UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Elton Eduardo Fissmer

Investigação Experimental dos Fenômenos de Formação e Estabilidade da Poça de Fusão em Modo *Keyhole* na Soldagem a Laser do aço AISI 304

Joinville
2026

Elton Eduardo Fissmer

Investigação Experimental dos Fenômenos de Formação e Estabilidade da Poça de Fusão em Modo *Keyhole* na Soldagem a Laser do aço AISI 304

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Materiais.

Orientador: Prof. Tiago Vieira da Cunha, Dr.

Joinville

2026

Fissmer, Elton Eduardo
Investigação Experimental dos Fenômenos de Formação e Estabilidade da Poça de Fusão em Modo Keyhole na Soldagem a Laser do aço AISI 304 / Elton Eduardo Fissmer ; orientador, Tiago Vieira da Cunha, 2026.
166 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2026.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Soldagem a laser. 3. Modo Keyhole. 4. Aço Inoxidável AISI 304. 5. Quasi-Keyhole. I. da Cunha, Tiago Vieira. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. III. Título.

Elton Eduardo Fissmer

Investigação Experimental dos Fenômenos de Formação e Estabilidade da Poça de Fusão em Modo *Keyhole* na Soldagem a Laser do aço AISI 304

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 08 de dezembro de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Karen Johanna Quintana Cuellar, Dr.(a)
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof. Luiz Eduardo dos Santos Paes, Dr.
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Prof. Erick Cardoso Costa, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Materiais.

ICP-Edu
Documento assinado digitalmente
Roberto Simoni
Data: 10/02/2026 15:30:19-0300
CPF: ***.398.969-**
Verifique as assinaturas em https://v.ufsc.br

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

ICP-Edu
Documento assinado digitalmente
Tiago Vieira da Cunha
Data: 10/02/2026 14:02:34-0300
CPF: ***.054.449-**
Verifique as assinaturas em https://v.ufsc.br

Prof. Tiago Vieira da Cunha, Dr.
Orientador

Joinville, 2026.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer e dedicar este trabalho às seguintes pessoas:

À minha esposa, amiga e companheira Maria Leticia Fissmer Gerloff, minha mais profunda gratidão. Agradeço por seu apoio incondicional, pela compreensão durante as longas horas de ausência e pela paciência infinita nos momentos mais difíceis.

À minha mãe, Jolita Cristina Fissmer, por seus conselhos, que moldaram meu caráter e meus princípios, e pela confiança que me deu para chegar a este momento. Sou eternamente grato por sua força em ser mãe e pai ao mesmo tempo, sempre lutando para me oferecer o melhor caminho.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Tiago Vieira da Cunha, por ir além da orientação técnica. Sou grato por cada direcionamento que aprimorou este trabalho, mas principalmente por ter me inspirado a desenvolver um olhar mais aguçado e crítico, fundamental para minha formação como pesquisador.

Ao Instituto SENAI de Inovação pela oportunidade de alavancar minha carreira e me preparado para este trabalho. Em especial aos colegas que com sua amizade e colaboração tornaram a jornada muito mais leve, meu muito obrigado. Um agradecimento especial a Natália Wendt Dreveck, pela orientação e aprendizados desde o início da minha trajetória na pesquisa, e a Henrique Nardon Ferraressi e Guilherme de Faveri, pelas discussões que tanto enriqueceram este trabalho. A todos os demais que, de alguma forma, participaram deste ciclo, minha sincera gratidão.

Aos meus amigos, os de longa data e os que esta jornada me trouxe, por todos os momentos de apoio e descontração que compartilhamos. Um agradecimento especial a Amauri Igor Cortez, um irmão que a vida me deu.

E a mim, pela resiliência. Por ter transformado os desafios em aprendizado e por não ter perdido de vista os objetivos e sonhos que me trouxeram até aqui. A jornada foi longa, mas a missão foi cumprida.

Seja curioso, não julgador.

Walt Whitman

RESUMO

Este trabalho investiga experimentalmente os mecanismos de instabilidade do *keyhole* e a dinâmica da poça de fusão na soldagem a laser do aço inoxidável AISI 304, e como estes fenômenos (governados pelos parâmetros de processo e gás de proteção) impactam a morfologia, dimensão e integridade do cordão de solda. Inicialmente, a utilização de argônio como gás de proteção resultou em porosidade, causada pela instabilidade do *keyhole*. A substituição por nitrogênio eliminou de forma efetiva as descontinuidades, uma melhoria atribuída às distintas propriedades físico-químicas dos gases e à alta solubilidade do nitrogênio no aço líquido. Utilizando o processo sem descontinuidades com nitrogênio, o estudo correlacionou a dinâmica da poça de fusão com a morfologia e as dimensões do cordão de solda e da poça de fusão. As principais descobertas incluíram a comprovação de que a energia de soldagem é um parâmetro insuficiente, visto que condições de idêntica energia produziram resultados físicos e morfológicos opostos. Adicionalmente, foi proposto um novo regime híbrido, o Modo *Quasi-Keyhole*, baseado em uma contradição experimental entre as métricas de eficiência de fusão e a estabilidade visual da poça de fusão em 1 kW de potência do laser. Por fim, foram identificadas e quantificadas instabilidades dinâmicas, como a queda de eficiência por absorção da pluma de plasma através do mecanismo de *Bremsstrahlung* Inversa e uma oscilação periódica do comprimento da poça de fusão, que foi diretamente correlacionada à formação de irregularidades no cordão de solda. O trabalho estabelece, portanto, as correlações diretas entre as instabilidades dinâmicas e a morfologia final, propondo um novo regime de processo para a soldagem a laser.

Palavras-chave: variáveis de processo; soldagem a laser; aço inoxidável AISI 304; modo *keyhole*; porosidade; *quasi-keyhole*.

ABSTRACT

This work experimentally investigates the keyhole instability mechanisms and the melt pool dynamics in the laser welding of AISI 304 stainless steel, and how these phenomena (governed by process parameters and shielding gas) impact the morphology, dimensions, and integrity of the weld bead. Initially, the use of argon as a shielding gas resulted in porosity, caused by keyhole instability. The substitution with nitrogen effectively eliminated the discontinuities, an improvement attributed to the distinct physicochemical properties of the gases and the high solubility of nitrogen in the molten steel. Using the discontinuity-free process with nitrogen, the study correlated the melt pool dynamics with the morphology and dimensions of the weld bead and the melt pool. The main findings included the confirmation that welding energy is an insufficient parameter, since conditions of identical energy produced opposite physical and morphological results. Additionally, a new hybrid regime was proposed, the Quasi-Keyhole Mode, based on an experimental contradiction between the melting efficiency metrics and the visual stability of the melt pool at 1 kW of laser power. Finally, dynamic instabilities were identified and quantified, such as the efficiency drop due to plasma plume absorption through the Inverse Bremsstrahlung mechanism and a periodic oscillation of the melt pool length, which was directly correlated to the formation of irregularities in the weld bead. Therefore, the work establishes the direct correlations between the dynamic instabilities and the final morphology, proposing a new process regime for laser welding.

Keywords: process variables; laser welding; AISI 304 stainless steel; *keyhole* mode; porosity; stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Princípio de funcionamento do laser de disco. 21
Figura 2 - Variáveis de um feixe gaussiano.....22
Figura 3 – Distribuição de diferentes comprimentos de onda utilizados para processamento de materiais metálicos. 23
Figura 4 – Principais interações do feixe laser com a superfície metálica. 24
Figura 5 - Ilustração esquemática das reflexões que decorrem no interior do *keyhole*. 24
Figura 6 - Efeito da temperatura da superfície no coeficiente de acoplamento do laser ou na absortividade do material 25
Figura 7 - Parâmetros ópticos envolvidos no feixe laser. 26
Figura 8 - Comparação entre a intensidade de diferentes processos de soldagem..27
Figura 9 - Transição entre o modo condução e o modo *keyhole*.....28
Figura 10 – Macrografias dos modos de operação. 29
Figura 11 – Diagrama esquemático do processo de mudança do modo de soldagem. 30
Figura 12 - Seção transversal de cordões de solda de aço inoxidável tipo 304 com diferentes potências do laser.....31
Figura 13 – Variação do perfil de penetração do cordão de solda em função da potência do laser. 32
Figura 14 - Penetração em função da velocidade de soldagem e da potência do laser. 32
Figura 15 - Efeito de diferentes velocidades de soldagem na geometria e dinâmica do cordão de solda. 33
Figura 16 – Morfologia da poça de fusão em chapas de aço inoxidável AISI 304 no processo GTAW. 34
Figura 17 - Influência da posição do foco na geometria do cordão de solda. 34
Figura 18 - Comparação de condições de foco de feixe, seções transversais de cordões de solda feitos em chapas Tipo 304 em diferentes distâncias de foco e sua correspondente absortividade do laser durante a soldagem entre laser de fibra e laser YAG.....35
Figura 19 – Representação esquemática do fluxo e do equilíbrio de pressões. 38

Figura 20 - Ilustração esquemática dos fenômenos físicos de fusão, formação da poça de fusão e cavidade, evolução do *keyhole*, ejeção de pluma, respingos, formação de partículas ultrafinas e formação de fumo durante a soldagem a laser. 39
Figura 21 – Variação periódica da morfologia da poça de fusão.....40
Figura 22 - Diagramas esquemáticos dos padrões de escoamento do fluido na poça de fusão para: (a) gradiente de tensão superficial negativo e (b) gradiente de tensão superficial positivo. 41
Figura 23 – Esquemático dos mecanismos de absorção do feixe laser no modo *keyhole*. 42
Figura 24 - Alteração da morfologia da pluma com diferentes velocidades de soldagem (6 kW, 2000 fps). 43
Figura 25 – Representação esquemática do comportamento da pluma de plasma, *keyhole* e fluxos de fusão na geração de bolhas que ocasionam porosidade na poça de fusão em diferentes condições. 44
Figura 26 – Instabilidade do *keyhole* associada à evaporação localizada na parede frontal do *keyhole* e à formação de porosidade.....46
Figura 27 - Mecanismo de colapso do *keyhole* e transições associadas do regime de fusão por *keyhole* no processo LPBF. (a) Radiografias LPBF em chapa de alumínio sem revestimento no regime de transição, mostrando o colapso da parede traseira do *keyhole* com ilustração associada (b). (c) Radiografias da LPBF em chapa de alumínio sem revestimento no regime instável, mostrando o colapso da base do *keyhole* com ilustração associada (d). (RKW - Expansão da parede traseira do *keyhole*) e (FKW - Ângulo da parede frontal). 48
Figura 28 - Efeitos do movimento da poça de fusão na porosidade: (a) fluxo de Marangoni radialmente para dentro; (b) fluxo de Marangoni radialmente para fora..49
Figura 29 - Inversão da convecção de Marangoni, passando de fluxo radial para fora para fluxo radial para dentro, na presença de N_2 no gás de proteção. 50
Figura 30 - Observação da transmissão de raios X microfocada do comportamento do *keyhole* durante a soldagem a laser de aço inoxidável AISI 304 com diferentes gases de proteção. 51
Figura 31 - Mapa de fases EBSD da zona de fusão produzida sob diferentes misturas de gases de proteção. 52
Figura 32 – Seções longitudinais obtidas com potência do feixe laser de 10 kW, gás de proteção argônio e diferentes velocidades de soldagem. 54

Figura 33 - Marcação dos dois formatos de corpos de prova. (a) 300x30 mm e (b) 70x30 mm.....56
Figura 34 – Bancada que será utilizada para realização dos ensaios.....56
Figura 35 – Interface do software PRIMES com suas respectivas opções de diagnóstico. 57
Figura 36 – Caracterização do feixe laser utilizado neste estudo. (a) e (b) distribuição de energia no plano e (c) representação da cáustica do feixe laser. 58
Figura 37 – Equipamentos utilizados para aquisição de imagens em alta velocidade. (a) Câmera Phanton Miro R311 e (b) Sistema Cavilux de laser para iluminação.....59
Figura 38 - Esquemático do sistema de captura das imagens do processo de soldagem.....60
Figura 39 – Padronização a partir do instante *Laser on*, *Laser off e final da solidificação da poça de fusão.*.....61
Figura 40 – Fluxograma do Planejamento e Execução.....62
Figura 41 – Cordões de solda realizados em amostras com 300 x 30 x 12,7 mm. ...63
Figura 42 - Esquemático das variáveis investigadas na alimentação do gás de proteção. 65
Figura 43 – Esquemático da realização dos cortes utilizando eletroerosão. (a) Estratégia utilizada em amostras 300 x 30 mm para seção longitudinal, (b) Estratégia utilizada em amostras 70 x 30 mm para seção longitudinal e (c) Estratégia utilizada em amostras 300 x 30 mm para seção transversal.....67
Figura 44 – Metodologia de medição da seção longitudinal (Etapas 01 e 02) e seção transversal da etapa (02 e 03).....69
Figura 45 – Definição do CPF, LPF e APF.....71
Figura 46 - Representação esquemática das etapas de transferência de energia durante o processo de soldagem a laser, desde a energia de soldagem (Es) até eficiência de fusão (ηf), evidenciando as eficiências parciais de acoplamento (ηa) e de conversão térmica (ηc). 74
Figura 47 – Vista superior dos cordões de solda com rampa de potência do laser utilizando argônio como gás de proteção.....76
Figura 48 – Vista superior e seção longitudinal das condições com 1 kW de potência do laser. 78
Figura 49 - Vista superior e seção longitudinal das condições entre 2 kW e 3 kW de potência do laser.....79

Figura 50 - Vista superior e seção longitudinal das condições entre 4 kW e 5 kW de potência do laser. 80
Figura 51 – Mapeamento de porosidade em diferentes condições de velocidade de soldagem e potência do feixe laser. CPT: Colapso da parede traseira e CFK: Colapso do fundo do *keyhole*. 81
Figura 52 - Variação da área de porosidades em função da potência do laser para diferentes velocidades de soldagem. 84
Figura 53 – Matriz comparativa da morfologia da poça de fusão para diferentes condições de soldagem utilizando argônio como gás de proteção. 85
Figura 54 - Evolução temporal da poça de fusão com 1 kW de potência do laser e 1 m/min de velocidade de soldagem. 86
Figura 55 – (a) Comprimento da poça de fusão e (b) Largura da poça de fusão em função da potência do laser e da velocidade de soldagem. 88
Figura 56 - Variação do perfil de penetração do cordão de solda (seção longitudinal) em função da potência do laser e da velocidade de soldagem. 89
Figura 57 – Vista superior dos cordões de solda com (a) Argônio e (b) Nitrogênio obtidos na etapa de otimização da proteção gasosa. 91
Figura 58 – Seção longitudinal dos cordões de solda com (a) Argônio e (b) Nitrogênio obtidos na etapa de otimização da proteção gasosa. 92
Figura 59 - Gráficos de (a) comprimento e (b) largura da poça de fusão em função da vazão e número do bocal TIG. 94
Figura 60 - APF vs. Vazão de Gás para argônio e nitrogênio. 95
Figura 61 – Dimensões da poça de fusão para a condição de bocal TIG n°4 para diferentes vazões e composição do gás de proteção. 96
Figura 62 - APF vs. Bocal TIG para argônio e nitrogênio. 97
Figura 63 - Penetração dos cordões de solda em função da vazão e do bocal. 98
Figura 64 – Comparação da seção longitudinal (50x) na condição de 10 L/min e bocal n° 4: (a) Argônio e (b) Nitrogênio. 100
Figura 65 – Seção transversal (50x) na condição de 10 L/min e bocal n° 4: (a) Argônio e (b) Nitrogênio. 100
Figura 66 – Vista superior dos cordões de solda com rampa de potência do laser utilizando condição otimizada de proteção gasosa. 103
Figura 67 – Seções longitudinais dos cordões de solda obtidos com condição otimizada. 104

Figura 68 – Comprovação do perfil de penetração (3 m/min; 3-5 kW) após segunda preparação metalográfica. 105
Figura 69 – Matriz de seções transversais obtidas para cada combinação de potência do feixe laser e velocidade de soldagem, utilizando nitrogênio como gás de proteção. 107
Figura 70 - Poça de fusão durante o incremento de potência do laser utilizando nitrogênio como gás de proteção. 108
Figura 71 - Evolução temporal da poça de fusão com potência do laser de 1 kW para as velocidades de soldagem de 1, 2 e 3 m/min. 110
Figura 72 - Evolução temporal da poça de fusão com potência do laser de 2 kW para as velocidades de soldagem de 1, 2 e 3 m/min. 111
Figura 73 - Evolução temporal da poça de fusão com potência do laser de 3 kW para as velocidades de soldagem de 1, 2 e 3 m/min. 112
Figura 74 - Evolução temporal da poça de fusão com potência do laser de 4 kW para as velocidades de soldagem de 1, 2 e 3 m/min. 113
Figura 75 - Evolução temporal da poça de fusão com potência do laser de 5 kW para as velocidades de soldagem de 1, 2 e 3 m/min. 114
Figura 76 - Análise temporal da dinâmica da poça de fusão e dos fenômenos de ejeção de metal na soldagem a laser com 5 kW de potência do laser e 3 m/min de velocidade de soldagem. 116
Figura 77 – Comparativo da vista superior e da poça de fusão na região de 1 kW para diferentes velocidades de soldagem. 117
Figura 78 - Comparativo da vista superior e da poça de fusão na região de 2 kW para diferentes velocidades de soldagem. 118
Figura 79 - Comparativo da vista superior e da poça de fusão na região de 3 kW para diferentes velocidades de soldagem. 118
Figura 80 - Comparativo da vista superior e da poça de fusão na região de 4 kW para diferentes velocidades de soldagem. 119
Figura 81 - Comparativo da vista superior e da poça de fusão na região de 5 kW para diferentes velocidades de soldagem. 119
Figura 82 - Profundidade de penetração em função da potência do laser e velocidade de soldagem. 121
Figura 83 - Correlação unificada entre a profundidade de penetração e o fator de potência. 122

Figura 84 - Largura do cordão de solda em função da potência do laser e velocidade de soldagem. 123
Figura 85 - Razão de aspecto do cordão de solda em função da potência do laser e velocidade de soldagem. 123
Figura 86 - Influência do tempo de interação na largura do cordão de solda. 124
Figura 87 – Área da Seção transversal da zona fundida em função da velocidade de soldagem e potência do laser 125
Figura 88 – Eficiência de Fusão em função da potência do laser e velocidade de soldagem. 126
Figura 89 – Comparação morfológica e comportamental da poça de fusão para condição de 1 m/min de velocidade de soldagem e 1 kW de potência do laser para modo condução e *keyhole* 127
Figura 90 - Ilustração do mecanismo de instabilidade da pluma de plasma e sua interferência momentânea com o feixe de laser. (a) Instante de bloqueio e (b) Instante fora da zona de incidência 128
Figura 91 - Variação da largura e do comprimento da poça de fusão em função da potência do laser e da velocidade de soldagem. (a) Comprimento e (b) Largura. .. 129
Figura 92 - Efeito da velocidade de soldagem na relação entre APF e as dimensões da zona fundida (área transversal e penetração). 131
Figura 93 – Sequência de frames com velocidade de soldagem de 1 m/min e 3 kW de potência do feixe laser apresentando a oscilação da poça de fusão e origem da solidificação irregular (escamas). 133
Figura 94 - Análise correlacionada do fenômeno de oscilação da poça de fusão e seu efeito na morfologia do cordão de solda solidificado: (a) Vista superior do cordão de solda; (b) Marcas de solidificação na seção longitudinal; (c) Sequência temporal de um ciclo de oscilação. 134
Figura 95 – Matriz de comparativa da energia de soldagem linear (60 J/mm) e suas diferenças morfológicas para diferentes condições de potência do laser e velocidade de soldagem. 135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise química do substrato aço inoxidável AISI 304. 55
Tabela 2 – Características do laser TRUDISK 10002 e do cabeçote de soldagem. .57
Tabela 3 – Dados medidos durante a caracterização do feixe laser. 58
Tabela 4 – Planejamento de experimentos para avaliação da alimentação do gás de proteção. 65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	*American Iron and Steel Institute*
APF	Área da Poça de Fusão
Ar	Argônio
A_s	Área do Feixe Laser na Superfície do Material
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
AWS	*American Welding Society*
BPP	*Beam Paramater Product*
CEF	Calor Efetivo de Fusão
CFK	Colapso do Fundo do *Keyhole*
cp	Calor Específico
CPF	Comprimento da Poça de Fusão
CPT	Colapso da Parede do *Keyhole*
d	Diâmetro
DP	Densidade de Potência
EBSD	*Electron Backscatter Diffraction*
Es	Energia de Soldagem
Ev	Entalpia Volumétrica
FP	Fator de Potência
GMAW	*Gas Metal Arc Welding*
He	Hélio
IR	Infra-Vermelho
LBW	*Laser Beam Welding*
L_f	Calor Latente de Fusão
LPF	Largura da Poça de Fusão
MB	Metal de Base
N_2	Nitrogênio
P	Potência do Laser
PCC	*Phantom Camera Control*
Q	Calor Imposto
TIG	*Tungsten Inert Gas*
v	Velocidade de soldagem

ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZF	Zona Fundida
ηa	Eficiência de Acoplamento
ηc	Eficiência de Conversão Térmica
ηf	Eficiência de Fusão
ρ	Densidade
τi	Tempo de Interação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 OBJETIVOS 18
1.1.1 Objetivo Geral 18
1.1.2 Objetivos Específicos 18
2 REVISÃO DE LITERATURA 20
2.1 LASER 20
2.1.1 Qualidade do Feixe Laser 21
2.1.2 Interação Laser-Matéria 22
2.2 SOLDAGEM A LASER 26
2.2.1 Principais Variáveis do Processo 30
2.2.2 Parâmetros Derivados de Interação 36
2.3 FORMAÇÃO E ESTABILIDADE DO *KEYHOLE* 37
***2.3.1* Mecanismos de Formação do *Keyhole* 38**
***2.3.2* Fatores que Influenciam a Estabilidade do *keyhole* 40**
2.4 FORMAÇÃO DE POROSIDADES 45
2.4.1 Mecanismos de Formação de Porosidades 45
2.4.2 Fatores que Influenciam na Formação de Porosidades 50
3 MATERIAIS E MÉTODOS 54
3.1 MATERIAIS E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS 55
3.2 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL 56
3.2.1 Bancada de Soldagem 56
3.2.2 Fonte Laser e Características do Feixe 57
3.2.3 Sistema de Aquisição de Imagens 59
3.3 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS 61
3.3.1 Análise Preliminar com Variação de Potência do Laser e Velocidade de Soldagem 63
3.3.2 Investigação e Seleção da Condição de Proteção Gasosa Adequada 64
3.3.3 Investigação e Caracterização do Processo de Soldagem a Laser com Condição Gasosa Adequada 65
3.4 PROCEDIMENTO DE CARACTERIZAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA 66
3.4.1 Análise da Superfície do Cordão de Solda 66

3.4.2 Preparação Metalográfica 67
3.4.3 Caracterização e Medição dos Aspectos Dimensionais do Cordão de Solda 68
3.5 ANÁLISE DA DINÂMICA DA POÇA DE FUSÃO 69
3.5.1 Processamento das Imagens de Alta Velocidade 69
3.5.2 Caracterização e Medição dos Aspectos Dimensionais da Poça de Fusão 70
3.6 ANÁLISE DE DADOS E MÉTODOS ESTATÍSTICOS 71
3.6.1 Cálculo da Eficiência de Fusão.....72
3.6.2 Análise de Correlação 74
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....75
4.1 ANÁLISE PRELIMINAR E IDENTIFICAÇÃO DE POROSIDADE 76
4.1.1 Morfologia da Superfície dos Cordões de Solda.....76
4.1.2 Caracterização Macrográfica e de Descontinuidade 77
4.1.3 Comportamento Dinâmico da Poça de Fusão utilizando Argônio.....85
4.1.4 Correlações Geométricas da Poça de Fusão 87
4.2 PROTEÇÃO GASOSA: INVESTIGAÇÃO QUANTO A POROSIDADE.....90
4.2.1 Influência da Composição do Gás de Proteção no Cordão de Solda ..90
4.2.2 Dinâmica da Poça de Fusão: Argônio vs. Nitrogênio 93
4.2.3 Discussão dos Mecanismos de Atuação do Nitrogênio 99
4.3 ANÁLISE DO PROCESSO EM CONDIÇÃO GASOSA ADEQUADA.....102
4.3.1 Caracterização Morfológica da Condição Selecionada 102
4.3.2 Dinâmica da Poça de Fusão em Condição Otimizada 107
4.3.3 Análise Quantitativa da Dimensão do Cordão de Solda e Dinâmica da Poça de Fusão em Função dos Parâmetros de Soldagem 120
4.3.4 A Insuficiência da Energia de Soldagem como Parâmetro Preditivo .134
5 CONCLUSÃO 137
6 TRABALHOS FUTUROS 138
REFERÊNCIAS 140
APÊNDICE A – DADOS DO COMPRIMENTO DA POÇA DE FUSÃO (CPF): ANÁLISE PRELIMINAR (ARGÔNIO).....146
APÊNDICE B – DADOS DA LARGURA DA POÇA DE FUSÃO (LPF): ANÁLISE PRELIMINAR (ARGÔNIO).....148

APÊNDICE C – DADOS GEOMÉTRICOS (PENETRAÇÃO) – ANÁLISE PRELIMINAR (ARGÔNIO) 150
APÊNDICE D – DADOS DO COMPRIMENTO DA POÇA DE FUSÃO (CPF): OTIMIZAÇÃO DA PROTEÇÃO GASOSA 151
APÊNDICE E – DADOS DA LARGURA DA POÇA DE FUSÃO (LPF): OTIMIZAÇÃO DA PROTEÇÃO GASOSA 152
APÊNDICE F – DADOS DA ÁREA DA POÇA DE FUSÃO (APF): OTIMIZAÇÃO DA PROTEÇÃO GASOSA 153
APÊNDICE G – DADOS DE PENETRAÇÃO – OTIMIZAÇÃO DA PROTEÇÃO GASOSA 154
APÊNDICE H – DADOS GEOMÉTRICOS DA SEÇÃO TRANSVERSAL (ANÁLISE ESTÁTICA) – PROCESSO OTIMIZADO.....155
APÊNDICE I – DADOS DO COMPRIMENTO DA POÇA DE FUSÃO (CPF) – PROCESSO OTIMIZADO.....156
APÊNDICE J – DADOS DA LARGURA DA POÇA DE FUSÃO (LPF) – PROCESSO OTIMIZADO.....158
APÊNDICE K – DADOS DA ÁREA DA POÇA DE FUSÃO (APF) – PROCESSO OTIMIZADO.....160

1 INTRODUÇÃO

A soldagem de materiais de seção espessa tem se consolidado como uma das técnicas mais avançadas na união de materiais metálicos, sendo amplamente utilizada na construção naval, usinas de energia, dutos de transporte de óleo/gás, e em setores que demandam alta qualidade e produtividade, como a indústria aeroespacial e automotiva. Métodos tradicionais, como soldagem a arco, apresentam dificuldades na união de chapas com elevada espessura devido ao aporte de calor relativamente alto, que pode causar grandes distorções.

Em contraste, a soldagem a laser de alta potência se distingue pela sua alta densidade de energia. Essa concentração de calor é o fator determinante que possibilita um baixo aporte térmico, resultando na formação de cordões com elevada relação profundidade-largura e uma zona termicamente afetada estreita, características que garantem mínima distorção na peça soldada (Sun *et al*., 2017a). Simultaneamente, ao assegurar uma aplicação localizada de energia, o processo promove altas taxas de penetração e juntas com elevada resistência mecânica, favorecida pelo refinamento microestrutural decorrente das altas taxas de resfriamento inerentes ao processo. Além disso, a facilidade de automação com robôs torna a técnica flexível e eficiente, otimizando custos e possibilitando sua implementação em larga escala (Coelho *et al*., 2018; Xue; Chang; Du, 2022).

Desde a sua introdução industrial, a soldagem a laser tem evoluído significativamente, com avanços que incluem o desenvolvimento de lasers de fibra, diodo e disco, sistemas de monitoramento *in-situ* e métodos de análise computacional, todos voltados para a melhoria da qualidade da solda e a compreensão de fenômenos físicos complexos (Pang *et al*., 2016; Tao *et al*., 2023). Entre os principais fenômenos que definem a qualidade e a estabilidade do processo de soldagem a laser está a formação do *keyhole* (Brock; Hohenstein; Schmidt, 2014). Essa cavidade é criada pela interação intensa entre o feixe de laser e o material, resultando em vaporização localizada e pressão de recuo que mantêm a abertura do *keyhole* enquanto o metal ao redor se funde (Brock; Hohenstein; Schmidt, 2014; Pang *et al*., 2016).

A estabilidade do *keyhole* é influenciada por uma série de variáveis operacionais, como a potência do laser, velocidade de soldagem e gás de proteção, que determinam não apenas a geometria da poça de fusão, mas também a dinâmica da poça de fusão e da pluma de plasma (Xue; Chang; Du, 2022; Yang *et al*., 2026).

Estudos mostram que a pluma de plasma, é um fenômeno crítico, pois suas características refletem, e podem ativamente interferir, na absorção de energia e estabilidade do *keyhole* (Li *et al*., 2021; Tao *et al*., 2023). No entanto, o comportamento simultâneo da poça de fusão e da pluma de plasma, especialmente sob condições dinâmicas de variação de potência do laser e velocidade de soldagem, ainda não é completamente compreendido.

Vários trabalhos têm buscado compreender a interação entre o *keyhole* e a poça de fusão. Pang *et al.* (2016), por exemplo, demonstraram que flutuações específicas na frequência de oscilação do *keyhole* são os precursores diretos do colapso capilar e da formação de descontinuidades. Neste cenário, Sun *et al.* (2017a) comprovaram a eficácia do nitrogênio na eliminação da porosidade no aço inoxidável AISI 304, atribuindo esse efeito à capacidade de reabsorção das bolhas pela matriz devido à alta solubilidade deste gás. Em complemento, Kshirsagar *et al.* (2021) observaram que o nitrogênio atua como elemento tensoativo, alterando o fluxo de Marangoni, enquanto Tao *et al.* (2023) evidenciaram que altas taxas de solidificação podem aprisionar bolhas antes que a dinâmica do fluxo permita sua exaustão. No entanto, a maioria dessas investigações foca em condições estáticas, com parâmetros de processo constantes, deixando uma lacuna significativa na compreensão de processos dinâmicos, como as variações de potência do laser durante a soldagem.

Neste contexto, o presente trabalho desenvolve uma investigação experimental sequencial. Primeiramente, caracteriza-se a instabilidade e os mecanismos de formação de porosidade no processo convencional com argônio como gás de proteção. Em seguida, investiga-se sistematicamente a otimização da proteção gasosa, validando o nitrogênio como uma solução robusta. Por fim, com base na condição otimizada, realiza-se uma caracterização aprofundada do processo, estabelecendo as correlações quantitativas entre os parâmetros de soldagem, a geometria do cordão de solda e a dinâmica da poça de fusão.

A justificativa para este estudo reside na necessidade crítica de se obter cordões de solda íntegros em materiais como o aço inoxidável AISI 304 para aplicações industriais de alta responsabilidade, tais como vasos de pressão na indústria petroquímica, sistemas de tubulação em usinas nucleares e componentes estruturais para o setor automotivo e aeroespacial.

O diferencial deste trabalho está na sua abordagem metodológica integrada, que combina a caracterização detalhada do feixe laser, o monitoramento do processo

em tempo real com câmera de alta velocidade e a análise metalúrgica. Essa abordagem permite não apenas propor uma solução para um problema industrial relevante, mas também aprofundar o entendimento fundamental da interação entre os parâmetros de processo e os complexos fenômenos físico-químicos que governam a qualidade da solda a laser.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo investigar experimentalmente os fenômenos de formação e estabilidade da poça de fusão na soldagem a laser em modo *keyhole* do aço inoxidável AISI 304.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar os mecanismos de formação de porosidade no modo *keyhole*, correlacionando-os com a morfologia e as dimensões resultantes do cordão de solda e os parâmetros de processo (potência do laser e velocidade de soldagem);
- Investigar sistematicamente como diferentes condições de proteção gasosa (composição, vazão e diâmetro do bocal) afetam a estabilidade da poça de fusão e atuam na mitigação da porosidade;
- Selecionar a condição de proteção gasosa mais adequada para viabilizar a análise detalhada da dinâmica da poça de fusão e da geometria resultante do cordão de solda;
- Desenvolver e aplicar uma metodologia para a análise quantitativa das dimensões da poça de fusão a partir de imagens de alta velocidade;
- Correlacionar quantitativamente as dimensões da poça de fusão (comprimento e largura) com os parâmetros de processo (potência do feixe laser e velocidade de soldagem) e dimensões dos cordões de solda (largura e penetração) para a condição de soldagem selecionada.

- Avaliar criticamente a aplicabilidade de parâmetros unificadores, como a energia de soldagem, com base nos distintos fenômenos físicos observados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 LASER

O termo LASER é um acrônimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação). O primeiro dispositivo funcional foi desenvolvido por Theodore Maiman em 1960, utilizando um cristal de rubi como meio ativo (Steen; Mazumder, 2010). Desde então, a tecnologia evoluiu para incluir diversos meios ativos, como gasosos (CO_2), semicondutores (diodo) e sólidos (Nd:YAG, Fibra e Disco), consolidando-se como uma ferramenta essencial no processamento de materiais (Ion, 2005).

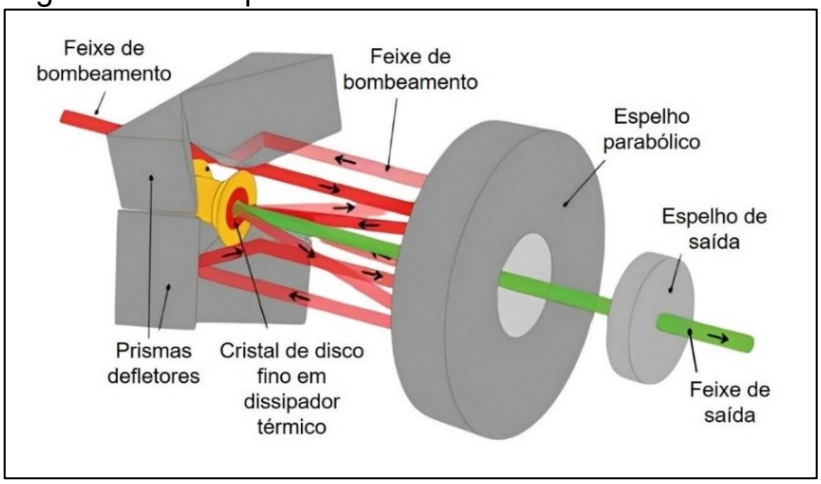
O princípio físico que rege o funcionamento desses dispositivos é a emissão estimulada, fenômeno descrito por Albert Einstein em 1916 (Ion, 2005; Katayama, 2009; Steen; Mazumder, 2010). O processo ocorre quando um fóton interage com uma partícula excitada, induzindo a liberação de um novo fóton com características idênticas ao original: mesma direção, fase e comprimento de onda (Ion, 2005). Contudo, para que um meio possa efetivamente amplificar a luz, é necessário que a taxa de geração de fótons por emissão estimulada supere as perdas causadas por efeitos como absorção e espalhamento. Quando tal condição termodinâmica é atendida, o material torna-se viável para aplicação como meio ativo em lasers.

Para a sustentação do processo, o dispositivo deve ser constituído por três componentes fundamentais: meio ativo, fonte de bombeamento e ressonador óptico. A fonte de bombeamento tem a função de elevar o meio ativo a um estado energético superior, promovendo a inversão de população, cenário onde a quantidade de partículas no estado excitado supera a do estado fundamental. Tal condição garante que o ganho óptico do meio permaneça superior a 1, viabilizando a operação. A amplificação é completada pelo ressonador óptico, composto por espelhos que refletem a radiação continuamente através do meio ativo, promovendo sucessivas ampliações do feixe antes que uma parcela seja extraída pelo espelho semitransparente para a aplicação (Steen; Mazumder, 2010).

No contexto específico deste trabalho, a fonte de calor utilizada consiste em um laser de disco, conforme o princípio detalhado na Figura 1. Nesta tecnologia, o meio ativo é um disco de cristal fino, tipicamente composto por granada de ítrio e alumínio dopada com itérbio (Yb:YAG), fixado sobre um dissipador térmico para

refrigeração eficiente. Diferente de sistemas convencionais bombeados por lâmpadas, o bombeamento aqui é realizado por diodos laser, um conjunto de prismas defletores e um espelho parabólico, que redirecionam a radiação de bombeamento, forçando múltiplas passagens pelo cristal. Este arranjo favorece a absorção de energia e a eficiência do sistema, resultando em um feixe de elevada qualidade para soldagem.

Figura 1 – Princípio de funcionamento do laser de disco.



Fonte: Adaptado de Divoky *et al.* (2014).

2.1.1 Qualidade do Feixe Laser

A qualidade do feixe laser é um fator determinante para os processos de soldagem a laser, pois influencia diretamente a densidade de potência na zona focal. Feixes com boa qualidade apresentam menor divergência e maior capacidade de focalização, favorecendo a formação estável do *keyhole*, maior penetração e menor zona termicamente afetada.

O feixe pode ser avaliado por meio do parâmetro denominado *Beam Parameter Product* (BPP), que corresponde ao produto entre o raio do feixe na sua menor seção transversal (raio da cintura do feixe, $w0$) e o ângulo de divergência do feixe (θ), variáveis apresentadas na Figura 2 e relacionadas conforme a Equação (1):

$$BPP = 2\omega_0\theta \quad (1)$$

Este parâmetro, expresso em milímetros-milirradianos (mm*mrad), fornece uma medida da capacidade do feixe de ser focalizado em um ponto reduzido. Um

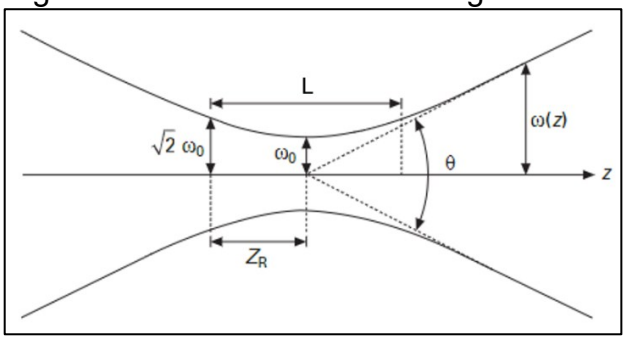
feixe idealmente gaussiano, que representa o limite teórico de focalização, apresenta o menor valor possível de BPP, igual ao comprimento de onda do laser (λ).

Para quantificar a diferença entre o feixe real e o feixe ideal gaussiano, utiliza-se o parâmetro $M2$, que é a figura de mérito mais amplamente aceita para a qualidade do feixe. Ele é definido como a razão entre o BPP do feixe real e o BPP do feixe ideal na mesma condição de comprimento de onda, conforme a Equação (2):

$$M^2 = \frac{BPP_{real}}{BPP_{ideal}} \geq 1 \tag{2}$$

Dessa forma, quanto mais próximo o valor de M2 for de 1, melhor é a qualidade do feixe, indicando características próximas de um feixe Gaussiano ideal. Valores de $M2$ significativamente maiores que 1 indicam um feixe com maior divergência e menor capacidade de focalização. Essa é uma característica típica de sistemas de alta potência entregues por fibra óptica, resultando em diâmetros focais maiores que influenciam diretamente a densidade de potência disponível para a interação laser-matéria.

Figura 2 - Variáveis de um feixe gaussiano.



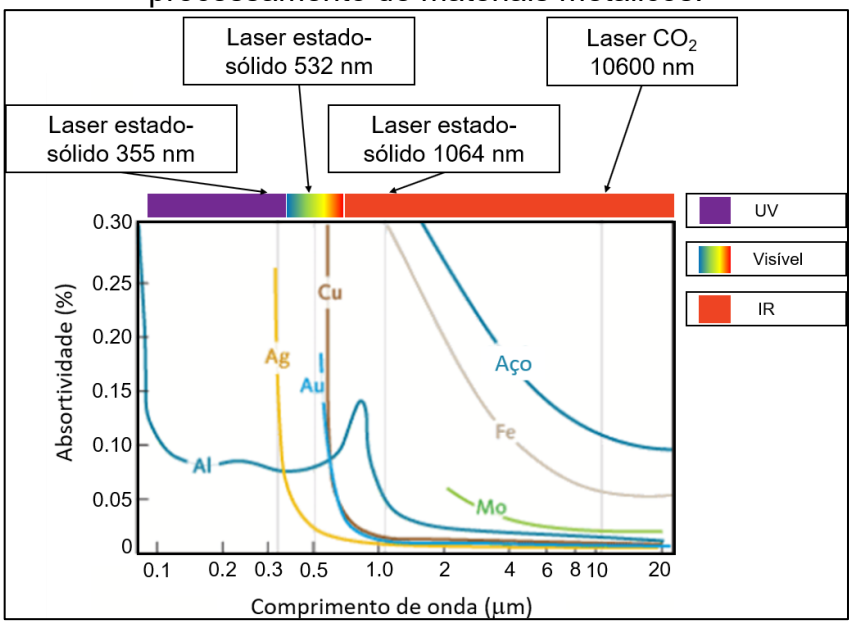
Fonte: Adaptado de Katayama (2009).

2.1.2 Interação Laser-Matéria

O comprimento de onda da luz gerada é uma característica fundamental, pois determina a interação da luz com o material a ser processado, influenciando diretamente a absorção da energia pelo material. Metais como o cobre, por exemplo, apresentam baixa absorção para lasers infravermelhos (IR), enquanto materiais como

os aços inoxidáveis têm maior capacidade de absorver essa radiação. A Figura 3 apresenta a curva de absortividade de diversos metais em função do comprimento de onda. Observa-se que, no aço, a absorção é significativamente maior na região do infravermelho próximo (em torno de 1 µm, faixa de operação de lasers de estado sólido como fibra e disco) do que na região do infravermelho distante (10,6 µm, típica dos lasers de CO_2). Esse comportamento justifica a preferência por fontes de estado sólido no processamento de materiais metálicos, tornando o laser uma ferramenta eficaz na indústria.

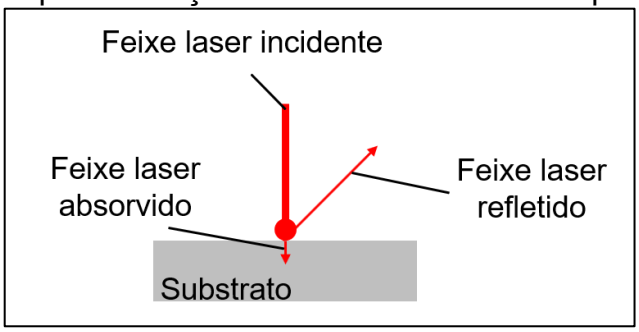
Figura 3 – Distribuição de diferentes comprimentos de onda utilizados para processamento de materiais metálicos.



Fonte: Adaptado de Quintino *et al.* (2007).

Quando um feixe de laser incide sobre um material, diferentes processos ópticos ocorrem, como absorção, reflexão, transmissão, refração e espalhamento, dependendo da composição e condição superficial (Katayama, 2020; Roessler; Steen, 1986; Steen; Mazumder, 2010). Nos metais, praticamente toda a luz que não é refletida é absorvida, porque a luz não atravessa o material, conforme ilustra a Figura 4. A absorção direta por elétrons livres é limitada, ocorrendo parcialmente devido a interações com vibrações da rede cristalina e imperfeições estruturais. Essa energia absorvida é convertida em calor, levando ao aquecimento e, sob alta densidade de potência, à fusão e formação da poça líquida.

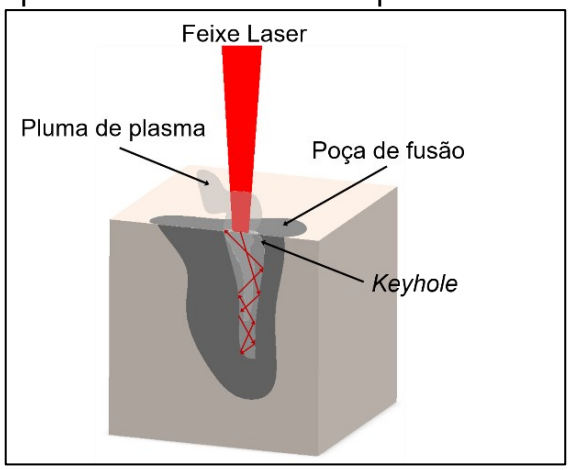
Figura 4 – Principais interações do feixe laser com a superfície metálica.



Fonte: Adaptado de KATAYAMA (2020).

Schuöcker (1998), ao investigar a termodinâmica do processo, descreveu que a elevação da temperatura altera as propriedades ópticas da superfície, reduzindo a refletividade e aumentando a absorção. Esse fenômeno intensifica-se na transição para o estado líquido e, sobretudo, durante a formação do *keyhole*. Nesse regime, a cavidade atua como um corpo negro, promovendo múltiplas reflexões internas que aprisionam a radiação, conforme esquematizado na Figura 5. Para o aço inoxidável AISI 304, esse mecanismo resulta em um acoplamento de energia elevado e maior estabilidade quando utilizados comprimentos de onda menores (lasers de fibra/disco) em comparação aos de maior comprimento de onda.

Figura 5 - Ilustração esquemática das reflexões que decorrem no interior do *keyhole*.

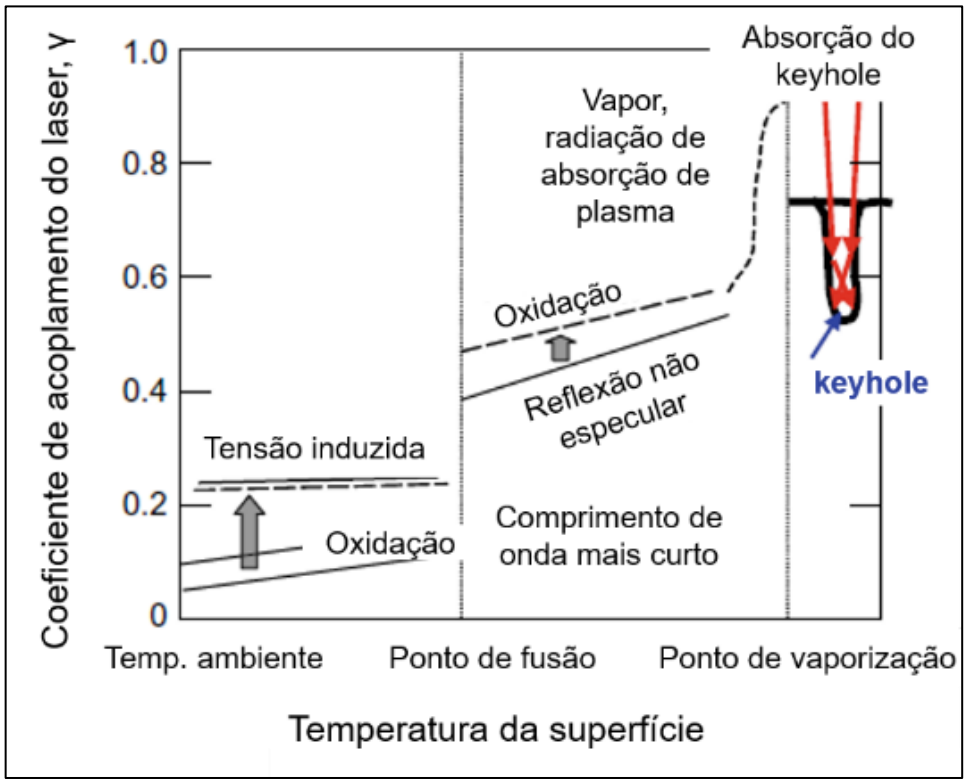


Fonte: Adaptado de Wang; Gao; Kong (2022).

O coeficiente de acoplamento, que corresponde à fração da potência efetivamente absorvida, evolui dinamicamente com a temperatura. A Figura 6 detalha as etapas desse comportamento: inicialmente, na fase sólida (temperatura ambiente), o acoplamento é baixo e governado pela oxidação superficial, ao atingir o ponto de

fusão, observa-se um salto discreto na absortividade. Contudo, a mudança drástica ocorre no ponto de vaporização, onde a abertura do *keyhole* e a interação com o vapor elevam o coeficiente de acoplamento para valores próximos à unidade (absorção total) (Katayama, 2018; Roessler; Steen, 1986). Essa evolução sustenta a transição do modo de condução para o modo de penetração profunda.

Figura 6 - Efeito da temperatura da superfície no coeficiente de acoplamento do laser ou na absortividade do material

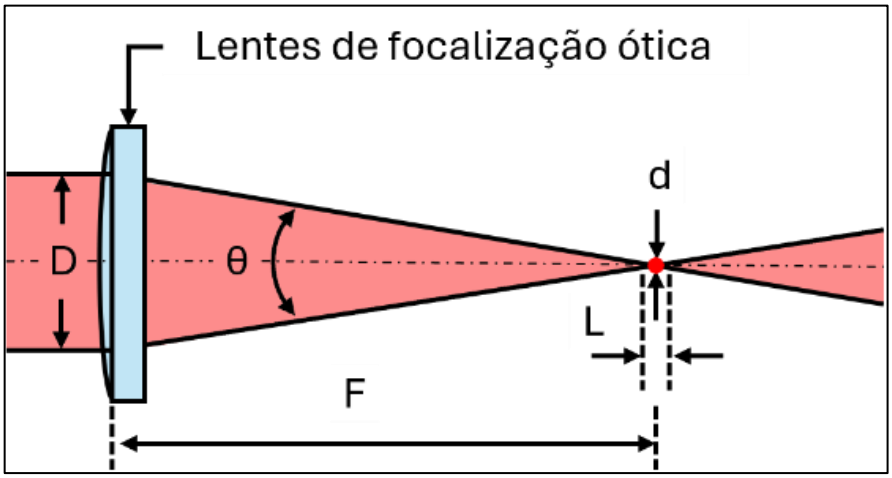


Fonte: Adaptado de Katayama (2020).

A eficiência do processo também depende de como o feixe é manipulado ao longo do sistema ótico, especialmente quando este é focalizado na superfície do material. Nesse contexto, a convergência do feixe, que ocorre ao passar por uma lente, desempenha um papel crucial na determinação do diâmetro do feixe na região de foco. De acordo com Ribeiro (2016), um feixe de luz com determinado diâmetro de incidência na lente óptica (D) converge ao passar por uma lente e terá seus raios se agrupando em um ponto, onde se formará o menor diâmetro desse feixe, sendo denominado de diâmetro focal (d), que terá uma distância em relação à lente, denominado de distância focal (F), e um ângulo de convergência do feixe (θ). Próximo ao foco, pequenas mudanças na distância focal na ordem de milímetros não causam

alterações na intensidade do feixe laser. O comprimento dessa região pode ser denominado de profundidade de foco (L) como apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Parâmetros ópticos envolvidos no feixe laser.

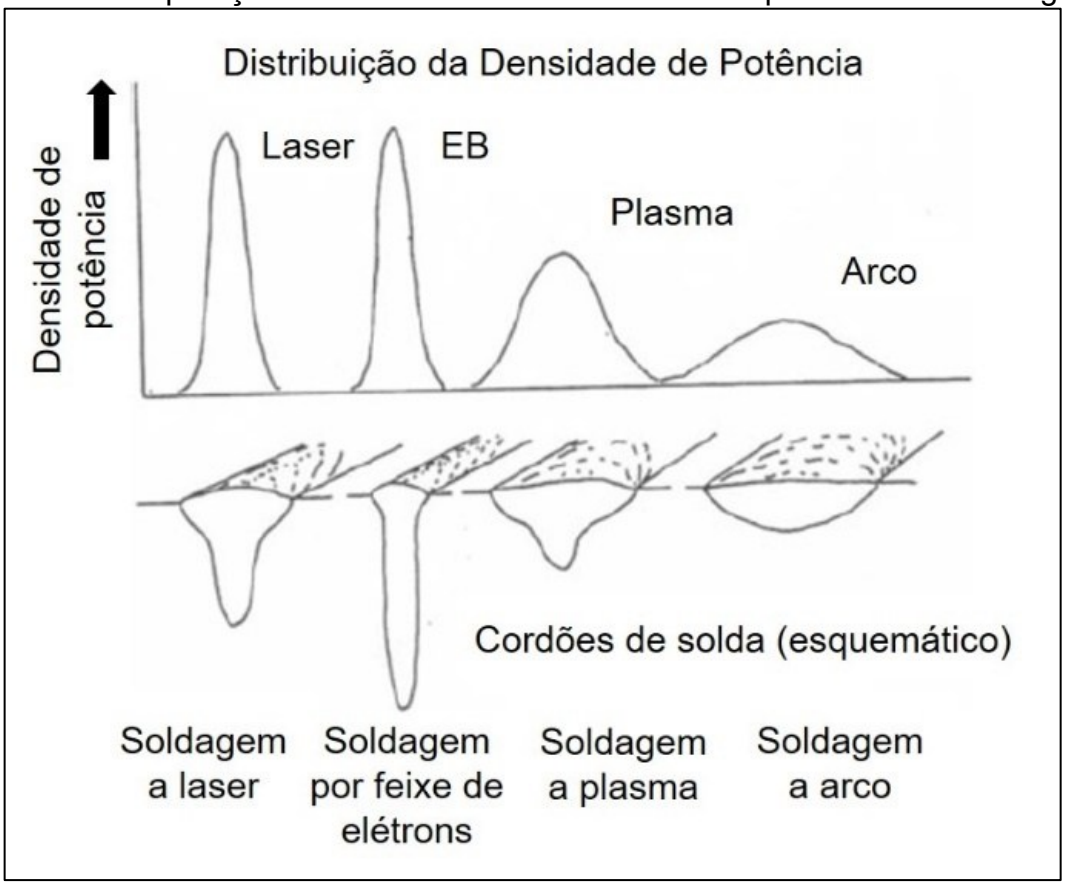


Fonte: Adaptado de Dawes (1992).

2.2 SOLDAGEM A LASER

Devido à elevada coerência e característica monocromática, o feixe laser se destaca como uma excelente fonte de calor para processos de soldagem por fusão. Sua principal vantagem consiste na capacidade de concentrar intensamente a energia em uma região extremamente pequena, pouco divergente e com pequeno diâmetro no foco, podendo variar de 100 a 600 μm, ou mais, dependendo do conjunto óptico utilizado, conforme descrito por Ion (2005). Essa característica gera fluxos térmicos comparáveis aos da soldagem por feixe de elétrons (EBW) e consideravelmente superiores aos dos métodos convencionais baseados em arco elétrico. Além disso, trata-se de uma fonte de calor altamente estável e de fácil controle. A Figura 8 apresenta um comparativo dos perfis de profundidade de penetração de diferentes fontes de calor empregadas na soldagem, em conjunto com a distribuição da densidade de potência.

Figura 8 - Comparação entre a intensidade de diferentes processos de soldagem.



Fonte: Adaptado de Katayama (2009).

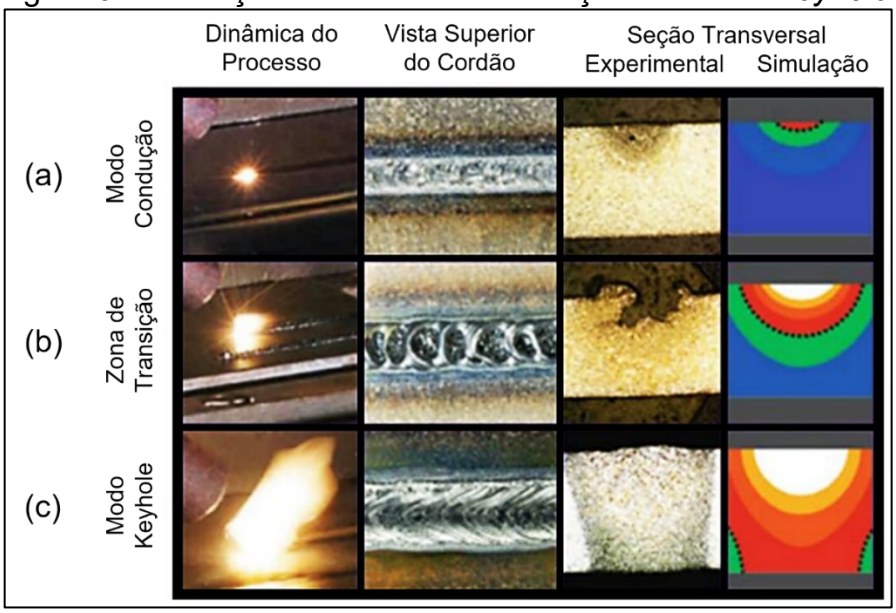
A soldagem a laser apresenta dois regimes distintos de operação, governados pela densidade de potência: o modo condução e o modo *keyhole*, cujas diferenças morfológicas e fenomenológicas são apresentadas esquematicamente na Figura 9.

No regime de baixa densidade de potência, a energia é absorvida superficialmente e transportadora para o interior da peça exclusivamente por difusão térmica. Conforme ilustrado na Figura 9 (a), esse mecanismo, denominado modo condução, resulta em uma poça de fusão com perfil semicircular, caracterizada por ser rasa e larga (Assunção, 2012; Poprawe, 2011; Steen; Mazumder, 2010).

Contudo, a mudança de um modo para o outro não é abrupta. Entre esses dois regimes, existe uma zona de transição caracterizada por severa instabilidade hidrodinâmica. Nessa faixa intermediária, a pressão de recuo do vapor compete com a tensão superficial, mas não é suficiente para sustentar o *keyhole* aberto de forma uniforme. Isso gera um comportamento oscilatório, onde o *keyhole* se forma e colapsa intermitentemente, prejudicando a qualidade do cordão de solda (Poprawe, 2011).

Por outro lado, quando a densidade de potência ultrapassa um limiar crítico, o material atinge a temperatura de vaporização rapidamente. A pressão de recuo do vapor gerado vence a tensão superficial e abre um capilar de vapor profundo na poça fundida, conforme detalhado na Figura 9 (c). Esse regime, denominado modo *keyhole*, permite a obtenção de soldas com elevada razão de aspecto (Assunção, 2012; Ion, 2005; Xiao *et al*., 2022). Devido à complexidade física desse *keyhole*, que envolve dinâmicas entre a pressão de vapor, múltiplas reflexões internas do feixe laser e forças hidrodinâmicas, a sua estabilidade e formação têm sido objeto de extensa modelagem matemática na literatura para diversos materiais (Rai *et al*., 2007).

Figura 9 - Transição entre o modo condução e o modo *keyhole*.



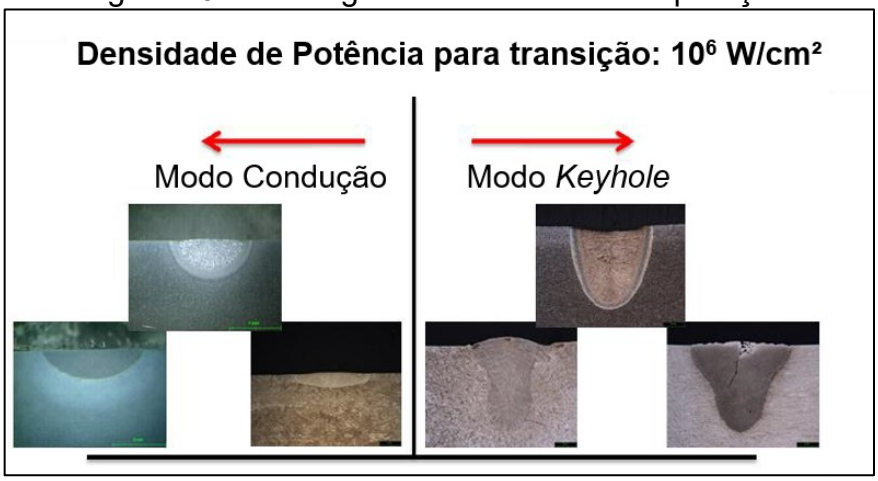
Fonte: Adaptado de Poprawe (2011).

De modo geral, a soldagem por condução está associada a densidades de potência inferiores a 10^6 W/cm², independentemente da velocidade de soldagem ou do diâmetro do feixe (Brock; Hohenstein; Schmidt, 2014; Ion, 2005; Katayama, 2009; Roessler; Steen, 1986; Steen; Mazumder, 2010). Além disso, este modo é frequentemente relacionado a potências do laser mais baixas, próximas de 1 kW, o que limita a geração de vapor, resultando em cordões de solda com alta estabilidade. Adicionalmente, permite um controle preciso do aporte térmico, favorecendo a obtenção de soldas de excelente qualidade, sem descontinuidades como porosidade e respingos (Assunção; Williams; Yapp, 2012; Dreveck, 2019; Poprawe, 2011).

Adicionalmente, por empregar um feixe relativamente mais largo, os desafios relacionados ao ajuste entre as peças são minimizados (Ion, 2005; Poprawe, 2011).

O reflexo morfológico dessa limitação energética é apresentado na Figura 10. À esquerda, as seções transversais típicas do modo condução exibem um perfil semicircular, caracterizado por baixa penetração e uma razão de aspecto reduzida. Esse comportamento contrasta com as macrografias do modo *keyhole* (à direita da figura), onde a superação do limiar crítico de densidade de potência (10^6 W/cm²) desencadeia a vaporização intensa do material. A consequente abertura do capilar de vapor resulta na formação de cordões profundos e estreitos.

Figura 10 – Macrografias dos modos de operação.



Fonte: Adaptado de Assunção (2012).

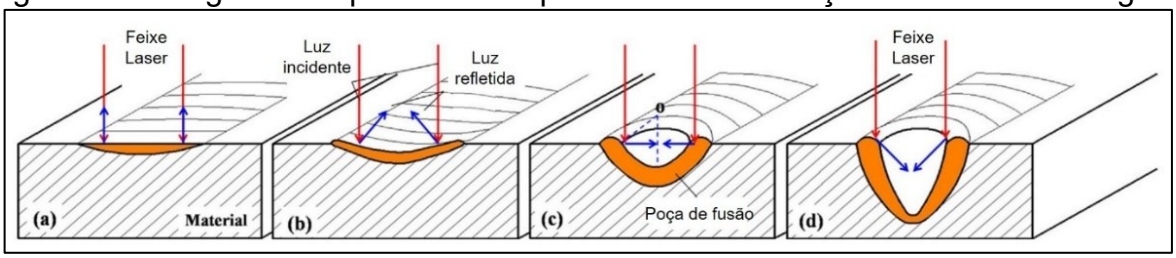
Além das limitações geométricas, o modo condução apresenta restrições significativas quanto à eficiência de acoplamento do feixe laser, especialmente em materiais com alta refletividade e está relacionada à fração da energia do feixe que é efetivamente absorvida pelo material. Durante a transição do modo condução para o modo *keyhole*, ocorrem alterações significativas na forma de interação do feixe laser com a superfície da poça de fusão. No regime de condução, a maior parte da radiação incidente é refletida para fora da poça de fusão, como ilustrado nas Figura 11a e 11b, o que limita a quantidade de energia transferida ao material.

A mudança drástica nesse cenário ocorre durante a transição para o modo *keyhole*. O aumento da intensidade do laser favorece a vaporização intensa, elevando a pressão de recuo sobre a poça fundida até romper a barreira da tensão superficial. Quando isso ocorre, forma-se o capilar de vapor (Assunção, 2012; Ion, 2005;

Katayama, 2020). A grande vantagem energética desse formato é óptica: as paredes íngremes da cavidade forçam o feixe a sofrer múltiplas reflexões internas, direcionando a energia para o fundo do material em vez de refleti-la para fora (Figura 11c e 11d). Esse fenômeno de aprisionamento aumenta exponencialmente a absorção de energia do processo (Ion, 2005; Katayama, 2009; Poprawe, 2011).

Para prever essa mudança de regime, a literatura sugere que a irradiância isolada pode não ser suficiente. Estudos indicam que o Fator de Potência, definido pela razão entre a potência do feixe e o diâmetro do ponto focal, apresenta uma correlação mais robusta com a transição de modo e com a estabilidade do processo do que a densidade de potência convencional (Assunção, 2012; Ion, 2005; Katayama, 2020).

Figura 11 – Diagrama esquemático do processo de mudança do modo de soldagem.



Fonte: Adaptado de Zou *et al.* (2015).

De acordo com Nath *et al*. (2002), no caso do aço inoxidável, a eficiência de absorção no modo condução é da ordem de 15%, podendo atingir valores de até 65% no modo penetração. A soldagem neste regime é caracterizada por elevada profundidade de penetração, alta produtividade, uma zona termicamente afetada (ZTA) estreita e menores distorções térmicas, o que torna o processo atrativo para aplicações que exigem precisão e controle térmico. Apesar das diversas abordagens na literatura sobre os modos de soldagem a laser, os limites exatos entre o modo condução e o modo *keyhole*, em termos de parâmetros de processo, ainda não estão claramente definidos.

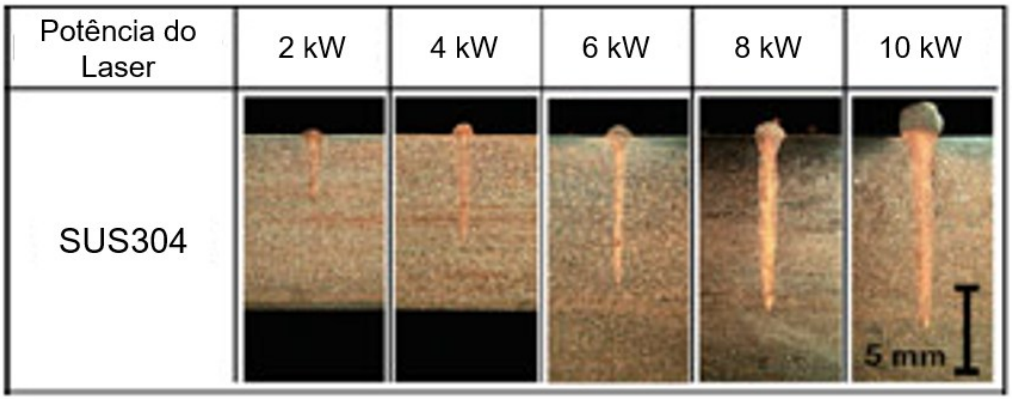
2.2.1 Principais Variáveis do Processo

Diversos estudos têm se dedicado a investigar a influência das variáveis da soldagem a laser nas características do cordão de solda (Assunção; Williams; Yapp,

2012; Coroado *et al*., 2017; Fabbro, 2010; Jia; Zhao, 2019; Ogawa *et al*., 2022; Wang *et al*., 2021; Zou *et al*., 2022). De modo geral, a geometria do cordão de solda é determinada pela interação entre três variáveis principais do processo: a potência do feixe laser, a velocidade de soldagem e o diâmetro do feixe. A adequada seleção dessas variáveis é fundamental não apenas para garantir que o cordão de solda atenda aos requisitos da aplicação desejada, mas também para assegurar a reprodutibilidade do processo em diferentes equipamentos e condições de soldagem (Assunção, 2012; Barbetta, 2019; Suder; Williams, 2014).

A potência do laser exerce uma influência significativa sobre a profundidade de penetração, uma vez que o aumento da potência do laser resulta em maior disponibilidade de energia para fundir o material. Nesse contexto, Katayama *et al.* (2010), realizaram ensaios experimentais com o objetivo de avaliar esse efeito. Os resultados mostraram que o aumento da potência do laser proporcionou uma maior profundidade de penetração, conforme o esperado. A Figura 12 apresenta as seções transversais de cordões de solda entre 2 e 10 kW com velocidade de soldagem de 50 mm/s para o aço inoxidável SUS304.

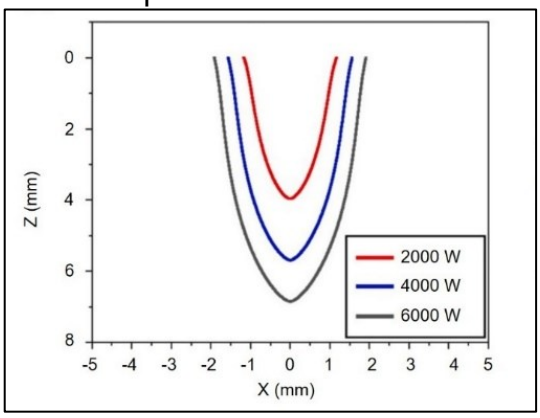
Figura 12 - Seção transversal de cordões de solda de aço inoxidável tipo 304 com diferentes potências do laser.



Fonte: Adaptado de Katayama; Kawahito; Mizutani (2010).

Adicionalmente, Zhu *et al*. (2026) desenvolveram um modelo com o objetivo de correlacionar as variáveis de processamento com as características geométricas do cordão de solda obtido no processo de soldagem a laser. Adicionalmente, a Figura 13 ilustra o comportamento experimental da penetração do cordão de solda em função da potência do feixe laser.

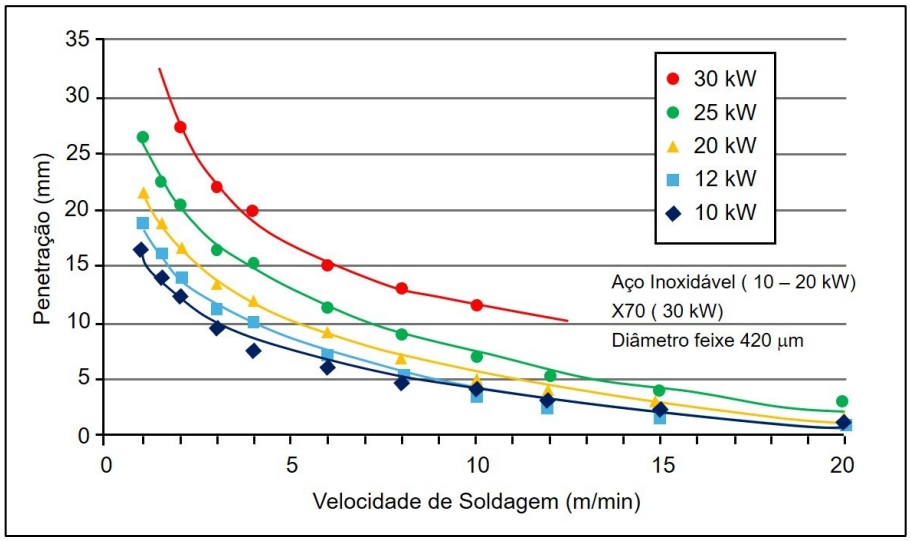
Figura 13 – Variação do perfil de penetração do cordão de solda em função da potência do laser.



Fonte: Adaptado de Zhu *et al.* (2026).

Assim como a potência do laser, a velocidade de soldagem é uma variável crítica que governa a entrada de energia no processo. O aumento da velocidade de soldagem provoca a redução na quantidade de energia transferida por unidade de comprimento do cordão de solda, também conhecida como energia de soldagem. Como consequência, a profundidade de penetração tende a diminuir. Esse comportamento pode ser observado na Figura 14, que apresenta a variação de penetração em função da velocidade de soldagem, considerando diferentes níveis de potência do laser no processo de soldagem a laser de fibra aplicado a um aço inoxidável AISI 304 (10 – 20 kW) e aço X70 (30 kW) (Tsuji, 2009).

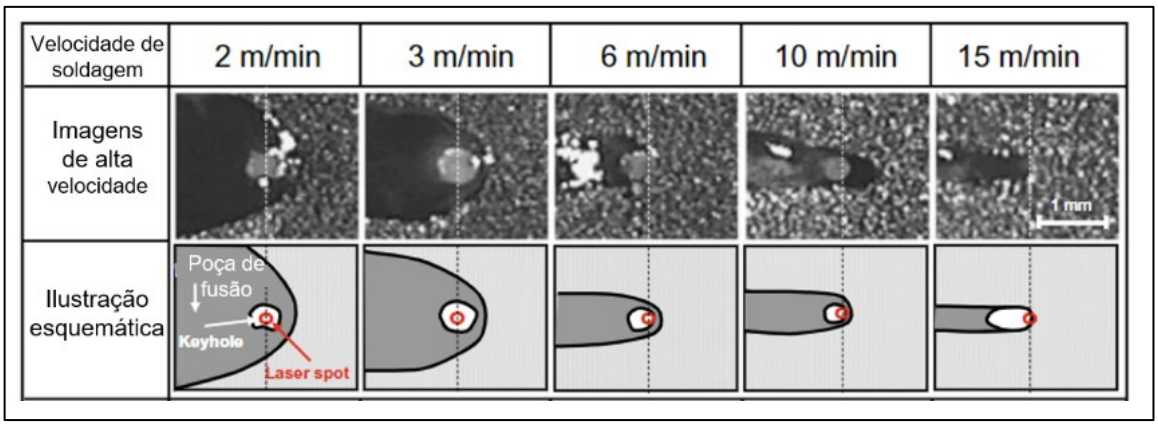
Figura 14 - Penetração em função da velocidade de soldagem e da potência do laser.



Fonte: Adaptado de Tsuji (2009).

De acordo com Bergmann *et al*. (2020), a velocidade de soldagem atua diretamente na dinâmica de fluidos e no balanço térmico do processo. Conforme ilustra a Figura 15, o aumento da velocidade não resulta apenas na diminuição da penetração, mas provoca um estreitamento progressivo da poça de fusão. Observa-se que a camada líquida situada à frente do *keyhole* torna-se fina, alterando as condições de absorção de energia, uma vez que parte do feixe passa a incidir diretamente sobre essa interface reduzida e sobre a superfície metálica ainda sólida.

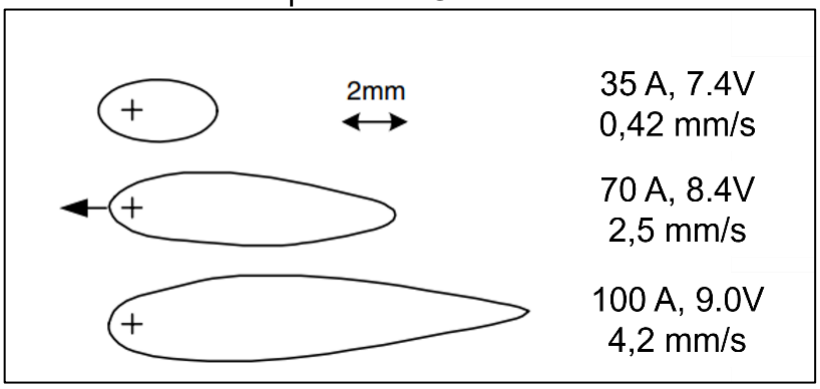
Figura 15 - Efeito de diferentes velocidades de soldagem na geometria e dinâmica do cordão de solda.



Fonte: Adaptado de Katayama (2020).

Essa restrição dimensional evolui para uma alteração morfológica. Conforme citado por Kou (2003), a poça de fusão transita de uma geometria elíptica (típica de baixas velocidades) para um formato de gota ou lágrima (*teardrop*) em velocidades mais elevadas. A Figura 16 evidencia essa mudança no processo GTAW, cujo princípio físico de fluxo de calor se aplica analogamente à soldagem a laser. Essa transição para o formato *teardrop* altera a direção de crescimento dos grãos durante a solidificação, forçando o encontro abrupto dos cristais no centro do cordão de solda, o que favorece a segregação de impurezas e aumenta a suscetibilidade a trincas de solidificação.

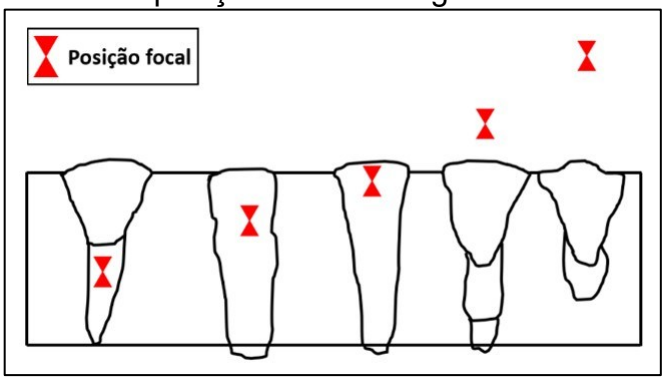
Figura 16 – Morfologia da poça de fusão em chapas de aço inoxidável AISI 304 no processo GTAW.



Fonte: Adaptado de Kou (2003).

O diâmetro do feixe laser desempenha um papel importante na dinâmica do processo de soldagem, uma vez que interfere diretamente tanto na intensidade de energia incidente quanto no tempo de interação entre o feixe e o material. De maneira geral, quando se utiliza um feixe com maior diâmetro, a densidade de potência sobre a superfície do material é reduzida, visto que a energia disponível é distribuída em uma área maior. Além disso, o tempo de exposição do material à fonte de calor é ampliado, pois o feixe percorre um ponto específico da superfície de forma mais lenta, considerando-se uma mesma velocidade de soldagem. Por outro lado, feixes de menor diâmetro favorecem a obtenção de cordões de solda com maiores profundidades de penetração. Nesse contexto, a posição focal em relação à superfície irá influenciar diretamente no diâmetro do feixe, que por sua vez terá impacto na penetração do cordão de solda obtido, consequência da variação da distribuição de energia. A Figura 17 apresenta a influência da posição focal do feixe laser.

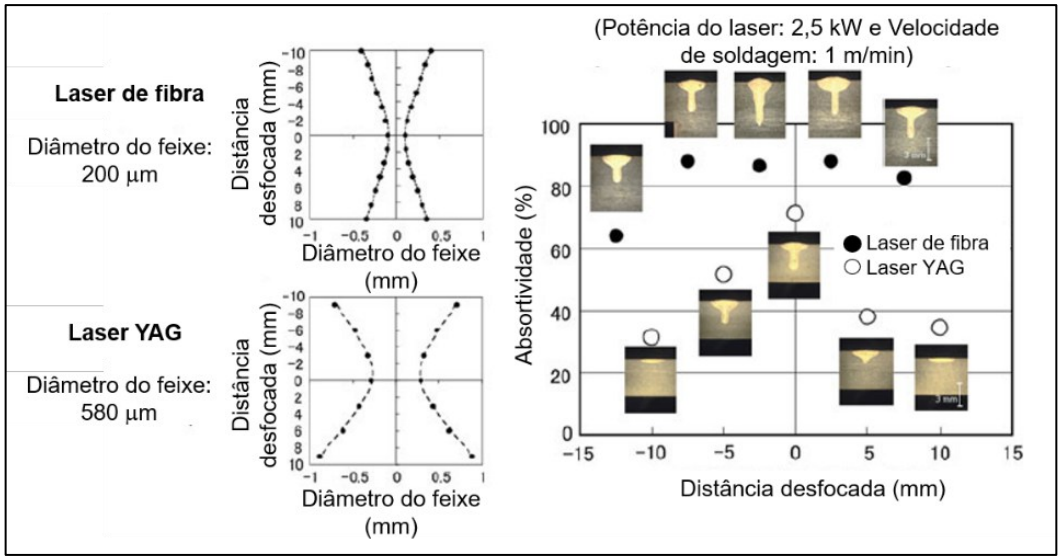
Figura 17 - Influência da posição do foco na geometria do cordão de solda.



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2016).

Katayama *et al.* (2012) realizaram ensaios de soldagem no aço inoxidável 304 utilizando laser de fibra e laser YAG sob diferentes condições de foco do feixe laser. Os autores observaram que, para uma potência do laser de 2,5 kW e velocidade de soldagem de 1 m/min, a absortividade do laser de fibra foi significativamente maior do que a do laser YAG nas mesmas distâncias de desfocalização, conforme ilustrado na Figura 18. Essa diferença foi atribuída ao menor diâmetro do ponto do feixe do laser de fibra (0,2 mm), que proporciona uma maior densidade de potência e facilita a formação do *keyhole*. Além disso, observou-se que, em ambas as tecnologias, a absortividade diminui com o aumento da distância de desfocalização, enquanto o efeito do comprimento de onda foi considerado pequeno nessas condições.

Figura 18 - Comparação de condições de foco de feixe, seções transversais de cordões de solda feitos em chapas Tipo 304 em diferentes distâncias de foco e sua correspondente absortividade do laser durante a soldagem entre laser de fibra e laser YAG.



Fonte: Adaptado de Katayama; Kawahito; Mizutani (2012).

Por fim, a composição e a vazão do gás de proteção desempenham um papel fundamental na estabilidade e na qualidade da soldagem. Além da função primária de proteger a poça de fusão e a zona termicamente afetada contra a oxidação atmosférica, o gás interage diretamente com a física do processo. Gases com diferentes potenciais de ionização e condutividades térmicas, como Argônio, Hélio ou Nitrogênio, influenciam a formação e o controle da pluma de plasma, que, por sua vez, pode interferir na eficácia do feixe de laser, levando a uma absorção de energia indesejada. Esse fenômeno, conhecido como absorção por *bremsstrahlung* inversa,

pode limitar a penetração efetiva e, em casos extremos, causar instabilidades na soldagem. Essa complexidade demonstra que, para uma compreensão aprofundada do processo, é fundamental avaliar os parâmetros derivados de interação, que descrevem a energia efetivamente entregue ao material. Grandezas como a densidade de potência, fator de potência e tempo de interação, tornam-se essenciais para essa análise.

2.2.2 Parâmetros Derivados de Interação

Suder e Williams (2012) propuseram três parâmetros fundamentais que regem a interação entre o laser e o material: densidade de potência, tempo de interação e energia pontual específica. Esses parâmetros estão diretamente ligados à potência do laser, à velocidade de soldagem e à área do feixe laser na superfície do material, sendo aplicáveis de forma consistente mesmo entre equipamentos com diferentes configurações ópticas. De acordo com os autores, a profundidade da solda é fortemente influenciada pela densidade de potência e pela energia pontual específica, enquanto a largura do cordão de solda está mais associada ao tempo durante o qual o feixe interage com o material.

Desse modo, a densidade de potência (DP) pode ser definida como a razão entre a potência do laser (P) e a área do feixe laser na superfície (As), que é dada pela Equação (3):

$$DP = \frac{P}{As}[W * m^{-2}] \tag{3}$$

Adicionalmente, o tempo de interação (τi) define o tempo em que um determinado ponto do material é exposto ao feixe laser, enquanto o feixe se move com uma velocidade de soldagem constante (v). Considerando um ponto na linha do centro do cordão de solda com um certo diâmetro (d). Conforme Equação (4):

$$\tau i = \frac{d}{v}[s] \tag{4}$$

Em estudos posteriores, os mesmos autores (Suder; Williams, 2014) observaram que a profundidade de penetração apresenta uma correlação mais significativa com o fator de potência do que com a densidade de potência isoladamente. Outros pesquisadores, como Zou *et al.* (2015), também identificaram o fator de potência como um critério mais eficaz para distinguir entre os modos de condução térmica e penetração profunda durante a soldagem a laser. O fator de potência (FP) é definido como a razão entre a potência do laser (P) e o diâmetro do feixe no plano focal (d), sendo expresso pela equação (5):

$$FP = \frac{P}{d}[W * m^{-1}] \tag{5}$$

Esse parâmetro empírico é utilizado para comparar diferentes condições de soldagem, pois reflete de forma simplificada a intensidade de energia disponível no ponto focal. Diferentemente da densidade de potência, que considera a área efetiva de incidência do feixe na superfície, o fator de potência não possui unidade física direta, mas tem se mostrado um critério eficaz para distinguir entre os modos condução e *keyhole*.

Em conjunto, esses parâmetros de interação oferecem uma maneira mais robusta de caracterizar o processo de soldagem a laser. A importância da densidade de potência, em particular, torna-se evidente quando se considera a transição entre os modos de soldagem. Ao atingir um valor crítico, tipicamente na ordem de 10^6 W/cm², a energia do feixe é suficiente para causar a vaporização do material, dando origem ao modo *keyhole*.

2.3 FORMAÇÃO E ESTABILIDADE DO *KEYHOLE*

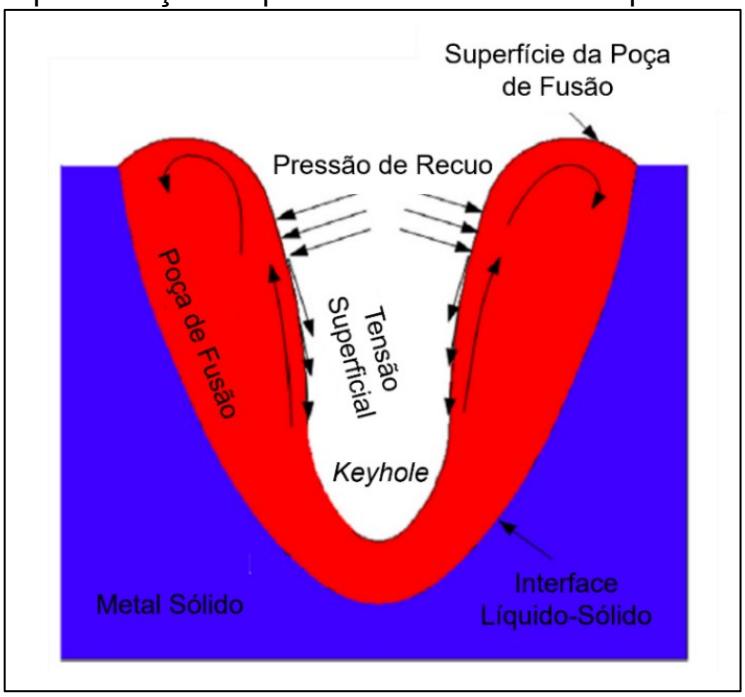
A formação e a manutenção do *keyhole* dependem fundamentalmente de um equilíbrio dinâmico entre forças que atuam para abrir a cavidade e forças que tendem a fechá-la. Esse balanço de pressões é ilustrado esquematicamente na Figura 19, que detalha os principais mecanismos físicos atuantes nas paredes do capilar.

Conforme observado no esquema, a principal força responsável pela abertura e sustentação do *keyhole* é a pressão de recuo. Essa força é gerada pela violenta vaporização do metal na superfície interna da cavidade, à medida que o vapor é

expelido em alta velocidade, ele exerce uma força de reação contra as paredes líquidas, mantendo o capilar aberto contra o colapso (Gao *et al*., 2018).

Em contrapartida, atuam as forças de fechamento, sendo a tensão superficial a mais predominante. Essa força tende a minimizar a área de superfície da poça, exercendo uma pressão centrípeta que tenta colapsar o *keyhole*. Adicionalmente, a pressão hidrostática (peso da coluna líquida) também contribui para o fechamento, embora em menor magnitude. A estabilidade do processo, portanto, depende da capacidade da pressão de recuo em superar continuamente a soma das pressões de tensão superficial e hidrostática, enquanto o fluxo de fluido (convecção de Marangoni) redistribui o calor e a massa ao redor da cavidade (Fabbro, 2010; Gao *et al*., 2018; Schmidt *et al*., 2024; Wang *et al*., 2026).

Figura 19 – Representação esquemática do fluxo e do equilíbrio de pressões.



Fonte: Adaptado de Gao *et al.* (2018).

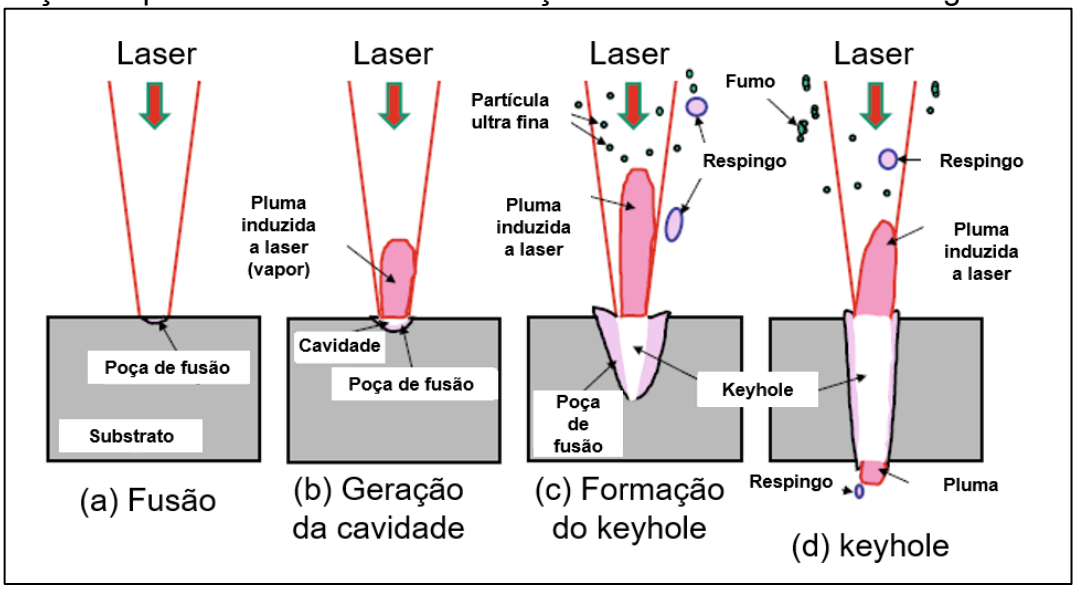
2.3.1 Mecanismos de Formação do *Keyhole*

A formação do *keyhole* ocorre quando a densidade de potência do feixe supera o limiar crítico de vaporização. A evolução temporal desse mecanismo é detalhada na Figura 20. O processo inicia-se com a absorção de energia e a formação da poça fundida superficial (a). Com a continuidade do aporte térmico, a temperatura

atinge o ponto de ebulição, gerando uma pressão de recuo que inicia a depressão da superfície líquida (b).

À medida que o capilar se aprofunda (c e d), o fluxo de vapor expelido em alta velocidade (pluma induzida) interage violentamente com as paredes da poça de fusão. Essa exaustão gasosa arrasta consigo metal líquido e condensados, dando origem aos subprodutos visíveis no esquema: fumos, partículas ultrafinas e respingos. Portanto, a presença desses elementos ejetados não é aleatória; ela é a evidência física da intensa pressão de recuo que mantém a cavidade aberta contra a tensão superficial (Brock; Hohenstein; Schmidt, 2014; Fabbro, 2010; Pang *et al*., 2016; Tao *et al*., 2023).

Figura 20 - Ilustração esquemática dos fenômenos físicos de fusão, formação da poça de fusão e cavidade, evolução do *keyhole*, ejeção de pluma, respingos, formação de partículas ultrafinas e formação de fumo durante a soldagem a laser.



Fonte: Adaptado de Katayama (2020).

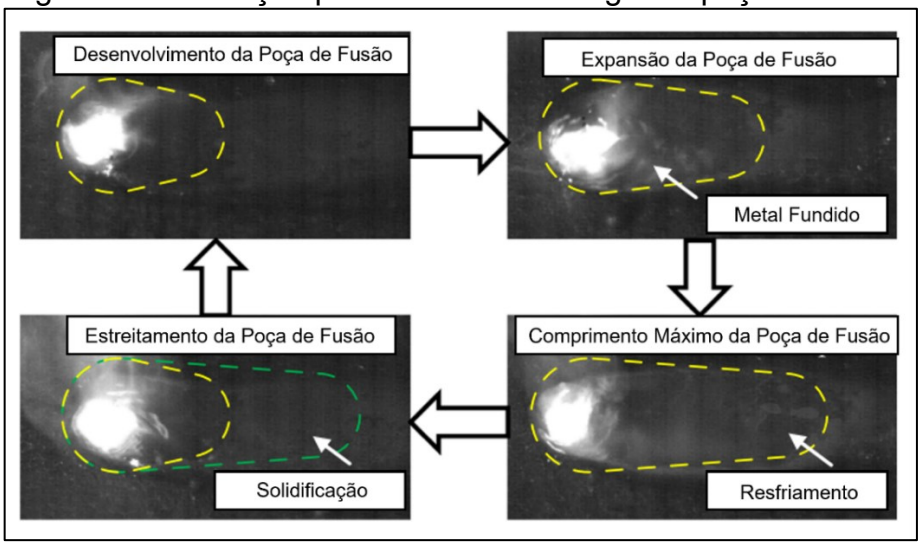
Uma vez formado, o *keyhole* adquire uma estrutura cilíndrica ou cônica que se aprofunda no material à medida que o processo de soldagem prossegue. A profundidade e estabilidade dessa cavidade são diretamente relacionadas à potência do laser e à taxa de absorção de energia pelo material. Para materiais como o AISI 304, que apresentam alta absorção de energia em comprimentos de onda específicos do laser, o *keyhole* pode atingir profundidades significativas com uma densidade de potência relativamente alta. A formação do *keyhole* é ainda influenciada pela composição do material e por propriedades termofísicas, como condutividade térmica

e calor específico, que determinam a dissipação de calor nas zonas adjacentes à poça de fusão (Katayama, 2020; Tao *et al*., 2023).

2.3.2 Fatores que Influenciam a Estabilidade do *Keyhole*

A estabilidade do *keyhole* é um fator crucial para assegurar a qualidade da solda, uma vez que flutuações nessa cavidade podem resultar em variações na penetração e gerar descontinuidades como porosidade e trincas. A pressão de recuo, gerada pela vaporização intensa do metal no *keyhole*, desempenha um papel central na manutenção da cavidade aberta. Contudo, essa pressão oscila conforme a taxa de vaporização e, consequentemente, influencia a estabilidade do *keyhole*. Pang *et al.* (2016) observaram que essas flutuações causam um comportamento oscilatório da pluma de vapor, que responde em frequência e intensidade conforme os parâmetros operacionais. Buscando quantificar essas oscilações, Lei *et al.* (2018) utilizaram imagens de alta velocidade para extrair parâmetros como o comprimento, largura e período de oscilação da poça de fusão, cujo ciclo de variação periódica é ilustrado na Figura 21. Os autores demonstraram que a potência do laser é o fator dominante que governa a morfologia e a dinâmica oscilatória da poça.

Figura 21 – Variação periódica da morfologia da poça de fusão.



Fonte: Adaptado de Lei *et al.* (2018).

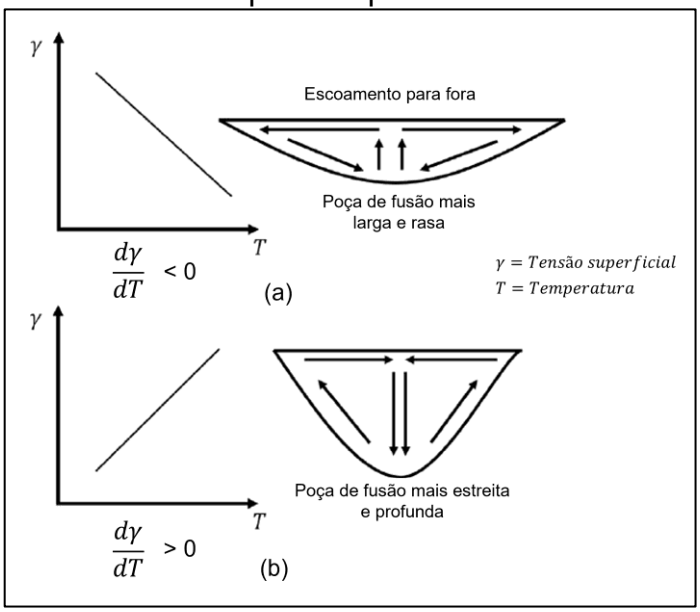
A origem deste comportamento oscilatório reside no complexo equilíbrio de forças que atuam sobre a poça de fusão. O plasma desempenha papel duplo, pois, por um lado ele facilita a absorção de energia pelo material e por outro, pode atuar

como um meio difusor, reduzindo a densidade de potência efetiva do feixe incidente (Steen; Mazumder, 2010). A pressão de recuo do vapor e do plasma promove a abertura da cavidade, enquanto a tensão superficial do metal líquido e a pressão hidrostática da poça tendem a colapsar a mesma (Fotovvati *et al*., 2018).

Adicionalmente, os intensos gradientes de temperatura na superfície da poça de fusão geram variações locais na tensão superficial, induzindo um movimento convectivo de massa conhecido como fluxo de Marangoni ou termocapilar (Fabbro, 2010; Kshirsagar *et al*., 2021; Le; Lo, 2019). A influência determinante desse mecanismo na geometria da poça é detalhada na Figura 22.

Conforme ilustrado em (a), para materiais onde o coeficiente de tensão superficial em relação à temperatura é negativo ($d\gamma/dT < 0$), o fluido escoa do centro quente (menor tensão) para as bordas frias (maior tensão), resultando em uma poça larga e rasa. Por outro lado, a presença de elementos tensoativos pode inverter esse comportamento, conforme mostrado em (b). Nesse caso ($d\gamma/dT > 0$), a tensão superficial torna-se maior na região central mais quente, invertendo o sentido do fluxo para dentro e para o fundo da poça, o que favorece a penetração e gera perfis mais estreitos e profundos. A estabilidade da soldagem está diretamente associada à manutenção desse equilíbrio dinâmico, onde é observada uma flutuação contínua na forma e no tamanho do *keyhole* (Gao; Wen; Katayama, 2013).

Figura 22 - Diagramas esquemáticos dos padrões de escoamento do fluido na poça de fusão para: (a) gradiente de tensão superficial negativo e (b) gradiente de tensão superficial positivo.

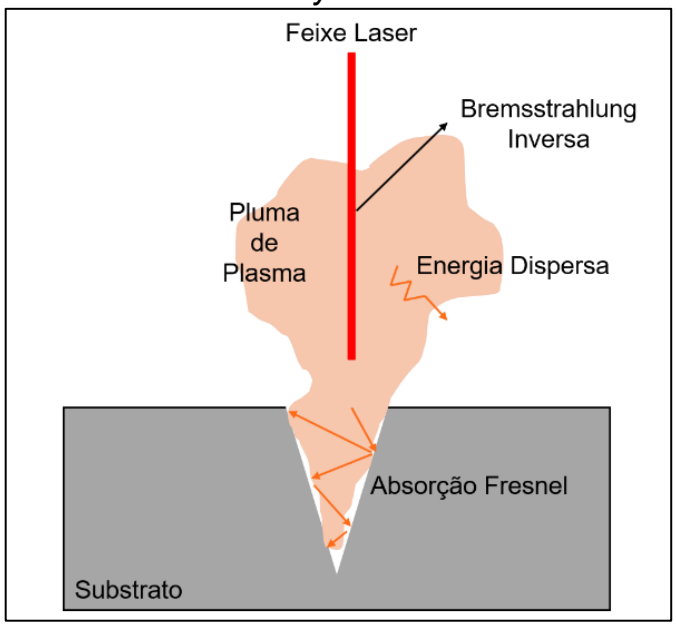


Fonte: Adaptado de Le; Lo (2019).

Outros dois mecanismos principais atuam na absorção da energia do feixe laser. O primeiro é a absorção por *bremsstrahlung* inversa, fenômeno que ocorre no plasma parcialmente ionizado, onde os fótons transferem sua energia aos elétrons livres, que por sua vez a transmitem ao material. Esse mecanismo geralmente ocorre em condições de baixas velocidades de soldagem, nas quais há tempo suficiente para o desenvolvimento de um plasma denso. Entretanto, um plasma denso desfoca o feixe, o que modifica a penetração e pode resultar em instabilidade do cordão de solda. A seleção adequada do gás de proteção desempenha papel fundamental no controle e formação do plasma, sendo um dos principais fatores responsáveis pela estabilidade do *keyhole* (Gao; Wen; Katayama, 2013).

O outro mecanismo é conhecido como absorção de Fresnel, que ocorre nas paredes do *keyhole*. Esse processo resulta das múltiplas reflexões do feixe laser nessas paredes internas, promovendo uma elevada absorção direta pelo material. Esse mecanismo é favorecido em altas velocidades de soldagem, porém depende da polarização do feixe laser (Steen; Mazumder, 2010). A Figura 23 ilustra ambos os mecanismos de absorção de energia.

Figura 23 – Esquemático dos mecanismos de absorção do feixe laser no modo *keyhole*.

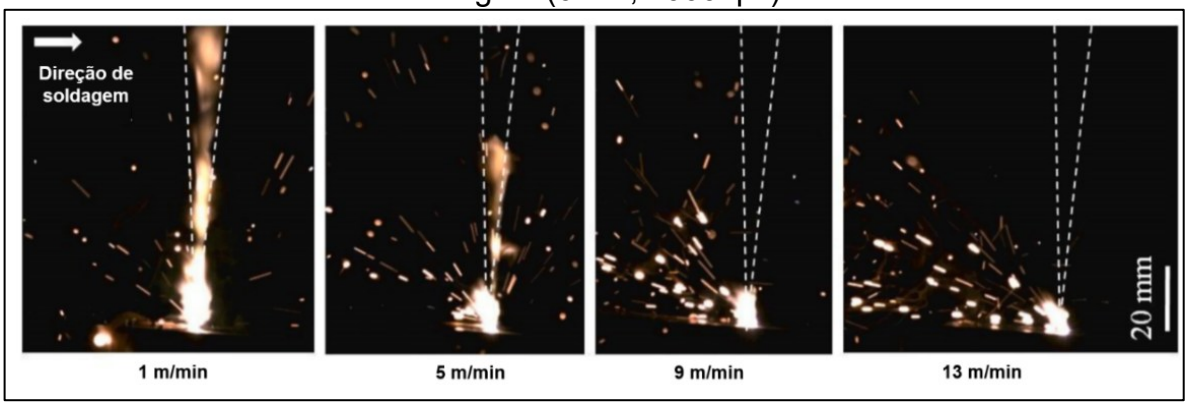


Fonte: Do autor (2026).

O estudo de Zou *et al.* (2021) investigou o mecanismo de absorção por *bremsstrahlung* inversa ao utilizar diferentes níveis de energia de soldagem, com uma potência fixa de laser de 6 kW e velocidades de soldagem variando de 1 a 13 m/min.

Os resultados mostraram que plumas de plasma maiores eram observadas em velocidades de soldagem menores (Figura 24), o que corrobora com outros autores, que relacionam a pluma de plasma com a energia de soldagem, esse sendo a relação direta entre potência do feixe laser e velocidade de soldagem.

Figura 24 - Alteração da morfologia da pluma com diferentes velocidades de soldagem (6 kW, 2000 fps).

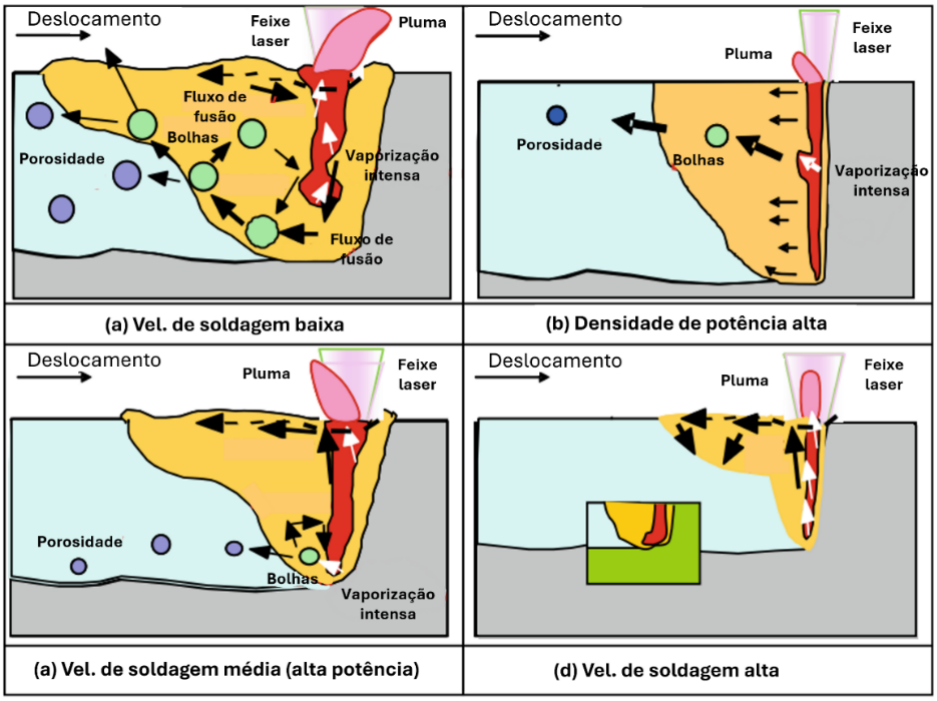


Fonte: Adaptado de Zou *et al.* (2021).

Além da energia de soldagem, a densidade de potência e o tempo de interação do feixe com o material são determinantes para a geometria e estabilidade do capilar. Altas densidades de potência favorecem a formação de uma cavidade profunda devido ao aumento da taxa de evaporação e da pressão de recuo, força motriz que mantém o *keyhole* aberto. No entanto, o excesso de energia ou velocidades de soldagem inadequadas podem induzir turbulências severas no metal líquido.

A Figura 25 esquematiza a correlação entre essas variáveis operacionais e a integridade da poça. Observa-se que flutuações intensas na pressão de recuo desestabilizam as paredes do capilar, especialmente a parede traseira. Quando a força de abertura falha momentaneamente, o fluxo de metal fundido colapsa sobre a cavidade, aprisionando o vapor metálico ou gases de proteção antes que eles possam escapar. Esse mecanismo de colapso e aprisionamento dá origem às bolhas de gás/vapor, que, ao solidificarem, resultam em porosidades no cordão de solda (Brock; Hohenstein; Schmidt, 2014; Pang *et al*., 2016).

Figura 25 – Representação esquemática do comportamento da pluma de plasma, *keyhole* e fluxos de fusão na geração de bolhas que ocasionam porosidade na poça de fusão em diferentes condições.



Fonte: Adaptado de Katayama *et al.* (2010).

Outro fator que exerce grande influência na estabilidade do *keyhole* é o gás de proteção. Gases como o argônio atuam tanto na proteção da zona de soldagem contra contaminações quanto no controle da pressão em torno do *keyhole* e da poça de fusão. O nível de pressão ambiente aplicado pelo gás impacta a forma da pluma de vapor, o que promove o alinhamento da coluna de vapor e previne o colapso da cavidade. Em condições de baixa pressão, o *keyhole* apresenta uma estabilidade superior, com menores oscilações da pluma de vapor e uma solda mais uniforme. Esse comportamento sugere que, ao ajustar adequadamente o modo de alimentação e a vazão do gás de proteção, é possível otimizar a estabilidade do *keyhole* para obter uma solda de maior qualidade e menor incidência de porosidade (Li *et al*., 2021).

O argônio, por ser um gás inerte com alta densidade, pode resultar em uma pluma de plasma mais robusta. No entanto, sua incapacidade de se dissolver no metal de solda também pode contribuir para a formação de poros (Grevey *et al*., 2005; Hosseini Motlagh *et al*., 2013). Esses fatores, incluindo a velocidade de fluxo do material fundido e o comportamento oscilatório da pluma, foram detalhados por Meng *et al.* (2019), que destacam como a taxa de absorção e dissipação de calor afeta o processo. Gao *et al.* (2015) sugerem que, conforme a pluma de vapor emerge da

cavidade do *keyhole*, ela afeta a estabilidade da poça de fusão ao interagir com as bordas internas do *keyhole*. Esse comportamento, citado no trabalho de Fotovvati *et al.* (2018), é chamado de *metal crown* (coroa de metal fundido).

Além da influência na formação de porosidade, a dinâmica do *keyhole* e da pluma de plasma pode ser otimizada através da condição adequada do gás de proteção, resultando em menos flutuações e colapsos do *keyhole*. Trabalhos como os de Tsukamoto (2011) e Zhao *et al.* (2011) confirmam essa relação. Nesse contexto, a análise dos efeitos do gás de proteção na soldagem a laser é fundamental para otimizar processos, especialmente em aplicações industriais onde a qualidade e a integridade do cordão de solda são cruciais. A combinação de parâmetros como a densidade de potência do laser, o tempo de interação e a condição de alimentação do gás de proteção pode ser ajustada para maximizar a eficiência do processo de soldagem e minimizar a ocorrência de descontinuidades.

2.4 FORMAÇÃO DE POROSIDADES

A complexa interação entre o feixe laser, o material e a atmosfera, aliada à alta taxa de aquecimento e resfriamento, torna o processo suscetível à formação de descontinuidades. A porosidade é um dos mais comuns e prejudiciais à integridade mecânica do cordão de solda (Katayama, 2020). Sua formação está relacionada a três causas principais: a instabilidade do *keyhole*, condições inadequadas da superfície do material e as características físico-químicas dos materiais utilizados. Desse modo, entender os mecanismos físicos e os fatores operacionais envolvidos na geração de poros é crucial para o desenvolvimento de procedimentos de prevenção e para a obtenção de cordões de solda de alta qualidade, especialmente em aços inoxidáveis, como o AISI 304, que é o foco deste trabalho.

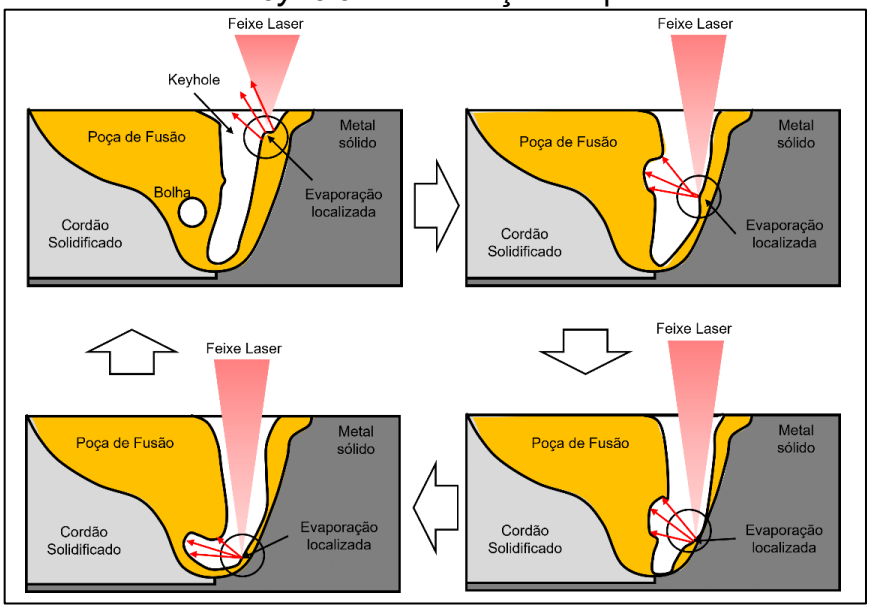
2.4.1 Mecanismos de Formação de Porosidades

Durante a soldagem com lasers contínuos de alta potência, poros são frequentemente observados na zona de fusão, e sua formação fortemente associada à instabilidade do *keyhole* e da poça de fusão (Katayama; Iviizutanf; Matsunawa, 2003; Seto; Katayama; Matsunawa, 2000). A literatura propõe diversos mecanismos

para o aprisionamento de gases durante a solidificação, que resultam na formação de porosidades.

Um dos mecanismos mais citados na literatura é o colapso do *keyhole*, processo que pode resultar no aprisionamento de bolhas de vapor metálico ou de gás de proteção no interior do metal líquido (58,59). A dinâmica desse fenômeno é esquematizada na Figura 26. Observa-se que a vaporização intensa, em conjunto a fluxos turbulentos no interior da cavidade, induz o desprendimento de bolhas de vapor que são capturadas pela retaguarda da poça de fusão. Caso essas bolhas não tenham tempo suficiente para migrar e escapar pela superfície antes do avanço da frente de solidificação, elas acabam retidas na matriz metálica, consolidando-se como porosidade. Observações com câmera de alta velocidade revelam que essas bolhas se originam na raiz do *keyhole*, subindo com os fluxos da poça de fusão até serem aprisionadas na interface sólido-líquido (Katayama; Iviizutanf; Matsunawa, 2003; Seto; Katayama; Matsunawa, 2000). O estudo de Bergmann *et al.* (2010), utilizando transmissão de raios X microfocados em materiais como o aço inoxidável AISI 304, demonstram que bolhas pequenas e grandes se formam principalmente na extremidade do *keyhole* e podem ser capturadas pela frente de solidificação. Na soldagem do aço inoxidável AISI 304, as bolhas tendem a se mover para cima e para trás, mas frequentemente não alcançam a superfície livre, sendo aprisionadas nas regiões inferiores do cordão de solda.

Figura 26 – Instabilidade do *keyhole* associada à evaporação localizada na parede frontal do *keyhole* e à formação de porosidade.



Fonte: Adaptado de Matsunawa *et al.* (2002).

Estudos complementares, como os de Zhao *et al.* (2020) e Huang *et al.* (2022), aprofundaram a compreensão sobre a formação da porosidade na soldagem a laser, vinculando-a diretamente à instabilidade e ao colapso do *keyhole*.

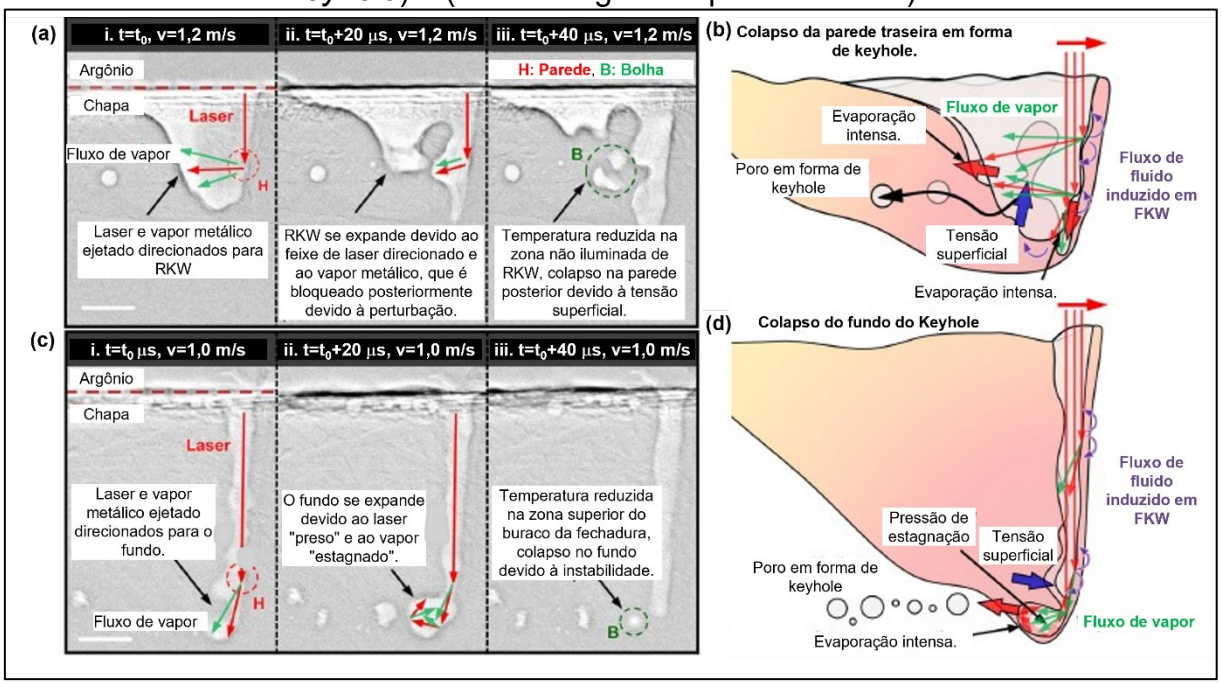
Por meio de modelagem numérica, Zhao *et al.* demonstraram que flutuações abruptas na profundidade do capilar levam ao seu estrangulamento. Esse fenômeno resulta no aprisionamento de gás, formando bolhas que são subsequentemente capturadas pela frente de solidificação. De forma complementar, as simulações de Huang *et al.* revelaram que tanto o colapso da parede dianteira quanto o da traseira são mecanismos ativos de geração de bolhas, sendo as regiões de constrição do canal de vapor particularmente suscetíveis à nucleação.

A Figura 27 ilustra detalhadamente esses mecanismos. Em (a) e (b), são apresentados, respectivamente, a radiografia e o modelo esquemático do colapso da parede traseira. Observa-se que a reflexão intensa do feixe nessa região provoca uma vaporização localizada e violenta, gerando uma protuberância que desestabiliza a parede do capilar e resulta no desprendimento de bolhas em direção à poça de fusão.

Por outro lado, o mecanismo de formação de poros na raiz é evidenciado em (c) (radiografia) e (d) (esquemático). Nessas condições, a concentração de energia ocorre predominantemente no fundo do *keyhole*, fazendo com que a expansão de vapor seja direcionada para a base. Esse comportamento favorece o aprisionamento de gases nas regiões mais profundas do cordão, consolidando-se como porosidade de raiz.

Esses trabalhos corroboram, portanto, que a instabilidade hidrodinâmica, seguida pelo transporte e eventual aprisionamento de bolhas pela frente de solidificação, constitui o mecanismo fundamental que governa a formação de poros. A complexa interação entre a energia do processo e o tempo de solidificação explica a ocorrência de padrões de porosidade distintos, como os observados na raiz, distribuídos aleatoriamente ou em formato alongado, em função dos parâmetros de soldagem utilizados.

Figura 27 - Mecanismo de colapso do *keyhole* e transições associadas do regime de fusão por *keyhole* no processo LPBF. (a) Radiografias LPBF em chapa de alumínio sem revestimento no regime de transição, mostrando o colapso da parede traseira do *keyhole* com ilustração associada (b). (c) Radiografias da LPBF em chapa de alumínio sem revestimento no regime instável, mostrando o colapso da base do *keyhole* com ilustração associada (d). (RKW - Expansão da parede traseira do *keyhole*) e (FKW - Ângulo da parede frontal).



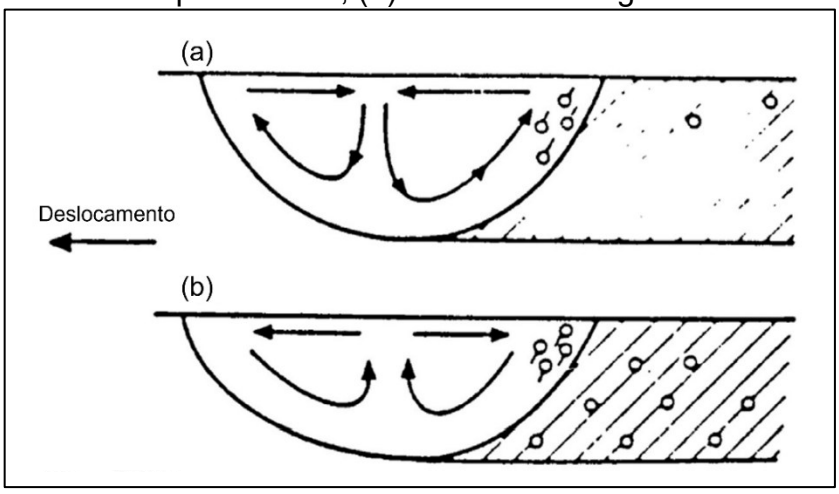
Fonte: Adaptado de Huang *et al.* (2022).

Outro mecanismo relevante envolve a presença de gases dissolvidos no material, como hidrogênio, nitrogênio ou oxigênio. Como a solubilidade desses elementos no metal sofre uma redução durante a transição da fase líquida para a sólida, ocorre a rejeição do gás excedente na frente de solidificação. Esse fenômeno leva à nucleação de bolhas justamente quando o material está solidificando, caso a velocidade de avanço da frente sólida seja superior à velocidade de flutuação e escape dessas bolhas, elas acabam sendo aprisionadas na matriz metálica, consolidando-se como porosidade (Katayama; Iviizutanf; Matsunawa, 2003).

Embora menos comum para o aço inoxidável AISI 304, reações metalúrgicas internas entre elementos na poça de fusão também podem gerar gases que causem porosidades (Wainer; Brandi; Mello, 2004). Adicionalmente, a alta intensidade do feixe laser e a dinâmica do *keyhole* podem gerar fluxos turbulentos na poça de fusão, capazes de arrastar bolhas de gás para o interior da poça, aumentando a probabilidade de aprisionamento do gás (Katayama; Iviizutanf; Matsunawa, 2003).

Além da instabilidade do *keyhole*, a própria dinâmica de fluidos dentro da poça de fusão desempenha um papel crucial no aprisionamento de bolhas. O principal mecanismo que governa a circulação do metal líquido na superfície é o fluxo Marangoni. A direção deste fluxo pode facilitar ou dificultar a remoção de bolhas de gás. Conforme ilustrado por Le *et al.* (2019), a presença de elementos tensoativos (como o nitrogênio) na poça de fusão pode inverter o coeficiente de tensão superficial, alterando o regime de fluxo de um movimento radial para fora para um radial para dentro (inverso). A Figura 28 esquematiza o impacto dessa hidrodinâmica na eliminação de gases. No cenário de fluxo inverso, representado na Figura 28 (a), as correntes de convecção atuam movendo as bolhas para longe da frente de solidificação, direcionando-as para o centro líquido onde podem flutuar e escapar. Em contrapartida, no fluxo convencional para fora Figura 28 (b), o movimento do fluido empurra as bolhas diretamente contra a frente de solidificação em avanço, aumentando a probabilidade de aprisionamento e a consequente formação de porosidades no cordão de solda.

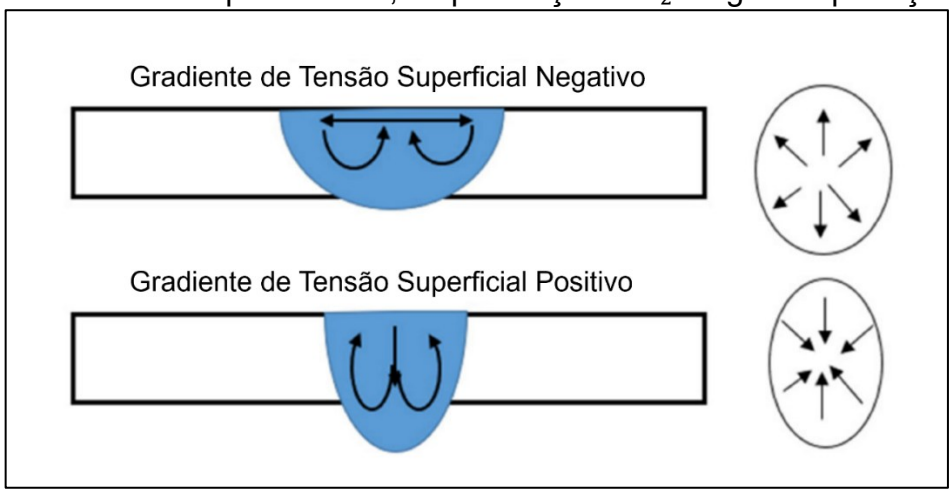
Figura 28 - Efeitos do movimento da poça de fusão na porosidade: (a) fluxo de Marangoni radialmente para dentro; (b) fluxo de Marangoni radialmente para fora.



Fonte: Adaptado de Le *et al.* (2019).

Esse mesmo comportamento foi observado por Kshirsagar *et al.* (2021) que ao investigarem o processo de soldagem TIG aplicado ao aço inoxidável AISI 304L, verificaram que a adição de nitrogênio ao gás de proteção altera a geometria do cordão de solda, o que sugere uma mudança no fluxo Marangoni, conforme ilustra a Figura 29.

Figura 29 - Inversão da convecção de Marangoni, passando de fluxo radial para fora para fluxo radial para dentro, na presença de N_2 no gás de proteção.



Fonte: Adaptado de Kshirsagar *et al.* (2021).

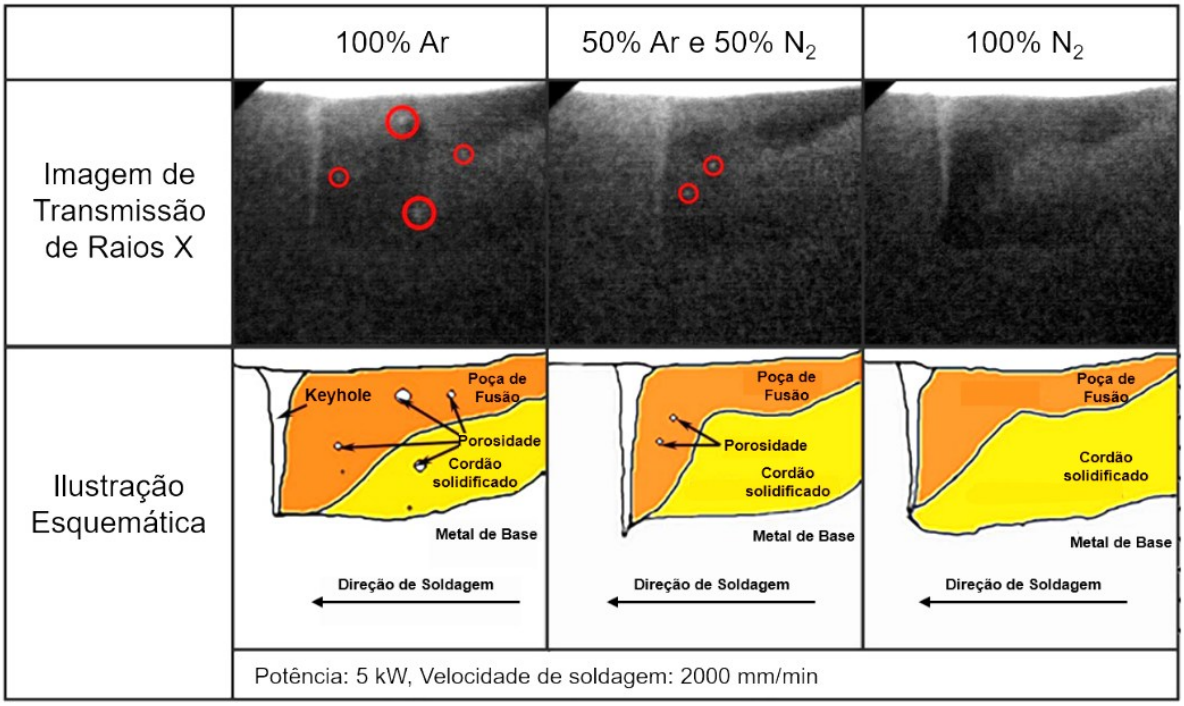
2.4.2 Fatores que Influenciam na Formação de Porosidades

A formação de porosidade é influenciada por uma série de parâmetros de processo e propriedades do material, e a otimização desses fatores é essencial para a sua prevenção. Estudos demonstram que o nitrogênio é significativamente mais eficaz na redução de porosidades em aços inoxidáveis AISI 304 do que o argônio. Sun *et al.* (2017a) e Elmer *et al.* (2014) observaram que cordões de solda em aço inoxidável AISI 304 produzidos com argônio como gás de proteção exibiam alta porosidade, em contraste com aqueles produzidos com nitrogênio, que apresentou porosidade mínima ou quase nula. Esse efeito é atribuído à maior solubilidade do nitrogênio no aço inoxidável líquido, o que permite que as bolhas de gás sejam absorvidas pela poça de fusão, em vez de serem aprisionadas.

Esse mesmo fenômeno foi observado por Hafez (2023) ao analisar a dinâmica interna do *keyhole* via transmissão de raios X, conforme apresentado na Figura 30. O autor concluiu que o uso de nitrogênio é fundamental para a supressão de poros, pois atua diretamente nas propriedades físicas do metal fundido, reduzindo a tensão superficial e a viscosidade. No caso do argônio, a alta tensão superficial favorece a constrição e o colapso momentâneo da base do capilar, gerando fluxos de vórtice violentos que nucleiam bolhas na ponta do *keyhole*, as quais acabam aprisionadas pela frente de solidificação. Em contrapartida, a adição de nitrogênio melhora a fluidez do metal líquido, mantendo o *keyhole* aberto e estável, essa geometria não colapsada

permite que eventuais bolhas ou vapores tenham um caminho livre para escapar pela superfície antes de serem retidos no cordão solidificado.

Figura 30 - Observação da transmissão de raios X microfocada do comportamento do *keyhole* durante a soldagem a laser de aço inoxidável AISI 304 com diferentes gases de proteção.



Fonte: Adaptado de Hafez (2023).

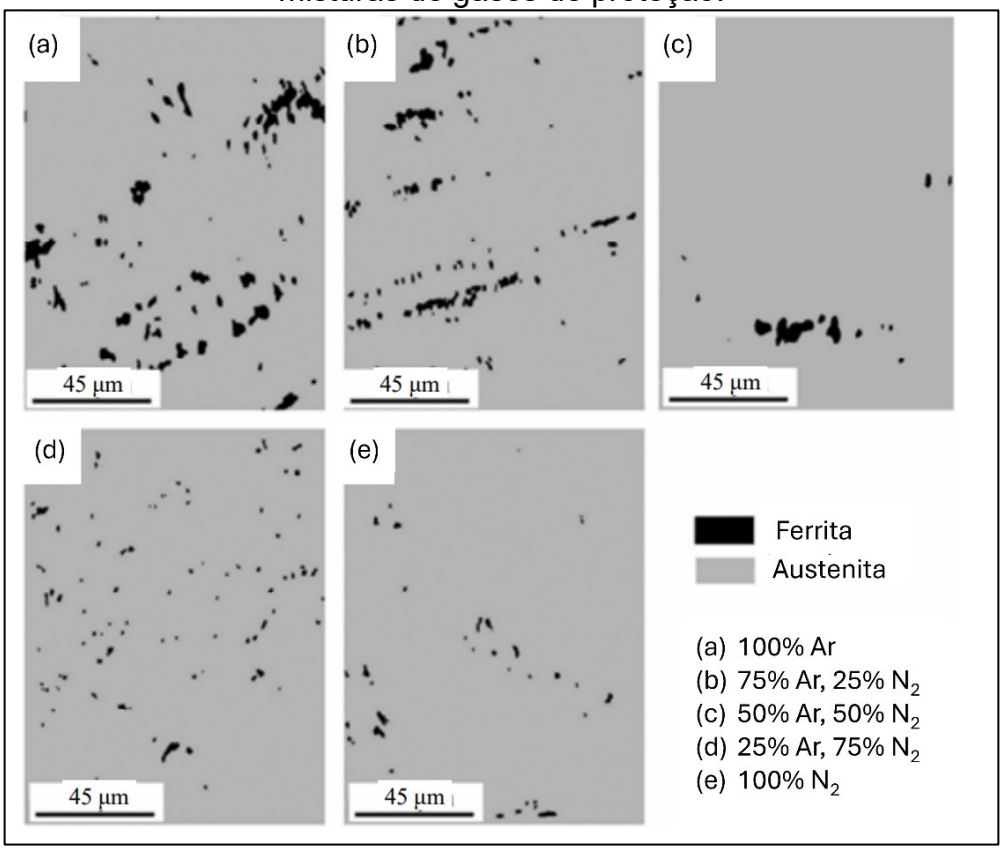
A eficácia do nitrogênio na supressão de porosidade na soldagem a laser do aço inoxidável AISI 304 está ligada a dois mecanismos principais. Primeiramente, os gases de proteção possuem propriedades físico-químicas distintas, o nitrogênio, por exemplo, apresenta maior condutividade térmica que o argônio, o que pode impactar positivamente na estabilidade do *keyhole*. Em segundo lugar, o nitrogênio possui interações metalúrgicas únicas com a poça de fusão: ele possui alta solubilidade na fase austenítica (γ), o que favorece sua dissolução no metal líquido em vez da formação de bolhas de gás, que são precursoras de porosidades (Hafez, 2023).

Elmer *et al.* (2014) destacam que essa alta solubilidade é um fator determinante, pois permite que o nitrogênio presente no *keyhole* seja rapidamente absorvido pela poça de fusão, reduzindo o potencial de aprisionamento de gás e, consequentemente, a formação de poros. Além disso, a dissolução do nitrogênio na matriz metálica pode influenciar as propriedades metalúrgicas do cordão de solda, atuando como estabilizador da fase austenítica e contribuindo para o aumento da

resistência mecânica. No entanto, quando presente em excesso, o nitrogênio pode promover a formação de nitretos de cromo, o que reduz localmente a resistência à corrosão.

Adicionalmente, o nitrogênio atua como um potente elemento estabilizador da austenita. Conforme demonstrado por Kwak *et al.* (2022) e Hafez (2023), a absorção de nitrogênio durante a soldagem promove uma microestrutura predominantemente austenítica, suprimindo a formação de ferrita-δ. Essa transformação é importante, pois a ferrita-δ apresenta menor capacidade de dissolver gases, portanto, sua redução contribui para diminuir o número de sítios onde os gases poderiam se aprisionar e originar poros durante a solidificação, efeito quantificado e ilustrado na Figura 31. No entanto, vale destacar que pequenas frações de ferrita-δ podem exercer papel benéfico na resistência à fissuração a quente e no alívio de tensões durante a solidificação, sendo, portanto, desejável um balanço adequado entre as fases ferrítica e austenítica.

Figura 31 - Mapa de fases EBSD da zona de fusão produzida sob diferentes misturas de gases de proteção.

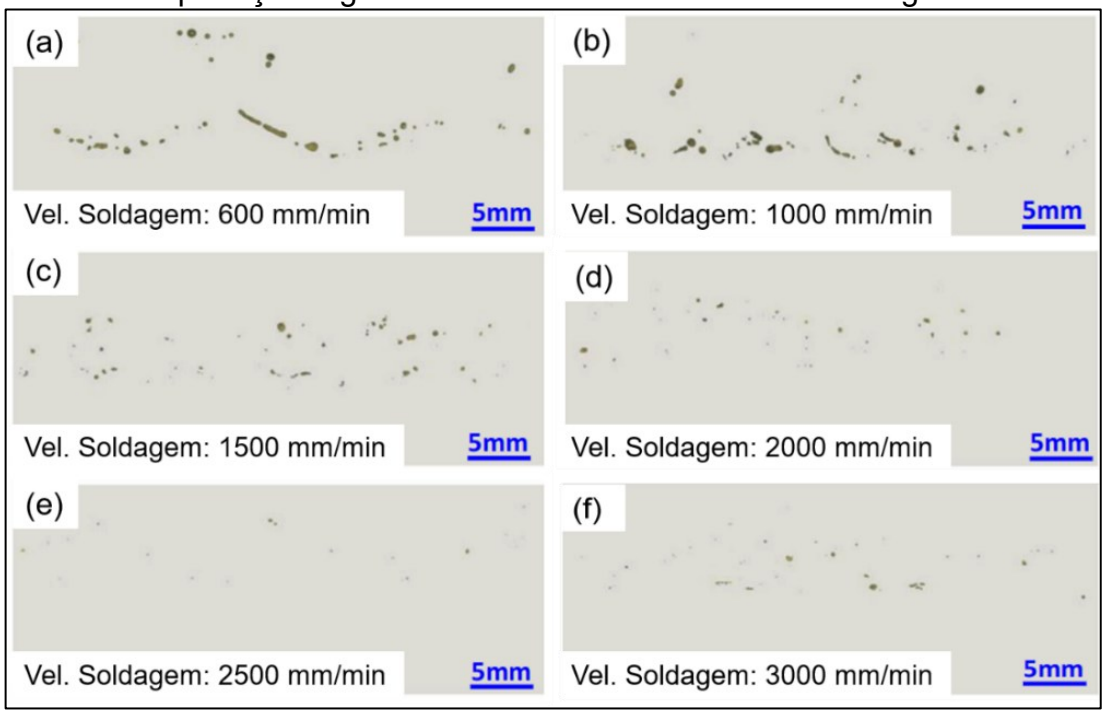


Fonte: Adaptado de Kwak *et al.* (2022).

A vazão e a geometria do gás de proteção também são cruciais para garantir uma blindagem eficaz da poça de fusão e do *keyhole* contra a atmosfera. Wang *et al.* (2007) demonstraram que o aumento da vazão amplia a zona de proteção efetiva, mas uma vazão excessivamente alta pode induzir turbulência na poça de fusão, aumentando o risco de aprisionamento de bolhas ou instabilidade do *keyhole*. Adicionalmente, a geometria de entrega do gás, incluindo o ângulo e o diâmetro do bocal, desempenha um papel relevante. Wang *et al.* (2007) indicam que um ângulo de inclinação menor resulta em uma área de blindagem mais extensa e eficaz. Embora não exista consenso na literatura sobre a melhor condição para o diâmetro do bocal, essa variável tem demonstrado influência significativa na estabilidade do processo de soldagem. Zhao *et al.* (2016) discutem o uso de bocais de pequeno diâmetro para o controle eficiente do plasma. A otimização conjunta do ângulo, vazão e diâmetro visa direcionar o fluxo de gás para estabilizar o *keyhole*, controlar o plasma induzido pelo laser e remover eficientemente vapores metálicos e gases indesejados, sem gerar turbulência excessiva na poça de fusão.

Em relação aos parâmetros do processo, potências do laser excessivas aumentam a taxa de evaporação e a geração de vapor metálico, elevando a pressão de recuo dentro do *keyhole*. Embora essa pressão seja responsável por manter a cavidade aberta, flutuações intensas decorrentes do excesso de energia podem desestabilizar o *keyhole*, levando ao seu colapso parcial e favorecendo a formação de poros. Por outro lado, potências do laser muito baixas podem gerar *keyhole*s rasos e instáveis, igualmente propensos a descontinuidades. A velocidade de soldagem interfere no tempo de permanência das bolhas na poça, sendo que Katayama *et al.* (2003) observaram que altas velocidades reduzem esse tempo, favorecendo sua expulsão. Entretanto, Seto *et al.* (2000) notaram que, mesmo com argônio, velocidades mais altas reduziram a porosidade no aço inoxidável AISI 304, reforçando a complexa interação entre os parâmetros. Essas observações corroboram o estudo de Sun *et al.* (2017a), que, ao analisarem condições com diferentes velocidades de soldagem e potência do laser constante, observaram redução da porosidade (Figura 32). Outro fator relevante é a posição de foco do feixe laser, cuja variação altera a forma e estabilidade do *keyhole* e da poça de fusão.

Figura 32 – Seções longitudinais obtidas com potência do feixe laser de 10 kW, gás de proteção argônio e diferentes velocidades de soldagem.



Fonte: Adaptado de Sun *et al.* (2017a).

Por fim, as propriedades do material também são determinantes. A composição química da liga, em especial a solubilidade dos gases como nitrogênio e hidrogênio no metal líquido, varia entre as ligas, tornando algumas mais suscetíveis à porosidade. A presença de contaminações e impurezas na superfície do material base ou nos consumíveis pode levar à formação de gases durante a soldagem, que podem ser aprisionados como poros (Katayama, 2018; Wang *et al*., 2007; Zhao *et al*., 2016). A compreensão e o controle desses diversos fatores são, portanto, fundamentais para o desenvolvimento de um processo de soldagem a laser robusto e a produção de soldas livres de porosidade para aplicações críticas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo detalha os materiais e os procedimentos experimentais empregados para investigar a formação e a estabilidade da poça de fusão na soldagem a laser do aço inoxidável AISI 304. A seção inicia com a descrição do material de base e da preparação dos corpos de prova. Em seguida, apresenta-se a configuração experimental, incluindo a bancada de soldagem, a fonte laser com as características do seu feixe, e o sistema de monitoramento por imagem em alta

velocidade. O planejamento experimental é então detalhado, descrevendo a metodologia sequencial de três etapas adotadas no estudo. Posteriormente, são descritos os procedimentos de caracterização pós-soldagem, que abrangem a análise da superfície do cordão de solda e a preparação metalográfica para a análise macrográfica da seção longitudinal e transversal. Por fim, detalha-se a metodologia para a análise da dinâmica da poça de fusão, incluindo o processamento das imagens de alta velocidade e a medição quantitativa de sua morfologia.

3.1 MATERIAIS E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O material de base utilizado neste estudo foi o aço inoxidável AISI 304, amplamente empregado em aplicações industriais devido à sua elevada resistência à corrosão e boa soldabilidade. Os corpos de prova foram obtidos a partir de chapas laminadas a quente, com duas configurações de dimensões: de 300 x 30 mm e 70 x 30 mm, ambas com espessura de 12,7 mm. A composição química do material está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Análise química do substrato aço inoxidável AISI 304.

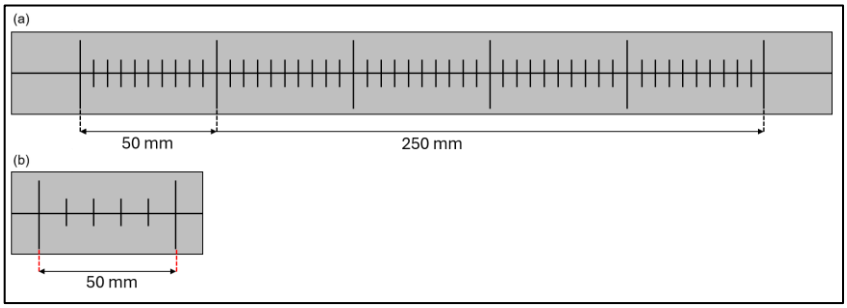
Material	**C**	**Cr**	**Ni**	**Mo**	**Mn**	**Si**	**P**	**S**
AISI 304	0,025	18,2	8,05	0,45	1,67	0,310	0,037	0,021

Fonte: Inox do Brasil (2026).

As superfícies das chapas foram marcadas em uma máquina de gravação a laser Welle, com potência máxima de 72 W. Esse procedimento permitiu a realização de marcações uniformes e reprodutíveis, que serviram de referência para as etapas subsequentes. Essas inscrições serviram para orientar a análise temporal, definir as posições de corte da seção longitudinal, padronizar distâncias e posicionamentos durante a soldagem a laser e fornecer uma escala para interpretação dos vídeos em alta velocidade.

Nos corpos de prova de 300 × 30 mm, a escala apresenta incrementos de 5 mm entre as marcações, já nas amostras de 70 × 30 mm, o espaçamento foi de 10 mm. Em ambos os casos, as indicações foram distribuídas conforme distâncias previamente definidas (Figura 33), assegurando comparabilidade entre as condições experimentais e contribuindo para a repetibilidade dos ensaios.

Figura 33 - Marcação dos dois formatos de corpos de prova. (a) 300x30 mm e (b) 70x30 mm.



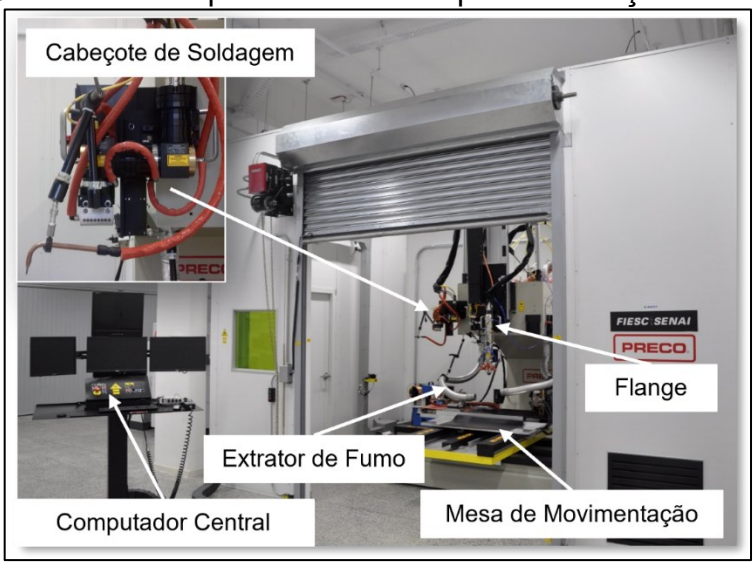
Fonte: Do autor (2026).

3.2 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

3.2.1 Bancada de Soldagem

Para a realização dos ensaios, foi utilizada a máquina PRECO Inc. SL8600 apresentada na Figura 34. O equipamento possui 5 eixos, sendo a velocidade máxima nos eixos X e Y de 10 m/min. A bancada possui cabeçotes para realização de três processos a laser: soldagem, revestimento e tratamento térmico. Neste trabalho, será utilizado o cabeçote de soldagem, que está conectado a fonte Laser TRUDISK 10002 da fabricante TRUMPF. A bancada é formada pelo flange do cabeçote, mesa com movimento cartesiano, extrator de fumos, cabeçote de soldagem e computador central.

Figura 34 – Bancada que será utilizada para realização dos ensaios.



Fonte: Do autor (2026).

3.2.2 Fonte Laser e Características do Feixe

A fonte laser utilizada nos experimentos foi do tipo disco de alta potência, modelo TRUDISK 10002, fabricado pela TRUMPF. As principais especificações nominais do feixe laser fornecidas pelo fabricante estão detalhadas na Tabela 2.

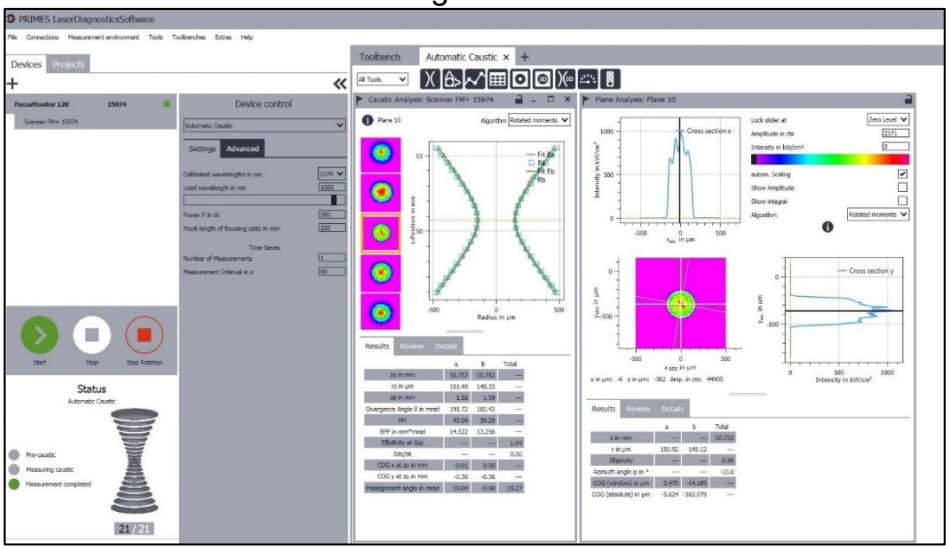
Tabela 2 – Características do laser TRUDISK 10002 e do cabeçote de soldagem.

Potência máxima	10 kW
Diâmetro mínimo do feixe	600 μm
Comprimento de onda	1030 nm
Distância focal	450 mm
Emissão	Contínua

Fonte: Do autor (2026).

Para além dos valores nominais fornecidos pelo fabricante, realizou-se uma caracterização experimental do feixe laser a fim de determinar os parâmetros ópticos precisos que influenciam a interação com o material. Para isso, foi empregado o equipamento PRIMES, um sistema de diagnóstico de feixes para aplicações industriais que permite a obtenção de informações precisas sobre a distribuição de intensidade e a geometria do feixe. A Figura 35 apresenta o perfil de distribuição espacial de energia obtido pelo sistema.

Figura 35 – Interface do software PRIMES com suas respectivas opções de diagnóstico.

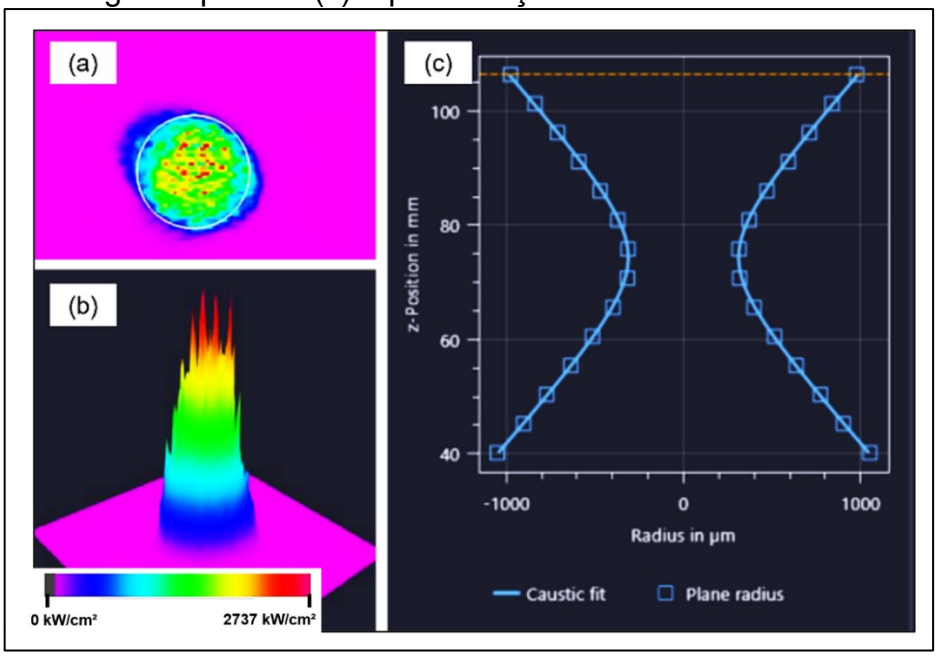


Fonte: Do autor (2026).

A caracterização do feixe foi realizada com o laser operando em condições estáveis e utilizando a mesma configuração ótica dos experimentos de soldagem,

assegurando a representatividade dos dados. Os resultados do diagnóstico, obtidos com o equipamento PRIMES, são apresentados na Figura 36. A análise do perfil de intensidade (Figura 36a) e do mapa bidimensional (Figura 36b) indica uma distribuição de energia levemente assimétrica, comportamento comum em sistemas reais de processamento a laser. A medição da cáustica (Figura 36c) permitiu determinar um diâmetro focal efetivo de 0,607 mm, valor próximo ao especificado pelo fabricante (0,6 mm). Esse resultado confirma a consistência do sistema óptico e valida o uso desse valor para o cálculo dos parâmetros de interação empregados nos resultados.

Figura 36 – Caracterização do feixe laser utilizado neste estudo. (a) e (b) distribuição de energia no plano e (c) representação da cáustica do feixe laser.



Fonte: Do autor (2026).

Além da análise visual da distribuição de energia, o diagnóstico do feixe forneceu parâmetros quantitativos que descrevem sua geometria e qualidade, apresentados na Tabela 3. Esses dados experimentais são fundamentais para compreender as condições reais de interação do feixe com o material.

Tabela 3 – Dados medidos durante a caracterização do feixe laser.

Dados	Valor
Diâmetro no foco [mm]	0,60724
Ângulo de divergência [mrad]	59,78
Elipticidade no foco	0,85
Fator BPP [mm*mrad]	9,08

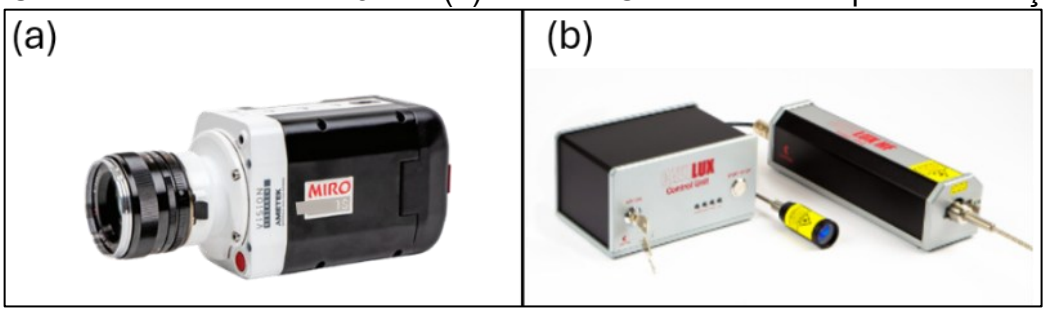
Fonte: Do autor (2026).

Os parâmetros do feixe laser são considerados adequados para a aplicação de soldagem. O BPP de 9,08 mm*mrad é um valor adequado, típico de um laser de disco de alta potência, resultando em um feixe laser focado em um diâmetro de 0,607 mm. Este diâmetro é ideal para soldagem, ao contrário de um feixe de corte fino, pois é grande o suficiente para gerar uma poça de fusão estável, mantendo a densidade de potência necessária para formar o *keyhole*. A elipticidade de 0,85 confirma um perfil de feixe quase circular, e o ângulo de divergência de 59,78 mrad indica que, embora o feixe laser seja de boa qualidade, a profundidade de foco é relativamente curta, tornando a posição vertical (eixo Z) do foco um parâmetro crítico para a consistência do processo.

3.2.3 Sistema de Aquisição de Imagens

A captura de imagens da poça de fusão foi realizada com uma câmera Phantom R311, ilustrada na Figura 37a, configurada para operar a 200 quadros por segundo (fps), permitindo o registro detalhado da dinâmica da poça de fusão durante o processo de soldagem. Para minimizar a interferência de reflexos diretos do feixe laser, a câmera foi posicionada a uma distância segura da região de soldagem, com um ângulo de inclinação de aproximadamente 54° em relação à superfície do material. A iluminação adicional para realçar o contrate das imagens foi fornecida por um sistema de laser pulsado Cavilux, representado na Figura 37b. Este sistema emite luz em comprimentos de onda específicos, o que ajuda a reduzir as interferências ópticas causada pela intensa emissão do laser e da pluma de plasma.

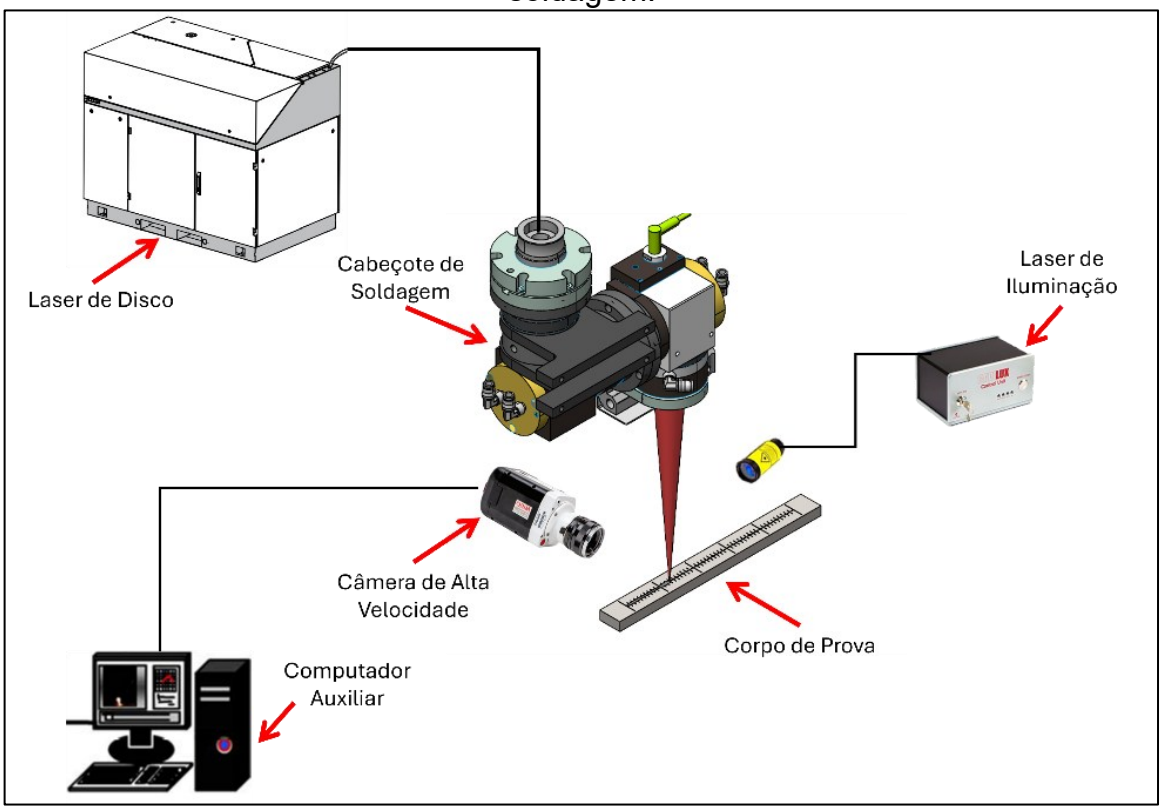
Figura 37 – Equipamentos utilizados para aquisição de imagens em alta velocidade. (a) Câmera Phanton Miro R311 e (b) Sistema Cavilux de laser para iluminação.



Fonte: Do autor (2026).

A câmera foi calibrada para focar na região de interesse, abrangendo uma área suficiente para registrar a poça de fusão. A resolução foi ajustada de modo a maximizar o detalhamento das bordas da poça, permitindo uma análise mais precisa da morfologia e das variações dinâmicas. A Figura 38 ilustra o setup utilizado para a captura das imagens dos cordões de solda realizados.

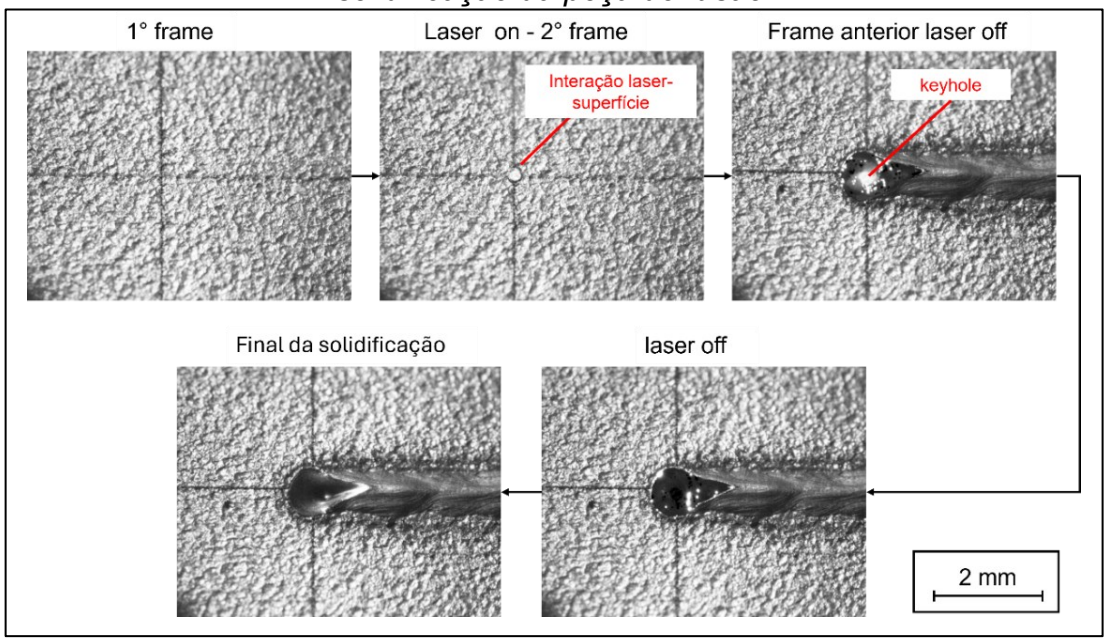
Figura 38 - Esquemático do sistema de captura das imagens do processo de soldagem.



Fonte: Do autor (2026).

Para garantir a padronização e a comparabilidade entre os ensaios, a captura dos vídeos foi sincronizada com a operação do laser. A gravação foi editada para iniciar em um frame anterior ao acionamento do feixe (*laser on*) e finalizada somente após o seu desligamento (*laser off*) e a completa solidificação do cordão de solda. Essa padronização temporal, ilustrada na Figura 39, é fundamental para permitir a análise de todo o ciclo da poça de fusão e a correlação precisa entre os fenômenos observados, como as oscilações do *keyhole*, e os parâmetros do processo.

Figura 39 – Padronização a partir do instante *Laser on*, *Laser off e final da solidificação da poça de fusão*.

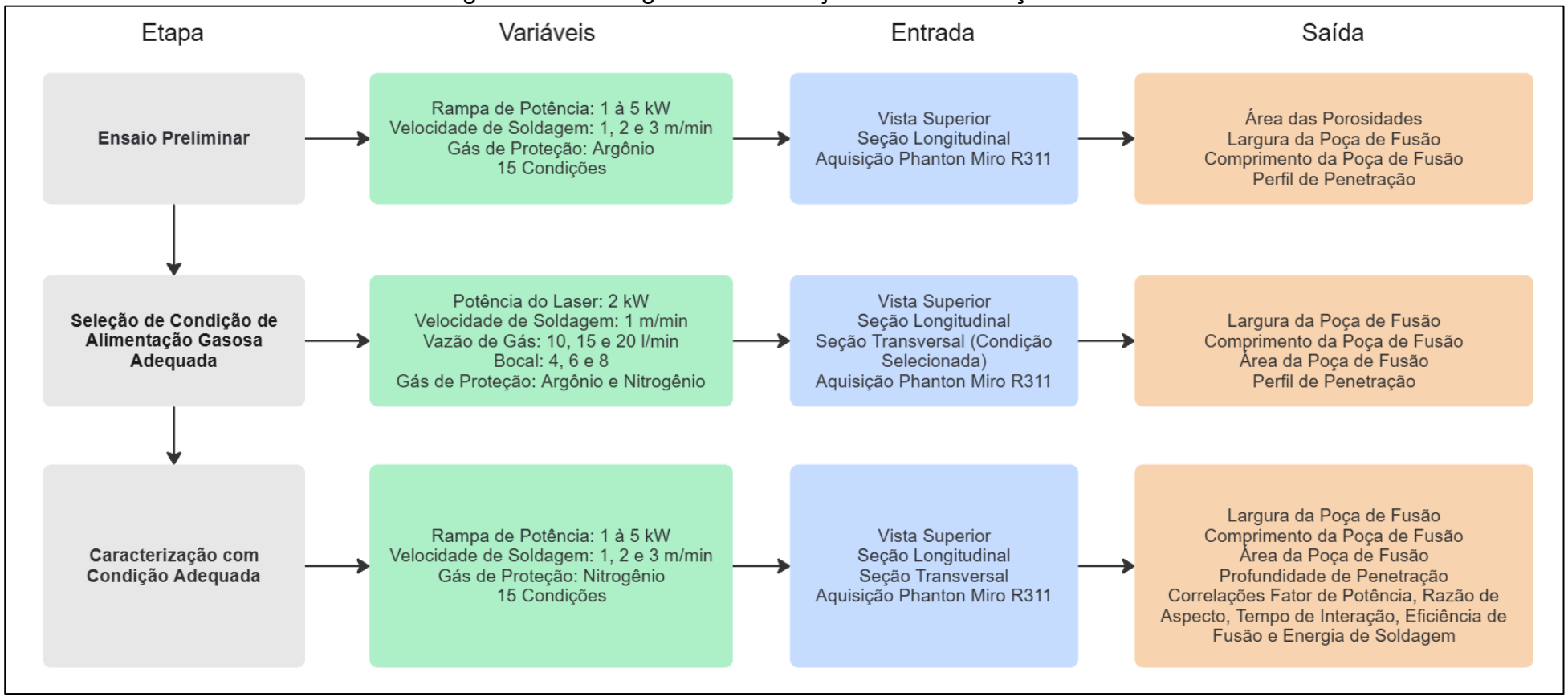


Fonte: Do autor (2026).

3.3 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

O presente estudo foi estruturado em três etapas experimentais sequenciais e interdependentes, de modo que o planejamento de cada fase foi estabelecido como uma resposta direta aos resultados obtidos na etapa anterior. A primeira etapa consistiu em uma análise exploratória para mapear o processo, momento em que foram identificados desafios relacionados à integridade dos cordões de solda. Com base nesse diagnóstico, planejou-se a segunda etapa, focada na investigação e seleção da proteção gasosa mais adequada para mitigar as descontinuidades encontradas. Por fim, a terceira etapa utilizou a condição de proteção definida na fase anterior para viabilizar uma análise sistemática e aprofundada da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria final do cordão. A Figura 40 esquematiza essa estrutura metodológica, correlacionando para cada Etapa as respectivas Variáveis de processo, as Entradas (técnicas de caracterização) e as Saídas (respostas obtidas). O detalhamento específico de cada fase e a discussão dos resultados serão apresentados nos subcapítulos a seguir.

Figura 40 – Fluxograma do Planejamento e Execução.



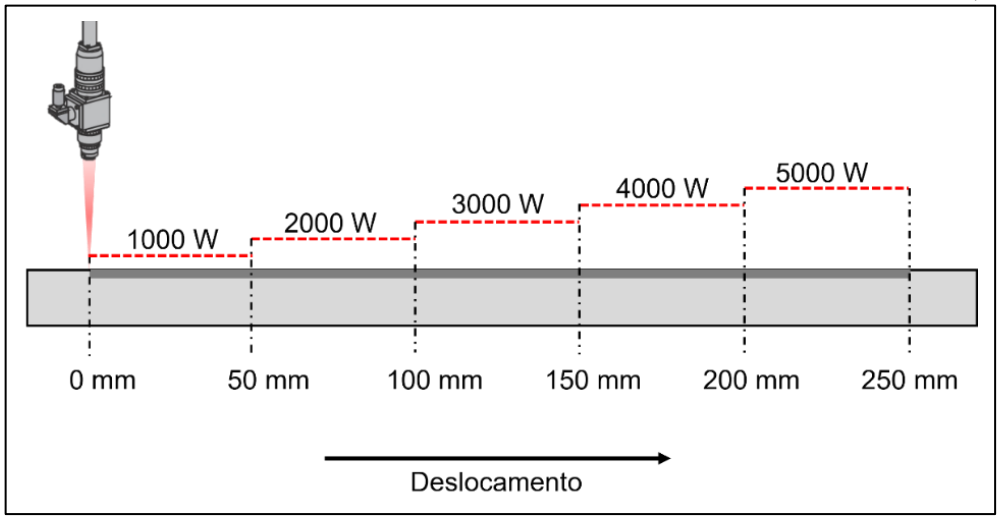
Fonte: Do autor (2026).

3.3.1 Análise Preliminar com Variação de Potência do Laser e Velocidade de Soldagem

A etapa inicial teve como objetivo investigar a transição entre os modos de operação (condução e *keyhole*) e os fenômenos resultantes na poça de fusão. Para induzir as diferentes dinâmicas de fluido e absorção, aplicou-se uma variação sistemática de potência do laser e velocidade de soldagem. Ressalta-se que, em conformidade com a abordagem fenomenológica adotada em todo este trabalho, não foram realizadas réplicas dos ensaios. O foco da investigação consiste na compreensão dos mecanismos físicos de formação e nos limiares de transição do processo, e não na validação estatística de dados.

Para isso, foram realizados três cordões de solda autógena sobre chapa, em corpos de prova com dimensões de 300 x 30 x 12,7 mm. Cada cordão foi executado com um comprimento total de 250 mm, aplicando-se uma variação escalonada de potência a cada 50 mm, iniciando em 1 kW e com incrementos de 1 kW até atingir 5 kW, conforme ilustrado na Figura 41. Estes ensaios foram realizados para três velocidades de soldagem distintas: 1 m/min, 2 m/min e 3 m/min. Em todas as condições, utilizou-se argônio como gás de proteção com vazão de 15 L/min. Essa estratégia permitiu cobrir uma ampla janela de parâmetros para observar diretamente as alterações físicas na poça de fusão associadas a cada nível de densidade de potência.

Figura 41 – Cordões de solda realizados em amostras com 300 x 30 x 12,7 mm.



Fonte: Do autor (2026).

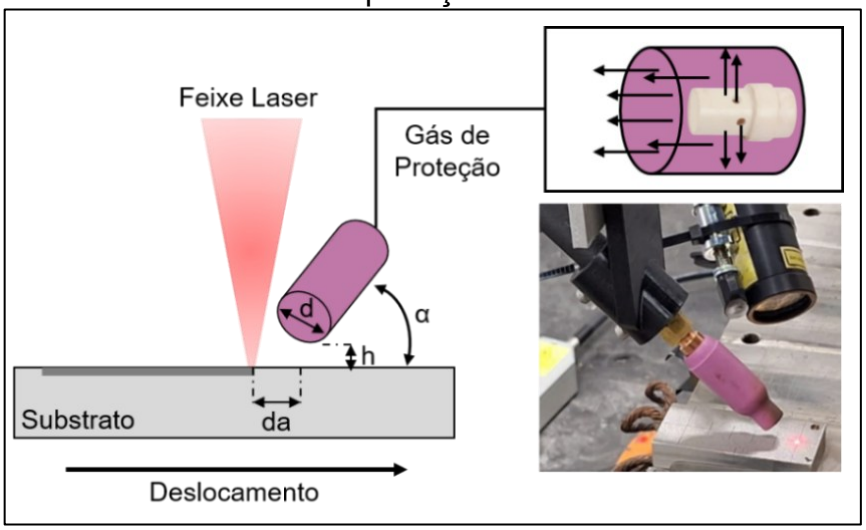
3.3.2 Investigação e Seleção da Condição de Proteção Gasosa Adequada

A análise dos resultados da primeira etapa revelou a presença de descontinuidades internas (porosidades) nos cordões de solda. Diante disso, a segunda etapa do trabalho foi dedicada a investigar e mitigar a formação desta descontinuidade através da investigação e seleção adequada da proteção gasosa. Considerando que a condição de 2 kW e 1 m/min apresentou a maior incidência de porosidades, essa configuração foi adotada como referência para a definição de um planejamento experimental sistemático, visando investigar os fatores que influenciam a formação de porosidade.

A metodologia consistiu na variação sistemática de três parâmetros-chave, definidos em diferentes níveis experimentais: composição do gás (2 níveis), vazão de alimentação (3 níveis) e diâmetro de saída do bocal (3 níveis). Os valores específicos adotados para cada variável são detalhados na Tabela 4. Para isolar o efeito desses fatores principais, os parâmetros geométricos de posicionamento foram mantidos fixos, estabelecendo-se a distância de alimentação (da) de 10 mm, a altura de alimentação (h) de 8 mm e o ângulo de alimentação (α) de 45°, conforme ilustrado no arranjo esquemático da Figura 42.

Adicionalmente, um difusor de gás foi incorporado ao sistema com o intuito de garantir um regime de fluxo laminar, proporcionando condições de saída uniformes. Para a execução experimental, foi produzido um único cordão de solda de 50 mm de comprimento para cada condição, em corpos de prova de 70 x 30 x 12,7 mm. Em concordância com a abordagem fenomenológica adotada neste trabalho, não foram realizadas réplicas, uma vez que o critério de avaliação se baseou na observação direta da eficácia da proteção.

Figura 42 - Esquemático das variáveis investigadas na alimentação do gás de proteção.



Fonte: Do autor (2026).

Tabela 4 – Planejamento de experimentos para avaliação da alimentação do gás de proteção.

ID	Vazão [L/min]	Diâmetro do bocal [mm]	Gás
1	10	4	Ar
2	15	4	Ar
3	20	4	Ar
4	10	6	Ar
5	15	6	Ar
6	20	6	Ar
7	10	8	Ar
8	15	8	Ar
9	20	8	Ar
10	10	4	N_2
11	15	4	N_2
12	20	4	N_2
13	10	6	N_2
14	15	6	N_2
15	20	6	N_2
16	10	8	N_2
17	15	8	N_2
18	20	8	N_2

Fonte: Do autor (2026).

3.3.3 Investigação e Caracterização do Processo de Soldagem a Laser com Condição Gasosa Adequada

Com base nos resultados da etapa de investigação da proteção gasosa, que permitiram selecionar uma condição capaz de suprimir a formação de porosidade, a

terceira e última etapa experimental foi executada. O objetivo desta fase foi reavaliar a influência da potência do laser e da velocidade de soldagem sobre a morfologia e a dinâmica da poça de fusão, agora sob uma condição controlada. Ressalta-se que a etapa preliminar foi indispensável para estabelecer a linha de base do processo convencional com argônio e diagnosticar a severidade das descontinuidades, permitindo, nesta fase final, uma comparação direta que evidencie os ganhos fenomenológicos obtidos com a troca do gás.

Para tal, a metodologia da etapa preliminar foi replicada, alterando-se exclusivamente o sistema de proteção. Foram produzidos três cordões de solda com 250 mm de comprimento em corpos de prova de 300 x 30 x 12,7 mm. Cada cordão foi executado com velocidade constante (1, 2 e 3 m/min, respectivamente), variando-se a potência do laser em degraus de 1 kW a cada 50 mm (faixa de 1 a 5 kW), conforme a Figura 41. A proteção gasosa empregada utilizou os parâmetros definidos na etapa anterior: nitrogênio, vazão de 10 l/min e bocal nº 4.

Adicionalmente, foi realizada a soldagem de uma amostra adicional de 300 × 30 mm, consolidando em um único substrato as três condições de velocidade de soldagem investigadas (1, 2 e 3 m/min). Essa configuração experimental teve como objetivo específico viabilizar a preparação metalográfica conjunta, permitindo a análise comparativa simultânea das seções transversais e garantindo que todas as condições fossem avaliadas sob os mesmos critérios de corte e ataque químico.

3.4 PROCEDIMENTO DE CARACTERIZAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA

Após a execução dos experimentos de soldagem, os corpos de prova foram submetidos a uma série de procedimentos de caracterização para avaliar a morfologia, a geometria e a integridade dos cordões de solda. As análises foram divididas em avaliação da superfície de topo e análise da seção transversal e longitudinal, conforme detalhado a seguir.

3.4.1 Análise da Superfície do Cordão de Solda

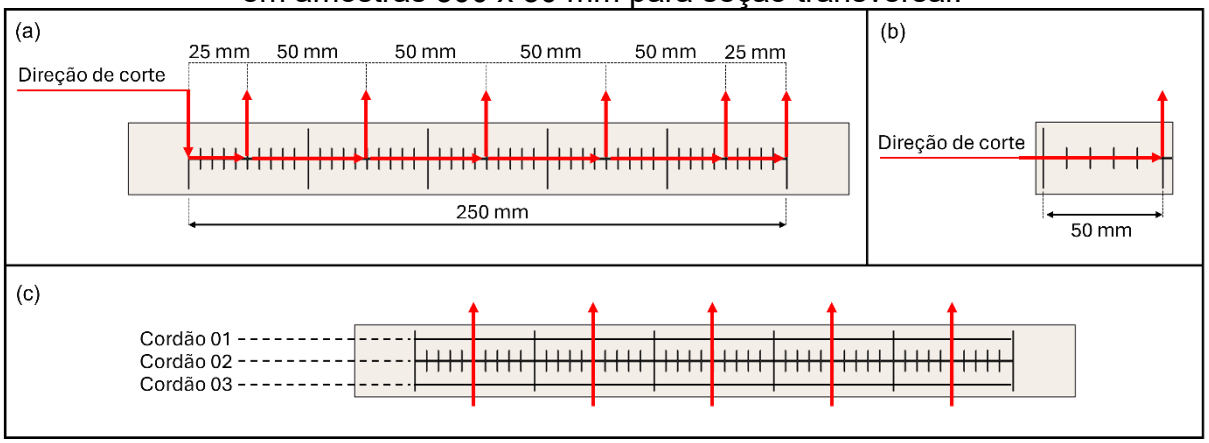
A primeira avaliação consistiu em uma inspeção visual da superfície dos cordões de solda. Para obter um registro padronizado e de alta resolução, foram capturadas imagens da vista superior de cada cordão de solda utilizando uma câmera

fotográfica digital modelo Canon T6i. As amostras foram posicionadas sobre um fundo branco para garantir o máximo de contraste e clareza. O objetivo desta análise foi avaliar qualitativamente características como a regularidade e a aparência superficial do cordão de solda.

3.4.2 Preparação Metalográfica

Para a análise macroestrutural e da geometria interna do cordão de solda, as amostras foram preparadas para ensaio metalográfico. Primeiramente, realizou-se o seccionamento longitudinal e transversal dos corpos de prova. O corte foi executado utilizando uma máquina de eletroerosão a fio, técnica escolhida por sua alta precisão e por minimizar a introdução de calor e deformação plástica na região de interesse, com posicionamento do corte precisamente alinhado com o centro do cordão de solda. A Figura 43 ilustra a estratégia de corte utilizada para cada formato de corpo de prova para análise da seção longitudinal em (a) e (b) e para a análise da seção transversal em (c).

Figura 43 – Esquemático da realização dos cortes utilizando eletroerosão. (a) Estratégia utilizada em amostras 300 x 30 mm para seção longitudinal, (b) Estratégia utilizada em amostras 70 x 30 mm para seção longitudinal e (c) Estratégia utilizada em amostras 300 x 30 mm para seção transversal.



Fonte: Do autor (2026).

Subsequentemente, as amostras seccionadas foram submetidas ao processo de preparação metalográfica, seguindo as diretrizes da norma ASTM E3-17. O procedimento envolveu etapas de lixamento com uma sequência de lixas com granulação progressivamente mais fina, seguido de polimento final.

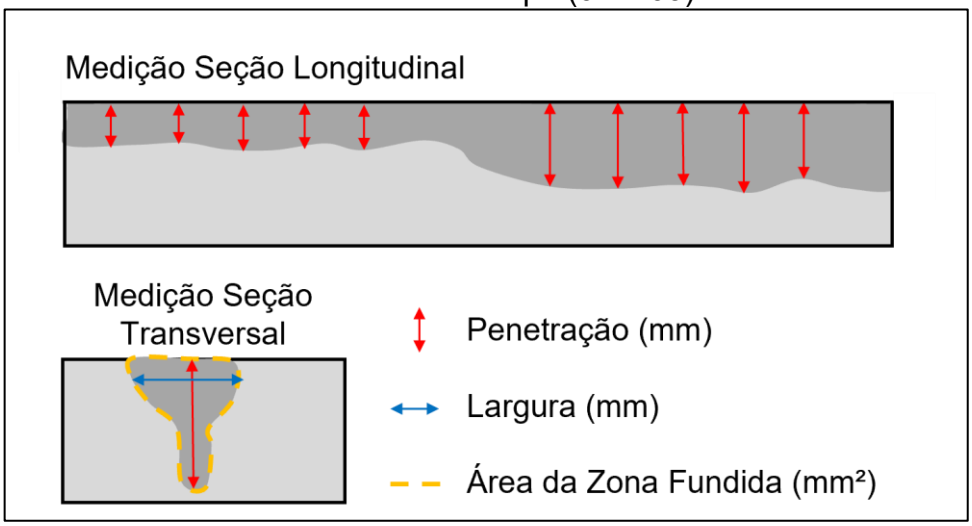
Para revelar a macroestrutura da zona fundida e da zona termicamente afetada, a superfície polida foi submetida a um ataque eletrolítico. Utilizou-se uma solução de ácido oxálico a 10% em água destilada como reagente, aplicando-se uma tensão de 7,3 V e uma corrente de 4,17 A por um período de 45 segundos. Este procedimento garantiu um contraste adequado entre as diferentes regiões do cordão de solda, sendo essencial para a posterior análise de imagem.

3.4.3 Caracterização e Medição dos Aspectos Dimensionais do Cordão de Solda

Após a preparação metalográfica, as amostras foram submetidas à análise macrográfica para avaliação da geometria da zona fundida e verificação da presença de descontinuidades internas, como porosidade e trincas. As imagens das seções longitudinais e transversais foram adquiridas utilizando um estereoscópio digital (Zeiss Discovery V8) e um microscópio óptico (Zeiss Axio Imager 2).

A metodologia para a medição da geometria do cordão de solda foi adaptada e refinada ao longo de cada etapa experimental. Para a etapa preliminar, a análise de penetração e porosidade foi conduzida na seção longitudinal. Para a etapa de otimização, a comparação entre as amostras também foi realizada na seção longitudinal, sendo que apenas a condição selecionada como otimizada recebeu uma análise complementar da seção transversal. Contudo, foi identificado que o corte longitudinal, especialmente em cordões de solda profundos e estreitos, apresentava um risco significativo de interceptar uma parede lateral em vez do fundo real do cordão de solda, subestimando a penetração. Por essa razão, a metodologia para a etapa otimizada foi alterada, e as medições de geometria foram realizadas na seção transversal para cada patamar de potência do laser, garantindo uma aferição mais precisa e confiável da penetração, largura e área da zona fundida. A Figura 44 ilustra a metodologia de medição utilizada.

Figura 44 – Metodologia de medição da seção longitudinal (Etapas 01 e 02) e seção transversal da etapa (02 e 03).



Fonte: Do autor (2026).

3.5 ANÁLISE DA DINÂMICA DA POÇA DE FUSÃO

A análise da dinâmica do processo foi realizada por meio do processamento e análise quantitativa de vídeos de alta velocidade. O objetivo desta análise foi duplo: o primeiro, caracterizar a morfologia da poça de fusão sob diferentes parâmetros de processo e o segundo avaliar a variabilidade dimensional e os fenômenos transientes da poça como indicadores de sua estabilidade. As imagens extraídas dos vídeos foram processadas e medidas conforme descrito nas seções subsequentes.

3.5.1 Processamento das Imagens de Alta Velocidade

A análise temporal da formação e do comportamento da poça de fusão foi realizada a partir dos vídeos em alta velocidade, utilizando o software *Phantom Camera Control* (PCC), que acompanha a câmera. Para garantir a detecção precisa dos contornos da poça de fusão, que podem ser ofuscados pela intensa emissão de luz do processo, foram aplicadas etapas essenciais de processamento de imagem em cada vídeo. Ajustes de brilho, contraste e gama foram realizados para melhorar a visibilidade da transição entre o metal líquido e o material sólido. Adicionalmente, a curva de tons (*tone curve*) foi ajustada para equilibrar as áreas de alta e baixa luminosidade, realçando os limites da poça de fusão.

Para a extração dos quadros (*frames*), foram adotadas duas estratégias de amostragem complementares, ambas normalizadas pela distância percorrida para garantir uma comparação robusta entre ensaios com diferentes velocidades de soldagem.

A primeira estratégia, focada na análise macro da evolução média da poça de fusão, utilizou as marcações na superfície do substrato como referência principal. Para os cordões de 250 mm (etapas 1 e 3), foram extraídos quadros a cada marcação vertical com espaçamento de 5 mm, totalizando 45 imagens por cordão. Esta abordagem proporcionou uma amostragem representativa da evolução da poça de fusão ao longo de toda a variação de potência do laser. Adicionalmente, para as amostras com 70 x 30 mm (etapa 2), foram extraídas 4 imagens por vídeo, mantendo a marcação vertical como referência, porém desta vez espaçadas em 10 mm.

A segunda estratégia, de caráter micro analítico, foi realizada para observar a estabilidade e as pequenas variações da poça de fusão dentro do regime estacionário de cada patamar (etapa 3). Para isso, foi necessário um método de calibração preciso para correlacionar o avanço em milímetros com o número de quadros. Foi utilizada uma abordagem empírica baseada nas marcas de referência: para cada velocidade de soldagem, identificou-se o quadro de uma posição inicial (ex: 25 mm) e o quadro de uma marca subsequente (ex: 30 mm). A diferença no número de quadros foi dividida pela distância percorrida (5 mm), determinando-se o incremento de quadro exato correspondente a 1 mm de deslocamento. Este cálculo de distância por quadro foi validado para as três velocidades de soldagem.

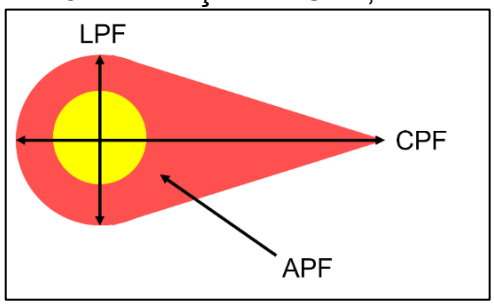
Com base nesta calibração, a análise micro foi focada na região central de cada patamar de potência do laser. A partir deste ponto inicial, foi coletada uma sequência de 5 imagens em incrementos de 1 mm (ex: 25 mm, 26 mm, 27 mm, 28 mm e 29 mm), utilizando o incremento de quadros previamente calibrado. Esta estratégia permitiu a observação e quantificação de pequenas variações na geometria e estabilidade da poça de fusão dentro de cada condição experimental.

3.5.2 Caracterização e Medição dos Aspectos Dimensionais da Poça de Fusão

A partir dos quadros processados, foram extraídos os parâmetros quantitativos da dimensão da poça de fusão. As três principais dimensões analisadas foram: o Comprimento da Poça de Fusão (CPF), a Largura da Poça de Fusão (LPF)

e Área da Poça de Fusão (APF). Conforme ilustrado na Figura 45, o CPF foi definido como a maior extensão da poça ao longo da direção de soldagem, incluindo a cauda de solidificação, a LPF foi definida como a maior largura da região fundida, medida perpendicularmente à direção de soldagem, enquanto a APF foi definida como toda área fundida.

Figura 45 – Definição do CPF, LPF e APF.



Fonte: Do autor (2026).

Para converter as medições de pixels para milímetros, foi realizado um procedimento de calibração. Devido ao ângulo de inclinação da câmera em relação à peça, foram necessárias taxas de conversão distintas para as direções horizontal e vertical. Para isso foi utilizado as marcações de referência na superfície do substrato, conforme ilustra a Figura 33. Todas as medições de CPF, LPF e APF foram realizadas manualmente no software ImageJ em cada imagem extraída, utilizando essas taxas de calibração para obter os valores dimensionais precisos, que foram subsequentemente utilizados para a análise quantitativa da influência dos parâmetros de processo.

Adicionalmente, para os ensaios de 1 m/min, foi realizada a análise da oscilação periódica da poça de fusão, medindo-se a sua frequência a partir da contagem de ciclos em um intervalo de tempo definido no vídeo de alta velocidade.

3.6 ANÁLISE DE DADOS E MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Esta seção detalha os procedimentos analíticos e estatísticos empregados para processar os dados experimentais e correlacionar os parâmetros de processo com os resultados da soldagem. O objetivo principal é transformar os dados brutos, obtidos na caracterização dos cordões de solda e na análise da dinâmica da poça de fusão, em métricas quantitativas que permitam a avaliação do comportamento e da

estabilidade do processo. A análise está dividida em duas frentes principais: o cálculo da eficiência termofísica do processo e a análise estatística das variáveis experimentais.

3.6.1 Cálculo da Eficiência de Fusão

Para avaliar quantitativamente o desempenho do processo de soldagem a laser, foi calculada a eficiência de fusão (ηf) para cada condição de soldagem. Essa eficiência expressa a fração da energia nominal entregue pelo laser que foi efetivamente utilizada na fusão do material, considerando as perdas por reflexão, condução e ejeção de material fundido.

Do ponto de vista energético, o processo pode ser separado em três estágios principais. A energia de soldagem (Es), determinada pela razão entre a potência do laser e a velocidade de soldagem, representa a energia nominal fornecida ao processo. Uma fração dessa energia é absorvida pelo material, definida como calor imposto (Q), cuja magnitude depende da eficiência de acoplamento (ηa) na superfície do material, conforme Equação (6):

$$Q = \eta a * Es \tag{6}$$

Parte do calor imposto é efetivamente utilizada na fusão do metal (condução e convecção por exemplo), sendo essa fração caracterizada pela eficiência de conversão térmica (ηc). Assim, o calor efetivo de fusão (CEF), energia efetivamente responsável pela fusão observada, é dado pela Equação (7):

$$CEF = \eta c * Q = \eta a * \eta c * Es \tag{7}$$

Para viabilizar o cálculo experimental dessa energia útil sem o uso de calorimetria, recorreu-se ao conceito de Entalpia Volumétrica de Fusão (Ev). Segundo Finch (2024), essa grandeza física representa a energia necessária para levar uma unidade de volume do material da temperatura ambiente até o ponto de fusão, somada ao calor latente de fusão, sendo expressa pela Equação (8):

$$Ev = \rho * [(cp * \Delta T) + L_f] \quad (8)$$

Adotando-se os valores de referência da literatura para o aço inoxidável AISI 304 (Finch, 2024), tais como densidade (ρ ≈ 0,008 g/mm³), calor específico (cp ≈ 0,6 J/g*K), variação de temperatura (ΔT ≈ 1375 K) e calor latente de fusão (L_f≈ 261 J/g), obteve-se Ev ≈ 8,71 J/mm³.

Com base nesses fundamentos, a Eficiência de Fusão (ηf) foi determinada neste trabalho relacionando-se o volume fundido real com a energia fornecida. Considerando uma análise por seção transversal, a eficiência foi calculada para cada cordão de solda através da Equação (9):

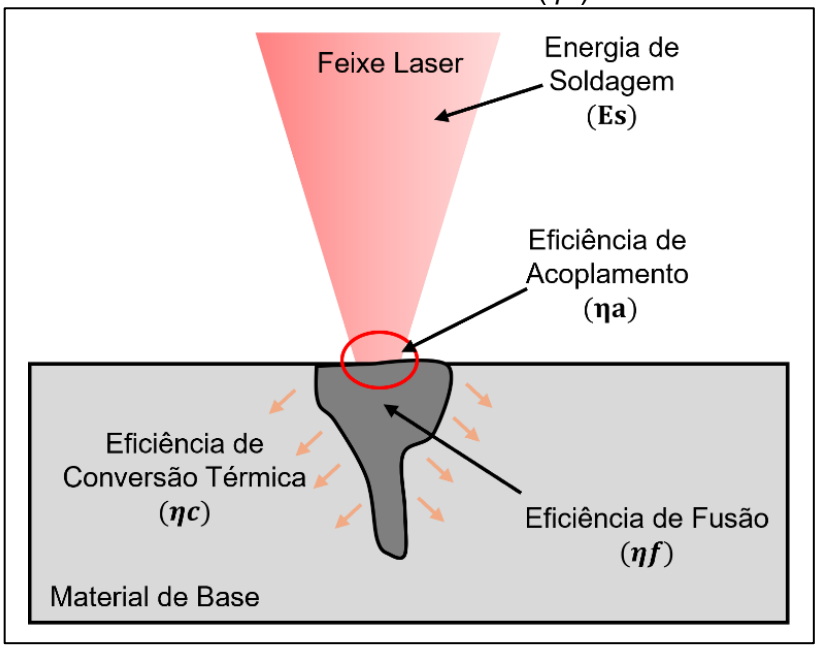
$$\eta f = \frac{A * Ev}{Es} = \eta\mathrm{a} * \eta\mathrm{c} \quad (9)$$

Onde A é a área da zona fundida (mm²), Ev a entalpia volumétrica (J/mm³) e Es a energia de soldagem (J/mm).

A eficiência de fusão representa, portanto, o produto entre a eficiência de acoplamento, associada à absorção do feixe na superfície, e a eficiência de conversão térmica, associada à conversão do calor absorvido em fusão efetiva do material.

Ressalta-se que a opção por utilizar a entalpia volumétrica como base para os cálculos foi adotada por duas razões principais. A primeira é que o foco deste trabalho não recai sobre a caracterização termoenergética detalhada do processo, mas sobre a análise morfológica e a correlação entre os parâmetros de soldagem e a resposta geométrica da poça de fusão. A segunda razão refere-se à ausência de instrumentação específica, como calorímetros ou pirômetros de alta precisão, necessária para a determinação direta da eficiência de acoplamento. Dessa forma, a decomposição conceitual apresentada nas Equações (6) a (9) tem por objetivo esclarecer o modelo energético proposto, evidenciando as etapas de transformação da energia, desde a emissão do feixe laser até sua efetiva conversão em fusão, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 46.

Figura 46 - Representação esquemática das etapas de transferência de energia durante o processo de soldagem a laser, desde a energia de soldagem (Es) até eficiência de fusão (ηf), evidenciando as eficiências parciais de acoplamento (ηa) e de conversão térmica (ηc).



Fonte: Do autor (2026).

3.6.2 Análise de Correlação

Após a coleta das imagens de alta velocidade e macrografias, foi empregado um conjunto de ferramentas de software para realizar as medições, a análise estatística e a visualização dos resultados. Para a medição das dimensões da poça de fusão a partir dos quadros de vídeo e do perfil de penetração obtido pelas análises macrográficas, foi utilizado o software ImageJ. Este software permitiu o carregamento das imagens, a aplicação das taxas de calibração e a medição interativa das distâncias em milímetros, garantindo precisão e consistência no processo.

A análise estatística e a geração dos gráficos foram realizadas utilizando os softwares Excel e OriginPro, integrando duas abordagens complementares de coleta de dados. Primeiramente, para a avaliação da estabilidade do processo, foram calculados as médias e os desvios padrão das variáveis superficiais da poça de fusão (área, largura e comprimento). Ressalta-se que esses descritores estatísticos foram obtidos através da análise temporal de quadros (frames) da filmagem em alta velocidade, sendo o desvio padrão utilizado aqui como um indicador quantitativo da flutuação hidrodinâmica ao longo do tempo.

Em contrapartida, os parâmetros geométricos internos e derivados, especificamente a penetração, a razão de aspecto e o Fator de Potência, foram determinados a partir da análise de seções transversais únicas. Estas amostras foram extraídas estrategicamente da região central do patamar de potência, correspondente ao momento estacionário do processo, em que as condições térmicas já se encontravam estabilizadas. Dessa forma, tais parâmetros representam a morfologia final consolidada, utilizada para aprofundar a discussão sobre a influência da densidade de energia na geometria da solda.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos nos experimentos de soldagem a laser do aço inoxidável AISI 304, com foco na formação e estabilidade da poça de fusão em modo *keyhole* e na influência das condições de alimentação do gás de proteção na mitigação da porosidade.

Inicialmente, são discutidos os cordões de solda obtidos com rampa de potência do laser utilizando argônio como gás de proteção, enfatizando aspectos geométricos, perfil longitudinal e descontinuidades.

Considerando as porosidades observadas na primeira etapa, são apresentados os resultados dos ensaios de otimização das condições de alimentação do gás de proteção. Essa análise abrangeu a seção longitudinal dos cordões, visando à detecção de porosidades, e a caracterização do comportamento da poça de fusão e do *keyhole* a partir de imagens de alta velocidade em diferentes condições de alimentação. Adicionalmente, são discutidos os prováveis mecanismos envolvidos para surgimento e supressão da porosidade.

Por fim, são discutidos os resultados referentes a condição otimizada com nitrogênio como gás de proteção. Nesta seção, são estabelecidas as correlações quantitativas entre os parâmetros de processo (potência do laser e velocidade de soldagem), a dinâmica da poça de fusão e seu comportamento distinto entre diferentes condições de potência do laser e velocidade de soldagem e a geometria final do cordão de solda, agora livre da interferência de descontinuidades. Adicionalmente, é realizado uma comparação direta com cordões de solda obtidos com argônio como gás de proteção, utilizando a mesma condição de alimentação da terceira etapa.

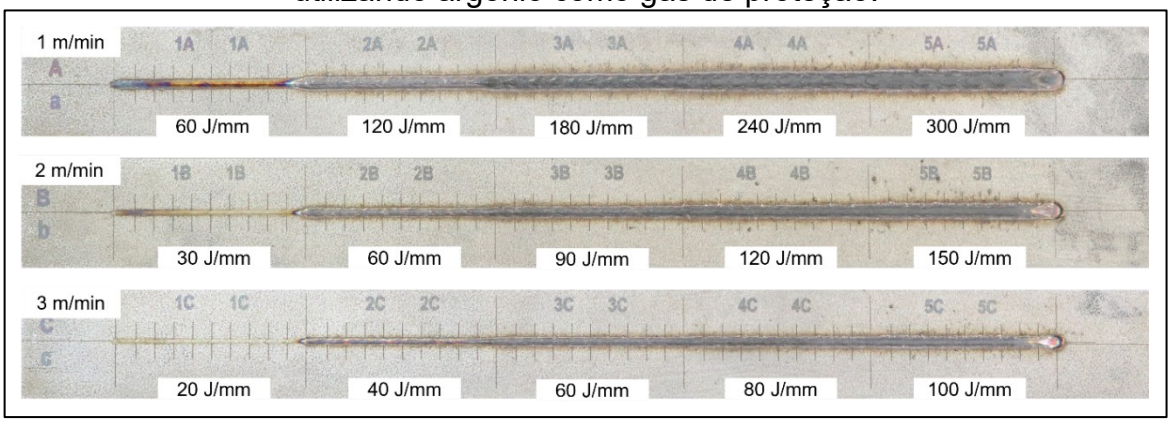
4.1 ANÁLISE PRELIMINAR E IDENTIFICAÇÃO DE POROSIDADE

Esta seção inicial apresenta os resultados e a discussão referentes aos cordões de solda produzidos com argônio. A análise foca na identificação de descontinuidades, bem como na caracterização geométrica do cordão de solda e na avaliação do perfil da poça de fusão.

4.1.1 Morfologia da Superfície dos Cordões de Solda

A etapa inicial do estudo avaliou a influência da potência do laser e da velocidade de soldagem na morfologia do cordão de solda, utilizando argônio como gás de proteção. A Figura 47 exibe a vista superior dos três cordões de solda realizados sobre o substrato, cada um correspondendo a uma velocidade de soldagem (1, 2 e 3 m/min) sob uma rampa de potência do laser crescente de 1 a 5 kW. A análise da superfície mostra que, para todas as velocidades de soldagem, a largura do cordão de solda aumenta progressivamente com o incremento da potência do laser. Este efeito está diretamente relacionado ao aumento da energia de soldagem teórica. No cordão de solda de 1 m/min, a energia varia de 60 J/mm (a 1 kW) a 300 J/mm (a 5 kW), resultando em um alargamento visível da zona fundida. Superficialmente, os cordões de solda apresentam-se contínuos e com boa regularidade.

Figura 47 – Vista superior dos cordões de solda com rampa de potência do laser utilizando argônio como gás de proteção.



Fonte: Do autor (2026).

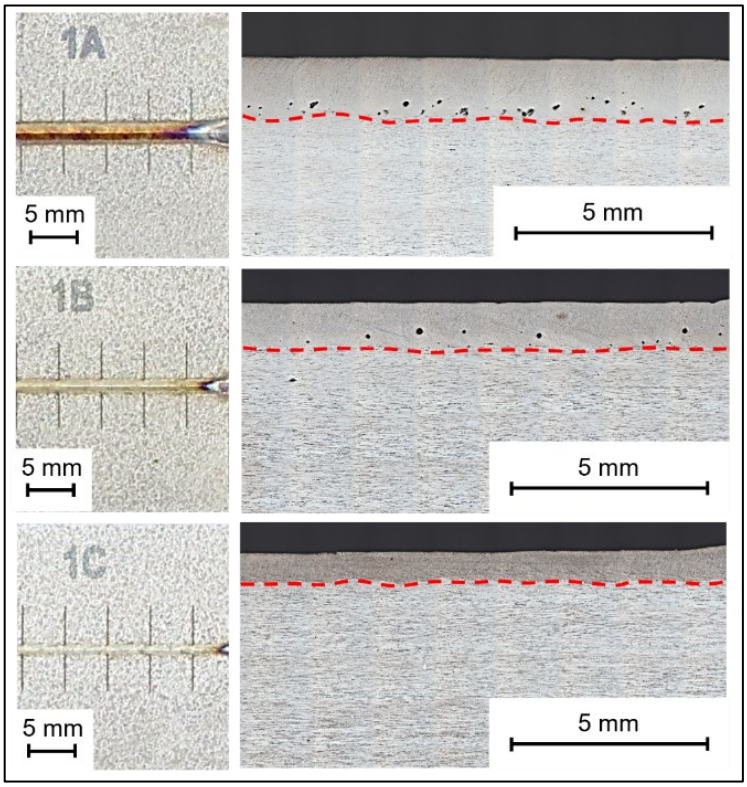
O aumento da largura do cordão de solda com o incremento da potência do laser, observado na Figura 47, é um resultado direto do balanço de energia do processo. Uma maior potência do laser eleva a densidade de energia e o fluxo de calor transferido para o material. Isso desloca as isotermas de fusão para uma área mais ampla, aumentando as dimensões da poça de fusão e, consequentemente, a largura do cordão de solda após a solidificação (Lei *et al*., 2018; Tsuji, 2009). Inversamente, para um mesmo nível de potência do laser, o aumento da velocidade de soldagem reduz o tempo de interação entre o feixe e o material em um determinado ponto. Essa redução no aporte de energia por unidade de comprimento resulta em uma poça de fusão menor e, portanto, em cordões de solda mais estreitos. A inspeção da superfície por si só é insuficiente para garantir a integridade interna do cordão de solda, tornando necessária uma análise da seção longitudinal.

4.1.2 Caracterização Macrográfica e de Descontinuidade

A análise da seção longitudinal dos cordões de solda produzidos com argônio revelou a presença significativa de porosidade na maioria das condições, uma descontinuidade intrinsecamente ligada à estabilidade do regime *keyhole*. A investigação subsequente foca em identificar como a porosidade evolui com o aumento da potência do laser (de 1 kW a 5 kW) e como ela é influenciada pela velocidade de soldagem (1, 2 e 3 m/min).

A Figura 48 apresenta a análise macrográfica da seção longitudinal para a potência de 1 kW, nas três velocidades de soldagem. Uma observação crucial é que, para as velocidades de 1 m/min e 2 m/min, a porosidade já é evidente mesmo nesta baixa potência, indicando o estabelecimento precoce do modo *keyhole*. Em contraste, na velocidade de 3 m/min (a 1 kW), não foram observadas porosidades, e o cordão de solda apresentou um perfil de penetração raso, característico do regime de soldagem por condução (Assunção, 2012; Ayoola; Suder; Williams, 2017; Xiao *et al*., 2022). Esta condição de condução (3 m/min e 1 kW) foi, portanto, desconsiderada na análise de criticidade de poros, uma vez que, nesse regime, não ocorre a formação do capilar de vapor nem dos fenômenos complexos a ele associados. Ainda assim, tal condição pode ser vantajosa em aplicações envolvendo materiais de baixa espessura ou componentes sensíveis ao aporte térmico, nos quais deformações ou requisitos rigorosos de qualidade superficial sejam fatores críticos.

Figura 48 – Vista superior e seção longitudinal das condições com 1 kW de potência do laser.

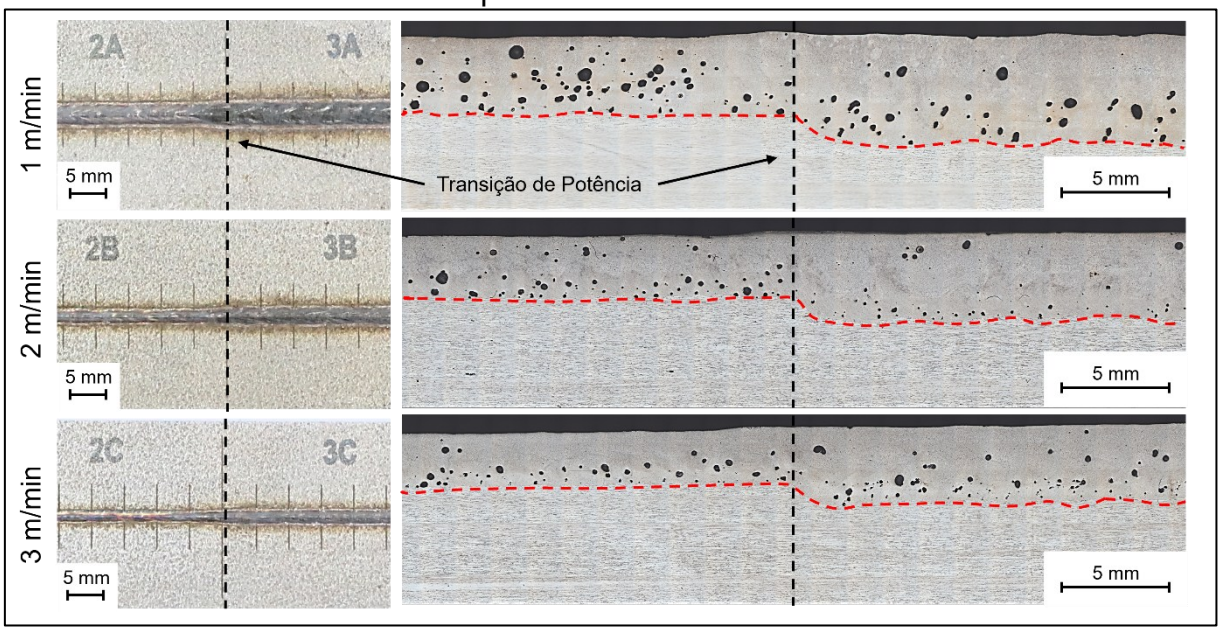


Fonte: Do autor (2026).

A análise prossegue para potências mais elevadas, detalhada na Figura 49, que compara as regiões de 2 kW e 3 kW. Esta transição, para as velocidades de 1 e 2 m/min, não representa apenas o início do surgimento de porosidades, mas sim uma intensificação abrupta tanto da penetração quanto da instabilidade. De fato, a região identificada visualmente como a mais crítica em termos de incidência de porosidades em todo o estudo foi obtida nesta faixa: com 1 m/min de velocidade de soldagem e 2 kW de potência.

Já a condição a 2 m/min resulta em um *keyhole* mais estável e contínuo. Esse comportamento é atribuído à redução do volume de metal fundido ao redor do capilar, o aumento da velocidade limita o crescimento excessivo da poça de fusão que, na condição anterior de baixa velocidade (1 m/min), tendia a colapsar sobre o canal de vapor devido à turbulência hidrodinâmica gerada pelo superaquecimento.

Figura 49 - Vista superior e seção longitudinal das condições entre 2 kW e 3 kW de potência do laser.



Fonte: Do autor (2026).

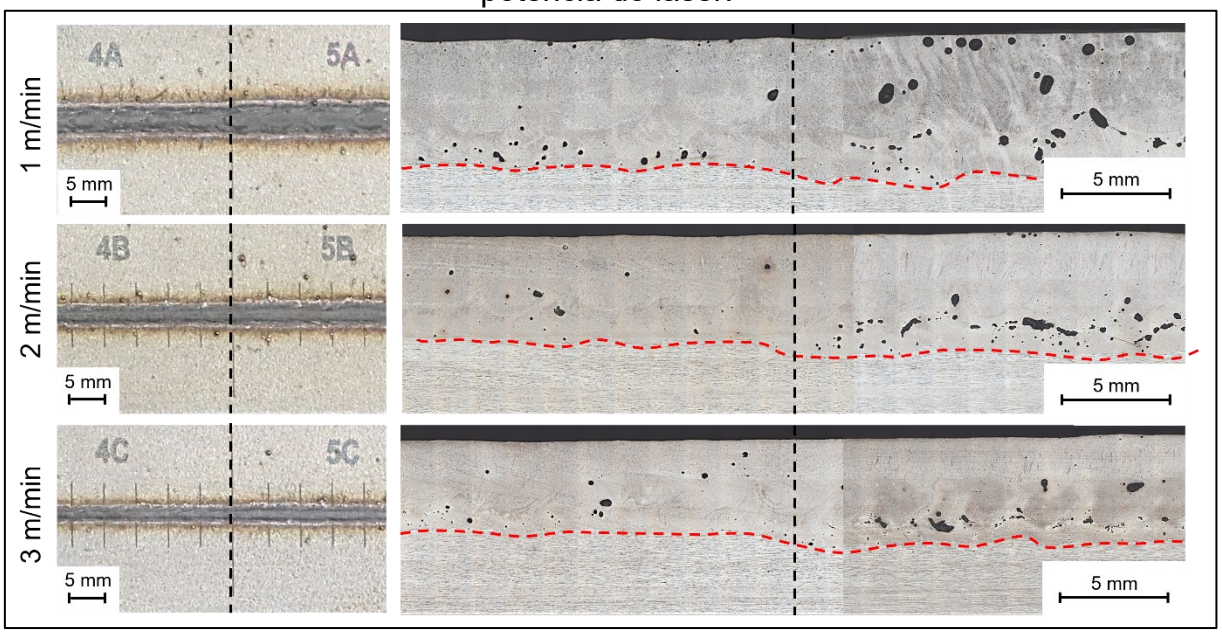
A Figura 50 detalha a faixa de alta potência (4 kW e 5 kW). Notavelmente, a condição de 2 m/min e 4 kW apresentou a redução mais visível no volume de poros, sendo considerada a condição menos crítica observada. Em velocidades de soldagem mais altas nesta faixa, a poça de fusão torna-se mais alongada e menos volumosa, o que dificulta o colapso do *keyhole* e facilita o escape de bolhas (Sun *et al*., 2017a). Este equilíbrio favorável, no entanto, não se manteve ao aumentar a velocidade para 3 m/min (a 4 kW), onde a porosidade voltou a crescer, possivelmente devido ao tempo de interação muito curto que acelera a solidificação e limita o escape de bolhas.

Por fim, analisando a potência de 5 kW, foram identificados poros de morfologia circular e irregular, concentrados na porção inferior do cordão, sugerindo aprisionamento nos estágios finais de solidificação (Kouraytem *et al*., 2019; Sun *et al*., 2017b, a).

É fundamental destacar a comparação entre a condição mais crítica (1 m/min e 2 kW) e a menos crítica (2 m/min e 4 kW). Ambas apresentam a mesma energia de soldagem (120 J/mm). Isso evidencia que a porosidade não depende apenas da energia total introduzida, mas também da forma como essa energia é entregue. Na condição de 1 m/min e 2 kW, o tempo de interação mais longo intensifica as oscilações do *keyhole*. Já na condição 2 m/min e 4 kW, a maior densidade de potência instantânea promove um *keyhole* mais estável. Esse comportamento reforça que a

estabilidade do *keyhole* é governada principalmente pela dinâmica de evaporação e pressão de recuo.

Figura 50 - Vista superior e seção longitudinal das condições entre 4 kW e 5 kW de potência do laser.

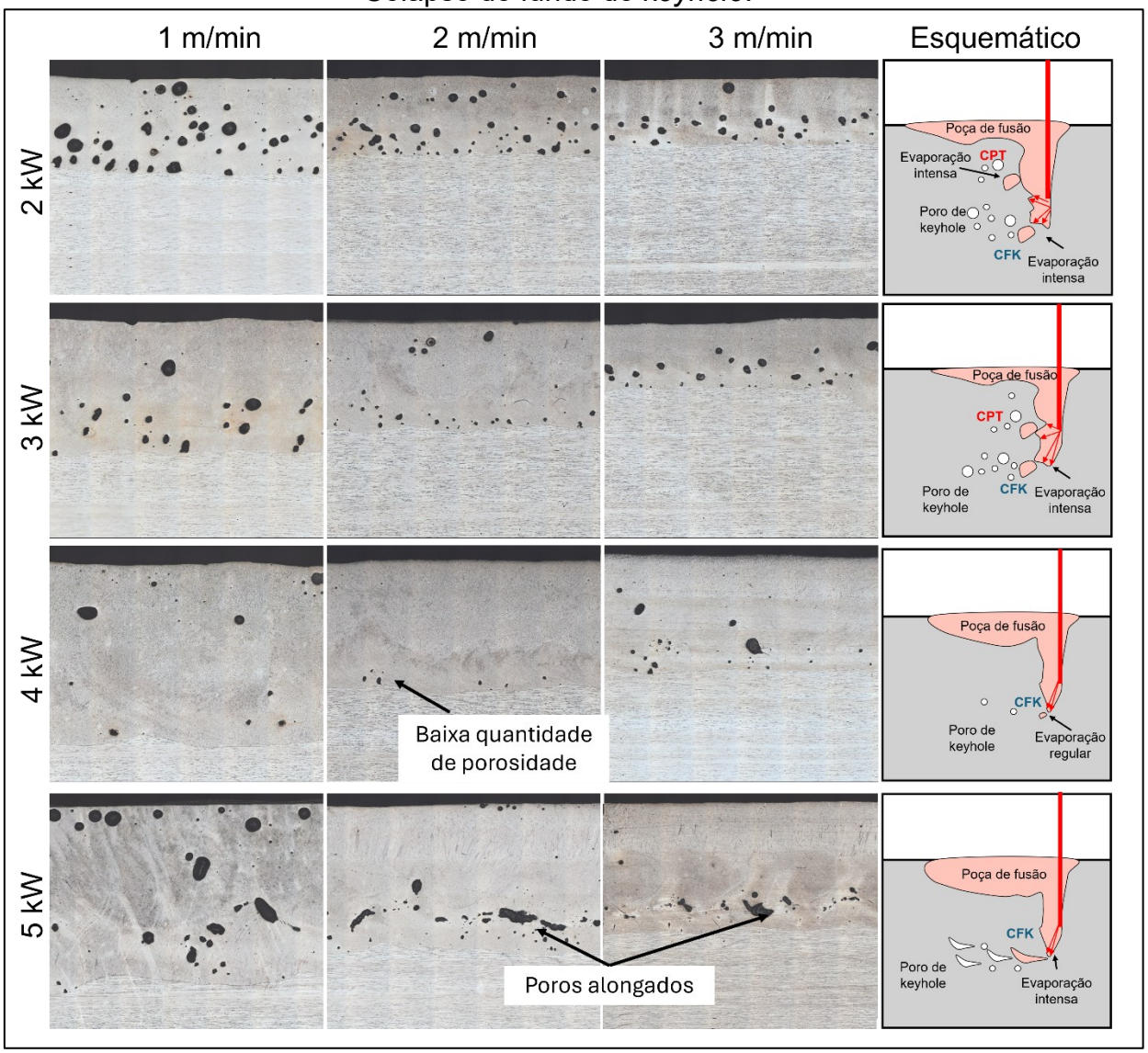


Fonte: Do autor (2026).

Com base na análise qualitativa das seções longitudinais, a condição de 2 kW e 1 m/min foi identificada como aquela com maior volume aparente e quantidade de poros. Por esse motivo, foi selecionada como condição de referência para a etapa subsequente de investigação da influência do gás de proteção.

Para consolidar a análise da porosidade, a Figura 51 apresenta uma matriz de imagens ampliadas da seção longitudinal, permitindo uma comparação visual do volume de poros em cada condição. A condição de 1 kW, analisada na Figura 48, foi omitida desta matriz comparativa para focar a análise no regime de *keyhole* plenamente estabelecido (2 kW a 5 kW), onde as instabilidades mais críticas e os maiores volumes de poros foram observados.

Figura 51 – Mapeamento de porosidade em diferentes condições de velocidade de soldagem e potência do feixe laser. CPT: Colapso da parede traseira e CFK: Colapso do fundo do *keyhole*.



Fonte: Do autor (2026).

Na faixa de potência do laser de 2 kW, o comportamento não uniforme da porosidade, alternando entre concentração na raiz e distribuição aleatória, sugere que essa variação pode ser explicada pelo colapso em diferentes regiões, ocorrendo no fundo do *keyhole* (CFK) e na parede traseira (CPT). Zhao *et al.* (Zhao *et al*., 2020) demonstraram que, nessa condição, a estabilidade da cavidade de vapor é altamente sensível à velocidade de soldagem, resultando em colapsos não sistemáticos do *keyhole* em distintas profundidades. A morfologia esférica dos poros indica, contudo, que a captura pela frente de solidificação não foi suficientemente rápida para deformar

as bolhas, princípio fundamental da porosidade gasosa, conforme discutido por Kou (Kou, 2003).

Ao elevar a potência do laser para 3 kW, estabelece-se um regime de *keyhole* mais estável, em que a porosidade é controlada pelo balanço entre o tempo de escape das bolhas por flutuação e o tempo de solidificação da poça de fusão. Quando a solidificação ocorre rapidamente, as bolhas ficam aprisionadas, já quando o tempo de resfriamento é mais longo, há maior probabilidade de escoamento e eliminação dos gases. Nessa condição, ainda há indícios da ocorrência de CPT, evidenciados pela presença de porosidades ao longo do centro e da parte superior do cordão. No entanto, devido à menor quantidade de porosidades em relação à condição de 2 kW, a frequência desses colapsos é inferior, resultando em menor incidência de poros. A forma e o tamanho se mantiveram semelhantes a 1 m/min, mas, ao aumentar a velocidade para 2 e 3 m/min, observou-se redução no diâmetro dos poros na raiz, indicando um CFK menos violento.

A faixa de 4 kW foi determinante para identificar a janela de processo com menor incidência de porosidade e evidenciar os mecanismos de transição que a limitam. Na condição de 4 kW e 2 m/min, observou-se a porosidade mínima, indicando equilíbrio ideal entre os fatores do processo: a potência foi suficiente para manter um *keyhole* profundo e estável. Zhao *et al.* (2020) definiram esse regime como fusão estável, caracterizado por um *keyhole* em forma de “J”, cujas paredes apresentam flutuações de baixa amplitude, permitindo que a maioria das bolhas escape antes da solidificação. Os pequenos poros residuais observados na raiz correspondem a eventos ocasionais e inevitáveis de CFK, mas sua baixa frequência e tamanho reduzido confirmam a operação em regime de máxima estabilidade para esse material e gás de proteção.

Desvios dessa condição resultaram em mecanismos distintos de degradação: em baixa velocidade de soldagem (1 m/min), o volume excessivo de metal fundido gera uma pressão hidrostática que colapsa as paredes do capilar, criando zonas de concentração de porosidades. Já em alta velocidade (3 m/min), a inclinação severa do *keyhole* para a retaguarda, combinada à rápida velocidade de solidificação, impede a flutuação das bolhas, resultando em poros alongados e sinalizando a saída da janela de estabilidade.

Esse comportamento apresenta concordância parcial com os resultados de Sun *et al.* (2017a), que também identificaram uma faixa intermediária de velocidades

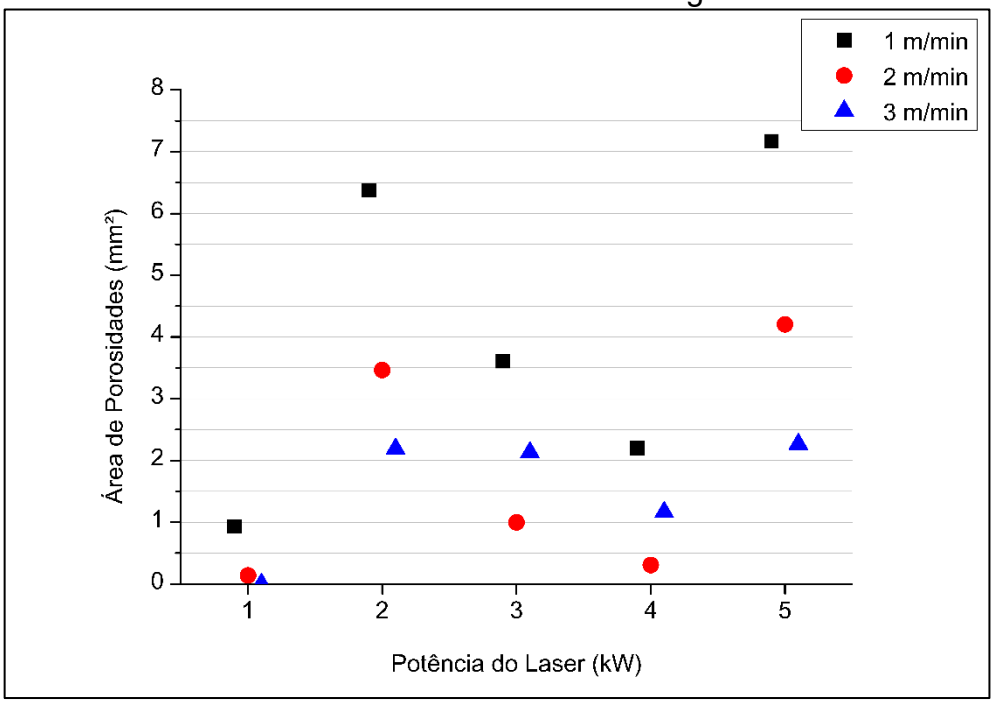
(2 a 2,5 m/min) associada à supressão de porosidade. Segundo os autores, enquanto baixas velocidades favorecem o colapso instável por gravidade, velocidades de soldagem adequadas facilitam a ejeção eficiente do vapor metálico, impedindo a entrada de contaminantes, contudo, ao se ultrapassar esse limite, o processo volta a se desestabilizar devido à dinâmica de arrasto.

Por fim, a 5 kW, o regime de alta densidade de energia intensificou os mecanismos de formação de porosidades. Em baixa velocidade (1 m/min), o elevado aporte térmico prolongou o tempo de vida da poça de fusão, permitindo a ascensão das bolhas por empuxo, contudo, estas não foram totalmente expelidas, resultando em seu aprisionamento preferencial na porção superior do cordão antes que pudessem escapar para a atmosfera.

Em contrapartida, em velocidades mais altas (2 e 3 m/min), a combinação de elevada potência do laser e maior velocidade de soldagem promoveu instabilidade máxima. O colapso violento do capilar e a captura imediata pela frente de solidificação em rápido avanço resultaram na formação de poros grandes e alongados na raiz. Essa morfologia, descrita como *wormholes* (Kou, 2003), é característica de aprisionamento dinâmico e intenso, confirmando que a taxa de solidificação superou a capacidade das bolhas de escapar ou estabilizar-se em forma esférica.

Para validar quantitativamente as observações macrográficas, foi mensurada a área total ocupada por porosidade na seção longitudinal de cada condição, conforme os dados compilados na Figura 52. A análise numérica corrobora que a velocidade de soldagem de 1 m/min concentra os índices mais críticos de descontinuidade em toda a faixa de potência do laser, atingindo valores de 6,37 mm² a 2 kW e um pico absoluto de 7,17 mm² a 5 kW. Em contrapartida, a janela operacional identificada visualmente como ideal (4 kW e 2 m/min) apresentou a menor área de porosidade no regime de *keyhole*, registrando apenas 0,31 mm². Isso representa uma redução de aproximadamente 95% no volume de porosidades quando comparada à condição crítica inicial (2 kW / 1 m/min). Adicionalmente, os dados confirmam a sensibilidade do processo: ao se aumentar a velocidade para 3 m/min nesta mesma potência do laser (4 kW), a área de porosidades voltou a subir para 1,16 mm², ratificando quantitativamente a saída da janela de estabilidade dinâmica descrita pelo mecanismo de arrasto.

Figura 52 - Variação da área de porosidades em função da potência do laser para diferentes velocidades de soldagem.



Fonte: Do autor (2026).

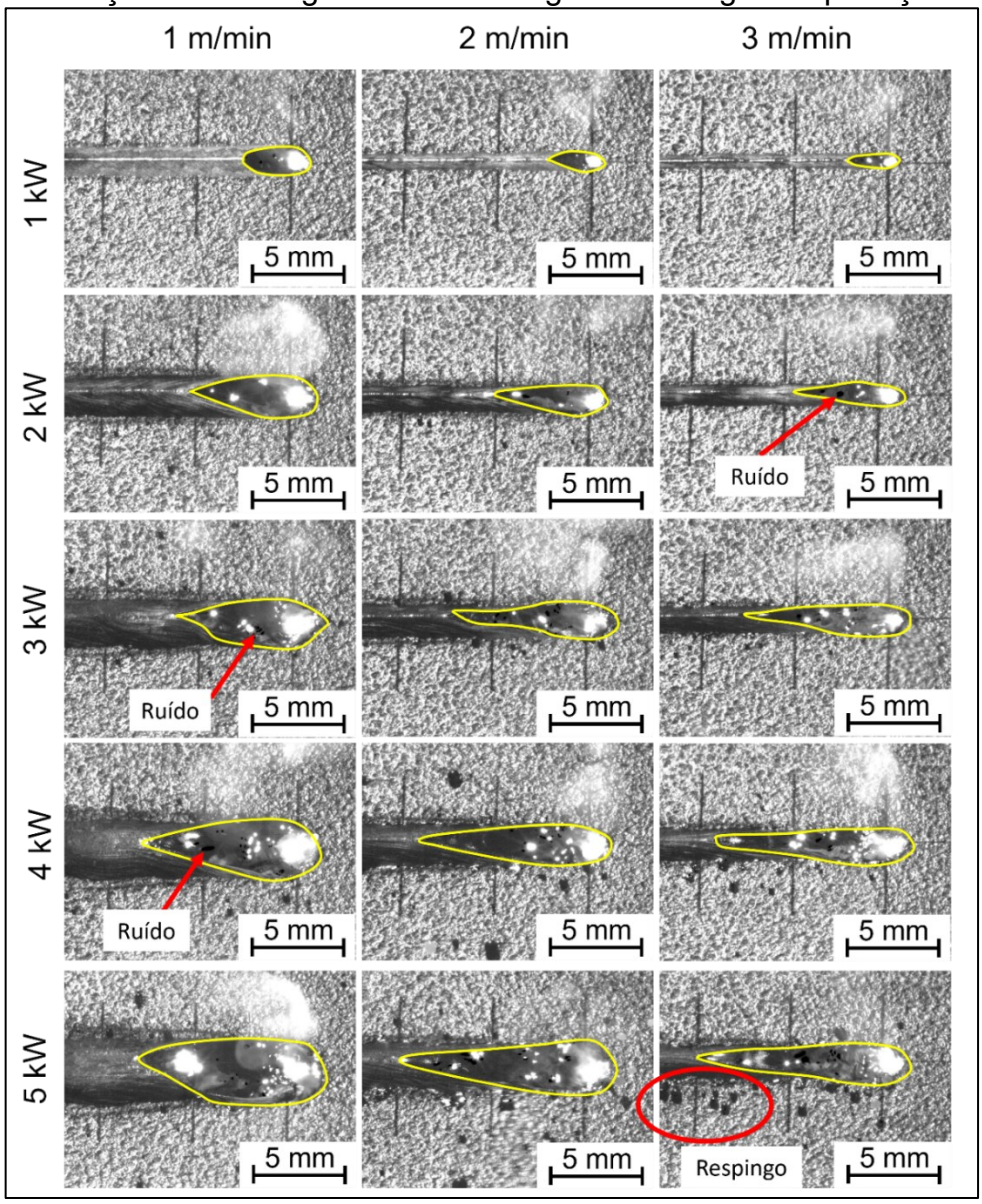
Expandindo a análise para todo o domínio experimental, a curva de porosidade revela um comportamento não linear característico, observável em todas as velocidades de soldagem, que indica as fronteiras físicas do processo em três estágios distintos. Inicialmente, observa-se uma transição crítica marcada pelo aumento abrupto da área de poros ao passar de 1 kW para 2 kW. Esse pico marca a instabilidade de formação do *keyhole*, fase em que a pressão de recuo ainda é insuficiente para manter o capilar plenamente aberto contra a tensão superficial, resultando em colapsos frequentes.

Subsequentemente, ocorre um declínio expressivo da porosidade, configurando uma janela de estabilidade entre 3 e 4 kW. O mínimo global de descontinuidades registrado a 4 kW evidencia a entrada na zona de processamento estável, onde a pressão de vapor é robusta o suficiente para sustentar as paredes do *keyhole*. Por fim, a retomada do crescimento da porosidade a 5 kW indica a saturação da estabilidade pelo excesso de energia. O aporte térmico elevado induz turbulências hidrodinâmicas severas e flutuações violentas da poça de fusão, levando ao aprisionamento dinâmico (*wormholes*). Esses dados ratificam que a eliminação da porosidade depende do encontro de um ponto de equilíbrio hidrodinâmico, neste caso, próximo a 4 kW, onde as forças de abertura superam as instabilidades de colapso.

4.1.3 Comportamento Dinâmico da Poça de Fusão utilizando Argônio

Para caracterizar a dinâmica do processo em toda a janela de parâmetros, a poça de fusão foi monitorada por meio de filmagem em alta velocidade. A Figura 53 apresenta um panorama comparativo da morfologia da poça de fusão, exibindo um quadro representativo para cada combinação de potência do laser e velocidade de soldagem. Essa organização permite observar, de forma comparativa, a evolução do comportamento da poça de fusão à medida que se variam simultaneamente a potência do laser e a velocidade de soldagem.

Figura 53 – Matriz comparativa da morfologia da poça de fusão para diferentes condições de soldagem utilizando argônio como gás de proteção.



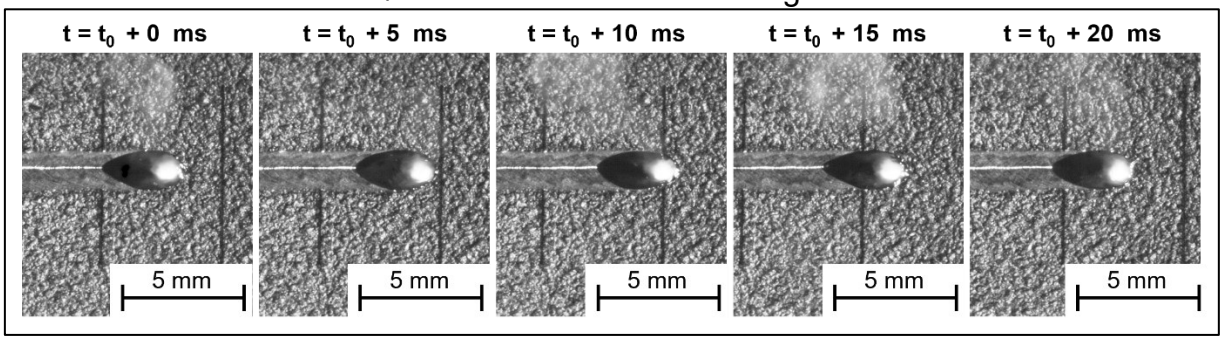
Fonte: Do autor (2026).

A análise qualitativa dos vídeos permite identificar tendências claras. Em algumas regiões das poças de fusão, observam-se pontos escuros destacados em vermelho, ressalta-se que esses pontos correspondem a ruídos do sistema de filmagem, não estando relacionados a fenômenos físicos do processo.

Analisando-se verticalmente as imagens (velocidade de soldagem constante), verifica-se que o aumento da potência do laser promoveu um crescimento visível da poça tanto em CPF quanto em LPF. A 1 kW, a poça de fusão apresentou, superficialmente, um formato arredondado e uma superfície estável em todas as três velocidades, aparentando ser o modo condução (Assunção, 2012; Ayoola; Suder; Williams, 2017; Katayama, 2020; Kou, 2003). No entanto, esta observação visual da superfície apresenta uma aparente contradição com a análise macrográfica. Enquanto a filmagem de 1 kW não capturou oscilações centrais, a macroscopia confirmou a presença de porosidade nas velocidades de 1 e 2 m/min, indicando o estabelecimento de um *keyhole*.

Isso sugere que, nesta baixa potência do laser (1 kW), o *keyhole* era transiente ou muito raso. As instabilidades geradas, embora suficientes para causar o aprisionamento de gás, podem ter sido muito sutis ou intermitentes, ocorrendo abaixo do limiar de detecção do sistema de filmagem. Para ilustrar essa aparente estabilidade superficial, a Figura 54 apresenta a evolução temporal da poça de fusão para a condição de 1 kW e 1 m/min, exibindo quadros a cada 5 ms. Conforme observado, a superfície da poça de fusão mantém-se estável, sem oscilações centrais evidentes que pudessem ser associadas a um *keyhole* ativo, reforçando a diferença entre a análise visual da poça e a análise macrográfica de poros.

Figura 54 - Evolução temporal da poça de fusão com 1 kW de potência do laser e 1 m/min de velocidade de soldagem.



Fonte: Do autor (2026).

A partir de 2 kW, a transição tornou-se inequívoca: a formação de uma região central mais brilhante e visivelmente oscilante indicou o modo *keyhole* plenamente estabelecido. Acima de 3 kW, a poça de fusão tornou-se progressivamente mais alongada (formato de lágrima) e turbulenta, sugerindo um *keyhole* mais profundo e desenvolvido.

Analisando-se horizontalmente (potência do laser constante), o aumento da velocidade de soldagem resultou em redução da LPF, enquanto o CPF apresentou menor variação. Essa diferença de sensibilidade está associada aos mecanismos de transferência de calor: a LPF depende de forma mais direta da difusão lateral de calor e, portanto, do tempo de interação, que é inversamente proporcional à velocidade de soldagem. Já o CPF é mais fortemente governado pela formação e estabilidade do *keyhole* em si (Katayama, 2020; Suder; Williams, 2012). Adicionalmente, observou-se que o aumento da velocidade de soldagem, especialmente em altas potências (como 5 kW), promoveu um nítido aumento na ejeção de respingos (circulado em vermelho), sugerindo uma maior instabilidade do *keyhole*. A possível causa é a combinação de uma pressão de recuo violenta (alta potência) atuando sobre uma poça de fusão em rápido movimento (alta velocidade de soldagem), gerando uma turbulência que ejeta o material antes que ele possa ser reabsorvido. Todas estas tendências serão investigadas de forma quantitativa na sequência.

4.1.4 Correlações Geométricas da Poça de Fusão

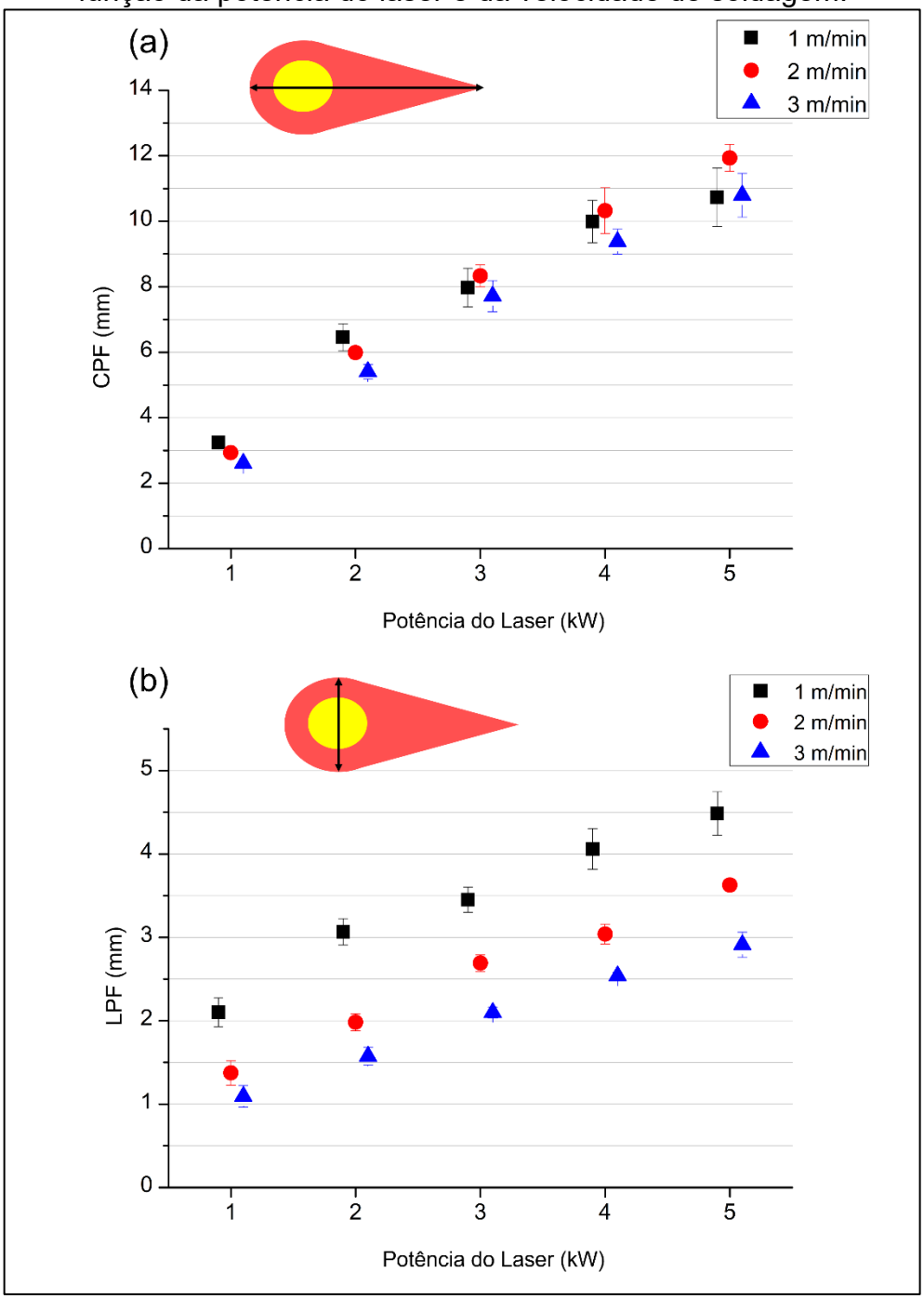
As observações visuais descritas anteriormente são corroboradas pelos dados quantitativos obtidos na análise dos frames, apresentados nos gráficos da Figura 55, onde as barras de erro representam o desvio padrão da flutuação temporal ao longo do cordão. No cordão de solda com velocidade de 1 m/min, o incremento da potência do laser de 1 para 5 kW provocou um aumento médio da LPF de 2,10 mm para 4,48 mm, e do CPF de 3,24 mm para 10,73 mm.

Em contrapartida, ao se analisar o efeito da velocidade mantendo a potência do laser fixa em 5 kW, observou-se uma redução significativa da dimensão lateral: o aumento da velocidade de 1 para 3 m/min resultou na diminuição da LPF de 4,48 mm para 2,91 mm.

Essa relação inversa entre a largura da poça de fusão e a velocidade de soldagem é explicada pela diminuição do tempo de interação, que reduz a difusão

lateral de calor, restringindo a fusão às adjacências imediatas do *keyhole*. Já o efeito da potência do laser está associado ao aumento da densidade de energia absorvida, resultando em maiores volumes de fusão (Suder; Williams, 2012). Tais resultados corroboram as tendências observadas por Seto *et al.* (2000) e Bergmann *et al.* (2020) em soldagens a laser de aços inoxidáveis.

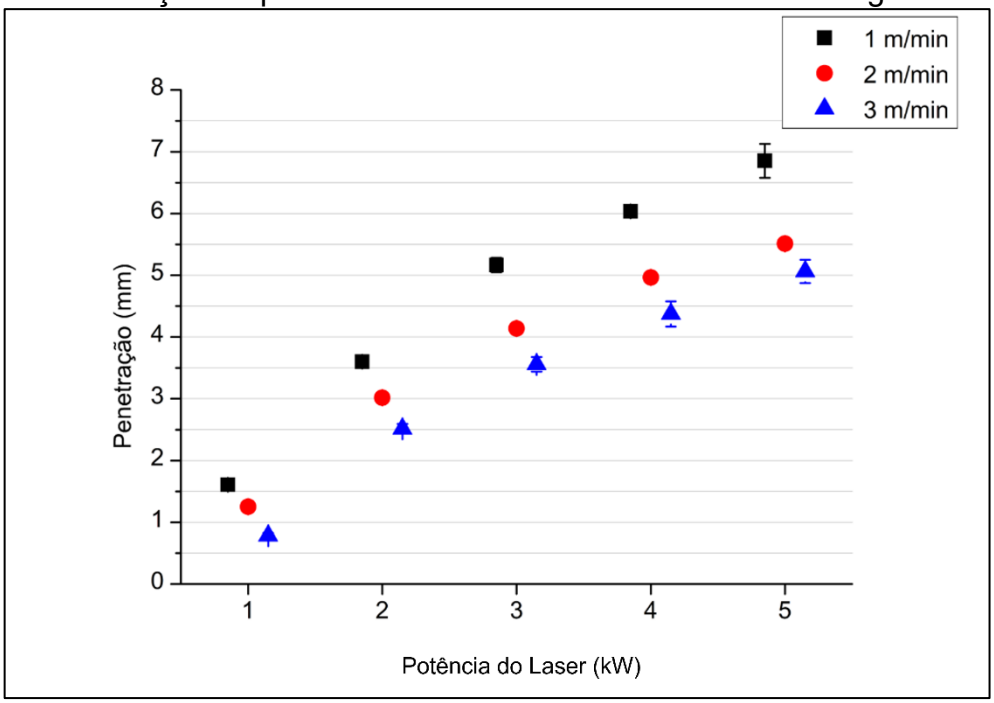
Figura 55 – (a) Comprimento da poça de fusão e (b) Largura da poça de fusão em função da potência do laser e da velocidade de soldagem.



Fonte: Do autor (2026).

Outra geometria essencial para a análise é a profundidade de penetração, cujos valores medidos são ilustrados na Figura 56. Observa-se um crescimento consistente da penetração com o aumento da potência do laser para todas as velocidades de soldagem. Para 1 m/min, a penetração variou de 1,61 ± 0,03 mm a 6,85 ± 0,27 mm. Para uma mesma potência do laser, a redução da velocidade de soldagem resultou em maiores profundidades, efeito associado ao aumento da energia por unidade de comprimento. Este comportamento é esperado e está relacionado ao aprofundamento do *keyhole* (Katayama, 2009; Tsuji, 2009; Zhu *et al*., 2026). À medida que a potência do laser aumenta, nota-se também uma redução da variabilidade relativa, sugerindo maior estabilidade do *keyhole*. Isso ocorre porque a maior densidade de energia gera um volume mais significativo de vapor metálico, aumentando a pressão de recuo que torna o *keyhole* mais robusto e menos suscetível a flutuações (Katayama, 2009).

Figura 56 - Variação do perfil de penetração do cordão de solda (seção longitudinal) em função da potência do laser e da velocidade de soldagem.



Fonte: Do autor (2026).

A análise quantitativa da profundidade confirma que o impacto da velocidade de soldagem é dependente do regime de operação. Em baixos níveis de potência (1 kW), característicos do modo condução, a penetração mostrou-se menos sensível à variação temporal, reduzindo de 1,61 mm (1 m/min) para 0,78 mm (3 m/min), uma

amplitude de variação de apenas 0,83 mm. Já no regime de *keyhole* (≥ 2 kW), a penetração torna-se mais sensível à velocidade de soldagem. A 5 kW, por exemplo, o aumento da velocidade de 1 para 3 m/min resultou em uma queda expressiva de 6,85 mm para 5,06 mm, ampliando a diferença absoluta para 1,79 mm. Esse distanciamento progressivo das curvas evidencia que, sob altas densidades de potência, o tempo de interação exerce um papel determinante e amplificado na definição da profundidade final do capilar, contrariando a hipótese de saturação precoce para esta janela de parâmetros.

Os resultados quantitativos confirmam que a combinação de elevada potência com velocidade de soldagem baixa (1 m/min) promove as maiores dimensões geométricas e profundidades de penetração. Contudo, a análise morfológica revelou que essas mesmas condições coincidem com a maior incidência de porosidade. Evidencia-se, portanto, um compromisso técnico: os parâmetros energéticos que maximizam a penetração são os mesmos que, sob atmosfera de argônio, induzem a instabilidade do *keyhole* e geram descontinuidades. Esse diagnóstico fundamenta a necessidade de investigar e adequar a proteção gasosa para estabilizar o processo, objetivo central da próxima etapa deste trabalho.

4.2 PROTEÇÃO GASOSA: INVESTIGAÇÃO QUANTO A POROSIDADE

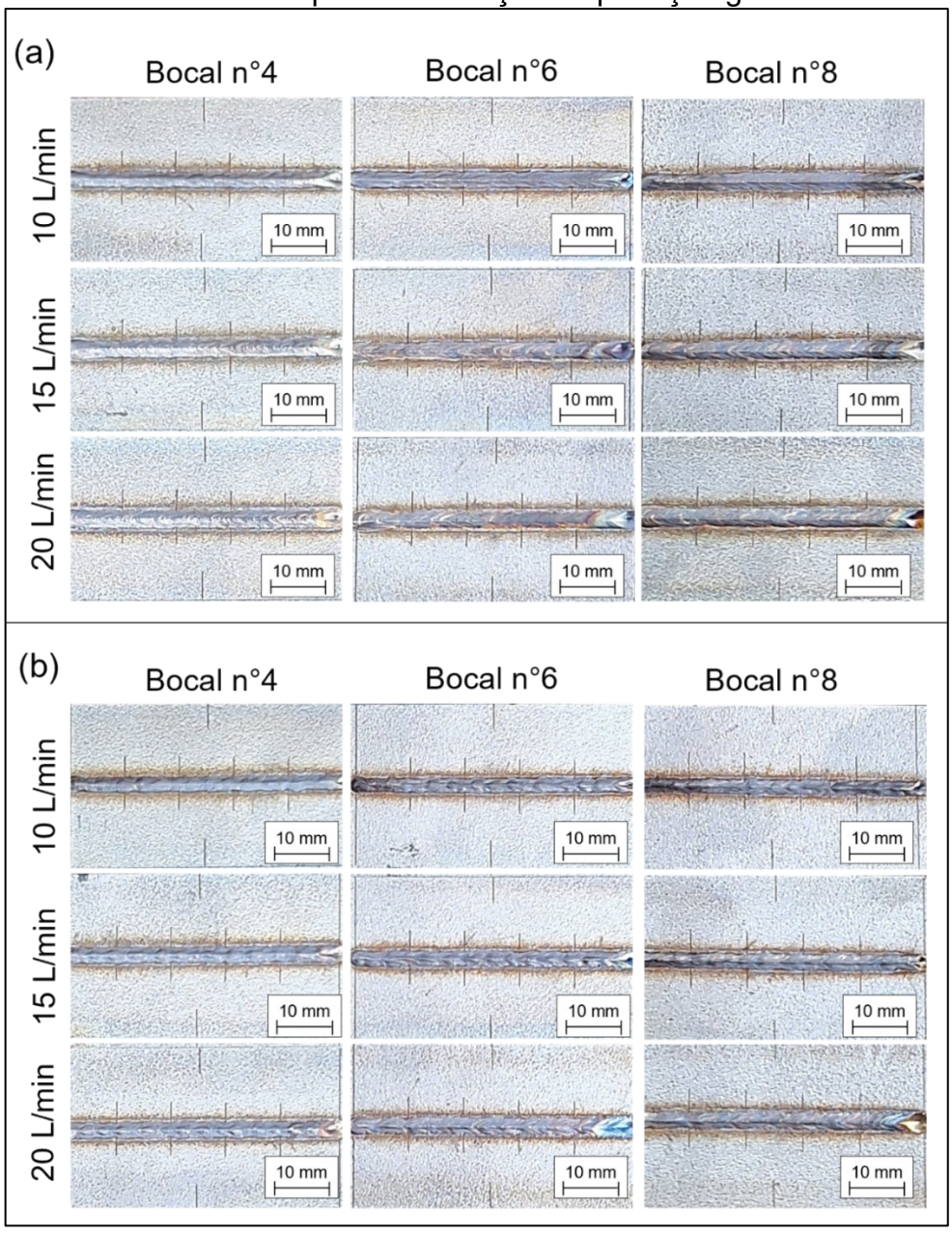
A presença de porosidade na etapa preliminar, conforme discutido anteriormente, motivou a investigação de novas condições para o gás de proteção, com o objetivo de eliminar ou reduzir esta descontinuidade. Conduziram-se, então, experimentos baseados nas variáveis descritas na Tabela 4, todos realizados na condição de 2 kW e 1 m/min, considerada a pior condição.

4.2.1 Influência da Composição do Gás de Proteção no Cordão de Solda

A Figura 57 apresenta a aparência superficial de uma seleção dos cordões de solda obtidos. A análise revela diferenças sutis na morfologia: observa-se que os cordões de solda produzidos com nitrogênio são ligeiramente mais estreitos do que aqueles produzidos com argônio. Outra característica refere-se às marcas de solidificação: enquanto os cordões de solda com argônio exibem uma superfície mais lisa e uniforme, os com nitrogênio apresentam ondulações mais pronunciadas.

Essa diferença pode estar associada às propriedades físicas e químicas dos gases de proteção. O nitrogênio, por possuir menor densidade e maior condutividade térmica que o argônio, favorece uma dissipação mais eficiente do calor e reduz o confinamento do plasma metálico, concentrando a energia do feixe em uma região mais estreita. Além disso, a solubilidade do nitrogênio no metal fundido pode modificar a tensão superficial da poça, promovendo flutuações mais intensas durante a solidificação, o que explicaria as ondulações observadas na superfície dos cordões protegidos com esse gás.

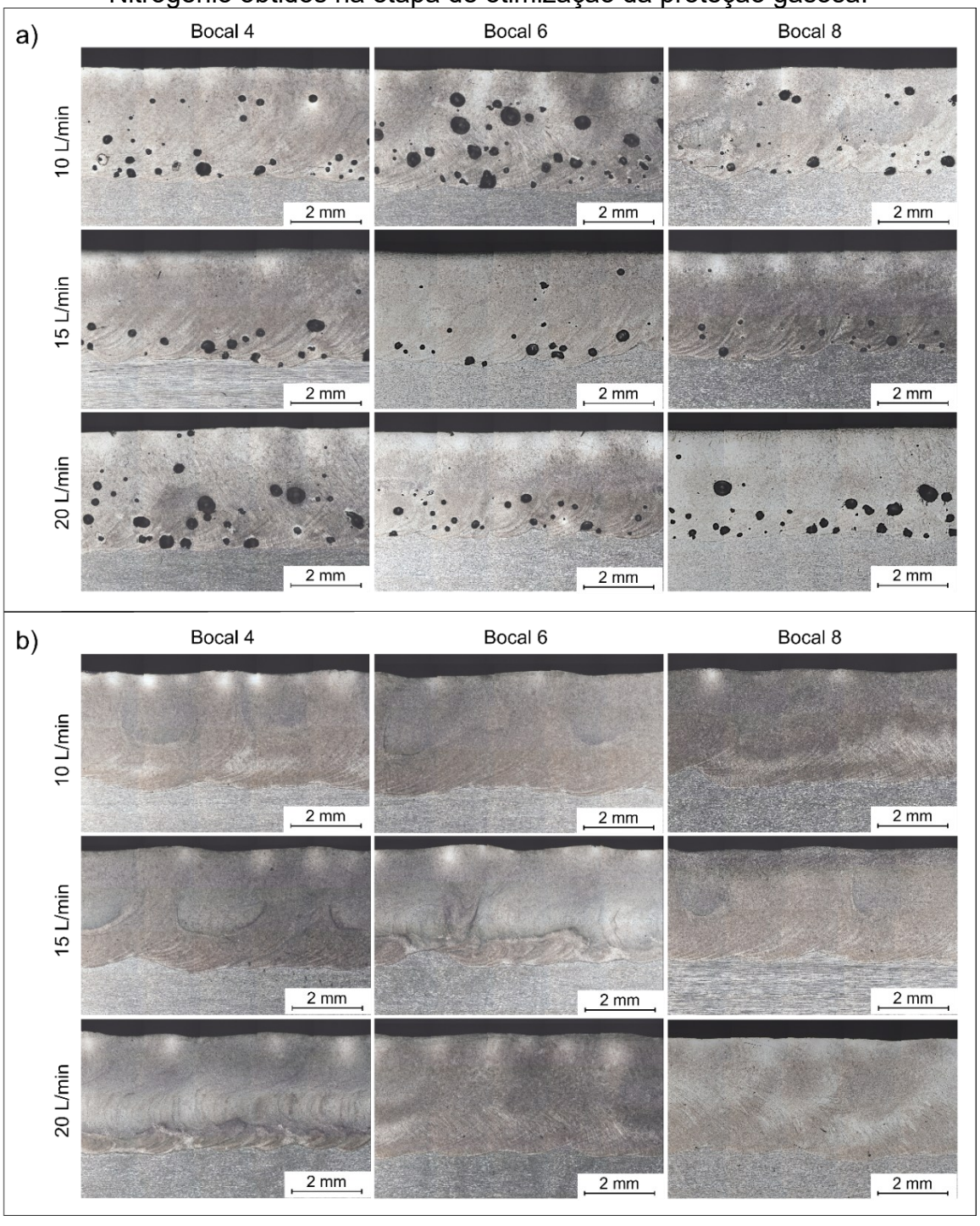
Figura 57 – Vista superior dos cordões de solda com (a) Argônio e (b) Nitrogênio obtidos na etapa de otimização da proteção gasosa.



Fonte: Do autor (2026).

A Figura 58 ilustra as seções longitudinais dos cordões de solda obtidos. A inspeção visual das amostras revelou um resultado conclusivo: o uso de nitrogênio como gás de proteção foi eficaz em reduzir drasticamente a porosidade em todas as condições testadas, enquanto o uso de argônio resultou consistentemente em cordões de solda porosos.

Figura 58 – Seção longitudinal dos cordões de solda com (a) Argônio e (b) Nitrogênio obtidos na etapa de otimização da proteção gasosa.



Fonte: Do autor (2026).

Os cordões de solda produzidos com nitrogênio apresentaram comportamento estável, mesmo com variações na vazão e no diâmetro do bocal. Em contraste, para o argônio, nem mesmo bocais de maior diâmetro, que ampliam a zona de proteção, foram capazes de reduzir significativamente a porosidade, indicando que a instabilidade observada na condição de 2 kW e 1 m/min é intrínseca ao uso deste gás. Essa diferença pode ser atribuída às propriedades físico-químicas do nitrogênio, cuja maior condutividade térmica e maior solubilidade no metal fundido favorecem uma dissipação térmica mais uniforme e reduzem a formação de vapor metálico no interior do *keyhole*. Como resultado, o processo sob atmosfera de nitrogênio manteve o *keyhole* mais estável e livre de colapsos, eliminando a formação de poros em todas as configurações analisadas.

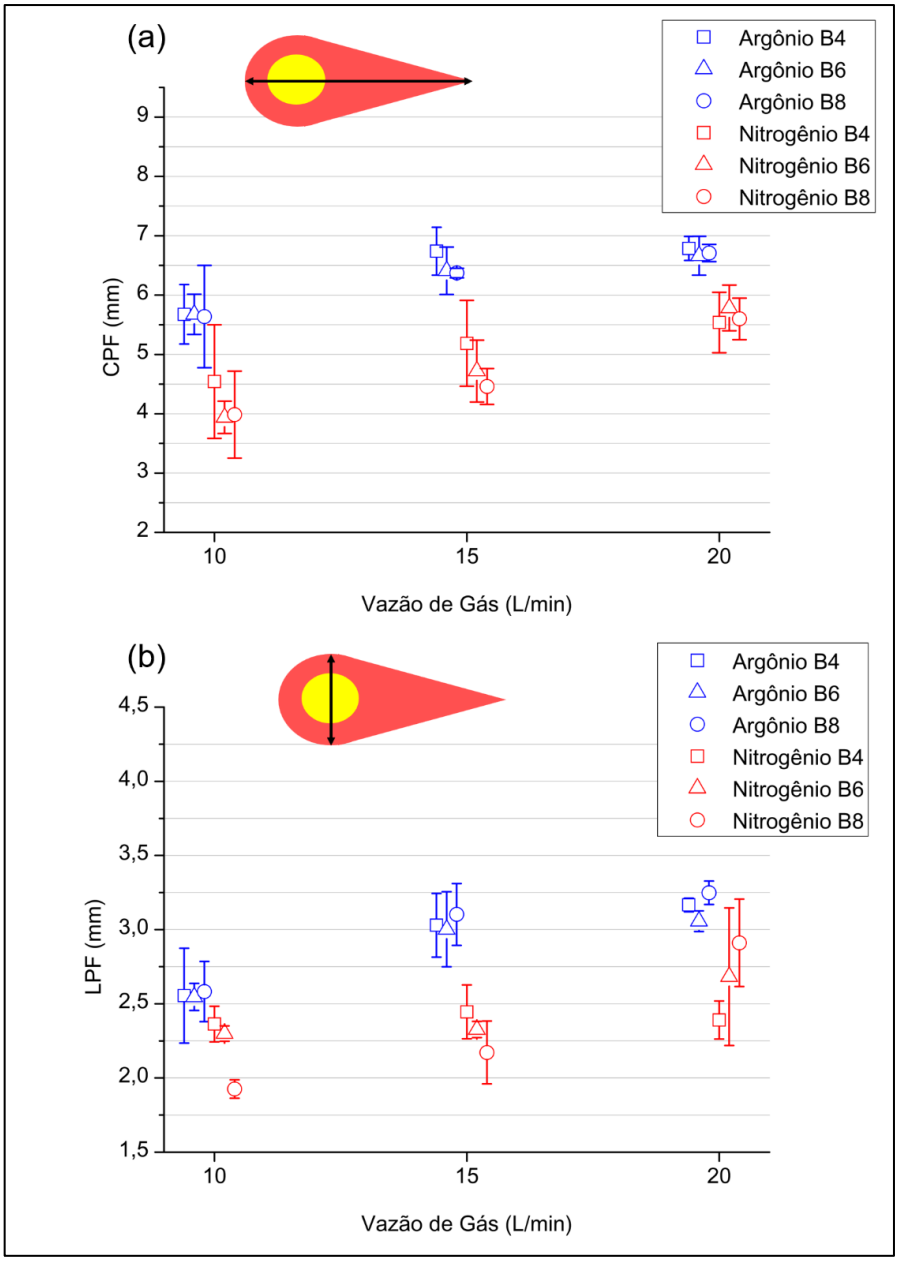
4.2.2 Dinâmica da Poça de Fusão: Argônio vs. Nitrogênio

A partir da constatação de que o nitrogênio eliminou a porosidade, buscou-se compreender se essa diferença poderia estar associada a alterações na dinâmica da poça de fusão. Para isso, foram analisados vídeos de alta velocidade e realizadas medições do comprimento, da largura da poça de fusão e da penetração, com base nos valores obtidos das seções longitudinais. A Figura 59 apresenta os resultados quantitativos para o CPF e a LPF.

Em relação ao CPF, os valores para o nitrogênio (entre 4,84 ± 0,66 mm e 6,04 ± 0,45 mm) apresentaram-se consistentemente inferiores aos do argônio (entre 5,76 ± 0,47 mm e 6,67 ± 0,22 mm). A redução mais expressiva, da ordem de 30%, foi observada nas condições de maior vazão (20 L/min), respondendo à maior convecção forçada. Essa contração sistemática das dimensões diverge dos resultados de Sun *et al.* (Sun *et al*., 2017a), que relataram geometrias similares para ambos os gases. Contudo, a diferença observada neste trabalho é justificada pelas distintas propriedades de transporte térmico: a maior condutividade térmica do nitrogênio promove uma extração de calor mais eficiente nas bordas da poça em comparação ao efeito isolante do argônio, restringindo o crescimento longitudinal da poça de fusão. Portanto, a eliminação da porosidade com nitrogênio está associada à sinergia entre essa estabilização térmica (menor volume de fluido suscetível a oscilações) e os mecanismos físico-químicos de alta solubilidade.

Para a LPF, observou-se uma tendência similar, com o argônio resultando em larguras em média 0,4 a 0,8 mm superiores às do nitrogênio. Novamente, a análise dos desvios padrão indica que essa variação, por si só, talvez não seja estatisticamente significativa para explicar a ausência de poros. Ainda assim, mesmo pequenas alterações na largura podem ser um indício de mudanças no fluxo de Marangoni (Kshirsagar *et al.*, 2021; Le; Lo, 2019), sugerindo que mecanismos de convecção interna, modulados pelo gás, podem estar contribuindo para o comportamento distinto dos cordões.

Figura 59 - Gráficos de (a) comprimento e (b) largura da poça de fusão em função da vazão e número do bocal TIG.

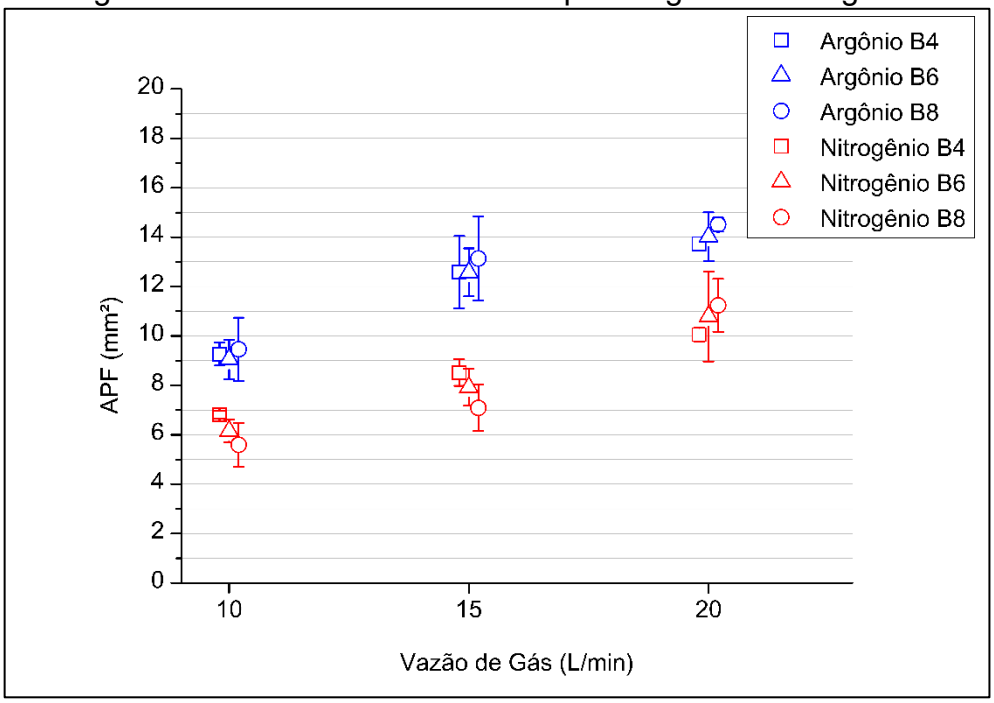


Fonte: Do autor (2026).

Para investigar a influência da composição e da vazão do gás, a APF foi quantificada e os resultados são apresentados na Figura 60. A comparação direta revela que o uso de argônio resultou consistentemente em uma APF significativamente superior à do nitrogênio. Esse resultado é a consequência direta das contrações lineares discutidas anteriormente: como o nitrogênio restringiu a largura e o comprimento devido à sua maior condutividade térmica, a área total foi reduzida.

Nota-se ainda que a vazão do gás exerce influência perceptível sobre a APF: o aumento da vazão de 10 para 20 L/min resultou no crescimento da área fundida para ambos os gases. Esse comportamento é atribuído à supressão eficiente da pluma de plasma/vapor metálico sobre o *keyhole*. Com a remoção dessa nuvem absorvedora pelo jato de gás mais intenso, reduz-se a absorção por *bremsstrahlung* inverso (Gao; Wen; Katayama, 2013), permitindo que uma densidade de energia efetiva maior atinja a superfície, o que incrementa o volume fundido e expande a área superficial da poça.

Figura 60 - APF vs. Vazão de Gás para argônio e nitrogênio.



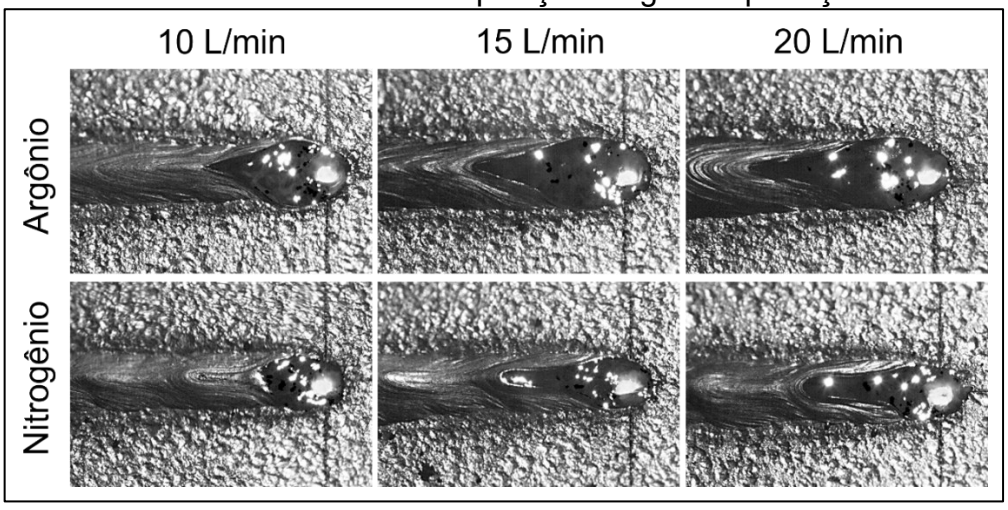
Fonte: Do autor (2026).

Esta diminuição da APF observada com o uso de nitrogênio como gás de proteção está associada às distintas propriedades físico-químicas entre os gases empregados. Em média, o uso de nitrogênio resultou em uma redução de

aproximadamente 27,7% na APF em comparação ao argônio, com variações que chegaram a até 46% nas condições de menor vazão. O argônio, por possuir condutividade térmica inferior e menor calor específico que o nitrogênio, é menos eficiente na remoção de calor da poça de fusão por convecção forçada. Essas menores perdas térmicas para o jato de gás (em comparação com o nitrogênio) permitem que o calor se acumule e a poça de fusão se espalhe mais lateralmente, contribuindo para a maior APF observada (Elmer *et al*., 2014). Essas diferenças alteram significativamente a eficiência de acoplamento do feixe laser e o mecanismo de absorção de energia na região da poça de fusão. Uma análise mais detalhada dessa interação, considerando os efeitos físico-químicos e a estabilidade do *keyhole*, será discutida no final desta seção.

Para ilustrar visualmente a influência da composição do gás de proteção sobre a APF, a Figura 61 apresenta quadros extraídos das imagens de alta velocidade. Observa-se que o argônio promove uma poça de fusão mais ampla, enquanto o nitrogênio tende a produzir uma poça mais estreita. Essas observações corroboram os resultados quantitativos da APF (Figura 60), reforçando o impacto direto do gás de proteção na dissipação de calor por convecção forçada e, consequentemente, na morfologia final da poça de fusão.

Figura 61 – Dimensões da poça de fusão para a condição de bocal TIG n°4 para diferentes vazões e composição do gás de proteção.



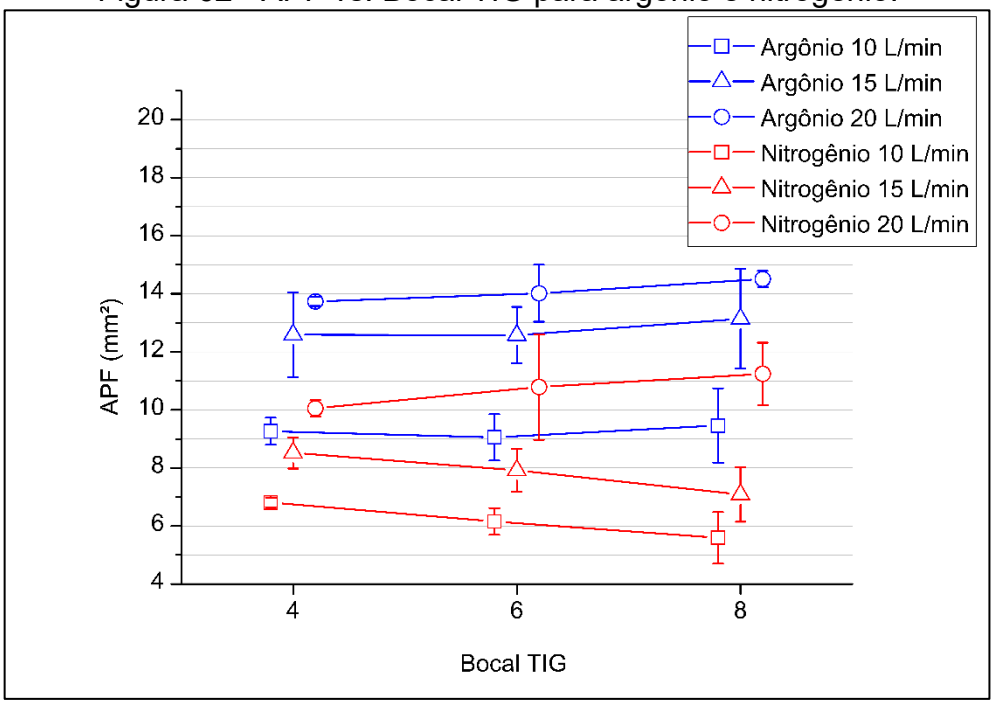
Fonte: Do autor (2026).

Na sequência, avaliou-se o efeito do diâmetro do bocal de proteção sobre a APF, conforme apresentado na Figura 62. A análise deste parâmetro revela um contraste evidente: ao contrário da vazão, cuja elevação promoveu um aumento

consistente da APF, a variação do diâmetro do bocal não apresentou influência estatisticamente significativa ou tendência clara.

Observando-se uma mesma vazão (ex: 10 L/min) para diferentes bocais, os resultados mostram-se estáveis dentro da margem de erro: com argônio, nota-se apenas uma flutuação marginal na APF, com nitrogênio, os resultados foram mistos e pouco expressivos. Essa ausência de sensibilidade ao diâmetro reforça a conclusão de que o fator predominante na governança da APF é a vazão mássica do gás. Embora a redução do diâmetro do bocal aumente a velocidade do jato (para uma mesma vazão), essa alteração na quantidade de movimento não foi suficiente para impactar o mecanismo de acoplamento energético na mesma magnitude que a variação do volume de gás injetado. Assim, o controle efetivo da vazão mostra-se mais determinante para o desempenho do processo do que a geometria do bocal sob as condições avaliadas.

Figura 62 - APF vs. Bocal TIG para argônio e nitrogênio.



Fonte: Do autor (2026).

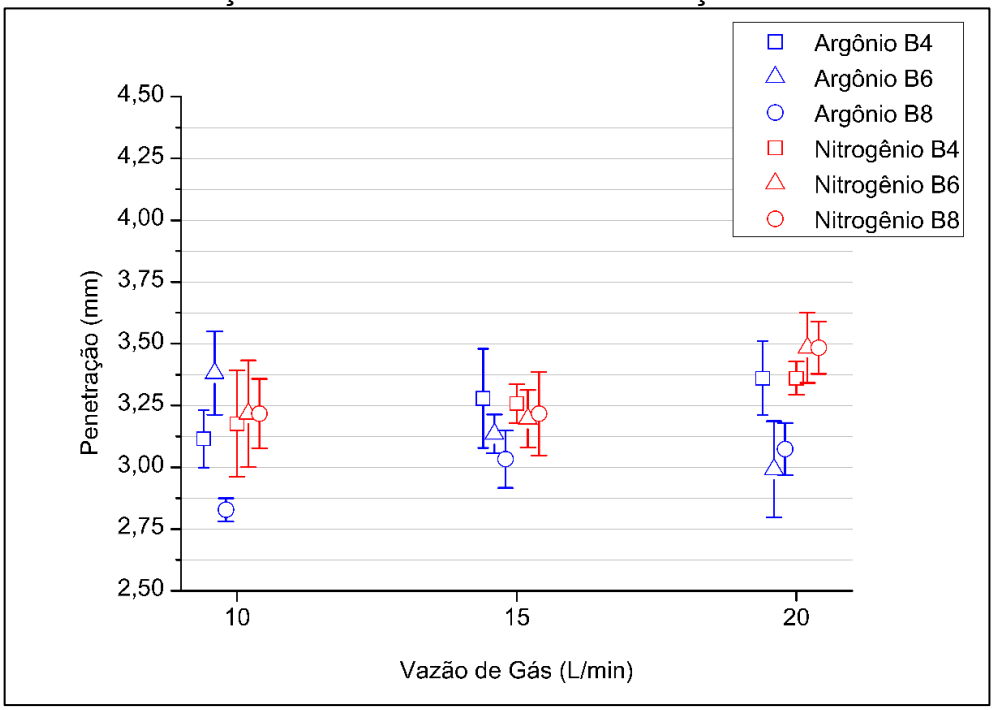
Encerrando a análise dos parâmetros de proteção gasosa, observa-se que a composição quanto as condições de vazão influenciam diretamente o acoplamento energético do feixe laser. No entanto, mesmo variações sutis na eficiência de blindagem e na dinâmica do plasma podem refletir de forma mais sensível sobre a profundidade de penetração, uma vez que esse parâmetro está intimamente

associado à densidade de potência efetiva incidente sobre o material e à distribuição térmica no interior do *keyhole*. Dessa forma, a seguir é apresentada a análise da profundidade de penetração, visando identificar possíveis correlações entre o tipo de gás e o comportamento da poça de fusão observado nas etapas anteriores.

A análise da profundidade de penetração, apresentada na Figura 63, demonstra uma estabilidade marcante, não evidenciando influência estatisticamente significativa dos fatores avaliados (tipo de gás, vazão ou diâmetro do bocal) sobre esta dimensão.

Os valores médios obtidos para o nitrogênio situaram-se na faixa de 3,18 a 3,48 mm, sobrepondo-se aos valores do argônio (2,83 a 3,38 mm) quando considerados os respectivos desvios padrão. Essa constatação é tecnicamente relevante, pois indica um desacoplamento entre os fenômenos superficiais e internos: embora o nitrogênio tenha restringido significativamente as dimensões superficiais (LPF e APF) devido à maior condutividade térmica, a densidade de potência efetiva no centro do feixe permaneceu constante, preservando a profundidade do *keyhole*. Portanto, a substituição do gás de proteção mostrou-se capaz de eliminar a porosidade sem comprometer a penetração da solda, validando a eficácia do processo com nitrogênio para esta aplicação

Figura 63 - Penetração dos cordões de solda em função da vazão e do bocal.



Fonte: Do autor (2026).

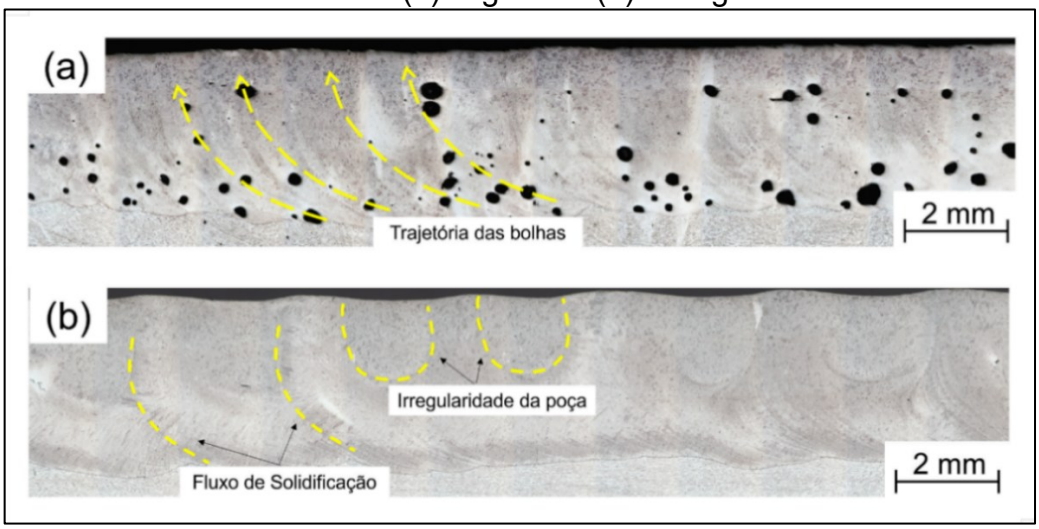
De modo geral, os resultados obtidos demonstram que, embora o gás de proteção e suas condições de escoamento (vazão e diâmetro do bocal) exerçam influência limitada sobre as dimensões da poça de fusão e valor de penetração. Tais variações sugerem alterações pontuais na eficiência de acoplamento do feixe laser e na distribuição térmica dentro do *keyhole*, especialmente nas condições com nitrogênio, que apresentaram leve tendência de maior penetração e menor APF. Esses resultados indicam que o comportamento termo fluídico da poça de fusão pode estar associado não apenas às propriedades físicas do gás, mas também a possíveis interações químicas e metalúrgicas no estado líquido. A fim de aprofundar essa análise e compreender os mecanismos subjacentes, a próxima subseção aborda de forma detalhada os efeitos específicos do nitrogênio na formação, estabilidade e solidificação da poça de fusão.

4.2.3 Discussão dos Mecanismos de Atuação do Nitrogênio

A Figura 64 apresenta uma análise macrográfica comparativa das seções longitudinais para a condição de 10 L/min (bocal n°4). A diferença mais notável, evidenciada no painel (a), é a presença de poros resultantes do aprisionamento de gás durante a solidificação no cordão de solda produzido com argônio. Estas descontinuidades estão completamente ausentes no cordão produzido com nitrogênio (b), embora ambos os cordões apresentem marcas de solidificação com morfologia similar.

Adicionalmente, uma análise mais detalhada da amostra com Nitrogênio revela a formação de perfis semicirculares na interface de fusão, gerando uma sutil irregularidade no padrão de solidificação. A hipótese preliminar associa esse fenômeno à oscilação da poça de fusão, possivelmente causada pelas propriedades físicas do nitrogênio. No entanto, a correlação exata entre essas oscilações e a estabilidade do processo constitui um mecanismo complexo, o qual será isolado, quantificado e discutido em profundidade na Seção 4.3.

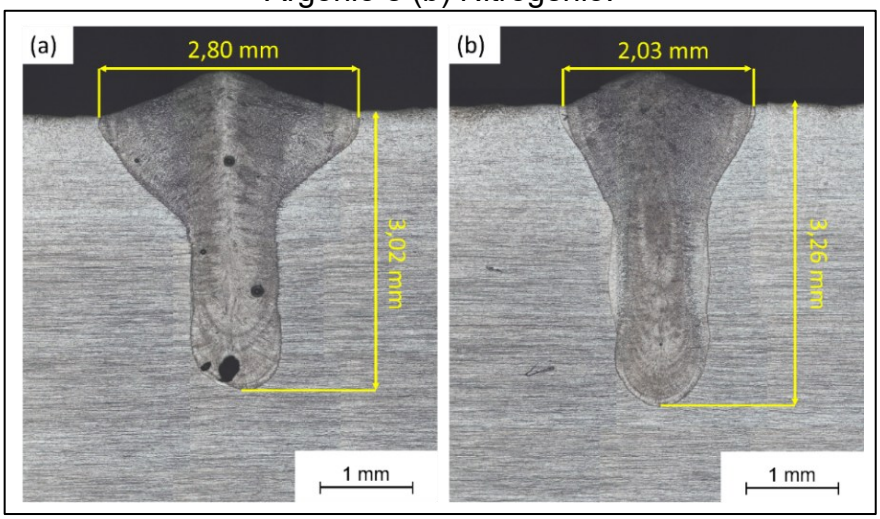
Figura 64 – Comparação da seção longitudinal (50x) na condição de 10 L/min e bocal n° 4: (a) Argônio e (b) Nitrogênio.



Fonte: Do autor (2026).

A caracterização foi complementada pela análise da seção transversal para esta mesma condição (10 L/min, bocal n°4), conforme ilustrado na Figura 65. A comparação dos perfis confirma as tendências geométricas observadas: o cordão de solda produzido com argônio apresentou-se ligeiramente mais largo e com menor penetração, enquanto o cordão de solda produzido com nitrogênio resultou em um perfil mais estreito e profundo.

Figura 65 – Seção transversal (50x) na condição de 10 L/min e bocal n° 4: (a) Argônio e (b) Nitrogênio.



Fonte: Do autor (2026).

Essa alteração morfológica, que resultou em um cordão mais estreito e profundo com nitrogênio, é corroborada pela medição das áreas fundidas na seção

transversal: o cordão de solda produzido com argônio apresentou uma área média de 4,622 mm², enquanto o produzido com nitrogênio foi de 4,287 mm².

Embora o valor absoluto seja ligeiramente menor para o nitrogênio, esse resultado é coerente com uma transferência térmica mais eficiente. A geometria observada reflete não uma perda de energia, mas uma melhor eficiência térmica e estabilidade da poça de fusão sob atmosfera de nitrogênio, onde o calor é redistribuído mais uniformemente e concentrado em profundidade, em vez de mais largo e raso.

Portanto, conclui-se que a eliminação robusta das descontinuidades observadas com o nitrogênio se deve à atuação simultânea de múltiplos mecanismos físico-químicos e fluidodinâmicos, e não a um fator isolado. Os principais mecanismos responsáveis por essa melhoria são detalhados a seguir.

O primeiro mecanismo está associado à estabilização do *keyhole*. Conforme apontado por Hafez (2023), a instabilidade do *keyhole* na presença de argônio favorece o aprisionamento de bolhas no metal fundido. Em contrapartida, a maior estabilidade promovida pelo nitrogênio, corroborada pela ausência de poros nas condições testadas (Figura 58), permite que eventuais bolhas sejam absorvidas antes da solidificação, evitando a formação de descontinuidades internas.

Além disso, as diferenças nas propriedades termofísicas dos gases também contribuem para esse comportamento. O nitrogênio apresenta condutividade térmica e calor específico ligeiramente superiores aos do argônio, o que favorece uma transferência de calor mais eficiente e uma dissipação térmica mais homogênea ao redor do *keyhole*. Essa maior eficiência térmica auxilia na manutenção de um gradiente de temperatura mais estável, reduzindo flutuações abruptas de pressão e de fluxo dentro da cavidade.

Paralelamente, as alterações geométricas observadas sugerem que o nitrogênio também influencia o padrão de convecção do metal líquido. Como elemento tensoativo, ele pode modificar o fluxo Marangoni, alterando a distribuição de calor e o perfil da poça de fusão. Embora este trabalho não permita isolar esse efeito de forma conclusiva, trata-se de um fenômeno descrito na literatura (Kshirsagar *et al*., 2021; Le; Lo, 2019).

Adicionalmente, a alta solubilidade do nitrogênio no aço inoxidável líquido também desempenha papel fundamental. Diferentemente do argônio, que é inerte e tende a formar bolhas gasosas, o nitrogênio atua como elemento de liga, sendo

absorvido pela poça de fusão e posteriormente dissolvido na matriz austenítica durante a solidificação, o que inibe a nucleação de poros (Sun *et al*., 2017b).

Por fim, observa-se ainda um efeito microestrutural associado à presença de nitrogênio. Este elemento é um potente estabilizador da austenita e, conforme demonstrado por Kwak *et al.* (2022), sua utilização favorece a formação de uma microestrutura predominantemente austenítica. Embora essa característica contribua para a redução da porosidade, uma vez que a ausência de ferrita-δ diminui o potencial de aprisionamento de gases durante a solidificação, também é importante reconhecer que uma microestrutura totalmente austenítica pode aumentar a suscetibilidade a trincas a quente, especialmente sob elevadas taxas de resfriamento. Além disso, o uso de nitrogênio como gás de proteção não é amplamente aplicável: sua eficiência depende fortemente da composição química do material e do equilíbrio de fases desejado. Portanto, o desempenho observado neste estudo deve ser interpretado dentro do contexto específico do aço inoxidável AISI 304, onde a combinação de mecanismos térmicos, físico-químicos e microestruturais atuou de forma sinérgica para eliminar a porosidade.

4.3 ANÁLISE DO PROCESSO EM CONDIÇÃO GASOSA ADEQUADA

Diante da robustez dos resultados da seção anterior, que demonstraram a eliminação da porosidade com o uso de nitrogênio, foi selecionada a configuração de proteção gasosa a ser utilizada na etapa final do presente estudo. Optou-se pela com vazão de 10 L/min e bocal n°4 (ID10), pois, além de eficaz, representa a opção mais econômica (menor vazão).

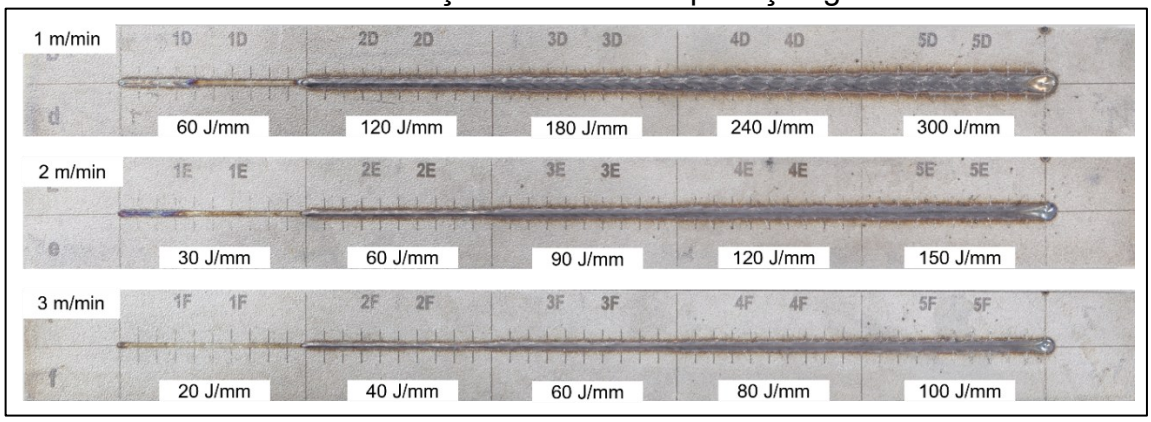
Com esta condição de proteção otimizada estabelecida, realizou-se uma nova série de experimentos para caracterizar o processo. Nesta etapa, investigou-se a influência da potência do laser (rampa de 1 a 5 kW) e da velocidade de soldagem (1, 2 e 3 m/min) na morfologia do cordão de solda e na dinâmica da poça de fusão, agora em um regime estável e livre de descontinuidades.

4.3.1 Caracterização Morfológica da Condição Selecionada

A Figura 66 exibe a vista superior dos três cordões de solda, utilizando a condição de proteção gasosa selecionada. A análise da superfície confirma a

tendência física esperada e já observada na Seção 4.1, onde, para todas as velocidades de soldagem, a largura do cordão de solda aumenta progressivamente com o incremento da potência do laser, enquanto velocidades de soldagem maiores resultam em cordões de solda mais estreitos. Este comportamento previsível, associado ao balanço de energia do processo, evidencia um primeiro nível de estabilidade e controle.

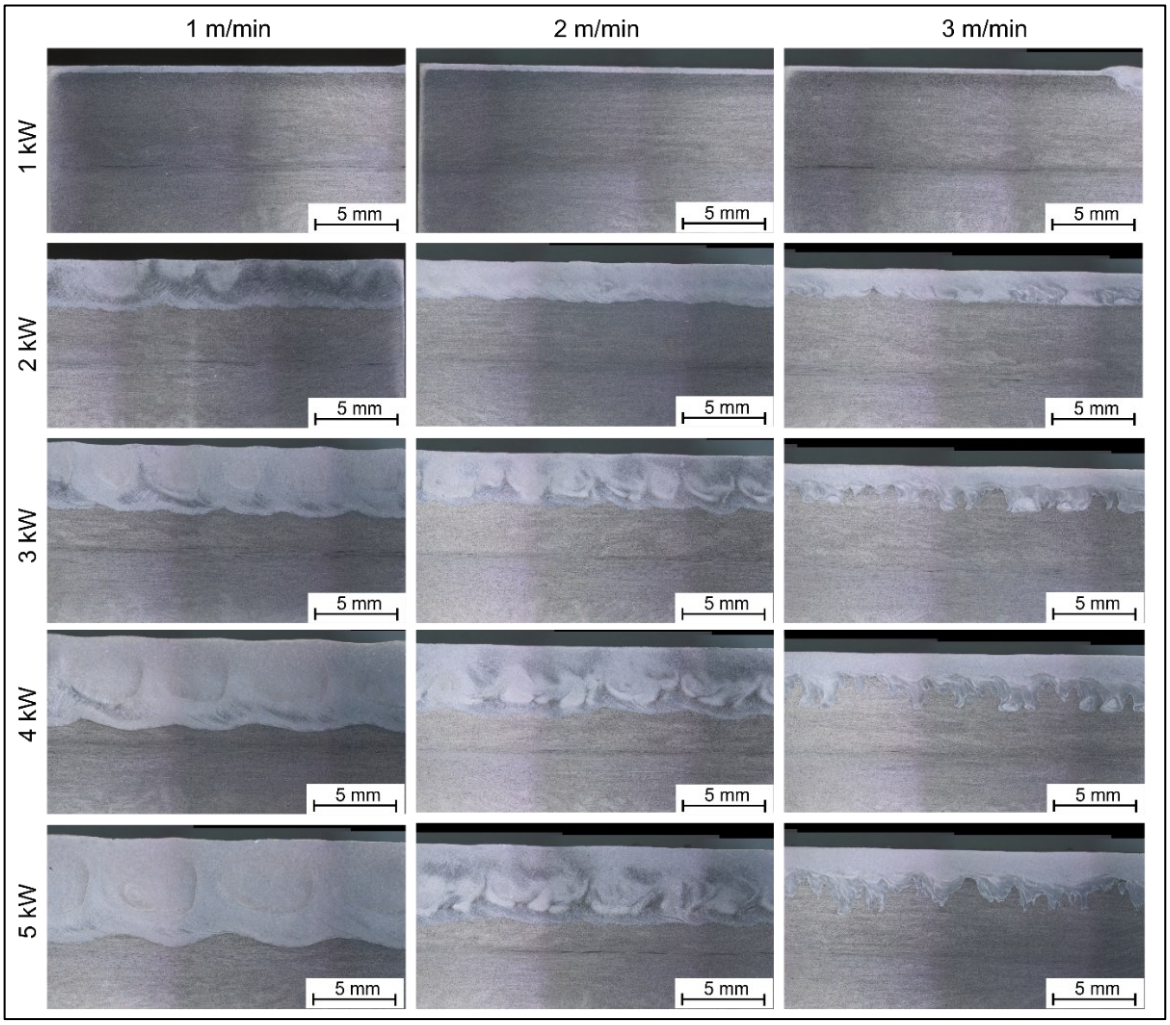
Figura 66 – Vista superior dos cordões de solda com rampa de potência do laser utilizando condição otimizada de proteção gasosa.



Fonte: Do autor (2026).

A integridade superficial observada é corroborada pela análise interna dos cordões de solda, apresentada na Figura 67, que exibe as seções longitudinais para as três velocidades de soldagem. Em forte contraste com os resultados obtidos com argônio (Seção 4.1.2), a inspeção revela a completa ausência de porosidade em toda a extensão dos cordões de solda e em toda a faixa de parâmetros investigada. Este resultado não apenas valida a eficácia da proteção com nitrogênio, mas também confirma a obtenção de um processo robusto e estável, condição essa que é essencial para a análise quantitativa detalhada que será apresentada na sequência.

Figura 67 – Seções longitudinais dos cordões de solda obtidos com condição otimizada.



Fonte: Do autor (2026).

Uma observação particular na Figura 67 é a aparente flutuação na profundidade de penetração do cordão de solda realizado a 3 m/min com potências do laser superiores a 2 kW. É importante ressaltar que a flutuação observada não representa uma instabilidade intrínseca ao processo de soldagem, mas sim uma distorção geométrica induzida pela preparação metalográfica.

Devido ao perfil de solda profundo e estreito (alta razão de aspecto) característico desta condição, a explicação mais plausível é que um pequeno desalinhamento do plano de corte ou lixamento em relação à linha de centro do cordão seja suficiente para que a seção analisada exponha uma faixa lateral da zona fundida, subestimando a penetração real e criando a impressão de variabilidade.

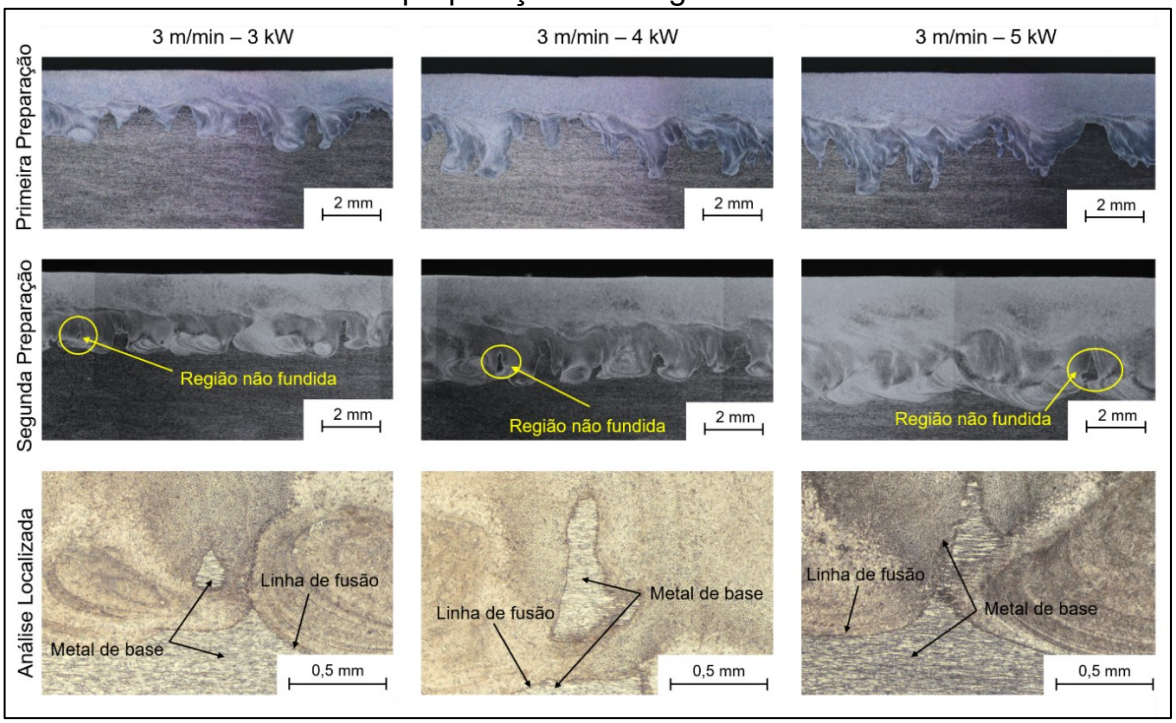
Esta interpretação é fortemente suportada pela Figura 68, que apresenta a mesma seção longitudinal após nova preparação metalográfica. Neste segundo

preparo, o perfil tornou-se visivelmente mais regular, mas revelou um fenômeno mais complexo: a presença de pequenas "ilhas" de metal de base "no interior" do cordão de solda.

Esta observação confirma que a flutuação anterior era resultado de um desalinhamento mais severo. No entanto, a presença dessas "ilhas" é uma evidência crucial da complexa morfologia 3D do *keyhole*. Em alta velocidade (3 m/min), o *keyhole* não é um canal uniforme, mas sofre flutuações morfológicas que criam variações locais em sua largura (formando cinturas e protuberâncias). O corte longitudinal 2D intercepta essa geometria 3D instável, e a "ilha" de metal de base é a parede do material entre duas protuberâncias do *keyhole* que o plano de corte atravessou.

Portanto, a Figura 68 serve como uma evidência indireta da dinâmica e da geometria pulsante do *keyhole* neste regime. Esta interpretação é também corroborada pela alta regularidade observada nas filmagens de alta velocidade (Figuras 73 a 75), que mostram um processo estável, mesmo que a morfologia solidificada do *keyhole* seja complexa.

Figura 68 – Comprovação do perfil de penetração (3 m/min; 3-5 kW) após segunda preparação metalográfica.

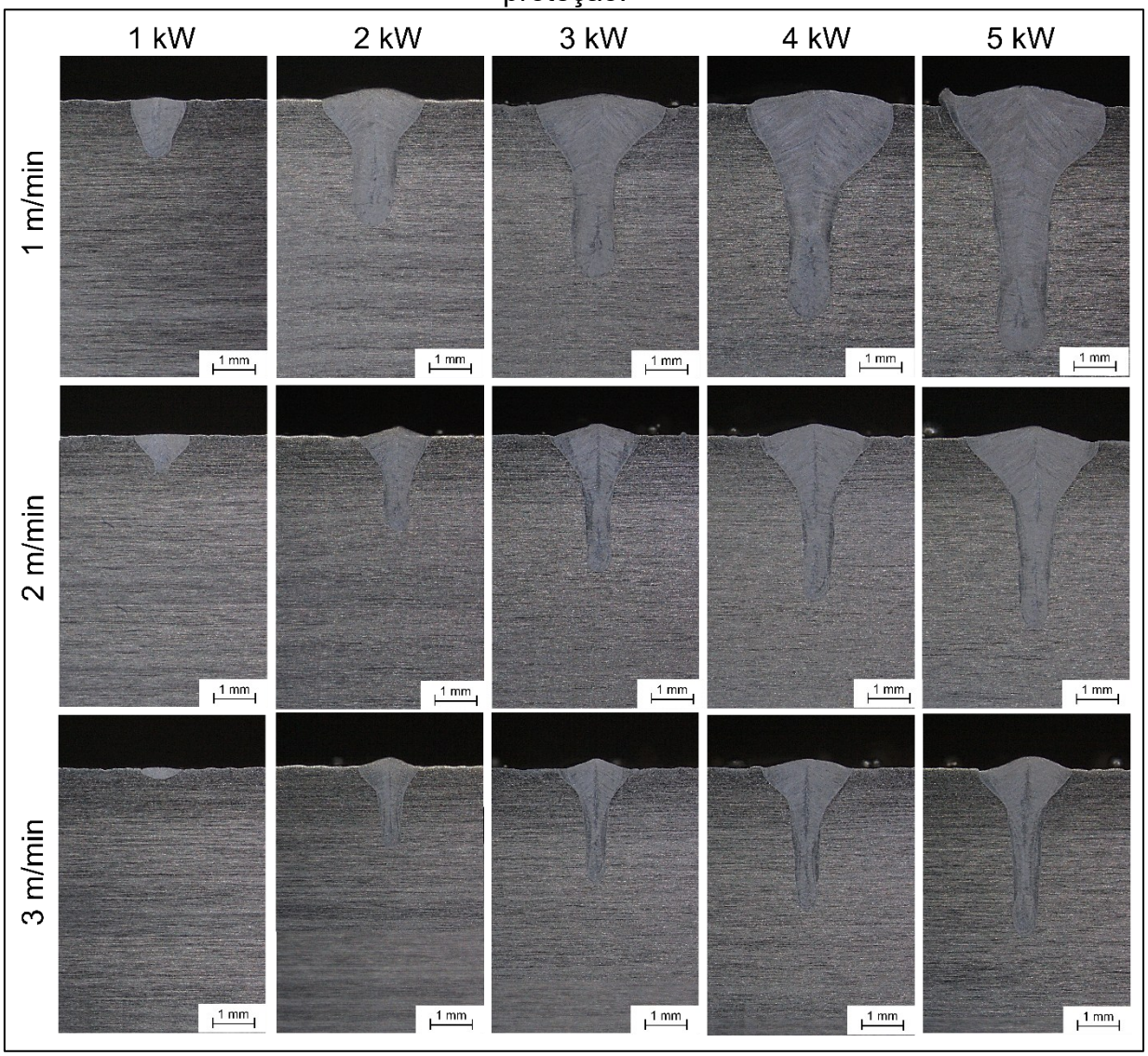


Fonte: Autor (2026).

Para qualificar a influência dos parâmetros de processo na morfologia do cordão de solda, foram realizadas análises nas seções transversais, preparadas para cada um dos 15 regimes de soldagem (5 níveis de potência do laser para cada uma das 3 velocidades de soldagem). A Figura 69 apresenta uma matriz com uma seleção de macrografias representativas, ilustrando a evolução da geometria do cordão de solda. Nestas imagens, é possível observar qualitativamente o aumento da profundidade de penetração e da largura com o incremento da potência do laser, assim como o perfil profundo e característico do regime *keyhole*. A medição sistemática destas geometrias é a base para as correlações quantitativas que serão discutidas na sequência.

Além disto, a análise das seções transversais dos cordões de solda, revelam uma morfologia característica em formato de taça de vinho. Esta geometria e as condições de processo em que ela ocorre correspondem diretamente ao que Fabbro (2010) classifica como o regime Rosenthal. Neste regime, observado pelo autor em velocidades de soldagem abaixo de 5 m/min, a poça de fusão é grande, o *keyhole* permanece relativamente vertical e a superfície apresenta flutuações caóticas com ejeção de respingos. A morfologia em taça de vinho é, portanto, uma consequência de um processo em que o transporte de calor por condução ao redor de um *keyhole* vertical desempenha um papel significativo na formatação da poça, em contraste com os regimes de maior velocidade de soldagem onde a inclinação do *keyhole* e um fluxo de fluido mais direcionado se tornam dominantes. Assim, os resultados das seções transversais do presente trabalho validam a ocorrência do regime Rosenthal, com exceção para a potência do laser de 1 kW, que pode ser explicado devido à baixa densidade de potência, alinhando-se com as observações e a classificação propostas por Fabbro.

Figura 69 – Matriz de seções transversais obtidas para cada combinação de potência do feixe laser e velocidade de soldagem, utilizando nitrogênio como gás de proteção.

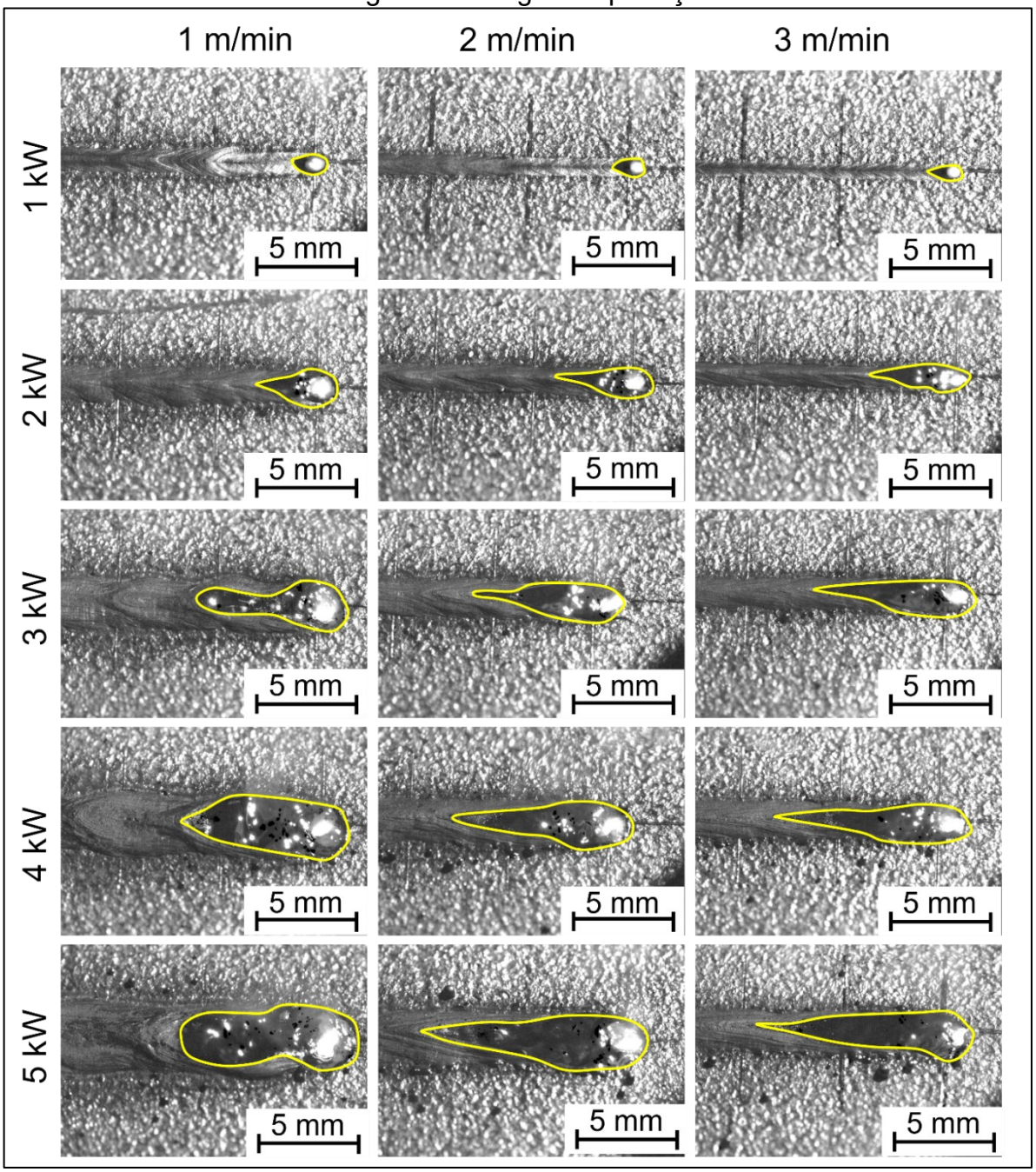


Fonte: Do autor (2026).

4.3.2 Dinâmica da Poça de Fusão em Condição Otimizada

Nesta seção, a análise se volta, então, para a dinâmica da poça de fusão. Para fornecer um panorama completo do comportamento do processo em tempo real, a Figura 70 apresenta uma matriz comparativa pontual de frames representativos, extraídos dos vídeos em alta velocidade, para cada uma das 15 combinações de potência do laser e velocidade de soldagem.

Figura 70 - Poça de fusão durante o incremento de potência do laser utilizando nitrogênio como gás de proteção.



Fonte: Do autor (2026).

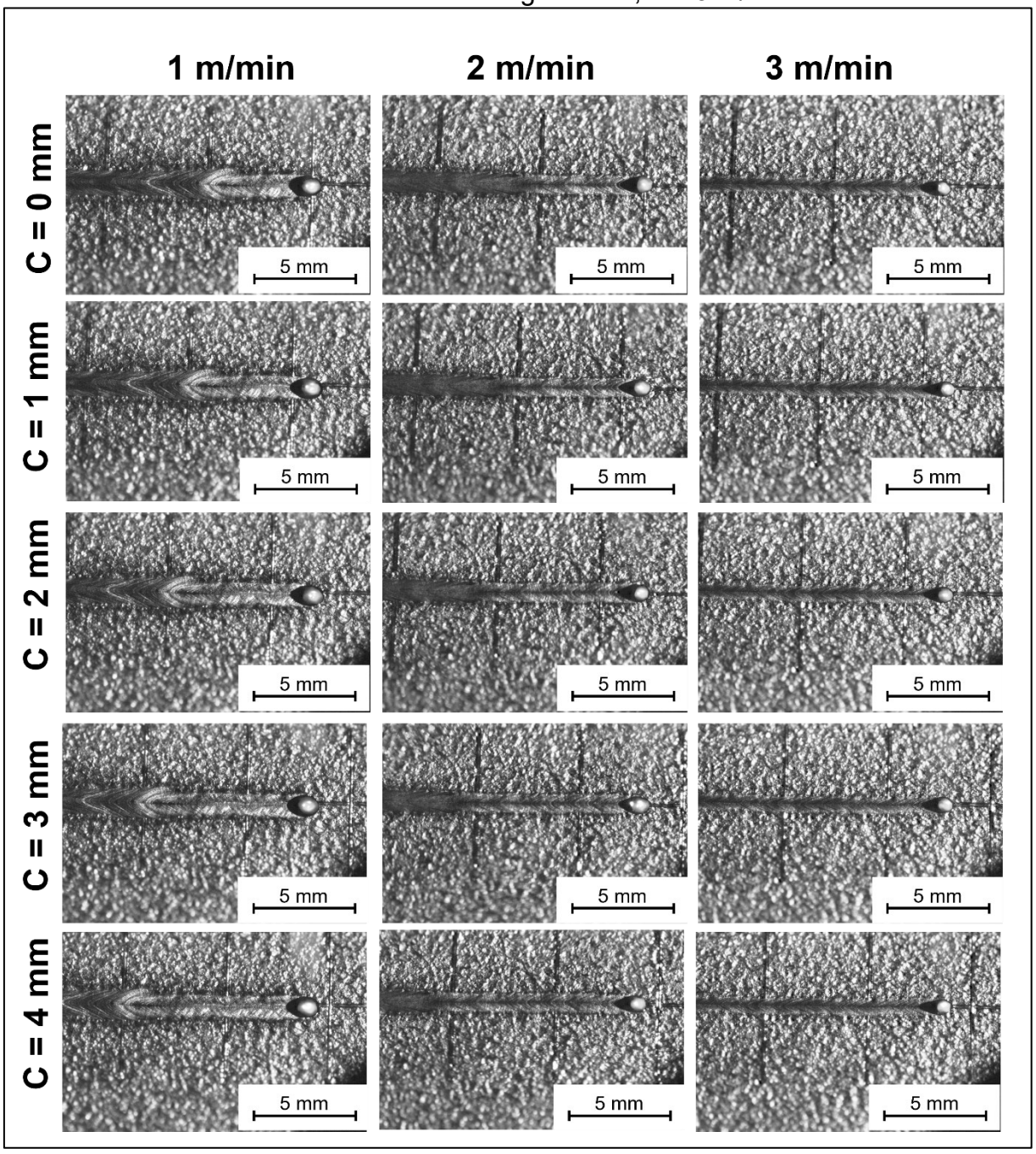
Assim como observado nos cordões produzidos com argônio, a análise morfológica da poça de fusão com nitrogênio revela tendências de processo semelhante, indicando que o comportamento da superfície da poça de fusão é independente do gás de proteção utilizado. Em resumo, o aumento da velocidade de soldagem resulta em poças progressivamente mais estreitas e alongadas, enquanto o aumento da potência promove um crescimento dimensional geral (comprimento e

largura). Essa transição morfológica, partindo de formatos elípticos (baixo aporte térmico) para formatos de lágrima (alto aporte térmico), está em total concordância com a descrição clássica de Kou (2003). O autor associa o formato alongado à rápida solidificação, que ocorre antes que o metal fundido tenha tempo de se redistribuir lateralmente. Portanto, estes resultados confirmam experimentalmente a transição teórica, reforçando a consistência dos dados obtidos.

Devido a análise da matriz anterior ter sido baseada em um quadro estático. Essa abordagem pontual não permite a avaliação da dinâmica ou estabilidade do processo ao longo do tempo. Para suprir essa lacuna, as Figuras 71 a 75 apresentam a evolução temporal da poça de fusão.

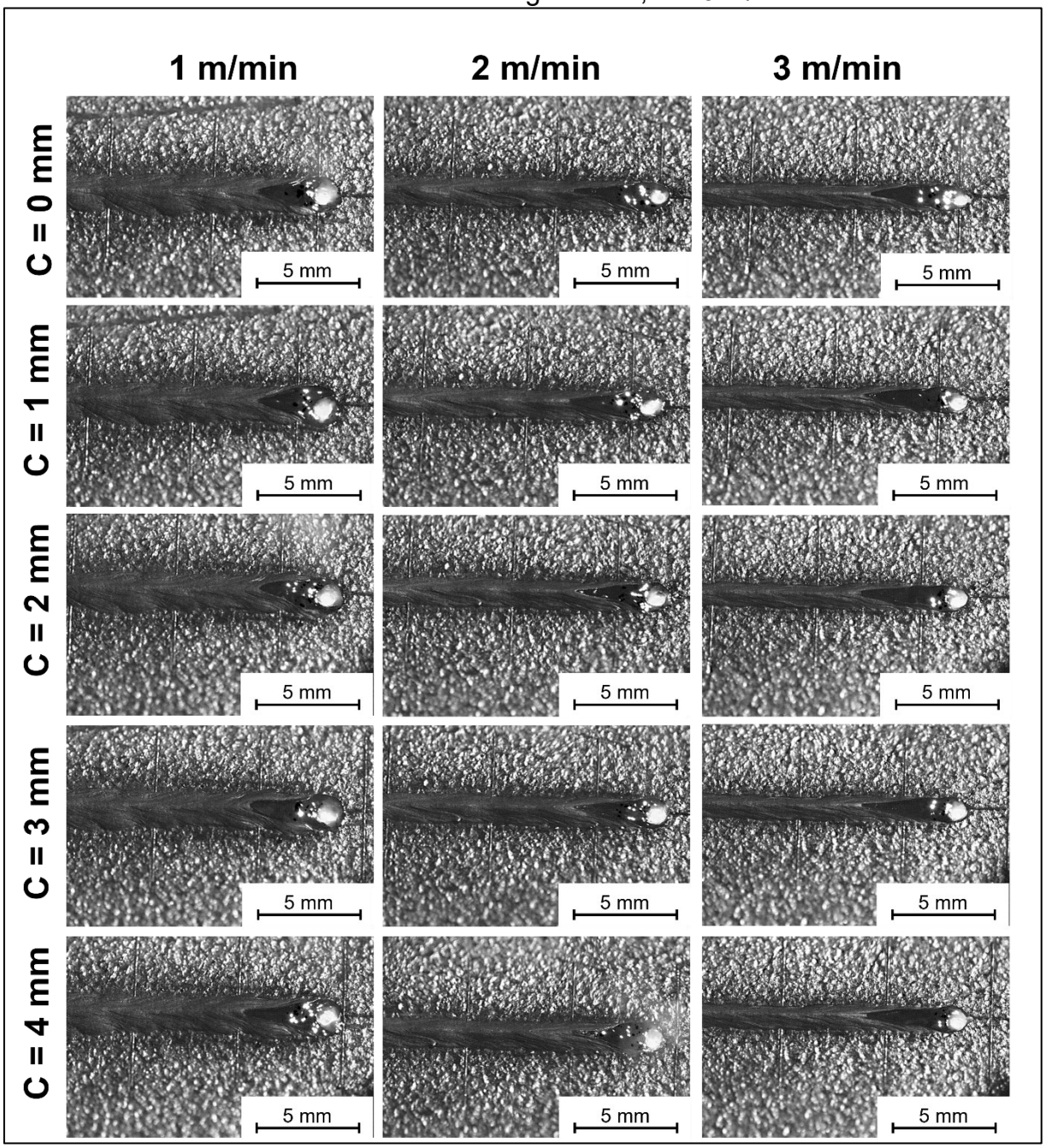
Para a análise e discussão dos resultados obtidos da evolução temporal da poça de fusão, foi adotada uma abordagem metodológica que prioriza a distância percorrida como eixo de comparação, em detrimento do tempo decorrido. Esta escolha é essencial, visto que o estudo compara experimentos com diferentes velocidades de soldagem. Se a base de análise fosse puramente temporal, as imagens extraídas corresponderiam a posições físicas diferentes ao longo do cordão de solda para cada velocidade de soldagem, inviabilizando uma comparação direta. Ao normalizar a amostragem pela distância, garante-se que a poça de fusão está sendo avaliada em estágios geometricamente equivalentes do processo. Isso permite isolar e comparar de forma robusta o efeito das diferentes velocidades de soldagem e potências do laser na geometria, estabilidade e dinâmica oscilatória da poça de fusão.

Figura 71 - Evolução temporal da poça de fusão com potência do laser de 1 kW para as velocidades de soldagem de 1, 2 e 3 m/min.



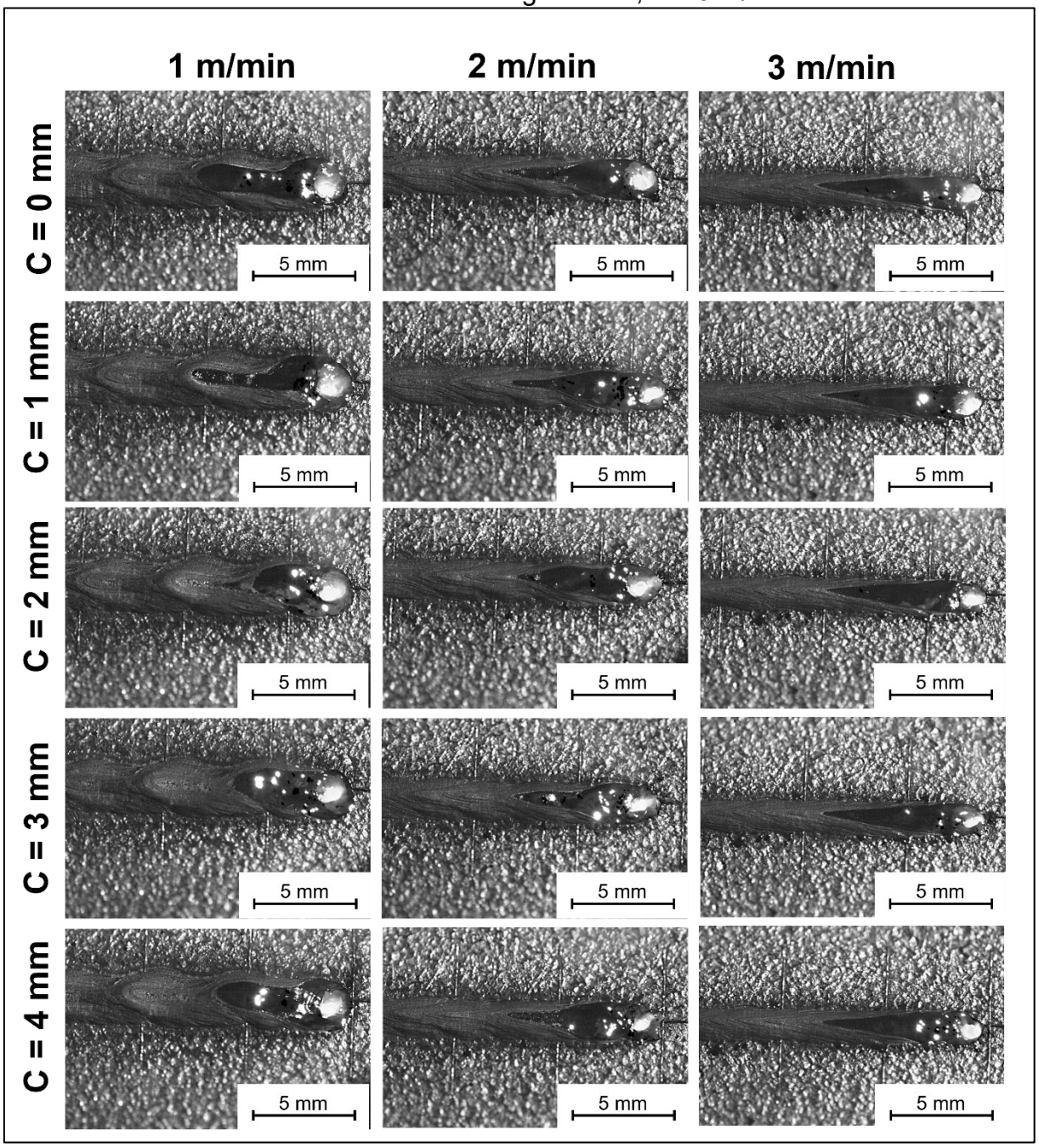
Fonte: Do autor (2026).

Figura 72 - Evolução temporal da poça de fusão com potência do laser de 2 kW para as velocidades de soldagem de 1, 2 e 3 m/min.



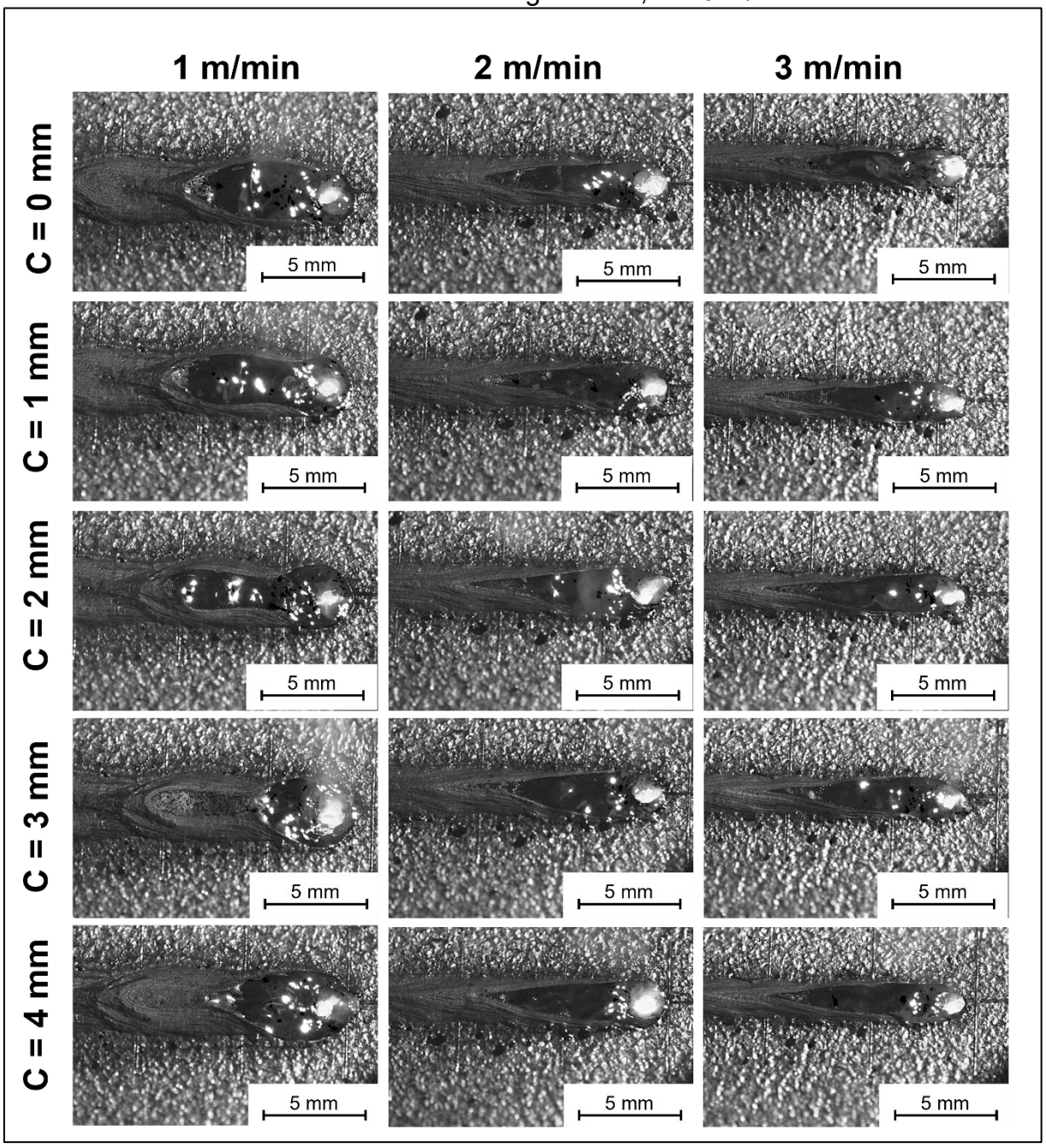
Fonte: Do autor (2026).

Figura 73 - Evolução temporal da poça de fusão com potência do laser de 3 kW para as velocidades de soldagem de 1, 2 e 3 m/min.



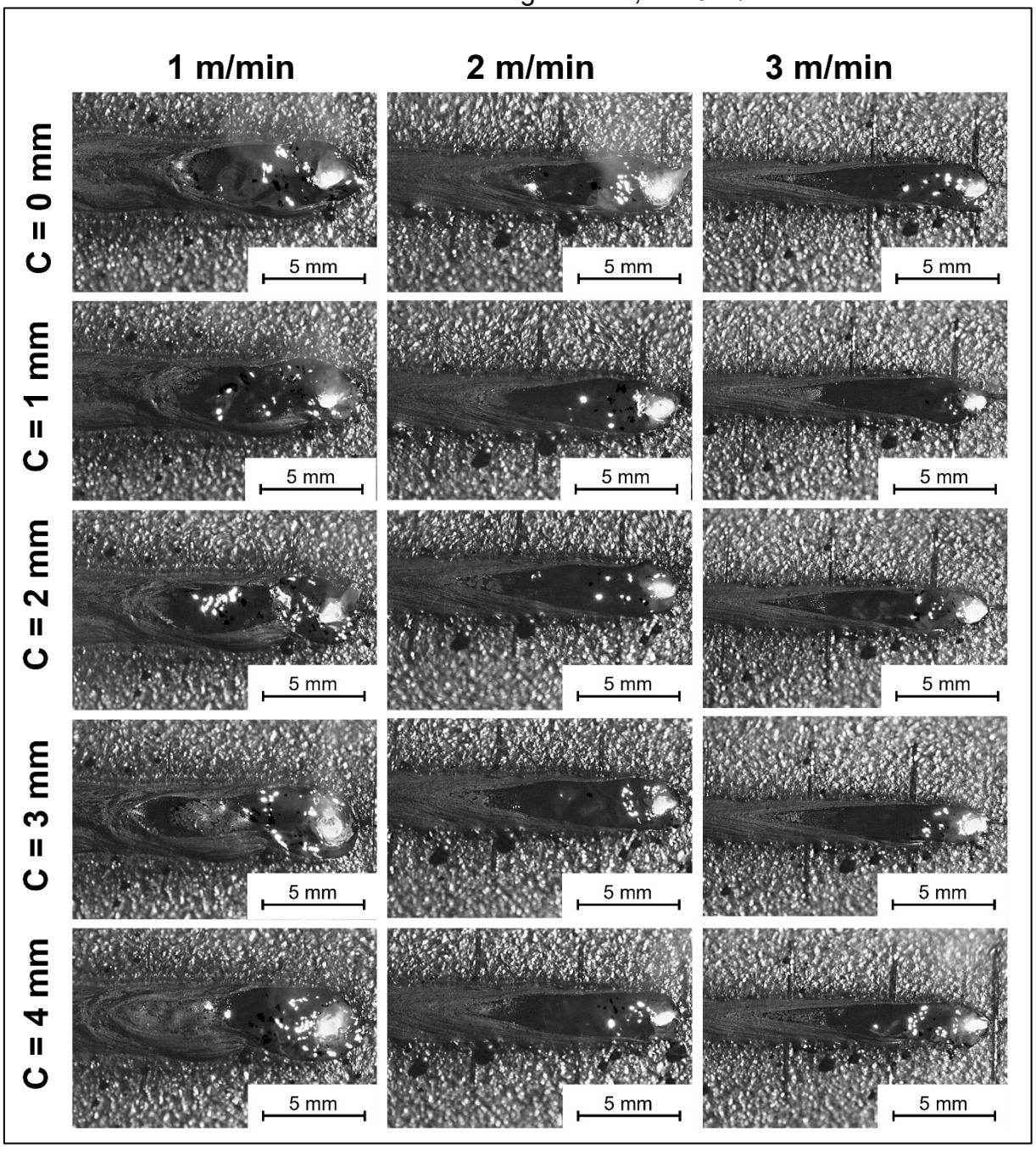
Fonte: Do autor (2026).

Figura 74 - Evolução temporal da poça de fusão com potência do laser de 4 kW para as velocidades de soldagem de 1, 2 e 3 m/min.



Fonte: Do autor (2026).

Figura 75 - Evolução temporal da poça de fusão com potência do laser de 5 kW para as velocidades de soldagem de 1, 2 e 3 m/min.



Fonte: Do autor (2026).

Uma análise comparativa das Figuras 71 a 75, que detalham a evolução da poça por distância percorrida, revela os diferentes regimes físicos do processo. Primeiramente, a Figura 71 (1 kW) apresenta um comportamento notavelmente estável: a poça de fusão é visivelmente calma, não turbulenta, e sua morfologia permanece constante em todas as três velocidades de soldagem. A transição é evidente na Figura 72 (2 kW), onde o processo entra em um regime de *keyhole*

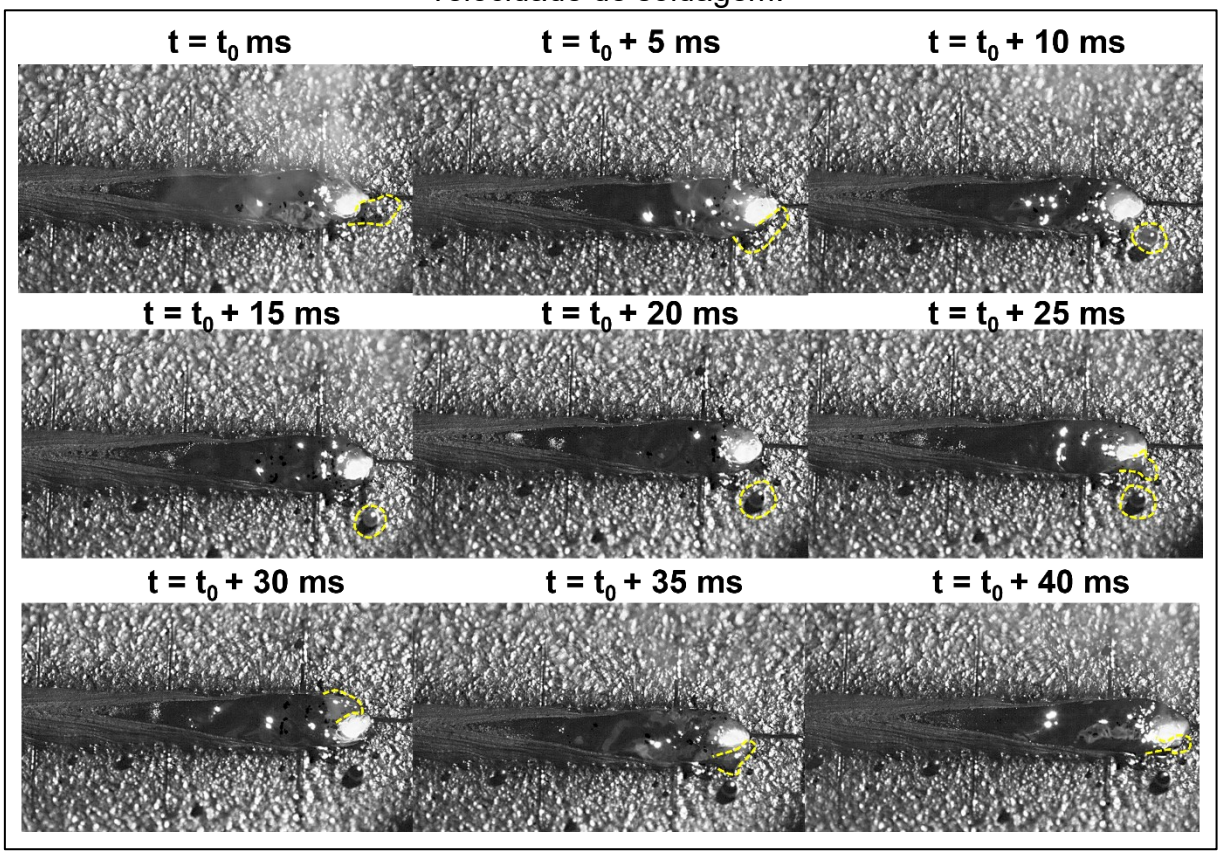
plenamente estabelecido, e a poça começa a exibir uma turbulência sutil e o formato característico de lágrima.

O fenômeno mais notável, no entanto, é a divergência de estabilidade com a velocidade de soldagem, observada a partir de 3 kW (Figuras 73 a 75). Enquanto as poças de fusão de 2 e 3 m/min mantêm uma forma e área relativamente uniformes (consistente com o esperado aumento CPF e redução da LPF em maiores velocidades de soldagem), a condição de 1 m/min exibe uma instabilidade. Conforme observado, a poça de fusão nesta condição sofre uma oscilação periódica: ela apresenta uma constrição do CPF. Esta é a prova visual direta da instabilidade que será quantificada na sequência deste trabalho.

Por fim, à medida que a potência aumenta (Figuras 74 e 75), essa tendência se intensifica. A Figura 73 (5 kW), em particular, mostra um aumento expressivo de respingos depositados ao lado do cordão de solda nas velocidades mais altas (2 e 3 m/min). Este é o resultado visível da ejeção violenta de material da poça de fusão.

A análise temporal da dinâmica da poça de fusão nas regiões de maior potência do laser (≥ 2 kW) revelou a formação de um fenômeno de ejeção de material fundido característico, conhecido na literatura como *melt crown* (coroa de material fundido). Fotovvati *et al.* (2018) descrevem que quando a pressão de vaporização excede a tensão superficial e a pressão hidrostática na poça de fusão, cria-se um fluxo de material fundido em alta velocidade que forma uma estrutura tipo coroa ao redor da abertura do *keyhole* na superfície da poça de fusão. A Figura 76 apresenta esse fenômeno utilizando 5 kW de potência do laser e 3 m/min de velocidade de soldagem.

Figura 76 - Análise temporal da dinâmica da poça de fusão e dos fenômenos de ejeção de metal na soldagem a laser com 5 kW de potência do laser e 3 m/min de velocidade de soldagem.



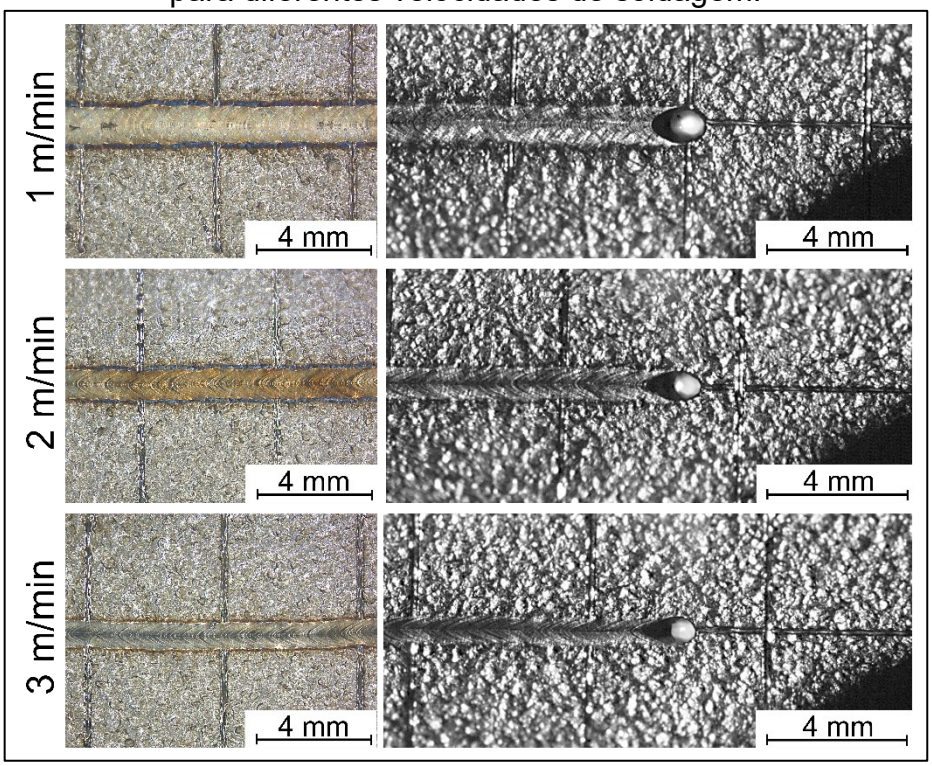
Fonte: Do autor (2026).

No presente estudo, observou-se que o destino do material ejetado é fortemente dependente da velocidade de soldagem. A 1 m/min, o material ejetado é recapturado pela poça de fusão, sendo puxado de volta para o interior da poça líquida devido ao tempo de vida prolongado da poça e às intensas correntes de convecção termocapilares que dominam em condições de baixa velocidade de soldagem e alta densidade de energia. Em contraste, a 2 e 3 m/min, o material ejetado solidifica na forma de respingos sobre o substrato sólido adjacente à solda, não sendo recapturado pela poça de fusão devido ao tempo de vida reduzido da poça e à maior velocidade de soldagem. A frequência de ejeção aumenta notavelmente com a velocidade de soldagem, sendo mais pronunciada a 3 m/min, indicando maior instabilidade do *keyhole* e eventos de colapso mais frequentes. Esta transição no comportamento de ejeção, de recaptura a 1 m/min para formação de respingos a 2 e 3 m/min, constitui uma evidência adicional da mudança de regime de instabilidade do *keyhole* com o

aumento da velocidade de soldagem, correlacionando-se diretamente com a transição morfológica observada na porosidade quando utilizado argônio como gás de proteção.

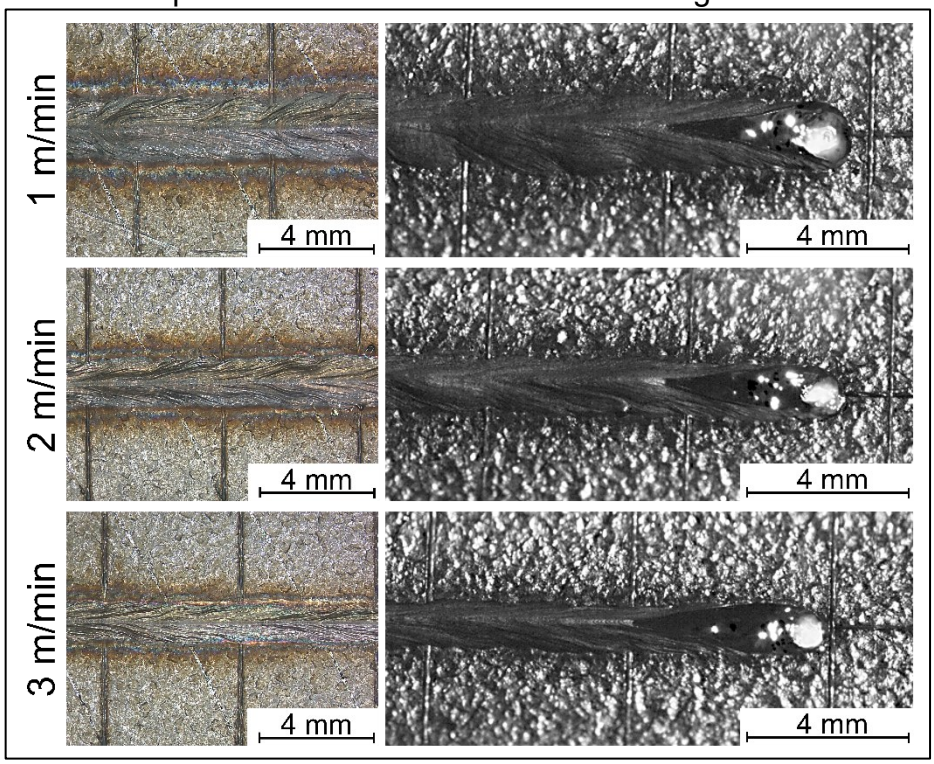
Para aprofundar a correlação direta entre o processo dinâmico e o cordão de solda solidificado, a sequência de figuras a seguir (Figura 77 a Figura 81) apresentam uma comparação lado a lado entre a morfologia superficial do cordão de solda e um frame correspondente da poça de fusão para cada nível de potência do laser investigado.

Figura 77 – Comparativo da vista superior e da poça de fusão na região de 1 kW para diferentes velocidades de soldagem.



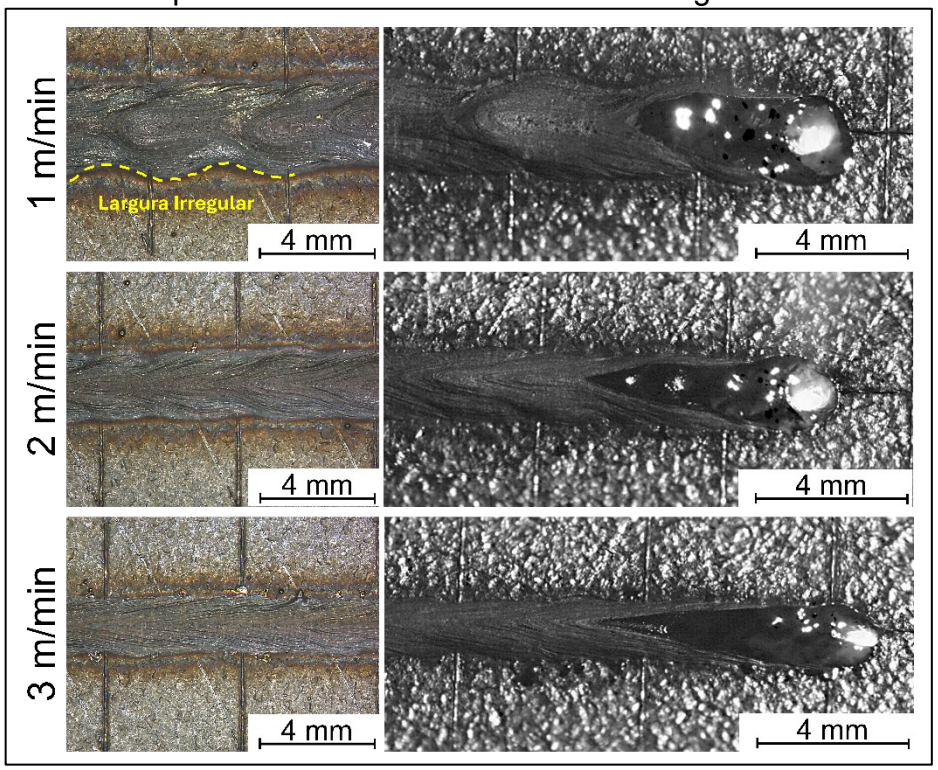
Fonte: Do autor (2026).

Figura 78 - Comparativo da vista superior e da poça de fusão na região de 2 kW para diferentes velocidades de soldagem.



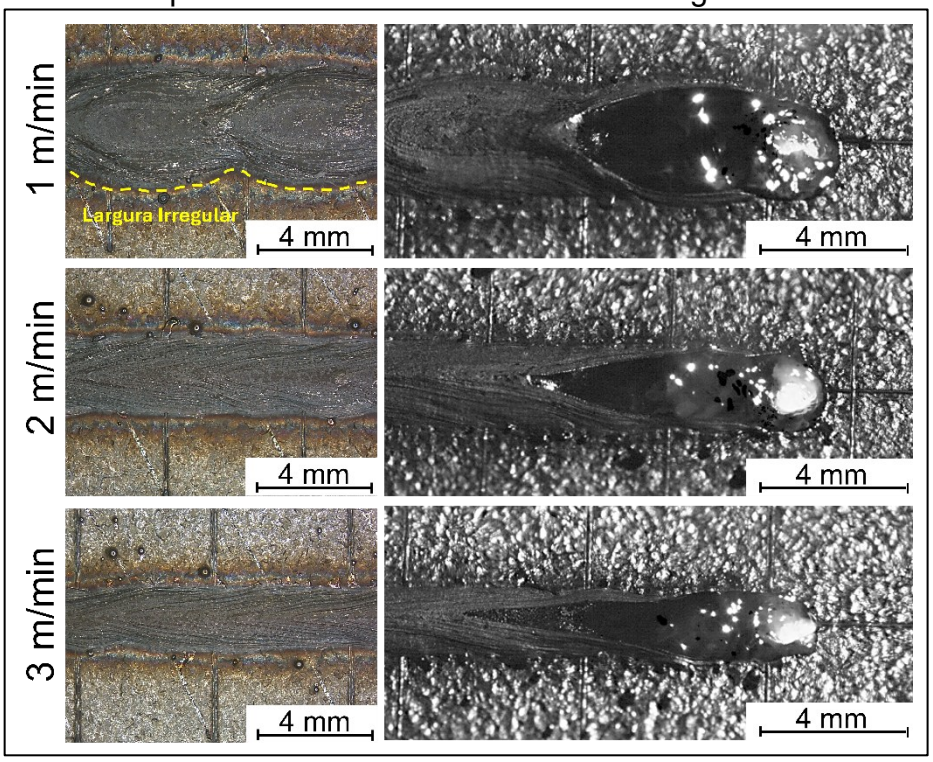
Fonte: Do autor (2026).

Figura 79 - Comparativo da vista superior e da poça de fusão na região de 3 kW para diferentes velocidades de soldagem.



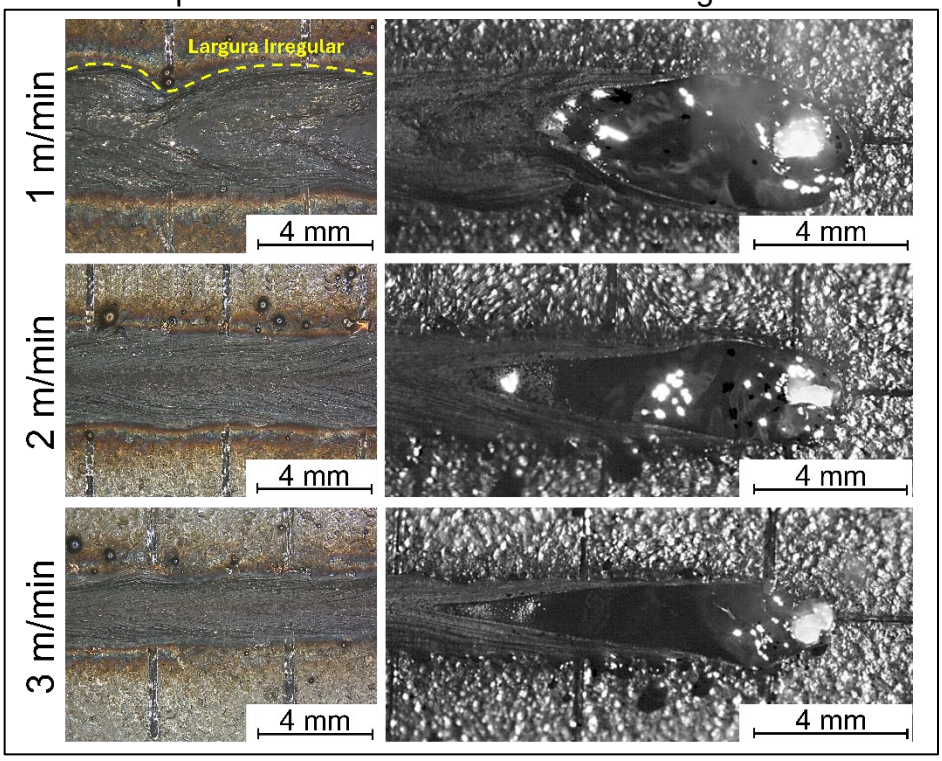
Fonte: Do autor (2026).

Figura 80 - Comparativo da vista superior e da poça de fusão na região de 4 kW para diferentes velocidades de soldagem.



Fonte: Do autor (2026).

Figura 81 - Comparativo da vista superior e da poça de fusão na região de 5 kW para diferentes velocidades de soldagem.



Fonte: Do autor (2026).

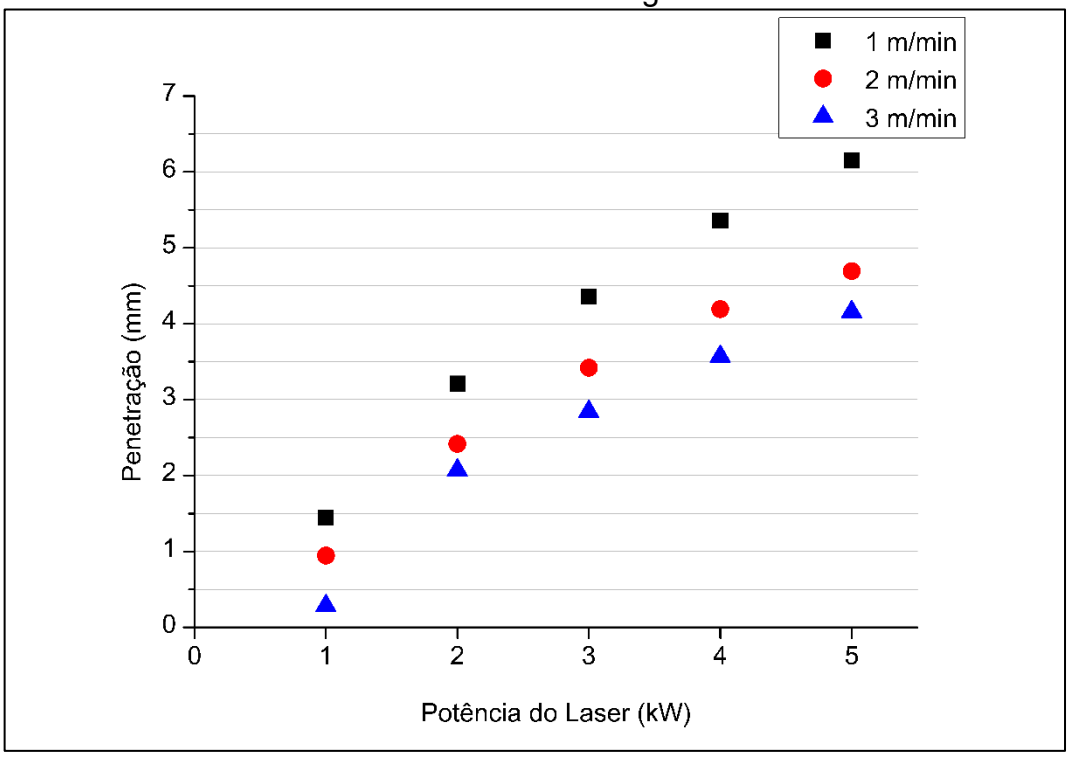
Uma observação mais detalhada revela um comportamento particular para a velocidade de soldagem de 1 m/min em potências do laser a partir de 3 kW. Nestas condições, a imagem de estereoscopia exibe uma ondulação lateral visível nas bordas do cordão de solda solidificado, resultando em uma largura irregular que se assemelha a escamas. A imagem correspondente da câmera de alta velocidade revela a origem deste fenômeno: a largura da poça de fusão não se mantém constante, mas apresenta flutuações periódicas. Esta correlação direta entre a instabilidade dimensional da poça e a irregularidade do cordão de solda final é a primeira evidência visual do fenômeno de oscilação que será quantificado em detalhe na sequência.

4.3.3 Análise Quantitativa da Dimensão do Cordão de Solda e Dinâmica da Poça de Fusão em Função dos Parâmetros de Soldagem

A partir da caracterização morfológica, a investigação prossegue com a quantificação detalhada das geometrias do cordão de solda e da poça de fusão. Para isso, foram realizadas medições nas seções transversais e nos quadros dos vídeos de alta velocidade para cada um dos 15 regimes de soldagem.

A análise da geometria dos cordões de solda está compilada nos gráficos da Figura 82 a Figura 85. A Figura 82 correlaciona a potência do laser com a profundidade de penetração. Observa-se uma forte correlação positiva entre a potência do laser e a penetração para as três velocidades de soldagem. Para a velocidade de soldagem 1 m/min, por exemplo, a penetração aumenta de 1,44 mm (a 1 kW) para 6,15 mm (a 5 kW), um aumento de mais de quatro vezes. A influência da velocidade de soldagem também é nítida: para uma mesma potência do laser de 5 kW, a penetração foi de 6,15 mm a 1 m/min, reduzindo para 4,69 mm e 4,16 mm para as velocidades de soldagem de 2 e 3 m/min, respectivamente, comportamento consistente com a variação do aporte de energia.

Figura 82 - Profundidade de penetração em função da potência do laser e velocidade de soldagem.

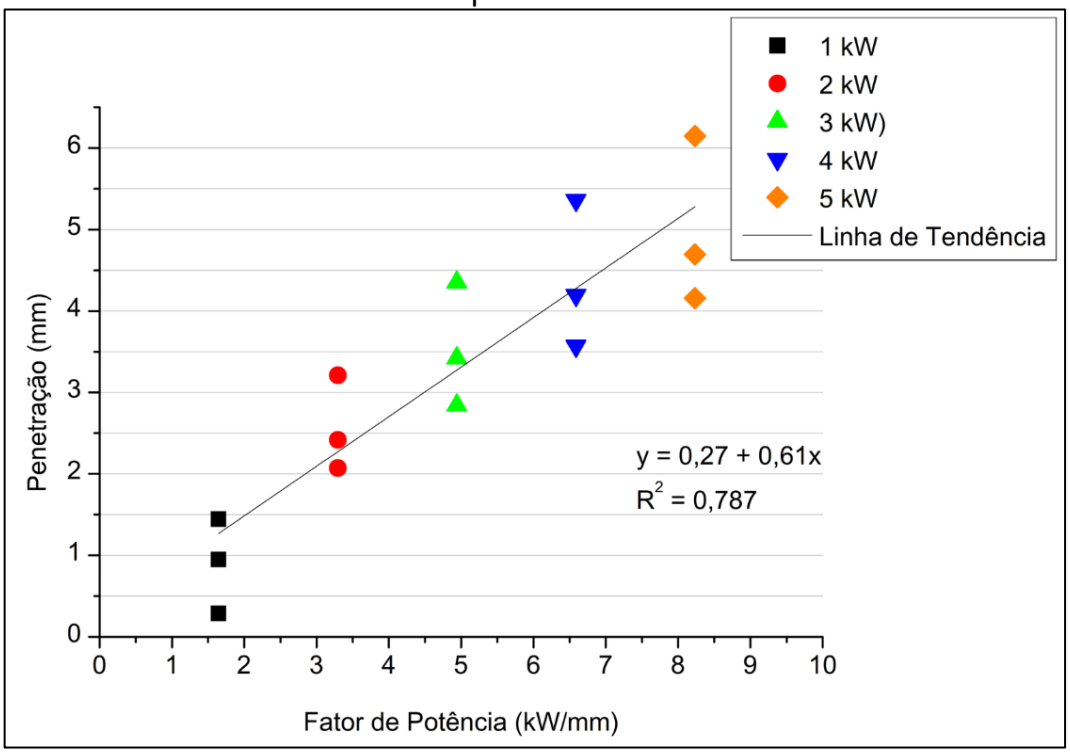


Fonte: Do autor (2026).

De forma ainda mais significativa, a forte correlação entre a potência do laser e a profundidade de penetração está alinhada com o conceito do fator de potência, que, segundo a literatura (Suder; Williams, 2012; 2014; Zou *et al*., 2015), é um critério mais eficaz para prever a profundidade de penetração.

Para testar a validade desses parâmetros com os dados experimentais obtidos, foram criados gráficos que correlacionam a geometria do cordão de solda com os parâmetros de interação. A profundidade de penetração foi plotada em função do fator de potência, como mostra a Figura 83. A análise do gráfico revela um resultado notável: os dados das três diferentes velocidades de soldagem, que antes formavam curvas separadas, agora convergem e se alinham ao longo de uma única tendência.

Figura 83 - Correlação unificada entre a profundidade de penetração e o fator de potência.

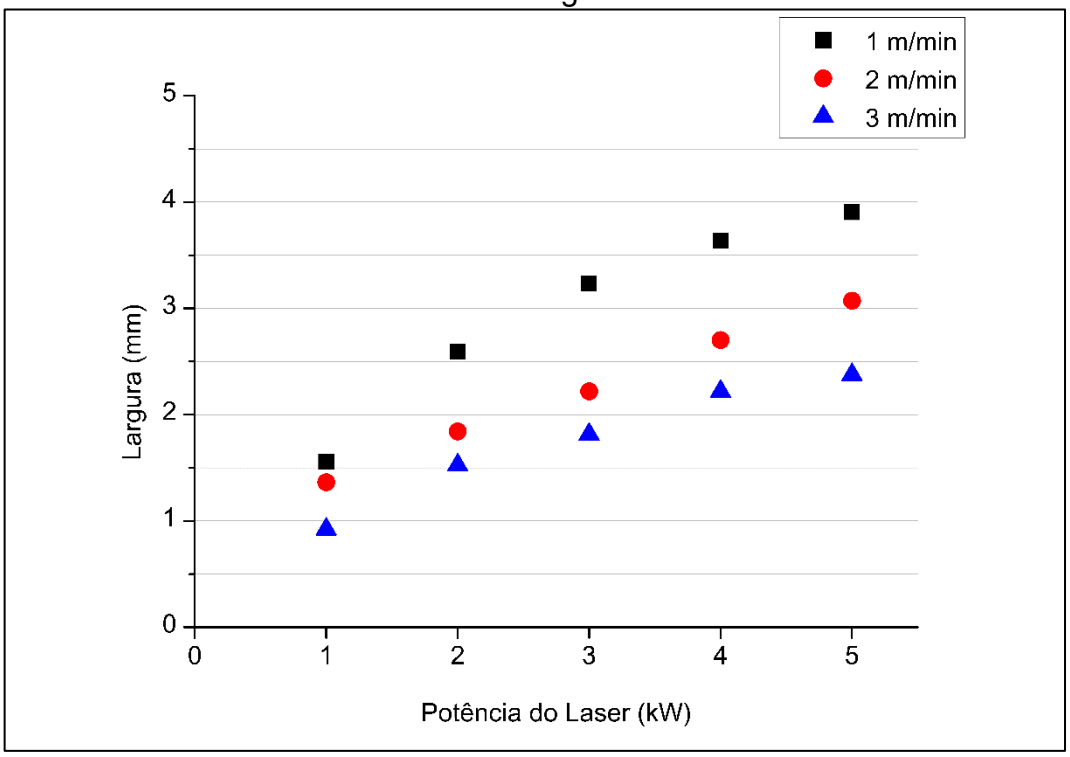


Fonte: Do autor (2026).

Para quantificar esta correlação, realizou-se um ajuste linear sobre todos os 15 pontos de dados. O modelo resultante (y = 0,27 + 0,61x) apresentou um coeficiente de determinação ajustado (R^2) de 0,787, indicando uma correlação moderada. Este resultado valida o fator de potência como um parâmetro unificador e mais fundamental para prever a penetração do que a potência do laser isoladamente. A dispersão residual dos pontos em torno da reta pode ser atribuída à leve não-linearidade intrínseca à transição entre os regimes de condução e *keyhole*, já que o modelo linear é uma aproximação para todo o processo.

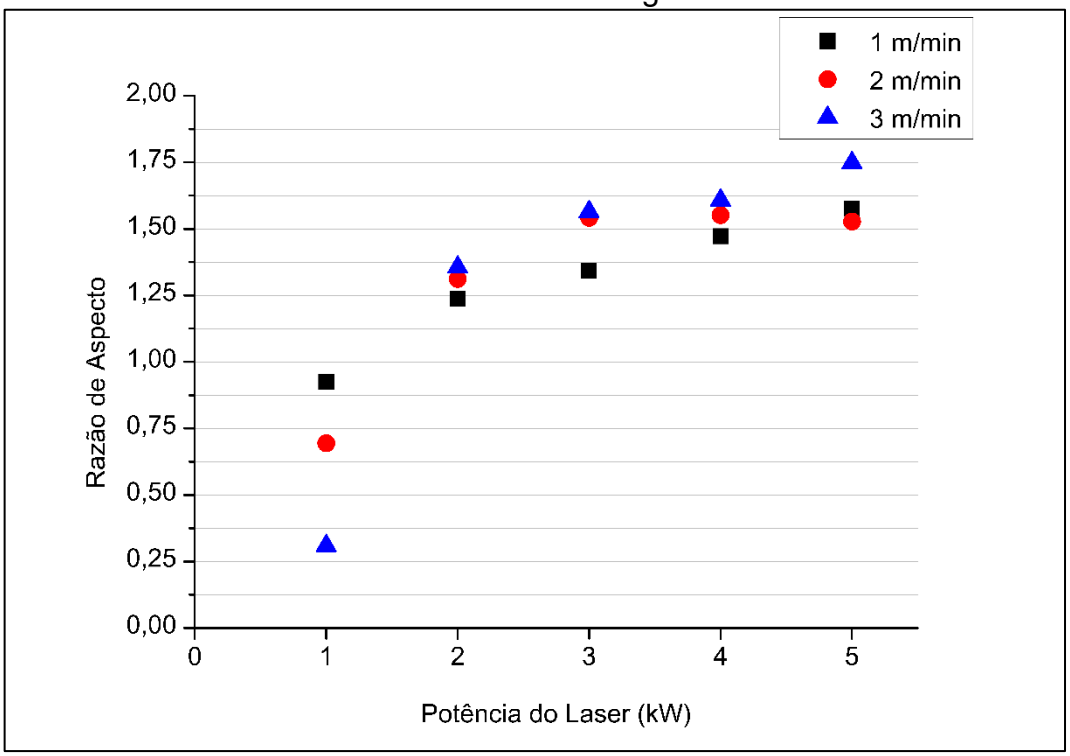
De maneira similar, a largura do cordão de solda, apresentada na Figura 84, também exibe uma correlação positiva com a potência do laser, crescendo de 1,56 mm para 3,90 mm na condição de 1 m/min ao se variar a potência do laser de 1 a 5 kW. A análise se torna ainda mais reveladora ao se observar a razão de aspecto (Profundidade/Largura), ilustrada na Figura 85. O gráfico mostra que o aumento da potência do laser eleva significativamente a razão de aspecto para todas as velocidades de soldagem. Na condição de 3 m/min, por exemplo, a razão de aspecto passou de um valor baixo de 0,31, indicando um cordão de solda mais largo que profundo, típico do modo condução, para 1,75 em 5 kW.

Figura 84 - Largura do cordão de solda em função da potência do laser e velocidade de soldagem.



Fonte: Do autor (2026).

Figura 85 - Razão de aspecto do cordão de solda em função da potência do laser e velocidade de soldagem.

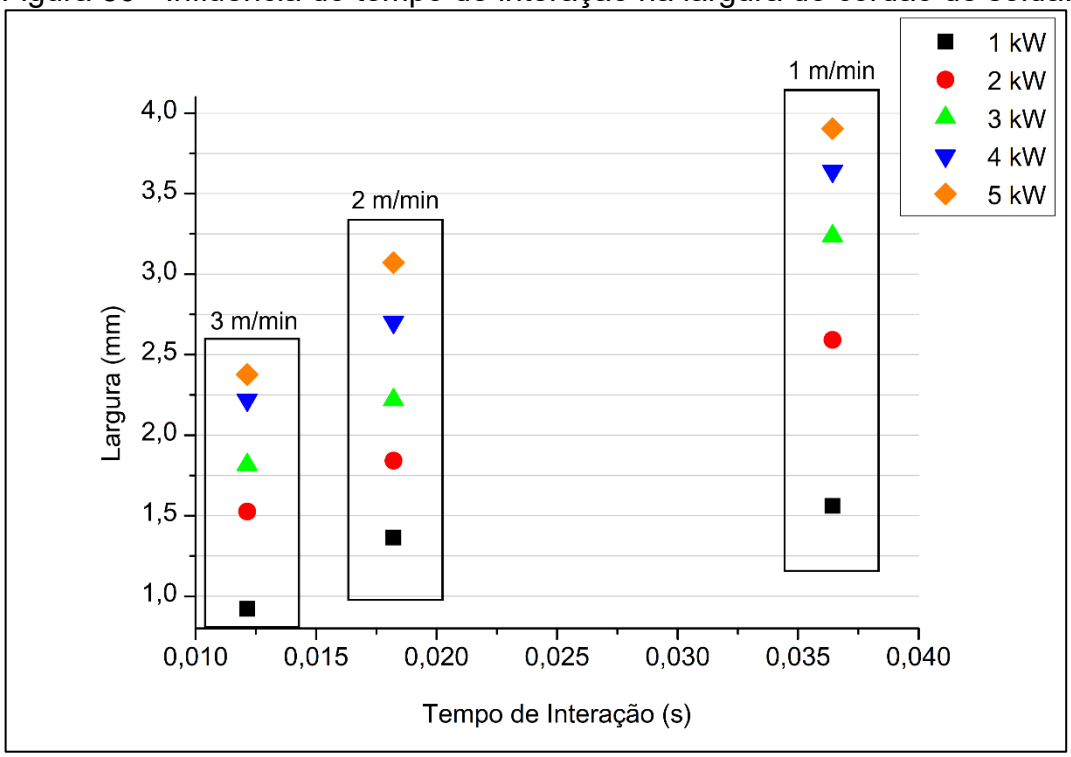


Fonte: Do autor (2026).

Esta evolução da razão de aspecto é uma evidência quantitativa de um processo de soldagem mais eficiente em altas potências do laser. Notavelmente, as maiores razões de aspecto foram obtidas nas velocidades de soldagem mais elevadas sob alta potência do laser, indicando que a energia adicional é utilizada de forma muito eficaz para aprofundar e estabilizar o *keyhole*, em vez de apenas alargar a poça de fusão por condução lateral de calor.

De forma complementar, a relação entre a largura do cordão de solda e o tempo de interação foi explorada na Figura 86. O gráfico mostra uma clara tendência positiva, onde tempos de interação maiores correspondem a velocidades de soldagem mais baixas, resultando em cordões consistentemente mais largos. Este resultado corrobora visualmente o princípio de que a largura é governada pela difusão de calor lateral, que é diretamente dependente do tempo de exposição do material ao feixe de laser.

Figura 86 - Influência do tempo de interação na largura do cordão de solda.

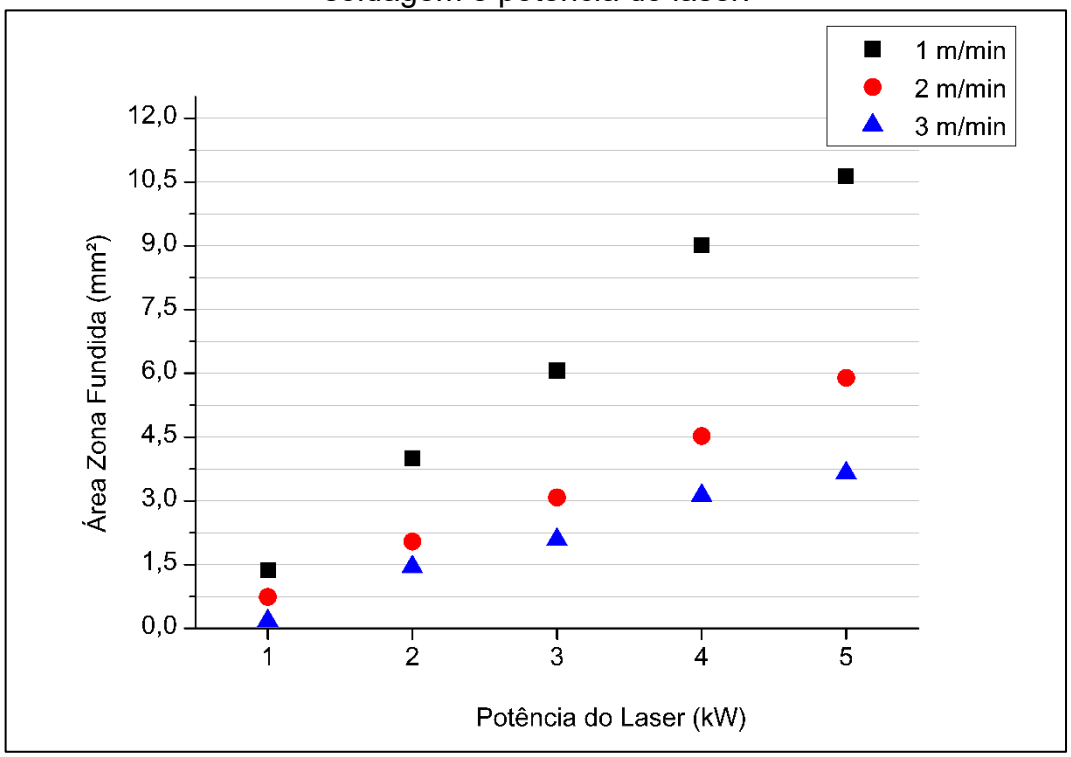


Fonte: Do autor (2026).

A área da seção transversal das 15 condições, apresentada na Figura 87, exibe um comportamento semelhante ao da penetração. A área fundida é maximizada em velocidades de soldagem mais baixas (1 m/min), um resultado direto do maior tempo de interação que permite uma condução de calor mais volumétrica. Contudo, é

notável que a proximidade entre os resultados de 2 e 3 m/min é muito maior do que a diferença observada entre 1 e 2 m/min. Esta análise dos resultados em velocidades de soldagem mais altas sugere que o processo se torna menos sensível à variação do tempo de interação, que já é muito curto, e passa a ser mais dominado pela densidade de potência.

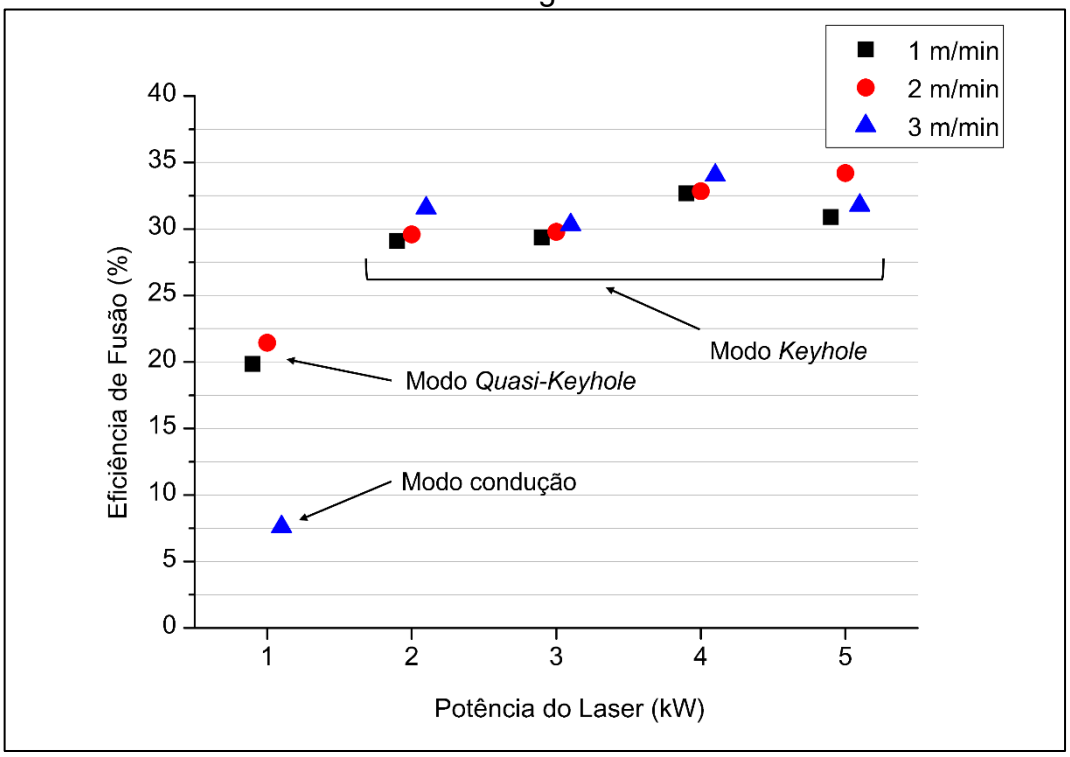
Figura 87 – Área da Seção transversal da zona fundida em função da velocidade de soldagem e potência do laser.



Fonte: Do autor (2026).

Para avaliar a performance energética do processo de fusão, a eficiência de fusão foi calculada para todas as 15 condições experimentais. Os resultados são apresentados na Figura 88, que apresenta a eficiência de fusão em função da potência do laser para cada velocidade de soldagem.

Figura 88 – Eficiência de Fusão em função da potência do laser e velocidade de soldagem.



Fonte: Do autor (2026).

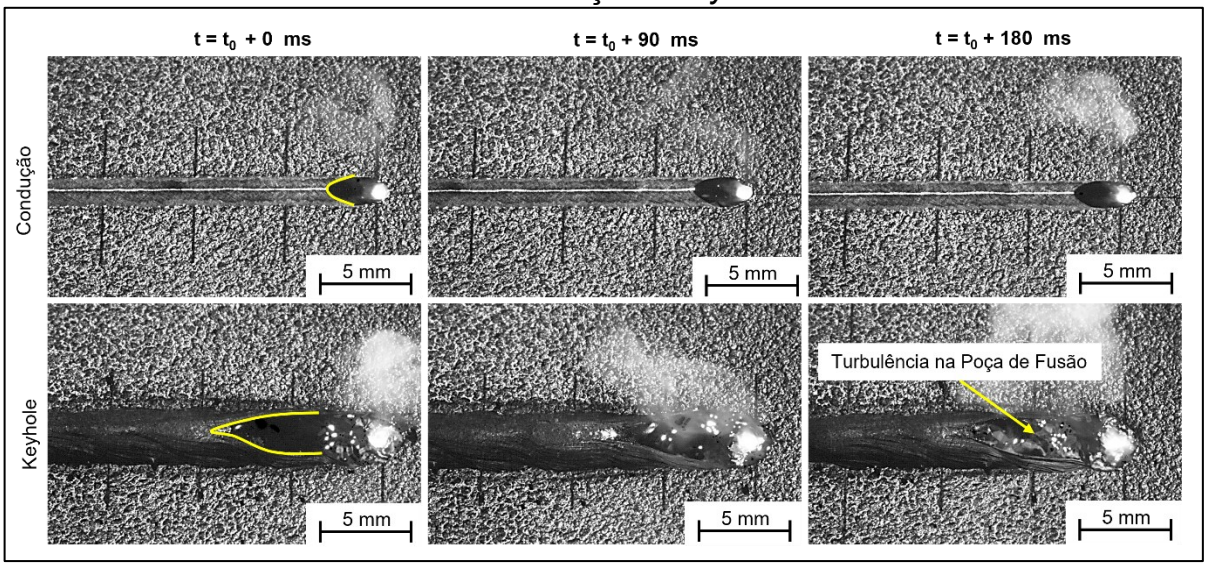
Embora os valores de área fundida tenham sido obtidos a partir de uma única seção transversal para cada condição, é importante destacar que a soldagem a laser em modo *keyhole* é um processo altamente dinâmico, no qual a pluma de plasma e o próprio *keyhole* apresentam oscilações em escalas de milissegundos (4,51). Assim, uma única macrografia deve ser interpretada apenas como uma representação estática e pontual do estado solidificado, o qual pode ter sido influenciado por flutuações transitórias da pluma e da cavidade de vapor.

Ainda assim, a combinação dos resultados de eficiência de fusão, razão de aspecto, morfologia e comportamento dinâmico da poça de fusão revela um aspecto particularmente relevante: a ocorrência de um regime intermediário, aqui proposto como modo quase-*keyhole* (*Quasi-Keyhole Mode*).

Ao analisar o patamar de potência de 1 kW, observa-se que, para a velocidade de soldagem de 3 m/min, a eficiência de fusão claramente está em modo condção, enquanto as velocidades menores (1 e 2 m/min) apresentaram eficiências próximas de 20%, compatíveis com o modo *keyhole*. Essa interpretação é reforçada pela razão de aspecto próxima a 1, comumente associada ao *keyhole* (≥1). No entanto, a morfologia e a estabilidade da poça observadas (Figura 89) indicam o oposto: uma

evolução gradual e estável da poça de fusão ao longo do patamar de potência do laser, preservando características típicas do modo condução, mesmo com velocidades de soldagem de 1 e 2 m/min e 1 kW de potência do laser.

Figura 89 – Comparação morfológica e comportamental da poça de fusão para condição de 1 m/min de velocidade de soldagem e 1 kW de potência do laser para modo condução e *keyhole*.



Fonte: Do autor (2026).

Essa região, portanto, apresenta simultaneamente evidências contraditórias de ambos os modos, condução e *keyhole*. Apesar disso, a hipótese de operar no modo transição não se sustenta, uma vez que não foram observadas flutuações significativas de penetração (como ilustrado nas seções longitudinais), e a poça manteve uniformidade durante todo o período de soldagem. Além disso, não foram identificadas características morfológicas típicas do *keyhole*, como o alongamento em “lágrima” ou a presença de turbulência acentuada.

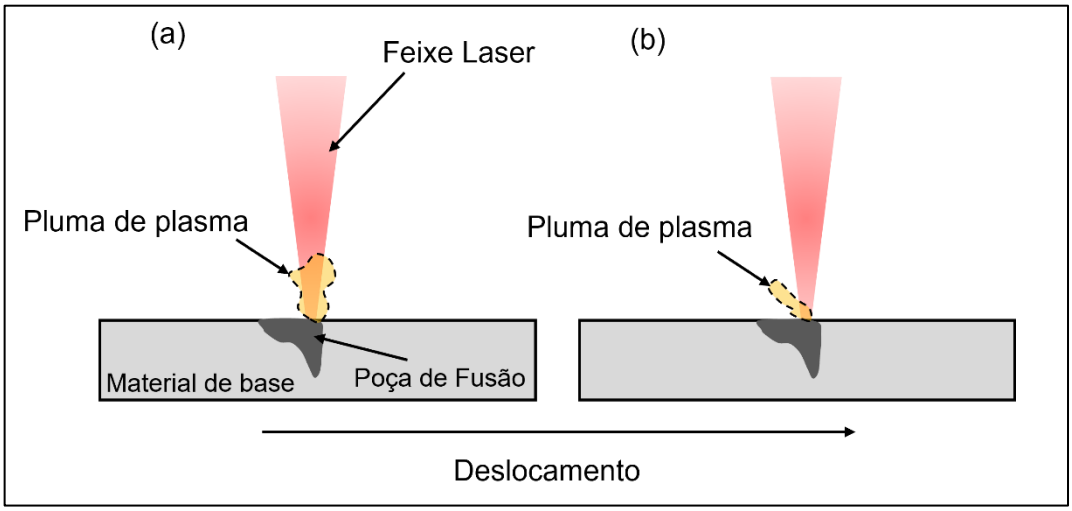
Dessa forma, o comportamento observado pode ser interpretado como um estado térmico intermediário, no qual a energia incidente é suficiente para iniciar a formação parcial de um *keyhole*, mas insuficiente para gerar turbulência na poça de fusão. Propõe-se, portanto, o termo modo *Quasi-Keyhole* para designar este regime híbrido, caracterizado pela coexistência de aspectos térmicos e morfológicos dos modos de condução e *keyhole*.

De modo geral, a análise dos resultados indica três regimes físicos distintos. Primeiro, o regime de condução (3/min) e *Quasi-Keyhole* (1 e 2 m/min) com patamar de potência do laser de 1 kW, onde a eficiência observada é menor, caindo para

apenas 7,6% em 3 m/min. Em segundo lugar, o regime de *bremsstrahlung* inversa (1 m/min) é observado na curva de 1 m/min: a eficiência atinge um pico de 32,7% em 4 kW e decai para 30,9% ao se aumentar a potência para 5 kW. Este decaimento sugere uma presença mais acentuada da pluma de plasma, onde a baixa velocidade de soldagem não consegue remover a pluma de vapor metálico que, sob a alta intensidade de 5 kW, ioniza-se e forma um plasma denso acima da superfície do material, o qual absorve e bloqueia uma pequena porcentagem de energia do laser, reduzindo a eficiência do processo. Finalmente, o regime de transição e instabilidade da pluma (2-3 m/min) mostra que as velocidades mais altas (2 e 3 m/min) apresentam os pontos de máxima eficiência (34,2% e 34,0%), sugerindo um regime de *keyhole* estável. Nestas condições, a velocidade elevada ajuda a mitigar a pluma de plasma, limitando a zona de interação e permitindo que o feixe de alta potência atinja a superfície do material.

Contudo, a curva de 3 m/min não é uniforme: ela flutua de 31,6% (2 kW), para 30,3% (3 kW), sobe para 34,0% (4 kW) e decai para 31,8% (5 kW). Essas flutuações, devido à medição em um único corte, podem indicar que o processo está operando próximo a um limiar de instabilidade. A alta velocidade (3 m/min) torna o processo mais sensível a oscilações momentâneas da pluma de plasma, onde em um dado momento, a pluma está mais densa sobre a área de incidência do laser no material. Em contraste, os valores maiores representam um instante em que a oscilação da pluma de plasma se deslocou para fora da incidência, conforme ilustra a Figura 90.

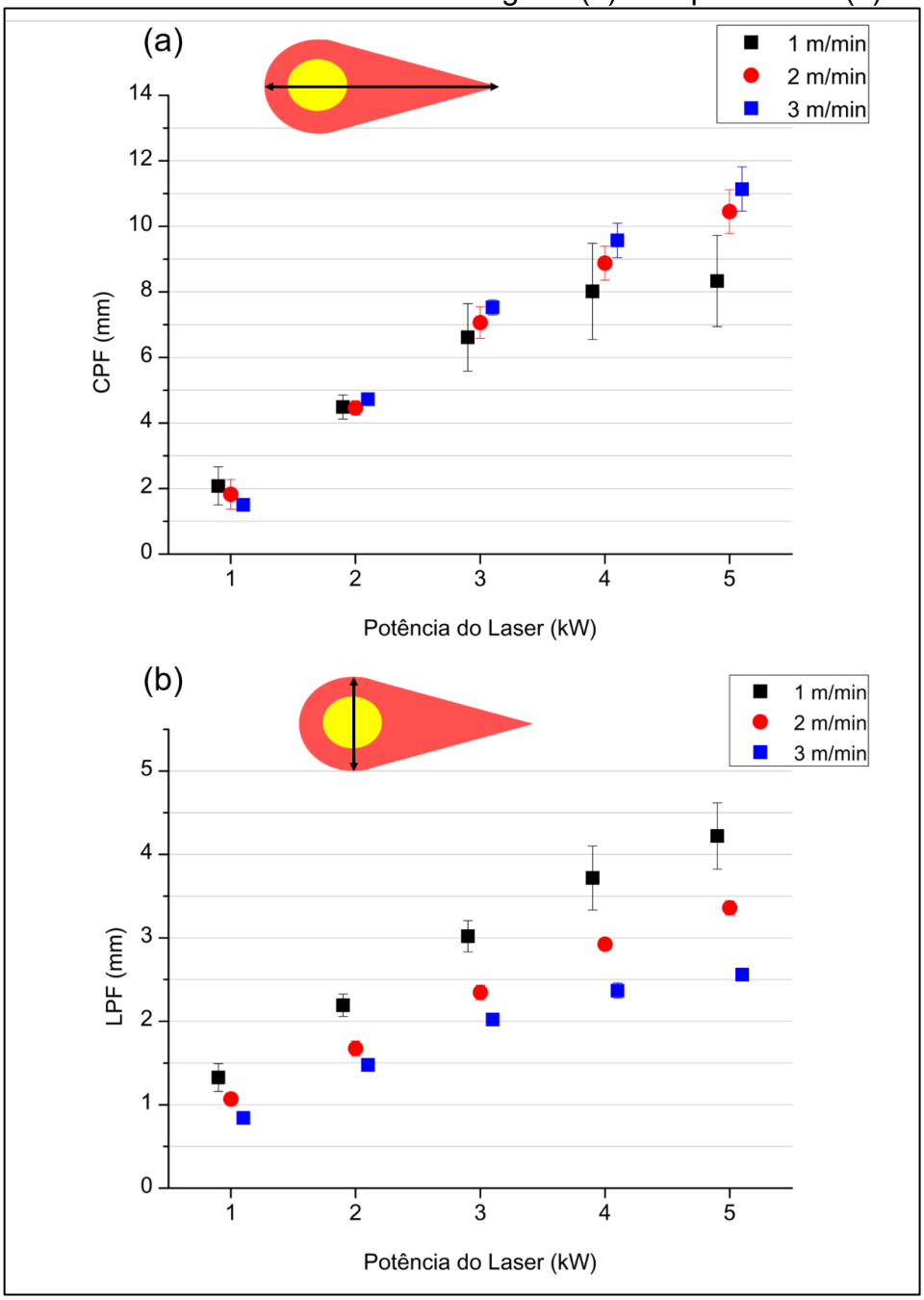
Figura 90 - Ilustração do mecanismo de instabilidade da pluma de plasma e sua interferência momentânea com o feixe de laser. (a) Instante de bloqueio e (b) Instante fora da zona de incidência.



Fonte: Do autor (2026).

A partir desta base visual detalhada, a análise prossegue com a quantificação das dimensões da poça de fusão para estabelecer as correlações numéricas com os parâmetros de processo. A Figura 91 exibe os valores médios do CPF e da LPF, respectivamente, com suas barras de erro representando o desvio padrão das medições.

Figura 91 - Variação da largura e do comprimento da poça de fusão em função da potência do laser e da velocidade de soldagem. (a) Comprimento e (b) Largura.



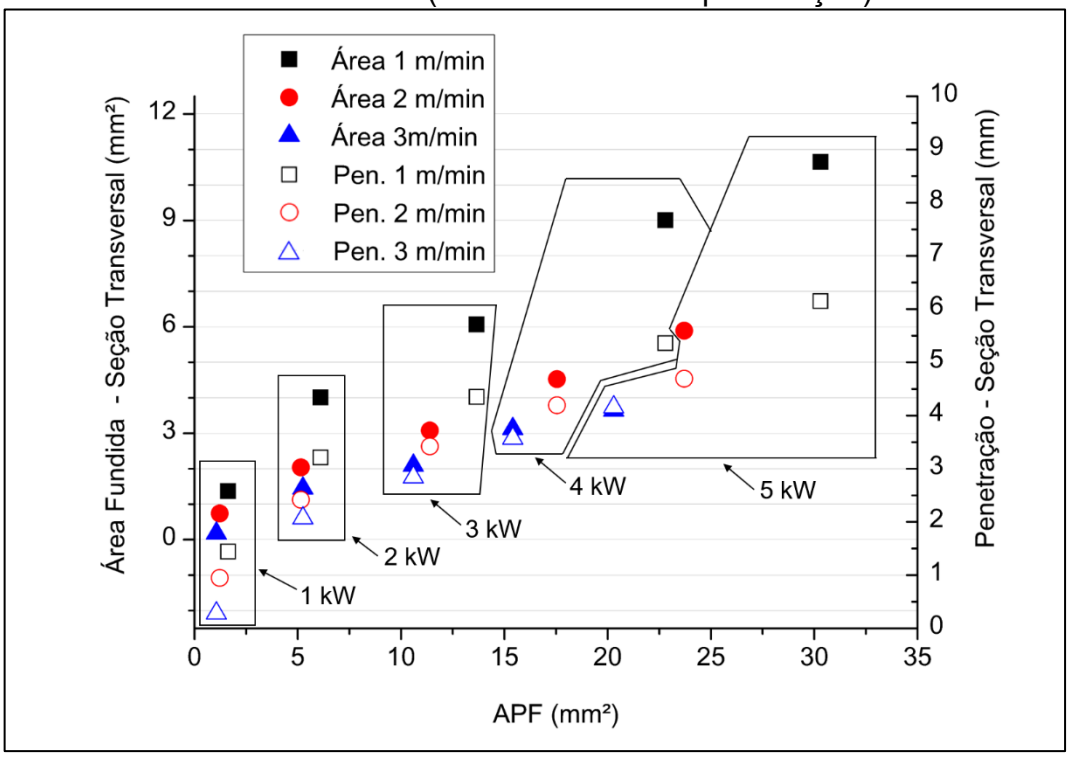
Fonte: Do autor (2026).

Observa-se, para as três velocidades de soldagem, uma forte correlação positiva entre o CPF e a potência do laser. A influência da velocidade de soldagem, no entanto, revela um comportamento complexo: em baixa potência do laser (1 kW), velocidades maiores resultam em uma poça mais curta (de 2,08 mm a 1 m/min para 1,48 mm a 3 m/min). Contudo, em alta potência do laser (a partir de 3 kW), essa tendência se inverte, e velocidades de soldagem maiores produzem uma poça significativamente mais longa. Em 5 kW, por exemplo, o CPF atinge 11,14 mm a 3 m/min, em comparação com 8,33 mm na mesma potência do laser a 1 m/min. Esta inversão sugere uma mudança na dinâmica do *keyhole*, que se torna mais estável e alongado em regimes de alta velocidade de soldagem e alta potência do laser.

A análise da LPF, mostra um comportamento mais direto e previsível. Assim como o CPF, a LPF aumenta consistentemente com a potência do laser para todas as velocidades de soldagem. Diferente do comprimento, no entanto, a velocidade de soldagem exerce um efeito uniforme sobre a largura: para qualquer nível de potência do laser, o aumento da velocidade de soldagem resulta em uma poça mais estreita. Em 5 kW, a largura diminui de 4,22 mm (a 1 m/min) para 2,56 mm (a 3 m/min). Este resultado é consistente com a redução do tempo de interação, que limita a difusão lateral de calor, e confirma que a largura final do cordão de solda é um reflexo direto da largura da poça durante o processo. A baixa magnitude dos desvios padrão em ambas as análises reforça a estabilidade do processo na condição otimizada.

Para estabelecer a ligação entre o processo dinâmico e o resultado estático, a poça de fusão foi quantificada pela sua área instantânea medida durante o processo, definida neste trabalho como APF. Esse parâmetro representa a quantidade de material fundido ao longo do cordão de solda sob condições transientes e integra diretamente os efeitos de potência do laser, velocidade de soldagem e acoplamento térmico. A Figura 92, portanto, investiga como essa métrica dinâmica se correlaciona com a geometria final da solda, representada pela área fundida e pela penetração, ambas obtidas a partir da seção transversal.

Figura 92 - Efeito da velocidade de soldagem na relação entre APF e as dimensões da zona fundida (área transversal e penetração).



Fonte: Do autor (2026).

Os resultados demonstram a dependência da proporção entre a área da zona fundida e a profundidade de penetração em relação às diferentes velocidades de soldagem. Em 1 m/min (para 5 kW), observa-se a maior combinação entre penetração (6,15 mm) e área fundida (10,65 mm²), coerente com os elevados valores de APF obtidos nessas condições. À medida que a velocidade de soldagem aumenta para 3 m/min (mantendo os 5 kW), essa relação se torna ainda mais distinta. Uma análise quantitativa desta mudança demonstra que: enquanto a penetração diminuiu 32% (de 6,15 para 4,16 mm), a área fundida teve uma redução de 66% (de 10,65 para 3,65 mm²). Isso comprova que a redução da área fundida é, de fato, proporcionalmente mais intensa. Como resultado, observa-se que, nesta condição de 3 m/min e 5 kW, os valores numéricos de área da zona fundida (3,65 mm²) e penetração (4,16 mm) se invertem. Esta mudança é a evidência quantitativa da morfologia tipo "prego" (estreita e profunda), onde a condução lateral foi suprimida em favor da penetração vertical.

Esse comportamento reforça e evidencia um fenômeno: com o aumento da velocidade de soldagem, ocorre uma redução da expansão lateral da poça de fusão e, consequentemente, da região fundida na seção transversal. O menor tempo de interação do feixe limita a dissipação térmica radial, favorecendo a direção vertical do

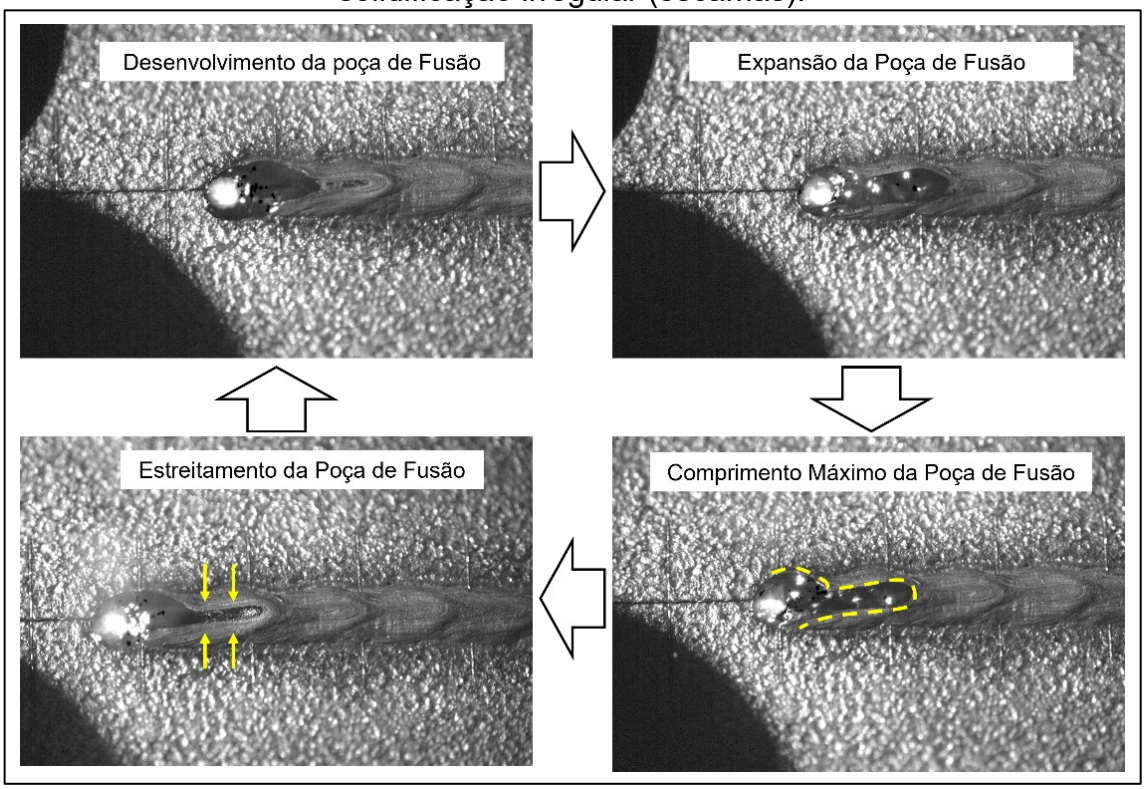
fluxo de calor e resultando em morfologias mais estreitas. Em contrapartida, em 1 m/min, a maior energia de soldagem promove uma poça de fusão mais ampla, com maior área fundida e expansão lateral significativa.

Assim, para uma potência do laser constante, o incremento da velocidade de soldagem induz simultaneamente uma diminuição da largura da poça de fusão e do cordão de solda, uma queda da penetração de menor intensidade relativa, uma redução mais acentuada da área fundida e, adicionalmente, valores menores de APF. Dessa forma, a APF se mostra uma métrica dinâmica eficaz que reflete o curto tempo de interação, conectando diretamente o comportamento da poça de fusão ao resultado metalográfico estático.

Apesar desta correlação geométrica geral, uma análise mais aprofundada dos dados de estabilidade revelou uma exceção importante nos dados de CPF e LPF para a velocidade de soldagem de 1 m/min. Nesta condição, o desvio padrão do CPF aumentou consideravelmente em altas potências do laser, atingindo valores de 1,03 mm, 1,47 mm e 1,39 mm para 3, 4 e 5 kW, respectivamente, valores de duas a três vezes superiores aos observados nos demais ensaios. Essa maior variabilidade dimensional sugeriu a presença de um fenômeno dinâmico subjacente que não era capturado apenas pela análise do tamanho médio da poça.

A investigação desta variabilidade por meio dos vídeos de alta velocidade revelou sua causa: uma oscilação periódica da poça de fusão. Para o cordão de solda realizado a 1 m/min, observou-se esta irregularidade, cuja frequência foi quantificada em diferentes patamares de potência do laser. A Figura 93 exibe uma sequência de quadros que ilustra um ciclo completo deste fenômeno na condição com velocidade de soldagem de 1 m/min e 3 kW de potência do laser.

Figura 93 – Sequência de frames com velocidade de soldagem de 1 m/min e 3 kW de potência do feixe laser apresentando a oscilação da poça de fusão e origem da solidificação irregular (escamas).



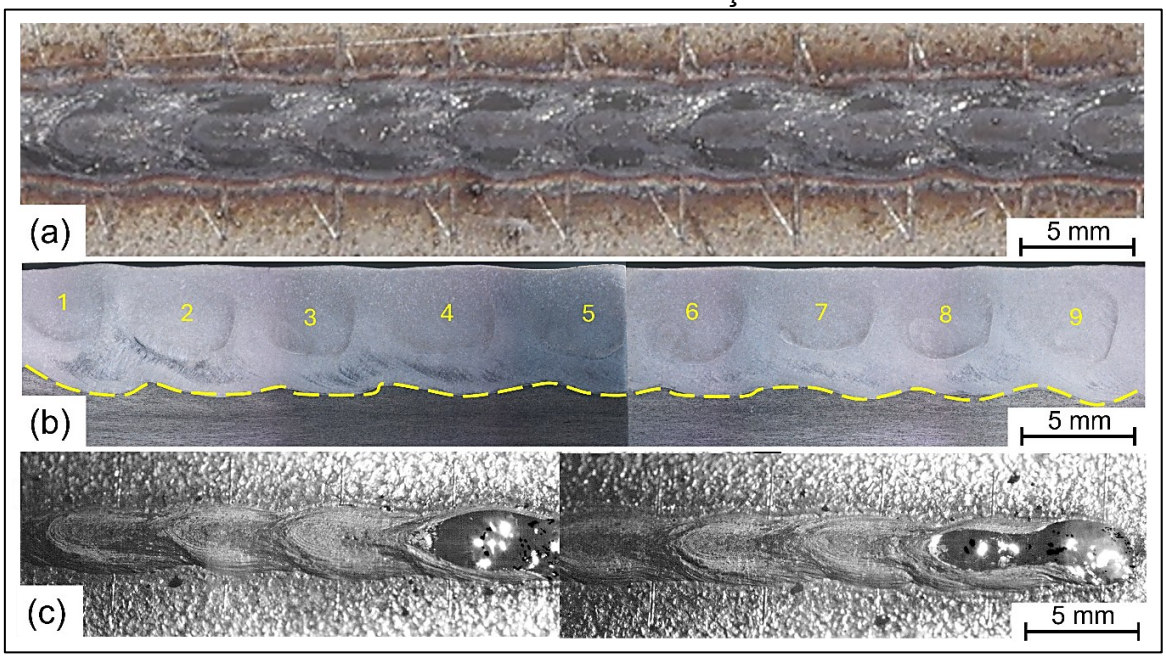
Fonte: Do autor (2026).

A frequência desta oscilação apresentou uma correlação inversa com a potência do laser, diminuindo de 4,33 Hz (a 3 kW) para 2,67 Hz (a 4 kW) e 2,0 Hz (a 5 kW). Este comportamento encontra forte respaldo na literatura. Lei *et al.*(Lei *et al*., 2018), em um estudo sobre a morfologia da poça de fusão, também reportaram que um maior aporte de energia resulta em uma redução na frequência de oscilação da poça de fusão. A explicação física para esta tendência de diminuição da frequência com o aumento da potência do laser está ligada à estabilidade do *keyhole*. Em potências do laser mais baixas (como 3 kW), o *keyhole* é mais instável e suscetível a colapsos e aberturas rápidas e frequentes. À medida que a potência do laser aumenta, a maior densidade de energia gera um volume maior de vapor metálico e, consequentemente, uma pressão de recuo mais intensa e constante. Essa pressão de recuo superior cria um *keyhole* mais robusto, volumoso e com maior inércia, que, embora ainda dinâmico, torna-se menos suscetível a oscilações de alta frequência, resultando na diminuição da frequência observada.

Adicionalmente, este fenômeno de oscilação é a causa direta do padrão de solidificação observado anteriormente na Seção 4.2.2 (Figura 64). Para comprovar

esta correlação, a Figura 94 apresenta uma análise que alinha temporalmente os quadros do vídeo em alta velocidade com a seção de topo e macrografia final da seção longitudinal.

Figura 94 - Análise correlacionada do fenômeno de oscilação da poça de fusão e seu efeito na morfologia do cordão de solda solidificado: (a) Vista superior do cordão de solda; (b) Marcas de solidificação na seção longitudinal; (c) Sequência temporal de um ciclo de oscilação.



Fonte: Do autor (2026).

A análise da figura é conclusiva: a formação das marcas de solidificação com perfil semicircular coincide precisamente com o ciclo de estreitamento da poça de fusão. A explicação física para este fenômeno é que, durante a rápida contração da poça, a frente de solidificação na cauda do cordão de solda avança momentaneamente, aprisionando um pequeno volume de metal líquido. Este volume, agora isolado do fluxo convectivo principal da poça, solidifica-se com uma morfologia distinta, criando a interface curva visível na macrografia. Portanto, fica demonstrado que as irregularidades no cordão de solda final não são aleatórias, mas sim um registro permanente da instabilidade oscilatória da poça de fusão.

4.3.4 A Insuficiência da Energia de Soldagem como Parâmetro Preditivo

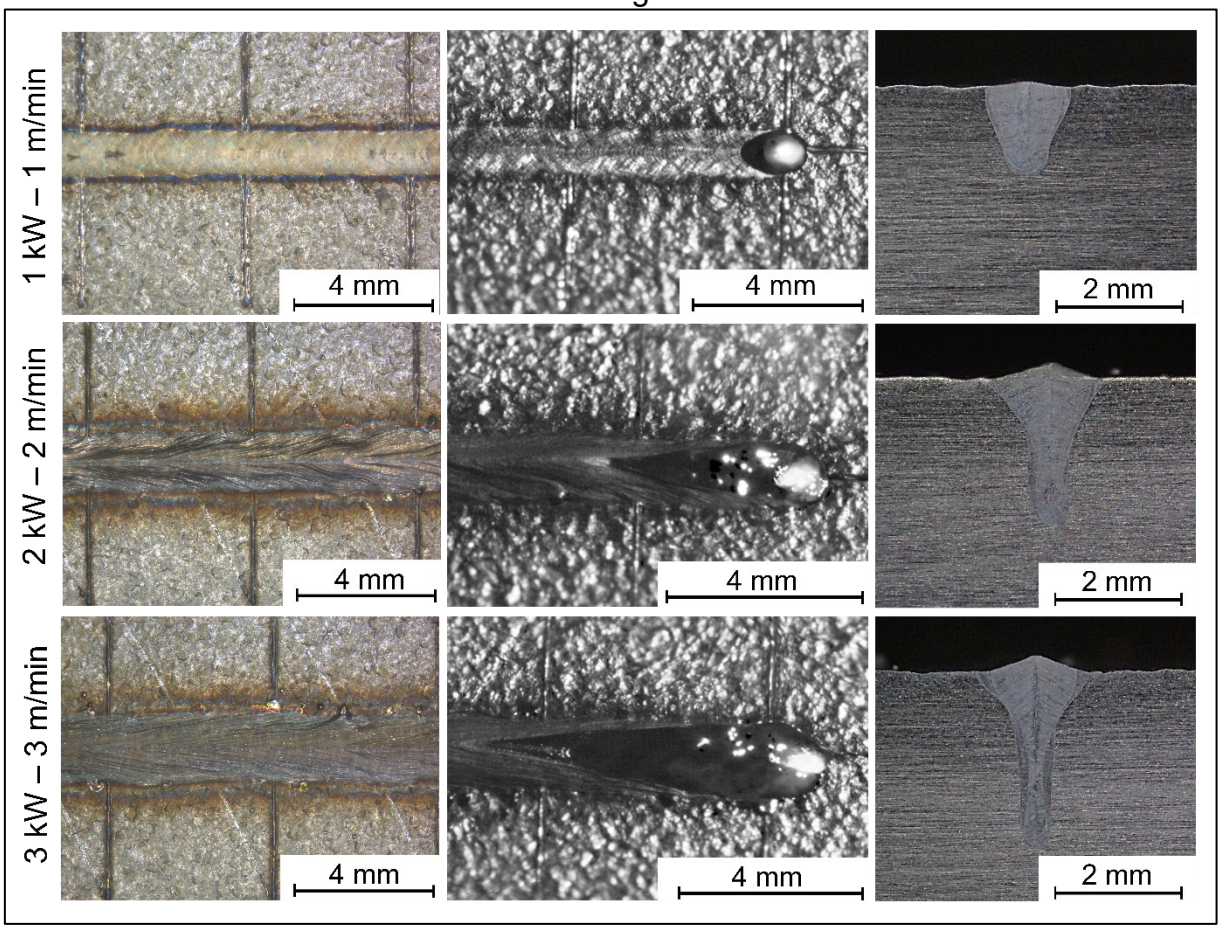
Uma prática comum na engenharia de soldagem é a utilização da energia de soldagem (em J/mm ou kJ/mm) como um parâmetro unificador para prever o aporte

térmico e a morfologia resultante do cordão de solda. Este parâmetro assume que diferentes combinações de potência do laser e velocidade de soldagem que resultam no mesmo valor de J/mm produzirão resultados semelhantes.

Contudo, os resultados experimentais deste trabalho demonstram conclusivamente que esta premissa é enganosa e que a energia de soldagem, isoladamente, é um parâmetro insuficiente para prever a física do processo.

Para testar esta hipótese, a Figura 95 apresenta uma análise comparativa de três colunas (vista superior, poça de fusão e seção transversal) para três condições distintas que possuem, teoricamente, a mesma energia de soldagem de 60 J/mm: a Condição 1 (1 kW e 1 m/min), a Condição 2 (2 kW e 2 m/min) e a Condição 3 (3 kW e 3 m/min).

Figura 95 – Matriz de comparativa da energia de soldagem linear (60 J/mm) e suas diferenças morfológicas para diferentes condições de potência do laser e velocidade de soldagem.



Fonte: Do autor (2026).

A análise da Figura 93 revela uma contradição fundamental. Apesar da energia de soldagem idêntica, a morfologia do cordão de solda e a dinâmica da poça de fusão são drasticamente diferentes para cada condição.

Na primeira condição (1 kW e 1 m/min), observa-se um cordão de solda mais raso (baixa razão de aspecto). A seção transversal confirma uma penetração limitada, e a poça de fusão é estável e elíptica. Este é o comportamento do Modo *Quasi-Keyhole* discutido anteriormente. Nesta condição, a densidade de potência foi insuficiente para criar um *keyhole* robusto.

Na terceira condição (3 kW e 3 m/min), em total contraste, o cordão de solda é visivelmente mais estreito e apresenta uma maior penetração (alta razão de aspecto). A poça de fusão é alongada (formato de lágrima), e o processo está em regime de *keyhole* plenamente estabelecido, onde, a alta densidade de potência criou um *keyhole* intenso e profundo, enquanto o curto tempo de interação impediu a difusão lateral, forçando a energia verticalmente e resultando em um cordão estreito e profundo. Esse mesmo comportamento pode ser visto na segunda condição (2 kW e 2 m/min), que apresenta uma poça de fusão com menor comprimento e menor penetração quando comparada a condição 3.

Esta conclusão é ainda mais reforçada ao reexaminar os dados da análise preliminar com argônio (Seção 4.1), que duas condições com a mesma energia de soldagem (120 J/mm) produziram resultados opostos: 1 m/min e 2 kW (120 J/mm) foi a pior condição, com porosidade crítica, enquanto 2 m/min e 4 kW (120 J/mm) foi a melhor condição, com a menor porosidade.

Isso prova que a estabilidade do *keyhole* não escala com a energia de soldagem (J/mm), mas sim com a densidade de potência, que foi maior no segundo caso.

Portanto, este trabalho demonstra que a energia de soldagem deve ser desconsiderada como um parâmetro unificador para prever a física do processo em soldagem a laser de alta potência. A análise deve ser baseada nos parâmetros fundamentais (potência do laser, velocidade, diâmetro do feixe) que ditam os fenômenos físicos reais de densidade de potência e tempo de interação.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou experimentalmente os fenômenos de formação e estabilidade da poça de fusão na soldagem a laser em modo *keyhole* do aço inoxidável AISI 304. O objetivo principal foi correlacionar a dinâmica do processo com a morfologia e dimensões do cordão de solda solidificado, visando propor e validar os mecanismos físicos que governam o processo.

- A utilização de argônio como gás de proteção resultou em porosidade, causada pela instabilidade do *keyhole*. A substituição por nitrogênio eliminou esta porosidade. Este estudo atribuiu essa melhoria a uma combinação de mecanismos: às propriedades físico-químicas que promovem a estabilização da cavidade de vapor e, de forma semelhante, à alta solubilidade do nitrogénio no aço líquido, que inibe a nucleação de poros ao ser dissolvido no material. A obtenção de um cordão de solda livre de porosidades foi uma etapa metodológica crucial que permitiu o estudo dos fenômenos físicos subjacentes, livres da interferência de descontinuidades;
- Foram obtidos modos de soldagem distintos para uma mesma energia de soldagem. Para 60 J/mm, observou-se tanto o regime *keyhole* quanto o de condução, a depender da velocidade utilizada.
- A análise dos parâmetros de interação validou os modelos teóricos com os dados experimentais deste trabalho. Foi provado que a energia de soldagem é um parâmetro insuficiente para predizer o processo. Isso foi demonstrado de duas formas: primeiro, na análise com argônio, duas condições com idêntica energia (120 J/mm) produziram os resultados mais crítico (pior) e menos crítico (melhor) em termos de porosidade, segundo, na análise com nitrogênio, três condições com idêntica energia de soldagem (60 J/mm) produziram morfologias e regimes físicos drasticamente diferentes (raso/largo vs. profundo/estreito);
- O trabalho demonstrou que o fator de potência (para prever penetração) e o Tempo de Interação (para prever largura) são os parâmetros preditivos fundamentais, pois eles se correlacionam diretamente com os fenômenos físicos de densidade de potência e difusão de calor lateral;
- A análise combinada da eficiência de fusão (quantitativa) e da dinâmica da poça (visual) em 1 kW revelou uma contradição experimental que levou à proposição de

um regime híbrido: o Modo *Quasi-Keyhole*. Neste regime, as métricas (eficiência ~20%, razão de aspecto ~1) indicam *keyhole*, mas a poça de fusão manteve-se visualmente estável, sem turbulência, típica do modo condução. Conclui-se que este é um estado onde a energia é suficiente para iniciar um *keyhole* (aumentando a eficiência), mas insuficiente para gerar instabilidade convectiva na poça;

- A análise da eficiência de fusão em alta potência do laser revelou os mecanismos físicos que a controlam. A eficiência máxima (em 2-3 m/min) foi atribuída à mitigação da pluma de plasma pela alta velocidade. A queda de eficiência (em 1 m/min e 5 kW) foi atribuída ao fenômeno de absorção por *Bremsstrahlung Inversa*, onde a baixa velocidade de soldagem permite a ionização da pluma, que bloqueia o laser;
- Foi identificada e quantificada uma instabilidade dinâmica em baixa velocidade (1 m/min) e alta potência (≥ 3 kW). Esta instabilidade foi primeiramente detectada nos dados quantitativos, através de um aumento abrupto do desvio-padrão do comprimento da poça (CPF). A análise dos vídeos confirmou que a causa era uma oscilação periódica da largura da poça de fusão. Este fenômeno dinâmico foi diretamente correlacionado ao seu efeito estático: a formação das "escamas" (marcas de solidificação irregulares) na borda do cordão de solda;
- A frequência desta oscilação diminuiu com o aumento da potência. O fenômeno foi atribuído ao aumento da inércia do *keyhole*: em potências do laser mais altas, a pressão de recuo mais intensa cria um *keyhole* mais robusto e volumoso, tornando-o menos suscetível a oscilações de alta frequência, em total concordância com os achados da literatura.

Em síntese, o trabalho cumpriu seus objetivos ao caracterizar o problema da porosidade, implementar uma solução eficaz e, por fim, utilizar o processo otimizado para propor um novo regime de soldagem (*Quasi-Keyhole*) e estabelecer as correlações diretas entre as instabilidades dinâmicas (oscilação da poça de fusão, pluma de plasma) e a morfologia e eficiência do cordão de solda.

6 TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados e das observações realizadas no presente estudo, foram identificadas três linhas principais de investigação que poderiam aprofundar e expandir o conhecimento gerado.

- A primeira sugestão consiste em uma análise aprofundada da dinâmica de alta frequência da poça de fusão. O presente estudo identificou e quantificou uma oscilação periódica de baixa frequência no comprimento da poça de fusão. Um trabalho futuro pode empregar um sistema de imageamento de altíssima velocidade para capturar esses fenômenos de alta frequência, permitindo uma correlação mais precisa entre a estabilidade do *keyhole* e as micro-oscilações da poça de fusão;
- A segunda linha de pesquisa seria a implementação de técnicas de visualização direta da cavidade interna do *keyhole*. Na análise da condição otimizada (3 m/min), este trabalho levantou a hipótese de que o *keyhole* possui uma morfologia 3D complexa e pulsante (com "cinturas" e "protuberâncias") para explicar a formação de "ilhas" de metal de base vistas na seção longitudinal. Esta foi, no entanto, uma inferência baseada em uma análise metalográfica 2D (estática). Recomenda-se, portanto, um estudo futuro que utilize métodos de imageamento avançados, como a radiografia de raios-X síncrotron *in-situ*, para visualizar a morfologia e a dinâmica do *keyhole* através do metal líquido, permitindo a validação direta desta hipótese;
- A terceira sugestão foca na caracterização termográfica da poça de fusão em tempo real. Uma das principais descobertas deste estudo foi a proposição do Modo *Quasi-Keyhole*, um regime híbrido cuja existência foi inferida de uma aparente contradição entre as métricas de eficiência (que indicam *keyhole*) e a estabilidade visual da poça de fusão (que indica condução). A hipótese é que a energia é suficiente para iniciar o *keyhole*, mas insuficiente para gerar turbulência convectiva. Para validar este regime, um trabalho futuro pode utilizar termografia para mapear a distribuição de temperatura da superfície da poça, correlacionando os perfis térmicos com os diferentes regimes;
- Por fim, a quarta linha de pesquisa consiste na caracterização quantitativa da pluma de plasma. A análise da eficiência de fusão no processo otimizado sugeriu fortemente a influência da pluma de plasma, levantando a hipótese de absorção por Bremsstrahlung Inversa (em 1 m/min) e mitigação da pluma de plasma (em 3 m/min) para explicar as variações de eficiência. Contudo, esta foi uma conclusão baseada apenas na geometria do cordão solidificado. Sugere-se um estudo futuro que utilize análise espectroscópica óptica *in-situ* da pluma de plasma. Esta técnica permitiria medir diretamente a temperatura eletrônica e a densidade da pluma de plasma, provando quantitativamente a ocorrência do Bremsstrahlung e validando seu impacto real na eficiência do processo.

REFERÊNCIAS

Assunção, E. G. **Investigation of conduction to *Keyhole* Mode transition**. 2012. Doctoral Thesis in Welding Engineering (em Cranfield University). Cranfield, Bedfordshire, England, United Kingdom.

Assunção, E.; Williams, S.; Yapp, D. Interaction time and beam diameter effects on the conduction mode limit. **Optics and Lasers in Engineering**, vol. 50, nº 6, p. 823–828, 2012.

Ayoola, W. A.; Suder, W. J.; Williams, S. W. Parameters controlling weld bead profile in conduction laser welding. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 249, p. 522–530, 2017.

Barbetta, L. D. **Application of the high-current spray transfer buried arc in hybrid laser-arc welding**. 2019. Doctoral thesis in Mechanical Engineering (em Federal University of Santa Catarina). Florianópolis.

Brock, C.; Hohenstein, R.; Schmidt, M. Mechanisms of vapour plume formation in laser deep penetration welding. **Optics and Lasers in Engineering**, vol. 58, p. 93–101, 2014.

Coelho, B. N. *et al*. A comparative study of the heat input during laser welding of aeronautical aluminum alloy AA6013-T4. **Journal of Aerospace Technology and Management**, vol. 10, 2018.

Coroado, J. *et al*. Fundamental understanding of the interaction of continuous wave laser with aluminium. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 93, nº 9–12, p. 3165–3174, 2017.

Dawes, C. **Laser welding: A practical guide**. Cambridge: Woodhead. 1992.

Divoky, M. *et al*. Overview of the HiLASE project: High average power pulsed DPSSL systems for research and industry. **High Power Laser Science and Engineering**, vol. 2, 2014.

Dreveck, N. W. **Avaliação do arco enterrado na soldagem híbrida laser – GMAW e sua aplicação em aços TMCP**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Tecnológicas (em Universidade do Estado de Santa Catarina). Joinville.

Elmer, J. W. *et al*. The effect of Ar and N2 shielding gas on laser weld porosity in steel, stainless steel, and nickel. **The Welding Journal**, vol. LLNL-JRNL-663819, 2014.

Fabbro, R. Melt pool and *keyhole* behaviour analysis for deep penetration laser welding. **Journal of Physics D: Applied Physics**, vol. 43, nº 44, 2010.

Finch, N. W. **Quantifying variability in laser welding of stainless-steel alloy 304**. 2024. Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais (em The Pennsylvania State University). Pennsylvania.

Fotovvati, B. *et al*. A Review on Melt-Pool Characteristics in Laser Welding of Metals. Hindawi Limited. 2018.

Gao, M. *et al*. Characteristics of plasma plume in fiber laser welding of aluminum alloy. **Applied Surface Science**, vol. 326, p. 181–186, 2015.

Gao, X. D.; Wen, Q.; Katayama, S. Analysis of high-power disk laser welding stability based on classification of plume and spatter characteristics. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, vol. 23, nº 12, p. 3748–3757, 2013.

Gao, Z. *et al*. Investigation on the weld bead profile transformation with the *keyhole* and molten pool dynamic behavior simulation in high power laser welding. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 116, p. 1304–1313, 2018.

Grevey, D. *et al*. Gas protection optimization during Nd:YAG laser welding. **Optics and Laser Technology**, vol. 37, nº 8, p. 647–651, 2005.

Hafez, K. M. The influence of shielding gases on *keyhole*-induced porosity and nitrogen absorption in SS 304 stainless steel fiber laser welds. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 127, nº 3–4, p. 1887–1894, 2023.

Hosseini Motlagh, N. S. *et al*. The influence of different volume ratios of He and Ar in shielding gas mixture on the power waste parameters for Nd:YAG and CO2 laser welding. **Optics and Laser Technology**, vol. 54, p. 191–198, 2013.

Huang, Y. *et al*. *Keyhole* fluctuation and pore formation mechanisms during laser powder bed fusion additive manufacturing. **Nature Communications**, vol. 13, nº 1, 2022.

Ion, J. C. **Laser processing of engineering materials**. Londres: Elsevier. 2005.

Jia, X.; Zhao, X. Numerical study of material decomposition in ultrafast laser interaction with metals. **Applied Surface Science**, vol. 463, p. 781–790, 2019.

Katayama. **Handbook of laser welding technologies**. Osaka: Woodhead Pub. 2009.

Katayama, S. **Advances in laser materials processing**. 2 nd. Osaka: Woodhead. 2018.

Katayama, S. **Fundamentals and details of laser welding**. Osaka: Springer. 2020.

Katayama, S.; Iviizutanf, M.; Matsunawa, A. Development of porosity prevention procedures during laser welding. Osaka. 2003.

Katayama, S.; Kawahito, Y.; Mizutani, M. Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects. **Physics Procedia**. Osaka: Elsevier B.V. 2010. p. 9–17.

Katayama, S.; Kawahito, Y.; Mizutani, M. Latest progress in performance and understanding of laser welding. **Physics Procedia**. Osaka: Elsevier B.V. 2012. p. 8–16.

Kou, S. **Welding metallurgy**. 2 nd. Wisconsin: Wiley-InterScience. 2003.

Kouraytem, N. *et al*. Effect of laser-matter interaction on molten pool flow and *keyhole* dynamics. **Physical Review Applied**, vol. 11, nº 6, 2019.

Kshirsagar, R. *et al*. Effect of the addition of nitrogen through shielding gas on tig welds made homogenously and heterogeneously on 300 series austenitic stainless steels. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, vol. 5, nº 3, 2021.

Kwak, Y.; Lee, S. H.; Kang, M. Effects of shielding gases on the weldability of laser welded austenitic stainless steel. **Journal of Welding and Joining**, vol. 40, nº 6, p. 525–532, 2022.

Le, T. N.; Lo, Y. L. Effects of sulfur concentration and Marangoni convection on melt-pool formation in transition mode of selective laser melting process. **Materials and Design**, vol. 179, 2019.

Lei, T. *et al*. Experiment study and regression analysis of molten pool in laser welding. **Optics and Laser Technology**, vol. 108, p. 534–541, 2018.

Li, J. *et al*. Analysis of vapor plume and *keyhole* dynamics in laser welding stainless steel with beam oscillation. **Infrared Physics and Technology**, vol. 113, 2021.

Matsunawa, A. *et al*. Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding. **Journal of Light Metal Welding & Construction**, 2002.

Meng, W. *et al*. Dynamic features of plasma plume and molten pool in laser lap welding based on image monitoring and processing techniques. **Optics and Laser Technology**, vol. 109, p. 168–177, 2019.

Nath, A. K. *et al*. Laser power coupling efficiency in conduction and *keyhole* welding of austenitic stainless steel. Indore. 2002.

Ogawa, Y. *et al*. Evaluation of fatigue strength based on dissipated energy for laser welds. **Infrared Physics & Technology**, vol. 125, p. 1–7, 2022.

Pang, S. *et al*. Dynamics of vapor plume in transient *keyhole* during laser welding of stainless steel: Local evaporation, plume swing and gas entrapment into porosity. **Optics and Lasers in Engineering**, vol. 82, p. 28–40, 2016.

Poprawe, R. **Tailored Light 2**. RWTH. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2011.

Quintino, L. *et al*. Welding with high power fiber lasers - A preliminary study. **Materials and Design**, vol. 28, nº 4, p. 1231–1237, 2007.

Rai, R. *et al*. Heat transfer and fluid flow during *keyhole* mode laser welding of tantalum, Ti-6Al-4V, 304L stainless steel and vanadium. **Journal of Physics D: Applied Physics**, vol. 40, nº 18, p. 5753–5766, 2007.

Ribeiro, H. V. **Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas a laser em um aço ARBL**. 2016. Doutorado em Engenharia de Materiais (em Universidade de São Paulo). Lorena.

Roessler, D. M.; Steen, W. M. The industrial annual handbook. Michigan. 1986. p. 1169–1210.

Schmidt, L. *et al*. Effect of partial and global shielding on surface-driven phenomena in *keyhole* mode laser beam welding. **Welding in the World**, vol. 68, nº 6, p. 1353–1374, 2024.

Schuöcker, D. **Handbook of the eurolaser academy**. Vienna: Springer US. 1998.

Seto, N.; Katayama, S.; Matsunawa, A. High-speed simultaneous observation of plasma and *keyhole* behavior during high power CO2 laser welding: Effect of shielding gas on porosity formation. **Journal of Laser Applications**, vol. 12, nº 6, p. 245–250, 2000.

Steen, W. M.; Mazumder, J. **Laser material processing**. 4 th. Michigan: Springer London. 2010.

Suder, W. J.; Williams, S. Power factor model for selection of welding parameters in CW laser welding. **Optics and Laser Technology**, vol. 56, p. 223–229, 2014.

Suder, W. J.; Williams, S. W. Investigation of the effects of basic laser material interaction parameters in laser welding. **Journal of Laser Applications**, vol. 24, nº 3, p. 032009, 2012.

Sun, J. *et al*. The characteristics and reduction of porosity in high-power laser welds of thick AISI 304 plate. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 93, nº 9–12, p. 3517–3530, 2017a.

Sun, J. *et al*. The elimination of pores in laser welds of AISI 304 plate using different shielding gases. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 248, p. 56–63, 2017b.

Tao, P. *et al*. Effects of solidification on flow dynamics: A novel comprehension of defects formation in laser penetration welding. **Journal of Materials Research and Technology**, vol. 27, p. 7562–7569, 2023.

Tsuji, M. High power fiber laser and the newest applications. Yokohama. 2009.

Wainer, E.; Brandi, S. D.; Mello, F. D. H. de. **Soldagem: processos e metalurgia**. 4º ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA. 2004.

Wang, H. *et al*. Effect of assist gas flow on the gas shielding during laser deep penetration welding. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 184, nº 1–3, p. 379–385, 2007.

Wang, L.; Gao, X.; Kong, F. *Keyhole* dynamic status and spatter behavior during welding of stainless steel with adjustable-ring mode laser beam. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 74, p. 201–219, 2022.

Wang, Y. *et al*. Effects of energy density attenuation on the stability of *keyhole* and molten pool during deep penetration laser welding process: A combined numerical and experimental study. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 176, 2021.

Wang, Z. *et al*. Influence mechanisms of Y-direction magnetic field-assisted laser penetration welding on the molten pool behavior and joint characteristics of layered DSS2205/X65 bimetallic composite. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 146, p. 264–272, 2025.

Xiao, X. *et al*. Analysis of heat transfer and melt flow in conduction, transition, and *keyhole* modes for CW laser welding. **Infrared Physics and Technology**, vol. 120, 2022.

Xue, B.; Chang, B.; Du, D. Monitoring of high-speed laser welding process based on vapor plume. **Optics and Laser Technology**, vol. 147, 2022.

Yang, B. *et al*. A fixture design for controlling impact of the airflow on laser welding of galvanized steels. **Optics and Laser Technology**, vol. 181, 2025.

Zhao, C. *et al*. Critical instability at moving *keyhole* tip generates porosity in laser melting. Hillsboro. 2020.

Zhao, Y. *et al*. Plasma behavior and control with small diameter assisting gas nozzle during CO2 laser welding. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 237, p. 208–215, 2016.

Zhu, B. *et al*. A predictive model of weld bead cross-section morphology during laser deep penetration welding considering energy coupling law in *keyhole*. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 133, p. 1342–1351, 2025.

Zou, J. *et al*. Investigation on plume formation during fiber laser *keyhole* welding based on in-situ measurement of particles in plume. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 65, p. 153–160, 2021.

Zou, J. *et al*. Power density effect on the laser beam-induced eruption of spatters in fiber laser *keyhole* welding. **Optics and Laser Technology**, vol. 147, 2022.

Zou, J. L. *et al*. Experimental and theoretical characterization of deep penetration welding threshold induced by 1-μm laser. **Applied Surface Science**, vol. 357, p. 1522–1527, 2015.

APÊNDICE A – DADOS DO COMPRIMENTO DA POÇA DE FUSÃO (CPF): ANÁLISE PRELIMINAR (ARGÔNIO)

Potência Laser	Medição [mm]	Velocidade de Soldagem		
		1 m/min	2 m/min	3 m/min
1 kW	#1	3,04	3,17	2,60
	#2	3,10	2,77	2,68
	#3	3,19	2,70	2,66
	#4	3,30	2,81	2,54
	#5	3,28	2,92	2,62
	#6	3,33	2,99	2,56
	#7	3,30	3,08	2,52
	#8	3,26	3,06	2,62
	#9	3,37	2,90	2,62
	Média	**3,24**	**2,93**	**2,60**
	DesviP	**0,11**	**0,16**	**0,05**
2 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	5,78	5,78	5,34
	#2	7,03	5,94	5,14
	#3	6,50	6,27	5,39
	#4	6,59	5,98	5,10
	#5	6,67	5,98	5,37
	#6	6,25	5,78	5,51
	#7	6,83	5,98	5,42
	#8	5,87	6,30	5,83
	#9	6,61	5,92	5,58
	Média	**6,46**	**5,99**	**5,41**
	DesviP	**0,42**	**0,18**	**0,22**
3 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	8,57	7,63	6,58
	#2	7,84	8,48	7,93
	#3	7,55	8,59	7,68
	#4	7,66	8,71	7,64
	#5	9,20	8,42	8,26
	#6	7,99	8,30	7,64
	#7	7,77	8,06	7,89
	#8	7,21	8,19	7,71
	#9	7,99	8,62	8,09
	Média	**7,97**	**8,33**	**7,71**
	DesviP	**0,59**	**0,34**	**0,48**
4 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	8,88	8,73	8,69
	#2	9,60	9,89	9,34
	#3	9,87	10,05	9,61
	#4	9,69	10,51	8,96

	#5	9,87	10,65	9,67
	#6	11,16	10,78	9,18
	#7	10,71	10,85	9,41
	#8	10,05	10,51	9,73
	#9	10,11	10,96	9,82
	Média	**9,99**	**10,32**	**9,38**
	DesviP	**0,65**	**0,70**	**0,38**
5 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	9,69	11,12	9,84
	#2	11,05	11,56	10,49
	#3	12,08	12,39	10,76
	#4	10,20	11,65	11,29
	#5	9,98	12,14	10,25
	#6	12,21	12,23	10,08
	#7	10,40	11,99	11,29
	#8	10,74	12,14	11,54
	#9	10,27	12,21	11,64
	Média	**10,73**	**11,94**	**10,80**
	DesviP	**0,89**	**0,41**	**0,67**

APÊNDICE B – DADOS DA LARGURA DA POÇA DE FUSÃO (LPF): ANÁLISE PRELIMINAR (ARGÔNIO)

Potência Laser	Medição [mm]	Velocidade de Soldagem		
		1 m/min	2 m/min	3 m/min
1 kW	#1	1,69	1,14	0,96
	#2	2,23	1,14	0,81
	#3	2,23	1,41	1,08
	#4	2,05	1,35	1,12
	#5	2,17	1,40	1,18
	#6	2,20	1,51	1,15
	#7	2,11	1,41	1,20
	#8	2,20	1,56	1,17
	#9	2,05	1,47	1,17
	Média	**2,10**	**1,37**	**1,09**
	DesviP	**0,17**	**0,15**	**0,13**
2 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	3,28	2,04	1,45
	#2	3,07	1,86	1,47
	#3	2,98	1,98	1,53
	#4	3,07	1,78	1,50
	#5	2,83	2,08	1,68
	#6	3,22	2,04	1,71
	#7	3,13	1,96	1,54
	#8	3,16	2,07	1,74
	#9	2,83	2,05	1,56
	Média	**3,07**	**1,98**	**1,57**
	DesviP	**0,16**	**0,10**	**0,11**
3 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	3,13	2,67	2,08
	#2	3,40	2,68	2,13
	#3	3,52	2,74	2,13
	#4	3,52	2,55	2,01
	#5	3,46	2,70	2,13
	#6	3,52	2,68	2,22
	#7	3,52	2,61	2,01
	#8	3,31	2,71	2,13
	#9	3,65	2,90	2,07
	Média	**3,45**	**2,69**	**2,10**
	DesviP	**0,15**	**0,10**	**0,07**
4 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	3,95	2,89	2,55
	#2	3,95	3,17	2,58
	#3	4,19	3,14	2,49
	#4	3,98	3,02	2,55

	#5	4,22	3,11	2,61
	#6	4,43	2,84	2,49
	#7	4,34	3,14	2,58
	#8	3,74	3,05	2,52
	#9	3,77	2,96	2,52
	Média	**4,06**	**3,04**	**2,54**
	DesviP	**0,24**	**0,12**	**0,04**
5 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	4,37	3,65	3,05
	#2	4,94	3,65	3,05
	#3	4,43	3,44	2,90
	#4	4,19	3,68	2,67
	#5	4,46	3,62	3,08
	#6	4,46	3,62	2,84
	#7	4,13	3,68	2,81
	#8	4,61	3,68	2,75
	#9	4,79	3,59	3,02
	Média	**4,48**	**3,63**	**2,91**
	DesviP	**0,26**	**0,08**	**0,15**

APÊNDICE C – DADOS GEOMÉTRICOS (PENETRAÇÃO) – ANÁLISE PRELIMINAR (ARGÔNIO)

Potência Laser	Medição [mm]	Velocidade de Soldagem		
		1 m/min	2 m/min	3 m/min
1 kW	#1	1,61	1,22	0,83
	#2	1,57	1,30	0,78
	#3	1,61	1,22	0,83
	#4	1,65	1,26	0,74
	#5	1,61	1,26	0,74
	Média	**1,61**	**1,25**	**0,78**
	Desvio Padrão	**0,03**	**0,04**	**0,04**
2 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	3,52	2,91	2,52
	#2	3,61	2,96	2,52
	#3	3,65	3,09	2,61
	#4	3,65	3,09	2,52
	#5	3,57	3,04	2,39
	Média	**3,60**	**3,02**	**2,51**
	Desvio Padrão	**0,06**	**0,08**	**0,08**
3 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	5,09	4,13	3,61
	#2	5,09	4,17	3,61
	#3	5,09	4,09	3,61
	#4	5,35	4,04	3,61
	#5	5,22	4,26	3,35
	Média	**5,17**	**4,14**	**3,56**
	Desvio Padrão	**0,12**	**0,08**	**0,12**
4 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	6,09	5,04	4,57
	#2	6,04	4,87	4,52
	#3	6,04	5,04	4,48
	#4	6,04	4,87	4,17
	#5	5,96	5,00	4,13
	Média	**6,03**	**4,97**	**4,37**
	Desvio Padrão	**0,05**	**0,09**	**0,21**
5 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	6,83	5,48	5,13
	#2	7,09	5,57	5,30
	#3	6,39	5,48	5,13
	#4	7,00	5,61	4,87
	#5	6,96	5,44	4,87
	Média	**6,85**	**5,51**	**5,06**
	Desvio Padrão	**0,27**	**0,07**	**0,19**

APÊNDICE D – DADOS DO COMPRIMENTO DA POÇA DE FUSÃO (CPF): OTIMIZAÇÃO DA PROTEÇÃO GASOSA

	Medição [mm]	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7	ID8	ID9
Ar	**#1**	5,79	7,23	7,29	6,03	6,65	7,14	5,75	6,09	6,80
	#2	5,85	6,65	6,95	5,97	6,34	6,99	5,69	6,43	6,22
	#3	6,46	6,37	7,02	5,20	6,06	6,77	5,94	6,62	6,74
	#4	4,77	6,62	7,17	5,51	6,86	6,92	5,94	6,77	6,52
	#5	5,82	6,55	6,92	6,43	6,46	7,05	6,09	6,46	6,55
	#6	5,57	6,31	6,68	5,94	6,43	6,86	5,75	6,68	6,83
	#7	5,57	6,65	6,62	6,12	6,52	6,59	6,15	6,65	6,95
	#8	6,22	6,62	6,80	5,72	7,20	6,80	6,28	6,52	6,68
	#9	5,79	6,59	6,62	5,69	6,77	6,95	5,94	6,62	6,71
	Média	**5,76**	**6,62**	**6,90**	**5,85**	**6,59**	**6,90**	**5,95**	**6,54**	**6,67**
	Desvio Padrão	**0,47**	**0,26**	**0,24**	**0,36**	**0,33**	**0,16**	**0,20**	**0,20**	**0,22**
N_2	**Medição [mm]**	**ID10**	**ID11**	**ID12**	**ID13**	**ID14**	**ID15**	**ID16**	**ID17**	**ID18**
	#1	3,94	5,97	5,45	4,99	4,74	5,23	4,25	4,03	5,42
	#2	4,28	5,75	5,66	4,37	5,20	5,69	3,91	3,69	6,09
	#3	5,75	5,72	5,26	5,05	5,39	5,42	4,00	4,28	5,17
	#4	4,31	5,57	5,35	4,95	5,54	6,25	4,55	4,95	6,06
	#5	5,42	5,11	5,82	5,14	5,60	6,09	4,77	5,35	6,40
	#6	4,22	6,03	5,97	5,14	4,86	6,03	4,49	4,99	6,49
	#7	5,14	5,45	5,66	4,89	5,35	6,12	4,40	4,59	6,15
	#8	5,45	5,66	6,15	4,77	5,20	6,46	4,43	4,65	6,25
	#9	5,11	5,72	5,72	4,86	5,51	5,94	4,37	2,83	6,34
	Média	**4,84**	**5,67**	**5,67**	**4,91**	**5,27**	**5,91**	**4,35**	**4,37**	**6,04**
	Desvio Padrão	**0,66**	**0,28**	**0,29**	**0,24**	**0,30**	**0,40**	**0,27**	**0,77**	**0,45**

APÊNDICE E – DADOS DA LARGURA DA POÇA DE FUSÃO (LPF): OTIMIZAÇÃO DA PROTEÇÃO GASOSA

	Medição [mm]	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7	ID8	ID9
Ar	**#1**	2,54	2,91	3,17	2,84	2,91	2,95	2,50	2,72	3,28
	#2	2,50	3,02	3,06	2,24	2,84	3,36	2,91	3,36	3,40
	#3	2,43	3,17	3,32	2,69	3,47	3,13	2,99	3,13	3,32
	#4	2,80	3,21	3,13	2,69	3,21	3,51	2,91	3,36	3,36
	#5	2,31	3,36	3,21	2,69	2,95	3,36	2,95	3,28	3,36
	#6	2,61	3,25	3,25	2,76	3,17	3,40	2,99	3,28	3,25
	#7	3,10	3,10	3,10	2,54	3,36	3,43	2,84	3,40	3,17
	#8	2,65	3,21	3,10	2,65	3,32	3,40	3,17	3,28	3,43
	#9	2,87	3,17	3,13	2,91	3,25	3,40	2,87	3,28	3,47
	Média	**2,65**	**3,16**	**3,16**	**2,67**	**3,16**	**3,33**	**2,90**	**3,23**	**3,34**
	Desvio Padrão	**0,24**	**0,13**	**0,08**	**0,19**	**0,22**	**0,17**	**0,18**	**0,21**	**0,09**
N_2	**Medição [mm]**	**ID10**	**ID11**	**ID12**	**ID13**	**ID14**	**ID15**	**ID16**	**ID17**	**ID18**
	#1	2,48	2,48	2,44	2,30	2,78	2,52	1,82	2,22	2,93
	#2	2,56	2,74	2,56	2,22	2,48	3,00	2,04	2,22	2,89
	#3	2,67	2,44	2,74	2,26	2,48	3,15	2,07	2,33	3,04
	#4	2,33	2,41	2,82	2,41	2,67	3,00	1,96	2,19	2,89
	#5	2,15	2,41	2,56	2,37	2,63	3,11	2,22	2,48	2,96
	#6	2,11	2,67	2,22	2,30	2,44	2,93	2,37	2,41	2,82
	#7	2,44	2,52	2,41	2,37	2,82	3,19	2,52	2,37	3,15
	#8	2,41	2,56	2,41	2,26	2,70	3,15	2,15	2,48	3,11
	#9	2,44	2,33	2,67	2,41	2,67	3,22	2,19	2,30	2,93
	Média	**2,40**	**2,51**	**2,54**	**2,32**	**2,63**	**3,03**	**2,15**	**2,33**	**2,97**
	Desvio Padrão	**0,18**	**0,13**	**0,19**	**0,07**	**0,13**	**0,21**	**0,21**	**0,11**	**0,11**

APÊNDICE F – DADOS DA ÁREA DA POÇA DE FUSÃO (APF): OTIMIZAÇÃO DA PROTEÇÃO GASOSA

	Bocal	Medição [mm]	10 L/min	15 L/min	20 L/min		Bocal	Medição [mm]	10 L/min	15 L/min	20 L/min
Ar	B4	#1	9,12	10,46	13,94	N_2	B4	#1	6,90	7,92	9,66
		#2	9,36	12,87	13,65			#2	6,79	9,23	10,10
		#3	8,73	13,77	13,58			#3	6,59	8,41	10,10
		#4	9,84	13,25	13,76			#4	6,96	8,51	10,35
		Média	**9,26**	**12,59**	**13,73**			**Média**	**6,81**	**8,52**	**10,05**
		Desvio Padrão	**0,46**	**1,46**	**0,15**			**Desvio Padrão**	**0,16**	**0,54**	**0,29**
	B6	#1	9,24	11,15	12,80		B6	#1	6,18	8,90	8,32
		#2	10,06	13,09	13,64			#2	5,73	7,33	11,90
		#3	8,19	12,77	14,88			#3	6,78	8,09	10,56
		#4	8,71	13,29	14,75			#4	5,92	7,35	12,37
		Média	**9,05**	**12,57**	**14,02**			**Média**	**6,15**	**7,92**	**10,79**
		Desvio Padrão	**0,80**	**0,97**	**0,98**			**Desvio Padrão**	**0,46**	**0,74**	**1,82**
	B8	#1	7,54	10,65	14,62		B8	#1	5,37	6,80	10,25
		#2	10,20	13,99	14,13			#2	4,98	5,96	10,95
		#3	10,03	13,44	14,79			#3	5,12	8,19	10,99
		#4	10,07	14,47	14,50			#4	6,90	7,39	12,77
		Média	**9,46**	**13,14**	**14,51**			**Média**	**5,59**	**7,09**	**11,24**
		Desvio Padrão	**1,28**	**1,71**	**0,28**			**Desvio Padrão**	**0,89**	**0,94**	**1,08**

APÊNDICE G – DADOS DE PENETRAÇÃO – OTIMIZAÇÃO DA PROTEÇÃO GASOSA

Ar	**Medição [mm]**	**ID1**	**ID2**	**ID3**	**ID4**	**ID5**	**ID6**	**ID7**	**ID8**	**ID9**
	#1	2,95	3,44	3,20	3,36	3,12	3,20	2,87	3,20	3,03
	#2	3,12	3,44	3,44	3,61	3,03	3,12	2,79	2,95	3,12
	#3	3,20	3,20	3,53	3,36	3,20	2,87	2,79	3,03	3,20
	#4	3,20	3,03	3,28	3,20	3,20	2,79	2,87	2,95	2,95
	Média	**3,12**	**3,28**	**3,36**	**3,38**	**3,14**	**2,99**	**2,83**	**3,03**	**3,07**
	Desvio Padrão	**0,12**	**0,20**	**0,15**	**0,17**	**0,08**	**0,20**	**0,05**	**0,12**	**0,11**
N_2	**Medição [mm]**	**ID10**	**ID11**	**ID12**	**ID13**	**ID14**	**ID15**	**ID16**	**ID17**	**ID18**
	#1	3,36	3,36	3,36	3,20	3,28	3,36	3,36	3,12	3,44
	#2	3,20	3,28	3,28	3,53	3,03	3,44	3,20	3,36	3,36
	#3	3,28	3,20	3,44	3,12	3,28	3,69	3,03	3,03	3,53
	#4	2,87	3,20	3,36	3,03	3,20	3,44	3,28	3,36	3,61
	Média	**3,18**	**3,26**	**3,36**	**3,22**	**3,20**	**3,48**	**3,22**	**3,22**	**3,48**
	Desvio Padrão	**0,22**	**0,08**	**0,07**	**0,22**	**0,12**	**0,14**	**0,14**	**0,17**	**0,11**

APÊNDICE H – DADOS GEOMÉTRICOS DA SEÇÃO TRANSVERSAL (ANÁLISE ESTÁTICA) – PROCESSO OTIMIZADO

Potência Laser	Medição	Velocidade de Soldagem		
		1 m/min	2 m/min	3 m/min
1 kW	Penetração [mm]	1,44	0,95	0,29
	Largura [mm]	1,56	1,36	0,92
	Área [mm²]	1,37	0,74	0,18
2 kW	Medição	1 m/min	2 m/min	3 m/min
	Penetração [mm]	3,21	2,42	2,07
	Largura [mm]	2,59	1,84	1,53
	Área [mm²]	4,01	2,04	1,45
3 kW	Medição	1 m/min	2 m/min	3 m/min
	Penetração [mm]	4,35	3,42	2,84
	Largura [mm]	3,24	2,22	1,82
	Área [mm²]	6,07	3,08	2,09
4 kW	Medição	1 m/min	2 m/min	3 m/min
	Penetração [mm]	5,36	4,19	3,57
	Largura [mm]	3,64	2,70	2,22
	Área [mm²]	9,01	4,52	3,13
5 kW	Medição	1 m/min	2 m/min	3 m/min
	Penetração	6,15	4,69	4,16
	Largura	3,90	3,07	2,38
	Área	10,65	5,89	3,65

APÊNDICE I – DADOS DO COMPRIMENTO DA POÇA DE FUSÃO (CPF) – PROCESSO OTIMIZADO

Potência Laser	Medição [mm]	Velocidade de Soldagem		
		1 m/min	2 m/min	3 m/min
1 kW	#1	2,58	2,69	1,59
	#2	2,73	2,53	1,45
	#3	2,81	1,75	1,53
	#4	2,62	1,69	1,45
	#5	1,65	1,48	1,48
	#6	1,58	1,53	1,48
	#7	1,55	1,53	1,48
	#8	1,55	1,56	1,61
	#9	1,64	1,67	1,48
	Média	**2,08**	**1,82**	**1,51**
	Desvio Padrão	**0,58**	**0,45**	**0,06**
2 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	4,49	4,57	4,52
	#2	4,40	4,22	4,57
	#3	4,72	4,30	4,92
	#4	4,51	4,46	4,79
	#5	3,81	4,52	4,84
	#6	4,64	4,25	4,84
	#7	4,70	4,62	4,76
	#8	5,04	4,30	4,76
	#9	4,07	4,89	4,52
	Média	**4,49**	**4,46**	**4,72**
	Desvio Padrão	**0,37**	**0,22**	**0,15**
3 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	6,92	6,02	7,30
	#2	7,34	7,32	7,39
	#3	5,85	6,48	7,63
	#4	5,91	7,31	7,20
	#5	7,82	7,25	7,82
	#6	7,26	7,12	7,69
	#7	6,34	7,31	7,80
	#8	7,47	7,48	7,61
	#9	4,60	7,26	7,30
	Média	**6,61**	**7,06**	**7,53**
	Desvio Padrão	**1,03**	**0,48**	**0,23**
4 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	8,95	7,63	8,50
	#2	8,87	8,87	9,70
	#3	7,07	9,14	9,92
	#4	8,95	9,41	10,05

	#5	6,29	8,95	9,19
	#6	5,86	9,06	9,14
	#7	9,62	9,27	9,92
	#8	9,57	8,66	10,05
	#9	6,94	8,90	9,65
	Média	**8,01**	**8,88**	**9,57**
	Desvio Padrão	**1,47**	**0,52**	**0,53**
5 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	8,71	9,44	10,19
	#2	8,58	9,76	10,30
	#3	6,56	10,16	11,91
	#4	9,79	11,02	11,18
	#5	9,57	10,27	11,24
	#6	7,46	11,13	10,89
	#7	8,44	10,00	12,23
	#8	6,02	11,05	10,86
	#9	9,89	11,24	11,45
	Média	**8,33**	**10,45**	**11,14**
	Desvio Padrão	**1,39**	**0,67**	**0,68**

APÊNDICE J – DADOS DA LARGURA DA POÇA DE FUSÃO (LPF) – PROCESSO OTIMIZADO

Potência Laser	Medição [mm]	Velocidade de Soldagem		
		1 m/min	2 m/min	3 m/min
1 kW	#1	1,23	1,10	0,84
	#2	1,24	1,16	0,77
	#3	1,47	1,19	0,81
	#4	1,71	0,97	0,82
	#5	1,21	1,00	0,95
	#6	1,20	1,10	0,87
	#7	1,36	1,06	0,91
	#8	1,27	1,03	0,81
	#9	1,25	1,00	0,79
	Média	**1,33**	**1,07**	**0,84**
	Desvio Padrão	**0,17**	**0,08**	**0,06**
2 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	2,29	1,68	1,39
	#2	2,37	1,61	1,55
	#3	2,04	1,61	1,45
	#4	2,12	1,61	1,53
	#5	2,22	1,87	1,47
	#6	2,27	1,74	1,48
	#7	2,33	1,65	1,38
	#8	2,06	1,71	1,56
	#9	2,02	1,58	1,48
	Média	**2,19**	**1,67**	**1,48**
	Desvio Padrão	**0,13**	**0,09**	**0,07**
3 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	3,06	2,48	2,05
	#2	3,32	2,36	1,94
	#3	3,03	2,23	1,98
	#4	2,90	2,32	2,08
	#5	3,10	2,32	2,06
	#6	2,81	2,29	2,06
	#7	2,81	2,48	2,11
	#8	2,89	2,32	1,97
	#9	3,26	2,31	1,94
	Média	**3,02**	**2,35**	**2,02**
	Desvio Padrão	**0,19**	**0,09**	**0,07**
4 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	3,37	2,94	2,36
	#2	3,45	3,00	2,23
	#3	4,13	2,90	2,42
	#4	3,23	2,90	2,29

	#5	4,16	2,90	2,36
	#6	4,16	3,06	2,29
	#7	3,39	2,84	2,39
	#8	3,61	2,87	2,48
	#9	3,97	2,90	2,50
	Média	**3,72**	**2,92**	**2,37**
	Desvio Padrão	**0,38**	**0,07**	**0,09**
5 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	3,81	3,22	2,63
	#2	4,55	3,32	2,48
	#3	4,68	3,45	2,48
	#4	4,03	3,42	2,58
	#5	4,42	3,45	2,65
	#6	4,60	3,32	2,58
	#7	3,81	3,26	2,47
	#8	4,45	3,41	2,52
	#9	3,65	3,39	2,66
	Média	**4,22**	**3,36**	**2,56**
	Desvio Padrão	**0,40**	**0,08**	**0,08**

APÊNDICE K – DADOS DA ÁREA DA POÇA DE FUSÃO (APF) – PROCESSO OTIMIZADO

Potência Laser	Medição [mm]	Velocidade de Soldagem		
		1 m/min	2 m/min	3 m/min
1 kW	#1	1,65	1,23	1,09
	#2	1,58	1,23	1,01
	#3	1,58	1,19	1,06
	#4	1,66	1,21	1,06
	#5	1,64	1,22	1,10
	Média	**1,62**	**1,22**	**1,06**
	Desvio Padrão	**0,04**	**0,02**	**0,03**
2 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	5,41	4,99	5,29
	#2	6,26	5,85	5,02
	#3	5,98	4,75	5,35
	#4	6,33	5,11	5,35
	#5	6,51	5,06	5,24
	Média	**6,10**	**5,15**	**5,25**
	Desvio Padrão	**0,43**	**0,41**	**0,13**
3 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	14,57	11,44	10,85
	#2	13,62	11,48	10,78
	#3	12,25	11,72	10,54
	#4	13,61	10,76	10,30
	#5	14,25	11,55	10,52
	Média	**13,66**	**11,39**	**10,60**
	Desvio Padrão	**0,89**	**0,37**	**0,22**
4 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	25,43	16,57	14,28
	#2	25,10	17,67	15,72
	#3	24,02	18,45	15,85
	#4	17,33	17,80	15,70
	#5	22,10	17,22	15,50
	Média	**22,80**	**17,54**	**15,41**
	Desvio Padrão	**3,32**	**0,70**	**0,64**
5 kW	**Medição [mm]**	**1 m/min**	**2 m/min**	**3 m/min**
	#1	30,00	23,68	20,75
	#2	33,69	24,15	20,09
	#3	28,89	23,93	20,47
	#4	32,79	24,39	19,46
	#5	26,12	22,40	20,72

	Média	**30,30**	**23,71**	**20,30**
	Desvio Padrão	**3,05**	**0,78**	**0,54**