



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

CLEDENIR COSTA DE OLIVEIRA

**EFEITO DA GEOMETRIA DE MOVIMENTAÇÃO SOBREPOSTA À
TRAJETÓRIA DE DESLOCAMENTO LINEAR DO FEIXE LASER
SOBRE A SUPERFÍCIE DE UMA AMOSTRA DE AÇO INOXIDÁVEL
AISI 316L PARA APLICAÇÕES EM MICROSSOLDAGEM**

FLORIANÓPOLIS

2019

Cledenir Costa de Oliveira

EFEITO DA GEOMETRIA DE MOVIMENTAÇÃO SOBREPOSTA À TRAJETÓRIA DE
DESLOCAMENTO LINEAR DO FEIXE LASER SOBRE A SUPERFÍCIE DE UMA
AMOSTRA DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L PARA APLICAÇÕES EM
MICROSSOLDAGEM

Dissertação submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa Catarina para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientador: Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.

Florianópolis

2019

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

Oliveira, Cledenir Costa de
Efeito da geometria de movimentação sobreposta à
trajetória de deslocamento linear do feixe LASER sobre a
superfície de uma amostra de aço inoxidável AISI 316L para
aplicações em microsoldagem / Cledenir Costa de Oliveira ;
orientador, Milton Pereira, 2019.
128 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. I. Pereira, Milton. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Cledenir Costa de Oliveira

Efeito da geometria de movimentação sobreposta à trajetória de deslocamento linear do feixe LASER sobre a superfície de uma amostra de aço inoxidável AISI 316L para aplicações em microssoldagem

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

Prof. Milton Pereira, Dr. Eng. - Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Dr- Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Régis H. Gonçalves e Silva, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Tiago Vieira da Cunha, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Campus Joinville

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Eng. Jonny Carlos da Silva
Coordenador do Programa

Prof. Dr. Milton Pereira
Orientador

Florianópolis, 11 de dezembro de 2019

Este trabalho é dedicado ao meu Pai, meus irmãos e aos meus queridos amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela minha vida, saúde, paz, força e sabedoria que me concedeu para iniciar e completar mais esta árdua jornada. Obrigado senhor por sempre cuidar de mim, da minha família e dos meus eternos amigos. Toda honra e toda glória ao teu nome Jesus Cristo.

Aos meus velhos e melhores amigos:

A toda a minha família. De forma mais que especial, ao meu amado pai Milton Custódio de Oliveira. O senhor é tudo para mim, e sem você, de forma absoluta, eu não teria conquistado nem a metade do que consegui até essa fase da minha vida. Obrigado por nunca me desamparar, e sempre dar o melhor que o senhor tem de si, mesmo muitas vezes sendo criticado. Te amo muito, e rogo a Deus que me permita retribuir todo o seu sacrifício.

A todos meus queridos irmãos, em especial ao Willian, Messias e Clayton pela torcida e companheirismo nesta jornada.

Agradecimento especial ao eterno irmão que a vida me deu de presente Elton Fábio, nosso laço é muito maior que sangue. Obrigado por estar comigo desde o início da minha jornada, e sempre ter me estendido suas mãos nos momentos que mais precisei, e foram vários, você sabe. Tenha certeza que isso teve um grande impacto em minhas conquistas. Amo sua vida mano. Conte sempre comigo meu irmão.

Aos meus Orientadores, Banca Examinadora:

Ao meu orientador Professor Milton Pereira, por aceitar me conduzir nesta caminhada, e por entender minhas dificuldades e limitações indicando o caminho das pedras, aconselhando e corrigindo a trajetória sempre que preciso. Obrigado pelo tempo, paciência e incentivo despendidos a esta batalha. O senhor sabe que não foi nada fácil para mim, mas conseguimos.

Agradeço aos membros da banca, Professores Walter Lindolfo Weingaertner, Régis H. Gonçalves e Silva e Tiago Vieira da Cunha. Obrigado por dedicarem um tempo de sua agenda a esta tarefa.

Aos companheiros do LMP-LASER:

Agradecimento especial ao amigo Cláudio Abílio da Silveira pelas horas dedicadas em todos os ensaios realizados necessários para o trabalho (mesmo estando com sua agenda apertada) e por transmitir todo seu conhecimento nos momentos necessários. Você é um homem de pequena estatura, mas com uma alma de gigante. Obrigado amigo.

Obrigado ao amigo Calil Amaral pelas horas noturnas cedidas para me auxiliar em uma parte importante da dissertação.

São muitos nomes para citar. No risco eminente de esquecer alguns, me detenho em agradecer ao grupo LMP-LASER como um todo. Todos os membros que contribuíram diretamente ou indiretamente na realização desta dissertação. A vocês, o meu mais sincero agradecimento.

Agradeço o apoio do corpo técnico do LMP-LASER e também aos membros dos nossos vizinhos, que auxiliaram esta pesquisa: LABCONF, LABMAT.

Agradeço aos professores coordenadores de todos os laboratórios que utilizei.

Agradeço aos amigos Rafael Nunes (mineiro) e Max Baranenko pela força nas etapas de preparação/execução das análises metalográficas, etapas de usinagem, e dicas de escrita, bem como as risadas e parceria do dia-a-dia, vocês são feras.

Aos meus novos amigos:

Agradeço aos meus colegas de turma pela parceria nas disciplinas e trabalhos em geral.

Agradecimento especial aos meus amigos que presenciaram essa jornada Jurandir Souza (a lenda viva), Francisco Ratusznei, Gabriel Pillon pela parceria inicial, Ricardo Delgado, Adriano Barbosa e Ricardo Knoblauch pela parceria, companheirismo. Obrigado pelos “rolês”, risadas, etc. Vocês são demais.

Agradeço também ao amigo companheiro da sala mais top do Laboratório, João Osório (O Barba), futuro engenheiro mais fera do Brasil.

Muitas das coisas mais importantes do mundo foram conseguidas por pessoas que continuaram tentando quando parecia não haver mais nenhuma esperança de sucesso. (Dale Carnegie, 1940)

RESUMO

O presente trabalho trata da investigação da influência da movimentação “*wobble*” do feixe LASER ao se movimentar sobre a superfície de uma amostra de aço inoxidável AISI 316L com uma espessura de 1,2 mm com movimentação oscilatória sobreposta ao movimento linear do feixe. Emprega-se um LASER de fibra de 400 W instalado em uma bancada experimental provida de um *scanner* de duas coordenadas e uma mesa de trabalho de 3 coordenadas sincronizada com o *scanner*. A partir de uma modelagem matemática, para uma determinada potência do LASER e uma velocidade de deslocamento do foco do feixe LASER durante o processamento, são estimados os valores da velocidade instantânea do feixe durante o ensaio para prever sua influência térmica nos aspectos dos cordões de soldagem. Foram realizados experimentos de microssoldagem na modelagem autógenas com oscilação lateral do feixe. Foram empregadas duas formas de oscilações transversais sobrepostas “*wobble*”: uma com trajetória circular e outra descrevendo uma trajetória semelhante ao símbolo matemático “infinito”. Os resultados obtidos foram comparados aos obtidos na modelagem, e caracterizando a influência da combinação dos parâmetros de oscilação do feixe LASER. A avaliação dos cordões de soldagem foi realizada através da caracterização metalográfica da zona fundida dos cordões e pelos aspectos da superfície dos cordões. Evidenciam-se correlações entre os parâmetros utilizados e os resultados obtidos nas microssoldas, mensurando grandezas como penetração e largura dos cordões. Concluiu-se que a frequência de movimentação em círculo e em “infinito” para as frequências de 200 a 400 Hz não tem influência significativa sobre o resultado. O aumento da amplitude do movimento “*wobble*” de 0,5 para 2 mm tem uma influência significativa sobre a largura e a profundidade dos cordões gerados. Para um cordão obtido com parâmetros de potência do feixe laser de 300 W, velocidade de translação de 50 mm/s, amplitude do movimento “*wobble*” sobreposto de 0,5 mm e frequência de giro circular de 300 Hz, obteve-se a maior relação entre largura e profundidade. A técnica “*wobble*” mostrou-se satisfatória na prevenção de descontinuidades observada no processo sem a utilização da técnica, como porosidades.

Palavras-chave: Microssoldagem a LASER. Oscilação do feixe. Aço AISI 316L. LASER de fibra. *Wobble*.

ABSTRACT

The present work deals with the investigation of the influence of the “wobble” movement of the LASER beam when moving on the surface of a sample of AISI 316L stainless steel with a thickness of 1.2 mm with oscillatory movement superimposed on the linear movement of the beam. A 400 W fiber LASER installed on an experimental bench equipped with a two-coordinate scanner and a three-coordinate worktable synchronized with the scanner is used. From a mathematical modeling, for a given LASER power and a displacement speed of the LASER beam focus during processing, the values of the instantaneous beam speed during the test are estimated to predict its thermal influence on the aspects of the weld beads. Micro-welding experiments were carried out in autogenous modeling with lateral beam oscillation. Two forms of overlapping transverse “wobble” were used: one with a circular path and the other describing a path similar to the mathematical symbol “infinite”. The results obtained were compared to those obtained in the modeling, and characterizing the influence of the combination of oscillation parameters of the LASER beam. The evaluation of the weld beads was performed through the metallographic characterization of the melted area of the beads and by the aspects of the surface of the beads. Correlations are evidenced between the parameters used and the results obtained in the micro-welds, measuring quantities such as penetration and width of the cords. It was concluded that the frequency of movement in a circle and in “infinite” for frequencies from 200 to 400 Hz has no significant influence on the result. The increase in the amplitude of the “wobble” movement from 0.5 to 2 mm has a significant influence on the width and depth of the strands generated. For a cord obtained with 300 W laser beam power parameters, 50 mm / s translation speed, 0.5 mm overlapping “wobble” movement and 300 Hz circular rotation frequency, the highest relationship between width and depth. The “wobble” technique proved to be satisfactory in preventing discontinuities observed in the process without using the technique, such as porosities. present work deals with the investigation of the LASER beam oscillation mode in micro welding of stainless steels, more specifically, AISI 316L steel. A mathematical model was developed to estimate the welding speed values assumed by the beam during processing, and to predict their influence on the aspects of the beads. Autogenous micro welding experiments were carried out without oscillation to analyze the welding beads geometry without the oscillation influence, and using the beam oscillation technique with two different oscillation geometries, circular and infinite. The obtained results were then evaluated, associating with those obtained from the modeling, and characterizing the influence of the combination of beam oscillation parameters. This evaluation was performed through metallographic characterization, based on the surface and fused zone aspects of the strands. It was intended to show correlations between the parameters used and the results obtained in the welding beads, measuring quantities such as penetration and width. It was concluded that the proper use of the input parameters is fundamental for the quality assurance of the weld beads. Taking the quality of the bead as the ratio of width to depth, the best result was the welded bead with power parameters of 300 W, translation speed of 50 mm/s, oscillation amplitude of 0.5 mm and oscillation frequency of 300 Hz. The beam oscillation technique proved to be satisfactory in preventing discontinuities observed in the process without beam oscillation, for example, porosities.

Keywords: Laser welding. Beam oscillation. AISI 316L steel. Fiber laser. Wobble.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema de emissão estimulada (Adaptado de [2]).	27
Figura 2.2 - Componentes do oscilador LASER (Adaptado de [17]).	29
Figura 2.3 - Representação esquemática do LASER de fibra (Adaptado de [25]).	31
Figura 2.4 - Evolução da potência das fontes LASERs de fibra (Adaptado de [29]).	32
Figura 2.5 - Divergência do feixe (Adaptado de [30]).	34
Figura 2.6 – Representação dos componentes ópticos do <i>scanner</i> galvanométrico [Autor].	36
Figura 2.7 - Gráfico da refletividade versus comprimento de onda [2].	37
Figura 2.8 - Refletividade em função da temperatura (Adaptado de [2]).	38
Figura 2.9 - Absortividade de alguns materiais (Adaptado de [33]).	40
Figura 2.10 - Gráfico de intensidade e tempos de interação para processos diversos (Adaptado de [15]).	42
Figura 2.11 - Comparação da densidade de potência de vários processos de soldagem (Adaptado de [32]).	44
Figura 2.12 - Representação esquemática do LASER para soldagem [Autor].	45
Figura 2.13 - Influência da intensidade de potência no modo de soldagem (Adaptado de [43]).	46
Figura 2.14 - Esquemático das isothermas [43].	47
Figura 2.15 - Princípio da soldagem por condução (Adaptado de [43]).	48
Figura 2.16 - Princípio da soldagem <i>keyhole</i> (Adaptado de [43]).	49
Figura 2.17 - Tipos de porosidade da soldagem <i>keyhole</i> (Adaptado de [51]).	50
Figura 2.18 - Técnica de soldagem por oscilação (Adaptado de [62]).	52
Figura 2.19 – Principais geometrias de oscilações (Adaptado de [65]).	53
Figura 2.20 - Variáveis de entrada do processo para microsoldagem com <i>wobble</i> , características do feixe e parâmetros de saída [Autor].	54
Figura 3.1 - Fluxograma da sequência de trabalho [Autor].	57
Figura 3.2 - Sistema LASER a) gabinete elétrico b) equipamento com enclausuramento e monitor [Autor].	59
Figura 3.3 - Distribuição de intensidade e perfil de feixe [65].	60
Figura 3.4 - Cabeçote galvanométrico de varredura e lente F-theta montada [Autor].	61
Figura 3.5 - Mesa de movimentação linear de duas coordenadas com motor linear comandada numericamente [Autor].	62

Figura 3.6 – Gabarito e amostra montados sobre a mesa na bancada de ensaios [Autor].....	62
Figura 3.7 - Bancada experimental, destacando a unidade de processamento LASER, o computador e o conjunto eletrônico do sistema de comando [Autor].....	63
Figura 3.8 - Gabarito com uma amostra montada para os ensaios experimentais e componentes do sistema de fixação [Autor].....	64
Figura 3.9 - Esquemático da passagem do feixe com oscilação sobreposto ao movimento linear: a) <i>wobble</i> circular b) <i>wobble</i> infinito [Autor].....	65
Figura 3.10 - Metodologia da escolha dos parâmetros para a microssoldagem com feixe oscilante [Autor].....	68
Figura 3.11 - Sequência dos ensaios de microssoldagem com a técnica <i>wobble</i> [Autor].	71
Figura 3.12 - Esquemático do corte dos corpos de prova [Autor].....	72
Figura 4.1 - Representação esquemática de um ponto descrevendo um movimento circular uniforme [Autor].	74
Figura 4.2 - Geração do movimento circular [Autor].....	76
Figura 4.3 – Velocidades instantâneas do feixe ao longo da geometria circular para uma velocidade de translação de 50 mm/s, uma amplitude de $a=0,5$ mm e um frequência de oscilação $f=200$ Hz [Autor].....	77
Figura 4.4 - Gráfico da velocidade do movimento circular com a velocidade de translação somada ao movimento [Autor].....	78
Figura 4.5 - Velocidade do feixe sem a componente de translação ao longo da geometria circular [Autor].	79
Figura 4.6 - Gráfico da velocidade instantânea do feixe em geometria circular sem velocidade de translação somada ao movimento [Autor].....	79
Figura 4.7 – Representação esquemática do feixe descrevendo movimento em infinito [Autor].	81
Figura 4.8 – Representação das velocidades do movimento em infinito no eixo x e y [Autor].	82
Figura 4.9 - Gráfico da velocidade instantânea do feixe sem a velocidade de translação somada ao movimento [Autor].	83
Figura 4.10 - Gráfico da velocidade instantânea do feixe com a velocidade de translação somada ao movimento[Autor].	83
Figura 4.11 – Variação da velocidade instantânea do feixe sobre a superfície da amostra sem a velocidade de translação somada ao movimento [Autor].....	84

Figura 4.12 - Gráfico da velocidade instantânea do feixe sobre a superfície da amostra com a velocidade de translação somada ao movimento [Autor].....	84
Figura 4.13 – Aspectos das microsoldas obtidas nos ensaios preliminares [Autor].....	86
Figura 4.14 - Influência da variação da velocidade do feixe na penetração a) velocidades do feixe ao longo da trajetória b) seção transversal do cordão [Autor].....	89
Figura 4.15 - Representação da causa do formato de geometria obtida [Autor].	91
Figura 4.16 - Penetração de solda oscilação circular [Autor].....	92
Figura 4.17 – Largura de cordão oscilação circular [Autor].	93
Figura 4.18 - Influência da variação de velocidade do feixe na penetração a) velocidades do feixe ao longo da trajetória b) seção transversal do cordão [Autor].....	95
Figura 4.19 - Penetração dos cordões com oscilação em infinito [Autor].	97
Figura 4.20 - Largura dos cordões com oscilação em infinito [Autor].	98
Figura 4.21 - Gráfico de Pareto da influência na penetração oscilação circular [Autor].	99
Figura 4.22 - Influência da interação dos parâmetros na penetração em oscilação circular [Autor].....	100
Figura 4.23 - Efeito dos parâmetros na penetração dos cordões em oscilação circular [Autor].	100
Figura 4.24 - Gráfico de Pareto da influência na largura oscilação circular [Autor].	101
Figura 4.25 - Influência da interação dos parâmetros na largura em <i>wobble</i> circular [Autor].	102
Figura 4.26 - Efeitos principais na largura dos cordões em geometria circular [Autor].	102
Figura 4.27 - Gráfico de Pareto da influência na penetração dos cordões em infinito [Autor].	103
Figura 4.28 - Influência da interação dos parâmetros na penetração em oscilação infinito [Autor].....	104
Figura 4.29 - Influência dos parâmetros na penetração com oscilação em infinito [Autor]. .	104
Figura 4.30 - Influência dos parâmetros na largura do cordão com geometria em infinito [Autor].....	105
Figura 4.31 - Influência da interação dos parâmetros na largura com oscilação em infinito [Autor].....	106
Figura 4.32 - Influência dos parâmetros na largura dos cordões em infinito [Autor].	106
Figura 4.33 - Comportamento da penetração para movimentação do feixe na geometria de movimentação circular e infinito [Autor].....	107

Figura 4.34 - Quantitativo da influência da amplitude na penetração em oscilação circular [Autor].	108
Figura 4.35 - Quantitativo da influência da amplitude na penetração com oscilação em infinito [Autor].	109

LISTA DE TABELAS

Figura 2.1 - Esquema de emissão estimulada (Adaptado de [2]).	27
Figura 2.2 - Componentes do oscilador LASER (Adaptado de [17]).	29
Figura 2.3 - Representação esquemática do LASER de fibra (Adaptado de [25]).	31
Figura 2.4 - Evolução da potência das fontes LASERs de fibra (Adaptado de [29]).	32
Figura 2.5 - Divergência do feixe (Adaptado de [30]).	34
Figura 2.6 – Representação dos componentes ópticos do <i>scanner</i> galvanométrico [Autor].	36
Figura 2.7 - Gráfico da refletividade versus comprimento de onda [2].	37
Figura 2.8 - Refletividade em função da temperatura (Adaptado de [2]).	38
Figura 2.9 - Absortividade de alguns materiais (Adaptado de [33]).	40
Figura 2.10 - Gráfico de intensidade e tempos de interação para processos diversos (Adaptado de [15]).	42
Figura 2.11 - Comparação da densidade de potência de vários processos de soldagem (Adaptado de [32]).	44
Figura 2.12 - Representação esquemática do LASER para soldagem [Autor].	45
Figura 2.13 - Influência da intensidade de potência no modo de soldagem (Adaptado de [43]).	46
Figura 2.14 - Esquemático das isothermas [43].	47
Figura 2.15 - Princípio da soldagem por condução (Adaptado de [43]).	48
Figura 2.16 - Princípio da soldagem <i>keyhole</i> (Adaptado de [43]).	49
Figura 2.17 - Tipos de porosidade da soldagem <i>keyhole</i> (Adaptado de [51]).	50
Figura 2.18 - Técnica de soldagem por oscilação (Adaptado de [62]).	52
Figura 2.19 – Principais geometrias de oscilações (Adaptado de [65]).	53
Figura 2.20 - Variáveis de entrada do processo para microsoldagem com <i>wobble</i> , características do feixe e parâmetros de saída [Autor].	54
Figura 3.1 - Fluxograma da sequência de trabalho [Autor].	57
Figura 3.2 - Sistema LASER a) gabinete elétrico b) equipamento com enclausuramento e monitor [Autor].	59
Figura 3.3 - Distribuição de intensidade e perfil de feixe [65].	60
Figura 3.4 - Cabeçote galvanométrico de varredura e lente F-theta montada [Autor].	61
Figura 3.5 - Mesa de movimentação linear de duas coordenadas com motor linear comandada numericamente [Autor].	62

Figura 3.6 – Gabarito e amostra montados sobre a mesa na bancada de ensaios [Autor].....	62
Figura 3.7 - Bancada experimental, destacando a unidade de processamento LASER, o computador e o conjunto eletrônico do sistema de comando [Autor].....	63
Figura 3.8 - Gabarito com uma amostra montada para os ensaios experimentais e componentes do sistema de fixação [Autor].....	64
Figura 3.9 - Esquemático da passagem do feixe com oscilação sobreposto ao movimento linear: a) <i>wobble</i> circular b) <i>wobble</i> infinito [Autor].....	65
Figura 3.10 - Metodologia da escolha dos parâmetros para a microssoldagem com feixe oscilante [Autor].....	68
Figura 3.11 - Sequência dos ensaios de microssoldagem com a técnica <i>wobble</i> [Autor].	71
Figura 3.12 - Esquemático do corte dos corpos de prova [Autor].....	72
Figura 4.1 - Representação esquemática de um ponto descrevendo um movimento circular uniforme [Autor].	74
Figura 4.2 - Geração do movimento circular [Autor].....	76
Figura 4.3 – Velocidades instantâneas do feixe ao longo da geometria circular para uma velocidade de translação de 50 mm/s, uma amplitude de $a=0,5$ mm e um frequência de oscilação $f=200$ Hz [Autor].....	77
Figura 4.4 - Gráfico da velocidade do movimento circular com a velocidade de translação somada ao movimento [Autor].....	78
Figura 4.5 - Velocidade do feixe sem a componente de translação ao longo da geometria circular [Autor].	79
Figura 4.6 - Gráfico da velocidade instantânea do feixe em geometria circular sem velocidade de translação somada ao movimento [Autor].....	79
Figura 4.7 – Representação esquemática do feixe descrevendo movimento em infinito [Autor].	81
Figura 4.8 – Representação das velocidades do movimento em infinito no eixo x e y [Autor].	82
Figura 4.9 - Gráfico da velocidade instantânea do feixe sem a velocidade de translação somada ao movimento [Autor].	83
Figura 4.10 - Gráfico da velocidade instantânea do feixe com a velocidade de translação somada ao movimento[Autor].	83
Figura 4.11 – Variação da velocidade instantânea do feixe sobre a superfície da amostra sem a velocidade de translação somada ao movimento [Autor].....	84

Figura 4.12 - Gráfico da velocidade instantânea do feixe sobre a superfície da amostra com a velocidade de translação somada ao movimento [Autor].....	84
Figura 4.13 – Aspectos das microsoldas obtidas nos ensaios preliminares [Autor].....	86
Figura 4.14 - Influência da variação da velocidade do feixe na penetração a) velocidades do feixe ao longo da trajetória b) seção transversal do cordão [Autor].....	89
Figura 4.15 - Representação da causa do formato de geometria obtida [Autor].	91
Figura 4.16 - Penetração de solda oscilação circular [Autor].....	92
Figura 4.17 – Largura de cordão oscilação circular [Autor].	93
Figura 4.18 - Influência da variação de velocidade do feixe na penetração a) velocidades do feixe ao longo da trajetória b) seção transversal do cordão [Autor].....	95
Figura 4.19 - Penetração dos cordões com oscilação em infinito [Autor].	97
Figura 4.20 - Largura dos cordões com oscilação em infinito [Autor].	98
Figura 4.21 - Gráfico de Pareto da influência na penetração oscilação circular [Autor].	99
Figura 4.22 - Influência da interação dos parâmetros na penetração em oscilação circular [Autor].	100
Figura 4.23 - Efeito dos parâmetros na penetração dos cordões em oscilação circular [Autor].	100
Figura 4.24 - Gráfico de Pareto da influência na largura oscilação circular [Autor].	101
Figura 4.25 - Influência da interação dos parâmetros na largura em <i>wobble</i> circular [Autor].	102
Figura 4.26 - Efeitos principais na largura dos cordões em geometria circular [Autor].	102
Figura 4.27 - Gráfico de Pareto da influência na penetração dos cordões em infinito [Autor].	103
Figura 4.28 - Influência da interação dos parâmetros na penetração em oscilação infinito [Autor].	104
Figura 4.29 - Influência dos parâmetros na penetração com oscilação em infinito [Autor]. .	104
Figura 4.30 - Influência dos parâmetros na largura do cordão com geometria em infinito [Autor].	105
Figura 4.31 - Influência da interação dos parâmetros na largura com oscilação em infinito [Autor].	106
Figura 4.32 - Influência dos parâmetros na largura dos cordões em infinito [Autor].	106
Figura 4.33 - Comportamento da penetração para movimentação do feixe na geometria de movimentação circular e infinito [Autor].	107

Figura 4.34 - Quantitativo da influência da amplitude na penetração em oscilação circular [Autor].	108
Figura 4.35 - Quantitativo da influência da amplitude na penetração com oscilação em infinito [Autor].	109

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	23
1.2	OBJETIVOS.....	24
1.2.1	Objetivo Geral	24
1.2.2	Objetivos Específicos.....	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1	TECNOLOGIA LASER.....	26
2.1.1	Características do LASER.....	29
2.1.2	LASER de fibra	30
2.1.3	Qualidade do feixe	33
2.1.4	Sistema de entrega do feixe.....	34
2.2	INTERAÇÃO LASER/MATERIAL	36
2.2.1	Refletividade	37
2.2.2	Coefficiente de absorção (α).....	38
2.2.3	Difusidade térmica	40
2.3	SOLDAGEM A LASER	43
2.3.1	Fundamentos do processo.....	43
2.3.2	Técnicas de soldagem a LASER.....	45
2.3.3	Porosidades no cordão de solda LASER.....	49
2.4	MICROSSOLDAGEM A LASER.....	50
2.4.1	Microssoldagem com feixe LASER oscilante “wobble”	51
2.5	PARÂMETROS DE OPERAÇÃO	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
3.1	Caracterização do substrato.....	58
3.2	Sistema LASER.....	58

3.3	Sistema de fixação.....	63
3.4	Metodologia.....	64
3.4.1	Visão geral dos ensaios de microsoldagem	64
3.4.2	Ensaio preliminares – Etapa 1.....	67
3.4.3	Análise das regiões termicamente afetadas nos ensaios da Etapa 2	68
3.4.4	Influência do movimento <i>wobble</i> sobre as características da região termicamente afetada na amostra pela passagem do feixe LASER.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1	Determinação da velocidade instantânea do feixe laser oscilante.....	73
4.2	Aspectos gerais das microsoldas.....	86
4.2.1	Microsoldas sem oscilação do feixe LASER.....	86
4.2.2	Microsoldas em geometria circular.....	87
4.2.3	Microsoldas com geometria em infinito.....	93
4.3	Efeito dos parâmetros de processo na geometria dos cordões	98
4.4	Considerações finais.....	109
5	CONCLUSÃO	112
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	113
APÊNDICE A – TABELA.....		121
APÊNDICE B – CÓDIGO PYTHON.....		123
APÊNDICE C – CORDÕES DE SOLDA SEM A TÉCNICA <i>WOBBLE</i>		125

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O surgimento de novas tecnologias de equipamentos, possibilita a obtenção de diferentes tipos de materiais, devido a novos métodos de fabricação. A utilização da tecnologia LASER nas indústrias, permite aumentar de modo considerável a produtividade, qualidade de produto e velocidade de processamento de materiais, reduzindo custos de retrabalho e refugos.

No ano de 1960, surgiu o primeiro feixe de radiação LASER da história. Com o passar dos anos, muitas pesquisas sobre a interação LASER/material foram surgindo, possibilitando um grande avanço em diversos segmentos, e a diminuição do custo e adequação para aplicações industriais. Este cenário contribuiu para que o LASER se tornasse mais acessível para centros de pesquisas e empresas [1].

A tecnologia LASER transformou-se em uma alternativa atrativa e competitiva em relação a vários métodos existentes. As aplicações, em geral, são amplas e, dependendo principalmente do comprimento de onda e sua potência de saída, o LASER tem sido empregado em diversos campos, tais como:

- a) Optoeletrônica - CD players; CD-ROM drivers;
- b) Medicina – Odontologia; Dermatologia; Oftalmologia; Ortopedia;
- c) Manufatura na indústria – Corte; Soldagem; Tratamento de superfícies; Perfuração;
- d) Medição e Instrumentação – Medidas de superfícies; Calibração de instrumentos.

Atualmente, a utilização do LASER como ferramenta está entre os métodos de preparação de materiais mais modernos e avançados, encontrando-se em uma posição de destaque no setor industrial, apontando como uma ótima alternativa em relação a outros processos [2]. Isto ocorre devido à sua capacidade de proporcionar soluções para projetos que exigem processos difíceis, ou até mesmo, de impossível cumprimento através dos métodos tradicionais existente [3] [4].

Dentre as aplicações industriais utilizando LASER como fonte de calor, a soldagem vem sendo utilizada na área de metal mecânica, revestimento aeronáutico e em carrocerias de

automóveis [5] [6] [7] [8]. Estes segmentos visam constantemente estabelecer uma relação ideal entre peso e custos de seus componentes, a fim de reduzir significativamente o consumo de combustível dos automóveis e aeronaves [9] [10]. Na soldagem o LASER pode ser utilizado no modo contínuo ou no pulsado [11] [12].

Nas indústrias elétrica e eletrônica, é uma tendência que muitas peças e componentes sejam fabricados com dimensões cada vez menores para atender a requisitos de projetos, tais como: componentes mais leves, finos e compactos. Ou seja, há uma demanda por alta qualidade e eficiência na junção de chapas finas de metais [13].

Processos convencionais de soldagem, apresentam limitações nas aplicações em materiais de dimensões muito pequenas ou com geometrias complexas, não sendo possível oferecer soluções para projetos que requerem processos de difícil, ou até, impossível execução por métodos tradicionais de fabricação, como o caso da microssoldagem a LASER [3].

O processo de fabricação de dispositivos e máquinas com pequenas dimensões, por exemplo, é um setor importante, com muitos desafios, cujo aperfeiçoamento através de novos métodos da aplicação do feixe LASER, se torna necessário. Desta maneira, a técnica *wobble* vem auxiliar a superar estes desafios. Diferentes estratégias foram testadas em experimentos, com a rotação rápida do feixe sobre a junta a ser soldada. Os resultados relatados mostram que essa pode ser uma técnica para superar problemas como respingos e porosidades.

Logo, a microssoldagem do aço inoxidável AISI 316L empregando uma estratégia de oscilação do feixe LASER “*wobble*”, em duas geometrias, é o foco de interesse da atual pesquisa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é verificar como a movimentação de oscilação sobreposta ao movimento longitudinal do feixe sobre uma amostra modifica as características da superfície, das características metalúrgicas e da relação de aspecto do cordão obtido bem como o desenvolvimento de uma base científica e tecnológica para aplicações no processo de

microsoldagem a LASER, dando subsídios para o avanço das pesquisas concernentes a este processo.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para se atingir o objetivo geral proposto foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar a influência da variação da velocidade instantânea e potência do feixe LASER na geometria de cordões obtidos em movimento retilíneo;
- Desenvolver equações matemáticas para determinar a velocidade instantânea do feixe LASER devido à sobreposição dos movimentos *wobble* e linear para uma trajetória circular e uma semelhante ao símbolo matemático “infinito”;
- Determinar uma janela de parâmetros de processamento visando obtenção de cordões com qualidade adequada para aplicação em microsoldagem;
- Determinar a influência dos parâmetros de entrada da movimentação “*wobble*” do feixe sobre a penetração e largura dos cordões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TECNOLOGIA LASER

A tecnologia LASER é uma das grandes inovações do século XX e é cada vez mais notório sua aplicabilidade em diversas áreas do conhecimento. A teoria da emissão estimulada descoberta por Albert Einstein em 1916, se tornou a base para a busca de uma solução prática da oscilação de luz em um ressonador baseado no efeito da emissão de luz estimulada. O termo LASER é o acrônimo de amplificação da luz por emissão estimulada de radiação (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) popularmente conhecida pela sigla LASER. Os primeiros osciladores de ondas eletromagnéticas foram os MASER (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) o MASER, dispositivo que produz ondas eletromagnéticas coerentes através da amplificação de emissão estimulada. Anos depois de desenvolvidos os LASER, Schawlow e Charles Hard Townes sugeriram que o termo MASER fosse designado para “*Molecular Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” e os antigos MASER fossem denominados de *Optical Maser*, sendo estes incorporados aos LASER de comprimento de onda no extremo infravermelho. O primeiro LASER foi construído no ramo acadêmico na década de 1960, sendo responsável pela primeira fonte de emissão de LASER, o físico Theodore Maimann, utilizando um cristal de rubi [14]. A partir disto, diversas pesquisas e dispositivos a LASER baseados neste protótipo original foram desenvolvidos e aprimorados [15].

O princípio físico por trás do princípio de ampliação de luz por emissão estimulada LASER está baseado no fato de que átomos que já se encontram no estado excitado, ao receberem a energia de um segundo fóton, com energia igual ao da energia já armazenada minimizam a sua energia de excitação (ΔE) numa quantidade $h\nu$, como apresentado nas Equações (1) e (2) e representado na Figura 2.1, emitindo assim dois fótons, sendo que ambos os fótons possuem o mesmo comprimento de onda característico da emissão do átomo excitado sendo coerentes e apresentam exatamente a direção e fase do segundo fóton incidente [2]. Se no eixo de deslocamento destes fótons estiverem dispostos dois espelhos absolutos, paralelos entre si, e num afastamento igual à um múltiplo de meio comprimento de onda dos fótons emitidos, os dois fótons oscilarão entre estes dois espelhos. Se forem colocados mais átomos

excitados por uma fonte externa entre os dois espelhos do ressonador, e os fótons já em circulação atingirem estes átomos excitados, cada átomo excitado atingido emitirá dois fótons de luz exatamente em fase e paralelo ao eixo do ressonador. O aumento do número de fótons sincronizados aumenta até se atingir a saturação. A liberação dos dois fótons em decorrência do estímulo induzido pela incidência do fóton inicial é que caracteriza o conceito intrínseco da emissão estimulada.

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad (1)$$

onde:

h - Constante de Planck ($6,62607004 \times 10^{-34}$ J.s);

c - Velocidade da luz (299.792,458 m/s);

λ - Comprimento de onda (m);

ν - Frequência de radiação (1/s).

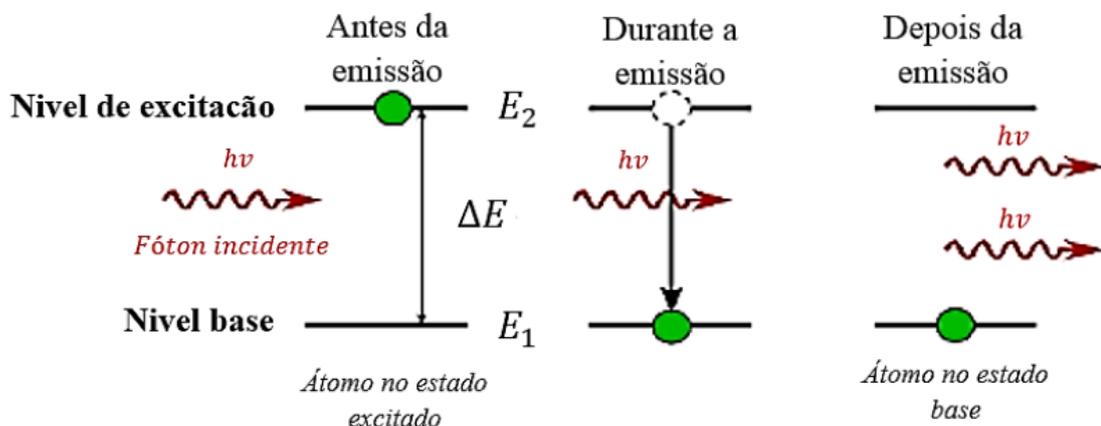


Figura 2.1 - Esquema de emissão estimulada (Adaptado de [2]).

$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu \quad (2)$$

A emissão estimulada é facilitada, se em um determinado nível de excitação, o tempo de emissão espontânea for grande. Materiais que possuam uma eficiência adequada, como por exemplo o neodímio (empregado no LASER Nd:YAG), itérbio e os vários outros materiais, são

explorados na construção de fontes de emissão de LASER. Se a emissão de energia espontânea ocorrer de forma muito rápida, a probabilidade deste átomo ser atingido por um fóton diminui. A emissão espontânea ocorre em qualquer direção e não apresenta sincronismo com a luz que circula no interior do ressonador [14].

É necessário ocorrer a condição de “inversão de população” para que haja a emissão estimulada, ou seja, deve haver mais partículas no estado E_2 (excitado) que no estado de baixa energia E_1 . Tal condição é vista quando o tempo de vida do estado E_2 é maior que o estado E_1 .

Na construção de uma fonte LASER, o meio ativo é o ambiente onde estão os átomos que possibilitam a ocorrência do processo de emissão estimulada. Normalmente, fica localizado entre dois espelhos, um totalmente refletor e outro parcialmente refletor, que permite a “entrega” do feixe LASER. Os espelhos são montados paralelos entre si, com um afastamento de um múltiplo de meio comprimento de ondas, formando assim um oscilador óptico para este comprimento de onda, ou seja, a luz é aprisionada ao ser refletida nos dois espelhos infinitamente. A luz é amplificada pelo fato de que, uma vez aprisionada ao longo do eixo óptico do ressonador, cada átomo excitado atingido por um fóton aprisionado, irá emitir dois fótons e assim servir para excitar de forma geométrica o meio ativo pelo mecanismo de emissão estimulada, gerando assim o princípio do qual deriva o nome LOSER (*Light Oscillation by Stimulated Emission of Radiation*) [16]. O termo LOSER foi redesignado para LASER pouco depois da descoberta da emissão de luz amplificada pelo primeiro oscilador por motivos óbvios do significado do acrônimo original em inglês. Theodor Maimann necessitava de recursos para continuar sua “brincadeira” (Seus colegas ironizavam: Não vai dar em nada!). O princípio de um ressonador LASER é representado na Figura 2.2. O bombeamento de energia transversal ao ressonador para obter o aumento do nível de energia dos átomos que dopam o hospedeiro necessitam de fóton para estímulo inicial e passa a ser contínuo a partir do momento em que ocorre a inversão da população. Naturalmente, este sistema ressonante não é perfeito e ocorrem perdas de energia nos espelhos que nunca são absolutos. No entanto, as maiores perdas são perdas térmicas fora do ressonador, principalmente na forma de calor, o que se constitui na principal limitação física na construção de fontes de LASER com escalas maiores de potência emitida.

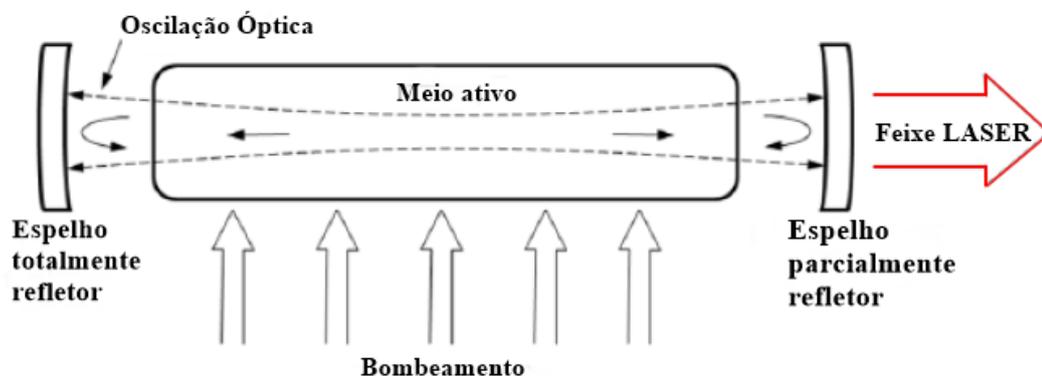


Figura 2.2 - Componentes do oscilador LASER (Adaptado de [17]).

Usualmente, diferencia-se o LASER através do seu modo de operação, podendo ser do modo contínuo ou pulsado. Neste trabalho, o LASER contínuo é o objeto usado no estudo. O modo contínuo, usado em diversas aplicações LASERs industriais, possui grande estabilidade em suas características de emissão [18].

As aplicações para o LASER têm crescido nas últimas décadas. Com a evolução no desenvolvimento de fontes e o melhor atendimento de requisitos práticos como flexibilidade, custos de consumíveis e entrega de feixe, há uma tendência de ampliação do uso de fontes de LASER no estado sólido em comparação com o LASER de CO₂, que ainda possuem uma larga utilização em aplicações industriais.

2.1.1 Características do LASER

A radiação LASER possui características próprias, como a monocromaticidade, a coerência e a propagação colimada, que gera a possibilidade focar a energia com alta densidade e pequena profundidade de foco, permitindo a localização de padrões geométricos com alta precisão [19]. São estas três características principais que caracterizam a luz LASER das fontes de luz comum como a luz do sol, de lâmpadas fluorescentes e incandescentes.

Em um feixe colimado os fótons da luz LASER se movem de forma paralela, tendo o feixe quase nenhuma divergência, o que permite emitir um feixe a longas distâncias e captar a luz refletida por um espelho mesmo depois de ter se propagado por centenas de quilômetros de

distância. Tal propriedade possibilita à potência óptica ficar concentrada em uma área relativamente pequena [19].

A monocromaticidade é a especificidade da radiação possuir um comprimento de onda definido. Os fótons da luz LASER são praticamente de cor “pura”, sendo a maior parte da radiação emitida em torno de um único comprimento de onda. Ao contrário, a luz gerada por outras fontes tradicionais compreende uma grande variedade de comprimentos de onda [19].

A coerência é a característica que faz a luz LASER emitida apresentar a mesma fase, de modo que, juntamente com as duas propriedades únicas já mencionadas acima, os vales e picos das ondas de luz emitidas combinam-se perfeitamente no espaço (coerência espacial) e no tempo (coerência temporal). Eles permanecem em fase por muitos comprimentos de onda [19].

Existem diversas formas de se obter um feixe de radiação LASER [19]. Uma diferença entre as diversas fontes é seu comprimento de onda (λ) emitido.

Na utilização do LASER para processamento de materiais, o feixe de radiação incide sobre a superfície do material com densidade de energia previamente regulada para dada operação. Uma parte dessa radiação é absorvida pelo material e o restante é refletida, dependendo das suas características termofísicas e características ópticas da superfície.

2.1.2 LASER de fibra

Este tipo de construção de sistema LASER possui tamanho compacto, excelentes parâmetros do feixe e boa eficiência como características principais. São fabricados à base de fibras óticas de dupla camada [20].

O primeiro uso do LASER de fibra ocorreu no início dos anos de 1960, ao se usar em amplificadores óticos LASERs de baixa potência. No ano de 2000 foi produzido para processamento de materiais um LASER com 100 W [21]. A partir de então, observa-se um rápido aumento na potência de saída dos LASER's de fibra.

Nos LASERs de fibra o hospedeiro é um vidro (normalmente a sílica) é dopado com um elemento do grupo das terras raras. A fibra dopada fica envolvida por um material que possui baixo índice de refração, atuando como guia para os fótons, garantindo assim uma transferência ideal dessa radiação para a fibra interior. O meio ativo, dopado com tálio (1900 - 2000 nm), érbio (1540 – 1560 nm) e itérbio (1030 – 1080 nm) é excitado por baterias de LASER de diodo

(VCSEL *vertical-cavity surface-emitting laser*) [22] [23]. Grades de gravadas na extremidade da própria fibra, funcionam como espelhos refletoras para formar o ressonador, que refletem apenas uma faixa estreita de comprimentos de ondas, gerando a emissão do LASER e resultando em uma fonte de LASER compacta e eficiente com alta qualidade de feixe.

O LASER de fibra de Yb, utilizado neste trabalho, dotado de uma fibra óptica dopada com íons de itérbio, emite em um nível de radiação muito próximo à do Nd: YAG (1030 a 1080 nm). Por possuir alta qualidade de feixe para um comprimento de onda de 1070 nm, torna-se adequado para o processo de soldagem de metais.

As fontes LASERs de fibra são compactas, confiáveis, de fácil utilização e possuem longo tempo de vida [24]. A Figura 2.3 mostra um esquema típico de LASER de fibra.

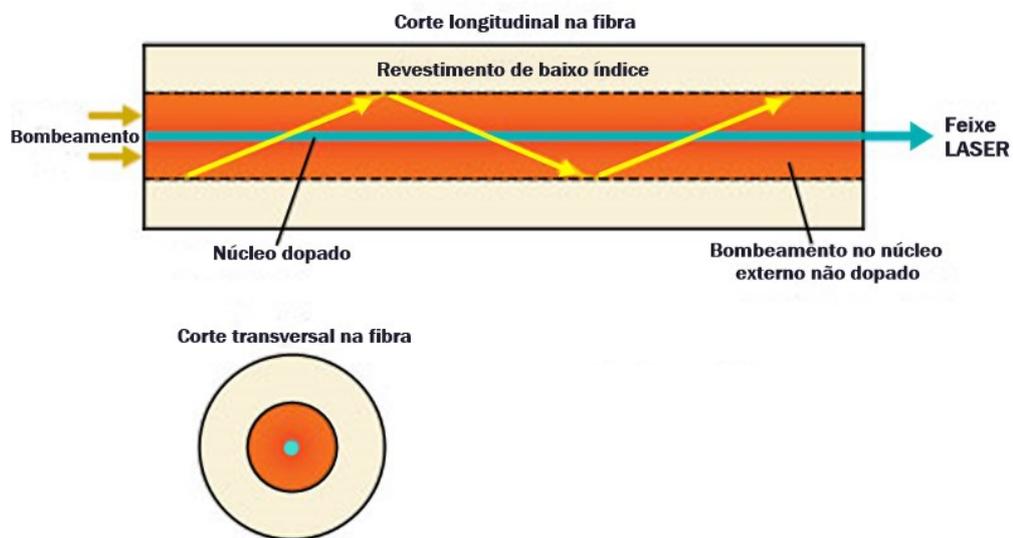


Figura 2.3 - Representação esquemática do LASER de fibra (Adaptado de [25]).

Desde 1960, as fontes LASER passaram por muitos aprimoramentos, através do surgimento de novas formas de geração e maiores potências dos feixes [26]. Estas evoluções influenciam os processos que utilizam o LASER como ferramenta principal de trabalho. A Figura 2.4 apresenta a evolução da potência disponibilizada por fontes de LASER de fibra ao longo dos anos. Com a combinação de feixes de múltiplos canais, pode-se aumentar a potência total até 100 kW [1, 27, 28].

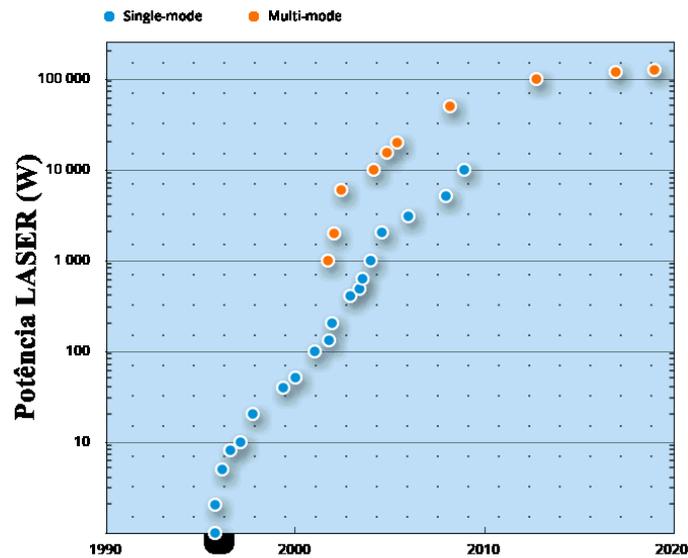


Figura 2.4 - Evolução da potência das fontes LASERs de fibra (Adaptado de [29]).

Na soldagem de chapas finas, o LASER de fibra tem sido bastante utilizado devido à possibilidade de obter melhor flexibilização de movimentos durante o processo, fato este dado à utilização de fibras ópticas, que são flexíveis e conduzem com mais facilidade a radiação LASER do que nos casos de necessidade de propagação livre do feixe no ar e a reflexão por espelhos, como necessário para o LASER de CO₂. Além disso, também tem ocorrido uma diminuição gradativa do seu custo.

As fontes de laser de fibra podem ser acopladas umas à outra, permitindo obter potências maiores. A partir do ano de 2000 as fontes de fibra vêm ganhando destaque no ramo industrial. Várias vantagens destacam o LASER de fibra aos demais, principalmente em relação às fontes de Nd: YAG. Destacam-se [26] :

- Baixo custo em relação aos demais sistemas;
- Bombeamento por VcSEL;
- Fibra não necessita de refrigeração forçada;
- Equipamentos mais compactos;
- Inicialização rápida e operação em máxima potência, sem necessidade de ciclos de aquecimento;
- Maior flexibilidade na entrega do feixe, devido a condução por fibra;

- Pouca manutenção;
- Maior confiabilidade e robustez;
- Grande eficiência energética;
- Excelente qualidade de feixe.

2.1.3 Qualidade do feixe

Nos feixes de LASERs de alta potência, a capacidade de foco do feixe é crítica, pois uma focalização eficiente expressa um tamanho de ponto de emissão menor, uma maior densidade de potência e uma menor profundidade de campo. Se há um foco bom, pode-se utilizar uma maior distância focal e, conseqüentemente, uma maior distância de trabalho, sem perder qualidade.

A capacidade de focalização do feixe do sistema LASER é frequentemente atribuída como sendo a qualidade do feixe, podendo ser mensurada de diversas maneiras [2]. Segundo a norma ISO 111146 de 1999, os parâmetros para se mensurar a qualidade do feixe de um LASER são:

- O número BPP (*Beam Parameter Product*), que é dado pelo produto entre o ângulo de divergência do campo distante de um feixe (θ) e o raio do feixe em seu ponto mais estreito, a “cintura do feixe” ($\frac{dcintura}{2}$), como representado na Figura 2.8. Quanto menor o BPP de um LASER, maior a profundidade do foco, sendo dado pela Equação (3):

$$BPP = \frac{(dcintura/2) * \theta}{4} \quad (3)$$

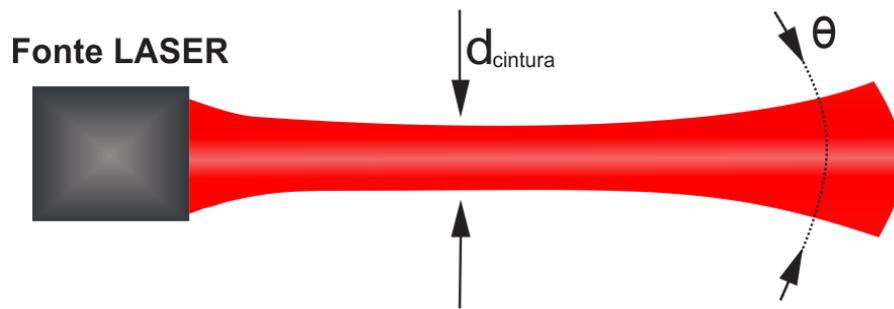


Figura 2.5 - Divergência do feixe (Adaptado de [30]).

- O fator M^2 , que, a partir da comparação com um feixe gaussiano ideal, representa o grau de variação da intensidade de um feixe real. Ou seja, corresponde à qualidade de um feixe específico (real) em relação a um feixe perfeito (ideal), denominado limite de difração. É definido como o produto do parâmetro do feixe imerso e o produto correspondente para um feixe gaussiano com difração limitada com o mesmo comprimento de onda (λ). Por exemplo, um feixe caracterizado pelo valor M^2 de 1,2, irá fornecer um diâmetro de feixe maior em 20% comparado a um LASER de feixe perfeito ($M^2=1$) [31]. Os feixes gaussianos têm a qualidade de feixe mais alta possível, associada a produtos de parâmetro de feixe menor e correspondente a $M^2=1$. Fator M^2 é definido pela Equação (4).

$$M^2 = BPP * \frac{\pi}{\lambda} \quad (4)$$

- O fator K , visto na Equação (5), é o inverso de M^2 e é elevado (idealmente 1) se tratando de feixes de alta qualidade.

$$K = \frac{1}{M^2} \quad (5)$$

2.1.4 Sistema de entrega do feixe

Os sistemas de entrega são compostos pelo conjunto óptico de condicionamento do formato do feixe e do sistema de movimentação deste feixe sobre a superfície de trabalho. O conjunto óptico é composto por elementos transmissivos e reflexivos e apresenta um projeto específico para gerar o formato desejado no feixe de LASER. O sistema de movimentação, dependendo da aplicação, pode fornecer velocidades distintas de deslocamento do feixe. Em processos com dinâmica mais lenta, é comum contar com sistemas cartesianos que deslocam todo o cabeçote óptico, com nas aplicações encontradas em máquinas de corte a LASER. Quando é necessário obter maiores velocidades de deslocamento do feixe, como no caso da microsoldagem oscilante, objeto de estudo deste trabalho, recorre-se a sistemas muito mais dinâmicos, como os scanners galvanométricos.

O scanner galvanométrico é composto por dois espelhos móveis e um controlador, onde a programação da movimentação é executada por um computador. O computador gera os comandos e os transfere de forma sequencial para o controlador. Os dados são convertidos em um sinal analógico pelo conversor D/A e alimentado ao circuito de controle do inversor. Com base no sinal analógico, o circuito gera um sinal de acionamento para o scanner.

A Figura 2.6 ilustra os componentes que compõem o scanner galvanométrico, com a representação de um feixe LASER sendo desviado por dois espelhos controlados nas direções x e y . O feixe é focalizado na amostra através da lente F-Theta, com determinado comprimento focal. Essa lente F-Theta mantém o foco do feixe no plano de trabalho e define a área de varredura.

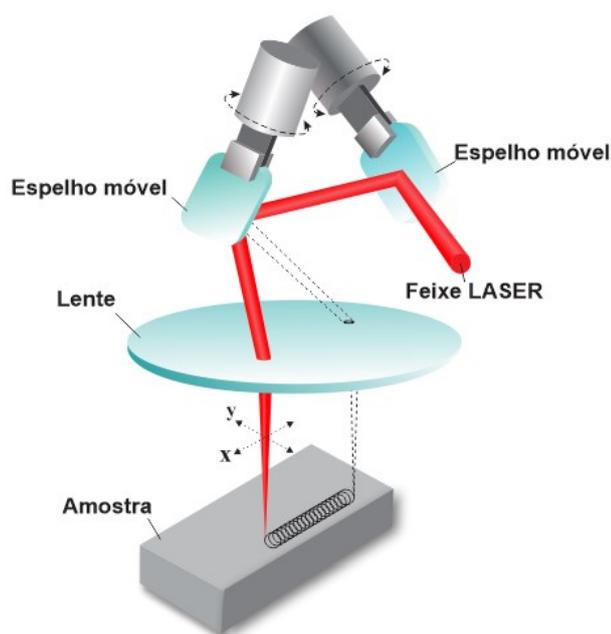


Figura 2.6 – Representação dos componentes ópticos do *scanner* galvanométrico [Autor].

2.2 INTERAÇÃO LASER/MATERIAL

Uma das vantagens do processamento de materiais com o LASER é sua capacidade de concentrar grandes densidades de potência em áreas relativamente pequenas, e com isso ocasionar um aquecimento rápido na região desejada. Compreender os processos físicos que ocorrem neste aquecimento durante a interação do LASER com o material é de suma importância para saber as capacidades e limitações do processamento.

Há três maneiras distintas do feixe LASER interagir com o material. Quando a radiação atinge a superfície do material, o feixe pode ser tanto absorvido, refletido ou transmitido (se tratando de materiais transparentes). O tipo de interação dependerá diretamente das características e propriedades do material a ser utilizado. Porém, se tratando de processamento, somente a energia absorvida será relevante, uma vez que a parte do feixe que é refletida ou transmitida não fornece energia para o material.

Durante o processamento de materiais com LASER, a parcela da energia absorvida pelo material processado é transformada em calor que, dependendo da temperatura atingida localmente, pode simplesmente aquecer ou mesmo fundir ou evaporar o material. O tipo de efeito causado é que determinará o processamento sofrido pelo material.

Os coeficientes de reflexão, absorção e a difusidade térmica são as propriedades mais relevantes do material em se tratando de processamento com LASER.

2.2.1 Refletividade

Trata-se do índice que demonstra a parcela do feixe incidente que é refletida pelo material durante o processamento, ou seja, um parâmetro que afeta a fração de radiação que é absorvida no material. Por definição, é a razão entre a radiação LASER refletida na superfície e a radiação incidente, sendo uma grandeza adimensional, assumindo valores entre 0 e 1. A radiação refletida se perde, não produzindo assim o aquecimento no material. Deste modo, a quantidade de radiação absorvida por uma superfície de um material é proporcional a $1-R$, onde R é a refletividade, e depende vigorosamente do comprimento de onda da radiação incidente e do material que irá absorver. Cada material apresenta sua característica própria de refletividade com base no comprimento de onda da radiação incidente e este é um fator importante a ser considerado quando se pretende processar um material a LASER.

A Figura 2.7 mostra o coeficiente de refletividade em função do comprimento de onda da radiação incidente para alguns materiais.

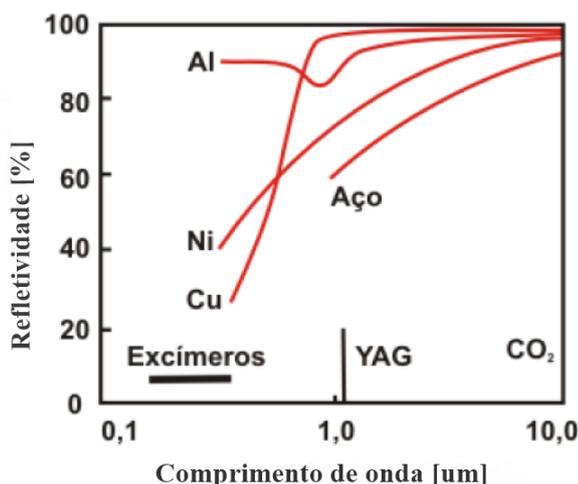


Figura 2.7 - Gráfico da refletividade versus comprimento de onda [2].

Nota-se que os metais possuem refletividades bem distintas em diferentes comprimentos de onda. Como exemplo, o alumínio, que reflete 98% da radiação emitida pelo LASER de CO2 e para o LASER de Nd: YAG apresenta uma refletividade de aproximadamente 85%.

Outra propriedade significativa que também influencia na refletividade do material, além do comprimento de onda, é a sua temperatura, devido ao aquecimento imediato da área de processamento do espécime pelo LASER.

A Figura 2.8 ilustra a influência da temperatura em alguns materiais.

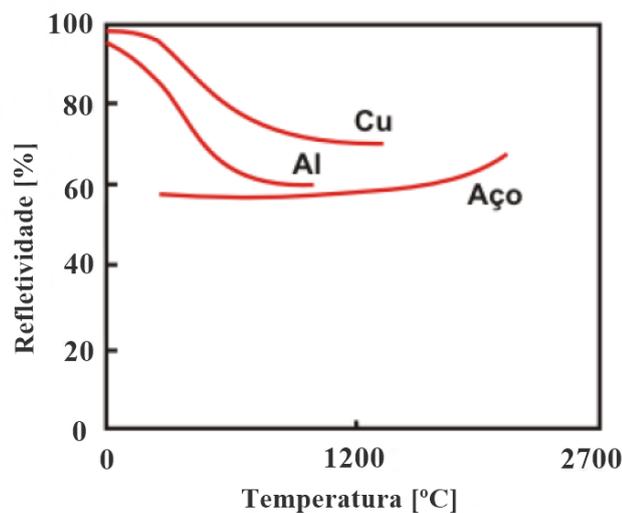


Figura 2.8 - Refletividade em função da temperatura (Adaptado de [2]).

2.2.2 Coeficiente de absorção (α)

Ao atingir a superfície do material, parte da radiação LASER é transmitida. A parcela que energia que é absorvida transforma-se em calor em uma camada fina rente à superfície. A absorção acontece de acordo com a Equação (6):

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (6)$$

$I(z)$: intensidade atingida na profundidade z ;

I_0 : intensidade absorvida;

α : coeficiente de absorção.

Absortividade é uma propriedade do material que estipula o quão profundo atinge a energia absorvida pelo material. Essa profundidade mantém a proporção $1/\alpha$ sendo na ordem de 10^{-5} para a grande parte dos materiais metálicos [15]. É possível observar os valores do coeficiente de absorção de alguns materiais metálicos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Coeficiente de absorção de alguns materiais [2].

Material	Coeficiente de absorção (cm⁻¹)
Alumínio	8×10^{-5}
Prata	7×10^{-5}
Cobre	5×10^{-5}
Ferro	3×10^{-5}

O coeficiente de absorção é uma propriedade que expõe a fração de energia óptica entregue por unidade de profundidade no material. Tal fração de energia é descrita pela Equação (7).

$$|\Delta E(z)| = E_0 \alpha e^{-\alpha z} \Delta z \quad (7)$$

Onde E_0 é a energia que incide na superfície. Com isso, a energia inserida é máxima na superfície decrescendo com a profundidade. Por isso, se diz que a radiação LASER é absorvida em uma profundidade $1/\alpha$ da superfície.

Quando a energia é absorvida pelo material, dependendo da densidade, pode haver quatro efeitos presentes: aquecimento, fusão, vaporização e formação de plasma. No caso do aço, a fusão se inicia quando a intensidade é de aproximadamente 10^5 W/cm². Quando atinge a casa de 10^6 W/cm², ocorre a vaporização, sem nem mesmo haver acúmulo de material fundido. Se a intensidade do feixe LASER é acima de 10^8 W/cm², ocorre a formação de plasma [32].

Cada material apresenta um comportamento distinto com relação à absorção da radiação LASER, dependendo do comprimento de onda empregado. Na Figura 2.9 é apresentada a

absortividade de vários tipos de metais ao serem submetidos à radiação LASER em diferentes comprimentos de onda.

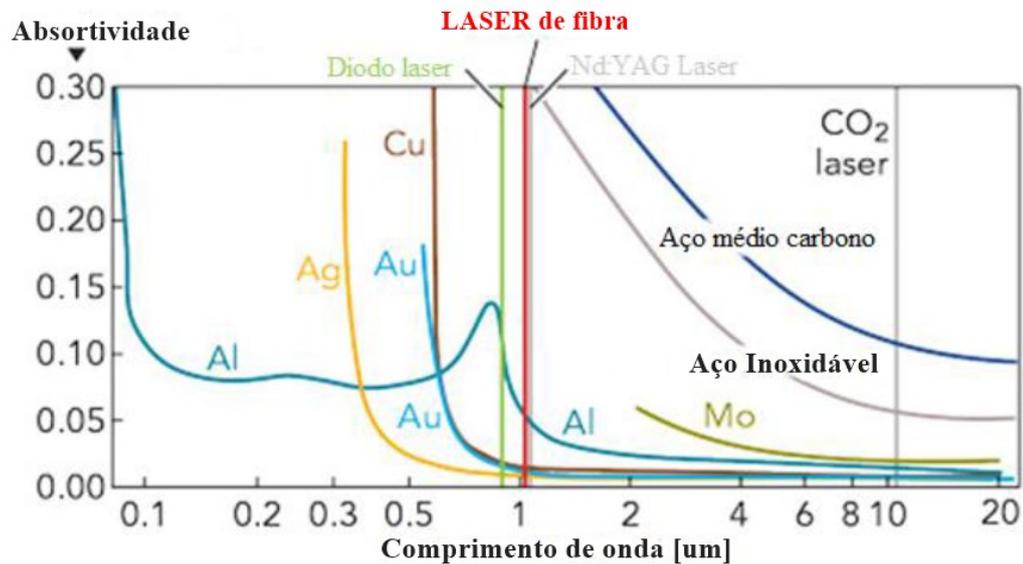


Figura 2.9 - Absortividade de alguns materiais (Adaptado de [33]).

2.2.3 Difusidade térmica

Em termos físicos, a difusidade térmica indica a rapidez que o material recebe e transmite energia térmica. Se a difusidade do material for baixa, isso demonstra que o calor tem uma certa dificuldade em prosseguir mais internamente ao material. Entretanto, com valores maiores, ocorre uma remoção acelerada de calor da superfície, podendo ocorrer uma redução da quantidade de material fundido.

Em termos gerais, a difusidade térmica das ligas tende a ser mais baixa que de um metal puro [34]. Por exemplo, o aço inoxidável possui baixa difusidade térmica em comparação com o ferro puro e, com isso, limita a penetração do calor em seu interior durante seu processamento.

A difusidade térmica é descrita pela Equação (8):

$$k = \frac{K_t}{\rho_m c} \quad (8)$$

É visto que a irradiação do calor interna ao material é orientada por suas propriedades termo físicas como condutividade térmica (K_t), calor específico (c) e densidade do material (ρ_m).

A Tabela 2.2 mostra o valor da difusidade térmica de alguns materiais.

Tabela 2.2 - Difusidade térmica de alguns metais [2].

Metal	Difusidade térmica (cm²/s)
Alumínio comercial puro	0,850
Alumínio 2024	0,706
Alumínio A13	0,474
Ferro comercial puro	0,202
Aço carbono	0,119
Aço inoxidável	0,056

Existe um outro coeficiente, o comprimento de difusão térmica do material, que define a profundidade de penetração do calor por unidade de tempo, representado pela Equação (9).

$$D = (4kt)^{1/2} \quad (9)$$

D : comprimento de difusão térmica do material;

t : tempo de interação do feixe com o material.

O tempo que o calor demora para se estender em uma certa distância é denominado de tempo de difusão térmica. Para um certo metal com certa espessura, o tempo de difusão térmica é dado pela Equação (10):

$$t_D = \frac{x^2}{4k} \quad (10)$$

O tempo é um importante fator no processamento de metais, por exemplo, se o tempo de interação não for suficiente durante o trabalho, mesmo utilizando níveis adequados de

intensidade, o evento físico esperado não é obtido. Os intervalos dos tempos de interação juntamente com a intensidade para processos distintos são mostrados na Figura 2.10.

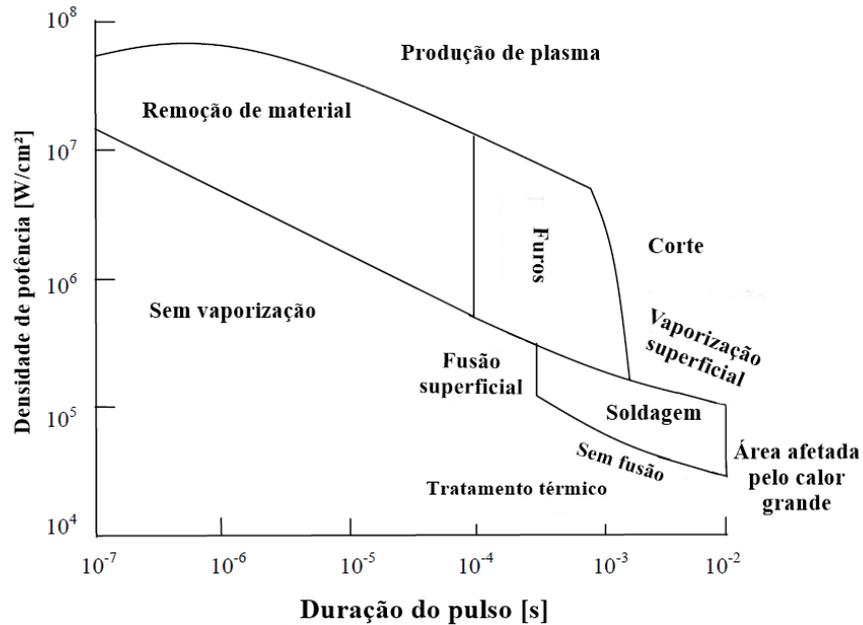


Figura 2.10 - Gráfico de intensidade e tempos de interação para processos diversos (Adaptado de [15]).

Em se tratando de LASER pulsado, o tempo de interação com o material é o tempo de pulso, e para o LASER contínuo o tempo de interação é conduzido com base na velocidade de processamento, expressa aproximadamente pela Equação (11):

$$t = \frac{D}{v} \quad (11)$$

t : Tempo de interação;

D : Diâmetro do feixe LASER;

v : Velocidade de processamento.

Para cada modo de processamento, é necessário um tempo adequado de interação para lograr êxito. Quanto menor a velocidade de processamento, maior será o tempo de interação.

2.3 SOLDAGEM A LASER

A soldagem é um assunto amplo e diversificado, envolvendo diversas técnicas, princípios e aplicações. Este trabalho focará nos aspectos específicos da soldagem a LASER. Portanto, os principais conceitos da soldagem a LASER são descritos nas próximas seções.

2.3.1 Fundamentos do processo

Uma excelente qualidade de radiação é possível devido à alta concentração do feixe LASER, possibilitando implementar uma gama de aplicações, dentre elas a soldagem. Determinadas características importantes para o processo de soldagem são potencializadas com o uso do LASER como fonte de energia, tais como: altas velocidades de soldagem, inexistência de contato entre a fonte de calor e o material utilizado, poucas distorções e zona afetada pelo calor (ZAC) relativamente pequena [35].

A soldagem a LASER tem sido cada vez mais utilizada na indústria de manufatura [35]. Os aspectos exclusivos do LASER em conjunto com a utilização de equipamentos modernos de deslocamento e posicionamento, proporcionam grandes vantagens, tais como: altas taxas de processamento, completa automação, fácil adaptação do processo para tipos específicos de materiais ou juntas, acesso a regiões difíceis da peça. Por outro lado, a desvantagem principal é o alto investimento inicial necessário para a aquisição do equipamento e na capacitação do pessoal.

Na Figura 2.11 é apresentada a comparação da intensidade de energia possível de ser obtida por diferentes fontes de calor existentes, juntamente com o perfil geométrico da zona fundida provenientes de vários processos de soldagem.

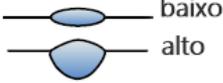
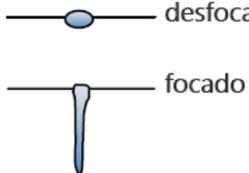
Processos	Intensidade da fonte de calor (W / m ²)	Perfil da zona fundida
Soldagem a arco com fluxo de proteção	$5 \times 10^6 - 10^8$	
Soldagem a arco com gás de proteção	$5 \times 10^6 - 10^8$	 baixo alto
LASER ou feixe de elétrons	$10^{10} - 10^{12}$	 desfocado focado

Figura 2.11 - Comparação da densidade de potência de vários processos de soldagem
(Adaptado de [32]).

Os fatores responsáveis pela evolução desta tecnologia são as melhorias nas fontes LASERs, juntamente com uma redução progressiva no seu custo, no controle adequado dos sistemas de transmissão dos feixes, e uma melhor compreensão teórica do processo [36]. Tal progresso permitiu que a soldagem a LASER fosse utilizada tanto para grandes quanto para pequenas peças, numa diversidade de materiais e aplicações.

Uma aplicação específica da soldagem a LASER é a soldagem de chapas metálicas de pequena espessura. Com o LASER, é possível obter um pequeno diâmetro do ponto focal, o que possibilita que a temperatura de evaporação seja alcançada, mesmo com baixas potências, e com elevadas velocidades de processamento. Podem ser encontrados exemplos de cordões de solda feitos em aço inoxidável com espessura de 25 μm a uma velocidade de soldagem de 2 m/s, com ponto focal de 22 μm de diâmetro, com apenas 15 W de potência de LASER [37].

No campo da microsoldagem, os LASERs operando em regime pulsado também desempenham um papel importante devido a características como: bom controle dimensional e alta concentração de energia em uma área muito pequena durante o processamento, o que gera a capacidade de soldar componentes sensíveis ao calor. Dessa maneira, se torna possível a microfabricação de componentes finos, juntamente com a criação de novas técnicas de junção a LASER em diversas áreas, como: componentes eletroeletrônicos, dispositivos médicos, peças para relógio, entre outros [38-41].

De maneira geral, a soldagem a LASER é caracterizada por um refinado balanço de energia entre aquecimento e resfriamento dentro de um volume, onde é formada uma poça líquida, que permanece estável até sua solidificação. A poça de fusão é formada através da absorção da radiação pelo material, possibilitando seu crescimento até atingir um tamanho desejado, que deve ser suficiente para se propagar através da interface sólida, eliminando a linha de descontinuidade da junta original das peças a serem unidas [35].

Para a realização da soldagem a LASER, é necessário basicamente uma fonte de energia proveniente de uma fonte LASER, junto aos seus controles, um sistema de condicionamento do formato do feixe e um sistema que possibilite um deslocamento relativo entre o feixe de LASER e a peça processada, como mostra a Figura 2.12. Dependendo do comprimento de onda do LASER e de outros aspectos, o feixe de LASER pode ser propagado pelo ar e refletido por espelhos até o local da aplicação ou pode ser conduzido por fibra óptica.

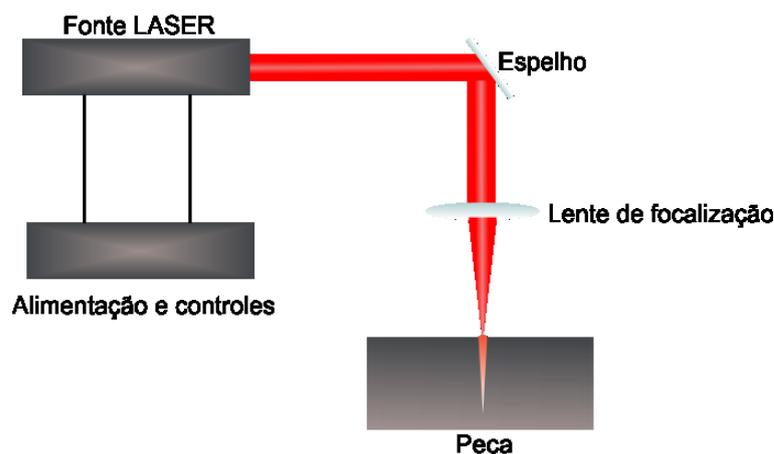


Figura 2.12 - Representação esquemática do LASER para soldagem [Autor].

2.3.2 Técnicas de soldagem a LASER

Os mecanismos que regem a interação LASER-material são influenciados por diversos fatores como a potência do LASER, o tempo de irradiação, a distribuição da intensidade da potência do feixe na superfície do material e propriedades do material.

De acordo com a intensidade, as operações de soldagem a LASER podem ser realizadas com o uso de duas técnicas fundamentais: por condução, que é a fusão convencional, como em outros processos de soldagem e, por penetração (*keyhole*). Entre a soldagem por condução e a soldagem por penetração há uma região de transição, que é instável e inapropriada para uso em

processamento, como representado na Figura 2.13. Ambas são possíveis de serem executadas com LASER no modo contínuo ou pulsado. No caso do LASER pulsado, o que irá definir se a solda é feita por condução ou penetração, será a duração do pulso e a intensidade do feixe do LASER [42].

A aplicabilidade de ambas as técnicas irá depender do tipo de material e geometria a ser soldada. A soldagem por condução gera uma poça de maior largura com pouca profundidade. Por outro lado, a soldagem por penetração gera poças mais estreitas com maior profundidade, o que pode resultar em descontinuidade ao reter gases, como vazios formadores de porosidades.

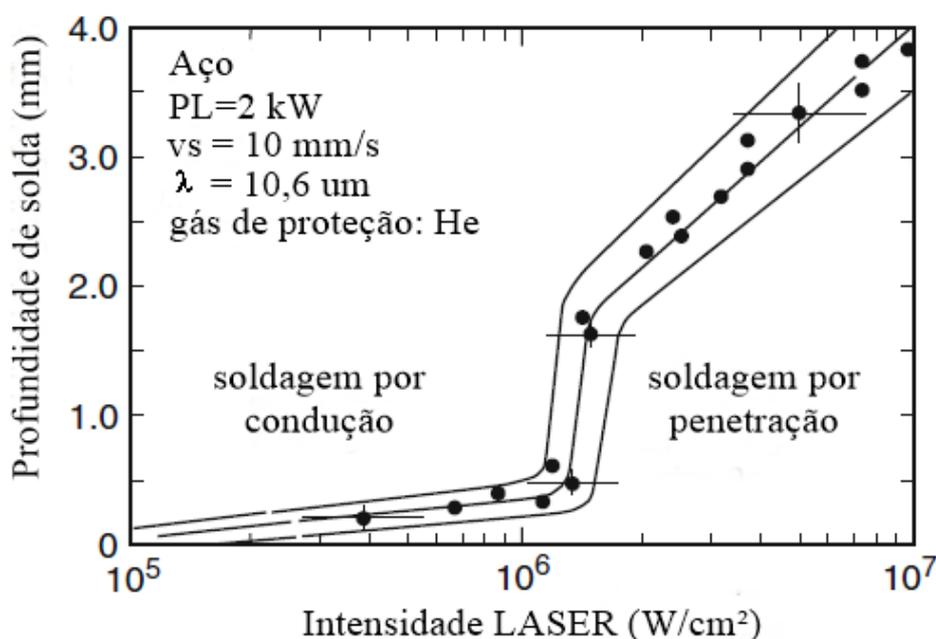


Figura 2.13 - Influência da intensidade de potência no modo de soldagem (Adaptado de [43]).

2.3.2.1 Soldagem a LASER por condução

A soldagem a LASER por condução é usada geralmente em densidades de potência baixas ($< 10^6 \text{ W/cm}^2$) [44]. O material é aquecido pelo feixe na superfície até atingir sua temperatura de fusão e o calor proveniente é transferido para a raiz da solda por condução térmica, independentemente se o feixe é contínuo ou pulsado [45]. Neste caso, a densidade de potência não é suficientemente alta para causar a vaporização do metal a uma certa velocidade de soldagem [46]. Há uma limitação neste método de soldagem no que diz respeito à profundidade de penetração máxima, não permitindo obter-se grandes profundidades. A eficiência energética do

processo também é menor, uma vez que boa parte da potência do LASER é perdida por condução.

A condução do calor não ocorre somente na direção vertical, mas também na horizontal ao longo da superfície do metal. As isoterma são semicírculos envoltos da irradiação do feixe, o que retrata que a seção transversal do cordão mostra uma forma semicircular [43]. A geometria do cordão neste modo é mais superficial e larga. De modo geral, a transição da condução para o modo *keyhole* acontece com o aumento da intensidade do LASER e do tempo de irradiação do feixe sob o material. As isoterma são esquematicamente mostradas na Figura 2.14.

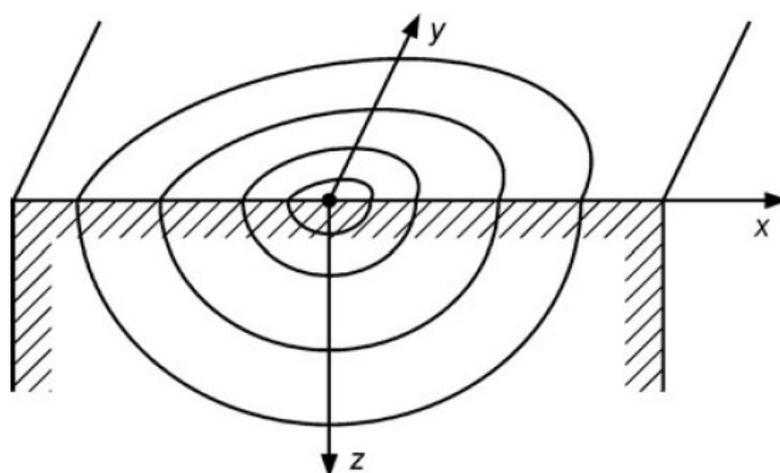


Figura 2.14 - Esquemático das isoterma [43].

A poça de fusão possui forças convectivas fortes ativada pelas correntes de Marangoni, devido a variação da tensão superficial e da densidade com a temperatura. Essas forças de Marangoni têm relação com o escoamento de fluidos acionados por gradiente de temperatura e tensão superficial, onde o fluxo na superfície da poça caminha de regiões de baixa tensão superficial, para regiões de alta tensão superficial [32].

O modo de soldagem por condução possibilita maior estabilidade ao processo, pois devido à radiação LASER não penetrar no material a ser soldado, resulta em soldas com menor susceptibilidade a respingos e outras discontinuidades, como por exemplo porosidades devido ao aprisionamento de gases. A soldagem por condução é representada pela Figura 2.15.

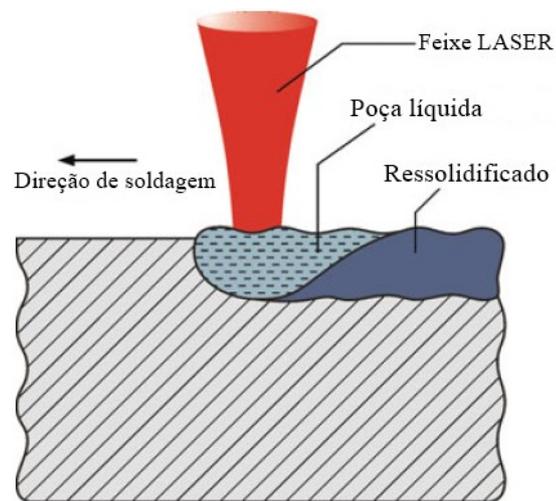


Figura 2.15 - Princípio da soldagem por condução (Adaptado de [43]).

2.3.2.2 Soldagem a LASER por *keyhole*.

Nos processos de soldagem a LASER por penetração (*keyhole*), a energia de irradiação do feixe aquece a peça para além de sua temperatura de evaporação na área focal do LASER. Devido à alta densidade de potência, forma-se um canal de vapor dentro da peça, e as paredes deste canal são compostas de líquido suspenso pela pressão do vapor. Neste modo de soldagem a densidade de energia chega além de 10^6 W/cm^2 , que gera o *keyhole*, ocasionando soldas com penetração profunda, alcançando temperaturas de até 20000 K dentro do orifício gerado [23, 44, 47]. Por causa dessa pressão, forma-se um orifício pelo qual é conduzido o feixe LASER. Este orifício é chamado de *keyhole*. Essa soldagem é a mais utilizada, sendo necessário que o feixe LASER incidente seja bem absorvido e emitido perpendicularmente à superfície do material, como mostra a Figura 2.16.

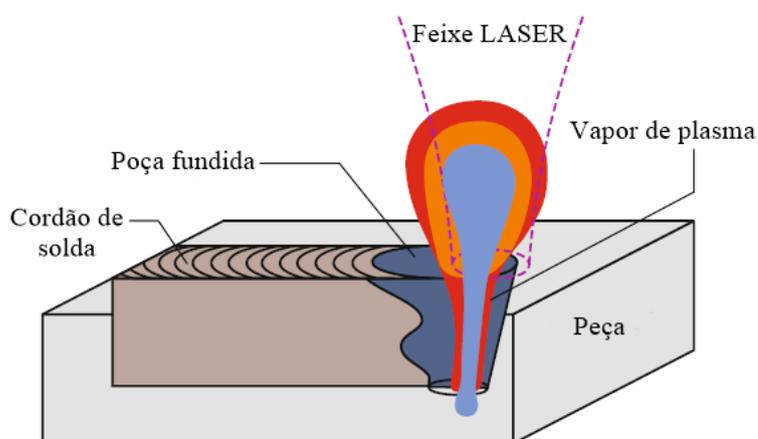


Figura 2.16 - Princípio da soldagem *keyhole* (Adaptado de [43]).

O canal de vapor, que fica rodeado por uma região de metal líquido, criado pelo feixe combinado com a pressão do plasma no *keyhole*, contribui para a estabilização e também para manter o ponto de solda aberto. Tal característica contribui para evitar o colapso do orifício, garantindo penetração profunda [48]. Por outro lado, o vapor que fica acima da superfície da peça forma o plasma, advindo da interação entre o feixe LASER e o metal vaporizado, que absorve parte da energia do LASER, podendo reduzir assim a penetração da solda no material sob algumas condições de processamento [49], pois a energia que seria entregue para o sólido, se perde para o metal vaporizado.

A alta temperatura interna do orifício faz com que essa técnica seja mais eficiente e tenha maior penetração do que a soldagem por condução. Contudo, a soldagem *keyhole* pode ser instável devido ao orifício fechar e abrir intermitentemente. Com a movimentação do feixe LASER ao longo da peça, o metal fundido preenche o espaço atrás do furo, solidificando-se [49].

2.3.3 Porosidades no cordão de solda LASER

No processo de soldagem a laser ocorrem imperfeições no cordão de solda, dentre as quais se destacam as porosidades.

A principal causa da porosidade na soldagem é devido à ocorrência de bolhas de gás dissolvido no próprio metal fundido, que ficam aprisionadas e não dispõem do tempo suficiente para novamente difundir para o metal antes de ocorrer a solidificação do metal líquido em torno

delas [50]. Durante a soldagem *keyhole* ocorrem dois tipos distintos de porosidade: porosidade metalúrgica e induzida, advinda do colapso do *keyhole*, como mostrado na Figura 2.17. A porosidade metalúrgica é o tipo mais costumeiro, que depende principalmente da reação e solubilidade do gás no metal líquido durante o processo de soldagem [50]. É frequente a formação de poros no cordão de solda na soldagem *keyhole*.

A quantidade, estrutura e tamanho dos poros prejudicam seriamente a resistência à fadiga, dentre outras propriedades mecânicas, em diferentes estados de tensão. A região dos poros se comporta como pontos de concentração de tensão, sendo locais de início de trincas, afetando de modo significativo a resistência mecânica dos materiais.

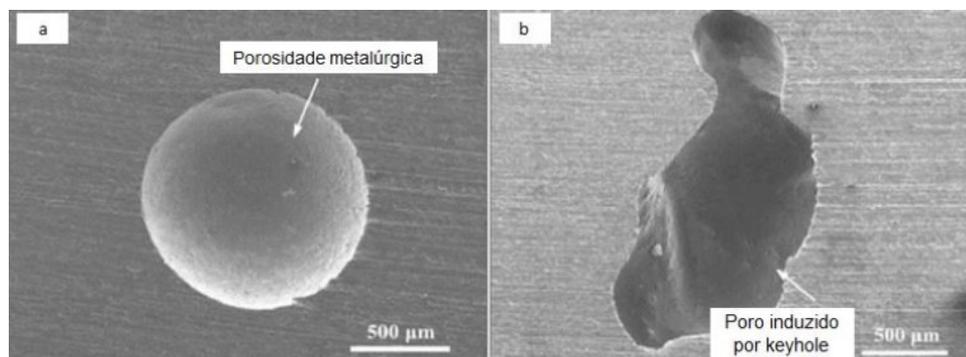


Figura 2.17 - Tipos de porosidade da soldagem *keyhole* (Adaptado de [51]).

Nos diferentes métodos de fusão existente, a porosidade é a descontinuidade mais frequente nas soldagens. A formação da porosidade pode ser fragmentado em três fases:

- Aumento de uma bolha de gás;
- Geração de um núcleo consistente;
- Fuga das bolhas de gás da poça fundida [52].

2.4 MICROSSOLDAGEM A LASER

O termo “microsoldagem” advém das dimensões diminutas dos cordões de soldagem. A microsoldagem a LASER é utilizada na manufatura devido às suas vantagens na soldagem de materiais especiais e com geometrias complexas [53]. Com o crescimento da demanda por dispositivos cada vez mais finos e complexos, torna-se indispensável um avanço efetivo nos

métodos de processamento. Portanto, o desenvolvimento de uma microssoldagem mais eficiente é parte integrante do sucesso futuro dessas operações.

2.4.1 Microssoldagem com feixe LASER oscilante “wobble”

Microssoldagem a LASER com oscilação do feixe, indica uma técnica na qual o feixe é desviado ciclicamente em relação à linha do eixo da direção de soldagem, podendo descrever diferentes tipos de padrões geométricos, enquanto que ao mesmo tempo, se move uniformemente ao longo do caminho da direção de soldagem.

Utilizando um cabeçote galvanométrico em conjunto com um LASER de fibra, é possível se obter padrões de solda complexos em alta velocidade a partir de uma única fonte LASER. A variação da potência para o processo de soldagem a LASER com movimentos de oscilação do feixe para a direção de alimentação vem ganhando cada vez mais destaque para materiais com difícil soldabilidade.

Observou-se em alguns trabalhos que a oscilação do feixe ajudou a minimizar descontinuidades metalúrgicas intrínsecos ao processo de soldagem. Sommer, Martin. *et al.*[54], com o uso de um LASER de diodo, observaram um aumento de 21% na eficiência de soldagem do alumínio em relação à soldagem convencional sem oscilação. Fetzer F. *et al.*[55], com o uso de um LASER de fibra: Yb, verificaram um decréscimo na incidência de porosidades na soldagem de alumínio, além de maior resistência a tração média e máxima microdureza na zona fundida.

Diversas pesquisas reportaram as vantagens da soldagem com feixe oscilante. Dentre essas vantagens algumas são:

- Melhora das características de soldagem de materiais metálicos dissimilares [56];
- Melhora da capacidade de soldar juntas com incompatibilidade de alinhamento e espaçamentos maiores [57, 58];
- Redução da porosidade na soldagem de materiais de difícil soldabilidade (por exemplo, Cu ultrapuro, Al) [59];
- Maior resistência mecânica da junta soldada devido a manipulação da geometria da solda e microestrutura proveniente [60, 61].

A técnica de oscilação do feixe sobre o deslocamento longitudinal tem influência direta no campo de temperatura que se desenvolve no componente durante a execução da soldagem. O mesmo cria uma poça de fusão maior e minimiza a formação de plasma [32]. Para oscilar o feixe em torno do eixo da direção de soldagem, em uma determinada amplitude e frequência selecionada é utilizado um cabeçote de varredura galvanométrica, numa estratégia de movimento conhecida como *wobble*.

A Figura 2.18 mostra o esquema básico da técnica *wobble*.

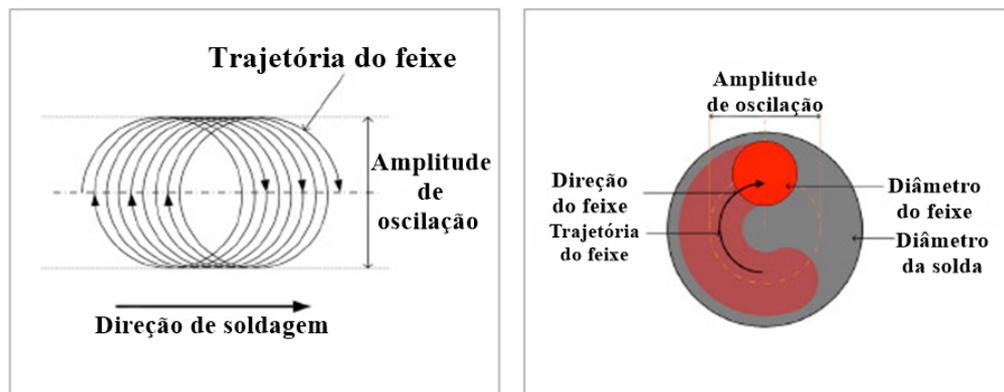


Figura 2.18 - Técnica de soldagem por oscilação (Adaptado de [62]).

A sobreposição da oscilação na direção de soldagem através do movimento relativo entre o feixe e a peça é resultado da modulação espacial do LASER [63]. A modulação espacial influencia a geometria do *keyhole* (interface gás-líquido), o gradiente de temperatura na poça de fusão e a geometria de toda a solda (interface líquido-sólido) [64].

Com o uso do cabeçote galvanométrico é possível obter uma gama de geometrias distintas de *wobble*, sendo que as principais são mostradas na Figura 2.19.

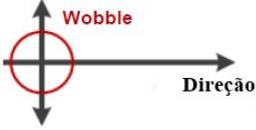
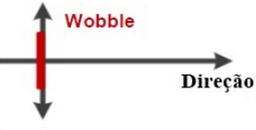
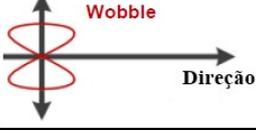
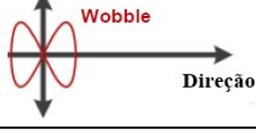
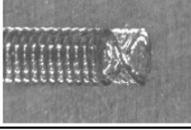
Modo <i>Wobble</i>	Esquemático	Cordão
Círculo (CW & CCW)		
Linear		
Oito		
Infinito		

Figura 2.19 – Principais geometrias de oscilações (Adaptado de [65]).

A oscilação *wobble* pode ser decomposta em vetores distintos, que é necessário diferenciá-los para entendimento do processo. O movimento *wobble* é descrito pela velocidade instantânea de deslocamento do feixe pela ação do *wobble* decorrente da oscilação. A velocidade de soldagem, é a velocidade de translação. A velocidade instantânea do feixe LASER sobre o componente se compõe da velocidade instantânea do *wobble* somada à velocidade de translação. As definições das velocidades serão melhor detalhadas nas próximas seções. A trajetória que o feixe LASER descreve durante o processo depende do movimento de oscilação, da frequência de oscilação, amplitude e da velocidade de translação.

A técnica *wobble* possibilita um melhor controle térmico da peça durante o processo, em consequência de o feixe varrer uma área lateral à linha central de soldagem diversas vezes. O gradiente de temperatura é menor, bem como as taxas de resfriamento do cordão central é mais lento se comparados com a soldagem a LASER sem o *wobble*. Com o *wobble*, o cordão de soldagem resultante apresenta uma minimização dos efeitos comuns de solda, como respingos [66]. Outra vantagem é a possibilidade de realizar cordões com largura muito maior do que o diâmetro do foco do LASER, com possibilidade de ajustar essa largura de cordão para cada tarefa ao longo do cordão de soldagem.

2.5 PARÂMETROS DE OPERAÇÃO

É de suma importância conhecer e controlar os parâmetros que envolvem o processo de soldagem, a fim de se obter uma solda dentro dos padrões aceitáveis de cada processo. Parâmetros controláveis tais como a velocidade de soldagem, potência do LASER, ponto focal do feixe, frequência e amplitude de oscilação devem ser variados para melhorar a qualidade da solda obtida. O comprimento de onda e qualidade do feixe são características da fonte LASER utilizada. Os parâmetros variáveis de entrada do LASER para o processo de microsoldagem com movimento *wobble* sobreposto ao feixe LASER, as características invariáveis e os parâmetros de saída são sintetizados na Figura 2.20.

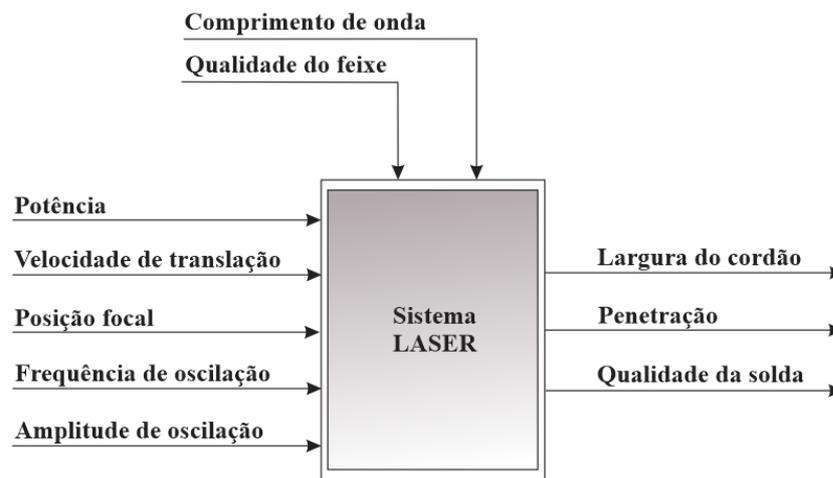


Figura 2.20 - Variáveis de entrada do processo para microsoldagem com *wobble*, características do feixe e parâmetros de saída [Autor].

Potência LASER: A potência do LASER é uma particularidade da fonte empregada. Ela pode ser variada entre um valor mínimo e um valor máximo. A penetração da solda tem relação direta com a densidade de potência do LASER, sendo função da potência e do diâmetro do feixe. É visto que, para um diâmetro de feixe constante, a penetração aumenta conforme a potência cresce [62].

Posição focal: Distância entre o ponto focal e a superfície da amostra. Valores negativos deste parâmetro indicam que o posicionamento do ponto focal está abaixo da superfície da amostra e valores positivos acima [67].

Velocidade de translação: Velocidade resultante em movimento retilíneo na mesma direção e sentido da direção de soldagem.

Frequência e amplitude de oscilação: Parâmetros que permitem controlar a profundidade e largura do cordão de solda durante o processo. Devido a essas características de oscilação, é possível obter um gerenciamento da temperatura da peça e, em consequência, reduzir discontinuidades, como porosidades, uma vez que o feixe passa pelos vários pontos da solda diversas vezes [65]. Ambos parâmetros possuem componentes em x e y .

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido nos laboratórios: Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP-LASER), divisão (LMP-LASER), Laboratório de Materiais (LABMAT) e Laboratório de Conformação Mecânica (LABCONF) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Os procedimentos experimentais estão divididos basicamente em três etapas:

- Etapa 1: Desenvolvimento do gabarito de fixação das amostras e ensaios preliminares de microssoldagem a LASER, sem oscilação do feixe, empregando diferentes parâmetros de processamento.
- Etapa 2: Análises metalográfica dos cordões de solda obtidos na etapa 1 e seleção dos parâmetros iniciais a serem utilizados na etapa 3.
- Etapa 3: Realização da modelagem, para o cálculo da velocidade instantânea do feixe, execução da microssoldagem a LASER, com a utilização da técnica *wobble*, empregando duas geometrias de oscilação, e análises dos resultados.

A Figura 3.1 apresenta um fluxograma que resume de forma simplificada todos os passos executados.

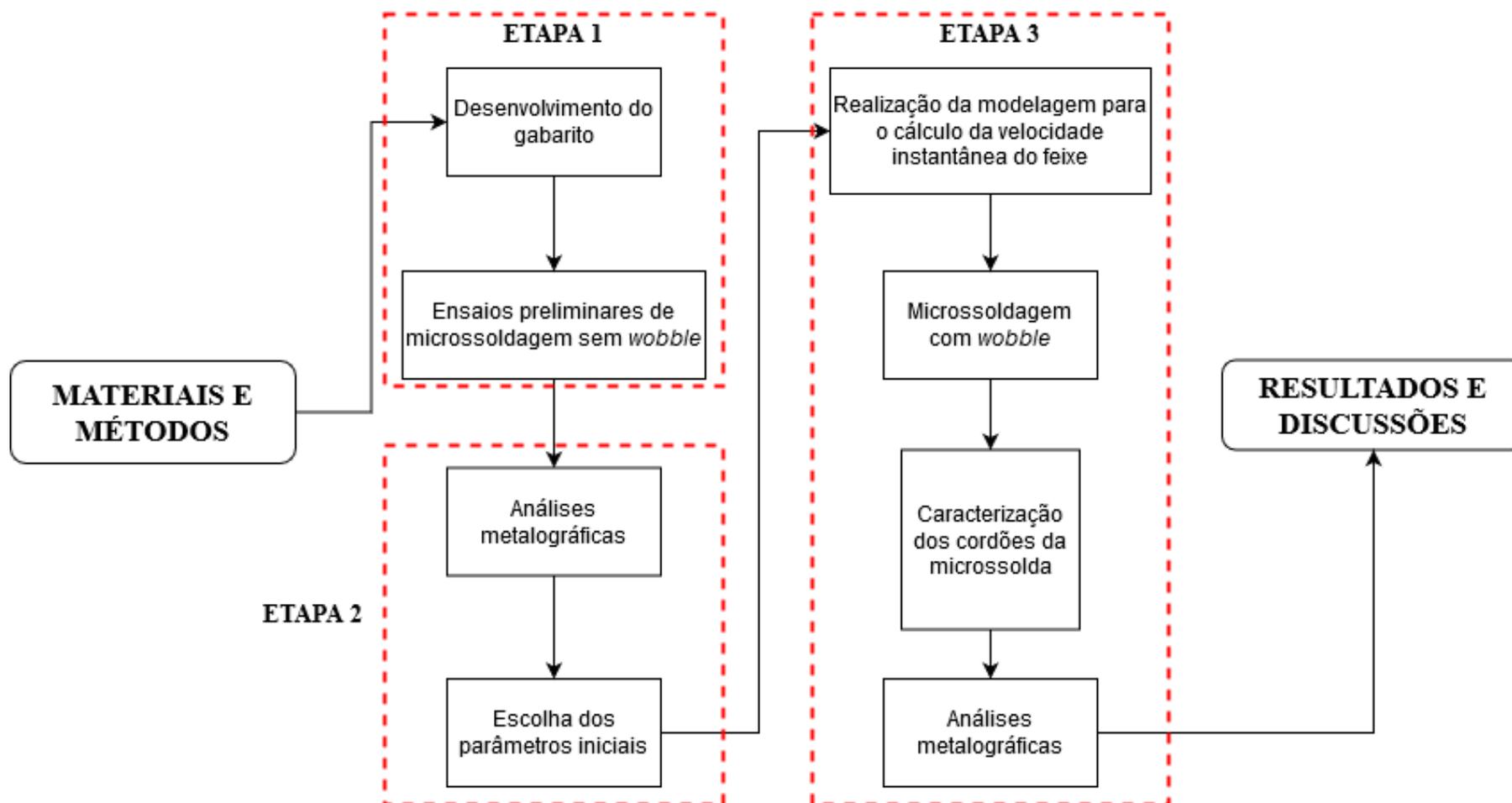


Figura 3.1 - Fluxograma da sequência de trabalho [Autor].

3.1 Caracterização do substrato

O material utilizado nos ensaios de microssoldagem foi o aço inoxidável AISI 316L com 1,2 mm de espessura. A escolha deste material e a espessura da chapa deve-se ao fato do mesmo ser utilizado em larga escala na indústria devido à sua propriedade anticorrosiva, bem como sua disponibilidade no laboratório.

Sua composição química está listada na Tabela 3.1 e as propriedades físicas e mecânicas na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Composição química do aço AISI 316L [68].

Composição química do substrato AISI 316L (%)							
C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo
0,03	2	1	16 - 18	10 - 14	0,045	0,03	2 - 3

Tabela 3.2 - Propriedades físicas do aço AISI 316L [68].

Propriedades físicas do substrato AISI 316L				
Modulo de elasticidade (Gpa)	Densidade (g/cm³)	Condutividade térmica (W/M.K)	Calor específico (J/Kg.K)	Intervalo de fusão (°C)
193	8	16,2	500	1405 - 1445

Foi utilizado um formato padrão de substrato: chapas retangulares (89,0 mm x 35,0 mm), para posterior realização das sequências de microssoldagem. As amostras foram limpas em álcool etílico para garantir a retirada de possíveis impurezas antes da realização dos cordões.

3.2 Sistema LASER

Um sistema de laser desenvolvido no escopo do trabalho de doutorado de Silveira, C. A. [69], composto por LASER IPG YLR 400 CW fabricado pela empresa IPG Photonics® foi usado em todos os experimentos, juntamente com a bancada de processamento mostrada na Figura 3.2. Trata-se de um LASER de fibra (Yb-itérbio) com potência nominal de 400 W

habilitado para operação em emissão contínua (CW). A Tabela 3.3 mostra as características do LASER utilizado.



Figura 3.2 - Sistema LASER a) gabinete elétrico b) equipamento com enclausuramento e monitor [Autor].

Tabela 3.3 - Características do LASER [65].

Características ópticas				
Fonte	Modo de operação	Potência de saída nominal (W)	Comprimento de onda (nm)	Localização do foco
IPG YLR-400-AC-Y14	CW/Modulado	400	1070	Superfície

A distribuição de intensidade e perfil do feixe LASER pode ser visto na Figura 3.3. Estes valores foram mensurados e disponibilizados no catálogo do equipamento pela fabricante. As características do feixe são apresentadas na Tabela 3.4.

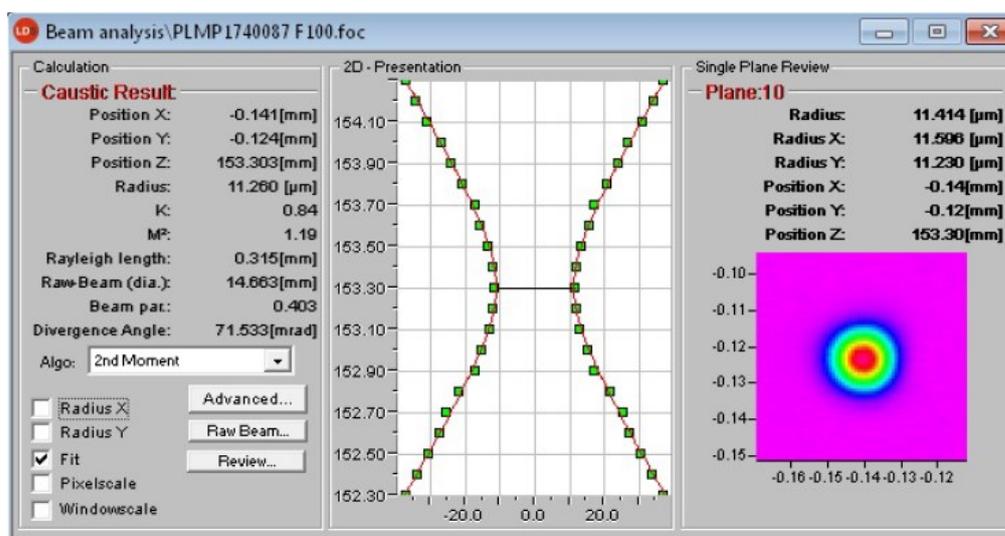


Figura 3.3 - Distribuição de intensidade e perfil de feixe [65].

Tabela 3.4 - Características do feixe LASER [65].

Características do feixe					
Diâmetro da fibra (mm)	K	M ²	BPP (mm*mrad)	Ângulo de divergência (mrad)	Raio do feixe (mm)
50	0,833333	1,2	2,5	0,23	3,441

Um cabeçote com *scanner* galvanométrico AGV-14HPO, da empresa AEROTECH® possibilita a oscilação do feixe LASER em duas coordenadas. Este componente é equipado com uma lente F-Theta com comprimento focal de 170 mm, campo de alcance de 110 x 110 mm, desenhada para trabalhar com um comprimento de onda (λ) entre 1030 a 1080 nm. O cabeçote galvanométrico está montado sobre um eixo de deslocamento vertical, também da AEROTECH®.

A dimensão da área de foco, informado pela fabricante JENOPTIK® [70], é determinado através da Equação (12).

$$\sigma = 1,83 \frac{\lambda f}{\emptyset} \quad (12)$$

onde:

σ : tamanho do foco;
 λ : comprimento de onda;
 f : comprimento focal;
 \emptyset : diâmetro focal de entrada.

Na Figura 3.4 é apresentado o cabeçote galvanométrico.

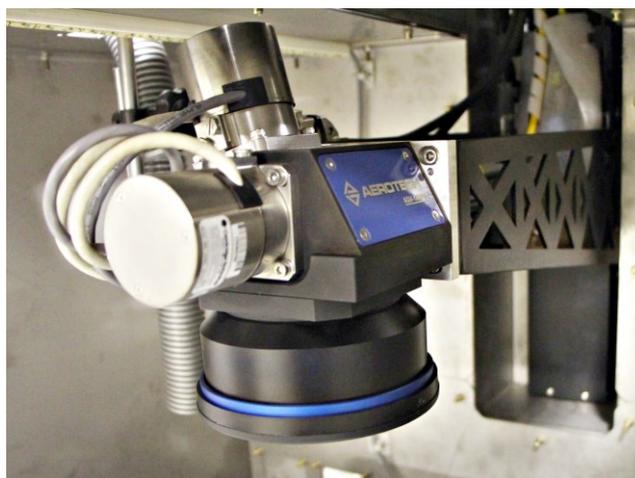


Figura 3.4 - Cabeçote galvanométrico de varredura e lente F-theta montada [Autor].

O módulo de movimentação com motor linear ECO165LM da empresa AEROTECH® é comandado numericamente por computador e permite a movimentação nas direções x e y . O eixo z é utilizado apenas para o posicionamento do foco sobre a amostra a ser trabalhada. Na Figura 3.5 é mostrado o módulo de movimentação das amostras.



Figura 3.5 - Mesa de movimentação linear de duas coordenadas com motor linear comandada numericamente [Autor].

A Figura 3.6 mostra o *setup* de trabalho usado para realizar as microssoldas. A mesa de movimentação percorre as direções x e y na velocidade linear de soldagem e o cabeçote galvanométrico executa o movimento *wobble* do feixe sobre a superfície.

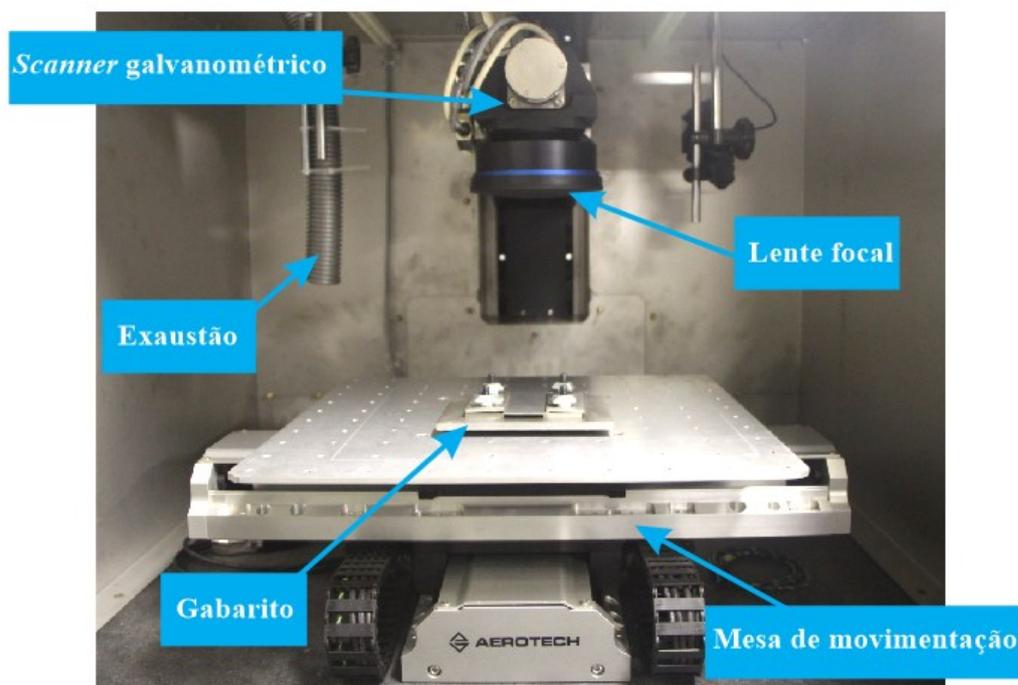


Figura 3.6 – Gabarito e amostra montados sobre a mesa na bancada de ensaios [Autor].

A trajetória e o tipo de geometria da solda são predefinidos por um programa em código G, que pode ser modificado usando o software Aerotech A3200, instalado no computador de controle visto na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Bancada experimental, destacando a unidade de processamento LASER, o computador e o conjunto eletrônico do sistema de comando [Autor].

3.3 Sistema de fixação

A fim de garantir um posicionamento adequado, com repetibilidade e, precisão e intercambialidade dos corpos de prova em todos os experimentos, foi projetado e fabricado um gabarito que atendesse as necessidades. Este sistema permite manter o corpo de prova restrito, evitando que ocorressem quaisquer movimentos, bem como o empenamento das amostras durante o processo de microsoldagem. A placa base, fabricada em aço de construção mecânica, foi dotada de 8 orifícios com roscas para fixar 4 estojos e possibilitar uma montagem de acordo com a largura da amostra a ser soldada. Para a fixação das amostras foram utilizadas 4 chapas com furações nos mesmos afastamentos da placa base. Duas destas chapas são colocadas sobre a placa base, mantendo um afastamento entre elas pouco inferior que a largura da amostra. A amostra é colocada sobre estas duas chapas e as outras duas chapas são apertadas pelas porcas contra as amostras para restringir seus movimentos durante o processo.

A Figura 3.8 mostra o gabarito usado nos ensaios.

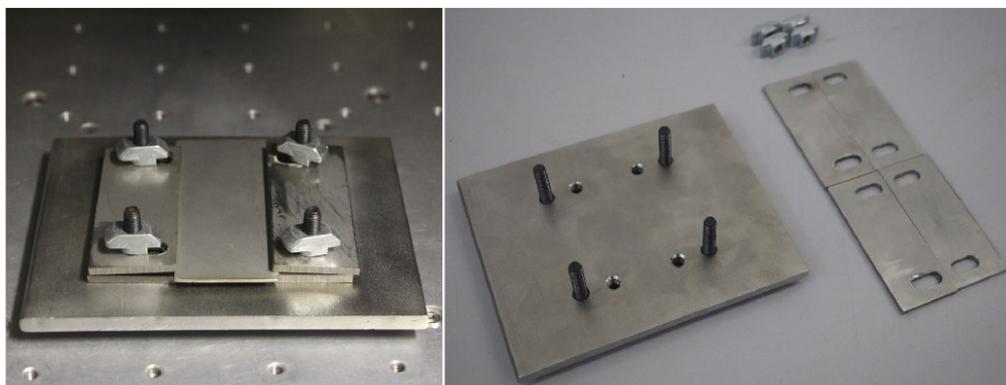


Figura 3.8 - Gabarito com uma amostra montada para os ensaios experimentais e componentes do sistema de fixação [Autor].

3.4 Metodologia

3.4.1 Visão geral dos ensaios de microssoldagem

O objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicabilidade da passagem de um feixe LASER com ou sem *wobble* sobre a superfície do aço inoxidável AISI 316L na soldagem de topo de chapas finas. Os ensaios foram realizados a partir da interação do feixe LASER com uma chapa fina apenas formando um cordão sobre a chapa sem adição de material (processo autógeno).

Para realizar a análise do efeito dos principais parâmetros variáveis de entrada do LASER nas características da região termicamente afetada nas amostras e na estabilidade do processo, bem como determinar uma janela de parâmetros para obter boa penetração e baixa inserção de descontinuidades, foi realizado um conjunto de ensaios. Os ensaios foram divididos em etapas, como apresentado na Figura 3.1. Baseado em ensaios preliminares sem *wobble*, na etapa 1 foram identificados a influência da potência do feixe e velocidade de deslocamento do feixe na penetração e aspecto do cordão. Na segunda etapa são avaliados os cordões obtidos, e os melhores parâmetros variáveis de entrada desta etapa permitiram selecionar os parâmetros de entrada para os ensaios na etapa 3. Na etapa 3, foram variados a amplitude, frequência e geometria de oscilação do feixe. Foram analisadas duas trajetórias de movimentação distintas de oscilação, sendo elas: circular e semelhante ao símbolo matemático “infinito”. A Figura 3.9

ilustra o processo de aquecimento a LASER com movimento oscilante em uma trajetória circular e infinito sobreposto ao movimento linear.

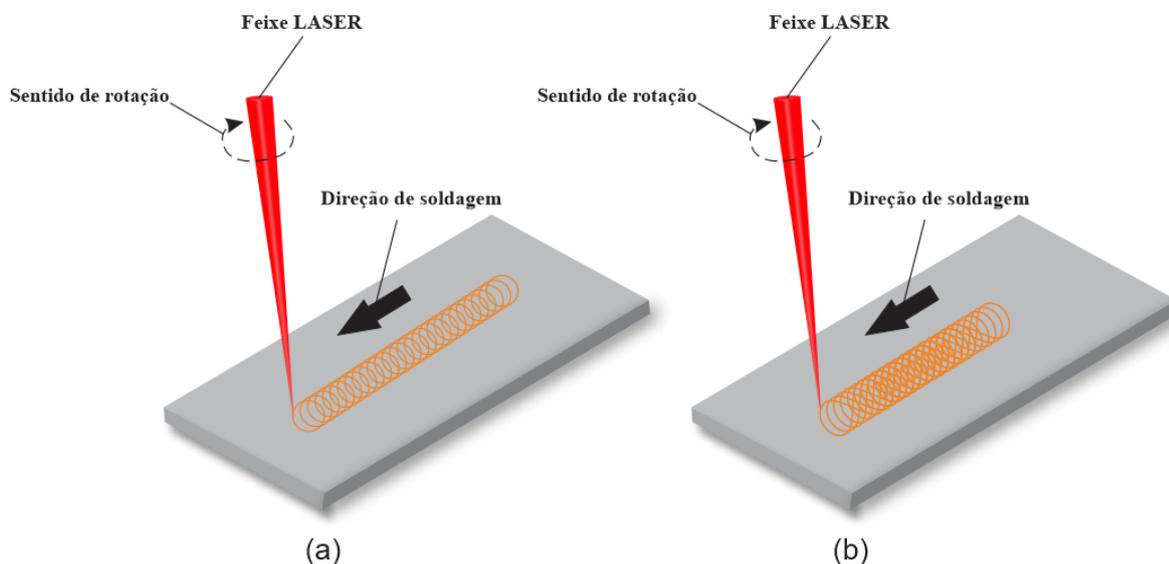


Figura 3.9 - Esquemático da passagem do feixe com oscilação sobreposto ao movimento linear: a) *wobble* circular b) *wobble* infinito [Autor].

As duas geometrias de oscilação, foram escolhidas pois através da revisão bibliográfica, foi observado maior número de trabalhos as utilizando, possibilitando maiores experimentos comparativos, bem como observado lacunas de pesquisas a serem melhor exploradas, como por exemplo, a influência da velocidade instantânea do feixe na zona afetada pelo calor durante a trajetória.

A metodologia é baseada na realização de ensaios controlados e planejados, partindo do levantamento e estabelecimento de parâmetros admissíveis, que gerem como resultado uma qualidade da região termicamente afetada (sem descontinuidades) e com penetração total, aplicável para a soldagem de chapas finas.

Uma característica importante a se investigar é a ocorrência e, caso ocorra, a estabilidade do *keyhole*. Baseados nas informações da revisão bibliográfica, no capítulo 2, que a formação e estabilização são os fatores essenciais para estabilização do processo. Para alcançar a formação e estabilização do *keyhole* é necessária a otimização das variáveis de entrada. Portanto, há necessidade de uma extensa bateria de ensaios e avaliações para averiguar a influência dos parâmetros de entrada, o que será realizada nas etapas preliminares.

Deu-se início no trabalho a partir do desenvolvimento de planejamento DOE, neste caso, adaptado para os objetivos do presente trabalho, que seguiu os seguintes passos:

- Caracterização dos problemas e objetivos do estudo;
- Escolha dos fatores de influência e níveis;
- Seleção da variável de resposta;
- Determinação de um modelo de planejamento de experimento;
- Condução do experimento;
- Análise dos dados;
- Conclusões e recomendações.

A partir da definição dos problemas e objetivos, é possível prosseguir, para o segundo passo, e escolher os parâmetros que conceitualmente provocam maiores efeitos na soldagem, sendo eles, a potência do LASER (W), velocidade de soldagem (mm/s) e a posição do ponto focal, que no presente trabalho foi mantida fixa na superfície da amostra. Optou-se pelo planejamento fatorial para se estabelecer os procedimentos experimentais a serem utilizados nos ensaios de soldagem. A análise dos dados possibilitou avaliar os parâmetros e interações significantes no processo referentes à qualidade da solda.

Desta forma, os parâmetros de soldagem, sendo eles potência, velocidade de soldagem e posição focal, foram dispostos em uma matriz de três fatores. A Tabela 3.5 apresenta estes dados. Foi conduzido um estudo preliminar para avaliar a influência da potência e da velocidade de soldagem na penetração e qualidade da solda, a fim de se obter os parâmetros iniciais para os ensaios com oscilação do feixe.

Tabela 3.5 - Fatores analisados nos ensaios preliminares [Autor].

Fatores	Níveis
Potência do LASER (W)	4
Velocidade de soldagem (mm/s)	12

3.4.2 Ensaios preliminares – Etapa 1

Na etapa 1 foi conduzido um estudo para adequar os parâmetros de potência e velocidade de deslocamento linear do feixe LASER sobre a superfície da amostra (sem *wobble*) que resultassem nos melhores aspectos de cordões. Foram analisadas penetração e ausência de descontinuidades (porosidades, falta de penetração, mordedura, trincas). Os parâmetros, com os quais se obtiveram os melhores resultados na etapa 1, foram selecionados para serem os parâmetros de entrada na etapa 2. O intuito foi encontrar uma combinação da velocidade de deslocamento linear e potência do LASER para ser utilizada posteriormente nos ensaios com *wobble*. O intervalo de parâmetros ensaiados é mostrado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Janela de parâmetros testados [Autor].

Parâmetros testados	
Número de ensaios	48
Potência (W)	100 - 400
Velocidade de soldagem (mm/s)	12,5 - 1050

Nos ensaios preliminares, sem a oscilação do feixe, foi variada apenas a velocidade de deslocamento do feixe LASER sobre a superfície da amostra e a potência do feixe LASER. A posição do foco foi mantida constante na superfície da amostra. Os valores de velocidade utilizados nos ensaios preliminares são mostrados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Potência e velocidade de deslocamento linear do feixe LASER sobre a amostra na etapa 1 [Autor].

Potência (W)	Velocidade de soldagem mínima (mm/s)	Velocidade de soldagem máxima (mm/s)	Incremento de velocidade de soldagem (mm/s)
100	12,5	150	12,5
200	12,5	150	12,5
300	25	300	25
400	50	1150	100

A escolha dos valores da potência e da velocidade de deslocamento linear do feixe LASER para estes ensaios derivou da análise dos respectivos parâmetros observados na literatura. Foi selecionado um intervalo amplo para a velocidade de soldagem, variando de 12,5 mm/s a 1050 mm/s. A fim de abranger uma janela maior de ensaios de velocidades. Para cada potência, foram selecionadas faixas de velocidades adequadas, somando 12 velocidades para cada potência selecionada. Os demais valores de velocidade utilizados nos ensaios estão dispostos em uma tabela apresentada no APÊNDICE A.

3.4.3 Análise das regiões termicamente afetadas nos ensaios da Etapa 2

Na execução da Etapa 2 do planejamento experimental, a escolha dos parâmetros mais adequados seguiu o fluxograma representado na Figura 3.10.

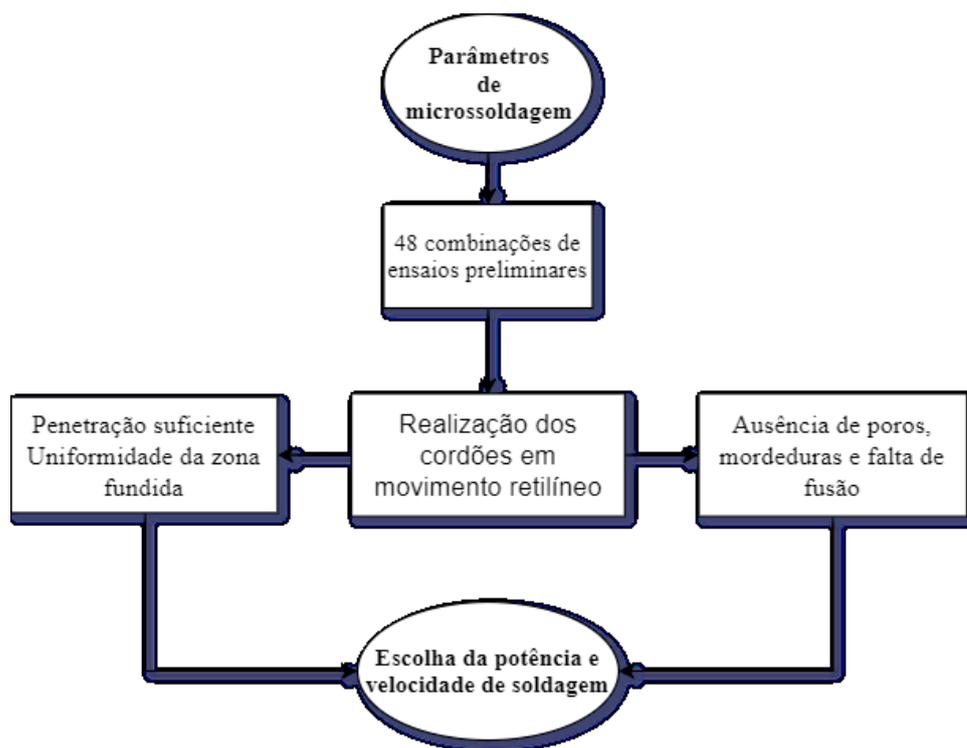


Figura 3.10 - Escolha dos parâmetros para os ensaios com deslocamento linear do feixe e *wobble* sobreposto [Autor].

Após a análise visual das superfícies dos cordões resultantes da etapa 1, os cordões considerados adequados foram seccionados transversalmente por serra fita do tipo vertical (serra ERGOP, disponível no LABCONF). Em seguida, as amostras foram embutidas em baquelite e preparadas para análise metalográfica: lixamento (lixa 80,120,220,400,600,1200 e 1400 *Mesh*) e, em sequência, polimento com alumina 0,3 μm até atingir a qualidade de superfície adequada. Na sequência, foi realizado ataque químico por imersão em solução Marble durante 10 s. A análise das amostras foi feita utilizando o microscópio ótico LEICA EC3 OLYMPUS BX60M disponível no LABCONF. A partir destas análises, empregando o software *Image J*, foi possível mensurar as regiões termicamente afetadas, extraindo dados como profundidade de penetração e largura de cada região. As imagens permitiram verificar a presença de descontinuidades, como trincas, mordeduras, porosidades e falta de fusão, por exemplo.

3.4.4 Influência do movimento *wobble* sobre as características da região termicamente afetada na amostra pela passagem do feixe LASER

Os ensaios da Etapa 1 definiram a potência de 300W e velocidade de soldagem de 50 mm/s. Estes parâmetros de entrada, definiram condições de entrada para os ensaios com movimento *wobble* do feixe LASER sobreposto ao movimento linear. Nessa etapa, foram acrescentados os parâmetros: frequência de oscilação, amplitude de oscilação e a trajetória geométrica de oscilação, que para o presente trabalho, foram duas: circular (\odot) e infinito (∞). A Tabela 3.8 apresenta os parâmetros utilizados nos ensaios de deslocamento linear do feixe LASER com movimento *wobble* sobreposto.

Tabela 3.8 - Parâmetros de deslocamento do feixe LASER com movimento *wobble* sobreposto [Autor].

Parâmetros			
Potência do feixe LASER (W)	300		
Velocidade de translação (mm/s)	50		
Frequência de oscilação (Hz)	200	300	400
Amplitude de oscilação (mm)	0,5	1	2
Geometria de oscilação	circular e infinito		

Foram aplicadas as três parametrizações apresentadas na Tabela 3.8, de modo a combinar todos os parâmetros. Com isso, foram geradas 9 combinações para cada geometria *wobble*, sendo realizado 4 réplicas. Nesta etapa de ensaio, o ponto focal foi mantido fixo na superfície da amostra e não houve adição de material (processo autógeno sem adição de material). A sequência de ensaios é apresentada pela Figura 3.11.

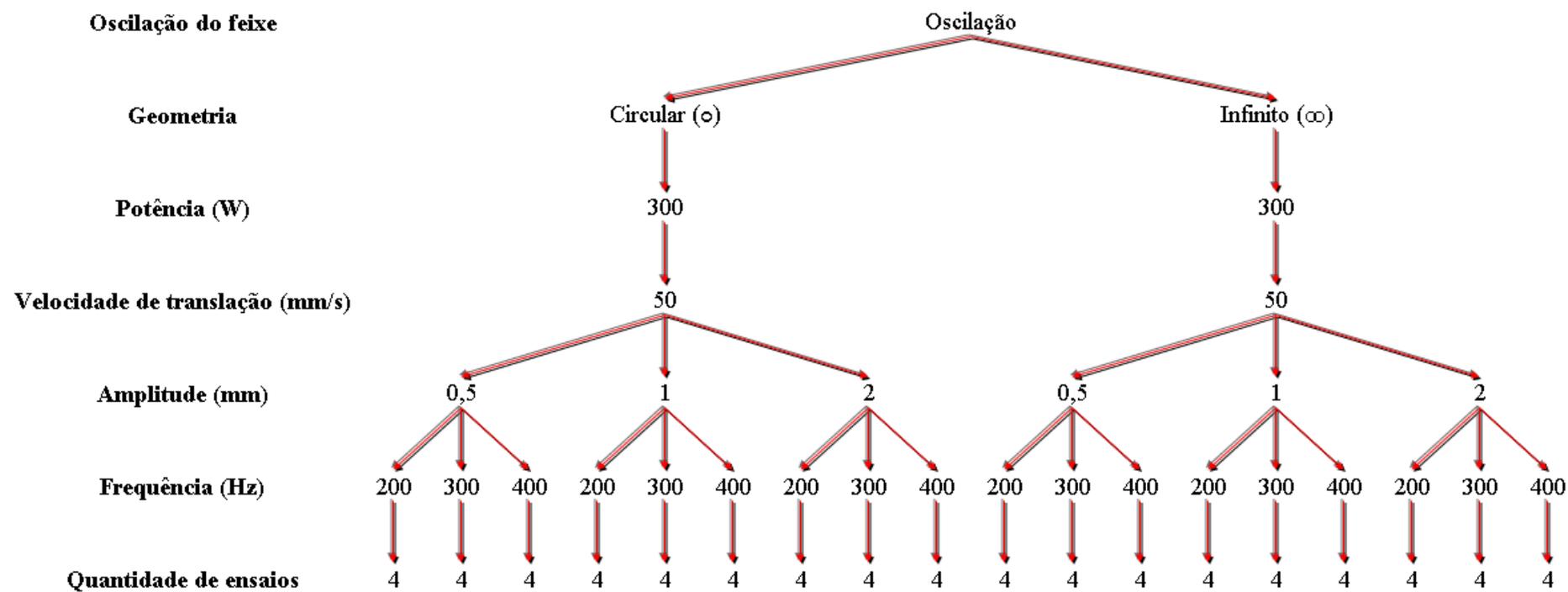


Figura 3.11 - Sequência dos ensaios de deslocamento do feixe LASER com *wobble* [Autor].

3.4.4.1 Análises metalográfica dos cordões obtidos por oscilação “wobble”

Foi realizada uma inspeção visual para identificar descontinuidades superficiais e profundas, bem como a largura e penetração da solda. A parte central dos cordões gerados foi selecionada como área para visualização dos mesmos no microscópio. Uma linha a 5 mm da extremidade do corpo de prova foi definida como secção transversal dos cordões para preparação metalográfica. O esquemático do corte dos corpos de prova utilizados nos ensaios pode ser observado na Figura 3.12.

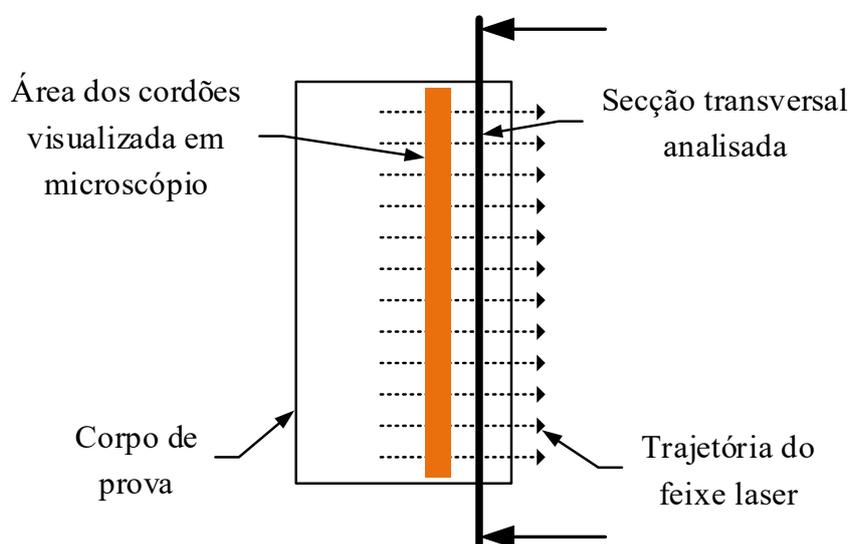


Figura 3.12 - Esquemático das regiões varridas pelo feixe LASER sobre a amostra bem como regiões observadas e do corte dos corpos de prova [Autor].

Todos os corpos de prova cortados foram embutidos em baquelite, polidos e atacados quimicamente com solução *marble* para revelação da ZAC. Foi realizada a análise metalográfica das microssoldas em um microscópio óptico, da mesma forma descrita na Etapa 2. Essa análise permitiu identificar as microssoldas e toda extensão das diferentes zonas presentes, e verificar a presença de descontinuidades.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas seções seguintes, serão descritos de modo detalhado os resultados obtidos nos ensaios realizados nas três etapas do trabalho. Os efeitos serão discutidos através de tabelas, macrografias da seção transversal dos cordões, e de gráficos que identificam a influência dos principais parâmetros nas características dos cordões obtidos.

Inicialmente foi realizada uma modelagem para determinar os valores da velocidade instantânea do feixe LASER, em ambas as geometrias, que a partir desta seção, serão referenciados com o termo: padrões oscilatórios. O algoritmo também possibilitou realizar um mapeamento, para localizar os pontos específicos das velocidades ao longo da trajetória do feixe, a fim de compreender a influência, ou não, da variação da velocidade na geometria dos cordões obtidos.

4.1 Determinação da velocidade instantânea do feixe laser oscilante

Para melhor entendimento a respeito dos termos de velocidades utilizados a partir desta seção, será realizado um breve resumo nos tópicos a seguir:

- Velocidade de deslocamento do feixe: velocidade de translação linear;
- Velocidade de oscilação: são os vetores de velocidade em x e y decorrentes da trajetória descrita pelo *wobble* (movimento oscilatório dos espelhos galvanométricos);
- Velocidade instantânea: é a soma vetorial das componentes de velocidade do movimento *wobble* e da velocidade de translação do feixe LASER ao longo da geometria percorrida.

Para o deslocamento do feixe LASER com movimento *wobble*, a velocidade instantânea do feixe é a soma vetorial da velocidade de deslocamento linear e da velocidade descrita sobre o movimento de oscilação *wobble*. O equipamento determina estes valores internamente com base nos parâmetros de velocidade de translação, frequência de oscilação e amplitude de oscilação selecionados. A fim de conhecer a grandeza da velocidade resultante em cada instante, e entender sua influência sobre as características geométricas das regiões

termicamente afetadas, foram desenvolvidas equações matemáticas que descrevem o comportamento do vetor velocidade resultante do feixe LASER para ambos os padrões do movimento *wobble*.

Uma das características do movimento circular uniforme é que, se a velocidade angular de um disco for constante, a velocidade linear em qualquer ponto sobre este disco também será constante em função da distância do ponto ao centro de giro do disco e da frequência de rotação [71].

No caso em que o raio de curvatura da trajetória R de um movimento *wobble* é constante, com o centro da curvatura permanecendo fixo, a trajetória é uma circunferência, logo o movimento é circular [71]. O vetor velocidade de um objeto cuja trajetória descreve um movimento circular uniforme tangencia-se à trajetória [71]. O vetor pode ser decomposto em vetores nas direções de interesse, no caso x e y , provenientes de movimentos oscilatórios dos espelhos galvanométricos.

A Figura 4.1 ilustra um feixe em movimento circular

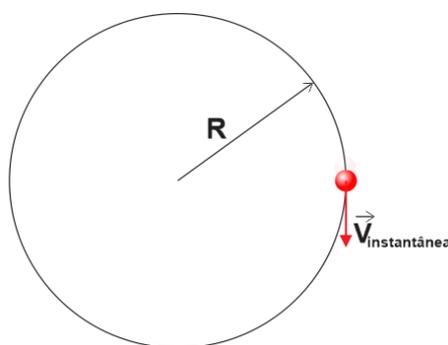


Figura 4.1 - Representação esquemática de um ponto descrevendo um movimento circular uniforme [Autor].

Na soldagem a LASER, a morfologia da solda depende da interação entre o feixe e a poça de fusão. Com a oscilação, a distribuição da energia do LASER e o fluxo de ar sobre a poça são alterados pelo feixe oscilante. Neste sentido, é necessário entender a formação da morfologia das soldas.

Devido à falta de acesso as informações internas de programação sobre o funcionamento do equipamento LASER utilizado, foi necessário realizar algumas considerações para dar

partida ao processo de equacionamento a fim de determinar a velocidade instantânea do feixe LASER. Foi considerado que os espelhos galvanométricos internos ao *scanner* tem seu funcionamento com base em oscilações senoidais.

Movimentos periódicos podem ser descritos utilizando funções trigonométricas tais como seno e cosseno [72], e dependem da amplitude e frequência, e podem ser utilizados para descrever as componentes da velocidade de um ponto no espaço em função do tempo.

A modelagem se iniciou a partir dos valores das relações geométricas das oscilações escolhidas, através dos seguintes parâmetros de entrada: amplitude de oscilação, frequência de oscilação e velocidade de translação. As equações que descrevem a velocidade em cada posição é a soma vetorial dos componentes da velocidade circular do feixe e de translação do feixe sobre o substrato. A posição de um ponto que oscila no eixo x e y , para formar um padrão geométrico, é representado pela Equação (13) e Equação (14), respectivamente.

$$S_x = A_x \cdot \text{sen}(w_x \cdot t) + vt_x \cdot t \quad (13)$$

$$S_y = A_y \cdot \text{cos}(w_y \cdot t) \quad (14)$$

onde:

x, y : subscritos que indicam as direções x e y de movimentação;

S : posição do ponto LASER em função do tempo;

A : amplitude de oscilação em mm;

w : velocidade angular do movimento em rad/s;

t : tempo em s;

vt_x : velocidade de translação do feixe.

O vetor posição S , que descreve o padrão geométrico em um dado espaço, é composto pelas componentes x e y (S_x e S_y). Cada componente é formada pelo somatório do movimento oscilatório e linear, ambas em função do tempo. Para complementar o entendimento, a representação do vetor posição que descreve o padrão geométrico circular, relacionado com o movimento oscilatório, pode ser observada na animação apresentada no link representado pelo código mostrado na Figura 2.1.

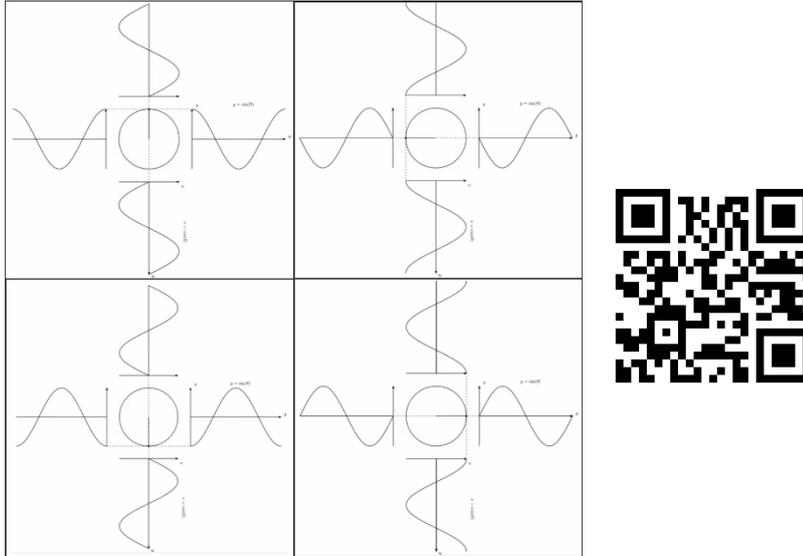


Figura 4.2 - Geração do movimento circular [Autor].

Com as equações da posição determinadas, foram realizadas suas derivadas em relação ao tempo $\frac{ds}{dt}$, após a soma vetorial, para se encontrar as componentes x e y da velocidade instantânea do feixe sobre a peça. Foram descritas vetorialmente e apresentadas na Tabela 4.1. O módulo da velocidade instantânea foi calculado a partir das componentes x e y derivadas do movimento oscilatório, sendo representado pela Equação (15).

Tabela 4.1 - Vetores velocidade do movimento circular [Autor].

$\overline{vc}_x(t) = \vec{i} \cdot (A \cos(\omega_x \cdot t) \cdot \omega_x + \overline{vt}_x(t))$	$\overline{vc}_y(t) = \vec{j} \cdot (-A \sin(\omega_y \cdot t) \cdot \omega_y)$
---	---

$$|\vec{V}_c(t)| = \sqrt{(A \cdot \cos(\omega_x \cdot t) \cdot \omega_x + vt_x(t))^2 + (-A \cdot \sin(\omega_y \cdot t) \cdot \omega_y)^2} \quad (15)$$

onde:

$\overline{vc}_x(t)$: vetor da velocidade em x em função do tempo;

$\overline{vc}_y(t)$: vetor da velocidade em y em função do tempo;

$\vec{V}_c(t)$: velocidade instantânea do movimento circular em relação ao tempo.

Com a modelagem da equação da velocidade do feixe em oscilação circular, foi criado um vetor dt com “ n ” pontos discretizados em espaços de um período (T) dividido por n , ou

seja, cada dt tem (T/n) referente a um número de ciclos de oscilação. Com isso foi possível realizar os cálculos de posição e velocidade do feixe LASER de cada ponto discretizado, ou seja, determinar os valores da velocidade do feixe de cada ponto durante a trajetória, bem como mapear suas localizações espaciais na geometria. Foi desenvolvido um algoritmo de programação em linguagem Python, apresentado em APÊNDICE B, para efetuar estes cálculos e fornecer os valores e localizações da velocidade do feixe.

Para tomar como exemplo, foi representado somente uma combinação de parâmetros. Foi plotado a posição dos pontos ao longo do tempo, associando as coordenadas do espaço com a velocidade instantânea em cada instante (ponto), com cores distintas para cada valor de velocidade ao longo da geometria. A Figura 4.3 mostra os valores da velocidade instantânea em um mapa de cores para a geometria em oscilação circular em 4 ciclos completos para valor de amplitude de oscilação de 0,5 mm e frequência de oscilação de 200 Hz e uma velocidade de translação de 50 mm/s.

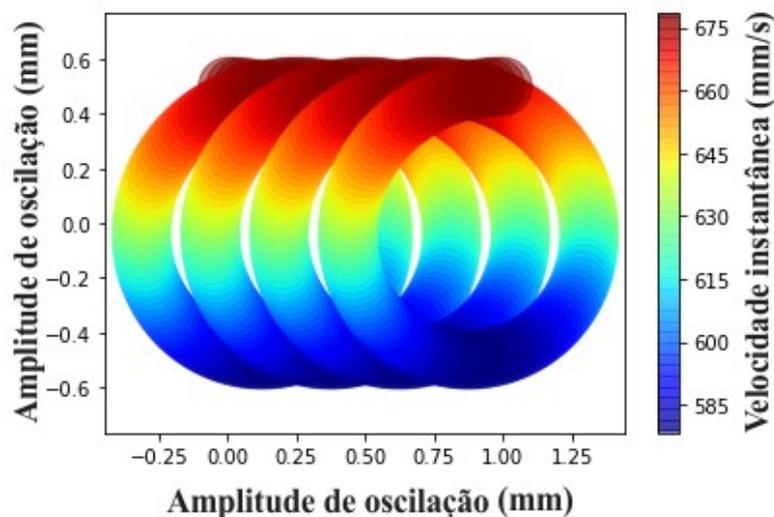


Figura 4.3 – Velocidades instantâneas do feixe ao longo da geometria circular para uma velocidade de translação de 50 mm/s, uma amplitude de $a=0,5$ mm e um frequência de oscilação $f=200$ Hz [Autor].

A velocidade do feixe oscila entre um valor mínimo de 578 mm/s e máximo de 678 mm/s, como pode ser visto no gráfico da Figura 4.4.

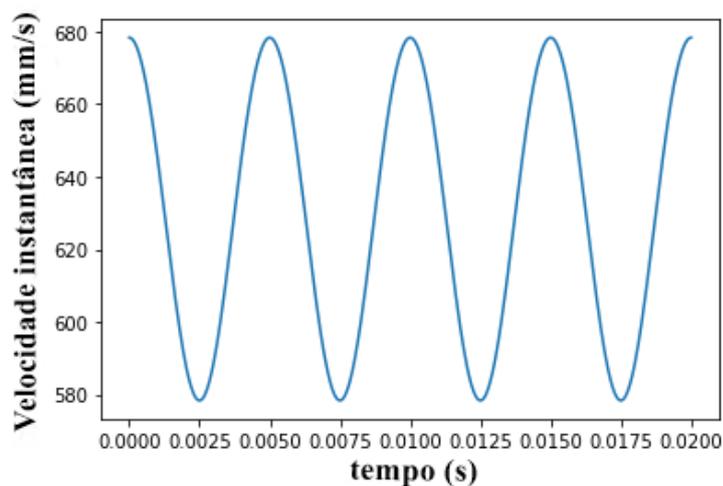


Figura 4.4 - Gráfico da velocidade do movimento circular com a velocidade de translação somada ao movimento [Autor].

É possível observar a variação da velocidade do feixe LASER durante a trajetória circular. Isso ocorre devido a influência do vetor da velocidade de translação \vec{vt}_x presente no movimento. Um ponto interessante observado, é que se a componente de translação \vec{vt}_x for retirada do movimento, a oscilação se torna um movimento circular uniforme (MCU), cujo conceito físico é: o vetor velocidade de uma partícula que executa movimento circular uniforme tangencia-se à trajetória e possui módulo (valor numérico) constante [71]. É possível verificar tal conceito na Figura 4.5, cuja velocidade de translação foi retirada do movimento.

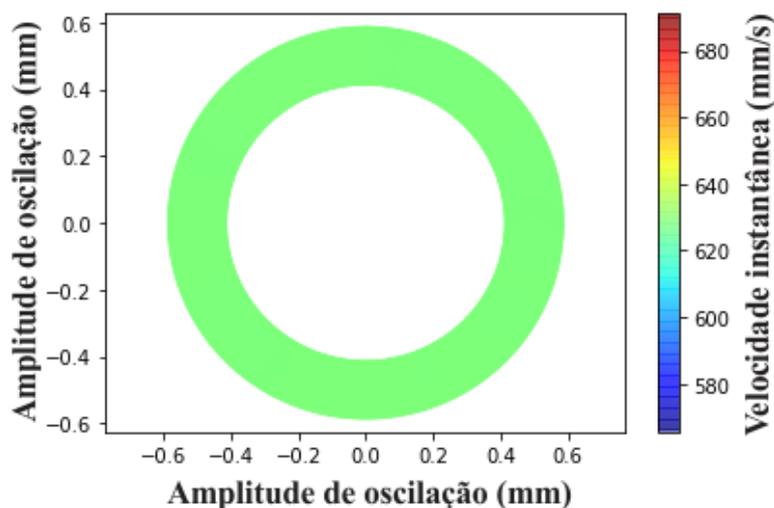


Figura 4.5 - Velocidade do feixe sem a componente de translação ao longo da geometria circular [Autor].

A velocidade instantânea do feixe LASER realizando um movimento circular uniforme *wobble* é constante ao longo do tempo. É visto um valor fixo de 628 mm/s no gráfico da Figura 4.6.

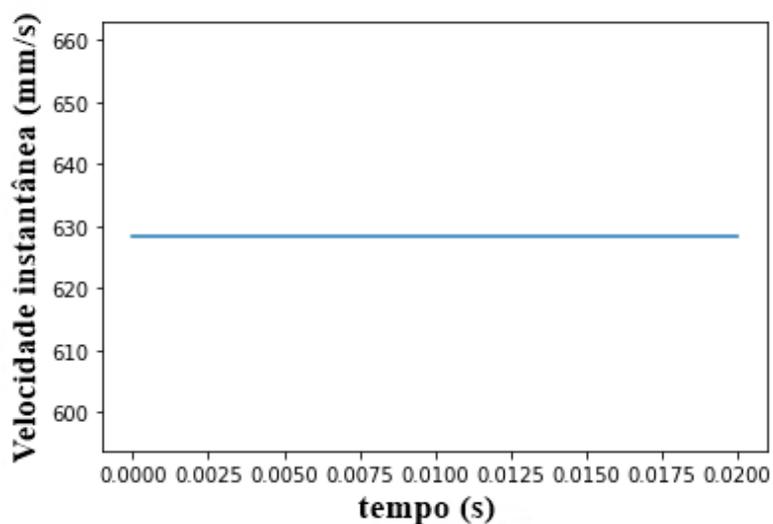


Figura 4.6 - Velocidade instantânea do feixe em geometria circular sem velocidade de translação somada ao movimento [Autor].

Para determinar a equação da velocidade do feixe LASER que realiza a trajetória em geometria em infinito, de forma semelhante ao movimento circular, foi considerado como

parâmetro de contorno que os espelhos internos ao *scanner* galvanométrico realizam oscilações senoidais, iniciando no ponto zero do plano cartesiano no eixo da abscissa e ordenada. Neste caso a frequência de oscilação em y é o dobro da frequência de oscilação em x .

A oscilação com movimento em infinito não é uma geometria com características de movimentos já conhecidas e conceitos teóricos consolidados, como visto no movimento circular uniforme. Por isso, foi necessário encontrar uma equação característica que descrevesse o movimento desejado, a fim de determinar a equação da velocidade. Primeiramente, foi iniciado o processo de modelagem determinando as equações do espaço para garantir que as mesmas descrevessem a geometria desejada.

As equações senoidais do espaço que descrevem a geometria em infinito foram desenvolvidas considerando uma amplitude unitária do movimento ($A=1$). O movimento senoidal é uma curva matemática descrevendo uma oscilação que se repete ao longo do tempo de forma suave, sendo essa curva uma onda contínua, composta por duas componentes, x e y . Sua principal forma em função do tempo é descrita pelas equações vistas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Equações de posição do movimento senoidal [Autor].

$S_x = A_{sx} \cdot \text{Sen}(w_x \cdot t) + v_{tx} \cdot t$	$S_y = A_{sy} \cdot \text{Sen}(w_y \cdot t)$
---	--

Para validar se as equações de posição de um ponto que realiza uma trajetória com uma geometria semelhante ao símbolo matemático “infinito”, foi descrito o equacionamento de cada ponto separadamente, conforme mostrado na Figura 4.7. As equações referentes a cada ponto da geometria foram dispostas na Tabela 4.3.

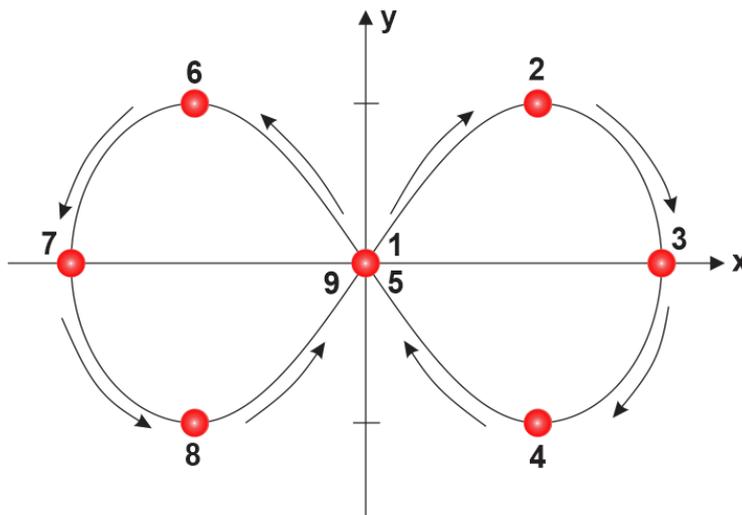


Figura 4.7 – Representação esquemática do feixe descrevendo movimento em infinito [Autor].

Tabela 4.3 - Equações do espaço do movimento em infinito [Autor].

$Sx = Sen(0) = 0$ $Sy = Sen(0) = 0$ <p style="text-align: right;">1</p>	$Sx = Sen(\pi/4) = 0,7$ $Sy = Sen(\pi/2) = 1$ <p style="text-align: right;">2</p>	$Sx = Sen(\pi/2) = 1$ $Sy = Sen(\pi) = 0$ <p style="text-align: right;">3</p>
$Sx = Sen(3\pi/4) = 0,7$ $Sy = Sen(3\pi/2) = -1$ <p style="text-align: right;">4</p>	$Sx = Sen(\pi) = 0$ $Sy = Sen(2\pi) = 0$ <p style="text-align: right;">5</p>	$Sx = Sen(\pi + \pi/4) = -0,7$ $Sy = Sen(2\pi + \pi/2) = 1$ <p style="text-align: right;">6</p>
$Sx = Sen(\pi + \pi/2) = -1$ $Sy = Sen(2\pi + \pi) = 0$ <p style="text-align: right;">7</p>	$Sx = Sen(\pi + 3\pi/4) = -0,7$ $Sy = Sen(2\pi + 3\pi/2) = -1$ <p style="text-align: right;">8</p>	$Sx = Sen(2\pi) = 0$ $Sy = Sen(2\pi + 2\pi) = 0$ <p style="text-align: right;">9</p>

Quando as oscilações senoidais são sobrepostas em duas direções ortogonais, diversos padrões de geometrias podem ser obtidos. Oscilação nas direções x e y , com amplitude e frequência idênticos e diferença de fase igual a 90° formam um círculo. Para se obter a geometria em infinito, a frequência de oscilação do movimento em y deve ser duas vezes a frequência de oscilação do movimento em x ($f_y=2f_x$), ou seja, a velocidade angular em y é duas vezes a velocidade angular em x , para ser possível o *scanner* galvanométrico gerar a geometria em infinito. Tal fenômeno pode ser melhor compreendido com o auxílio do gráfico da Figura 4.8, que apresenta a velocidade da oscilação senoidal das coordenadas x e y que compõem o movimento.

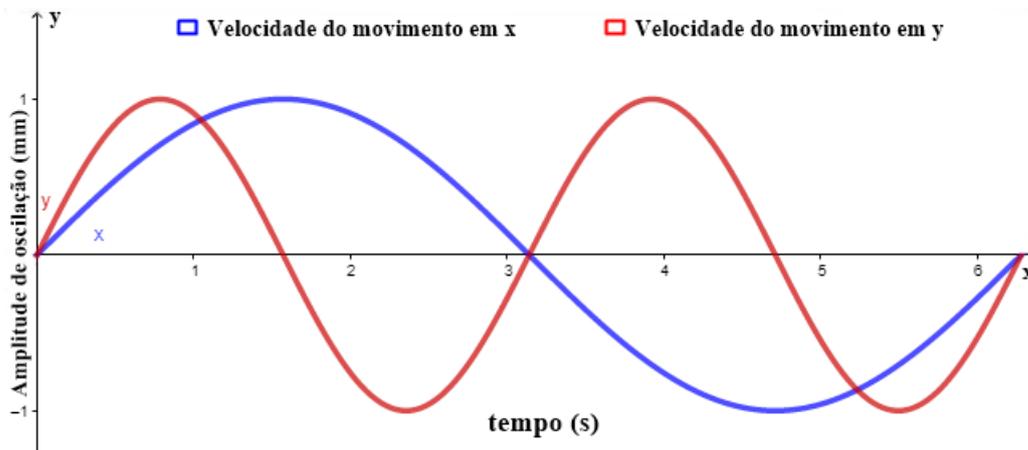


Figura 4.8 – Representação das velocidades do movimento em infinito no eixo x e y [Autor].

As análises anteriores foram realizadas considerando que o feixe LASER descrevia a geometria sem a componente da velocidade de translação. Após a validação das equações do espaço, foi possível modelar a equação da velocidade instantânea do feixe LASER. Para isso foi necessário incluir a componente da velocidade de translação (vt_x) que o feixe realiza durante o processamento. Com as equações do espaço determinadas, foram feitas suas derivadas em relação ao tempo $\frac{dS}{dt}$ após a soma vetorial e, por fim, foi determinado o módulo da velocidade, representado pela Equação (16).

$$|\vec{V}_i(t)| = \sqrt{(A \cdot \cos(w_x \cdot t) \cdot w_x + vt_x)^2 + (A \cdot \cos(w_y \cdot t) \cdot w_y)^2} \quad (16)$$

Essa equação fornece a velocidade instantânea do ponto LASER, sendo alterada em cada instante de tempo durante a oscilação. Uma característica particular observada do movimento em infinito, é que mesmo sem a componente de translação (vt_x), a velocidade de oscilação do feixe não permanece constante em nenhum momento, como visto no movimento circular, ou seja, em cada instante de tempo a velocidade instantânea do feixe está sofrendo alteração ao longo da trajetória, independente se a geometria está estática ou não.

A título de exemplo, é apresentado os valores das velocidades instantâneas do feixe ao longo de toda a geometria sem a componente de translação, na Figura 4.9, e com a componente

de translação, com valor de 50 mm/s, na Figura 4.10. Foi usado valor de amplitude de oscilação de 0,5 mm e frequência de oscilação de 200 Hz.

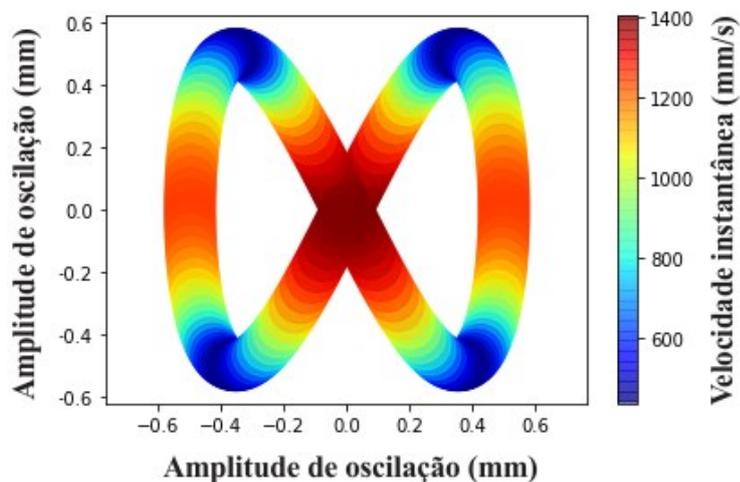


Figura 4.9 - Gráfico da velocidade instantânea do feixe sem a velocidade de translação somada ao movimento [Autor].

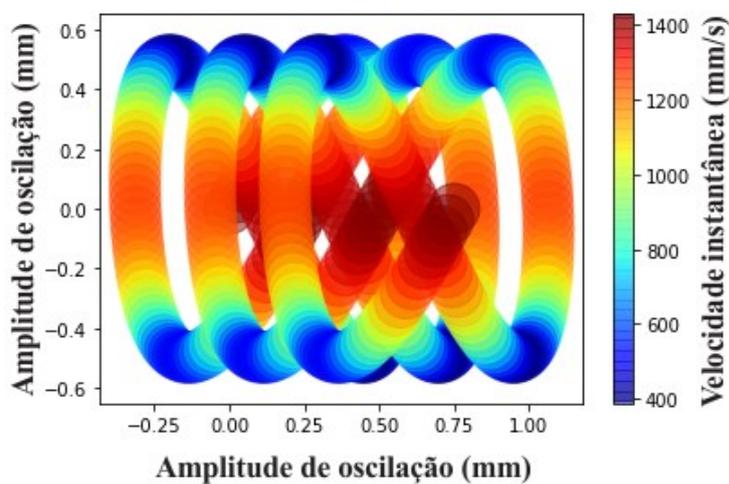


Figura 4.10 - Gráfico da velocidade instantânea do feixe com a velocidade de translação somada ao movimento [Autor].

A velocidade do feixe sem a componente de translação, com frequência de 200 Hz e amplitude de 0,5 mm, varia entre um valor mínimo de 437,3 mm/s e máximo de 1404,9 mm/s, como pode ser visto no gráfico da Figura 4.11.

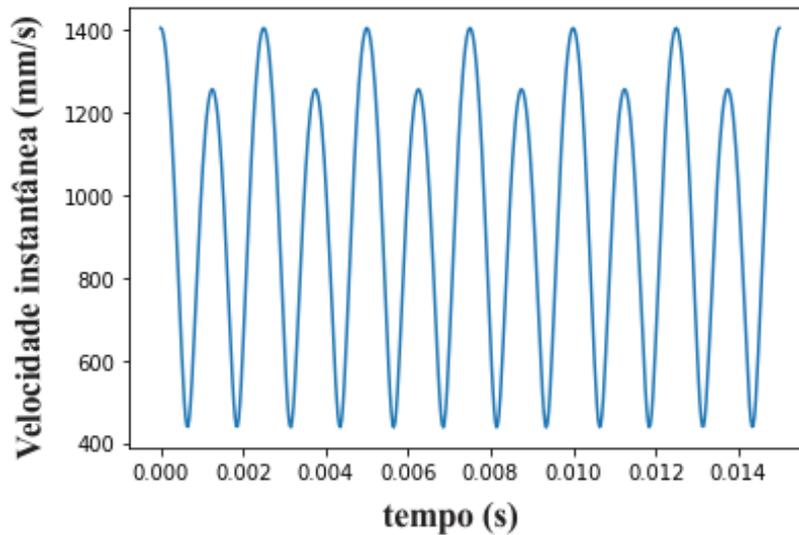


Figura 4.11 – Variação da velocidade instantânea do feixe sobre a superfície da amostra sem a velocidade de translação somada ao movimento [Autor].

A velocidade do feixe com a componente de translação, com frequência de 200 Hz e amplitude de 0,5 mm, varia entre um valor mínimo de 388,1 mm/s e máximo de 1428,0 mm/s como pode ser visto no gráfico da Figura 4.12.

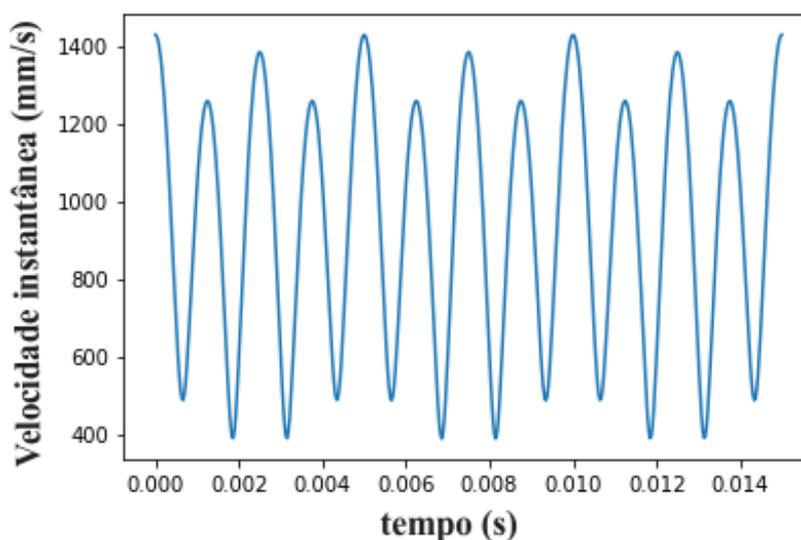


Figura 4.12 - Gráfico da velocidade instantânea do feixe sobre a superfície da amostra com a velocidade de translação somada ao movimento [Autor].

As demais velocidades médias instantâneas provenientes da combinação de todos os parâmetros dos ensaios em geometria circular e em infinito podem ser vistas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Valores das velocidades instantâneas médias do feixe em mm/s [Autor].

Circular	Frequência (Hz)		
Amplitude (mm)	200	300	400
0,5	629 (± 50)	943 (± 50)	1257 (± 50)
1	1257 (± 50)	1885 (± 50)	2513 (± 50)
2	2513 (± 50)	3770 (± 50)	5026 (± 50)
Infinito	Frequência (Hz)		
Amplitude (mm)	200	300	400
0,5	944(+484;-556)	1416(+714;-810)	1888(+944;-1063)
1	1888(+944;-1063)	2831(+1406;-1569)	3775(+1867;-2075)
2	3775(+1867;-2075)	5663(+2789;-3088)	7551(+3711;-4101)

É possível observar que conforme se aumenta, a amplitude de oscilação e frequência de oscilação, maior é a velocidade instantânea do feixe LASER em ambas geometrias. Na oscilação em geometria circular, o valor da variação entre a velocidade máxima e mínima é pequeno e não se altera, ou seja, permanece constante sofrendo somente influência da velocidade de translação, no caso 50 mm/s. Isso ocorre porque as velocidades instantâneas ao longo da geometria são constantes sem o vetor de translação, como visto no início desta da seção.

Na geometria em infinito, há uma grande variação da velocidade entre a máxima e mínima. As variações valores bem maiores que as obtidas na geometria circular, pois a velocidade instantânea não permanece constante em algum momento, mesmo sem a velocidade de translação. Ao incluir a translação, há um aumento significativo nos valores da velocidade instantânea ao longo da geometria.

4.2 Aspectos gerais das microssoldas

4.2.1 Microssoldas sem oscilação do feixe LASER

Foram realizados 48 cordões na etapa 1, sendo 12 para cada potência, variando os valores da velocidade de translação, denominada inicialmente como velocidade de soldagem. A fim de representar os aspectos principais observados nos cordões, sua largura e profundidade, foi disposta no gráfico da Figura 4.2 somente uma imagem, das 12 realizadas, da seção transversal dos cordões de cada potência utilizada. Os valores de velocidade de soldagem correspondente às seções transversais ilustradas no gráfico, para a potência de 100 W, 200 W, 300W e 400 W foram: 12,5 mm/s, 25 mm/s, 50 mm/s e 650 mm/s respectivamente.

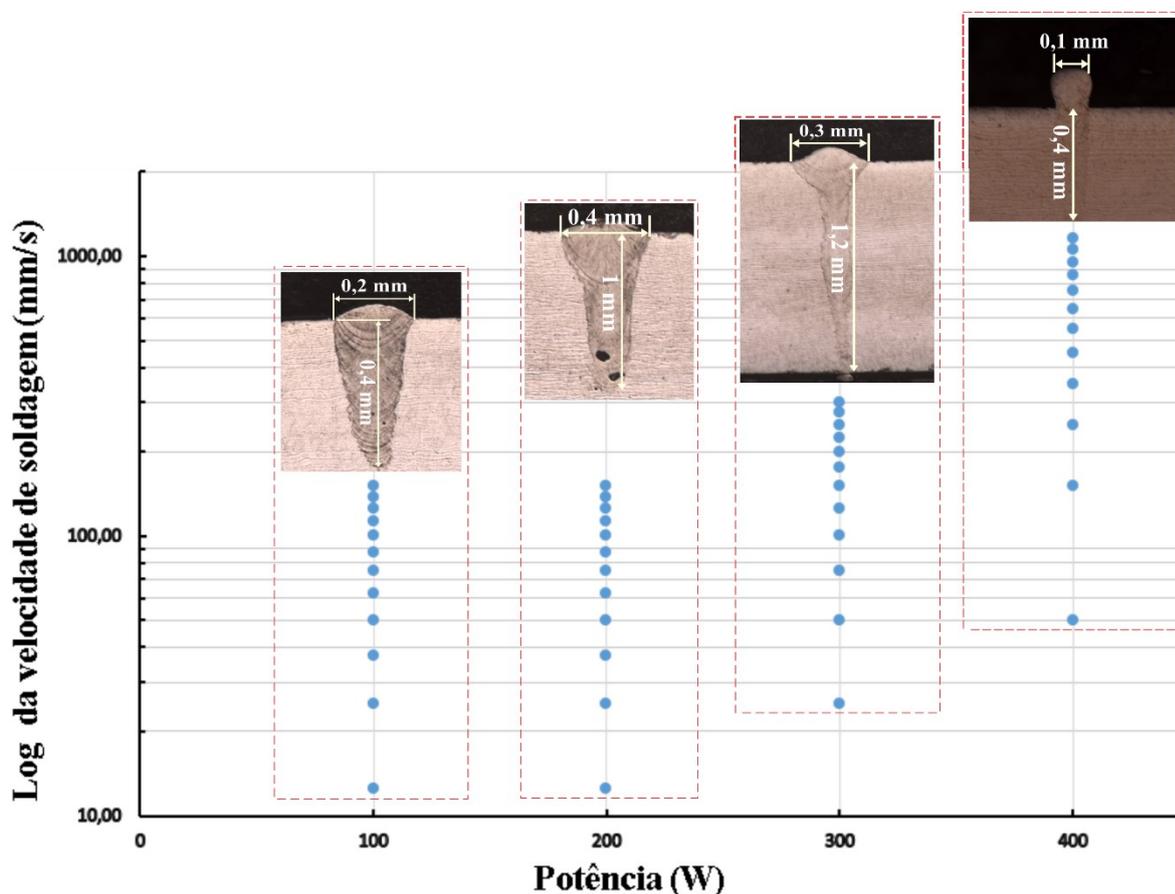


Figura 4.13 – Aspectos das microssoldas obtidas nos ensaios preliminares [Autor].

Foi observado que a microssolda não apresentou penetração adequada (total) em velocidades menores, analisadas na potência de 100 W. Em consequência, não houve

necessidade de se realizar ensaios em velocidades maiores, uma vez que, com o aumento da velocidade de soldagem, a penetração tende a diminuir.

Na potência de 200 W, observou-se um aumento da penetração da solda, juntamente com o surgimento de porosidade em 50% dos cordões realizados. Fato este que se deve, provavelmente, à instabilidade do capilar do *keyhole* durante o processamento [49]. Na potência de 400 W, ocorreu maior penetração, porém resultou em cordões com muita variação no aspecto geométrico da ZF que apresentou baixa uniformidade, além de cordões convexos em maiores velocidades de soldagem (acima de 450 mm/s).

As microssoldas com aspectos mais satisfatórios foram observadas na potência de 300 W, cordões com características geométricas adequadas, penetração suficiente e ausência de descontinuidades comuns ao processo [55, 73], por exemplo, porosidade, mordedura e falta de fusão. Com destaque para a faixa de velocidade de soldagem de 50 mm/s. Deste modo, dentre as 48 combinações foi escolhido o valor da potência de 300 W e velocidade de translação do feixe de 50 mm/s para a realização dos ensaios de microssoldagem com feixe oscilante.

As demais imagens dos cordões realizados na etapa 1, estão dispostos em uma tabela apresentada no APÊNDICE C.

4.2.2 Microssoldas em geometria circular

A partir de todo o conjunto das microssoldas produzidas nos ensaios com oscilação do feixe LASER, todos os cordões foram considerados de qualidade satisfatória através da análise visual. Com isso, os cordões aprovados foram designados para análises metalográfica, a fim de avaliar mais detalhadamente a presença de descontinuidades na superfície e/ou internas.

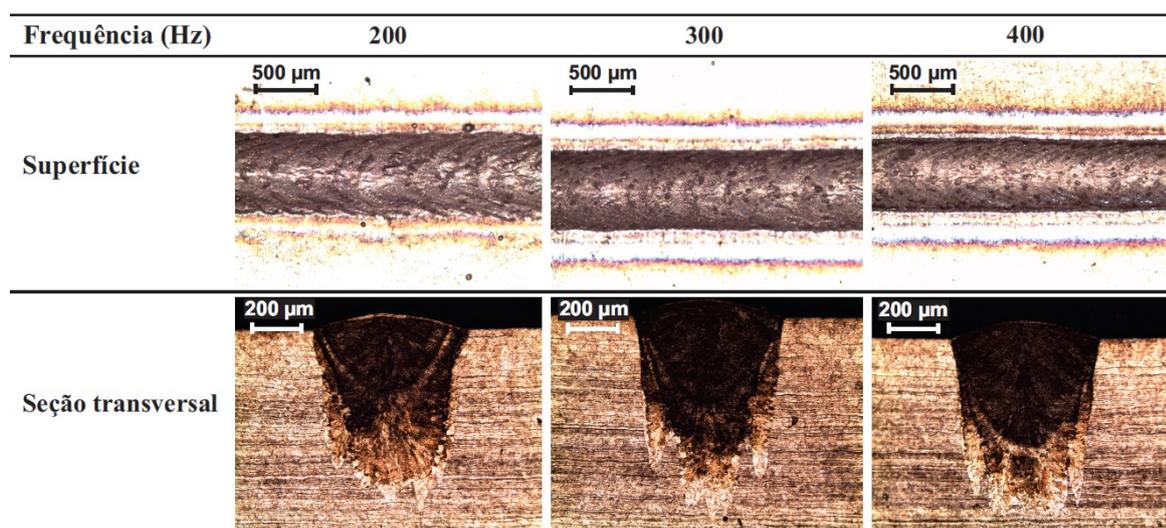
As seções transversais das microssoldas obtidas com oscilação em geometria circular, com amplitude de oscilação de 0,5 mm, 1,0 mm e 2,0 mm, com variação da frequência de oscilação de 200 Hz, 300Hz e 400 Hz são apresentadas na Tabela 4.5, Tabela 4.6 e Tabela 4.7 respectivamente. Conforme mencionado, utilizou-se a potência de 300 W, velocidade de translação de 50 mm/s, e o ponto do foco mantido fixo na superfície da amostra.

Os cordões de menor amplitude (0,5 mm) apresentaram maiores valores de penetração em relação às demais amplitudes, com média de valor de 0,7 mm. Devido à oscilação de menor

diâmetro em comparação com as demais, a área de radiação da energia é menor, assim como a velocidade instantânea do feixe durante a varredura. Com isso, o acúmulo de calor ocorre mais facilmente, levando à formação adequada do *keyhole*.

Em nenhum cordão dos ensaios com oscilação do feixe foi observado a presença de porosidades, como ocorreu nos cordões sem oscilação. Em consequência da oscilação, a poça fundida é agitada constantemente e isto auxilia na liberação dos gases gerados durante o processo, evitando o aparecimento de poros [55] [74]. A presença de vazios comprova forte correlação com a velocidade instantânea. Foi relatado por Miyagi *et.al.* [63], que em velocidades maiores que 160 mm/s, o *keyhole* é estável sendo possível obter soldas de elevada qualidade. Entretanto, a agitação da poça tende a liberar respingos, que foram reduzidos com o aumento da frequência de oscilação, que diretamente altera a velocidade instantânea [73]. É possível notar essa redução dos respingos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Vista da superfície e seção transversal das microssoldas de geometria circular (a=0,5 mm, vs=50 mm/s, P=300 W) [Autor].



Foi observada uma variação no formato da geometria da ZF dos cordões, com diferença de penetração nas extremidades do cordão, devido ao fato da velocidade instantânea do feixe mudar constantemente durante sua trajetória na geometria, como visto na seção 4.1. É possível observar na Figura 4.14 a influência da variação da velocidade do feixe na ZF do cordão em geometria circular com amplitude de 0,5 mm e frequência de 200 Hz.

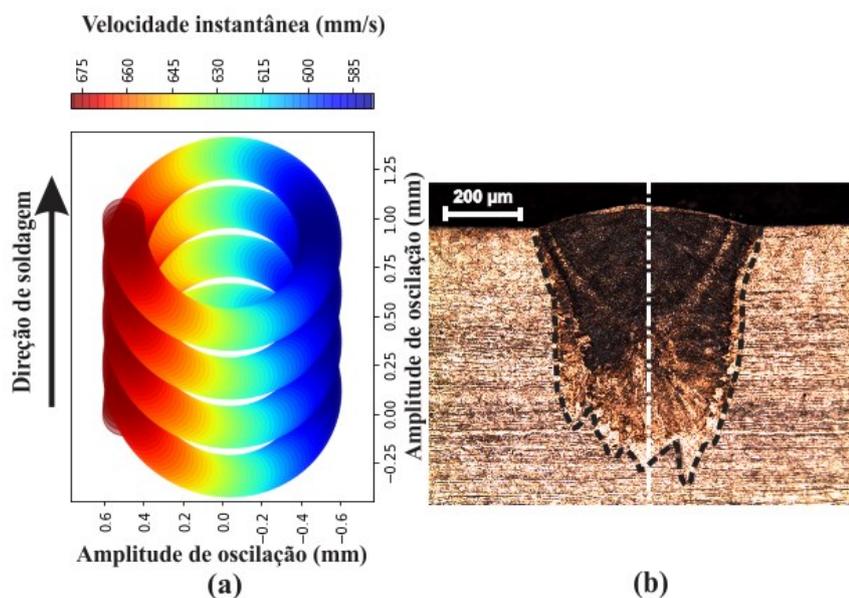


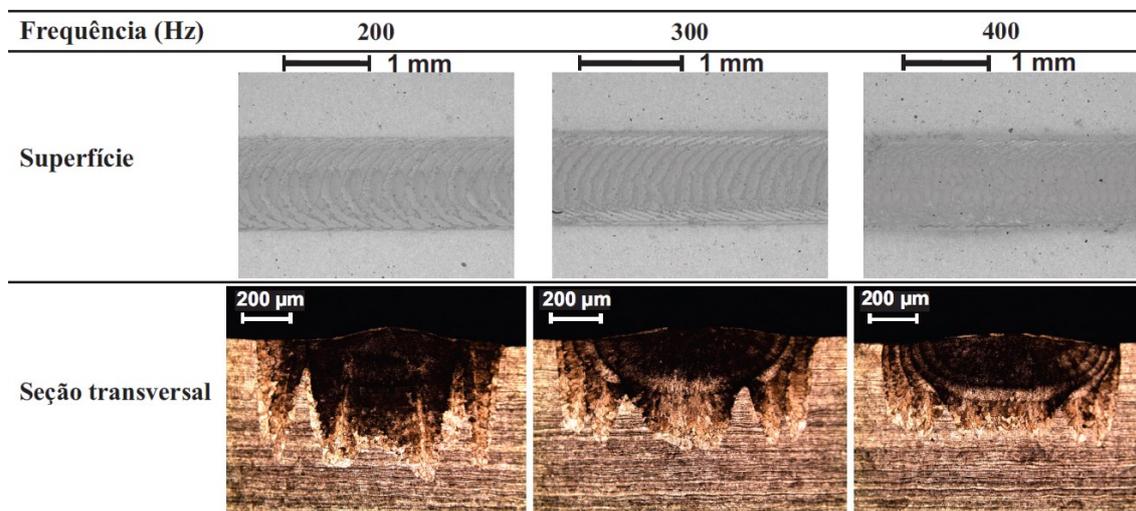
Figura 4.14 - Influência da variação da velocidade do feixe na penetração a) velocidades do feixe ao longo da trajetória b) seção transversal do cordão [Autor].

O mapa de cores das velocidades observado na Figura 4.14 possibilita visualizar as regiões com maiores e menores valores ao longo da geometria. A velocidade do feixe varia de um valor mínimo de 579 mm/s e máximo de 679 mm/s em regiões distintas. As cores mais frias (em azul), representam os valores de velocidades com menores magnitude, ocasionando em um maior tempo de interação entre LASER e material, e como consequência, aumenta a penetração da solda nessa região. É possível perceber na seção transversal do cordão na Figura 4.13b uma assimetria da ZF, com o lado de menor velocidade (direito) apresentando maior penetração.

As cores mais quentes (em vermelho) representam os valores de velocidades com maiores magnitudes. Essas diferenças de velocidades nos extremos do cordão ocorrem pois, nessa região mais quente, a velocidade do feixe LASER assume um valor máximo ao se somar com a velocidade de translação do movimento. Isso resulta em uma penetração menor da solda, devido ao tempo de interação LASER/material ser menor.

Com o aumento da amplitude de oscilação, como esperado, foi observada uma largura resultante maior e menor profundidade de penetração nos cordões. Na seção transversal dos cordões, para amplitude de 1 mm, nota-se uma geometria atípica da zona fundida para processos de soldagem, como pode ser visto na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Vista da superfície e seção transversal das microsoldas de geometria circular
($a=1\text{ mm}$, $v_s=50\text{ mm/s}$, $P=300\text{ W}$) [Autor].



Houve uma variação da penetração em pontos distintos da zona fundida (ZF) em todas as frequências de oscilação investigadas, resultando em pontos com penetração intermitente ao longo da ZF.

Devido a inércia de varredura dos espelhos, a velocidade do feixe não é constante e segue uma modulação senoidal com baixas velocidades nos pontos das extremidades e máxima na linha central do cordão. A potência constante do LASER, leva a uma linha de energia mais elevada depositada nas bordas do cordão, o que resultou na forma característica da seção transversal visto na Tabela 4.6.

A Figura 4.15 ilustra a variação da penetração devido à mudança dos valores de velocidade do feixe ao longo da geometria.

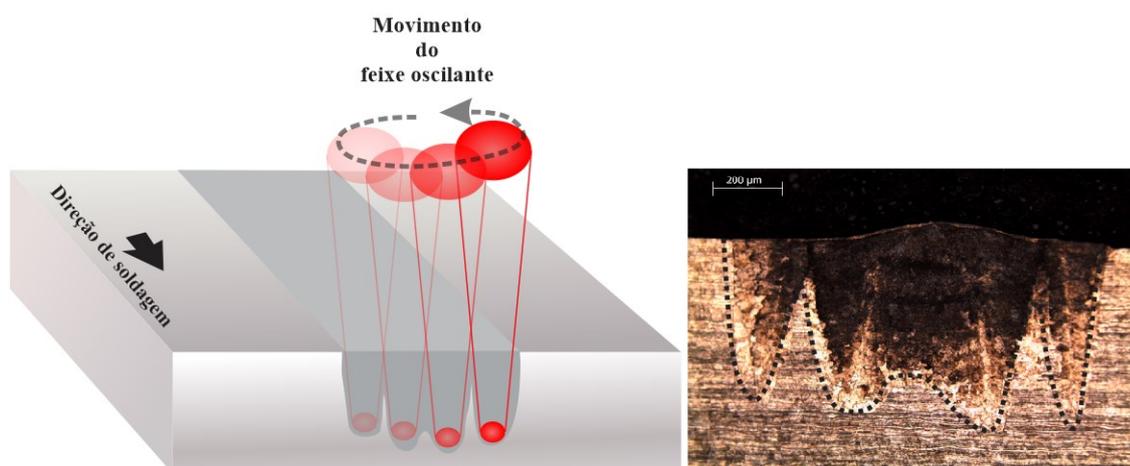
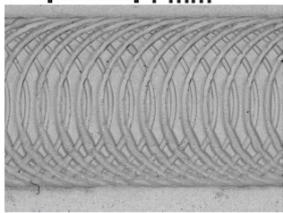
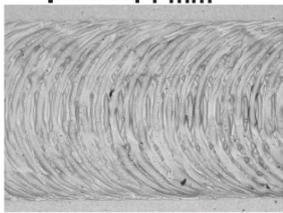
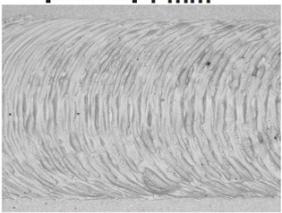
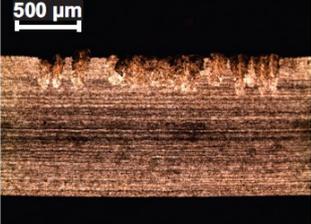
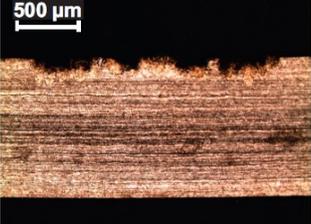
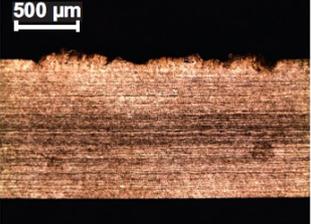


Figura 4.15 - Representação da causa do formato de geometria obtida [Autor].

No experimento com a maior amplitude de oscilação (2 mm), além do aumento na largura dos cordões, os mesmos apresentaram pouco material fundido, sendo possível identificar com clareza na vista da superfície a trajetória da geometria investigada, neste caso a circular. Nestas condições não se produz mais uma poça contínua, com isso, não é possível soldar pois o cordão acompanha a trajetória circular, como mostrado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Vista da superfície e seção transversal das microssoldas de geometria circular ($a=2$ mm, $v_s=50$ mm/s, $P=300$ W) [Autor].

Frequência (Hz)	200	300	400
	1 mm	1 mm	1 mm
Superfície			
Seção transversal			

Ao aumentar a amplitude de oscilação, a velocidade de instantânea também aumenta consideravelmente. Com isso, o tempo de interação do feixe LASER/material é muito curto, e

assim a deposição suficiente de energia no material não é alcançada, o que dificulta a fusão do metal. Foi possível observar um decréscimo na penetração, atingindo valores de no máximo 0,2 mm.

O aumento da velocidade em uma condição de soldagem com elevada penetração leva a mudanças nas dimensões da poça de fusão e, conseqüentemente, no cordão originado. A medida que a velocidade é elevada, a fase líquida no entorno diminui e ocorre um alongamento do *keyhole*. Como a seção transversal é menor, o fluxo de material fundido é transportado a uma taxa mais elevada. Este forte fluxo de material fundido ao encontrar o final da poça de fusão desacelera e emerge na superfície do cordão e solidifica na forma de corcundas [75]. Com o aumento da frequência de oscilação, foi observado um acúmulo insatisfatório de material na superfície, como visto nas superfícies dos cordões presentes na Tabela 4.7.

Os valores de profundidade de todos os cordões das amostras em geometria circular foram dispostos no gráfico da Figura 4.16.

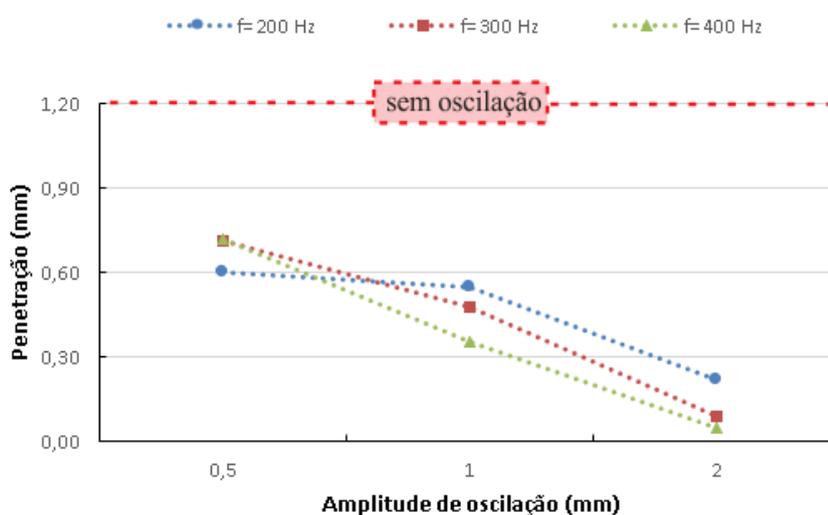


Figura 4.16 - Penetração de solda oscilação circular [Autor].

A tendência da diminuição da penetração com o aumento da amplitude de oscilação é mais significativa nas frequências maiores (300 e 400 Hz) pois a velocidade instantânea é maior em condições de amplitude e frequência maiores.

A penetração nos cordões sem oscilação foi maior que nos cordões com oscilação devido à maior energia por unidade de distância percorrida pelo feixe durante o processo, já que as

velocidades empregadas foram comparativamente muito menores. Resultou em penetração total de 1,2 mm em valores de potência de 300 W e velocidade de soldagem de 50 mm/s.

Os valores de largura de todos os cordões obtidos em geometria circular foram dispostos no gráfico da Figura 4.17.

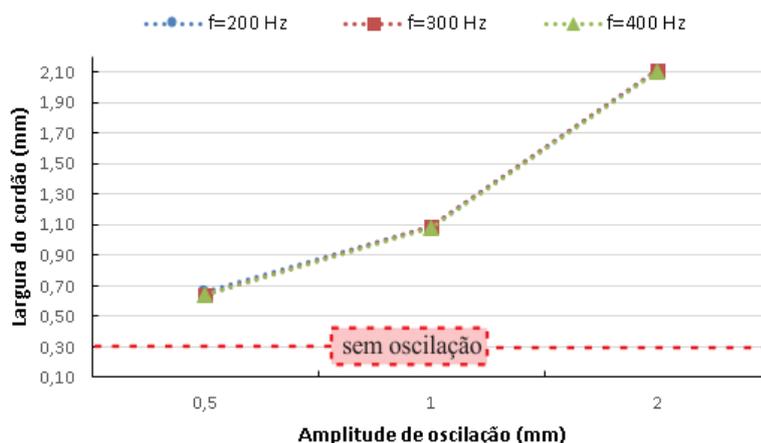


Figura 4.17 – Largura de cordão oscilação circular [Autor].

É possível notar que a tendência de aumento dos valores é muito próxima em todas as frequências de oscilação, com os pontos quase se sobrepondo. A média da largura dos cordões obtidos com oscilação é maior que os obtidos sem oscilação, devido à maior área atingida pela radiação do feixe, como esperado. O valor da largura dos cordões sem oscilação ficou constante em 0,3 mm, em potência de 300 W e velocidade de soldagem de 50 mm/s.

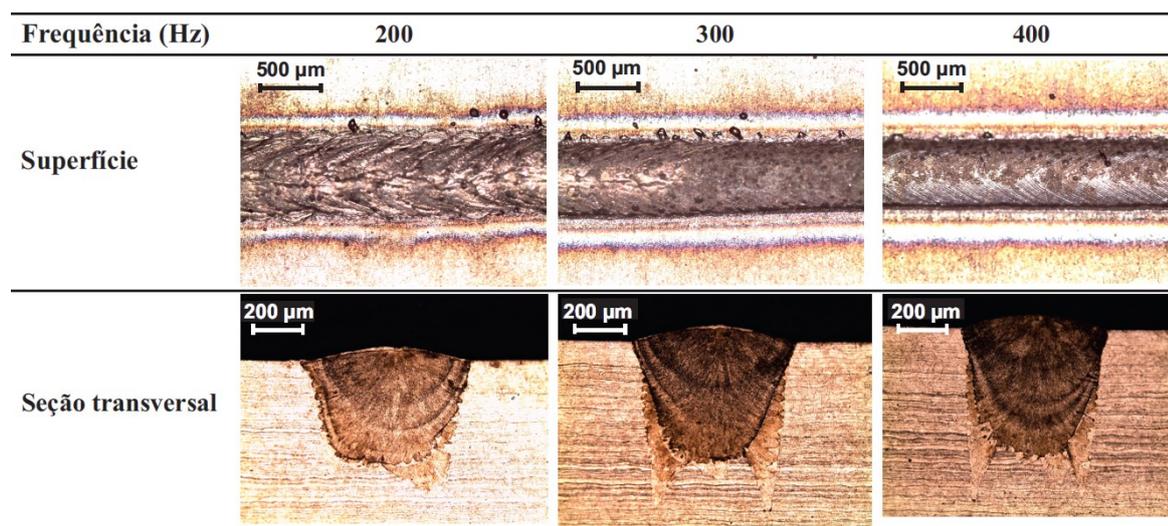
4.2.3 Microssoldas com geometria em infinito

A vista da superfície e seção transversal das microssoldas realizadas com a oscilação do feixe LASER com geometria em infinito, com oscilação de 0,5 mm, 1 mm e 2 mm são mostradas na Tabela 4.8, Tabela 4.9 e Tabela 4.10 respectivamente. Os cordões foram realizados com variação da amplitude de oscilação e frequência de oscilação conforme representado na Figura 3.11.

Nota-se uma semelhança na influência da frequência no surgimento de respingos. Igualmente como ocorreu nas microssoldas em oscilação circular, também houve uma redução

do surgimento dos respingos nos cordões com geometria em infinito com o aumento da frequência de oscilação, como apresentado nas superfícies dos cordões na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Vista da superfície e seção transversal das microsoldas com geometria em infinito ($a=0,5$ mm, $v_s=50$ mm/s, $P=300$ W) [Autor].



Foi observado na micrografia da seção transversal, dos cordões realizados com amplitude de oscilação de 0,5 mm, maior penetração nas extremidades da ZF, devido ao mesmo agente visto anteriormente na oscilação circular, menor valor de velocidade do feixe LASER nessas regiões. Por exemplo, é possível verificar na Figura 4.18 a influência da mudança de velocidade do feixe na penetração do cordão realizado com amplitude de 0,5 mm e frequência de 300 Hz.

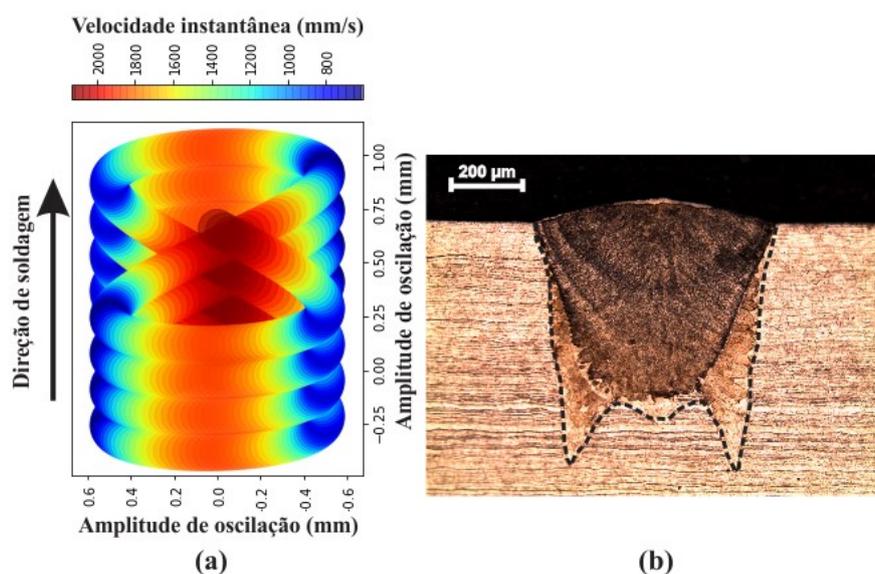


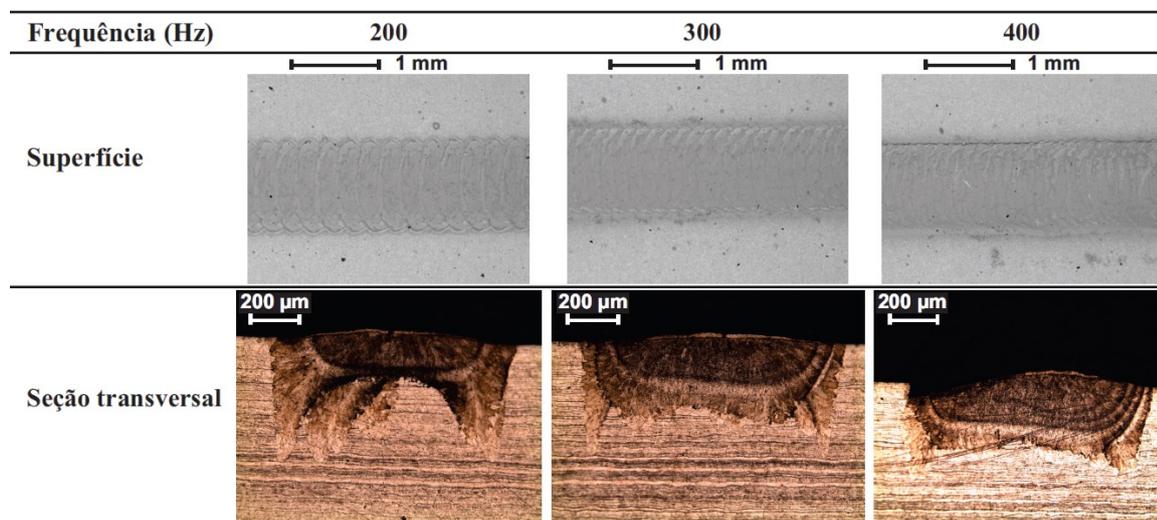
Figura 4.18 - Influência da variação de velocidade do feixe na penetração a) velocidades do feixe ao longo da trajetória b) seção transversal do cordão [Autor].

Ao longo da geometria em infinito, foi visto uma diferença grande de variação da velocidade do feixe nos pontos ao longo da geometria. É possível observar na Figura 4.18a nas regiões de cores frias, os menores valores de velocidade alcançados pelo feixe LASER. Nessas regiões a velocidade apresentou valor mínimo de 606 mm/s em ambas as extremidades, resultando em maior penetração nas bordas do cordão de modo simétrico, como visto na Figura 4.18b. Essa menor velocidade deve-se provavelmente à reversão nas extremidades que o feixe tem que realizar para formar a geometria.

Conforme se aproxima da região central da geometria, observa-se os pontos de cores mais quentes, cujas velocidades possuem maiores valores. Nessa região, a velocidade do feixe apresenta velocidade máxima de 2130 mm/s, resultando em menor penetração na parte central, conforme observado na seção transversal na Figura 4.18b.

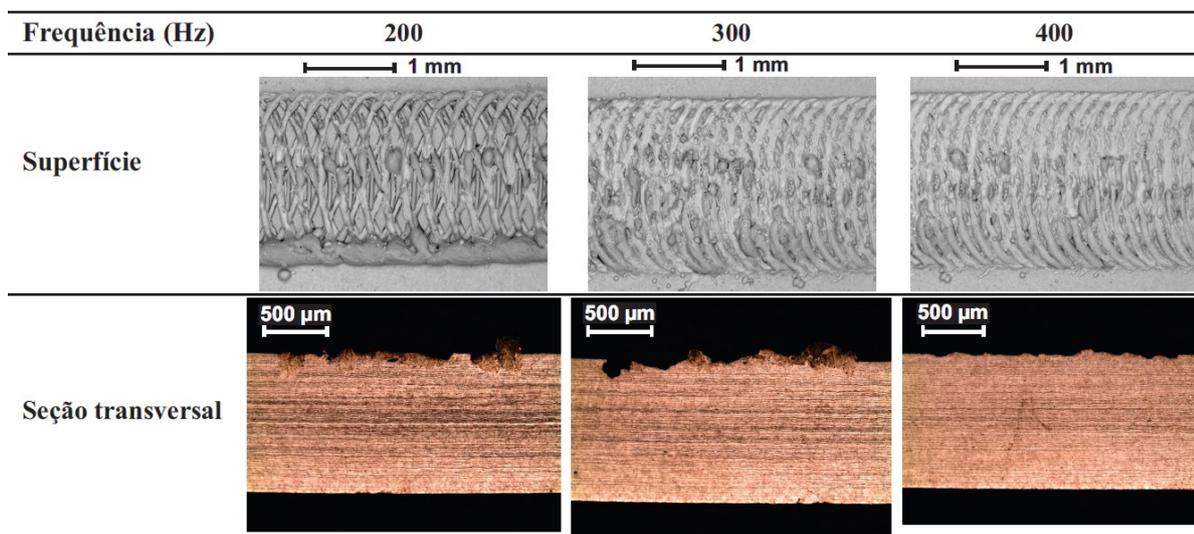
No valor da amplitude de oscilação de 1 mm, apresentado na Tabela 4.9, há uma geometria com variação da penetração, nas macrografias da seção transversal, com características em maior evidência. A forma da penetração obtida consistiu em uma profundidade maior nas extremidades que no centro do cordão. Na maior frequência de oscilação (400 Hz) ocorreu uma depressão da ZF na superfície.

Tabela 4.9 - Vista da superfície e seção transversal das microssoldas com geometria em infinito ($a=1$ mm, $v_s=50$ mm/s , $P=300$ W) [Autor].



Ao aumentar a amplitude de oscilação, ocorreu uma maior influência na penetração, onde a mesma continuou a diminuir a valores muito pequenos, de no máximo 0,1 mm. É possível observar na Tabela 4.10, a presença de pontos com acúmulo de metal solidificado (*humping*) nas extremidades e centro da superfície dos cordões em todas as frequências de oscilação. Nas imagens da seção transversal, é observado diversos pontos com mordedura, e uma total falta de penetração em todas as frequências.

Tabela 4.10 - Vista da superfície e seção transversal das microssoldas com geometria em infinito ($a=2$ mm, $v_s=50$ mm/s, $P=300$ W) [Autor].



Em todas as frequências, com o incremento da amplitude de oscilação, diminuiu-se a penetração das microssoldas, e aumentou o acúmulo de metal solidificado na superfície dos cordões (*humping*).

Os valores de penetração de todos os cordões das amostras com geometria em infinito foram dispostos no gráfico da Figura 4.19. A tendência da diminuição da penetração com o aumento da amplitude de oscilação também é mais significativa nas frequências maiores (300 Hz e 400 Hz).

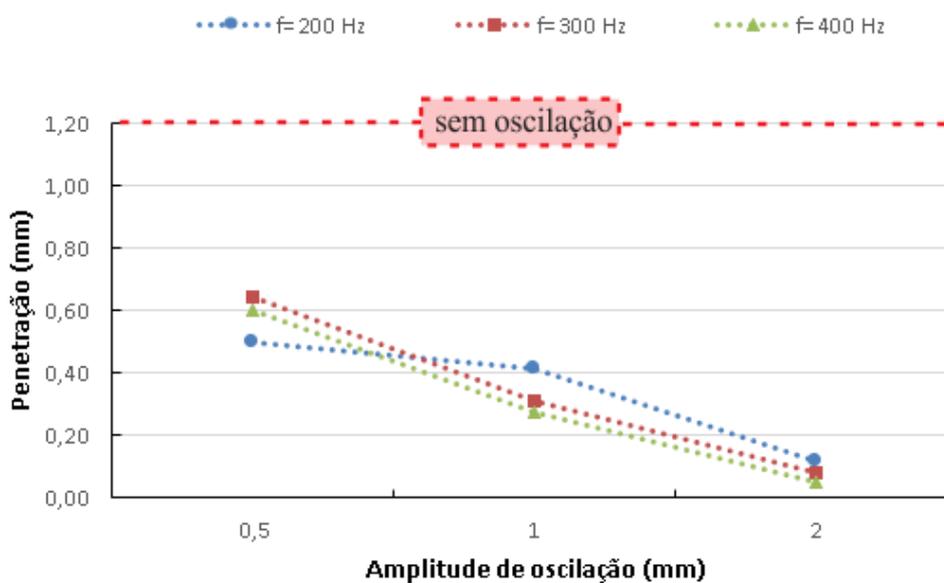


Figura 4.19 - Penetração dos cordões com oscilação em infinito [Autor].

Na geometria em infinito, a largura dos cordões obtidos com oscilação também foi maior que a obtida sem oscilação, devido a menor área de incidência de energia do feixe. Os valores da largura de todos os cordões podem ser vistos no gráfico da Figura 4.20.

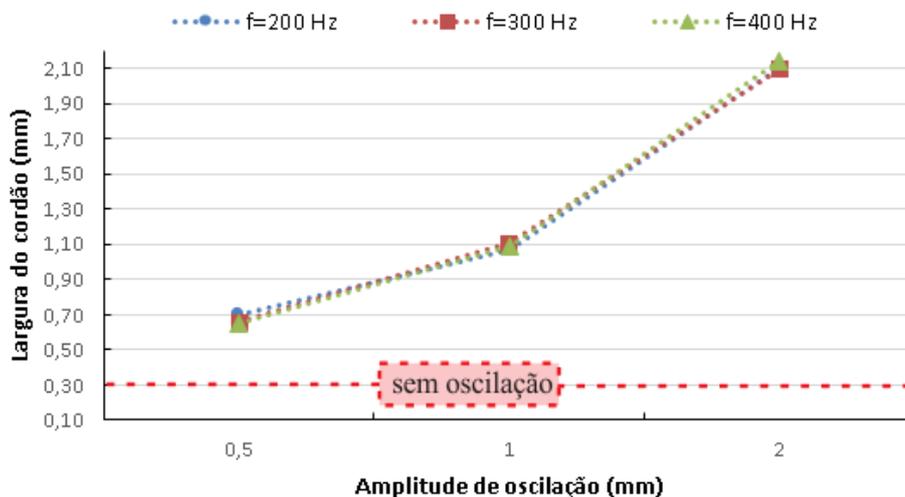


Figura 4.20 - Largura dos cordões com oscilação em infinito [Autor].

4.3 Efeito dos parâmetros de processo na geometria dos cordões

A partir dos ensaios realizados, observou-se que o aumento da amplitude de oscilação tem um efeito significativo na redução da profundidade de penetração do cordão. Para a potência de 300 W e uma amplitude de 0,5 mm foi obtido uma penetração média de 0,7 mm, ao passo que a penetração média diminuiu para 0,05 mm para uma amplitude de 2 mm. O gráfico de Pareto apresentado na Figura 4.21 exhibe os fatores com maior influência sobre a penetração dos cordões em oscilação circular.

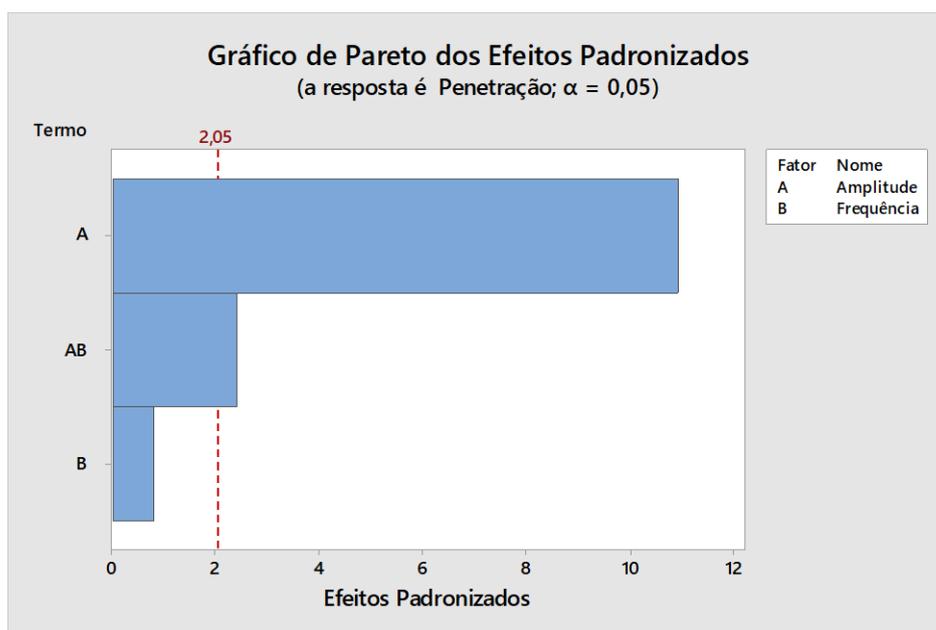


Figura 4.21 - Gráfico de Pareto da influência na penetração oscilação circular [Autor].

Como esperado, a amplitude de oscilação do feixe teve maior influência na penetração dos cordões. Isto se deve ao fato de ser possível controlar o tamanho da área que será concentrado a densidade de energia alterando o valor da amplitude de oscilação. Foi obtido maior penetração na amplitude de menor valor (0,5 mm), devido à alta densidade de energia em uma área relativamente pequena, bem como a menores valores de velocidade instantânea.

O segundo fator com maior significância na penetração das soldas, foi a interação entre a amplitude de oscilação e frequência de oscilação, conforme observado na Figura 4.22. Em um patamar com pouca influência na penetração, se encontra a frequência de oscilação.

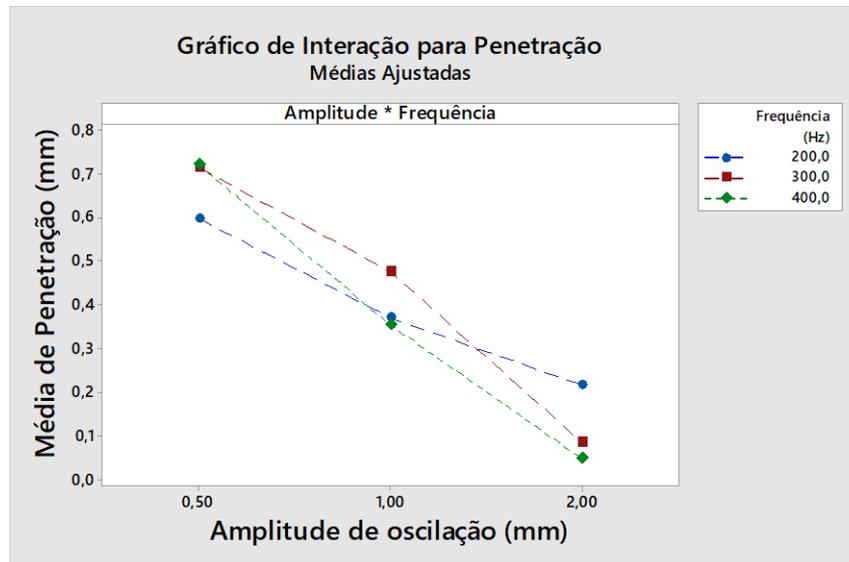


Figura 4.22 - Influência da interação dos parâmetros na penetração em oscilação circular [Autor].

O gráfico da Figura 4.23 apresenta maior magnitude do efeito causado pela amplitude de oscilação na penetração em relação aos demais parâmetros. É possível observar que com o aumento da amplitude de oscilação, tem-se a redução da média da penetração.

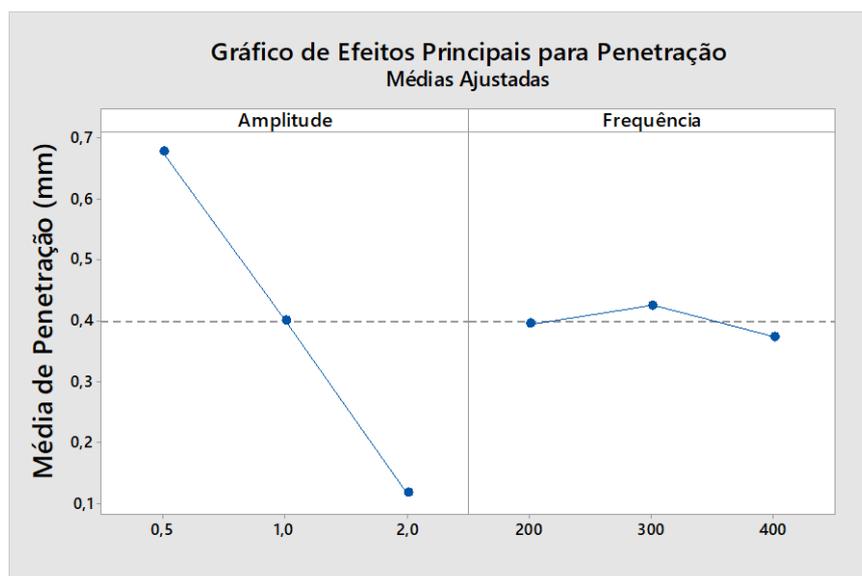


Figura 4.23 - Efeito dos parâmetros na penetração dos cordões em oscilação circular [Autor].

Outro parâmetro de saída analisado, além da penetração, foi a influência das variáveis de entrada na largura dos cordões. A amplitude de oscilação é diretamente proporcional à largura. Ao aumentar ou diminuir a amplitude, como esperado, a largura segue o mesmo comportamento. O gráfico de Pareto visto na Figura 4.24 mostra a influência do principal parâmetro na largura dos cordões.

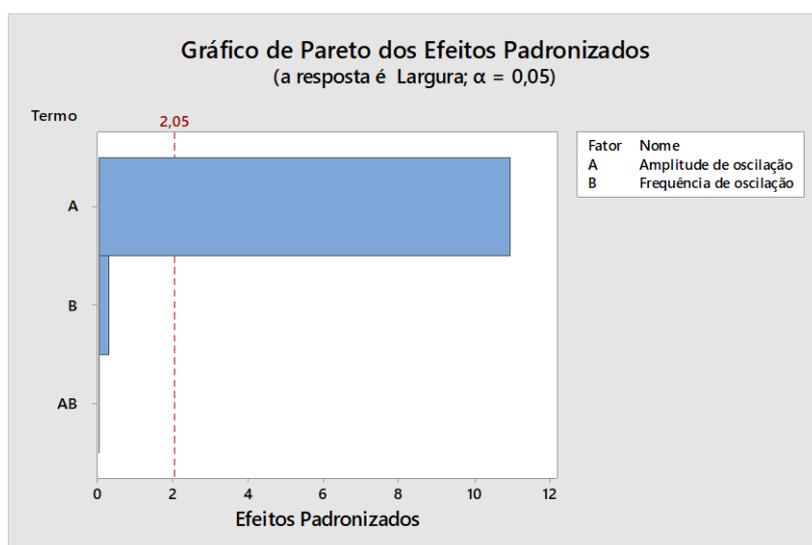


Figura 4.24 - Gráfico de Pareto da influência na largura oscilação circular [Autor].

Há uma maior influência no parâmetro de saída largura dos cordões com a variação da amplitude de oscilação do feixe. Tal característica é esperada, pois ao alterar os valores da amplitude, a área de varredura do feixe LASER muda, e com isso, a largura dos cordões acompanha os valores da amplitude.

O segundo fator mais significativo, a frequência do movimento circular, não possui influência na largura dos cordões, já que este parâmetro não altera de modo significativo o tamanho da área de varredura do feixe durante o processamento. Em um patamar também com baixa influência na largura está a interação dos parâmetros amplitude e frequência, onde os valores foram muito próximos, como apresentado pela Figura 4.25.

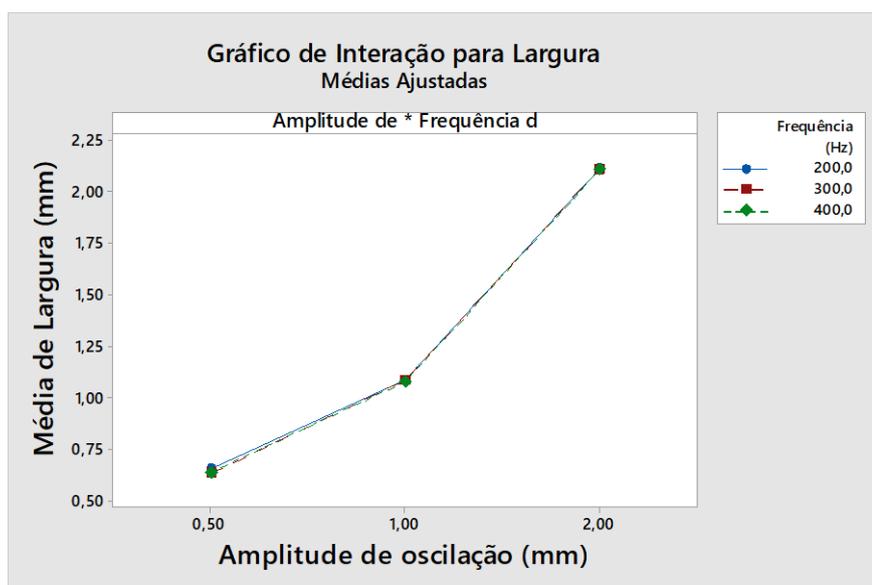


Figura 4.25 - Influência da interação dos parâmetros na largura em *wobble* circular [Autor].

O gráfico da Figura 4.26 apresenta maior magnitude do efeito causado pela amplitude de oscilação na largura em relação aos demais parâmetros. É possível observar que com o aumento da amplitude de oscilação, tem-se um aumento da média da largura dos cordões.

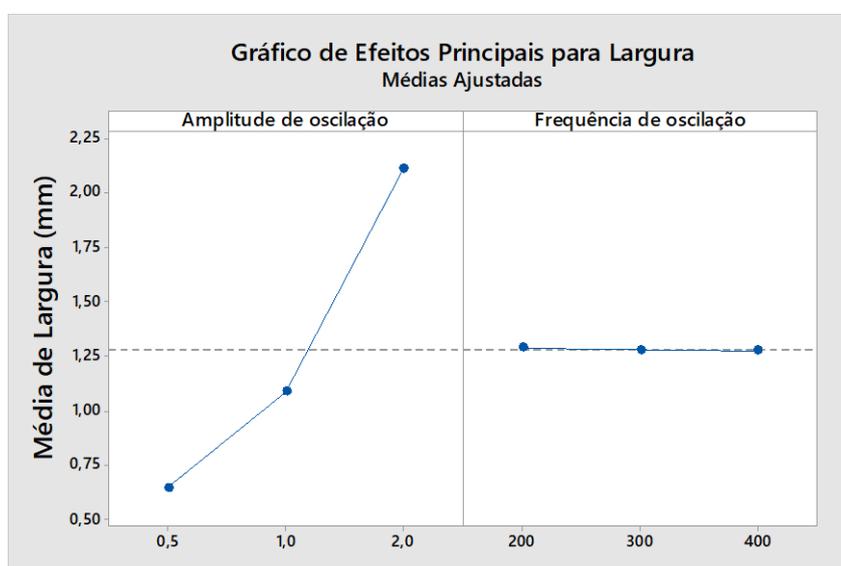


Figura 4.26 - Efeitos principais na largura dos cordões em geometria circular [Autor].

Ao alterar a geometria de oscilação para infinito, foi observado que o comportamento em relação a penetração se assemelha à oscilação circular, ou seja, houve uma redução da

penetração ao aumentar a amplitude de oscilação. Em uma amplitude de oscilação de 0,5 mm foi obtido uma penetração média de 0,6 mm, enquanto que em uma amplitude de 2 mm o valor da penetração média caiu para 0,08 mm. O gráfico de Pareto na Figura 4.27 exibe os fatores com maior influência na penetração dos cordões do feixe oscilante com geometria em infinito.

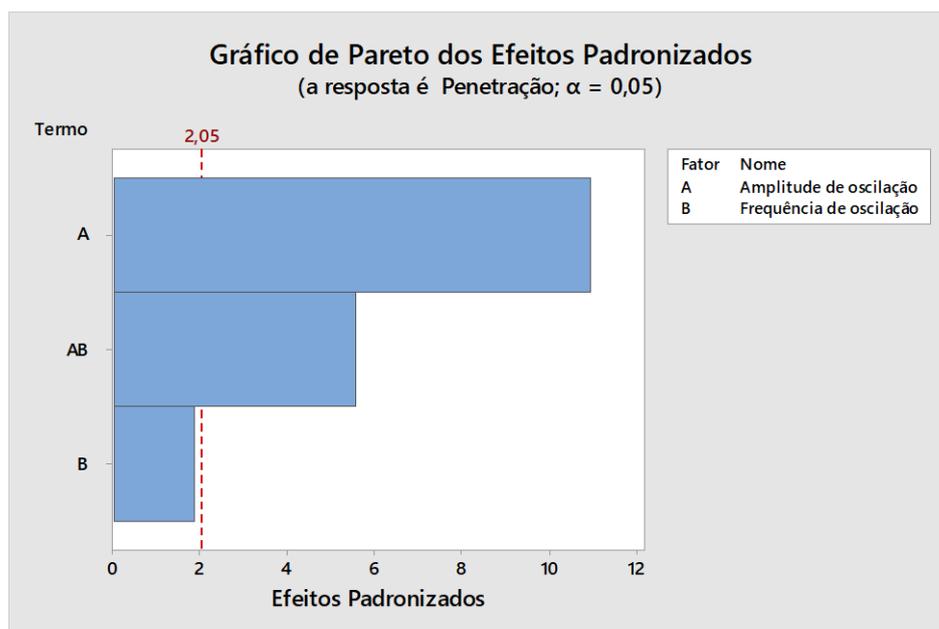


Figura 4.27 - Gráfico de Pareto da influência na penetração dos cordões em infinito [Autor].

O fator amplitude de oscilação, também teve maior influência na penetração com a oscilação com geometria em infinito, devido ao controle da distribuição de calor nos cordões. O segundo fator com maior significância foi a interação entre os parâmetros amplitude e frequência, como apresentado na Figura 4.28. Em um patamar menos significativo, se encontra a frequência de oscilação.

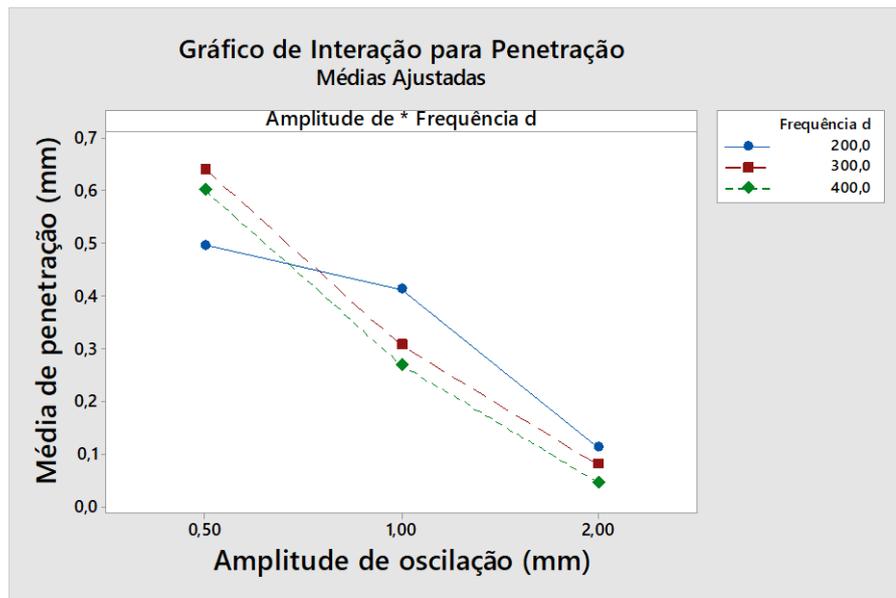


Figura 4.28 - Influência da interação dos parâmetros na penetração em oscilação infinito [Autor].

O gráfico da Figura 4.29 ilustra a magnitude da influência da amplitude de oscilação na penetração do cordão da microssolda com geometria em infinito.

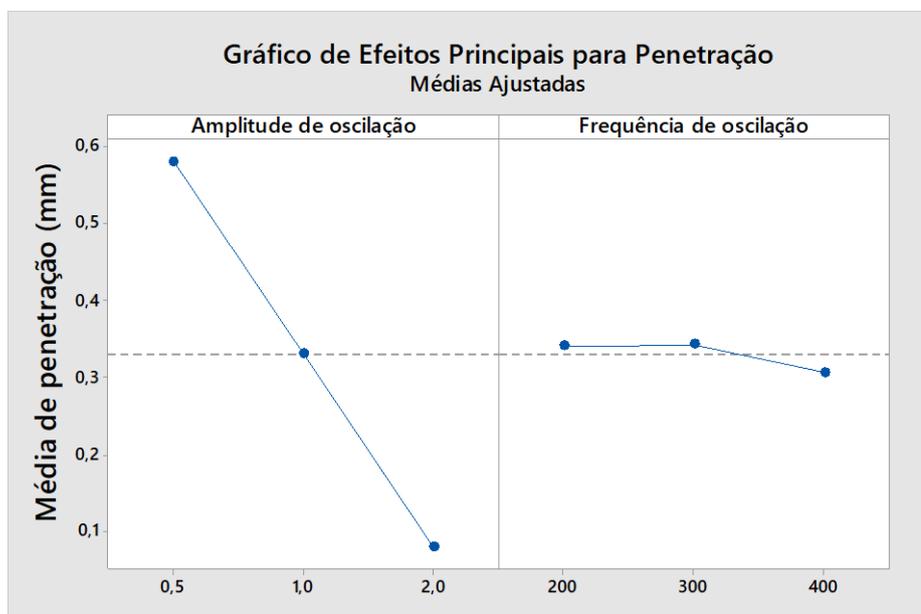


Figura 4.29 - Influência dos parâmetros na penetração com oscilação em infinito [Autor].

Há uma redução de aproximadamente 0,6 mm para menos de 0,1 mm de penetração ao aumentar o valor da amplitude de oscilação de 0,5 mm para 2 mm.

Outro fator também analisado na geometria em infinito foi a influência dos parâmetros na largura dos cordões. O gráfico de Pareto da Figura 4.30 mostra os principais parâmetros e seu grau de influência na largura dos cordões.

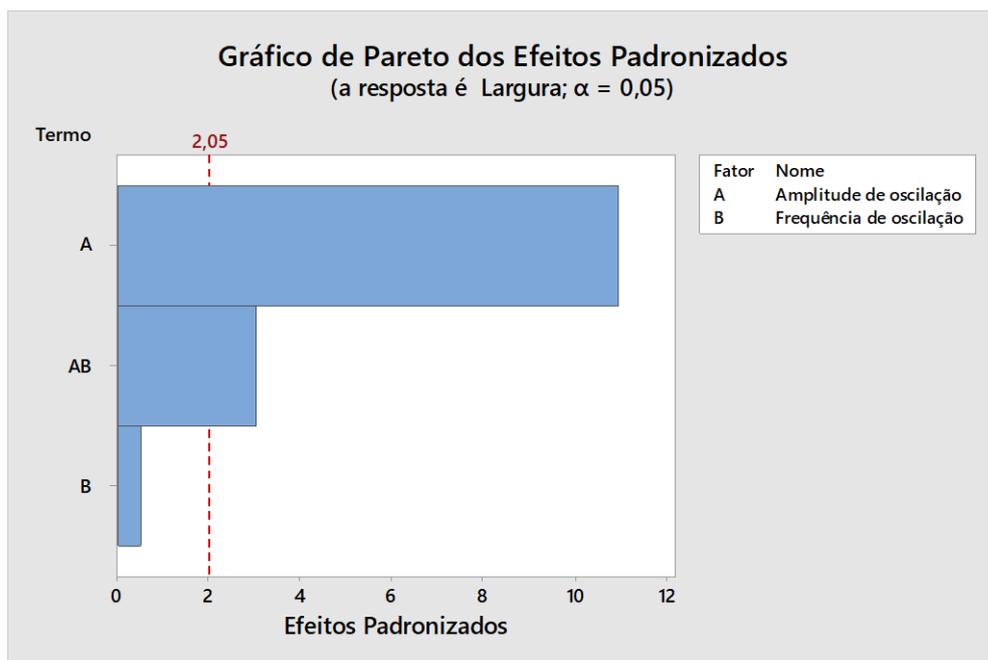


Figura 4.30 - Influência dos parâmetros na largura do cordão com geometria em infinito

[Autor].

De forma análoga ao ocorrido na geometria circular, a amplitude de oscilação foi o fator com maior influência na largura dos cordões, já que através deste parâmetro se determina a área que o feixe irá varrer sobre a amostra também para a geometria em infinito. Entretanto, um segundo fator significativo na largura dos cordões foi observado, o que não ocorreu na geometria circular, a interação dos parâmetros amplitude de oscilação e frequência de oscilação, como mostra a Figura 4.31.

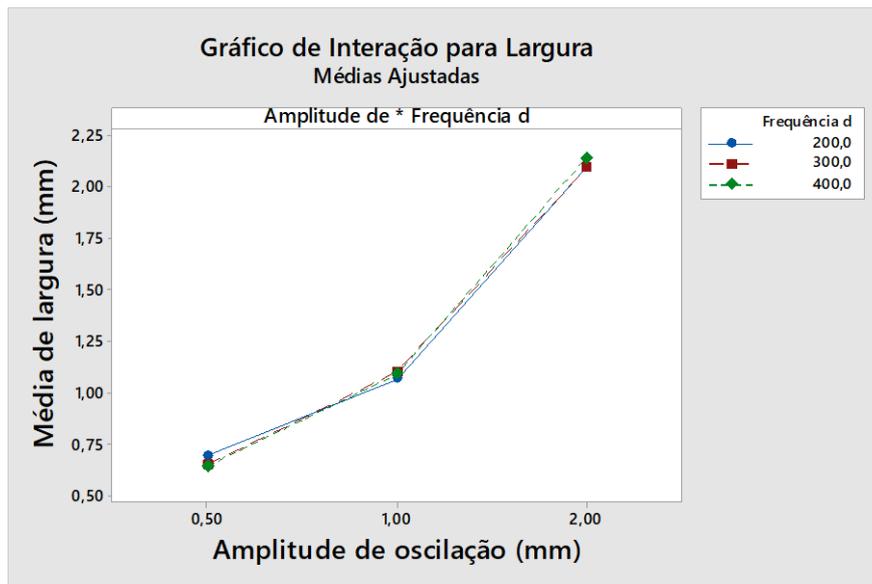


Figura 4.31 - Influência da interação dos parâmetros na largura com oscilação em infinito [Autor].

É possível observar na Figura 4.32 que ao aumentar a amplitude, a largura dos cordões também aumenta. Em um patamar sem influência significativa está a frequência de oscilação. O gráfico quantifica a influência de ambos os fatores na largura.

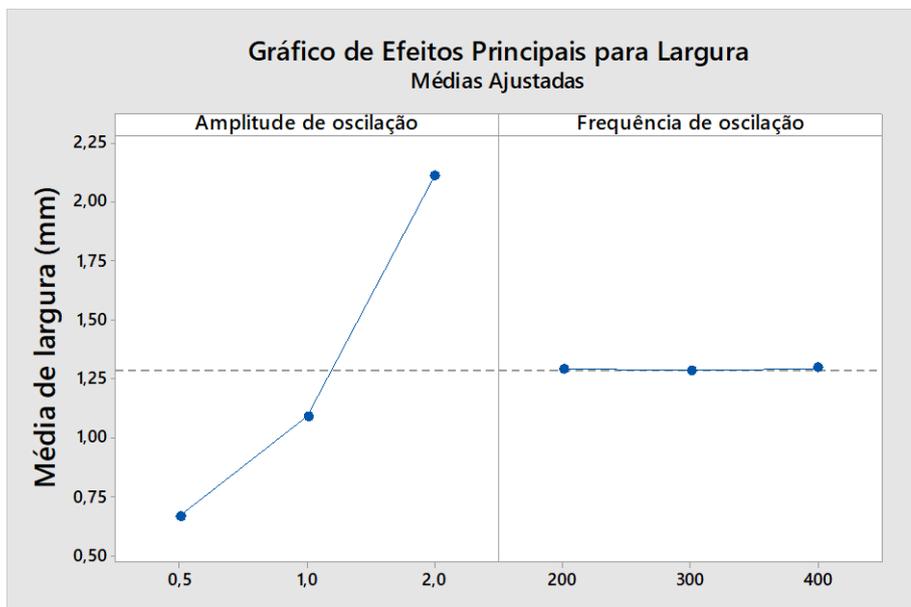


Figura 4.32 - Influência dos parâmetros na largura dos cordões em infinito [Autor].

(mm)

Em ambas geometrias de oscilação analisadas, a amplitude de oscilação teve influência significativa tanto na penetração, quanto na largura dos cordões. A frequência de oscilação não teve influência significativa em nenhuma das características analisadas.

Um comparativo do fator de saída penetração da oscilação circular e infinito mostrou que a geometria circular resultou em maiores valores de penetração nos cordões. A Figura 4.33 mostra este comparativo da penetração de ambas as geometrias analisadas.

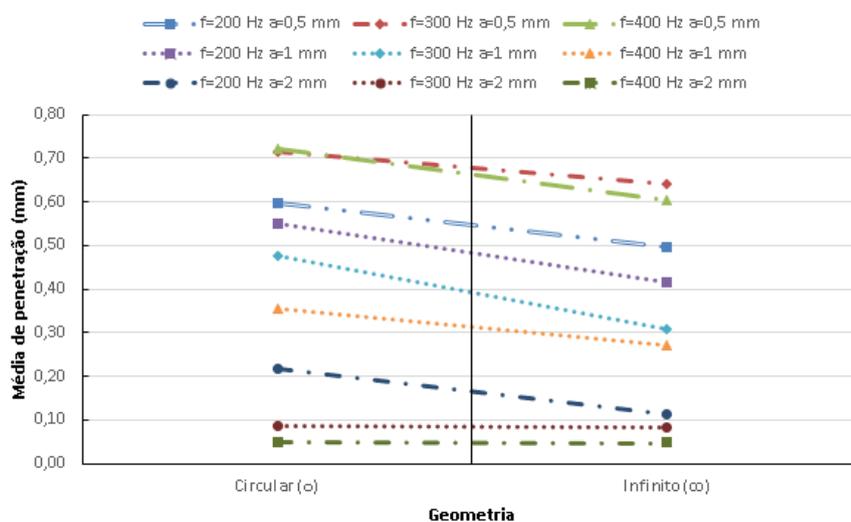


Figura 4.33 - Comportamento da penetração para movimentação do feixe na geometria de movimentação circular e “infinito” [Autor].

Através dos resultados obtidos de ambas as geometrias, foi observado que se pode alterar os valores da penetração sem necessariamente alterar o valor da potência. Com isso pode ser possível melhorar a eficiência do processo com a utilização de uma menor energia. Além de também reduzir discontinuidades com a diminuição do gradiente de temperatura na amostra. É possível verificar a porcentagem alterada dos valores de penetração com a variação da amplitude de oscilação em geometria circular e infinito nos gráficos da Figura 4.34 e Figura 4.35 respectivamente.

Ao variar a amplitude de oscilação de 0,5 mm para 1 mm, ocorreu uma redução de 32% na média da penetração. De 1 mm para 2 mm, houve uma redução de 74% na média da penetração. Analisando o intervalo total, variando o valor de 0,5 mm para 2 mm, houve uma

redução de 83% na média da penetração dos cordões em oscilação circular, conforme apresentado pelo gráfico da Figura 4.34.

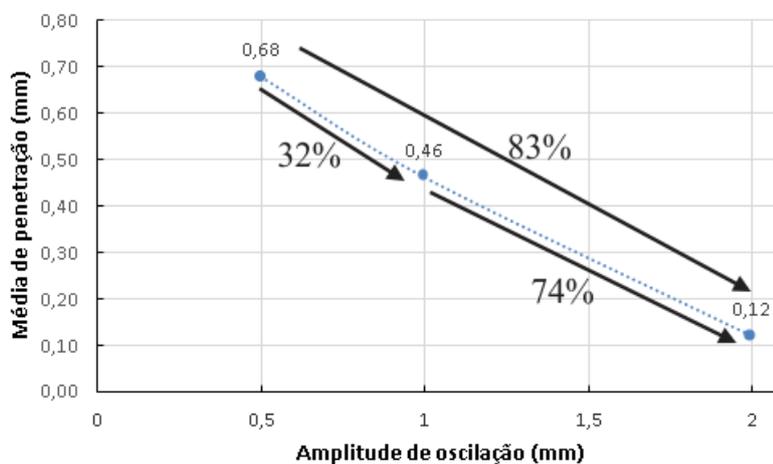


Figura 4.34 - Quantitativo da influência da amplitude na penetração em oscilação circular [Autor].

Em ambas geometrias, foi observado nos resultados anteriores, que é possível controlar a penetração da solda, através do parâmetro amplitude de oscilação. Este fato deve-se à alteração da área de emissão de energia ao mudar este parâmetro. Foi observado um aumento de 43% na penetração dos cordões ao alterar o valor da amplitude de 0,5 mm para 1 mm, 75% de 1 mm para 2 mm, e um aumento total de 86% ao alterar a amplitude de 0,5 mm para 2 mm na geometria em infinito, como apresentado no gráfico da Figura 4.35.

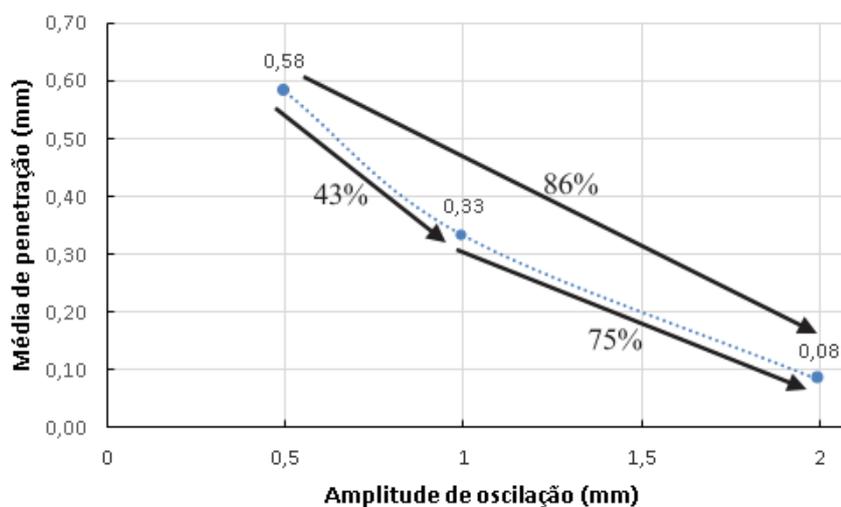


Figura 4.35 - Quantitativo da influência da amplitude na penetração com oscilação em infinito
[Autor].

4.4 Considerações finais

A modelagem do cálculo da velocidade instantânea permitiu conhecer o comportamento dinâmico do feixe LASER durante a trajetória em duas geometrias de oscilação distintas, circular e infinito. Com isso, foi possível realizar um mapeamento dos valores instantâneos e localizações das velocidades assumidas pelo feixe ao longo de toda trajetória.

Conhecer os valores e localizações das velocidades auxiliou no entendimento dos aspectos geométricos dos cordões obtidos, bem como prever as características da zona fundida, principalmente a penetração intermitente ao longo do mesmo cordão.

Foi possível quantificar a variação dos valores de velocidade instantânea em cada geometria, bem como identificar em qual oscilação foi a maior. Foi observado que a geometria em infinito apresentou a maior variação de temperaturas ao longo da extensão da ZF. As diferenças de velocidade influenciam de forma significativa na penetração dos cordões.

Outro aspecto que foi possível observar através da modelagem, foi a influência que a introdução da componente de translação causa nas velocidades. Houve comportamentos distintos para as duas geometrias analisadas. Na geometria circular, a velocidade instantânea do feixe permaneceu constante ao se retirar o vetor de translação. Foi observado através dos valores da Tabela 4.4 que, ao adicionar a componente de translação, a variação da velocidade assumiu o valor do vetor de translação.

Na geometria em infinito, foi observado um comportamento distinto ao da circular. Em nenhuma situação a velocidade instantânea do feixe permanece constante, ou seja, independentemente se introduz ou não a componente de translação no movimento, a velocidade apresenta uma grande variação em seus valores.

O maior valor de penetração foi obtido nas microssoldas realizadas sem a oscilação do feixe LASER. Em contrapartida, foi observado o maior surgimento de descontinuidades, como porosidades e respingos, devido ao *keyhole* se desestabilizar mais facilmente. Através dos ensaios preliminares foi possível observar influência da velocidade de soldagem na geometria da ZF. Em velocidades elevadas, a penetração da solda não foi suficiente.

Foi possível suprimir as descontinuidades com a utilização da oscilação do feixe. Houve uma redução dos respingos nas microssoldas com o aumento da frequência de oscilação em ambas as geometrias. Em um trabalho com a utilização da técnica de oscilação do feixe, ocorreu o contrário do observado. Yamazaki *et al.*[76] constataram um maior surgimento dos respingos ao aumentar a frequência de oscilação. Isso pode ser devido à maior potência utilizada no seu trabalho, que auxilia na estabilidade do capilar de *keyhole*, bem como o tipo de material utilizado, neste caso o aço carbono.

Ocorreram variações de penetração ao longo do cordão das duas geometrias analisadas, sendo mais evidente na oscilação em infinito. Isso ocorreu devido à maior variação dos valores de velocidade, e conseqüentemente, maior gradiente térmico nessa geometria. Essa variação foi representada pela Figura 4.14 e Figura 4.18.

Foi possível alterar a penetração através do ajuste da amplitude de oscilação, ocorrendo uma redução ao aumentar o valor de amplitude. Na geometria circular, houve uma redução de 32% ao aumentar a amplitude de 0,5 para 1 mm, 74% de 1 para 2 mm e um total de 83% de 0,5 para 2 mm, como representado nos gráficos da Figura 4.34. Na geometria em infinito ocorreu uma redução maior. Houve uma redução de 43% ao aumentar a amplitude de 0,5 para 1 mm, 75% de 1 para 2 mm e um total de 86% de 0,5 para 2 mm, como representado no gráfico da Figura 4.35.

Foram observadas maiores larguras dos cordões com oscilação em relação aos sem oscilação. Isso era esperado, pois ao aumentar a amplitude de oscilação do feixe aumenta a área de alcance de incidência da energia. Com isso, é possível trabalhar com fendas “*gaps*” maiores,

como relatado em [65], com resultados satisfatórios na soldagem em valores de fenda máxima de 450 μm .

Como representado pelo gráfico da Figura 4.33, a geometria que apresentou maior penetração foi a circular, devido apresentar valores menores de velocidade instantânea, para valores similares de amplitude de oscilação, frequência de oscilação, velocidade de translação e potência. Porém não atingiu a maior profundidade absoluta de soldagem.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente trabalho contribuiu para um melhor entendimento do modo de oscilação do feixe LASER na microssoldagem de aço inoxidável. Com base nos resultados obtidos é possível concluir o seguinte:

- Na microssoldagem sem oscilação do feixe, a interação entre a potência e velocidade de soldagem tem grande influência na penetração e características geométricas dos cordões. Para obter penetração total, para a geometria do substrato e configuração ótica usada, é necessário utilizar uma potência maior que 300 W e velocidade de soldagem abaixo de 50 mm/s. Uma microssolda livre de descontinuidades, com profundidade de 1,2 mm, pode ser obtida em uma potência de 300 W e velocidade de soldagem menor ou igual a 75 mm/s;
- A modelagem da velocidade instantânea de soldagem durante a oscilação permitiu correlacionar a influência dos valores da velocidade do feixe com as características geométricas da zona fundida, em ambas as geometrias de oscilação. Devido ao fato dos valores de velocidades instantâneas alterarem ao longo da geometria, houve uma penetração irregular nos cordões das duas geometrias, com regiões com menor penetração, e outras com maior penetração na mesma zona fundida;
- Devido à característica física do movimento circular, os valores de velocidade do feixe nas extremidades do cordão são diferentes. Com isso, foi observado menor simetria da zona fundida, com uma extremidade com maior penetração em relação à outra. Já na geometria em infinito, os valores de velocidade nas extremidades são semelhantes, resultando em uma zona fundida mais simétrica;
- A maior variação dos valores de velocidade instantânea ao longo da geometria foi observada na oscilação em infinito, como apresentado pela Tabela 4.4. A variação de maior magnitude, em relação à velocidade média, foi observada na amplitude de 2 mm e frequência de 400 Hz. Com valor médio de 7551 mm/s, a variação superior foi de 3711 mm/s e variação inferior de 4101 mm/s, enquanto na geometria circular, em todas as combinações dos parâmetros, a variação superior e inferior possuía os mesmos valores, 50 mm/s, que foi a velocidade de translação utilizada;

- A partir das duas geometrias de oscilação analisadas, a oscilação circular apresentou uma menor formação de respingos durante o processo, já que a poça fundida se manteve mais estável durante o processamento, em comparação com a oscilação em infinito;
- A oscilação do feixe LASER causou um impacto positivo no processo de microssoldagem. Nos cordões que apresentaram maior penetração, não foi observada a presença de porosidades. Sem a técnica *wobble*, os cordões apresentaram grande quantidade de descontinuidades, como pequenos poros e respingos causados pela instabilidade do *keyhole*;
- A amplitude de oscilação foi o parâmetro com maior influência, tanto na penetração, quanto na largura dos cordões das duas geometrias. Ao aumentar a amplitude, ocorreu uma redução drástica na penetração da solda, e aumento da largura dos cordões;
- Devido a menores valores de velocidade do feixe ao longo da trajetória, a geometria circular apresentou maior penetração que os cordões realizados na geometria em infinito;
- É conveniente soldar utilizando a técnica *wobble*, pois se for soldar em linha reta, sem a técnica *wobble*, e as duas juntas estiverem desalinhadas, não estiverem perfeitas, o feixe passará direto, ou seja, a peça não perceberá em momento algum que o LASER passou.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento do presente trabalho, foram observadas possíveis linhas de pesquisa que poderão contribuir com novas informações para esta dissertação. Pode-se destacar as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Aplicar o procedimento estudado com a técnica de oscilação do feixe LASER para microssoldagem em diferentes tipos de união como topo, sobreposta, em junta T, etc;
- Realizar a microssoldagem com feixe oscilante variando outros parâmetros operacionais como potência, velocidade de translação, posição focal. Analisar outros valores de amplitude e frequência de oscilação;

- Realizar análises complementares nas amostras realizadas (ou futuros ensaios), a fim de obter informações completas dos cordões de solda, como microdureza, composição química localizada, ensaio de tração torção e fadiga, por exemplo;
- Realizar a microssoldagem com feixe oscilante de diferentes materiais (cobre, alumínio), união entre materiais dissimilares;
- Mensurar e alterar a rugosidade das superfícies das amostras que serão soldadas, visto que esta possui influência direta na absorvidade do feixe. Avaliar sua influência no processo, a fim de se obter maior penetração do *keyhole*;
- Realizar melhoria do modelo desenvolvido aprimorando, por exemplo, um algoritmo que considera a distribuição de densidade de energia ao longo da amostra;
- Avaliar diferentes tipos de geometria de oscilação do feixe LASER, comparando seus resultados com a modelagem;
- Realizar filmagem do processo utilizando câmera de alta velocidade, a fim de visualizar e compreender os fenômenos causados pelo feixe oscilante na superfície da poça fundida, bem como comprovar a velocidade instantânea real do feixe;
- Realizar filmagem termográfica para avaliar a temperatura da superfície do cordão, verificando a influência da técnica *wobble* na temperatura.

REFERÊNCIAS

- [1] SHCHERBAKOV, E.; FOMIN, V.; ABRAMOV, A.; FERIN, A.; MOCHALOV, D.; GAPONTSEV, V. P. Industrial grade 100 kW power CW fiber laser. *In: Advanced Solid State Lasers*, 2013, Optical Society of America, p. ATh4A. 2.
- [2] STEEN, W. M. **Laser Material Processing**. Springer, 2003.
- [3] SEMAK, V. V.; KNOROVSKY, G. A.; MACCALLUM, D. O. On the possibility of microwelding with laser beams. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 36, n. 17, p. 2170-2174, 2003.
- [4] UENISHI, K.; SEKI, M.; KUNIMASA, T.; TAKATSUGU, M.; KOBAYASHI, K. F.; IKEDA, T.; TSUBOI, A. YAG laser micro welding of stainless steel and shape memory alloy. 2003.
- [5] VENTRELLA, V. A.; BERRETTA, J. R.; DE ROSSI, W. Pulsed Nd:YAG Laser Welding of Ni-Alloy Hastelloy C-276 Foils. **Physics Procedia**, v. 39, p. 569-576, 2012.
- [6] VENTRELLA, V. A.; BERRETTA, J. R.; DE ROSSI, W. Micro Welding of Ni-based Alloy Monel 400 Thin Foil by Pulsed Nd:YAG laser. **Physics Procedia**, v. 12, p. 347-354, 2011.
- [7] VENTRELLA, V. A.; BERRETTA, J. R.; DE ROSSI, W. Pulsed Nd:YAG laser seam welding of AISI 316L stainless steel thin foils. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 14, p. 1838-1843, 2010.
- [8] DAS NEVES, M. C. D. M.; LOTTO, A.; BERRETTA, J. R.; DE ROSSI, W.; JÚNIOR, N. D. V. Microstructure development in Nd:YAG laser welding of AISI 304 and Inconel 600. **Welding International**, v. 24, n. 10, p. 739-748, 2010.
- [9] BAI, Y.; MOMOTANI, Y.; CHEN, M. C.; SHIBATA, A.; TSUJI, N. Effect of grain refinement on hydrogen embrittlement behaviors of high-Mn TWIP steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 651, p. 935-944, 2016.
- [10] WEI, Y.; LI, Y.; ZHU, L.; LIU, Y.; LEI, X.; WANG, G.; WU, Y.; MI, Z.; LIU, J.; WANG, H.; OTHERS. Evading the strength--ductility trade-off dilemma in steel through gradient hierarchical nanotwins. **Nature communications**, v. 5, p. 3580-3580, 2014.
- [11] GILLNER, A.; HOLTkamp, J.; HARTMANN, C.; OLOWINSKY, A.; GEDICKE, J.; KLAGES, K.; BOSSE, L.; BAYER, A. Laser applications in microtechnology. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 167, n. 2-3, p. 494-498, 2005.

- [12] ABE, N.; FUNADA, Y.; IMANAKA, T.; TSUKAMOTO, M. Micro welding of thin stainless steel foil with a direct diode laser. **Transactions of JWRI**, v. 34, n. 1, p. 19-23, 2005.
- [13] ISMAIL, M. I. S.; OKAMOTO, Y.; OKADA, A.; UNO, Y. Experimental investigation on micro-welding of thin stainless steel sheet by fiber laser. **American Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 4, n. 3, p. 314-320, 2011.
- [14] DAHOTRE, N. B.; HARIMKAR, S. **Laser fabrication and machining of materials**. Springer Science & Business Media, 2008.
- [15] READY, J. F. **Industrial Applications of Lasers**. ACADEMIC PR INC, 1997.
- [16] SVELTO, O. **Principles of Lasers (Library)**. Springer, 2009.
- [17] SIEGMAN, A. E. **Lasers (Revised)**. UNIVERSITY SCIENCE BOOKS, 1986.
- [18] OLSEN, F. O. Theoretical investigations in the fundamental mechanisms of high intensity laser light reflectivity. v. 1020, p. 114-123, 1989.
- [19] HITZ, C. B.; EWING, J. J.; HECHT, J. **Introduction to laser technology**. John Wiley & Sons, 2012.
- [20] SCINTILLA, L. D.; TRICARICO, L. Experimental investigation on fiber and CO2 inert gas fusion cutting of AZ31 magnesium alloy sheets. **Optics & Laser Technology**, v. 46, p. 42-52, 2013.
- [21] QUINTINO, L.; COSTA, A.; MIRANDA, R.; YAPP, D.; KUMAR, V.; KONG, C. J. Welding with high power fiber lasers – A preliminary study. **Materials & Design**, v. 28, n. 4, p. 1231-1237, 2007.
- [22] WILLIAM STEEN, J. M. **Laser Material Processing**. Springer London, 2010.
- [23] MAJUMDAR, J. D.; MANNA, I. Laser processing of materials. **Sadhana**, v. 28, n. 3-4, p. 495-562, 2003.
- [24] SOMONOV, V. Prospects of Introduction of Fiber Lasers for Laser Heat Treatment of Ferrous Metals. **OALib**, v. 01, n. 08, p. 1-4, 2014.
- [25] HECHT, J. Fiber lasers: the state of the art. **Laser Focus World**, v. 48, n. 4, p. 57-60, 2012.
- [26] INJEYAN, H.; GOODNO, G. D. **High power laser handbook**. McGraw-Hill Professional New York, 2011.
- [27] LIU, Z.; JIN, X.; SU, R.; MA, P.; ZHOU, P. J. S. C. I. S. Development status of high power fiber lasers and their coherent beam combination. v. 62, n. 4, p. 41301, 2019.

- [28] HECHT, J. High-Power Fiber Lasers. **Optics & Photonics News**, v. 29, 2018.
- [29] PHOTONICS, I. IPG Photonics fiber-laser. 2019.
- [30] SUDER, W. Study of fundamental parameters in hybrid laser welding. 2011.
- [31] ION, J. **Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application**. Elsevier, 2005.
- [32] STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. **Laser welding**. Springer, 2010. p. 199-249.
- [33] BAUMBACH, N.; KÜHL, P.; KARAM, J.; JONKERS, J.; VILLARREAL-SAUCEDO, F.; REYES, M. A cutting-edge solution for 1 μ m laser metal processing. *In: High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems VI*, SPIE, 2017/02.
- [34] CHARSECHAN, S. S. **Guide to laser materials processing**. Laser Institute of America, 1993.
- [35] DULEY, W. W. **Laser Welding**. Wiley-Interscience, 1998.
- [36] PIRZIO, F. **Solid State Lasers Materials, Technologies and Applications**. MDPI AG, 2018.
- [37] MEUNIER, M.; HOLMES, A. S.; NIINO, H.; GU, B. **Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing VII (Proceedings of Spie)**. Society of Photo Optical, 2009.
- [38] DEARDEN, G. Recent advances in laser micro welding, soldering and bonding. **Laser in Manufacturing**, p. 615-623, 2005.
- [39] FREWIN, M. R.; SCOTT, D. A. Finite element model of pulsed laser welding. **WELDING JOURNAL-NEW YORK-**, v. 78, p. 15-s, 1999.
- [40] MIYAMOTO, I.; PARK, S.-J.; OOIE, T. Ultrafine-keyhole welding process using single-mode fiber laser. *In: International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Laser Institute of America, 2003.
- [41] NAEEM, M.; COLLINS, P. Micro welding of thin metals with low power pulsed Nd: YAG laser. *In: International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Laser Institute of America, 2005.
- [42] HE, X.; FUERSCHBACH, P. W.; DEBROY, T. Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 36, n. 12, p. 1388-1398, 2003.

- [43] POPRAWE, R. **Tailored Light 2**. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [44] KANNATEY-ASIBU JR, E. **Principles of laser materials processing**. John Wiley & Sons, 2009.
- [45] MARTINSON, P.; DANESHPOUR, S.; KOÇAK, M.; RIEKEHR, S.; STARON, P. Residual stress analysis of laser spot welding of steel sheets. **Materials & Design**, v. 30, n. 9, p. 3351-3359, 2009.
- [46] BENTER, C.; PETRING, D.; POPRAWE, R. Investigation of the transition from heat conduction to deep penetration welding with high power diode lasers. **Proceedings of Lasers in Manufacturing**, v. 3, p. 67-72, 2005.
- [47] CARMIGNANI, C.; MARES, R.; TOSELLI, G. Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a singlepass butt-welded thick steel plate. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 179, n. 3-4, p. 197-214, 1999.
- [48] DOWDEN, J.; DAVIS, M.; KAPADIA, P. The flow of heat and the motion of the weld pool in penetration welding with a laser. **Journal of Applied Physics**, v. 57, n. 9, p. 4474-4479, 1985.
- [49] HEYDEN, J.; NILSSON, K.; MAGNUSSON, C. Laser welding of zinc coated steel. *In*: Proceedings of the 6th International Conference on Lasers in Manufacturing, 1989. p. 93-104.
- [50] **Instrument Engineers Handbook, Volume Three**. CRC Press, 2002.
- [51] KAI, L. I.; FENG-GUI, L. U.; SONG-TAO, G. U. O.; HAI-CHAO, C. U. I.; XIN-HUA, T. A. N. G. Porosity sensitivity of A356 Al alloy during fiber laser welding. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 25, n. 8, p. 2516-2523, 2015.
- [52] DEYEV, G. F. **Surface phenomena in fusion welding processes**. cRc Press, 2005.
- [53] KIATTIWONGSE, W.; KHANTACHAWANA, A.; SANTIWONG, P. Effect of Direct Electric Resistance Heat Treatment on Mechanical Properties of NiTi Orthodontic Arch Wires. **Advanced Materials Research**, v. 55-57, p. 249-252, 2008.
- [54] SOMMER, M.; WEBERPALS, J.-P.; MÜLLER, S.; BERGER, P.; GRAF, T. J. J. O. L. A. Advantages of laser beam oscillation for remote welding of aluminum closely above the deep-penetration welding threshold. v. 29, n. 1, p. 012001, 2017.
- [55] FETZER, F.; SOMMER, M.; WEBER, R.; WEBERPALS, J.-P.; GRAF, T. J. O.; ENGINEERING, L. I. Reduction of pores by means of laser beam oscillation during remote welding of AlMgSi. v. 108, p. 68-77, 2018.

- [56] KRAETZSCH, M.; STANDFUSS, J.; KLOTZBACH, A.; KASPAR, J.; BRENNER, B.; BEYER, E. Laser Beam Welding with High-Frequency Beam Oscillation: Welding of Dissimilar Materials with Brilliant Fiber Lasers. **Physics Procedia**, v. 12, p. 142-149, 2011.
- [57] REITER, M. J.; CHO, J.; FARSON, D. F.; MEHL, M. Analysis and control of penetration depth fluctuations in single-mode fiber laser welds. *In: International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Laser Institute of America, 2009.
- [58] RUBBEN, K.; MOHRBACHER, H.; LEIRMAN, E. titleAdvantages of using an oscillating laser beam for the production of tailored blanks/title. *In: Lasers in Material Processing*, SPIE, 1997/08.
- [59] SCHMIDT, P. A.; SCHWEIER, M.; ZAEH, M. F. Joining of lithium-ion batteries using laser beam welding: Electrical losses of welded aluminum and copper joints. *In: International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Laser Institute of America, 2012.
- [60] BABU, N. K.; RAMAN, S. G. S.; MURTHY, C. V. S.; REDDY, G. M. Effect of beam oscillation on fatigue life of Ti-6Al-4V electron beam weldments. **Materials Science and Engineering: A**, v. 471, n. 1-2, p. 113-119, 2007.
- [61] MARTUKANITZ, R. P.; STOL, I.; TRESSLER, J. F.; WARREN, C. J. Development of the laser stir welding process for aluminum laser beam welding. *In: International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Laser Institute of America, 2005.
- [62] SPILASERS. Wobble welding method. **Disponível em:** <<https://www.spilasers.com>>.
- [63] MIYAGI, M.; ZHANG, X.; KAWAHITO, Y.; KATAYAMA, S. Surface void suppression for pure copper by high-speed laser scanner welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 240, p. 52-59, 2017.
- [64] GEDICKE, J.; OLOWINSKY, A.; ARTAL, J.; GILLNER, A. Influence of temporal and spatial laser power modulation on melt pool dynamics. *In: International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Laser Institute of America, 2007.
- [65] PHOTONICS, I. P. G. Wobble heads - The Benefits of Wobble Welding Compared to Conventional Welding Methods. **Wobble Process Heads Brochure**,
- [66] HAEUSLER, A.; SCHÜRMAN, A.; SCHÖLER, C.; OLOWINSKY, A.; GILLNER, A.; POPRAWE, R. Quality improvement of copper welds by laser microwelding with the usage of spatial power modulation. **Journal of Laser Applications**, v. 29, n. 2, p. 022422-022422, 2017.
- [67] LASLĂU, R.; BOBOESCU, R. Laser beam defocusing effects on laser welds surfaces. 2011.

- [68] SENATORE, M.; FINZETTO, L.; PEREA, E. Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 1, p. 175-181, 2007.
- [69] SILVEIRA, C. A. **Análise da movimentação síncrona e simultânea entre scanner galvanométrico e eixos lineares em aplicações laser**. 2019. - Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, 2019.
- [70] 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.
- [71] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S.; STANLEY, P. J. P., VOLUME 1, BY DAVID HALLIDAY, ROBERT RESNICK, KENNETH S. KRANE, PP. 624. ISBN 0-471-32057-9. WILEY-VCH, MARCH . Physics, Volume 1. p. 624, 2001.
- [72] BRANDÃO, E. **Acústica de salas: projeto e modelagem**. Editora Blucher, 2018. ISBN 8521210078.
- [73] SCHWEIER, M.; HEINS, J.; HAUBOLD, M.; ZAEH, M. J. P. P. Spatter formation in laser welding with beam oscillation. v. 41, p. 20-30, 2013.
- [74] WANG, Z.; OLIVEIRA, J.; ZENG, Z.; BU, X.; PENG, B.; SHAO, X. J. O.; TECHNOLOGY, L. Laser beam oscillating welding of 5A06 aluminum alloys: Microstructure, porosity and mechanical properties. v. 111, p. 58-65, 2019.
- [75] PATSCHGER, A.; BLIEDTNER, J.; BERGMANN, J. P. Process-limiting Factors and Characteristics of Laser-based Micro Welding. **Physics Procedia**, v. 56, p. 740-749, 2014. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.081.
- [76] YAMAZAKI, Y.; ABE, Y.; HIOKI, Y.; NAKATANI, M.; KITAGAWA, A.; NAKATA, K. J. W. I. Fundamental study of narrow-gap welding with oscillation laser beam. v. 30, n. 9, p. 699-707, 2016.

APÊNDICE A – TABELA

Nome Ensaio	Tensão selecionada	Potência	Velocidade de soldagem
	V	W	mm/s
A1	9,981	400	1150,00
A2	9,981	400	1050,00
A3	9,981	400	950,00
A4	9,981	400	850,00
A5	9,981	400	750,00
A6	9,981	400	650,00
A7	9,981	400	550,00
A8	9,981	400	450,00
A9	9,981	400	350,00
A10	9,981	400	250,00
A11	9,981	400	150,00
A12	9,981	400	50,00
B1	7,643	300	300,00
B2	7,643	300	275,00
B3	7,643	300	250,00
B4	7,643	300	225,00
B5	7,643	300	200,00
B6	7,643	300	175,00
B7	7,643	300	150,00
B8	7,643	300	125,00
B9	7,643	300	100,00
B10	7,643	300	75,00
B11	7,643	300	50,00
B12	7,643	300	25,00
C1	5,306	200	150,00
C2	5,306	200	137,50
C3	5,306	200	125,00
C4	5,306	200	112,50
C5	5,306	200	100,00
C6	5,306	200	87,50
C7	5,306	200	75,00
C8	5,306	200	62,50
C9	5,306	200	50,00
C10	5,306	200	37,50
C11	5,306	200	25,00
C12	5,306	200	12,50

D1	2.969	100	150,00
D2	2.969	100	137,50
D3	2.969	100	125,00
D4	2.969	100	112,50
D5	2.969	100	100,00
D6	2.969	100	87,50
D7	2.969	100	75,00
D8	2.969	100	62,50
D9	2.969	100	50,00
D10	2.969	100	37,50
D11	2.969	100	25,00
D12	2.969	100	12,50

APÊNDICE B – CÓDIGO PYTHON

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib import ticker
# Inicialização de variáveis
fx = 200
fy = fx
N = 500
dt = 1/(fx*N)
Ax = 0.5
Ay = 0.5
Vx1 = 50
Vy1 = 0
Sx0 = 0
Sy0 = 0
Nciclos = 4
t = np.linspace(0, (1/fx)*Nciclos ,N)

# Calcula vetores de posição em função do tempo
Sx = Ax*np.sin(2*np.pi*fx*t) + Vx1*t
Sy = Ay*np.cos(2*np.pi*fy*t) + Vy1*t

# Calcula vetores de velocidade em função do tempo
Vx = Ax*2*np.pi*fx*np.cos(2*np.pi*fx*t) + Vx1
Vy = -Ay*2*np.pi*fy*np.sin(2*np.pi*fy*t) + Vy1
```

```
Vr = np.sqrt(Vx**2 + Vy**2)

plt.scatter(Sx, Sy, c=Vr, cmap='jet', alpha = 0.5, s = 900) # Check colormaps:
https://matplotlib.org/3.1.1/tutorials/colors/colormaps.html

cb = plt.colorbar()

tick_locator = ticker.MaxNLocator(nbins=7)

cb.locator = tick_locator

cb.update_ticks()

plt.axis('equal')

plt.show()
```

APÊNDICE C – CORDÕES DE SOLDA SEM A TÉCNICA *WOBBLE*