível no eixo X (que apresenta menor capacidade de aceleração, uma vez que carrega consigo a massa do eixo Y).

A velocidade dos eixos lineares apresenta como níveis os valores de 75 mm/s e 150 mm/s, respectivamente a metade e máxima velocidade disponível nos eixos X e Y.

O tipo de rampa de aceleração é definido no *software* de controle de movimento por meio de um comando denominado *Ramp Type*. Foram selecionados os seguintes tipos: linear, senoidal e *s-curve*. Para evitar a introdução de variáveis não controladas associadas com as etapas de aceleração e desaceleração, se optou por empregar a estratégia mais convencional de sincronização entre movimentação e acionamento da fonte de *laser*. Para todos os ensaios realizados foi atribuído um atraso (*delay*) fixo entre os comandos de movimentação e de disparo do feixe. Desta forma, nos vetores de marcação realizados não apresentam etapas adicionais de movimentação (*sky-writing*) ou variação intencional da entrega de energia da fonte de *laser* (por exemplo, pela modulação da taxa de repetição de pulsos em função da velocidade).

Para cada fator listado anteriormente foram definidos dois níveis, com exceção do fator “tipo rampa de aceleração”, que apresenta três níveis. A Tabela 2 resume os níveis e valores definidos para cada um dos fatores adotados neste experimento.

Tabela 2 – Fatores, níveis e respectivos valores adotados no ensaio de influência dos parâmetros de movimentação.

Fator	Níveis	Valores
Velocidade <i>Scanner</i> (mm/s)	2	1000; 2000
Área Varrida pelo <i>Scanner</i> (mm ²)	2	50x50; 100x100
Aceleração Eixos (mm/s ²)	2	1000; 2000
Velocidade Eixos (mm/s)	2	75; 150
Tipo Rampa Aceleração ¹⁾ (adm)	3	1; 2; 3

¹⁾ Os valores 1, 2 e 3 correspondem aos tipos linear, senoidal e *s-curve*, respectivamente.

Fonte: elaborada pelo autor (2020).

A variável resposta para este experimento fatorial é o tempo de execução de um processo de microrremoção, aplicado em uma área com dimensão de 100 x 100 mm². A estratégia de varredura utilizada foi do tipo bidirecional (apresentada com mais detalhes no item 4.1.2). O espaçamento entre os vetores de marcação neste experimento foi definido em 0,1 mm. O tempo de execução foi obtido por meio do *software* de controle de movimento, que permitiu definir variáveis que armazenam o instante de tempo inicial e final de cada ensaio.

Foram executados 48 ensaios, resultado da combinação dos fatores selecionados e seus respectivos níveis. Com base em experimentos anteriores foi constatado que tempo de execução (variável resposta) não apresenta variação significativa quando realizada sobre determinados níveis de parâmetros de movimentação. Neste caso, foi optado pela não realização de réplicas devido a repetibilidade intrínseca do tempo de processamento obtida sob as condições de experimento propostas. Os ensaios foram realizados em um único bloco, com adoção de aleatoriedade na ordem de execução. A Tabela 3 resume a configuração do experimento fatorial.

Tabela 3 – Experimento fatorial multinível para determinar influência dos parâmetros de movimentação.

Fatores:	5	Réplicas:	0
Ensaio base:	48	Total de ensaios:	48
Blocos Base:	1	Total de blocos:	1

Fonte: elaborada pelo autor (2020).

4.1.2 Experimento de influência da estratégia de varredura

A estratégia de varredura, numa visão macro, é traduzida como o arranjo dos vetores que compõem a movimentação ao longo do tempo e espaço. Uma mesma área a ser processada pode ser preenchida de diferentes maneiras, conforme o padrão de vetores que compõem a estratégia utilizada.

Estas estratégias de varredura aplicadas em sistemas apenas com *scanner* apresentam características que podem gerar comportamentos inesperados ou indesejados quando são aplicadas à sistemas de movimentação síncronos. A ordem e frequência de execução dos diversos vetores de velocidade e aceleração, antes sujeitados apenas às características do *scanner*, agora compartilham as características da movimentação complementar proporcionada pelos eixos lineares.

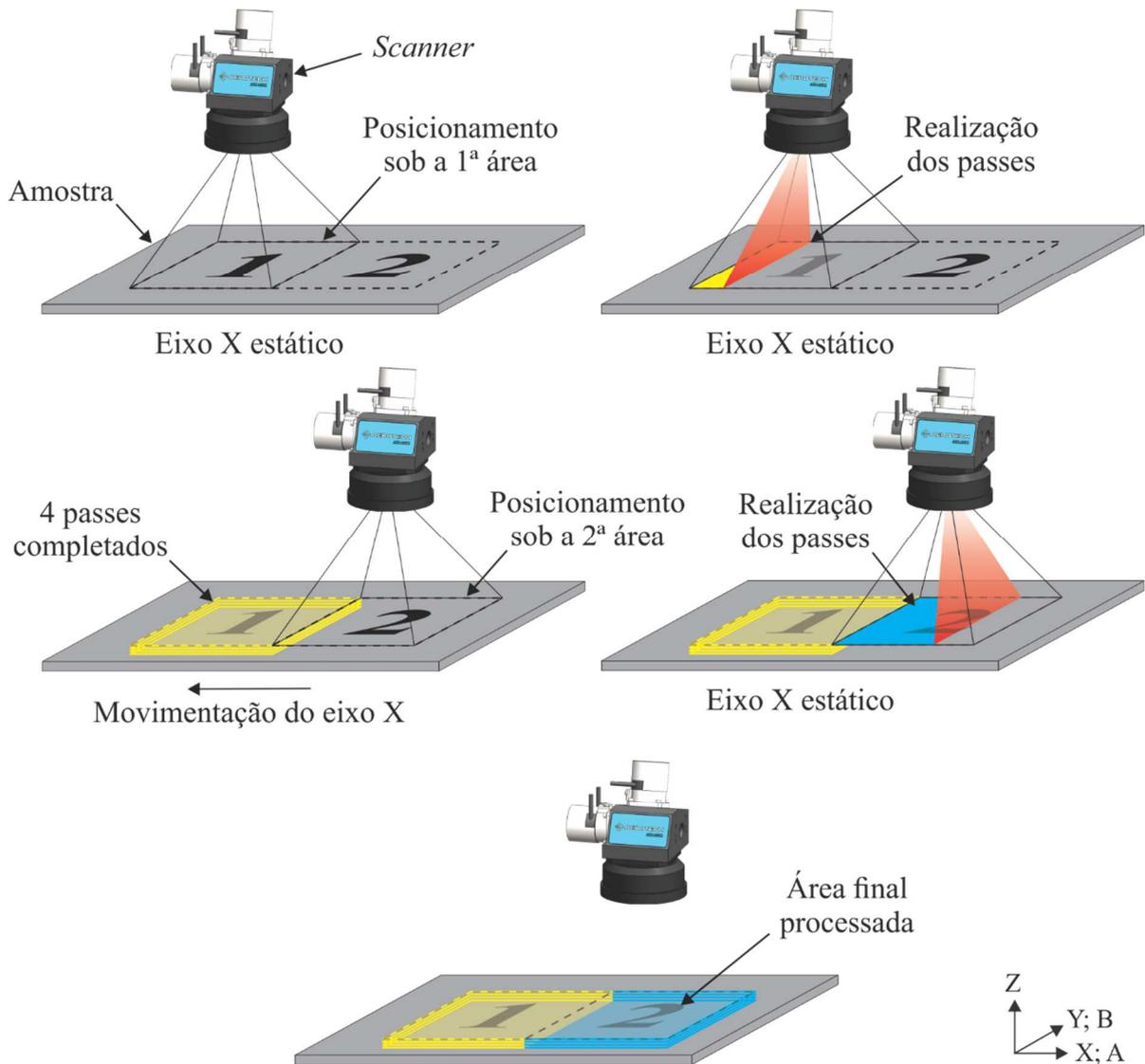
Para determinar a influência do padrão de deslocamento do feixe de *laser* sobre o comportamento do sistema de movimentação, ensaios foram executados em duas condições distintas: movimentação *step and scan* e movimentação síncrona e simultânea.

Na primeira condição, denominada de *step and scan*, o *scanner* e eixos lineares são sincronizados, mas a movimentação não ocorre de forma simultânea. Neste tipo de movimentação se inicia o processamento apenas com o *scanner*, os eixos lineares são mantidos estáticos. A área sob o *scanner* sofre então quatro passes consecutivos, de forma a simular um processo de microrremoção (que normalmente é obtido com a realização de múltiplos passes sobre a peça).

Após a conclusão dos quatro passes sobre a primeira área a operação do *scanner* é interrompida. A amostra é então movimentada pelo eixo linear X de forma a posicionar uma segunda área sob o *scanner*. Inicia-se novamente o processamento com *scanner*, repetindo os quatro passes sobre esta segunda área. Ao final de todo o processo é obtida a área final processada. Esta sequência de execução da varredura do feixe de *laser* na condição *step and scan* é apresentada na Figura 44.

Na segunda condição de experimento, o *scanner* e os eixos lineares são habilitados para operar de forma síncrona e simultânea, sem paradas discretas. Nesta condição a participação dos eixos lineares não é restrita a um deslocamento único, mas sim, a uma interação contínua com o *scanner* ao longo de todo o processamento.

Figura 44 – Sequência de processamento na condição *step and scan*.



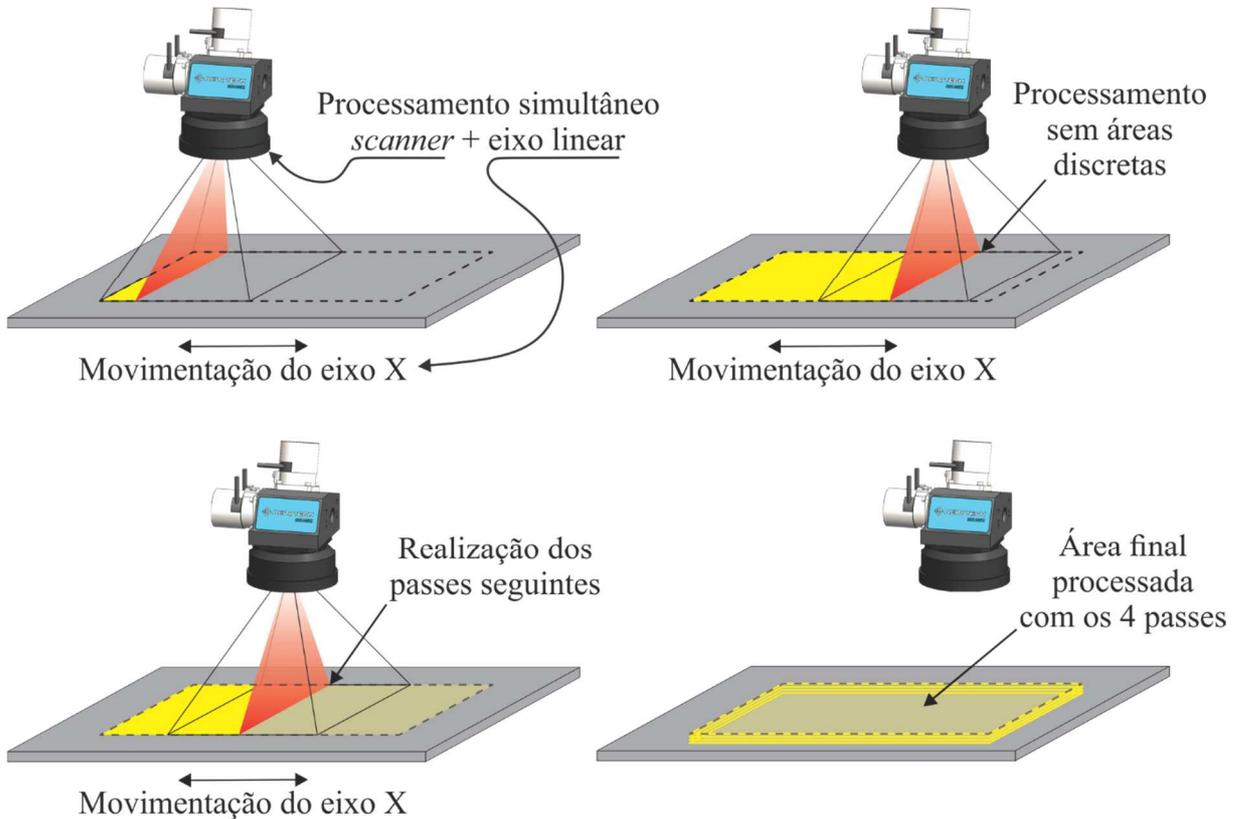
Fonte: elaborada pelo autor (2020).

O primeiro passe é iniciado em uma determinada região de acordo com a estratégia de varredura utilizada. A movimentação do feixe de *laser* é realizada por meio do *scanner* e a movimentação da amostra através dos eixos lineares. A movimentação destes elementos ocorre simultaneamente, permitindo que o processamento da área sobre o *scanner* seja realizado sem uma divisão definida de duas áreas (como ocorre na condição *step and scan*). Após cada passe, a varredura é reiniciada até obter a realização de 4 passes. A Figura 45 apresenta, de forma esquemática, a condição com movimentação síncrona e simultânea.

Em ambas as condições de execução do experimento a área varrida pelo *scanner* foi limitada em *software* a 50 x 50 mm². Desta forma, com área de trabalho reduzida, o *scanner* só

consegue alcançar a área final (50 x 100 mm²) caso haja participação dos eixos na movimentação, seja ela na condição *step and scan* ou síncrona e simultânea.

Figura 45 – Condição de processamento utilizando movimentação síncrona e simultânea.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Para verificar a influência da estratégia de processamento, as áreas mencionadas anteriormente foram processadas sob diferentes estratégias de varredura:

- a) bidirecional;
- b) bidirecional alternada;
- c) espiral externa;
- d) xadrez;
- e) aleatorizada.

Na varredura bidirecional, na medida em que ocorre o deslocamento, o feixe oscila com determinada amplitude sobre a superfície a ser processada, mantendo a direção, mas sentidos opostos após completar cada ciclo de oscilação. Desta forma, após a conclusão de um vetor de marcação em um sentido, o próximo deslocamento é imediatamente iniciado no sentido oposto. Quando toda a superfície é processada sob determinada condição se obtém a conclusão de um passe. Segundo Jaeggi *et al.* (2016), este método de varredura bidirecional é considerado

mais eficiente em relação ao unidirecional. Neste último, o feixe de *laser* apenas está ligado em um sentido de deslocamento dado pelo *scanner* e o processamento é executado sempre no mesmo sentido.

Quando vários passes são realizados, uma variação da varredura bidirecional consiste em alterar a direção dos vetores da oscilação do feixe entre cada passe. Se ao descrever determinado passe N , os vetores de movimento estiverem na direção longitudinal, no passe seguinte ($N + 1$) a direção de oscilação do feixe apresentará uma rotação de 90° . Esta estratégia é denominada de varredura bidirecional alternada.

A estratégia de movimentação espiral do feixe consiste em iniciar a varredura da superfície a ser processada pelo *laser* partindo das bordas externas da amostra. Para a amostra quadrada, após descrever um lado, a movimentação continua no sentido perpendicular ao primeiro trecho. Após completar o perímetro, o preenchimento do interior da área é descrito por um movimento espiralar, formada por vetores distribuídos ao longo das direções X e Y . Nesta estratégia os galvanômetros do *scanner* são igualmente solicitados ao longo do processamento de toda a área.

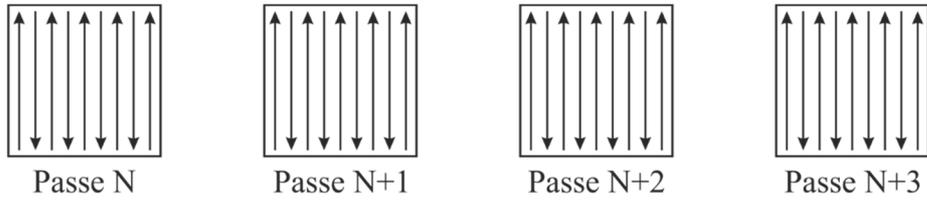
Na varredura do tipo xadrez a área a ser processada é subdividida em áreas menores, também chamadas de ilhas. A execução das ilhas pode seguir diferentes sequências de processamento. Também é possível definir qual a disposição dos vetores que compõem as ilhas. A sequência de processamento leva em consideração a não adjacência de ilhas, para reduzir o efeito térmico cumulativo entre as ilhas. O início foi estabelecido na ilha situada na posição de origem da área a ser processada.

Na varredura aleatorizada a sequência de execução dos vetores de movimentação segue uma distribuição aleatória. Esta distribuição é responsável por estabelecer a posição em que dado vetor de movimentação será executado sobre a área de processamento. O vetor de movimentação seguinte é executado em sua posição correspondente, paralelo e em sentido contrário ao anterior. A distribuição aleatória foi gerada a partir do *software* estatístico Minitab e introduzida no código G (G code). O *software* de controle de movimento (A3200) interpreta este código G e executa a respectiva sequência aleatória.

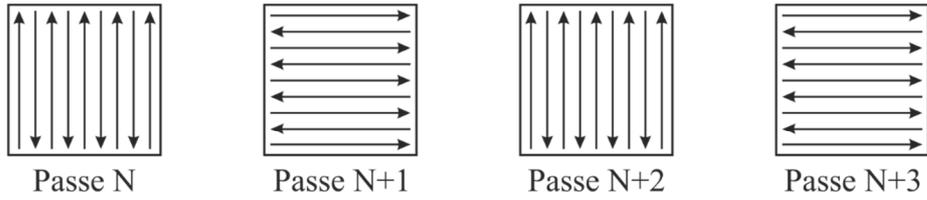
A Figura 46 representa de forma gráfica a sequência de realização dos vetores empregados nas estratégias de varredura descritas anteriormente.

Figura 46 – Representação esquemática das estratégias de varredura empregadas.

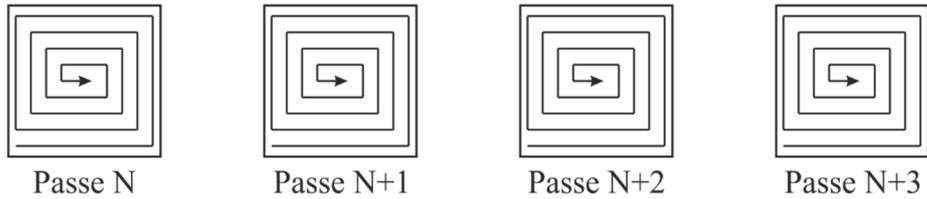
Estratégia bidirecional



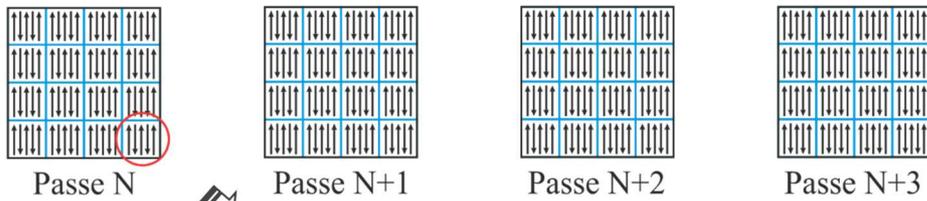
Estratégia bidirecional alternada



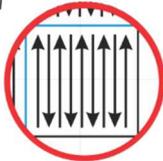
Estratégia espiral externa



Estratégia xadrez



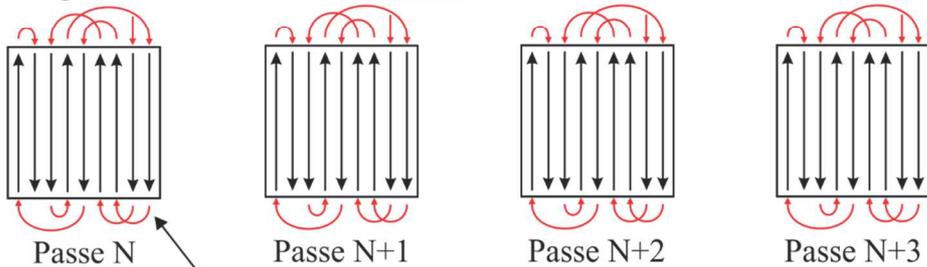
Detalhe dos vetores na ilha



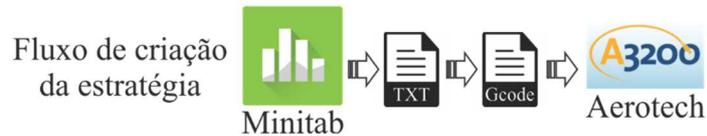
Ordem de execução das ilhas

11	7	10	6
3	15	2	14
9	5	12	8
1	13	4	16

Estratégia aleatorizada



Representação simplificada da execução aleatória



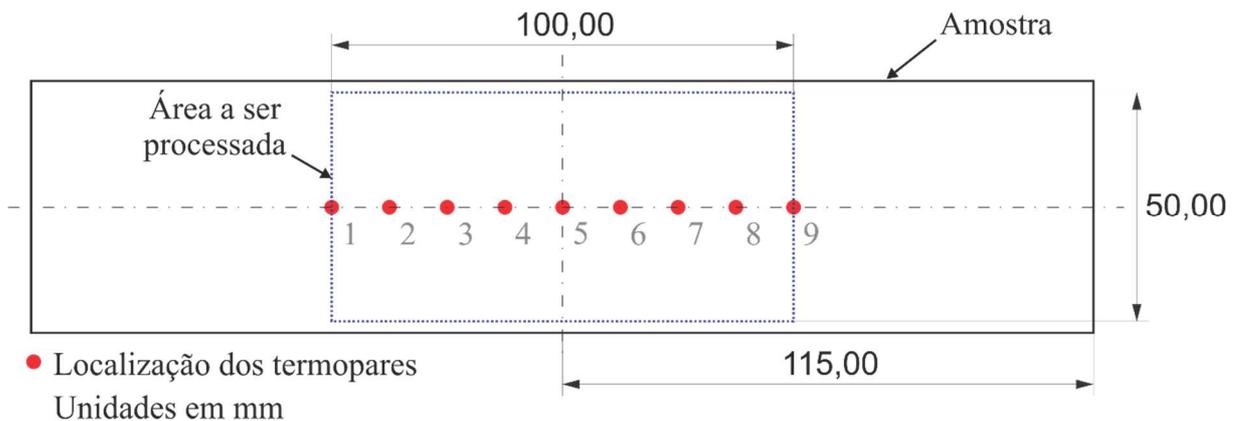
Fonte: elaborada pelo autor (2020).

O objetivo dos experimentos realizados nas distintas estratégias de movimentação é verificar a influência de tais estratégias sobre o comportamento do sistema, como por exemplo, o tempo de processamento. Contudo, as estratégias também apresentam reflexos sobre o processamento da amostra em si. Conforme o padrão de deslocamento do feixe, a energia *laser* pode ser entregue sob diferentes condições para a amostra.

Para inferir sobre esta distribuição da entrega da energia *laser* em função da estratégia empregada, uma série de medições de temperatura foi realizada. Termopares foram posicionados na face inferior da amostra, oposta a face exposta ao feixe de *laser*. A fixação dos termopares foi definida de modo a distribuir os pontos de aquisição ao longo da área destinada ao processamento. A técnica de fixação e a instrumentação empregada para aquisição são descritos em detalhes na seção 4.3.

A amostra utilizada nos ensaios é constituída por uma chapa de aço inoxidável AISI 316L, com espessura de 1,2 mm e dimensões de 55 x 230 mm². O desenho apresentado na Figura 47 exhibe as dimensões das amostras utilizadas, bem como a referência de posicionamento dos 9 termopares utilizados.

Figura 47 – Dimensões da chapa de aço inoxidável AISI 316L empregada como amostra e posicionamento dos termopares.

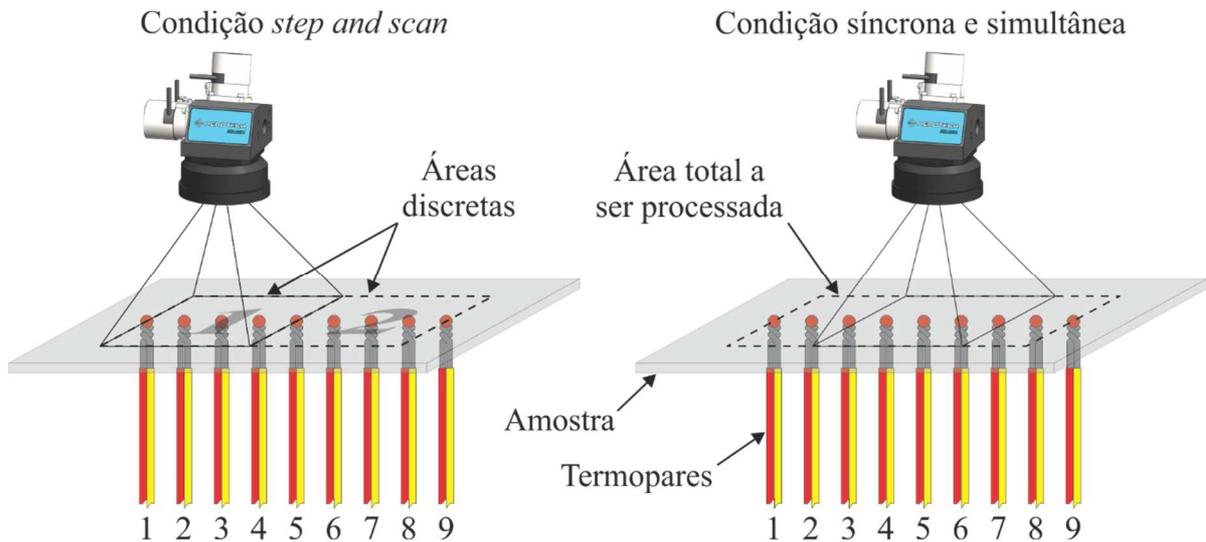


Fonte: elaborada pelo autor (2020).

O critério adotado para a distribuição dos termopares tem como objetivo obter os valores de temperatura ao longo do sentido longitudinal da área a ser processada. A quantidade foi estabelecida de forma a permitir a medição nas laterais (termopares 1 e 5; 5 e 9) e no centro (termopares 3 e 7) de cada uma das duas áreas processadas na condição *step and scan*. Para a condição de processamento com movimentação síncrona e simultânea, o posicionamento relativo entre termopares é a amostra é o mesmo da condição anterior. Contudo, como não

existem áreas de processamento discreto, as laterais são monitoradas pelos termopares 1 e 9, enquanto o centro da área total a ser processada coincide com o termopar 5. Os demais termopares foram adicionados de forma a coletar o comportamento nos pontos medianos entre as laterais e centro(s) da(s) área(s). A Figura 48 exibe uma representação da posição destes termopares em relação as áreas citadas para cada condição de movimentação ensaiada.

Figura 48 – Representação da distribuição dos termopares sob a amostra para as diferentes condições de movimentação.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

4.2 PARÂMETROS DE PROCESSO E FONTE DE LASER

Para o processamento das amostras foram selecionados parâmetros destinados a realização do processo de microrremocão a *laser*. O processo empregou a fonte de *laser* pulsado YLPN. Como parâmetros iniciais foram arbitrados uma largura de pulso 8 ns e uma taxa de repetição de pulsos de 600 kHz. A potência média utilizada foi de 10,6 W, baseada no limiar de fluência do aço inoxidável e na taxa de repetição de pulsos selecionada. Foi arbitrada uma distância entre pulsos de 8 μm , que em combinação com o raio de feixe de *laser* resulta em uma sobreposição de pulsos de aproximadamente 90 %. A velocidade de deslocamento relativo do feixe utilizada foi de 4800 mm/s. Os cálculos empregados para definição destes parâmetros de microrremocão estão disponíveis no APÊNDICE A.

Espera-se que nas estratégias que tendem a concentrar a atuação do feixe tão menor seja a área de atuação, maior deve ser a concentração de calor nas mesmas. Estratégias com vetores amplos por sua vez, tenderão a distribuir a energia dada a amplitude da movimentação,

que ainda pode ser incrementada por meio da movimentação síncrona. Para mensurar esta concentração de energia, um sistema de aquisição de sinais foi implementado para coletar a temperatura da amostra ao longo dos experimentos destinados a obter a influência da estratégia de varredura.

4.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS

A avaliação da distribuição de energia fornecida pela fonte de *laser* associada com movimentação síncrona e simultânea é feita pela medição da temperatura atingida em uma amostra instrumentada com 9 termopares. Para a leitura da temperatura destes termopares dispostos na amostra foi montado um sistema de aquisição e coleta de sinais. Sua composição básica inclui a placa de aquisição, termopares e programas para armazenamento e tratamento de dados.

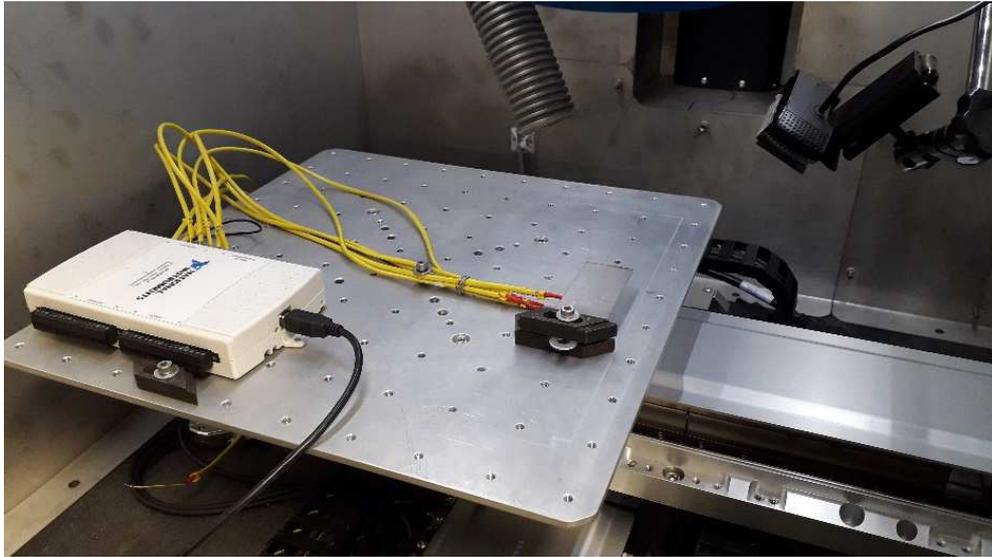
4.3.1 Placa de aquisição de sinais

A placa de aquisição de sinais utilizada é fabricada pela empresa National Instruments, modelo USB 6218. Apresenta, dentre outras características, 32 entradas analógicas individuais com resolução de 16 bits. Estas entradas recebem a conexão, em modo diferencial, dos nove termopares distribuídos sobre a amostra. A Figura 49 exibe a montagem da placa de aquisição junto aos termopares conectados a uma amostra.

Um computador equipado com o *software* Labview™ comunica-se com a placa de aquisição utilizando protocolo USB para receber as informações coletadas. O *software* Labview™ permite a criação de uma programação gráfica na forma de blocos, encadeados de modo a obter o processamento dos dados. Neste processamento está incluído um filtro do tipo passa-baixa, com frequência de corte de 4 Hz, destinado a remover ruídos de interferência provocados por fonte de alimentação próximas (National Instruments, 2018).

Após a filtragem dos sinais, os dados de temperatura são armazenados em um arquivo de extensão tdm. A taxa de aquisição final permite que as medições dos termopares sejam realizadas a cada 0,1 s. Os dados armazenados são acessados posteriormente utilizando o *software* Excel, que permite a abertura dos arquivos tdm. Os valores são então transferidos para o *software* estatístico Minitab. Neste último, são criados gráficos individuais e conjuntos, que expõem a evolução da temperatura nos termopares.

Figura 49 – Sistema de aquisição USB 6218 e termopares instalados em uma amostra.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

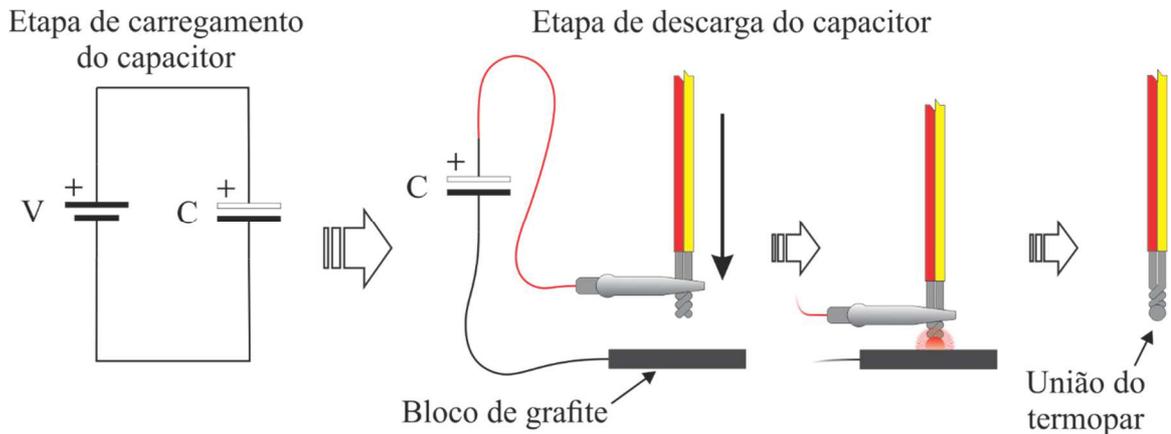
4.3.2 Termopares e seu método de fixação

Para instrumentação das amostras foram empregados termopares do tipo K (cromel/alumel) com faixa de operação entre $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$. A espessura dos fios que compõem os termopares é de $250\text{ }\mu\text{m}$. Para união dos elementos do termopar e sua posterior fixação à amostra foi utilizada a técnica de descarga capacitiva.

A técnica em questão consiste em utilizar a energia armazenada em um banco de capacitores para gerar uma corrente elétrica capaz de fundir os materiais envolvidos. Os capacitores são carregados em uma fonte de corrente contínua com tensão regulada. Esta fonte é desconectada do circuito após o carregamento completo dos capacitores. A energia armazenada pode ser abruptamente descarregada para obter uma corrente elétrica de intensidade suficiente para fundir os elementos.

Em um primeiro momento os dois fios que compõem o termopar são trançados em uma de suas extremidades. Um dos polos do capacitor é conectado ao par de fios trançados. O outro polo é conectado a um bloco de grafite que atua como eletrodo. Ao aproximar a ponta trançada dos termopares ao eletrodo de grafite é formado um circuito elétrico capaz de conduzir as cargas armazenadas no capacitor. A circulação de corrente causa a fusão dos fios por efeito Joule. Após cessar a passagem de corrente elétrica ocorre a solidificação do material e consequente união da extremidade do par trançado. A Figura 50 esquematiza o processo de união da extremidade do termopar para obtenção da forma esférica característica.

Figura 50 – Procedimento de união dos fios do termopar empregando descarga capacitiva.



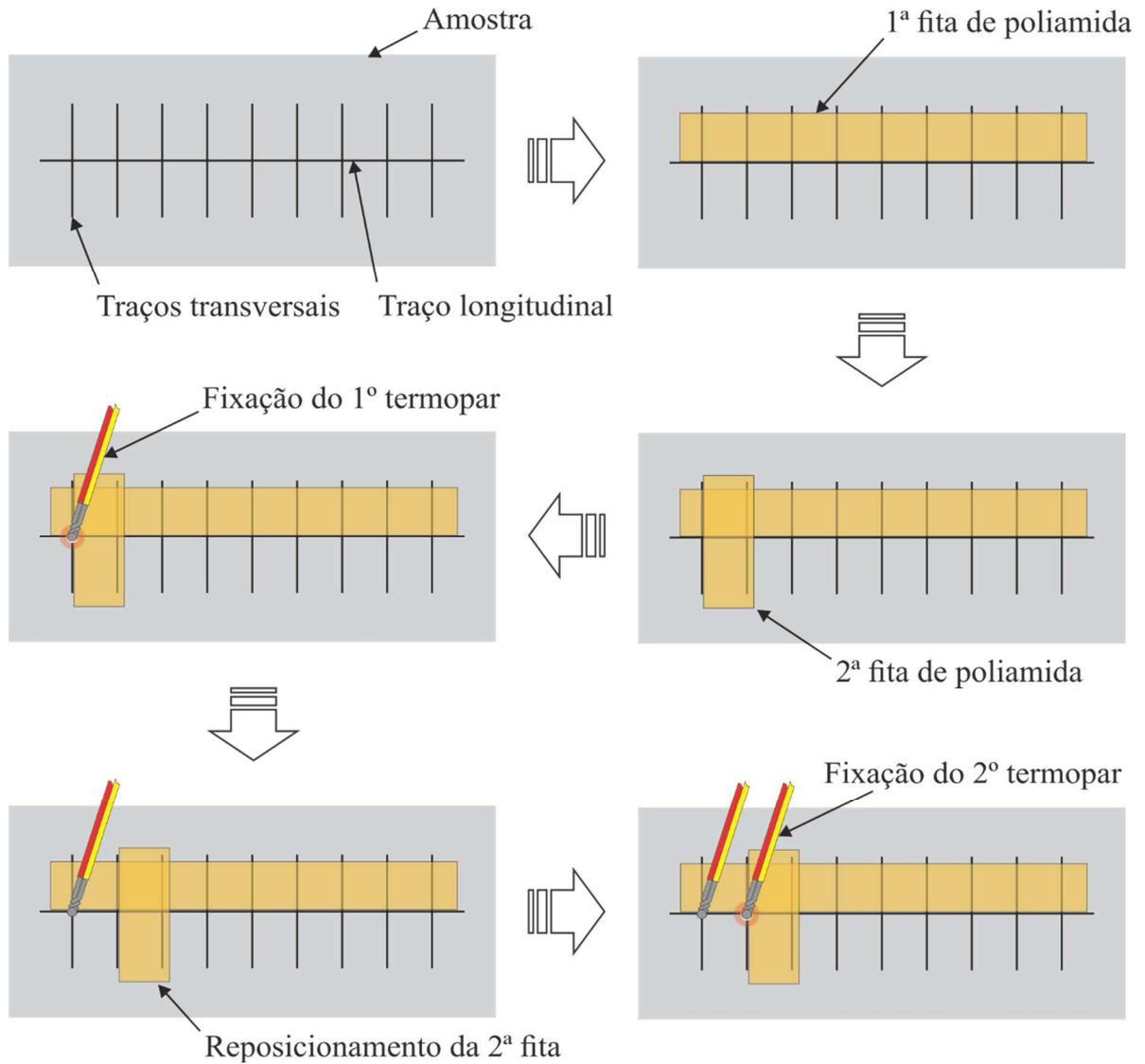
Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Depois de realizada a soldagem para obter a união entre os fios do termopar, o mesmo pode ser fixado à amostra. O procedimento empregado é similar ao anterior por também utilizar a soldagem capacitiva. Nesta etapa, um dos polos do capacitor é igualmente conectado ao termopar, porém o outro polo é conectado à amostra. Ao realizar a aproximação entre termopar e amostra, a corrente elétrica provoca aquecimento e fusão na região do contato. Uma vez cessada a passagem de corrente, o material solidifica, permitindo a união mecânica do termopar sobre a superfície da amostra.

Foi seguido um método para atingir o correto posicionamento dos termopares na soldagem nas posições marcadas com um traçador de altura para obter traços longitudinais e transversais. A sequência de etapas que compõem o método são apresentadas na Figura 51. Uma fita de poliamida é colada paralela ao traço longitudinal e uma segunda fita é colada paralela ao primeiro traço transversal. A cruz dos traços adjacente às duas fitas de poliamida permite ao operador delimitar o ponto para a fixação do termopar por descarga capacitiva. O operador desliza o termopar sobre a superfície isolada pelas fitas em direção à intersecção dos traços. Quando a extremidade do termopar atinge a região limitada pelas fitas de poliamida, ocorre a descarga do capacitor e a faísca formada entre a extremidade livre do termopar e a amostra sofrem fusão e o deslocamento do termopar em direção à poça fundida na amostra levam à união do termopar com a amostra.

Após a fixação do primeiro termopar, a segunda fita de poliamida é reposicionada junto ao traço transversal adjacente. Desta forma é obtido um novo cruzamento entre as fitas que define o ponto para fixação do termopar seguinte. O procedimento é repetido até fixação do número total de termopares desejados para a amostra.

Figura 51 – Sequência de operações para fixação dos termopares na face inferior da amostra por meio de descarga capacitiva.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com os experimentos propostos. No primeiro item é apresentada a influência de parâmetros sobre a movimentação síncrona e simultânea entre *scanner* e eixos lineares. Este experimento é baseado na alteração de fatores como velocidade e aceleração envolvidas. A análise dos resultados leva a determinação dos parâmetros que mais influenciam o tempo total de processamento, para as condições experimentadas.

Em um segundo item são descritos resultados obtidos por meio do processamento dos dados originados pelos termopares instalados junto a amostra. A variação de temperatura coletada é analisada e relacionada com a estratégia de varredura empregada no ensaio. Com base nas curvas de temperatura são observados comportamentos distintos na distribuição da energia entregue pelo processamento a *laser* à amostra.

Por fim, considerações adicionais são feitas em relação ao uso dos sistemas síncronos e simultâneos com lentes *F-theta* do tipo não telecêntricas, a forma como é realizada a movimentação relativa entre peça-*scanner* e utilização em sistemas de alimentação contínua de material.

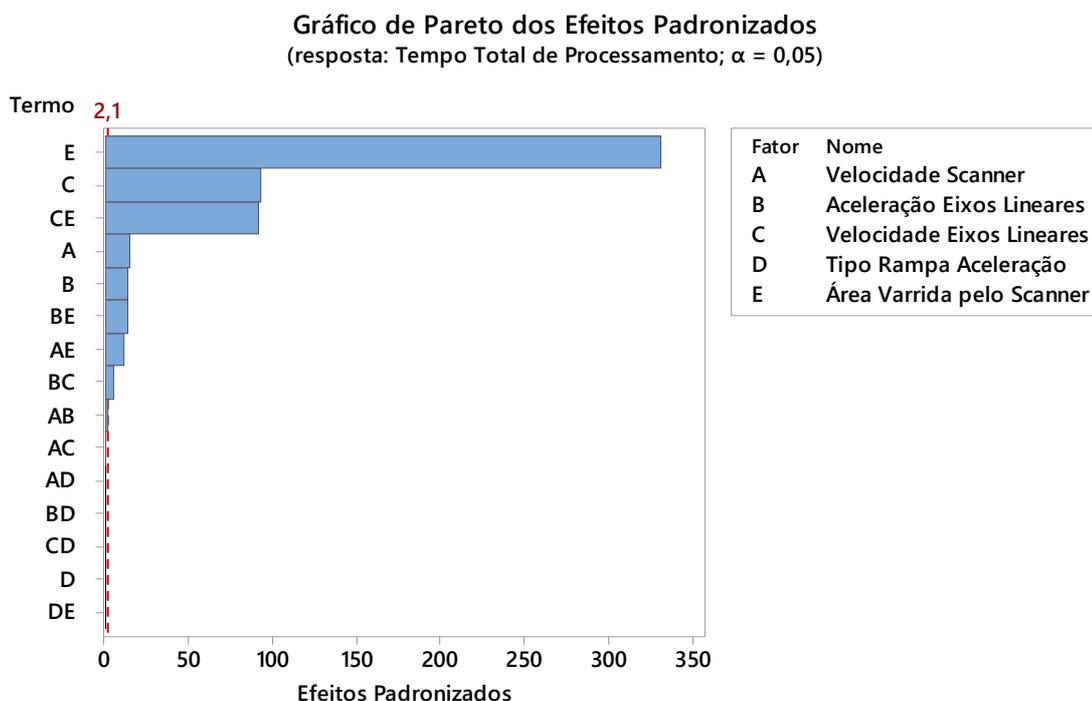
5.1 INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE MOVIMENTAÇÃO

Os ensaios realizados com intuito de analisar a influência dos parâmetros empregados na movimentação síncrona e simultânea revelam alguns pontos sobre o comportamento do sistema. Para a condição ensaiada, onde a distância entre linhas de varredura do *laser* correspondeu a 0,1 mm, o gráfico de Pareto na Figura 52 exhibe os fatores mais significativos sobre a resposta. A variável de resposta em questão é o tempo total de processamento necessário para que a varredura desempenhada pelo feixe de *laser* cubra uma área com dimensões de 100 x 100 mm².

O gráfico demonstra que a área varrida pelo *scanner* (termo E) é o fator de maior significância sobre a resposta. Este termo em particular apresenta um valor de efeitos padronizados três vezes superior ao dos demais termos presentes no experimento. Em seguida, a velocidade dos eixos lineares (termo C) e a sua interação com a área varrida pelo *scanner* (termo CE), também se apresentam como fatores de destaque sobre os efeitos. Em um patamar de menor significância se encontram a velocidade do *scanner* (termo A) e a aceleração dos

eixos lineares (termo B). O tipo de rampa de aceleração (termo D), dentre os fatores individuais, é o que apresenta menor significância sobre a resposta obtida.

Figura 52 – Gráfico de Pareto com os valores dos parâmetros de movimentação mais significativos sobre a resposta (tempo total de processamento).



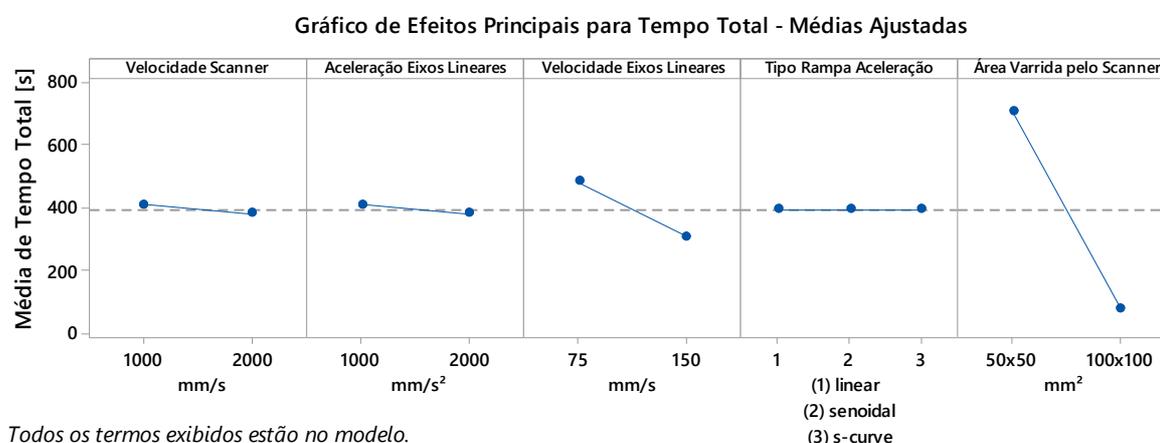
Fonte: elaborada pelo autor (2020).

A maior significância dos parâmetros destacados anteriormente também é visível nos gráficos da Figura 53. Se observa uma maior magnitude no efeito causado pela área varrida pelo *scanner* se comparada aos efeitos da velocidade do *scanner*, da aceleração e velocidade dos eixos lineares e da rampa de aceleração sobre o tempo de processamento das linhas paralelas processadas com espaçamento de 0,1 mm.

As condições ensaiadas onde a área varrida pelo *scanner* apresenta valor de 50 x 50 mm² são responsáveis pelos maiores valores do tempo total de processamento. De forma análoga, quando o *scanner* varre uma área de 100 x 100 mm² (ou seja, com maior alcance) a média do tempo de processamento é reduzida. A velocidade dos eixos lineares também afeta a resposta, quanto maior a velocidade menor a média de tempo total necessária para realizar a movimentação. Os demais parâmetros, para os níveis determinados neste experimento, apresentam linhas com inclinação horizontal, sugerindo que seu efeito principal é pequeno ou nulo sobre a resposta média.

Uma redução da área varrida pelo *scanner* (de 100 x 100 mm² para 50 x 50 mm²) acarreta menor disponibilidade para alcançar a velocidade constante unicamente por meio da deflexão dos espelhos. Este fato exige uma complementação mais frequente da movimentação por parte dos eixos lineares para que o vetor de marcação seja completado. Como os eixos lineares apresentam menor resposta dinâmica, o resultado é um aumento na média do tempo total de processamento.

Figura 53 – Gráfico de efeitos principais dos parâmetros de movimentação sobre a média do tempo total de processamento.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Nas condições onde a velocidade dos eixos lineares apresenta-se limitada a 75 mm/s, a participação do *scanner* na movimentação é mais acentuada. Com velocidade reduzida a movimentação dos eixos lineares é de certa forma “suavizada”, pois o tempo disponível para atingir a posição alvo não é suficiente para possibilitar sucessivas trocas de trajetória.

Nos casos citados anteriormente (de área varrida pelo *scanner* e velocidade dos eixos lineares com valores reduzidos) se observa uma evidente variação nos valores do tempo total de processamento. Considerando que a extensão a ser processada se manteve constante (área de 100 x 100 mm²), logo, a velocidade de deslocamento do feixe de *laser* também apresenta tal variação. Portanto, tempos longos de processamento estão associados a condições onde a velocidade efetiva do feixe de *laser* está proporcionalmente reduzida.

Sendo assim, em determinados casos, mesmo que a velocidade do processamento seja definida com base no limite alcançável pelo *scanner*, na prática, a velocidade atingida pode ser limitada pela combinação dos demais parâmetros do sistema de movimentação síncrona e simultânea. Por exemplo, o usuário pode estabelecer uma velocidade de varredura de

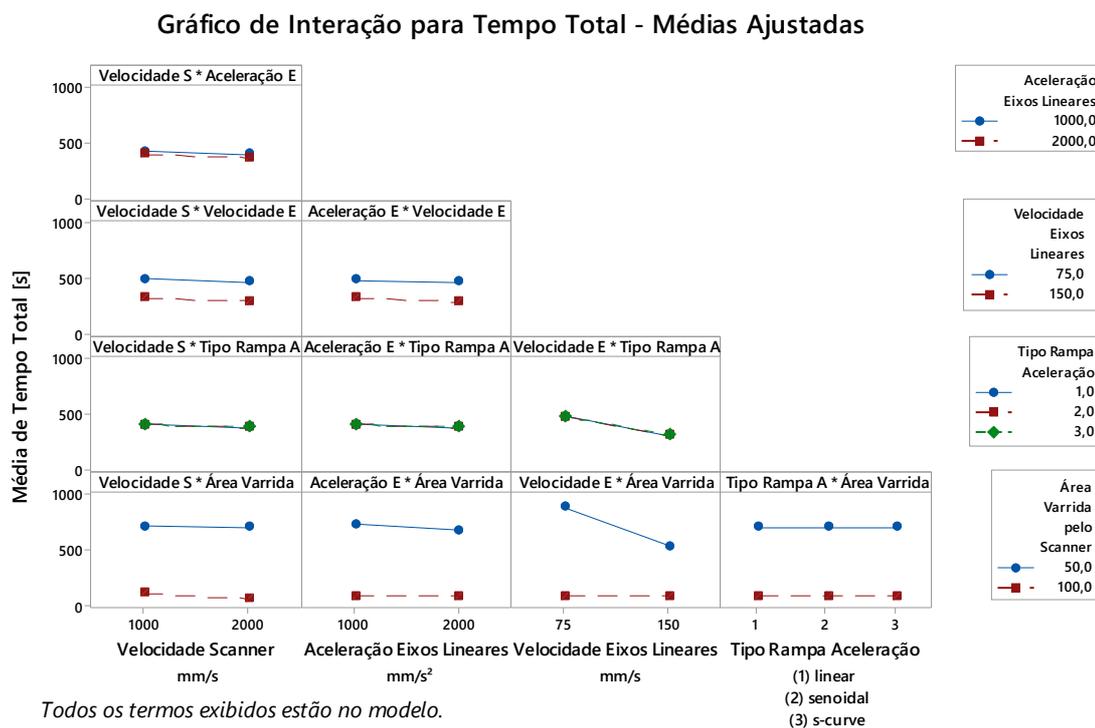
4800 mm/s para determinada ação de microrremoção a *laser*. Este valor de velocidade está virtualmente abaixo do limite comum a muitos modelos de *scanners*, como sugerido por Mincuzzi *et al.* (2018). No entanto, se a área a ser processada apresenta vetores de marcação que superam a área alcançável pelo *scanner*, o que por sua vez, resultará em maior atuação dos eixos lineares, haverá uma consequente limitação da velocidade final. Esta limitação da velocidade do feixe de *laser* terá influência sobre a qualidade do resultado final (aqui representado pelo processo de microrremoção a *laser*) pois a distribuição temporal da energia não será respeitada.

Em condições de maior aceleração a proporção de atuação dos eixos lineares é elevada, pois a aceleração permite deslocamento ágil entre as posições, reduzindo assim o tempo total de processamento. Nesta condição a atuação do *scanner* pode se manter centralizada a sua área de trabalho. No entanto, uma maior aceleração dos eixos lineares leva a movimentações abruptas da amostra. Acelerações maiores, combinadas com a inércia da massa total a ser movimentada e aliadas a um controle de posição não otimizado, podem contribuir para uma deterioração da repetibilidade de parada. Consequentemente, o processamento realizado estará mais susceptível a apresentar variação dimensional nas áreas de alteração brusca de movimentação, como trajetórias que formam ângulos agudos.

O tipo de rampa de aceleração apresenta uma magnitude do efeito nula sobre a resposta (tempo total de processamento) quando comparada aos demais fatores empregados no experimento. Neste caso, considera-se que para a ordem de grandeza de comprimento das movimentações utilizadas (50 mm e 100 mm), a etapa de aceleração/desaceleração ocupa um intervalo de tempo proporcionalmente pouco expressivo. Como não foram incluídos percursos extras para que a emissão de *laser* ocorresse unicamente com velocidade constante, não houve adição de vetores exclusivos de aceleração/desaceleração que levassem a um aumento significativo do tempo de processamento, como sugerido por De Loor (2013) ao investigar o método *sky-writing*.

Os gráficos da Figura 54 demonstram que a maior força de interação (linhas não paralelas) ocorre entre a velocidade dos eixos lineares e a área varrida pelo *scanner*. A correlação entre estas variáveis é devido ao fato de que, nas condições com área de varrida pelo *scanner* reduzida (50 x 50 mm²) se exige maior complementação de movimentação por parte dos eixos lineares. Neste caso, a execução do preenchimento fica limitada a velocidade imposta pelos eixos lineares devido ao alcance reduzido do *scanner*.

Figura 54 – Gráfico de interação entre os fatores do experimento fatorial realizado.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

5.2 INFLUÊNCIA DA ESTRATÉGIA DE VARREDURA SOBRE O COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA

Os itens a seguir descrevem os resultados obtidos para os experimentos realizados na condição de movimentação *step and scan* e na condição de movimentação síncrona e simultânea entre *scanner* galvanométrico e eixos lineares.

5.2.1 Condição com movimentação *step and scan*

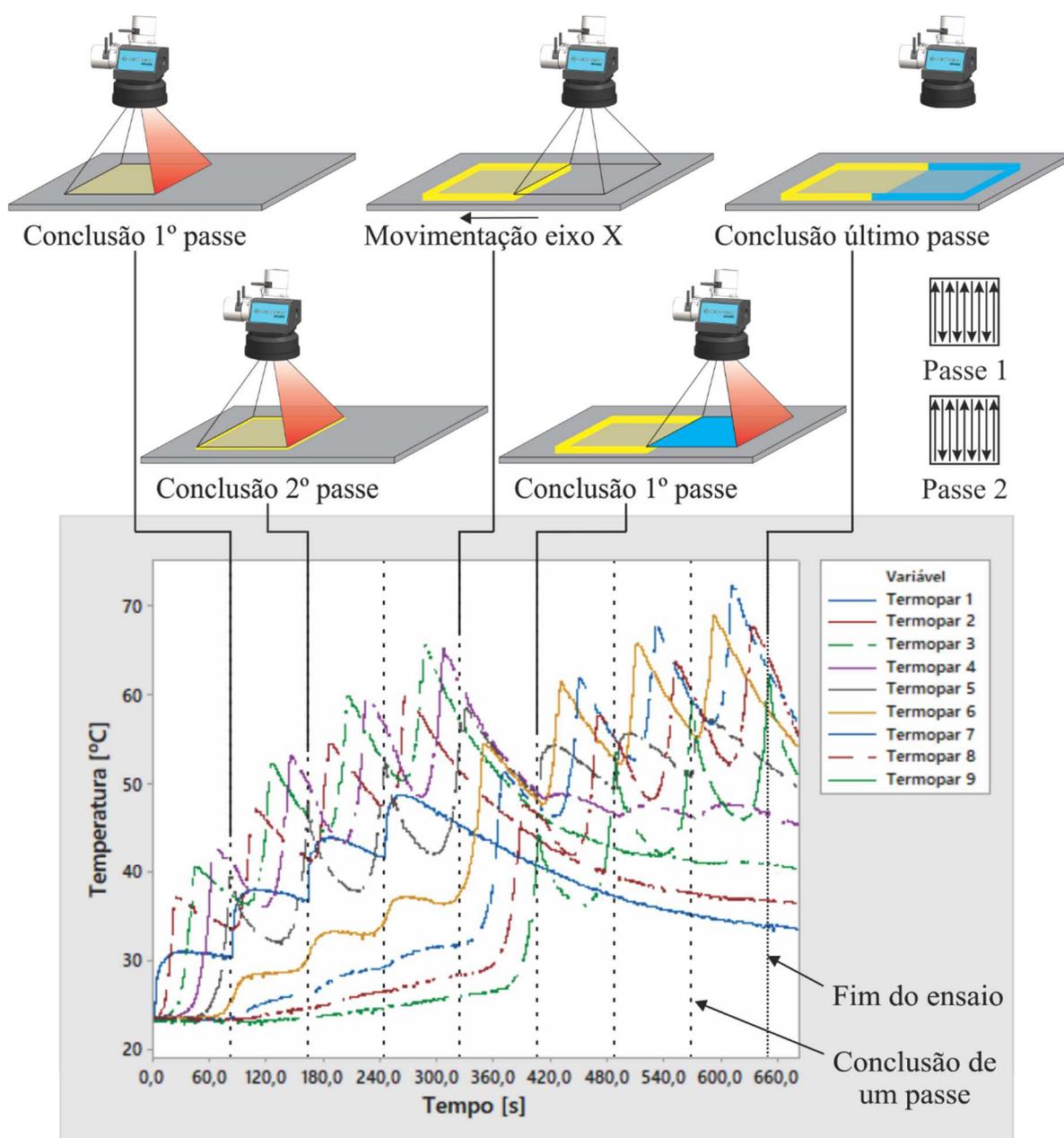
A quantidade de calor entregue pelo feixe de *laser* em cada área de processamento, tem como consequência o aquecimento da região de incidência elevando a temperatura localmente. Dependendo da densidade de energia aplicada na região é possível promover a fusão, a ablação e até a sublimação de volumes específicos de matéria. Contudo, parte do calor entregue pelo feixe de *laser* é transmitido por condução e eleva a temperatura das regiões adjacentes. Esta elevação de temperatura é captada ao longo do ensaio pelos termopares instalados na amostra.

Desconsiderando as perdas de calor por irradiação nas duas superfícies da placa plana e a quantidade de calor necessária para aquecer o próprio termopar, esta medição oferece um

valor de temperatura com repetibilidade necessária para avaliar as distintas estratégias de varredura do feixe de *laser* sobre a superfície da amostra.

Na Figura 55 são ilustrados diferentes momentos do percurso do feixe de *laser* sobre a amostra e, na parte inferior o comportamento característico da temperatura, numa estratégia bidirecional de varredura. No gráfico é mostrado o comportamento da temperatura medida em cada um dos termopares. O termopar de número 1 é o mais próximo da origem da varredura. O termopar 9 está situado no outro extremo da amostra.

Figura 55 – Evolução da temperatura empregando estratégia bidirecional na condição de movimentação *step and scan*.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Observa-se o comportamento cíclico impresso pela varredura bidirecional à medida em que o feixe de *laser* varre a área processada. Os picos de temperatura ocorrem sequencialmente para os termopares 1, 2, 3, 4 e 5. Estes estão localizados sobre a primeira área de 50 x 50 mm² processada. A cada passe completado (destacados pelas linhas pontilhadas verticais) os picos de temperatura medidos sofrem um acréscimo. Para uma fonte de calor em movimento, o aquecimento acusado por cada termopar é influenciado pelo calor entregue sobre a região do primeiro e os subsequentes. Tal acréscimo é decorrente da condução de calor da energia liberada pelo feixe de *laser* em cada novo passe, somada a energia remanescente do(s) passe(s) anterior(es). Desta forma, ao longo do percurso se verifica uma tendência do aumento da temperatura detectada pelos termopares colocados sob a linha de deslocamento.

Após executar 4 passes sobre a primeira área de varredura do *scanner*, o eixo linear do sistema se desloca por 50 mm (representado pela ilustração “movimentação eixo X”). Desta forma, os primeiros quatro termopares se tornam mais distantes e passam a serem menos influenciados pela ação do *laser* nas varreduras seguintes. A partir deste momento, os termopares 5, 6, 7, 8 e 9 são os mais próximos à atuação do feixe de *laser*.

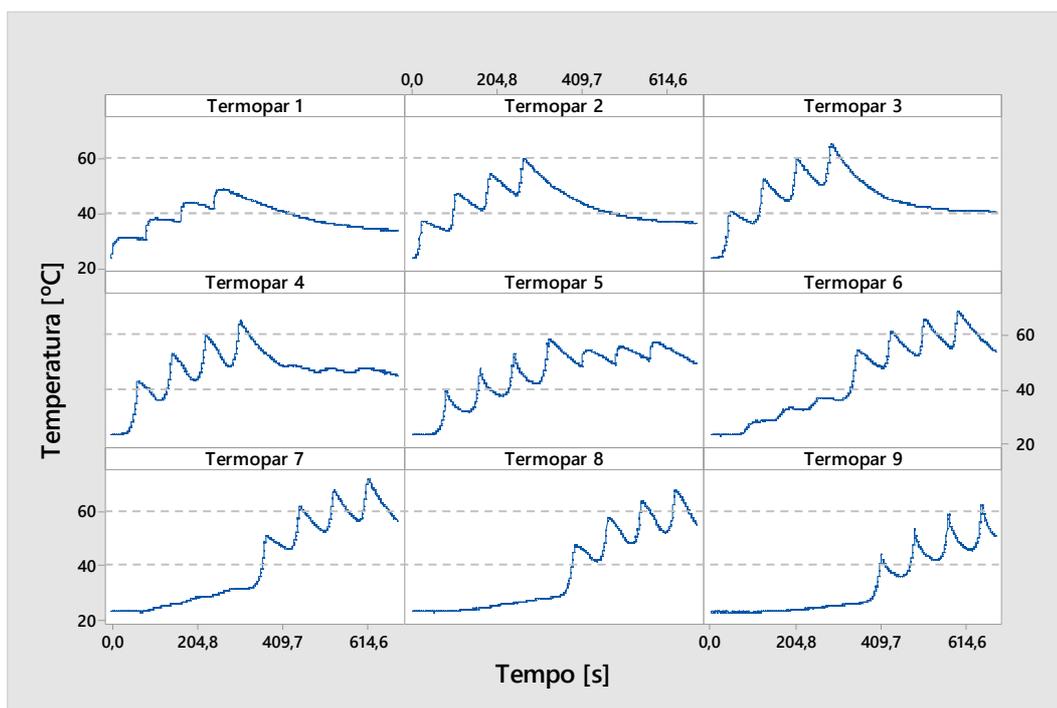
Para facilitar a visualização da influência da movimentação do *scanner* e da amostra, a Figura 56 exhibe individualmente o comportamento da temperatura de cada termopar. Cada pico bem definido nas curvas representa a passagem do *laser* sobre a localização do termopar, momento no tempo onde a temperatura se torna mais pronunciada.

As temperaturas registradas mostram que durante as primeiras passagens do feixe de *laser* sobre a região do primeiro termopar, o último termopar já detecta uma pequena alteração da temperatura. Os degraus mostrados no comportamento da temperatura do primeiro termopar, mostram que a segunda, terceira e quarta passagem do *laser* em sua proximidade elevam a temperatura na região do termopar. Para as demais curvas se observa o mesmo comportamento de incremento dos picos de temperatura, resultado do acúmulo de energia inserida a cada passe. Porém quando feixe de *laser* se afasta para uma maior distância (processamento da segunda área), não se verificam novos aumentos na temperatura da região em torno do termopar 1. Nesta condição, a distância entre a frente de calor imposta pelo *laser* e o termopar é suficientemente grande para neutralizar os efeitos causados pela condução de calor ao longo do corpo da amostra.

Os gráficos do comportamento da temperatura também permitem identificar a mudança de posição descrita pela amostra. O termopar 5, que está na posição de simetria, apresenta o comportamento mais regular, sendo influenciado por todas as passagens descritas pelo *scanner*. As curvas também se distinguem pelo comportamento que apresentam na

transição entre as duas áreas processadas pelo *scanner*. Termopares de 1 a 4 como esperado, têm picos elevados quando *laser* processa a área sobre eles. Ao ocorrer o deslocamento do eixo X para contemplar a segunda área, observa-se a perda gradual de energia sobre os termopares anteriormente citados, mesmo com o processamento ocorrendo na área adjacente.

Figura 56 – Temperaturas medidas em termopares sequenciais sobre uma linha, exibidas em painéis individuais, para a estratégia do tipo bidirecional.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

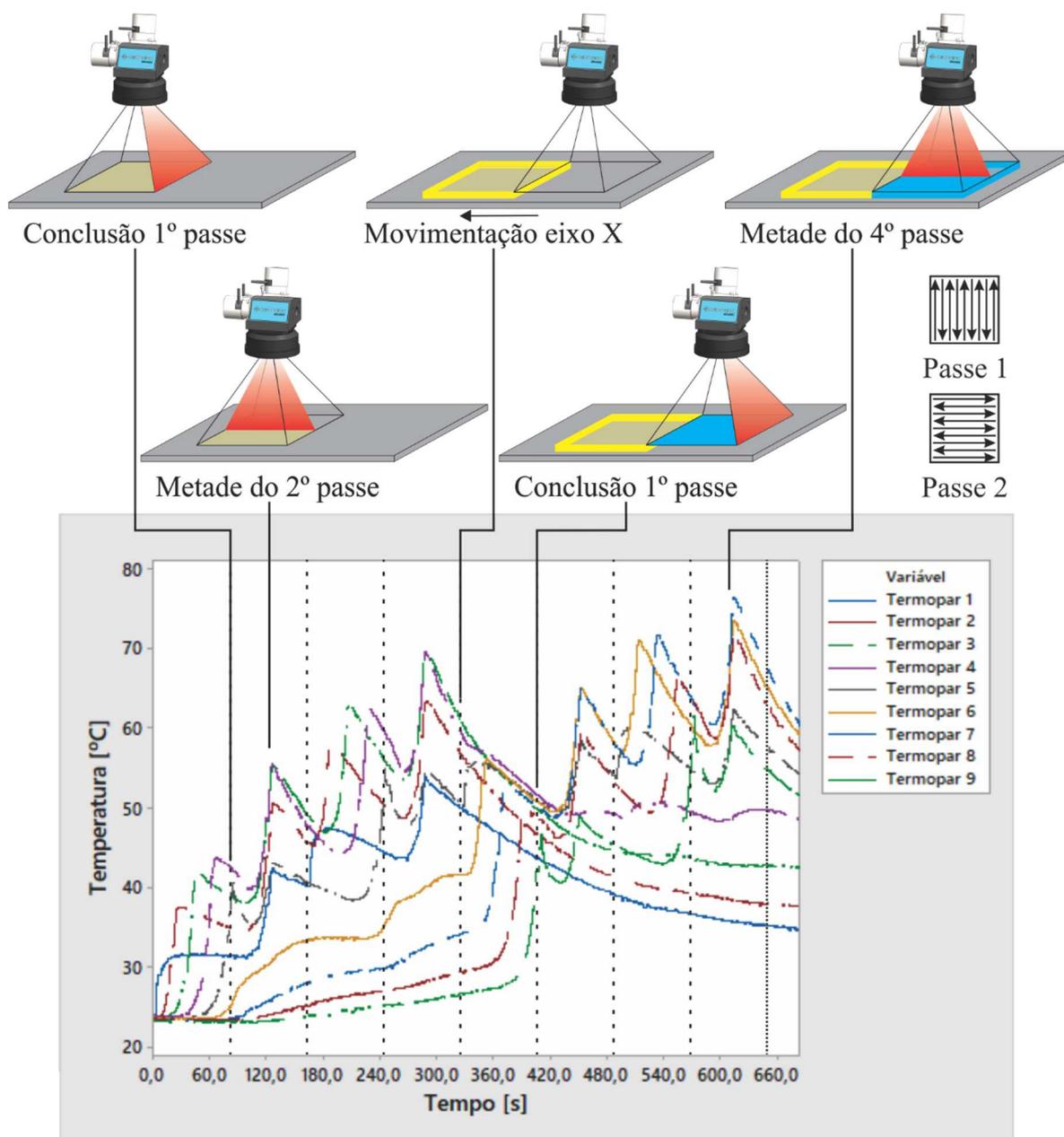
Comportamento análogo, porém, inverso, ocorre aos termopares 6 a 9, que são ligeiramente influenciados pelo calor transmitido pelo corpo da amostra até o momento de processamento da sua respectiva área. O termopar 5 é influenciado mais ativamente durante todo o processamento devido a sua posição centralizada.

Já na estratégia bidirecional alternada, o comportamento ao longo do ensaio difere parcialmente da estratégia puramente bidirecional. A Figura 57 exhibe o comportamento em um gráfico consolidado de todas as curvas de temperatura, acompanhado de ilustrações que destacam pontos singulares na movimentação do feixe de *laser* e do eixo X ao longo do ensaio realizado.

No primeiro momento a evolução da temperatura dos termopares 1 a 5 segue em sequência, com picos distribuídos conforme a passagem do *laser* sobre os pontos de

monitoramento. Progressivamente a energia absorvida pelo corpo da amostra eleva a temperatura do pico seguinte, com exceção do termopar 5 na extremidade da área processada.

Figura 57 – Evolução da temperatura empregando estratégia bidirecional alternada na condição de movimentação *step and scan*.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

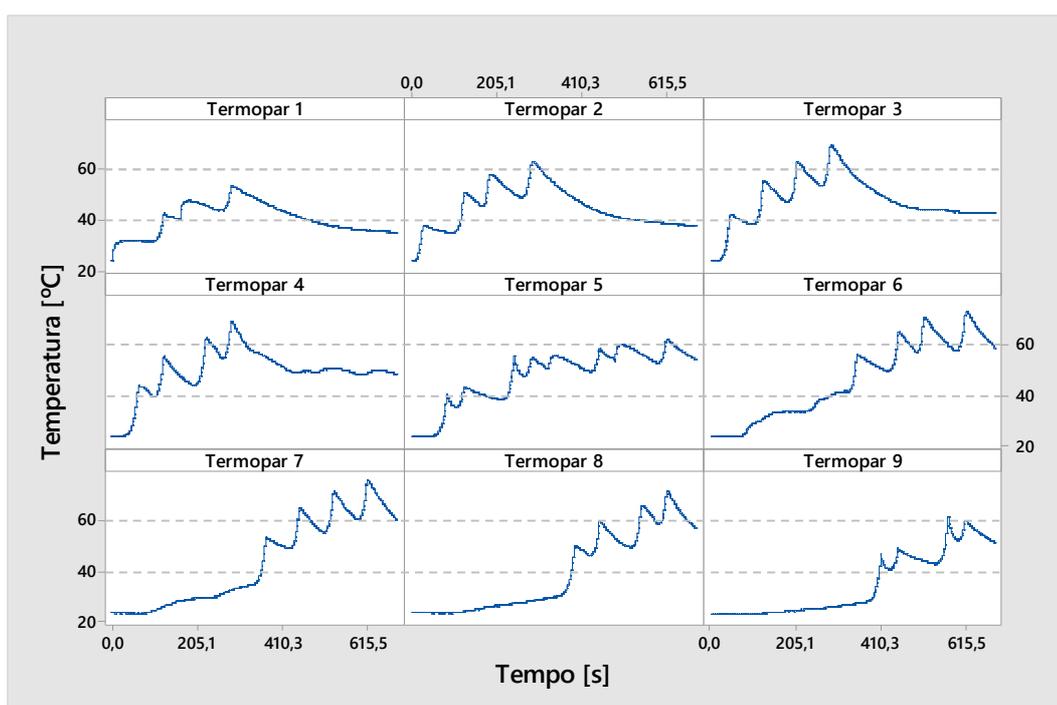
Na sequência, ocorre a segunda passagem do *laser* sobre a área processada, desta vez os vetores de marcação sofrem uma rotação de 90° em relação a sua orientação anterior. Desta forma, a varredura avança de forma perpendicular ao eixo X. Nesse momento a passagem do *laser* atinge os pontos de monitoramento simultaneamente. A elevação de temperatura que

provoca o segundo pico de temperatura experimentado pelos termopares de 1 a 5 ocorre em sincronia, condição destacada na Figura 57 pela ilustração “metade do 2º passe”.

A próxima passagem do feixe de *laser* (3º passe) apresenta comportamento da temperatura similar ao início do processo. A varredura avança de tal forma que contempla os pontos monitorados em sequência. A energia inserida promove a elevação de temperatura dos pontos em momentos temporais distintos.

A Figura 58, por sua vez, exhibe separadamente cada um dos comportamentos das temperaturas coletadas. Os termopares na região central de cada área processada (3 e 7) têm espaçamento regular de tempo entre os picos. A posição centralizada em cada área processada favorece a melhor distribuição das suas exposições ao longo do ensaio.

Figura 58 – Temperaturas exibidas em painéis individuais para a estratégia bidirecional alternada sob movimentação *step and scan*.



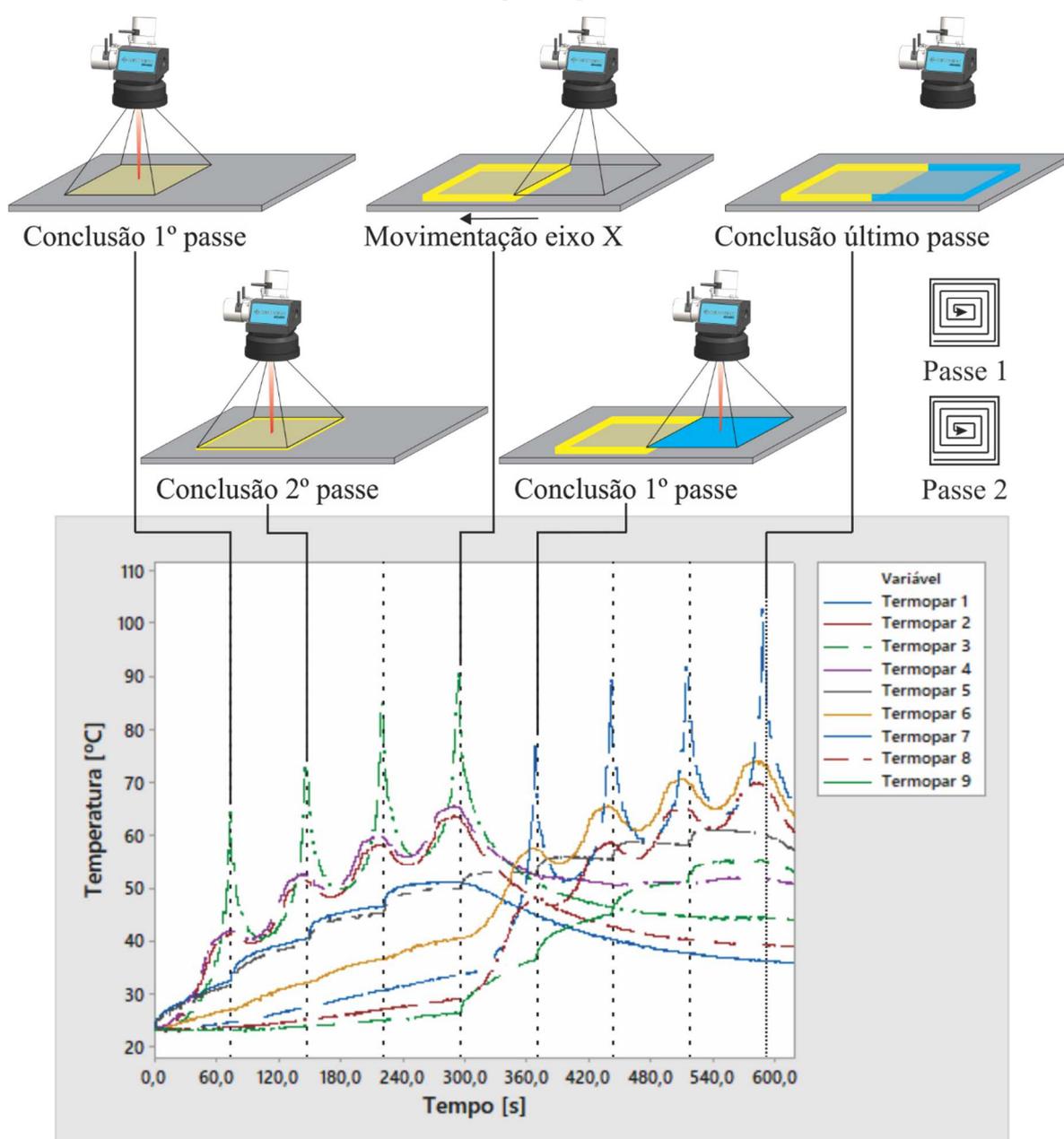
Fonte: elaborada pelo autor (2020).

No entanto os termopares nas extremidades (1, 5 e 9) aglomeram determinados picos pela dinâmica da movimentação. As extremidades, logo após serem atingidas pelo *laser* no final de uma varredura, podem ser rapidamente expostas ao feixe de *laser* no processamento iniciado na orientação seguinte.

Na estratégia de processamento que emprega a espiral externa o feixe de *laser* inicia seu deslocamento pelas extremidades da área a ser processada. Como consequência, os

termopares na região periférica de cada área discreta (1 e 5, 5 e 9) são os primeiros a serem sensibilizados. No entanto, o percurso feito nas extremidades apresenta os maiores deslocamentos resultando em maior tempo entre as exposições sucessivas de um mesmo termopar ao *laser*. Desta forma, a magnitude das temperaturas indicadas neste primeiro instante é menor em função do maior tempo disponível para dissipação do calor. A Figura 59 exibe o comportamento da temperatura ao longo da estratégia de espiral externa.

Figura 59 – Evolução da temperatura empregando estratégia espiral externa na condição de movimentação *step and scan*.



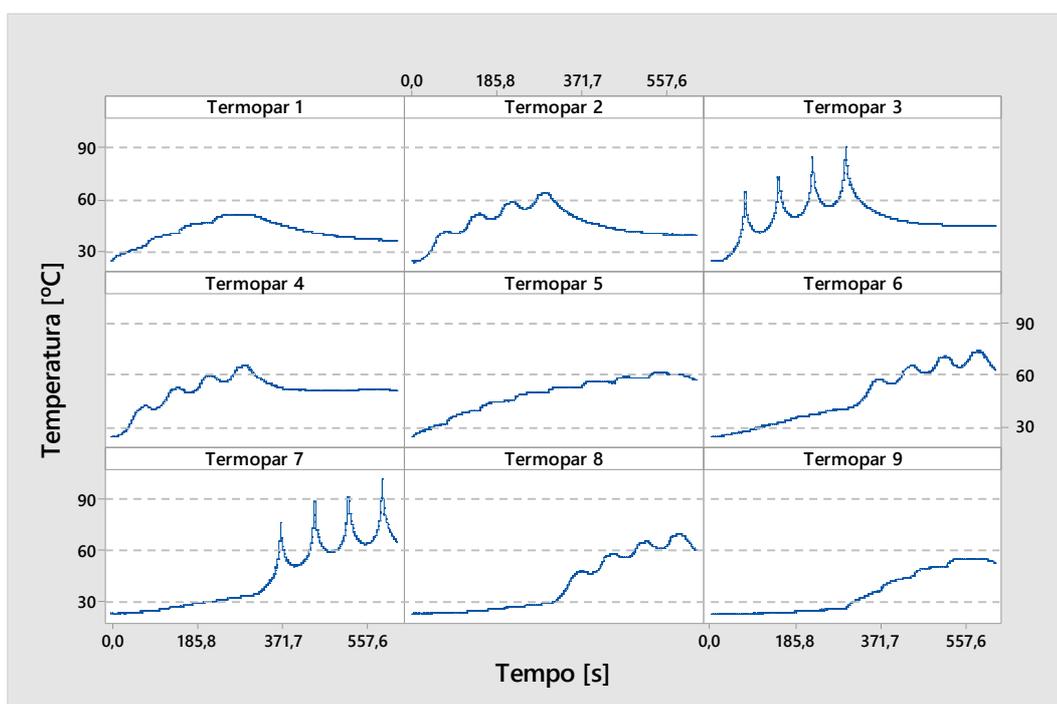
Fonte: elaborada pelo autor (2020).

A medida que a espiral avança para o centro, os vetores que compõem a movimentação vão diminuindo em comprimento. Isto resulta em uma redução do perímetro percorrido pelo feixe de *laser* a cada passagem. Tal fato leva a uma maior concentração da atuação do *laser* sobre o centro da área processada. A passagem mais frequente e concentrada do *laser* fica evidente nas temperaturas adquiridas, quanto mais próximo localiza-se o termopar do centro da área em processamento, maior o valor de temperatura atingida.

Fica evidenciado no gráfico a concentração de energia adquirida pelos termopares 3 e 7, centralizados em suas respectivas áreas processadas pelo *scanner*. Quanto mais próximo da região central, mais o *laser* é mantido concentrado sobre amostra devido a trajetória delimitada por vetores com poucos milímetros de comprimento. A densidade de movimentação sobre o mesmo espaço eleva rapidamente a temperatura na região. A temperatura atinge seu pico e cessa, pois, a continuidade do processamento se dá pelo retorno do *laser* às extremidades para o passe seguinte. Nesta condição, a concentração de energia é suficientemente elevada para provocar deformações mecânicas perceptíveis ao substrato da amostra.

A Figura 60 exibe as temperaturas em gráficos individuais. Evidencia-se novamente a presença dos picos nas regiões centrais (monitoradas pelos termopares 3 e 7) ao deslocamento em forma de espiral.

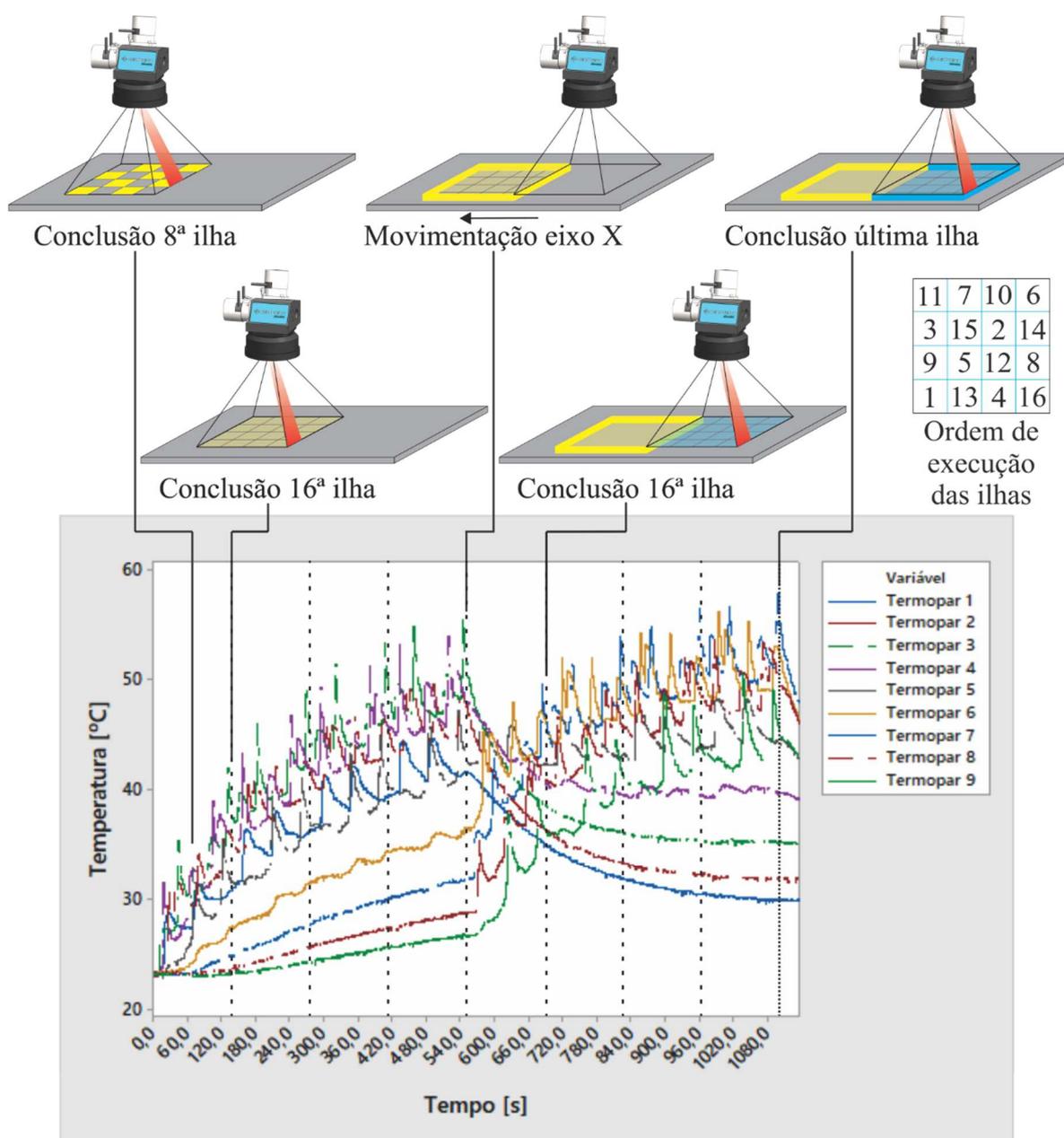
Figura 60 – Evolução individual das temperaturas na estratégia espiral externa sob a condição de movimentação *step and scan*.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Na estratégia xadrez, a subdivisão da área a ser processada em áreas menores (ilhas) ocasiona uma distribuição da energia caracterizada pela menor amplitude e maior número de picos de temperatura. No entanto, o comportamento de distribuição é acompanhado pela elevação rápida da temperatura nas regiões processadas. Como cada ilha apresenta vetores de trajetória curtos, o feixe permanece concentrado sobre esta mesma ilha até sua completa varredura. Graficamente, a evolução do processamento é caracterizada pelas curvas de temperatura exibidas na Figura 61. Nela, as curvas apresentam vários picos que estão relacionadas com a varredura individual de cada ilha da estratégia xadrez.

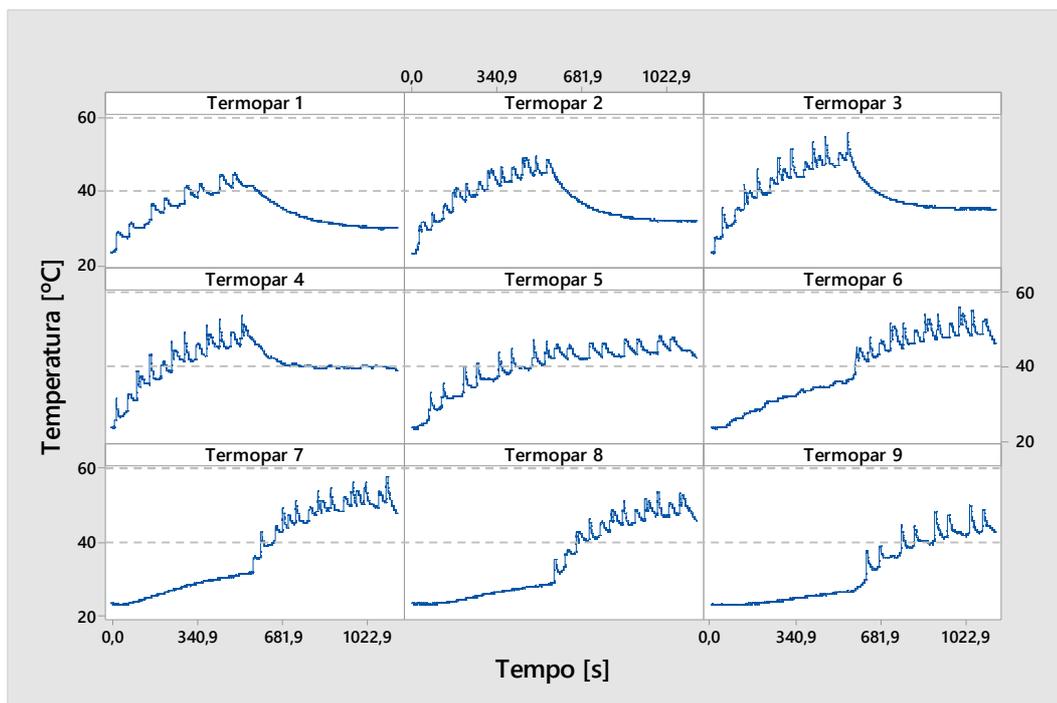
Figura 61 – Evolução da temperatura empregando estratégia xadrez.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Como as áreas da estratégia xadrez não coincidem necessariamente com a posição dos termopares, o processamento de uma mesma área pode afetar simultaneamente mais de um ponto monitorado. No entanto, para todas as curvas há manifestação de picos sucessivos de temperatura, sugerindo distribuição da energia fornecida, como ilustra a Figura 62.

Figura 62 – Temperaturas exibidas em painéis individuais para a estratégia xadrez na condição de movimentação *step and scan*.

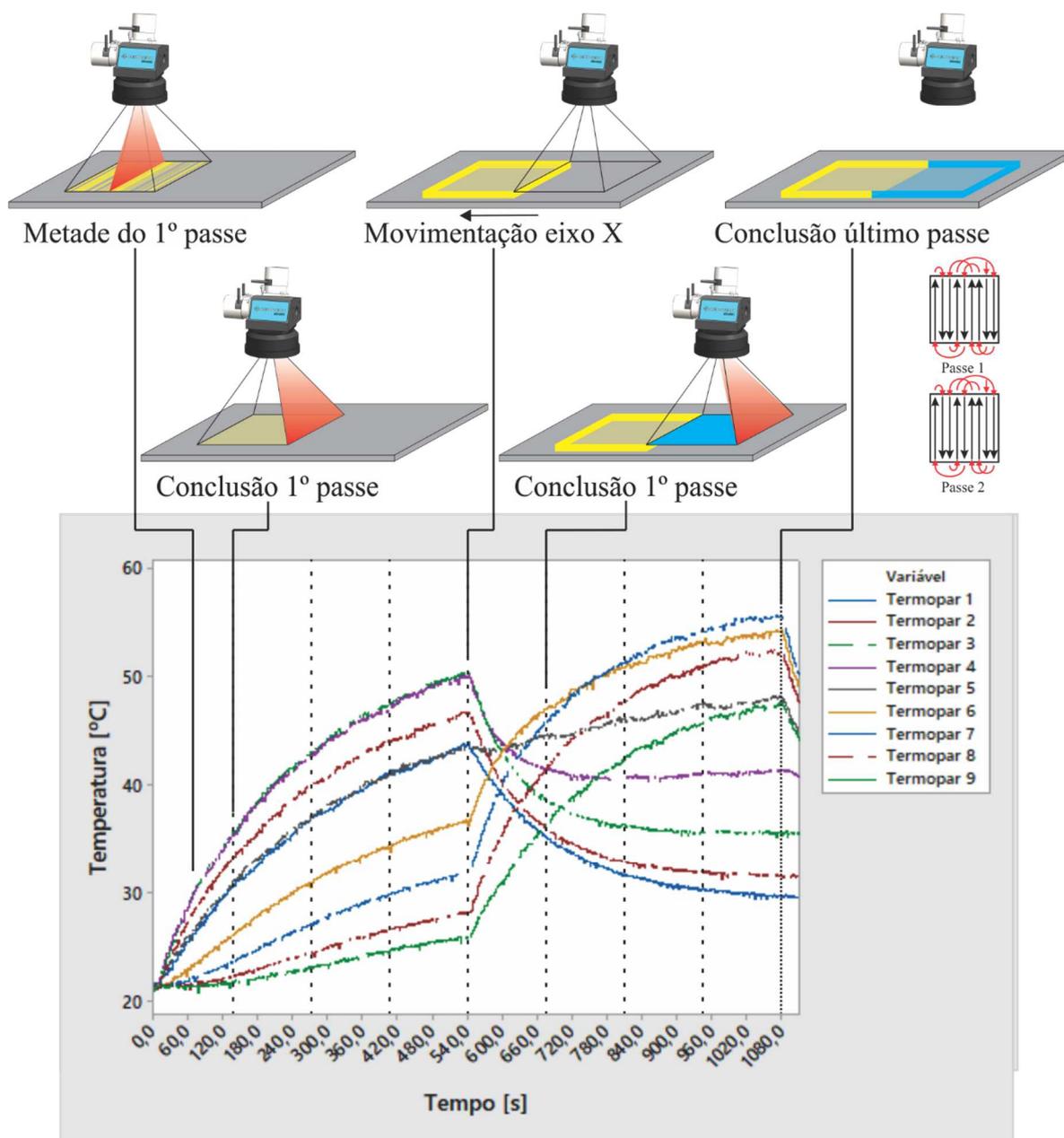


Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Na estratégia aleatorizada, a execução dos vetores bidirecionais ocorre segundo uma sequência aleatória pré-estabelecida. O resultado desta abordagem é exibido no gráfico da Figura 63. Há uma evolução gradativa da temperatura ao longo do processamento. Distinguem-se três comportamentos: os termopares 1 e 5 apresentam sincronia na elevação de temperatura; o termopar 2 apresenta um patamar intermediário de temperatura; e os com as temperaturas mais elevadas estão os termopares 3 e 4.

O fato dos pontos monitorados correspondentes aos termopares 1 e 5 apresentarem menor temperatura é compreensível quando se considera sua localização nas extremidades. Nestas regiões, a área adjacente não processada contribui para a dissipação da energia. De forma análoga, o termopar central (3), apresenta os maiores valores de temperatura, devido ao fato de estar envolto pelo processamento em ambos os lados.

Figura 63 – Evolução da temperatura empregando estratégia aleatorizada.



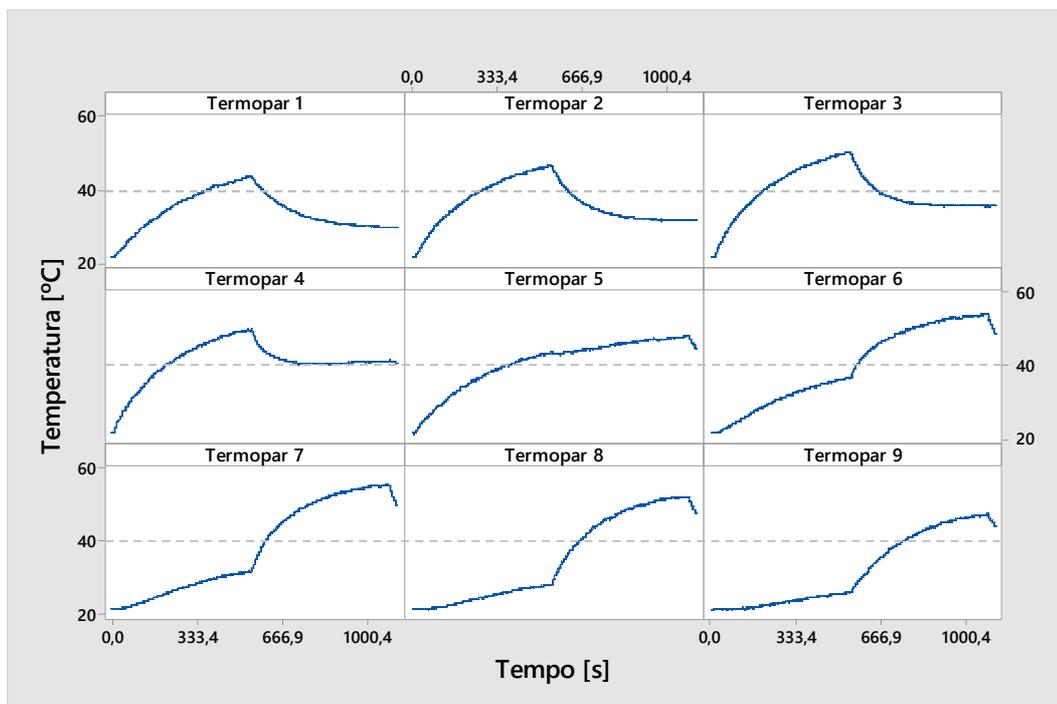
Fonte: elaborada pelo autor (2020).

No entanto, a distribuição da energia não seguiu uma direção uniforme das bordas para o interior do corpo de prova. O termopar 4 não apresenta a mesma magnitude de temperatura que o número 2, embora dispostos simetricamente sobre a área processada. Considera-se que a distribuição aleatorizada executada acabou por concentrar a energia na região situada sobre os termopares 3 e 4. Este fato justificaria a distribuição da energia observada.

No segundo momento do processamento (conclusão do 4º passe e movimentação do eixo X), há a troca de área sob atuação do *scanner* e ocorre a inversão do comportamento. Os pontos monitorados de 1 a 4 entram em processo de resfriamento e os pontos sobre a nova área

processada incrementam valores de temperatura pela ação do *laser*. Exceção se faz por conta do termopar 5 que compartilha a fronteira das duas áreas processadas e segue uma tendência de elevação da temperatura. A Figura 64 exhibe a evolução individual destas temperaturas.

Figura 64 – Evolução individual da temperatura empregando estratégia aleatorizada.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

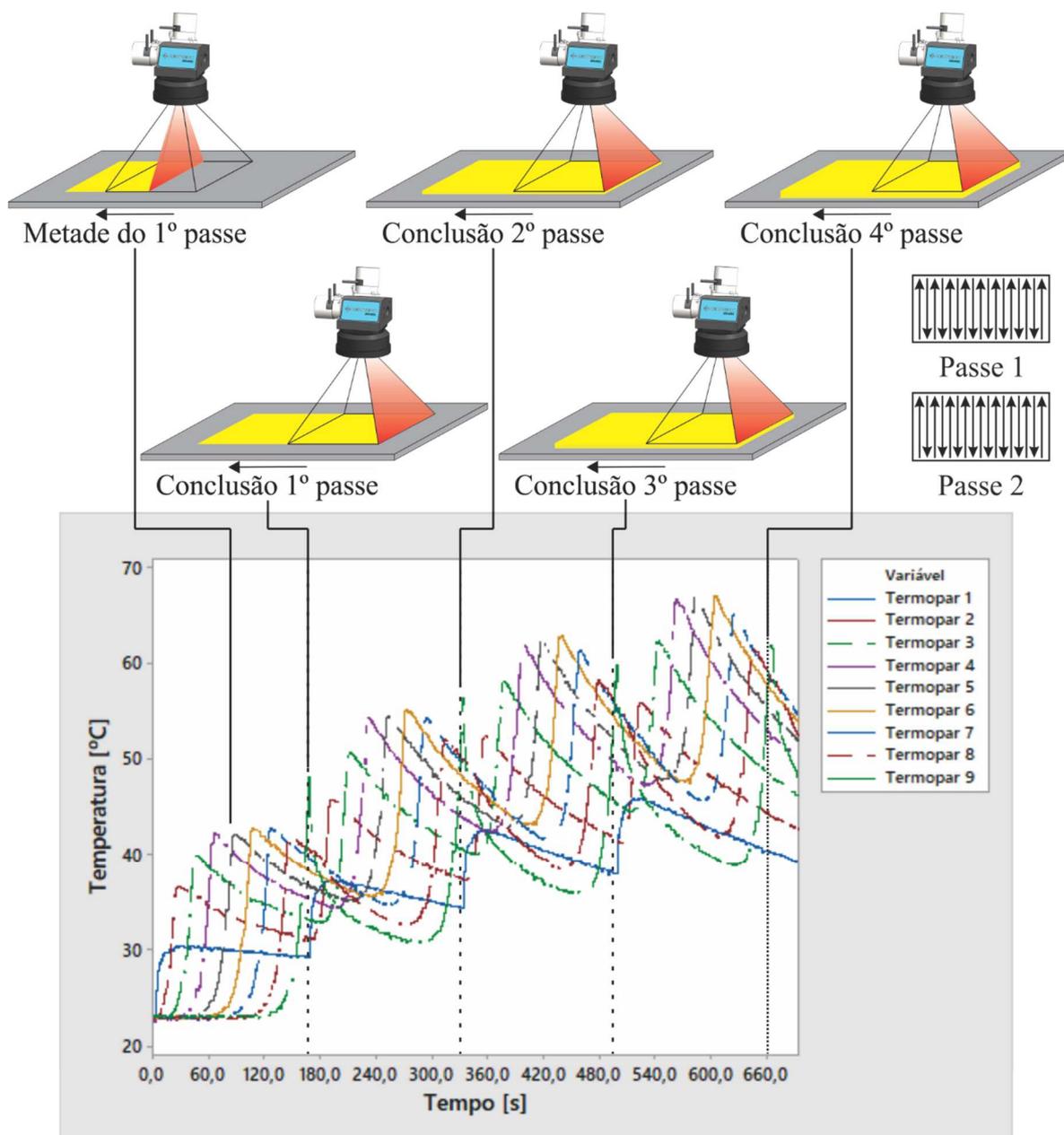
Os termopares 6 a 9 sofrem um aquecimento desde o início do ensaio, resultante da condução de calor ao longo do corpo da amostra. Este aquecimento inicial é mais intenso quanto mais próximo o ponto monitorado se encontra da primeira área processada. Também se observa que os maiores patamares de temperatura estão concentrados sobre os termopares 7 e 6. Numa analogia com o processamento da área anterior, estes patamares deveriam se concentrar sob os pontos 7 e 8. Esta mudança no perfil de distribuição das temperaturas é atribuída à influência do processamento da primeira área sob o processamento da segunda área.

5.2.2 Condição síncrona e simultânea

As estratégias expostas anteriormente também foram empregadas numa configuração de movimentação síncrona e simultânea de movimentação entre *scanner* e eixos lineares. Os padrões das estratégias foram adaptados para serem reproduzidos sobre uma área de processamento de 50 x 100 mm².

Nesta condição, o deslocamento dos eixos pode ser realizado no mesmo instante que ocorre a movimentação do feixe de *laser* pelo *scanner*. Para a estratégia bidirecional, esta funcionalidade fica evidente pela elevação sequencial da temperatura de todos os pontos monitorados a longo de um único passe. A Figura 65 exibe a evolução destas temperaturas.

Figura 65 – Estratégia bidirecional no modo de movimentação síncrona e simultânea.



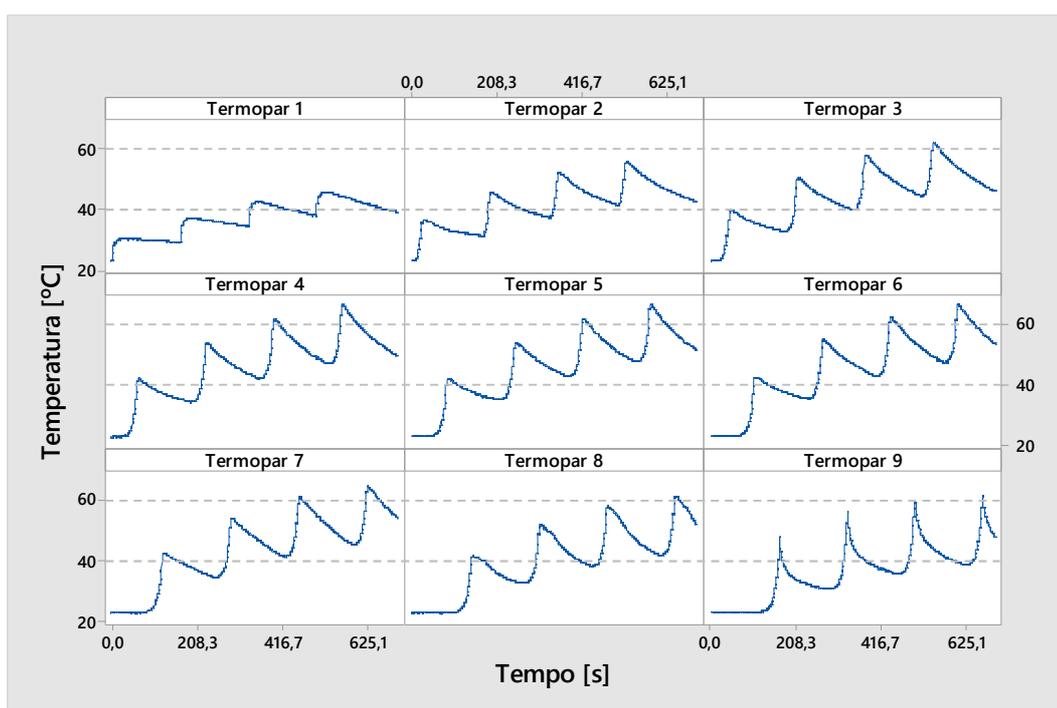
Fonte: elaborada pelo autor (2020).

A movimentação síncrona e simultânea dispensa a necessidade de processar uma área de 50 x 50 mm² com a estratégia e em seguida transpor a amostra para processamento da área

adjacente. Desta forma, o padrão de movimentação que compõem a estratégia bidirecional pode ser ampliada para processar em sua totalidade a área de 50 x 100 mm².

Como a movimentação dos eixos, neste caso, acompanha a movimentação do *scanner* ao longo do processamento, os picos de temperatura ocorrem com igual espaçamento. Esta homogeneidade é visualizada nos gráficos individuais de temperatura que são apresentados na Figura 66.

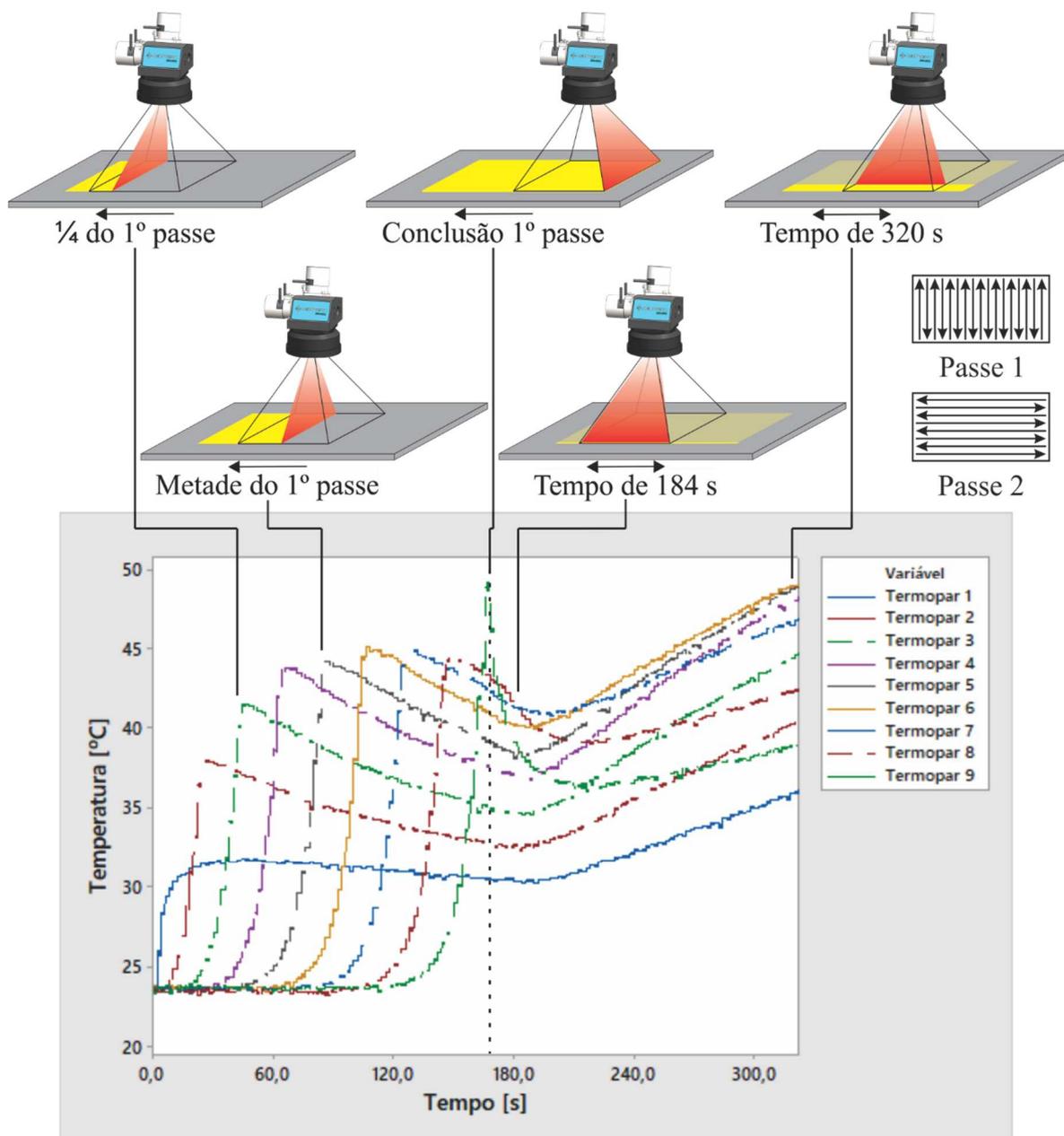
Figura 66 – Curvas individuais de temperatura para a estratégia bidirecional com movimentação síncrona e simultânea.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Para o caso onde a condição síncrona e simultânea é utilizada para executar a estratégia bidirecional alternada ocorre uma condição particular de movimentação. No primeiro momento a movimentação síncrona se limita a manter o eixo X acompanhando o deslocamento do feixe de *laser*. Desta forma, o deslocamento dos eixos lineares promove incrementos que vão expondo progressivamente novas áreas à ação do *scanner*. Nesta condição a velocidade elevada utilizada no processamento é desempenhada exclusivamente pelo eixo B do *scanner*. Este fato ocorre, pois, o comprimento do vetor de marcação corresponde a 50 mm e é completamente englobado pelo alcance do *scanner* na direção B. Este primeiro momento é identificável no gráfico da Figura 67 pelo comportamento das temperaturas. Os termopares são aquecidos, sequencialmente de 1 a 9, à medida que ocorre a varredura.

Figura 67 – Temperaturas coletadas na condição de movimentação síncrona e simultânea para a estratégia bidirecional alternada.

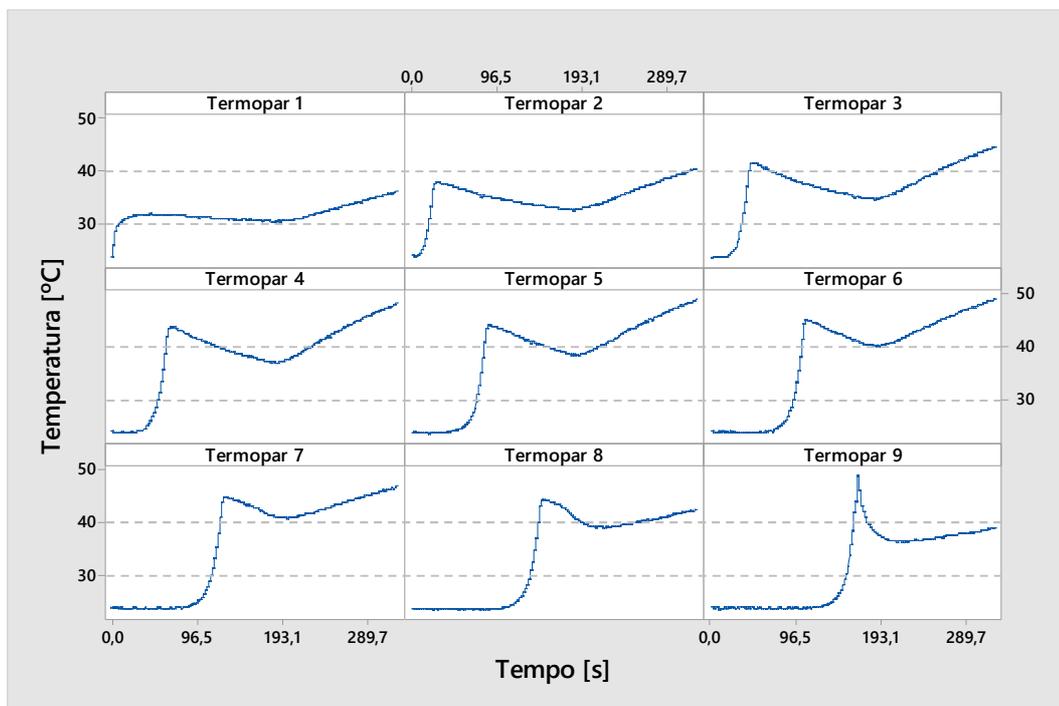


Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Após a conclusão do 1º passe, quando ocorre a alternância das camadas (rotação em 90° dos vetores) a dinâmica de processamento é alterada. Uma das consequências é a sensibilização simultânea dos pontos monitorados. Este comportamento é esperado, tendo em vista que a frente de aquecimento gerada pelo processamento avança paralela à linha formada por estes pontos. Esta simultaneidade também é visível no gráfico da Figura 68. Cada temperatura individual se manifesta diferente no primeiro momento, mas após o instante de tempo 184 s (conclusão do 1º passe) as curvas começam a apresentar comportamento de

incremento dos seus valores. Fato que decorre da mudança na direção de varredura dos vetores sobre a superfície da amostra.

Figura 68 – Visão individual das temperaturas para estratégia bidirecional alternada sob movimentação síncrona e simultânea.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Outra característica de destaque associada ao segundo passe é que o vetor de marcação a ser realizado apresenta comprimento de 100 mm, pois o mesmo é executado ao longo do sentido longitudinal da amostra. Como a atuação do *scanner* está limitada a 50 mm, é necessária uma complementação do movimento por parte dos eixos lineares. Ou seja, a movimentação síncrona e simultânea precisa atuar para efetuar a marcação completa deste vetor.

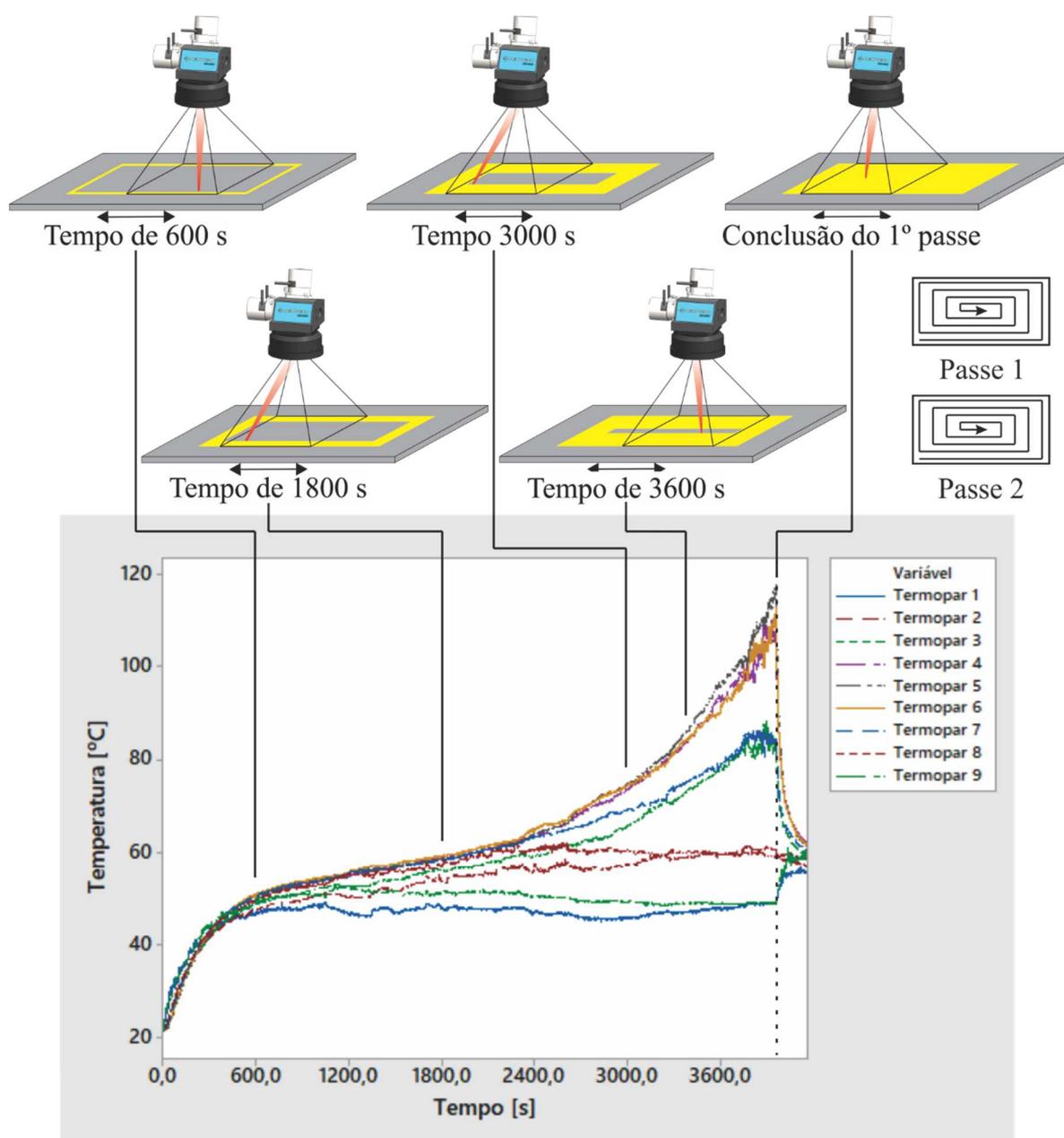
O tempo de processamento aumenta consideravelmente quando a movimentação síncrona e simultânea precisa ser executada para assegurar a completa execução da linha descrita pelo *laser*. Nesta situação, o vetor é executado até o limite da área varrida pelo *scanner*, sendo que o restante é executado pela movimentação do eixo linear. Contudo, a velocidade máxima dos eixos é 32 vezes inferior a programada para o *scanner* galvanométrico.

Uma das consequências da movimentação síncrona e simultânea sob tais condições é a não garantia da velocidade inicialmente programada. Parte do deslocamento pode ser alcançado com velocidade propiciada pelo *scanner*. Contudo, a atuação dos eixos não

possibilita atingir o valor de velocidade elevada, resultando em uma alteração da energia entregue por período de tempo e consequente modificação nas condições de processamento.

Vetores de marcação superiores ao alcance do *scanner* também apresentaram o mesmo efeito negativo sobre o tempo total de processamento na aplicação da estratégia de espiral externa. A Figura 69 exibe a evolução das temperaturas para o ensaio da estratégia em questão.

Figura 69 – Evolução das temperaturas obtidas em ensaio parcial (somente 1º passe concluído) para a estratégia espiral externa com movimentação síncrona e simultânea.

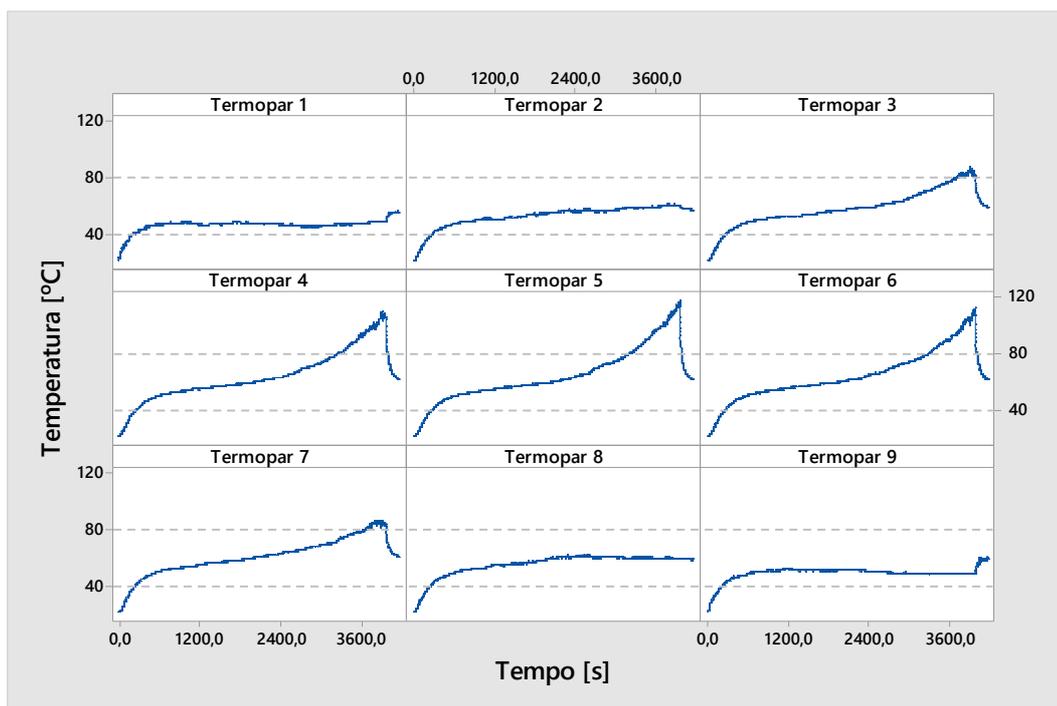


Fonte:Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Devido as características da estratégia espiral, os vetores de marcação alternam constantemente sua direção entre eixos X e Y. No contexto do ensaio realizado (processamento de uma área de 50 x 100 mm²) parte os vetores de marcação apresenta comprimento inferior ao alcance do *scanner*, logo estes podem ser executados unicamente por meio da deflexão dos espelhos. No entanto, no sentido longitudinal da área a ser processada o comprimento dos vetores extrapola o alcance do *scanner*, exigindo assim a complementação de movimentação por parte dos eixos lineares.

Na Figura 70 é possível observar a evolução individual das temperaturas para a estratégia espiral externa na condição síncrona e simultânea. Observa-se que o termopar 5 e seus adjacentes são expostos a maiores temperaturas. A medida em que a estratégia é executada os vetores de marcação são concentrados próximos ao centro da área. Como resultado, há uma elevação da temperatura monitorada pelos termopares centrais a valores próximos de 120 °C.

Figura 70 – Visão individual das temperaturas para estratégia espiral externa sob movimentação síncrona e simultânea.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

A estratégia de processamento xadrez apresenta a particularidade de poder ser composta por pequenas áreas. Este fato privilegia atuação do *scanner* galvanométrico, caso as dimensões das ilhas estejam dentro da área de alcance dos espelhos. Com esta condição satisfeita, o processamento das ilhas é realizado unicamente pelo *scanner*, permitindo usufruir

dos valores de velocidade e aceleração disponibilizados por este dispositivo. Desta forma, a movimentação síncrona e simultânea por meio dos eixos lineares atuaria no intuito de reposicionar relativamente o *scanner* com as ilhas a serem processadas na sequência.

O uso da estratégia aleatorizada em modo de movimentação síncrona e simultânea apresenta determinadas particularidades. Quando a aleatoriedade gerada permite a concentração de vetores em uma mesma região, pode ocorrer a prevalência de movimentação baseada no *scanner*. Porém, a mesma aleatoriedade pode criar situações onde os vetores são dispostos distantes uns aos outros em sua sequência de execução. Neste caso, a distância que separa dois vetores subsequentes pode demandar uma complementação de movimentação por parte dos eixos lineares. Quanto mais intensa esta complementação de movimentação determinada pela aleatorização, maior a parcela de tempo gasto para o reposicionamento relativo entre amostra e *scanner*, elevando assim o tempo total de processamento.

5.3 RESUMO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE MOVIMENTAÇÃO E DAS ESTRATÉGIAS DE VARREDURA

Dentre os parâmetros empregados, a área varrida pelo *scanner* e a velocidade dos eixos lineares apresentaram a maior influência sobre o tempo total de execução, para as condições de processamento utilizadas. Estes dois parâmetros também apresentam maior interação entre si, se comparados com os demais parâmetros.

Observa-se que ao reduzir a área varrida pelo *scanner* há um aumento da utilização da movimentação dos eixos lineares, com o objetivo de complementar a movimentação limitada dos espelhos. Nesta condição, os eixos lineares atuam diretamente na execução das linhas processadas com o *laser*, e não apenas reposicionando a amostra sob o *scanner*. O uso intensivo dos eixos lineares na movimentação síncrona e simultânea provoca um aumento considerável do tempo de processamento, fato decorrente da velocidade e aceleração destes componentes serem dezenas de vezes inferiores à do *scanner*.

A movimentação realizada sobre a condição *step and scan* é caracterizada principalmente pela distinção da temperatura da amostra ao longo do processamento. Observa-se uma divisão clara entre cada etapa de processamento, que nos gráficos é identificada pela mudança na tendência de comportamento captado pelos termopares sob cada área.

As estratégias bidirecional e bidirecional alternada apresentam pouca variação entre si em relação ao tempo total de processamento, considerando as condições e níveis dos parâmetros de movimentação ensaiados. Se comparadas em termos de temperatura máxima alcançada, a

estratégia bidirecional alternada apresenta valores cerca de 6 % superiores. No entanto, devido a rotação imposta aos vetores de marcação, a dinâmica de distribuição das temperaturas difere entre estas duas estratégias.

A estratégia espiral externa apresenta a característica de concentrar a energia no centro da área processada, onde os vetores de marcação apresentam menor comprimento. Tal concentração de varredura do *laser* faz com que os maiores valores de temperatura sejam atingidos nesta estratégia (cerca de 40 % a mais se comparada a bidirecional). Contudo, o tempo de processamento é o menor dentre os ensaios realizados, sendo em torno de 10 % menor se comparado as estratégias do tipo bidirecional e bidirecional alternada.

A subdivisão da área a ser processada em ilhas permite que a estratégia xadrez atinja menores patamares para os valores máximos de temperatura. Se comparada com a estratégia bidirecional, sua temperatura máxima é cerca de 17 % menor. No entanto, o tempo de processamento é o maior de todos, cerca de 69 % superior na mesma comparação.

A estratégia aleatorizada assemelha-se a estratégia xadrez em termos de temperatura máxima e tempos de processamento para as condições ensaiadas. A temperatura máxima é cerca de 23 % inferior e o tempo de processamento 66 % maior, quando comparados a estratégia bidirecional. Contudo, graficamente os comportamentos são distintos. A estratégia xadrez é descrita por curvas formadas por picos com rápida variação de temperatura, ao ponto que a estratégia aleatorizada apresenta curvas com elevação progressiva da temperatura.

Na Tabela 4 são apresentados os valores de temperatura máxima encontrados em cada uma das áreas discretamente processadas na condição de movimentação *step and scan*, bem como os tempos de processamento envolvidos para cada uma das estratégias ensaiadas.

Tabela 4 – Valores de temperatura máxima e tempos de processamento para cada estratégia de varredura empregada nos ensaios realizados.

Tipo de estratégia	Temperatura máxima (°C)	Tempo de processamento (s) para:		
	1ª área/2ª área	1 passe	1 área	Total
Bidirecional	65,5/72,2	82,4	328,6	652,4
Bidirecional alternada	69,9/76,3	83,0	331,2	655,2
Espiral externa	90,7/102,6	73,7	295,0	591,0
Xadrez	55,7 /57,9	139,4	555,4	1107,4
Aleatorizada	50,4/55,6	135,8	546,0	1082,0

Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Em termos gerais, as estratégias do tipo bidirecional e bidirecional alternada podem ser empregadas quando deseja obter um processamento com equilíbrio entre tempo de processamento satisfatório e média exposição a picos e valores máximo de temperatura. A estratégia espiral externa se adequa a aplicações que priorizam o menor tempo de processamento, porém ao custo de uma concentração de energia acompanhada de picos elevados de temperatura na região central da amostra. As estratégias do tipo xadrez e aleatorizada são recomendadas para aplicações onde a sensibilidade a valores máximos de temperatura supera o inconveniente dos maiores tempos de processamento.

Na movimentação realizada sobre a condição síncrona e simultânea há uma tendência de distribuição de energia mais uniforme no decorrer do processamento. A continuidade de movimento permite a distribuição da energia ao longo de toda a área a ser processada. No entanto, quando a movimentação imposta pela estratégia supera a área varrida pelo *scanner* ocorrem os efeitos negativos da intensificação de uso dos eixos lineares. Neste caso, a aparente vantagem de distribuição da energia é suprimida pelo excessivo tempo necessário ao processamento.

Como exposto, as estratégias de varredura com presença de vetores cujas dimensões superem a área varrida pelo *scanner* acabam por demandar maior atuação dos eixos lineares. Em contrapartida, as estratégias que atuam concentrando o processamento em menores áreas (por exemplo, a estratégia xadrez) permitem uso intensificado do *scanner*. Este fato é atingido pela dimensão reduzida de tais áreas, que podem ser processadas unicamente com movimentação propiciada pela deflexão dos espelhos. Enquanto o *scanner* galvanométrico se ocupa do processamento localizado, os eixos lineares podem em tempo adequado, por meio da movimentação simultânea, progressivamente dispor a amostra em direção ao processamento da próxima área.

Nas estratégias com maior inversão de movimentação, por exemplo, a varredura espiral, a variação de movimento envolvendo dois eixos terá manifestação crítica nos pontos de conexão a 90°. Observa-se nestes casos, que a inversão de movimento acarreta nestes pontos variação brusca de velocidade, sobretudo nas condições com intensa participação dos eixos lineares.

5.4 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

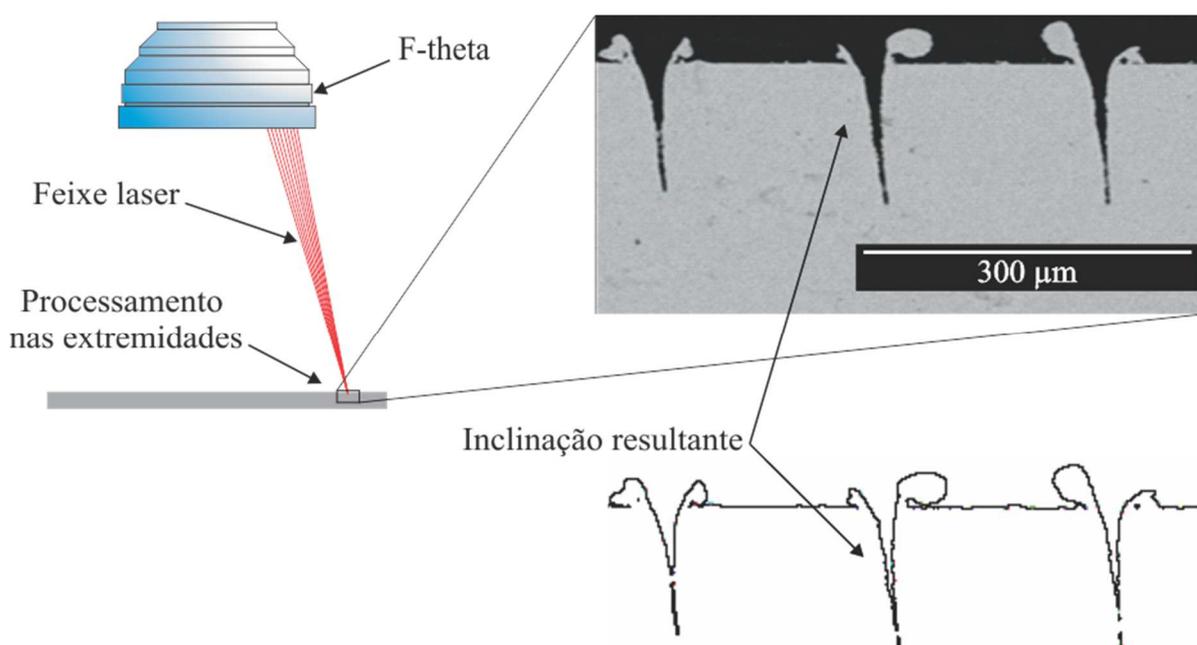
Além dos resultados obtidos por meio dos ensaios realizados, foi possível observar outros aspectos. Estes aspectos estão relacionados aos elementos como lentes e a cinemática do sistema. A observação destes itens permite estabelecer considerações adicionais para seleção e aplicação dos sistemas síncronos e simultâneos de movimentação.

5.4.1 Movimentação síncrona e simultânea com lentes não telecêtricas

As lentes do tipo *F-theta* convencionais tem embutidas em sua configuração óptica o surgimento de um ângulo não perpendicular entre o feixe de *laser* e superfície da amostra. O ângulo aumenta tão distante seja a posição do *laser* em relação ao centro da área de processamento da lente *F-theta*. Isto resulta em uma exposição não uniforme ao *laser* à medida que o processamento de um padrão é executado.

Na Figura 71 há um exemplo da influência do ângulo não perpendicular sobre o processamento. O efeito da inclinação na maioria dos casos é indesejado. A angulação pode comprometer a distribuição do padrão ao longo da superfície no caso das marcações ou na geometria do volume extraído no caso dos processos de remoção de material.

Figura 71 – Efeito do processamento realizado com feixe de *laser* nas extremidades da área de alcance da lente *F-theta*.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

A movimentação síncrona e simultânea pode ser empregada para mitigar os efeitos da inclinação ao propiciar a movimentação do feixe pelos eixos lineares e reduzir o uso das regiões periféricas da lente *F-theta*. Esta condição é atingida impondo uma restrição, em nível de *software*, que limite a movimentação do feixe dentro de uma área definida de alcance do *scanner*. Nestes casos, embora exista curso para que os espelhos promovam maior deflexão do feixe, a movimentação dos galvanômetros é interrompida e limitada a uma nova área de processamento. O resultado indireto é que o feixe, quando restrito a esta menor área de trabalho, apresenta menor inclinação não perpendicular em relação a superfície processada.

Esta estratégia naturalmente apresenta desvantagens. Embora a área de trabalho seja menor, a resolução de posicionamento não é incrementada, uma vez que a deflexão dada pelo giro dos espelhos continua atrelada à área efetivamente alcançada pela lente *F-theta*. Um aumento da resolução só é alcançado pela utilização de uma lente com menor distância focal, onde a relação deslocamento do feixe de *laser* por graus de rotação do espelho é reduzida.

5.4.2 Amostra movimentada versus scanner movimentado

Nos ensaios descritos no trabalho a cinemática de movimentação era tal que o *scanner* se encontrava estacionário (salvo durante a utilização do eixo *Z*), ao ponto que a amostra era movimentada pelos eixos lineares. Nesta condição ocorre uma movimentação da amostra ao longo do processamento. Esta movimentação é intensificada quanto maior a área além daquela coberta pelo *scanner* e quão mais severos são os parâmetros de movimentação dos eixos lineares.

Observa-se, neste caso, que a aceleração sofrida pela amostra interfere em pontos específicos. Por exemplo, amostras com geometrias na forma de lâminas poderiam ser deformadas elasticamente conforme a movimentação em determinado sentido. No caso de um processamento empregando leito de pó, as variações de velocidade atuariam como fator de movimentação das partículas. Isto poderia gerar uma distribuição irregular do pó, bem como a alteração da altura de camada dado o efeito de compactação induzida pelas frequentes movimentações.

Ainda considerando o emprego de leito de pó, outro fator influente é massa de pó a ser deslocada. Uma configuração de máquina empregando uma área de trabalho de 200 x 200 x 300 mm³, quando completamente preenchida com pó, por exemplo, o aço carbono, apresentará uma massa em torno de 94 kg. A movimentação desta massa representa um

consumo de energia elevado, bem como uma redução do desempenho em termos de velocidade e aceleração alcançáveis.

Para situações onde a movimentação da amostra é crítica em função das suas particularidades geométricas ou de massa, como nos exemplos anteriores, é possível privilegiar outra configuração cinemática. A movimentação síncrona e simultânea, nestes casos, pode ser alcançada com emprego da movimentação do próprio *scanner*.

Nesta configuração, os eixos lineares ao invés de deslocarem a amostra, deslocam o próprio *scanner*. A massa tipicamente encontrada em um *scanner* 2D com abertura de 20 mm tem uma ordem de grandeza de 3 kg. Desta forma, a movimentação do *scanner*, em comparação com a movimentação da massa de pó, propiciaria melhores características em termos de dinâmica de movimentação relativa entre feixe de *laser* e área processada.

5.4.3 Uso em sistemas de alimentação contínua

A cinemática alvo de estudo neste trabalho se concentrou na utilização do *scanner* com eixos lineares. O curso destes eixos é finito e delimitado pela sua construção mecânica. Virtualmente, a movimentação pode ser expandida a eixos quão extensos for possível.

Contudo, eixos com deslocamento não limitado podem ser empregados. É caso de materiais alimentados em um fluxo contínuo promovido por esteiras. Um exemplo são as linhas de produção ou montagem, nas quais não existe paradas para o processamento.

Neste caso, o eixo correspondente a esteira desloca-se em uma única direção, ou seja, sua posição é incrementada continuamente. As condições para sincronização entre esteiras e *scanner* segue mesmo princípio empregado com eixos lineares. No entanto, algumas considerações devem ser levadas em conta.

Para que ocorra sincronização, alguma grandeza associada ao deslocamento da esteira deve ser adquirida pelo sistema de controle. Esta grandeza pode ser a posição do material ou a velocidade de fornecimento da esteira. O controlador deve ser hábil a processar esta informação de forma a comandar a movimentação dos espelhos e evitar que as oscilações na alimentação do material provoquem variações no comportamento do sistema. Estas variações serão percebidas como desvios no padrão processado.

Caso o processamento seja alimentado com o valor de velocidade da esteira, o controlador deve calcular a posição de interesse. Em condições onde a movimentação do espelho acompanha o deslocamento da esteira haverá um somatório de velocidades. De forma

recíproca, a velocidade resultante é menor quando os espelhos atuam “contra” o deslocamento imposto pela esteira.

Outro ponto crítico é a interpretação do controle em relação a posição do eixo. Os valores de posição em um eixo linear compreendem basicamente seu curso, por exemplo, 0 mm a 300 mm. Em um eixo de alimentação contínua este valor é incrementado indefinidamente. Em dado momento, o valor da posição extrapolará o máximo valor de memória alocado para esta variável. Esta condição deve ser considerada para evitar erros relacionados ao “estouro” do valor de posição.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas ao final do trabalho, bem como as propostas para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

Dentre os objetivos específicos, de identificar as características e limitações em métodos e tecnologias baseadas em *scanner*, foi possível observar que a principal vantagem destes dispositivos é propiciar velocidade e aceleração elevada de deslocamento do feixe de *laser*, em comparação com os sistemas de movimentação convencional. No entanto, suas principais limitações de utilização decorrem da área que pode ser varrida pelo *scanner* e da necessidade de sincronização do acionamento da fonte de *laser* com a posição determinada pelo sistema de movimentação.

Para atender ao objetivo específico de identificar a influência dos parâmetros de movimentação sobre o tempo total de processamento foi empregue um experimento tendo como fatores a velocidade e área varrida pelo *scanner*, aceleração e velocidade dos eixos lineares e o tipo de rampa de aceleração. Dentre estes, a maior influência sobre o tempo total de processamento recai sobre a área varrida pelo *scanner* e a velocidade dos eixos lineares. Os demais fatores, para os níveis empregados no experimento, apresentam efeitos proporcionalmente pequenos ou nulos sobre a resposta, em comparação aos citados anteriormente.

Com objetivo específico de avaliar a distribuição da energia entregue pelas estratégias de varredura do feixe de *laser* uma amostra foi instrumentada com termopares, permitindo obter a evolução da temperatura ao longo do processamento empregado. Diferentes estratégias de varredura foram comparadas, sendo que cada estratégia apresenta particularidades relacionada a forma como a energia *laser* é fornecida aos diferentes pontos da área processada.

A estratégia bidirecional promove uma evolução sequencial e gradual da temperatura na direção perpendicular as linhas paralelas que compõem o avanço da varredura. Na variação alternada da estratégia bidirecional, ocorre a sincronização da elevação de temperatura devido ao avanço da varredura que atinge simultaneamente a linha formada pelos transdutores de temperatura.

Já as movimentações do tipo espiral provocam a concentração de energia, e consequentes picos de temperatura a medida que o *laser* é confinado à atuação no centro da

área processada. As estratégias de varredura xadrez e aleatorizada apresentam os maiores tempos de processamento, contudo são acompanhadas dos menores patamares de temperatura, sendo a xadrez caracterizada pela presença de inúmeros picos de temperatura e a aleatorizada por uma tendência de elevação regular.

Os resultados alcançados para atender ao objetivo específico de analisar diferentes estratégias de varredura quando aplicadas na movimentação síncrona e simultânea demonstram que determinadas condições deterioram o desempenho do sistema. Quando a estratégia de varredura emprega vetores de marcação que superam a área varrida pelo *scanner* galvanométrico há necessidade de complementar a execução destes vetores com emprego dos eixos lineares. O uso intensivo da movimentação complementar, neste caso, ocasiona redução da velocidade efetiva de processamento. Por outro lado, o uso de estratégias que intrinsecamente operam com vetores de marcação confinados ao alcance da área varrida pelo *scanner* permite uso pleno da velocidade e aceleração elevada proveniente da deflexão do feixe de *laser* pelos espelhos.

Para atender ao objetivo específico de propor estratégias de varredura na utilização de sistemas de movimentação síncronas e simultâneas entre *scanners* galvanométricos e eixos lineares, é necessário promover a condensação dos elementos a serem processados. Nestas estratégias as áreas com grande densidade de caracteres ou linhas devem ser agrupadas de forma a serem contempladas pela área varrida pelo *scanner*. Desta forma, a velocidade do *scanner* pode ser desempenhada para realizar estas linhas densamente concentradas. A transição entre os agrupamentos pode ser então realizada pelos eixos lineares, de forma simultânea, à medida que o *scanner* galvanométrico se ocupa das regiões com elevada demanda por movimentações rápidas.

Dentre as principais limitações deste trabalho está a experimentação prática das estratégias de varredura somente para o processo de microrremoção a *laser*. No entanto, outros processos (por exemplo, os de manufatura aditiva) também são potenciais interessados na ampliação da área de processamento dos *scanners* galvanométricos. Tais processos apresentam particularidades que certamente afetarão a utilização da movimentação síncrona e simultânea nestas aplicações, o que demanda a continuidade de estudos relacionados ao tema.

6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista as possibilidades de evolução dos estudos baseados em sistemas síncronos e simultâneos de movimentação, são propostas para trabalhos futuros os seguintes aspectos:

- a) desenvolver algoritmos dedicados a criação de rotinas de processamento otimizadas para sistemas síncronos e simultâneos de movimentação;
- b) analisar o emprego destes sistemas de movimentação em processo de fabricação por fusão seletiva de leito de pó e sua contribuição para o resultado obtido;
- c) integrar o *scanner* galvanométrico com sistemas de movimentação robótica ou de coordenadas polares;
- d) aplicar a movimentação síncrona e simultânea em processos de microssoldagem com emprego de oscilação do feixe de *laser* por meio do *scanner* (*wobble*);
- e) analisar e detalhar modelos matemáticos que permitam prever a distribuição de energia sob diferentes condições de movimentação do feixe de *laser* para definir a melhor estratégia de varredura em função do padrão geométrico a ser processado;
- f) analisar a viabilidade de utilização de métodos de filmagem termográfica para permitir uma visualização global da área processada ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- AEROTECH. ECO165LM Hardware Manual. 2017a. Catálogo *online*. Disponível em: <https://www.aerotech.com/product-catalog/stages/linear-stage/eco165lm.aspx?search-auto-complete=true>. Acesso em: 22 set. 2018.
- AEROTECH. How to Configure IFOV. 2017b. Disponível em: http://www.aerotechmotioncontrol.com/ftp/pwpsoftware/manuals_helpfiles/Controllers/Automation%20200/User%20Guide%20for%20Infinite%20Field%20of%20View.pdf. Acesso em: 8 maio 2019
- AEROTECH. PRO115LM Mechanical-Bearing Direct-Drive Linear Stage Hardware Manual. 2017c. Catálogo *online*. Disponível em: <https://www.aerotech.com/product-catalog/stages/linear-stage/pro115lm.aspx>. Acesso em: 22 set. 2018.
- AEROTECH. Nmark AGV-HP(O) 2-Axis Galvo Scanner Hardware Manual. 2018. Catálogo *online*. Disponível em: [http://www.aerotechmotioncontrol.com/ftp/pwpsoftware/manuals_helpfiles/Mechanical/Stage%20Tables%20and%20Slides/AGV-HP\(O\).pdf](http://www.aerotechmotioncontrol.com/ftp/pwpsoftware/manuals_helpfiles/Mechanical/Stage%20Tables%20and%20Slides/AGV-HP(O).pdf). Acesso em: 22 set. 2018.
- AEROTECH. **A3200 Help Files**. *Software*. 2019.
- AHMED, M. F.; SCHNELL, E.; AHMAD, S.; YUKIHARA, E. G. Image reconstruction algorithm for optically stimulated luminescence 2D dosimetry using laser-scanned Al₂O₃:C and Al₂O₃:C,Mg films. **Physics in Medicine & Biology**, v. 61, n. 20, p. 7484-7506, 2016. DOI: 10.1088/0031-9155/61/20/7484.
- AN, Y.; KIM, J. M.; SOHN, H. Laser lock-in thermography for fatigue crack detection in an uncoated metallic structure. *In: 2013 SPIE Conference on Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, 2013, San Diego, CA, United states. Proceedings [...]*. SPIE, 19 abr. 2013. p. 12. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2009205>. Acesso em: 21 jan. 2019.
- BLAIS, F. Control of Low Inertia Galvanometers For High Precision Laser Scanning Systems. **Optical Engineering**, v. 27, n. 2, p. 104-110, 1988. DOI: 10.1117/12.7976653.
- BO, Q.; YU-SHENG, S.; QING-SONG, W.; HAI-BO, W. The helix scan strategy applied to the selective laser melting. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 63, n. 5-8, p. 631-640, 2012. DOI: 10.1007/s00170-012-3922-9.
- BRANDT, M. **Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications**. Woodhead Publishing, 2016. p. 498. ISBN 9780081004340.
- CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. **Conduction of heat in solids**. Clarendon Press, 1959.
- CATCHPOLE-SMITH, S.; ABOULKHAIR, N.; PARRY, L.; TUCK, C.; ASHCROFT, I. A.; CLARE, A. Fractal scan strategies for selective laser melting of ‘unweldable’ nickel superalloys. **Additive Manufacturing**, v. 15, p. 113-122, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.02.002>.

CHENG, B.; SHRESTHA, S.; CHOU, K. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting. **Additive Manufacturing**, v. 12, p. 240-251, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.007>.

CLOOTS, M.; ZUMOFEN, L.; SPIERINGS, A. B.; KIRCHHEIM, A.; WEGENER, K. Approaches to minimize overhang angles of SLM parts. **Rapid Prototyping Journal**, v. 23, n. 2, p. 362-369, 2017. DOI: 10.1108/rpj-05-2015-0061.

DARLING, D. **Galvanometer**. In: Encyclopedia of Science. 2016? Disponível em: <https://www.daviddarling.info/encyclopedia/G/galvanometer.html>. Acesso em: 14 out 2019.

DE LOOR, R. Polygon scanner system for ultra short pulsed laser micro-machining applications. In: Lasers in Manufacturing, 2013, Amsterdam. **Proceedings [...]**. Elsevier Science Bv, p. 537-544. Disponível em: https://ac.els-cdn.com/S1875389213001284/1-s2.0-S1875389213001284-main.pdf?_tid=9c9f400c-5c73-4288-a5dc-7b6d26232923&acdnat=1547942830_ff0c6b62699889c0f5d189ba5b3dafc3. Acesso em: 22 jan. 2019.

DONG, L.; SAMSON, B. **Fiber Lasers: Basics, Technology, and Applications**. Boca Raton: CRC Press, 2016. p. 324. ISBN 9781498725552.

DOWDING, C. **Laser ablation**. Woodhead Publishing, 2010. p. 575-628. ISBN 9781845694746.

DURR, U.; HOLTZ, R.; JOKIEL, M.; LIEBERS, R.; LAVOIE, D. Advanced micro-welding strategies with pulsed Nd:YAG lasers. In: ICALEO 2004 - 23rd International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, 2004, San Francisco, CA, United states. **Proceedings [...]**. Laser Institute of America, p. 1-6. Disponível em: <https://doi.org/10.2351/1.5060192>. Acesso em: 28 mar. 2019.

DUY, V. H.; DAO, T. T.; ZELINKA, I.; KIM, S. B.; PHUONG, T. T. **AETA 2017 - Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences: Theory and Application**. [S.l]: Springer, 2017. p. 1092. ISBN 9783319698144.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR LASER TECHNOLOGY. Laser Technology in Photovoltaics. 2017. Disponível em: https://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/en/documents/product_and_services/laser_material_processing/B_Laser_Technology_in_Photovoltaics_2017.pdf. Acesso em: 2 set. 2019.

GF MACHINING SOLUTIONS. Application booklet: Experience Laser Texturing. 2018. Catálogo *online*. Disponível em: <https://www.gfms.com/content/dam/gfac/proddb/advanced-manufacturing/en/laser-application-catalog-en.pdf>. Acesso em: 4 set. 2019.

GF MACHINING SOLUTIONS. Série LASER P AgieCharmilles. 2019. Disponível em: https://www.gfms.com/country_BR/pt/Products/advanced-manufacturing/laser-ablation-texturing-family/laser-p-series.html. Acesso em: 8 nov. 2019.

HANZL, P.; ZETEK, M.; BAKŠA, T.; KROUPA, T. The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of SLM Parts. **Procedia Engineering**, v. 100, p. 1405-1413, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.510>.

HELSEER, G. Galvanometer scanners not fast enough for your new laser or application? 2016. Disponível em: <https://precisionlaserscanning.com/2016/03/galvanometer-scanners-not-fast-enough-for-your-new-laser-or-application/>. Acesso em: 20 jul. 2019.

HOMBURG, O.; MITRA, T. Gaussian-to-top-hat beam shaping - An overview of parameters, methods, and applications. *In: Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XIV*, 2012, San Francisco, CA. **Proceedings [...]**. p. 10. Disponível em: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/8236/82360A/Gaussian-to-top-hat-beam-shaping--an-overview-of/10.1117/12.907914.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2019.

IPG PHOTONICS. **YLR-400-AC-Y14: Test Results**. 4 ed. Manual de Instruções. 2014. p. 1-4.

IPG PHOTONICS. Fiber Beam Delivery. IPG Photonics, 2019. Disponível em: <https://www.ipgphotonics.com/en/products/beam-delivery/fiber-beam-delivery>. Acesso em: 23 abri. 2019.

IPG PHOTONICS. **Test Results Ytterbium Pulsed Fiber Laser Model YLPN-1-1x120-50-M S/N 16123833**. 5 ed. Manual de Instruções. [2017]. p. 1-9.

JAEGGI, B.; CANGUEIRO, L.; BRUNEEL, D.; DE CAMPOS, J. A. R.; HAIRAYE, C.; NEUENSCHWANDER, B. Micromachining using pulse bursts: Influence of the pulse duration and the number of pulses in the burst on the specific removal rate. *In: Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXIII*, 2018, San Francisco, CA, United states. **Proceedings [...]**. SPIE, 16 fev. 2018. p. 11. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2289549>. Acesso em: 22 jan. 2019.

JAEGGI, B.; NEUENSCHWANDER, B.; HUNZIKER, U.; ZUERCHER, J.; MEIER, T.; ZIMMERMANN, M.; SELBMANN, K. H.; HENNIG, G. Ultra high precision surface structuring by synchronizing a galvo scanner with an ultra short pulsed laser system in MOPA arrangement. *In: Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVII*, 2012, San Francisco, CA, United states. **Proceedings [...]**. SPIE, 15 fev. 2012. p. 12. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.909844>. Acesso em: 22 jan. 2019.

JAEGGI, B.; NEUENSCHWANDER, B.; MEIER, T.; ZIMMERMANN, M.; HENNIG, G. High precision surface structuring with ultra-short laser pulses and synchronized mechanical axes. *In: Lasers in Manufacturing*, 2013a, Amsterdam. **Proceedings [...]**. Elsevier Science Bv, p. 319-326. Disponível em: https://ac.els-cdn.com/S1875389213000989/1-s2.0-S1875389213000989-main.pdf?_tid=344bf496-d307-4f7a-8806-6ac6fae622a5&acdnat=1547942835_2eb5e88f64d0eeb8b49c333eb38baa8b. Acesso em: 22 jan. 2019.

JAEGGI, B.; NEUENSCHWANDER, B.; MEIER, T.; ZIMMERMANN, M.; HENNIG, G. High throughput laser micro machining on a rotating cylinder with ultra short pulses at highest precision. *In: Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic*

Manufacturing (LAMOM) XVIII, 2013b, San Francisco, CA, United states. **Proceedings [...]**. SPIE, p. 8. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2004099>. Acesso em: 21 jan. 2019.

JAEGGI, B.; NEUENSCHWANDER, B.; ZIMMERMANN, M.; PENNING, L.; DELOOR, R.; WEINGARTEN, K.; OEHLER, A. High-throughput and high-precision laser micromachining with ps-pulses in synchronized mode with a fast polygon line scanner. *In: Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XIX*, 2014, San Francisco, CA, United states. **Proceedings [...]**. SPIE, p. 11. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2037379>. Acesso em: 22 jan. 2019.

JAEGGI, B.; NEUENSCHWANDER, B.; ZIMMERMANN, M.; ZECHERLE, M.; BOECKLER, E. W. Time-optimized laser micro machining by using a new high dynamic and high precision galvo scanner. *In: Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXI*, 973513 2016, San Francisco, CA, United states. **Proceedings [...]**. 14 mar 2016. Disponível em: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9735/973513/Time-optimized-laser-micro-machining-by-using-a-new-high/10.1117/12.2210791.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2018.

JENOPTIK. F-Theta Lens for Laser Material Processing Applications. 2019. *Catalogo online*. Disponível em: <https://www.jenoptik.us/products/optical-systems/customized-and-standardized-objective-lenses/objective-lenses-for-high-precision-laser-material-processing/f-theta-objective-lenses>. Acesso em: 16 jun. 2017.

JONUAUSKAS, L.; GAILEVICIUS, D.; BARAVYKAS, T.; JUODKAZIS, S.; MALINAUSKAS, M. Mesoscale ultrafast laser 3D lithography: Throughput in voxels-per-second. *In: 3D Printed Optics and Additive Photonic Manufacturing*, 2018, Strasbourg, France. **Proceedings [...]**. SPIE, 22 mai. 2018. p. 9. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2305929>. Acesso em: 28 mar. 2019.

JONUSAUSKAS, L.; GAILEVICIUS, D.; REKSTYTE, S.; JUODKAZIS, S.; MALINAUSKAS, M. Synchronization of linear stages and galvo-scanners for efficient direct laser fabrication of polymeric 3D meso-scale structures. *In: Laser 3d Manufacturing V*, 2018, Bellingham. **Proceedings [...]**. Spie-Int Soc Optical Engineering, 26 fev. 2018. p. 9. Disponível em: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10523/2287669/Optical-3D-printing-in-mesoscale/10.1117/12.2287669.short>. Acesso em: 21 jan. 2019.

KEITHLEY, J. F. **The Story of Electrical and Magnetic Measurements**: From 500 BC to the 1940s. New York: John Wiley & Sons, 1999. ISBN 9780780311930.

KIM, K.; LEE, J.; YOON, K.; PARK, J. Synchronization system of galvanometer scanner and 2-axis linear stage for laser routing in wide area FPCB coverlay. *In: 29th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering, ASPE*, 2014, Boston, MA, United states. **Proceedings [...]**. American Society for Precision Engineering (ASPE), 9 nov. 2014. p. 132-133.

KIM, K.; YOON, K.; SUH, J.; LEE, J. Laser scanner stage on-the-fly method for ultrafast and wide area fabrication. *In: Lasers in Manufacturing (LiM) - Proceedings of the 6th International WLT Conference on Lasers in Manufacturing*, 2011, **Proceedings [...]**. Elsevier

B.V., p. 455-461. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.156>. Acesso em: 19 jan. 2019.

KIM, K.; YOON, K.; SUH, J.; LEE, J. Laser Scanner-Stage Synchronization Method for High-Speed And Wide-Area Fabrication. **Journal of Laser Micro/Nanoengineering**, v. 7, n. 2, p. 231-235, 2012. DOI: 10.2961/jlmn.2012.02.0018.

KRAMER, T.; REMUND, S.; GAFNER, M.; ZWYGART, D.; NEUENSCHWANDER, B.; HOLTZ, R.; WITTE, R.; DURY, N. Novel strategy for ultrafast pulsed laser micromachining of rotational symmetric metallic parts. *In: 10th CIRP Conference on Photonic Technologies*, LANE, 2018, Furth, Germany. **Proceedings [...]**. Elsevier B.V., 3 set. 2019. p. 611-617. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.076>. Acesso em: 19 jan. 2019.

LAND, W. S. Manufacturing challenges in laser cutting OLED displays. *In: Industrial Laser Solutions*, 19 mar. 2018. Disponível em: <https://www.industrial-lasers.com/home/article/16490485/manufacturing-challenges-in-laser-cutting-oled-displays>. Acesso em: 12 ago. 2019.

LAURIN, D. G.; BERARDIN, J. A.; BLAIS, F.; RIOUX, M.; COURNOYER, L. A Three-dimensional tracking and imaging laser scanner for space operations. *In: Laser Radar Technology and Applications IV 1999*, 1999, Orlando, FL, United states. **Proceedings [...]**. SPIE, 6 abr. 1999. p. 278-289. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.351351>. Acesso em: 19 jan. 2019.

LAWRENCE, J. R. **Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research and Application**. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 9781845699819.

LUO, X.; LI, J.; LUCAS, M. Galvanometer scanning technology for laser additive manufacturing. *In: SPIE LASE Laser 3D Manufacturing IV*, 2017, San Francisco. **Proceedings [...]**. SPIE, 24 fev. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.2252973>. Acesso em: 21 ago. 2019.

MAIMAN, T. H. Stimulated Optical Radiation in Ruby. **Nature**, v. 187, n. 4736, p. 493-494, 1960. DOI: 10.1038/187493a0.

MARSHALL, G. F.; STUTZ, G. E. **Handbook of Optical and Laser Scanning**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 9781439808801.

MARTENDAL, C. P.; SILVEIRA, C. A.; PEREIRA, M.; FREDEL, M. C. Wettability Modification of Laser Textured Copper Surfaces Applied to Phase Change Heat Transfer. *In: 38th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO)*, 2019,

MINCUZZI, G.; REBIÈRE, A.; LOPEZ, J.; FAUCON, M.; KLING, R. New fast galvo scanner head for high throughput micromachining. *In: Laser-Based Micro- and Nanoprocessing XII*, 2018, **Proceedings [...]**. SPIE, 19 fev 2018. Disponível em: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10520/105200X/New-fast-galvo-scanner-head-for-high-throughput-micromachining/10.1117/12.2289739.pdf>. Acesso em: 28 mar 2019.

MIRTICHEV, T.; WEEKS, R.; MINKO, S. Optimizing the feedback control of Galvo scanners for laser manufacturing systems. *In: Photonics North, 2010, Proceedings [...]. SPIE, 22 set. 2010. p. 8. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.873068>. Acesso em: 28 mar. 2019.*

NATIONAL INSTRUMENTS. Signal Conditioning Requirements for Thermocouples. 2018. Manual de utilização. Disponível em: <http://www.ni.com/documentation/en/ni-daqmx/latest/measfunds/sigcontherm/>. Acesso em: 19 jun. 2018.

NOLTE, S.; SCHREMPEL, F.; DAUSINGER, F. **Ultrashort Pulse Laser Technology: Laser Sources and Applications**. Springer, 2016. p. 358. ISBN 9783319373577.

NORTHROP, R. B. **Introduction to Instrumentation and Measurements**. 3 ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. p. 947. ISBN 9781466596795.

OBLOV, K.; IVANOVA, A.; SOLOVIEV, S.; SAMOTAEV, N.; VASILIEV, A.; SOKOLOV, A. Fabrication of MEMS Platform for Sensors Applications by Laser Micro Engraving. **Physics Procedia**, v. 72, p. 475-479, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.013>.

OEHLER, A.; AMMANN, H.; BENETTI, M.; WASSERMANN, D.; JAEGGI, B.; REMUND, S.; NEUENSCHWANDER, B. New random trigger-feature for ultrashort-pulsed laser increases throughput, accuracy and quality in micromachining applications. *In: Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXII, 2017, San Francisco, CA, United states. Proceedings [...]. SPIE, 30 jan. - 2 fev. 2017 p. 10. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2252599>. Acesso em: 22 jan. 2019.*

PARK, H.; RYU, K.; HWANG, T. Laser processing system development of large area and high precision. *In: Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVIII, 2013, Proceedings [...]. SPIE, p. 6. Disponível em: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/8607/1/Laser-processing-system-development-of-large-area-and-high-precision/10.1117/12.2003998.short?SSO=1>. Acesso em: 7 mar. 2016.*

PASCHOTTA, R. **Fiber Lasers**. *In: RP Photonics Encyclopedia. [S.l]: 2019a. Disponível em: https://www.rp-photonics.com/fiber_lasers.html. Acesso em: 15 jun. 2019.*

PASCHOTTA, R. **VCSEL Arrays**. *In: RP Photonics Encyclopedia. [S.l]: 2019b. Disponível em: https://www.rp-photonics.com/vcsel_arrays.html?s=ak. Acesso em: 15 jun. 2019.*

PASCHOTTA, R. **Wall-plug Efficiency**. *In: RP Photonics Encyclopedia. [S.l]: 2019c. Disponível em: https://www.rp-photonics.com/wall_plug_efficiency.html. Acesso em: 15 jun. 2019.*

PATWA, R.; HERFURTH, H.; MUELLER, G.; BUI, K. Laser drilling up to 15,000 holes/sec in silicon wafer for PV solar cells. *In: Laser Material Processing for Solar Energy Devices II, 2013, Bellingham. Proceedings [...]. Spie-Int Soc Optical Engineering, Disponível em: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/8826/1/Laser-drilling-up-to-15000-holes-sec-in-silicon-wafer/10.1117/12.2026539.short>. Acesso em: 22 jan. 2019.*

PAWLEY, J. **Handbook of Biological Confocal Microscopy**. 3 ed. [New York]: Springer, 2016. p. 985. ISBN 9781489977168.

PEREIRA, M.; THOMBANSEN, U. Contributions for the next generation of 3D metal printing machines. *In: Laser 3D Manufacturing II*, 2015, San Francisco, CA, United states. **Proceedings [...]**. SPIE, 16 mar. 2015. p. 11. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2079027>. Acesso em: 26 mar. 2019.

POPRAWA, R. **Tailored Light 2**. 2 ed. Berlin: Springer-Verlag, 2011. p. 605. ISBN 978-3-642-01236-5.

RIZVI, N. H.; APTE, P. Developments in laser micro-machining techniques. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 127, p. 206-210, 2002. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00143-7.

RYKALIN, N. N.; UGLOV, A. A.; KOKORA, A. **Laser machining and welding**. Pergamon Press, 1978. ISBN 9780080227245.

SAMSON, C.; ENGLISH, C.; DESLAURIERS, A.; CHRISTIE, I.; BLAIS, F.; FERRIE, F. The Neptec Three-Dimensional Laser Camera System: From Space Mission STS-105 to Terrestrial Applications. **Canadian Aeronautics and Space Journal**, v. 50, n. 2, p. 115-123, 2004. DOI: 10.5589/q04-009.

SAMSONOV, D.; ELSAESSER, A.; EDWARDS, A.; THOMAS, H. M.; MORFILL, G. E. High speed laser tomography system. **Review of Scientific Instruments**, v. 79, n. 3, 2008. DOI: 10.1063/1.2885683.

SCANLAB. Your Partner for Leading-Edge Scan Solutions. 2018. Catalogo *online*. Disponível em: <https://www.scanlab.de/sites/default/files/PDF-Dateien/Allgemein-SCANLAB/SCANLAB-company-profile-2018-EN-web.pdf>. Acesso em: 17 abri. 2019.

SCANLAB. Scanlab Innovators for industry. 2019. Disponível em: <https://www.scanlab.de/en>. Acesso em: 17 abr. 2019.

SCHILLE, J.; EBERT, R.; LOESCHNER, U.; SCULLY, P.; GODDARD, N.; EXNER, H. High repetition rate femtosecond laser processing of metals. *In: Frontiers in Ultrafast Optics: Biomedical, Scientific, and Industrial Applications X*, 2010, San Francisco, CA, United states. **Proceedings [...]**. SPIE, 25 fev. 2010. p. 12. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.842600>. Acesso em: 26 mar. 2019.

SCHILLE, J.; SCHNEIDER, L.; HARTWIG, L.; LOESCHNER, U. High rate laser processing of metals using high average power ultrashort pulse lasers. *In: The 38th International Manufacturing Automated Systems Technology Applications Design Organization and Management Research (MATADOR) Conference, 2017*, **Proceedings [...]**. Old City Publishing, p. 31-50. Disponível em: http://laz.htwm.de/43_rapidmicro/70_nachfolgeprojekte/10_hochrate/55_ver%F6ffentlichung/en/Joerg%20Schille%20MATADOR%202015_3943.pdf. Acesso em: 22 jan. 2019.

SCHMIDT, M.; ZÄH, M.; LI, L.; DUFLOU, J.; OVERMEYER, L.; VOLLERTSEN, F. Advances in macro-scale laser processing. **CIRP Annals**, v. 67, n. 2, p. 719-742, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.006>.

SHCHERBAKOV, E. A.; FOMIN, V. V.; ABRAMOV, A. A.; FERIN, A. A.; MOCHALOV, D. V.; GAPONTSEV, V. P. Industrial grade 100 kW power CW fiber laser. *In: Advanced Solid-State Lasers Congress, 2013, Paris. Optical Society of America, 27 out. 2013. p. 1-3.* Disponível em: <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ASSL-2013-ATh4A.2>. Acesso em: 3 set. 2019.

SHIN, H.; KIM, D. Cutting thin glass by femtosecond laser ablation. **Optics & Laser Technology**, v. 102, p. 1-11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.12.020>.

STAMP, R.; FOX, P.; O'NEILL, W.; JONES, E.; SUTCLIFFE, C. The development of a scanning strategy for the manufacture of porous biomaterials by selective laser melting. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 20, n. 9, p. 1839-1848, 2009. DOI: 10.1007/s10856-009-3763-8.

STEEN, W. M. **Laser Material Processing**. 3 ed. London: Springer, 2013. p. 408. ISBN 9781447137528.

STOETERAU, R. L. **Desenvolvimento do protótipo de uma máquina-ferramenta comandada numericamente para usinagem de ultraprecisão com ferramenta de geometria definida**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

SYGLETU, M.; PETRIDIS, C.; KYMAKIS, E.; STRATAKIS, E. Advanced Photonic Processes for Photovoltaic and Energy Storage Systems. **Advanced Materials**, v. 29, n. 39, 2017. DOI: 10.1002/adma.201700335.

TER-MIKIRTYCHEV, V. **Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers**. Springer International Publishing, 2016. p. 253. ISBN 9783319346625.

VIKTOR E. FRANKL. **Man's Search For Meaning**. 1st 2006 (first published 1946) ed. Beacon Press, 1946. p. 188.

WANG, D.; CHEN, X. A multirate fractional-order repetitive control for laser-based additive manufacturing. **Control Engineering Practice**, v. 77, p. 41-51, 2018. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.05.001.

WEINGAERTNER, W. L. **Plasmaunterstützte warmzerspanung**. 1983. Thesis, Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1983.

WU, M.; GUO, B.; ZHAO, Q.; FAN, R.; DONG, Z.; YU, X. The influence of the focus position on laser machining and laser micro-structuring monocrytalline diamond surface. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 105, p. 60-67, 2018. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.01.002.

YEUNG, H.; LANE, B. M.; DONMEZ, M. A.; FOX, J. C.; NEIRA, J. Implementation of Advanced Laser Control Strategies for Powder Bed Fusion Systems. **Procedia Manufacturing**, v. 26, p. 871-879, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.112>.

ZIMMERMANN, M.; JAEGGI, B.; NEUENSCHWANDER, B. Improvements in ultra-high precision surface structuring using synchronized galvo or polygon scanner with a laser system in MOPA arrangement. *In*: Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XX, 2015, San Francisco, CA, United states. **Proceedings [...]**. SPIE, 4 mar. 2015. p. 9. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2076724>. Acesso em: 21 jan. 2019.

APÊNDICE A – PARÂMETROS PARA MICRORREMOÇÃO

Cálculo do diâmetro focal (Jenoptik, 2019) (válido para a fonte de *laser* YLPN):

$\lambda = 1,0613 \text{ nm}$	Comprimento de onda do <i>laser</i> YLPN	
$f = 170 \text{ mm}$	Comprimento focal da lente F- <i>theta</i>	
$\phi = 7,6 \text{ mm}$	Diâmetro do feixe de <i>laser</i> na entrada	
$M^2 = 1,8$	Qualidade do feixe de <i>laser</i>	
$\sigma = 1,83 \cdot \frac{\lambda f}{\phi} \cdot M^2$	Diâmetro do feixe de <i>laser</i>	$\sigma = 78,2 \text{ }\mu\text{m}$

Cálculo da energia ideal de pulso (Jaeggi *et al.*, 2013b):

$w_0 = 39,1 \text{ }\mu\text{m}$	Raio do feixe de <i>laser</i>	
$H_{th} = 0,1 \text{ J/cm}^2$	Limiar da fluência para aço inoxidável	
$E_p = \frac{\pi \cdot w_0^2}{2} \cdot H_{th} \cdot e^2$	Energia ideal de pulso	$E_p = 0,0178 \text{ }\mu\text{J}$

Cálculo da potência média (Jaeggi *et al.*, 2012):

$E_p = 0,0178 \text{ }\mu\text{J}$	Energia ideal de pulso	
$f_p = 600 \text{ kHz}$	Taxa de repetição de pulsos	
$P_{av} = E_p \cdot f_p$	Potência média	$P_{av} = 10,6 \text{ W}$

Cálculo da sobreposição de pulso (Jaeggi *et al.*, 2016):

$w_0 = 39,1 \text{ }\mu\text{m}$	Raio do feixe de <i>laser</i>	
$p = 8 \text{ }\mu\text{m}$	Distância entre os pulsos	
$o = \frac{2 \cdot w_0 - p}{2 \cdot w_0}$	Sobreposição entre os pulsos	$o = 89,8 \text{ }\%$

Cálculo da velocidade relativa do feixe (Jaeggi *et al.*, 2016):

$w_0 = 39,1 \text{ }\mu\text{m}$	Raio do ponto focal	
$o = 89,8 \text{ }\%$	Sobreposição entre os pulsos	
$v = f_p \cdot 2 \cdot w_0 \cdot (1 - o)$	Velocidade relativa do feixe de <i>laser</i>	$v = 4800 \text{ mm/s}$

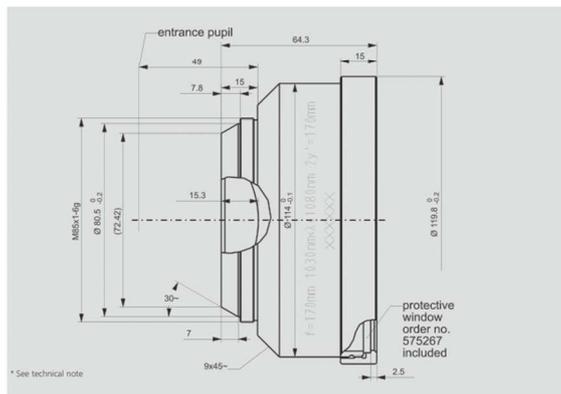
ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DA LENTE F-THETA

F-Theta JENar™ Lens Series

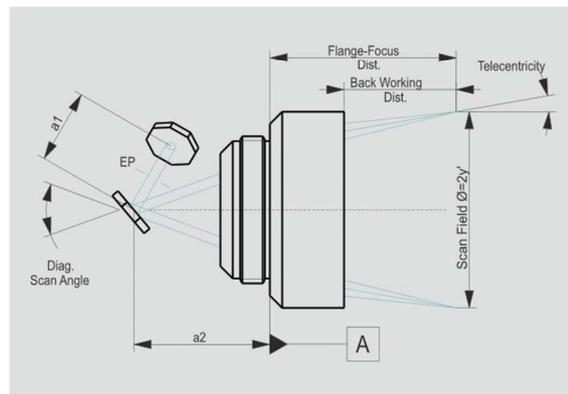
High Image Quality – JENar™ 170-1030...1080-170

Parameters	JENar™ 170-1030...1080-170 F-Theta lens for high image quality	Spot properties
Focal length:	170 mm	
Wavelength:	1030...1080 nm	
Scan field (X x Y); Ø:	(120 mm x 120 mm); 170 mm	
Diagonal scan angle:	57.4°	
Back working distance:	194 mm	
Flange focus distance:	243.2 mm	
Input beam Ø 1/e²:	14 mm	
Focus size Ø 1/e²:	24 µm	
a1:	17 mm	
a2:	40.5 mm	
Telecentricity (only F-Theta with scanner):	11.6° 11.7°	
Group delay dispersion (GDD)*:	1870 fs²	
LIDT coating pulsed; CW*:	5.0 J/cm² * (τ/[ns]) ^ 0.30; 5.0 MW/cm²	
LIDT system pulsed; CW*:	5.0 J/cm² * (τ/[ns]) ^ 0.30; 5.0 MW/cm²	
Weight:	1.232 kg	
Order Number::	017700-018-26	

Specifications JENar™ 170-1030...1080-170



Definition of geometrical parameters



JENar™: Trademark registered in EU, CN, JP, SG
 F-Theta: Registered Design in EU, CN, KR, IN, SG, JP

JENOPTIK Optical Systems GmbH
 Goeschwitzer Strasse 25 | 07745 Jena | Germany
 Phone +49 3641 65-3148 | Fax -3677
 optics@jenoptik.com | www.jenoptik.com/optics



ANEXO C – ESPECIFICAÇÃO DO LASER YLPN

	TEST RESULTS YTTERBIUM PULSED FIBER LASER Model YLPN-1-1x120-50-M S/N 16123833	Form:	38623
		Revision:	05
		Page:	1 of 9

This product is covered by the U.S. Pat. Nos. 5,422,897 and 5,774,484 and any foreign counterparts thereof, and other patents pending.

The information and the following charts provided below is the result of tests performed in controlled environments by IPG Laser. These provided useful, but not warranted, information about the functions and performance of the product.

N	Characteristic	Test Conditions	Symbol	Min	Typ.	Max	Test Results	Unit
<i>Optical characteristics</i>								
1.	Mode of operation			pulsed			pulsed	
2.	Central emission wavelength	$P_{out} = P_{nom}$	λ	1055	1064	1075	1061.3	nm
3.	Emission bandwidth	FWHM $P_{out} = P_{nom}$ PRR = PRR _{nom} T8 mode	$\Delta\lambda$		5	10	5.85	nm
4.	Output power adjusting range			10		100	tested	%
5.	Laser switching ON time	T8 mode			2	3	0.9	μ S
6.	Laser switching OFF time	T8 mode			2	3	0.6	μ S
7.	Red guide laser power (optional)	$\lambda = 660$ nm		0.3	0.5	1	0.5	mW
	T1 mode (1 ns in software)	PRR_{nom} = 5000 kHz						
8.	Pulse duration	50% level of maximum			1		0.9	ns
		10% level of maximum			1.5		1.5	ns
9.	Nominal average output power		P_{nom}	47	50	53	51.3	W
11.	Extended pulse repetition rate		PRR	120		5000	120 - 5000	kHz
	T2 mode (2 ns in software)	PRR_{nom} = 3000 kHz						
12.	Pulse duration	50% level of maximum			2		1.9	ns
		10% level of maximum			2.5		2.6	ns
13.	Nominal average output power		P_{nom}	47	50	53	51.7	W
14.	Extended pulse repetition rate		PRR	60		5000	60 - 5000	kHz
	T3 mode (4 ns in software)	PRR_{nom} = 1500 kHz						
15.	Pulse duration	50% level of maximum			4		4.5	ns
		10% level of maximum			4.5		5.4	ns
16.	Nominal average output power		P_{nom}	47	50	53	51.9	W
17.	Extended pulse repetition rate		PRR	30		5000	30 - 5000	kHz

	TEST RESULTS YTTERBIUM PULSED FIBER LASER Model YLPN-1-1x120-50-M S/N 16123833	Form:	38623
		Revision:	05
		Page:	2 of 9

N	Characteristic	Test Conditions	Symbol	Min	Typ.	Max	Test Results	Unit
	T4 mode (8 ns in software)	PRR_{nom} = 750 kHz						
18.	Pulse duration	50% level of maximum			8		8.8	ns
		10% level of maximum			8.5		10.0	ns
19.	Nominal average output power		P _{nom}	47	50	53	52.0	W
20.	Extended pulse repetition rate		PRR	15		5000	15 - 5000	kHz
	T5 mode (16 ns in software)	PRR_{nom} = 400 kHz						
21.	Pulse duration	50% level of maximum			16		17.9	ns
		10% level of maximum			17		18.9	ns
22.	Nominal average output power		P _{nom}	47	50	53	51.9	W
23.	Extended pulse repetition rate		PRR	8		5000	8 - 5000	kHz
	T6 mode (30 ns in software)	PRR_{nom} = 220 kHz						
24.	Pulse duration	50% level of maximum			30		29.7	ns
		10% level of maximum			30		30.8	ns
25.	Nominal average output power		P _{nom}	47	50	53	51.9	W
26.	Extended pulse repetition rate		PRR	4		2200	4 - 2200	kHz
	T7 mode (50 ns in software)	PRR_{nom} = 150 kHz						
27.	Pulse duration	50% level of maximum			37		40.2	ns
		10% level of maximum			50		48.0	ns
28.	Nominal average output power		P _{nom}	47	50	53	51.9	W
29.	Extended pulse repetition rate		PRR	3		1500	3 - 1500	kHz
	T8 mode (120 ns in software)	PRR_{nom} = 50 kHz						
30.	Pulse duration	50% level of maximum			120		120.3	ns
		10% level of maximum			120		126.7	ns
31.	Nominal average output power		P _{nom}	47	50	53	51.0	W
32.	Extended pulse repetition rate		PRR	2		505	2 - 505	kHz

	TEST RESULTS YTTERBIUM PULSED FIBER LASER Model YLPN-1-1x120-50-M S/N 16123833	Form:	38623
		Revision:	05
		Page:	3 of 9

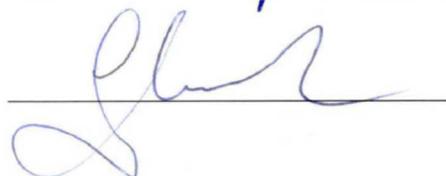
N	Characteristic	Test Conditions	Symbol	Min	Typ.	Max	Test Results	Unit
<i>Optical output</i>								
33.	Beam quality		M ²		1.5	2.0	1.80	
34.	Output beam diameter	"86% method"		6		9	7.6	mm
35.	Output beam divergence adjustment			minimum of divergence			0.35	mrad
<i>Electrical characteristics</i>								
36.	Supply voltage			23	24	25	24	V
37.	Current consumption					9	6.89	A
<i>Control interfaces</i>								
38.	Control interface "type E", digital signal lines (DB-25 plug connector):						tested	
39.	RS-232C interface, control and monitoring (DB-9 plug connector)						tested	
<i>Delivery configuration and options</i>								
Standard laser configuration includes:								
40.	Bitstream 1 (BS1) mode including high contrast (HC)						tested	
41.	Extended pulse repetition rate (with proportional average power drop at low PRR)						tested	
42.	Output isolator						tested	

Tested by:



Date: 12.01.2017

Approved by:



Dr. G. Sargsyan

ANEXO D– ESPECIFICAÇÃO DO LASER YLR

	SPECIFICATION YTTERBIUM FIBER LASER Model YLR-400-AC-Y14	Spec: Revision: Issue date: Page:	G22-29503 04 19.12.14 1 of 4
---	---	--	---------------------------------------

1. Optical characteristics

N	Characteristics	Test conditions	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
1	Operation Mode			CW / Modulated			
2	Polarization			Random			
3	Nominal Output Power		P_{nom}	400			W
4	Emission Wavelength	Output power: 400 W	λ		1070		nm
5	Emission Linewidth	Output power: 400 W	$\Delta\lambda$		3.5	5	nm
6	Short-term Power Instability	Output power: 400 W Frequency range: 10 kHz – 20 MHz			1.0	2.0	rms %
7	Long-term Power Instability	Output power: 400 W Time interval: 4 hrs (T=Constant)			±1	±3	%
8	Switching ON/OFF Time	Output power: 400 W			30	50	µs
9	Power Modulation Rate	Output power: 400 W				50	kHz
10	Red Guide Laser Power			0.1		1.0	mW

2. Optical output

N	Characteristics	Test conditions	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
1	Beam Quality		M^2		1.05	1.1	
2	Delivery Fiber Length		L		5.0	TBD	m
3	Delivery Cable Bending Radius			50			mm
4	Output Fiber Termination			Collimator* or QBH-compatible connector			
Collimator							
5	Beam Diameter	86% level	W	4.5	5.0	5.5	mm
6	Beam Divergence	Full angle, 86% level	θ		0.3	0.5	mrad
QBH-compatible connector							
7	Beam Divergence	Full angle, 86% level	θ	130	140	150	mrad

* By default a collimator with beam diameter 5 mm is installed. Other beam diameters are available upon request.

3. General characteristics

N	Characteristics	Min.	Typ.	Max.	Unit
1	Cooling method	Forced Air			
2	Operating Ambient Temperature Range	10		35	°C
3	Humidity	10		95	%
4	Storage Temperature	- 40		+ 75	°C
5	Dimensions, WxDxH:	4U 19" rack mountable 449 x 503 x 177			mm
6	Weight			40	kg

CONFIDENTIAL: This document and any data disclosed therein is the property of IPG Laser GmbH and its affiliates, and constitute and contain proprietary information. Neither receipt nor possession of this document confers or transfers any right to duplicate, use, or disclose any information contained herein except as expressly authorized in writing by IPG Laser GmbH.
No representations and warranties are made hereby, except in a binding purchase order.