



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS TRINDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Francisco Cavilha Neto

**Efeito da modulação de potência na soldagem autógena a laser dos aços SAE 1020, 1045
e 4140**

Florianópolis

2020

Francisco Cavilha Neto

**Efeito da modulação de potência na soldagem autógena a laser dos aços SAE 1020, 1045
e 4140**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Marcio Celso Fredel, Dr.-Ing
Coorientador: Prof. Milton Pereira, Dr.

Florianópolis

2020

Cavilha Neto, Francisco

Efeito da modulação de potência na soldagem autógena a laser
Dos aços 1020, 1045 e 4140 / Francisco Cavilha Neto ; orientador,
Márcio Celso Fredel ; coorientador, Milton Pereira. -
Florianópolis, SC, 2020.
133 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais.

Inclui referências.

1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2. Ciência e
Engenharia de Materiais. 3. Soldagem a Laser. 4. Modulação
de potência. I. Fredel, Márcio Celso. II. Pereira, Milton.
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. IV.
Título.

Francisco Cavilha Neto

**Efeito da modulação de potência na soldagem autógena a laser dos aços SAE 1020, 1045
e 4140**

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

Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luiz Eduardo dos Santos Paes Dr.
Instituição Universidade Federal de Uberlândia

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

Prof. Guilherme Mariz de Oliveira Barra, Dr.
Coordenador do Programa

Prof. Márcio Celso Fredel, Dr.-Ing.
Orientador

Florianópolis, 2020.

Dedico esse trabalho à possibilidade de desenvolvimento que ele mesmo me trouxe, direta e indiretamente.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Marcio Fredel e Milton Pereira, pela oportunidade, liberdade e disponibilidade ao desenvolver esse trabalho.

Ao laboratório LMP e ao Professor Walter Weingaertner, coordenador do laboratório e o responsável por toda a estrutura e idealização do laboratório, aos meus colegas de pós-graduação, principalmente ao Adriano Pereira, ao Max Baranenko, ao Claudio Abílio, ao Rafael Nunes e ao Luiz Paes, que sempre estiveram dispostos a me auxiliar durante esses dois anos, desde a procurar parafusos, até a realizar operações com a fonte laser.

Aos professores, Mateus Barancelli, Carlos Augusto e Pedro Bernardini pelas consultorias e disponibilidade de trocas de conhecimento.

Aos laboratórios LABSOLDA, LABMETRO, LCME e LABCONF pela disponibilidade de estrutura e maquinário para a realização desse trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por ser um centro tão rico de ensino, pesquisa e extensão, possibilitando aos jovens do Brasil o estudo, o desenvolvimento pessoal e o contato com o diferente.

À minha família, por todo o apoio moral, financeiro, amoroso e psicológico durante esses dois anos. Por acreditarem na pesquisa como fonte de trabalho e por acreditarem no meu potencial. Vocês são a base do que sou hoje e serei eternamente grato e honrado por ser filho, irmão, neto, sobrinho, primo, cunhado e agora padrinho de vocês.

Aos meus amigos do peito, de infância, de intercâmbio, de Rio do sul, de Florianópolis, de Rennes ou de Metz, que sempre estiveram presentes nas discussões, nas mazelas, nas vitórias e nos reclames: Zé, Bogo, Tiago, Leo, Rafa, Max, Isabella, André, Gab, Heitor, Vini, Julio, Erika, Bruno Carioca e os outros que mesmo não mencionados aqui, são tão importantes quanto.

À Vanessa por todo o apoio psicológico, por ser a melhor e única.

Especialmente à Anna, por todos os momentos de escuta de qualidade, de carinho, de amor e de conselhos. Por todos os momentos de lazer e descontração que foram essenciais para meu bem-estar. Pelo aprendizado imenso em todas as horas de conversa. E principalmente por me mostrar o outro lado, me ajudar a me desenvolver como pessoa, como homem, como pesquisador e como todos os outros personagens dos quais eu sou constituído.

Muito obrigado.

RESUMO

A utilização do laser com emissão de potência contínua como fonte de energia na soldagem revolucionou a indústria. Sua energia altamente concentrada trouxe precisão e versatilidade, acelerando a produtividade e reduzindo custos com defeitos de soldagem e falhas humanas. O controle preciso da energia aplicada pelo laser através de um uso adequado de aparato de hardware, capacidade de processamento e software abriu uma gama de possibilidades em relação à interação feixe-peça. Porém, alguns desafios no que se refere a redução de defeitos de soldagem e de tensões residuais ainda são desafios a comunidade acadêmica. Nesse sentido, o presente estudo se propõe a avaliar o efeito da modulação da potência de saída do laser, ou seja, o uso da pulsação em baixa frequência da energia entregue às amostras, durante união de materiais metálicos, a fim de observar as diferenças e possíveis melhorias provenientes do método no cordão de solda. Assim sendo, os objetivos deste trabalho constituem, principalmente, avaliar alguns aspectos gerais das soldas provenientes da soldagem a laser de potência modulada, como profundidade de soldagem, porosidade, tamanho de grão e tensões residuais em três diferentes aços SAE, 1020, 1045 e 4140. O projeto de pesquisa partiu da soldagem a laser de pulso contínuo e modulado de corpos de prova de aço SAE 1020 para a confirmação, através de microscopia óptica, da premissa principal da pesquisa: obtenção de cordões de solda de qualidade (à nível de defeitos e profundidade) similar ou superior aos de potência contínua utilizando-se sempre potências médias equivalentes. Os resultados foram divididos em seções. Na primeira seção, a frequência de pulso foi variada, com o objetivo de avaliar a morfologia da solda e a presença de porosidade no aço SAE 1020 através do método radiográfico. Em seguida, soldas contínuas e moduladas foram produzidas em aços SAE 1045 e SAE 4140, visando a análise das tensões residuais através do método do furo cego. A terceira parte apresenta a tentativa de análise de tamanho de grão da solda de aços SAE 1045 através da técnica de EBSD e microdureza Vickers. Por fim, diferentes formatos de entrega de potência são aplicados a fim de avaliar, via microscopia óptica, a profundidade de penetração e a porosidade dos cordões. Os resultados da aplicação da modulação de potência mostraram, para todos os ensaios no regime *keyhole*, cordões de solda mais profundos. Com relação à porosidade, para velocidades de soldagem de 1 m/min, as soldas apresentaram diferentes quantidades de poros para diferentes frequências de modulação, com a amostra soldada a 50 Hz demonstrando menor presença. Os ensaios de furo cego demonstraram valores semelhantes de tensões residuais entre os cordões produzidos via regimes contínuos e modulados, o que sugere uma vantagem do método, visto que os cordões modulados se apresentaram aproximadamente duas vezes mais profundos. As medidas de tamanho de grão, devido à estrutura complexa e ao alto grau de dureza na região da solda, não puderam ser quantificadas via análise de imagem ou EBSD, mas ensaios de dureza Vickers sugeriram, por exclusão, uma possível redução no tamanho médio dos grãos na região da zona fundida. Por fim, a variação do formato da potência modulada mostrou pouca variação de penetração da solda e todos os ensaios realizados à velocidade de 0,75 m/min se apresentaram livre de poros. A modulação de potência trouxe diversas mudanças nas características morfológicas e de defeitos em cordões de solda produzidos a laser, obtendo-se melhorias nos aspectos acima citados, muito devido a sua maior capacidade de controle dos fenômenos oscilatórios presentes durante a soldagem, gerando maior estabilização do processo através de frequências de pulso bem determinadas e rampas de aplicação de potência.

Palavras-chave: Processamento a laser; Modulação de potência; Defeitos de Soldagem;

ABSTRACT

The use of laser with continuous power emission as an energy source in welding has revolutionized the industry. Its highly concentrated energy brought precision and versatility, accelerating productivity and reducing costs with welding defects and human faults. The precise control of the energy applied by the laser through an appropriate use of hardware apparatus, processing capacity and software has opened up a range of possibilities regarding the beam-piece interaction. However, some challenges regarding the reduction of welding defects and residual stresses are still challenges to the academic community. In this sense, the present study proposes to evaluate the effect of the modulation of the laser output power, that is, the use of low frequency pulsation of the energy delivered to the samples, during the union of metallic materials, in order to observe the differences and possible improvements from the method in the weld bead. Therefore, the objectives of this work are, mainly, to evaluate some general aspects of welds from laser welding with modulated power, such as welding depth, porosity, grain size and residual stresses in three different SAE, 1020, 1045 and 4140 steels. The research project started from laser welding of continuous and modulated pulse of SAE 1020 steel specimens to confirm, through optical microscopy, the main premise of the research: obtaining quality weld beads (at the level of defects and depth) similar or superior to those of continuous power, always using equivalent average powers. The results were divided into sections. In the first section, the pulse frequency was varied, in order to assess the weld morphology and the presence of porosity using the radiographic method. Then, continuous and modulated welds were produced in SAE 1045 and SAE 4140 steels, aiming at the analysis of residual stresses through the drilled hole method. The third part presents the attempt to analyze the grain size of the SAE 1045 steel weld using the EBSD technique and Vickers microhardness. Finally, different power delivery formats are applied in order to assess, through optical microscopy, the depth of penetration and the porosity of the welds. The results of the application of power modulation showed, for all tests in the keyhole regime, deeper weld beads. With regard to porosity, for welding speeds of 1 m / min, the welds showed different amounts of pores for different modulation frequencies, with the sample welded at 50 Hz showing less presence. The drilled hole tests showed similar values of residual stresses between the beads produced via continuous and modulated regimes, which suggests an advantage of the method, since the modulated welds were approximately twice as deep. Grain size measurements, due to the complex structure and high degree of hardness in the weld region, could not be measured via image analysis or EBSD, but Vickers hardness tests suggested, by exclusion, a possible reduction in the average size of the weld grains in the melted zone region. Finally, the variation in the shape of the modulated power showed little variation in the penetration of the weld and all tests performed at a speed of 0.75 m / min were free of pores. The power modulation brought several changes in the morphological characteristics and defects in weld beads produced by laser, obtaining improvements in the aspects mentioned above, largely due to its greater ability to control the oscillatory phenomena present during welding, generating greater stabilization of the process through well-determined pulse frequencies and power application ramps.

Keywords: Laser processing; Power modulation; Welding defects;

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema básico dos componentes principais de um laser..... | 23 |
| Figura 2 - Estrutura do laser de fibra. | 25 |
| Figura 3 – Construção de um laser de fibra empregando: a) fibras de bombeamento e b) pacotes de laser de diodo. | 27 |
| Figura 4 - Interação da radiação com a matéria..... | 28 |
| Figura 5 - Interação laser-matéria para diferentes comprimentos de onda de laser (λ) e diferentes materiais. | 29 |
| Figura 6 - Efeito da temperatura na refletividade dos materiais..... | 30 |
| Figura 7 - Comparação entre luz comum e luz laser. | 31 |
| Figura 8 - Características do feixe laser. | 32 |
| Figura 9 - Distribuição gaussiana de energia do feixe do laser, $M^2=1$ | 33 |
| Figura 10 - Modo eletromagnético transversal do feixe laser. | 34 |
| Figura 11 - Sistema óptico do cabeçote laser. | 34 |
| Figura 12 - Intervalos de parâmetros onde atuam os dois mecanismos de soldagem a laser em aços..... | 42 |
| Figura 13 - Representação esquemática dos mecanismos de soldagem a laser: condução e <i>keyhole</i> | 42 |
| Figura 14 - Aspectos externos e internos do laser e da soldagem por condução e <i>keyhole</i> | 43 |
| Figura 15 - Esquema da soldagem por penetração profunda – <i>Keyhole</i> | 44 |
| Figura 16 - Fluxo de massa e de calor durante a soldagem de uma liga de alumínio..... | 45 |
| Figura 17 - Imagens da pluma induzida por laser durante a soldagem..... | 46 |
| Figura 18 - Fluxo de massa durante soldagem a laser contínua. | 47 |
| Figura 19 - Reconstruções 3D e imagens reais da morfologia dos tipos de poros encontrados na liga de molibdênio..... | 48 |
| Figura 20 - Mecanismos de formação de poros: a) poros induzidos pelas oscilações do <i>keyhole</i> , b) poros induzidos pela segregação de hidrogênio. | 49 |
| Figura 21 - Seções transversais de soldas produzidas sob diferentes pressões ambientes..... | 50 |
| Figura 22 - Vistas de topo de soldas produzidas sob diferentes pressões ambientes. | 50 |
| Figura 23 - Seção transversal de um aço SAE 1020 soldado via laser de penetração profunda. | 52 |
| Figura 24 - Parâmetros de soldagem contínua CW e modulada..... | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 - Soldas produzidas a (a) baixas frequências de modulação (40 Hz) e (b) altas frequências (400 Hz) para uma velocidade de soldagem de 6 m/min. | 56 |
| Figura 26 - Efeito da frequência de modulação na quantidade de defeitos das ligas Cu-ETP e CuSn6..... | 56 |
| Figura 27 - Efeito da frequência normalizada de modulação sobre o comprimento acumulado de trincas..... | 58 |
| Figura 28 - Variação do comprimento da poça fundida durante o processamento a laser..... | 58 |
| Figura 29 - Evaporação localizada de metal na parede frontal do <i>keyhole</i> e seu efeito na perturbação na estabilidade da parede traseira da poça fundida..... | 60 |
| Figura 30 - Imagem de transmissão de raio-x mostrando a dinâmica do <i>keyhole</i> em soldagem de potência contínua..... | 61 |
| Figura 31 - Efeito da modulação da potência contínua do laser na redução da porosidade..... | 62 |
| Figura 32 - Formatos de modulação de potência do laser..... | 62 |
| Figura 33 - Correlação entre a formação de bolhas e as oscilações de profundidade do <i>keyhole</i> | 63 |
| Figura 34 - Efeito da frequência de modulação de formato quadrado na formação de porosidade. | 64 |
| Figura 35 - Variações da luminosidade (B_k) e profundidade do <i>keyhole</i> durante os pulsos modulados de laser..... | 64 |
| Figura 36 - Supressão da porosidade via modulação de potência em formato de trapézio..... | 65 |
| Figura 37 - Seções transversais de soldas autógenas da liga AZ31 soldadas via laser a) potência contínua b) de potência modulada de formato sinusoidal com 1000 W de amplitude e c) modulada com 1500 W de amplitude. | 66 |
| Figura 38 - Fluxograma de atividades experimentais. | 68 |
| Figura 39 - Fonte LASER IPG Photonics® YLS - 10000. | 70 |
| Figura 40 - Visão geral do cabeçote óptico..... | 71 |
| Figura 41 - Sistema de movimentação para peças de pequenas dimensões..... | 72 |
| Figura 42 – Vista superior do ambiente projetado para prover segurança a durante processamentos a laser no laboratório LMP/Laser. | 74 |
| Figura 43 - Esquema das características físicas dos corpos de prova a) aço SAE 4140 e b) aços SAE 1020 e 1045. | 75 |
| Figura 44 - Distribuição de energia dos experimentos a) CT1 b) e CT2. | 77 |
| Figura 45 - Distribuição de energia dos experimentos da Tabela 6..... | 78 |

| | |
|--|-----|
| Figura 46 - Aspecto das soldas produzidas com 90% de sobreposição de pulsos..... | 79 |
| Figura 47 - Modulação do laser dos experimentos da Tabela 7. | 80 |
| Figura 48 - Esquema de sobreposição de pulsos do ensaio E11. | 81 |
| Figura 49 - Parâmetros de soldagem do segundo estudo. | 82 |
| Figura 50 - Parâmetros de soldagem do terceiro estudo. | 83 |
| Figura 51 - Distribuição de energia dos experimentos da Tabela 8..... | 85 |
| Figura 52 - Equipamento de medição de tensões residuais via furo cego. | 87 |
| Figura 53 - Seções transversais das soldas CT1 e CT2..... | 90 |
| Figura 54 - Seções transversais das soldas EP1 e EP2. | 91 |
| Figura 55 - Vista superior da solda EP2..... | 92 |
| Figura 56 - Seções transversais das soldas EP3 e EP4. | 92 |
| Figura 57 - Vista superior do cordão EP4..... | 93 |
| Figura 58 - Seções transversais dos cordões CT2, EP4 e CT3..... | 94 |
| Figura 59 - Imagens da seção transversal em alta ampliação da amostra EP1..... | 95 |
| Figura 60 - Vista superior a olho nu das soldas E11 a E15..... | 97 |
| Figura 61 - Seção transversal dos cordões E11 a E15. | 98 |
| Figura 62 - Seções longitudinais das soldas E11 a E15 com setas apontando para os poros e os retângulos indicando áreas de heterogeneidade de penetração. | 99 |
| Figura 63 - Gráfico das dimensões das seções transversais dos cordões E11 a E15..... | 100 |
| Figura 64 - Esquema de sobreposição de pulsos dos ensaios E11 e E15..... | 101 |
| Figura 65 - Lâmina radiográfica das soldas E11 a E15. | 102 |
| Figura 66 - Vista de topo da solda após pintura e perfuração do furo cego..... | 105 |
| Figura 67 - Franjas de contraste do teste de furo cego de a) amostra E25 tensionada, perto da solda e b) amostra E25 relaxado, com furo longe da solda..... | 105 |
| Figura 68 - Valores de tensões residuais dos cordões do aço SAE 1045 soldados sob os parâmetros E21 a E26. | 106 |
| Figura 69 - Seções transversais das amostras de aço SAE 1045 submetidas aos ensaios E24 a E26. | 108 |
| Figura 70 - Imagem de topo do cordão analisado por furo cego do aço SAE 1045 soldado sobre o conjunto de parâmetros E25. | 109 |
| Figura 71 - Valores de tensões residuais dos cordões do aço SAE 4140 soldados sob os parâmetros E21 a E26. | 110 |
| Figura 72 - Seções transversais das amostras de aço SAE 4140 submetidas aos ensaios E24 a E26. | 112 |

| | |
|---|-----|
| Figura 73 - Seções transversais das amostras de aço SAE 1045 submetidas aos ensaios E31 a E33. | 114 |
| Figura 74 - Seções transversais ampliadas em 1000x das amostras E31 a E33. | 114 |
| Figura 75 - Esquema das agulhas de martensita dentro de um grão austenítico. | 115 |
| Figura 76 - Mapa cristalográfico da ZF da amostra E31 obtido via técnica de EBSD. | 116 |
| Figura 77 - Mapa cristalográfico do substrato da amostra E31 obtido via técnica de EBSD. | 117 |
| Figura 78 - Valores de microdureza Vickers da ZF das amostras E31 a E33. | 118 |
| Figura 79 - Seção transversais ampliadas em 200x da amostra E33. | 119 |
| Figura 80 - a) vista de topo e b) radiografia das amostras E41 a E46. | 121 |
| Figura 81 - Seção transversal dos cordões produzidos sob os parâmetros E41 a E46. | 122 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Tipos de laser e seus comprimentos de onda e faixas de potência..... | 24 |
| Tabela 2 – Estado da arte do método de modulação de potência de laser. | 67 |
| Tabela 3 - Características do laser. | 70 |
| Tabela 4 - Composição química dos aços utilizados neste trabalho..... | 76 |
| Tabela 5 - Parâmetros de soldagem autógena com potência contínua..... | 77 |
| Tabela 6 - Etapa 1: parâmetros dos testes iniciais de soldagem com potência modulada..... | 77 |
| Tabela 7 - Estudo da variação da frequência de pulso..... | 79 |
| Tabela 8 - Etapa 3: estudo da forma de modulação de potência. | 84 |
| Tabela 9 - Valores de tensão de escoamento do material de base..... | 106 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CW (*Continuous wave*) Potência contínua

ZF Zona fundida

ZTA Zona termicamente afetada

EBSD *Electron backscattered diffraction* (Difração de elétrons retroespalhados)

TEM *Transverse Eletromagnetic mode* (Modo eletromagnético transversal)

MIG *Metal inert gas*

MAG *Metal active gas*

CNC *Computer Numeric Control* (Comando numérico computadorizado)

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|------------|---------------|--|
| t_{on} | ms | Tempo do laser ligado |
| t_{off} | ms | Tempo do laser desligado |
| λ | nm | Comprimento de onda do laser |
| h | adm | Constante de Planck |
| ν | Hz | Frequência do fóton |
| ® | adm | Marca registrada |
| μ | μm | Micrometros |
| σ | MPa | Tensão de escoamento |
| E | J | Energia |
| A | adm | Absortividade |
| r | μm | Raio do feixe |
| H_y | HV | Microdureza |
| k_y | adm | Constante de resistência |
| d | ASTM | Tamanho de grão |
| H_0 | MPa | Constante de tensão para mover discordâncias |
| f | Hz | Frequência |
| I | adm | Intensidade |
| P_v | kPa | Pressão de vapor |
| P_o | kPa | Pressão ambiente |
| P_σ | kPa | Tensão superficial |
| P_h | kPa | Pressão hidrostática |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA..... | 19 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 21 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 21 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 21 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 22 |
| 2.1 | LASER..... | 22 |
| 2.1.1 | Conceito e geração da luz laser | 22 |
| 2.1.2 | Laser de fibra..... | 24 |
| 2.1.3 | Física da geração da radiação laser | 27 |
| 2.1.4 | Interação laser-matéria | 29 |
| 2.1.5 | Características da radiação e do feixe..... | 31 |
| 2.1.6 | Soldagem a laser | 35 |
| 2.1.7 | Soldagem a laser por condução de calor..... | 39 |
| 2.1.8 | Soldagem de penetração profunda - <i>keyhole</i> | 40 |
| 2.1.9 | Soldagem a laser de aços baixo e médio carbono | 51 |
| 2.1.10 | Soldagem a laser do aço SAE 4140..... | 53 |
| 2.1.11 | Soldagem a laser de potência modulada | 53 |
| 3 | MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... | 68 |
| 3.1 | APARATO EXPERIMENTAL | 69 |
| 3.1.1 | Fonte laser..... | 69 |
| 3.1.2 | Cabeçote óptico..... | 70 |
| 3.1.3 | Sistema de controle e mesa de processamento..... | 71 |
| 3.1.4 | Segurança e infraestrutura | 72 |
| 3.1.5 | Materiais | 75 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.2 | PARAMETRIZAÇÃO | 76 |
| 3.2.1 | Ensaio preliminares | 76 |
| 3.2.2 | Primeiro estudo: efeito da frequência..... | 79 |
| 3.2.3 | Segundo estudo: tensões residuais | 81 |
| 3.2.4 | Terceiro estudo: análise do tamanho de grão..... | 82 |
| 3.2.5 | Quarto estudo: variação do formato de modulação | 84 |
| 3.3 | CARACTERIZAÇÕES | 85 |
| 3.3.1 | Microscopia Óptica..... | 85 |
| 3.3.2 | Ensaio radiográficos..... | 86 |
| 3.3.3 | Método do furo cego | 86 |
| 3.3.4 | Microdureza Vickers | 87 |
| 3.3.5 | Microscopia eletrônica de varredura..... | 88 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 89 |
| 4.1 | Ensaio preliminares..... | 89 |
| 4.2 | Estudo da frequência de modulação | 96 |
| 4.3 | Estudo das tensões residuais | 103 |
| 4.4 | Estudo do tamanho de grão..... | 113 |
| 4.5 | Estudo do formato de modulação..... | 120 |
| 5 | CONCLUSÕES | 124 |
| 5.1 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 125 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 126 |

1 INTRODUÇÃO

O uso do laser como ferramenta de processamento de materiais vem crescendo de forma acelerada desde o final do século XX. Na soldagem, por exemplo, o laser, usualmente com emissão de potência contínua (CW), apresenta inúmeras vantagens em relação a outros tipos de fontes de calor, como por resistência ou arco. Maiores penetrações, visando aplicação em chapas mais espessas, trazem vantagens como reduzidas zonas termicamente afetadas (ZTA) – o que caracteriza o processo de soldagem a laser – devido a instabilidades e defeitos presentes nessa zona. Além disso, o uso de fibras ópticas para levar o feixe do laser à junta de solda possibilita alto grau de automatização, aumentando a produtividade (DONG; SAMSON, 2016) (SHCHERBAKOV, 2013).

Já consolidado como método de soldagem, o processamento via laser encontra-se em constante aprimoramento. Sua frequente reavaliação considera desde os fenômenos físicos e mecanismos do processo até as parametrizações, a maquinaria e as aplicações em novos campos, tanto biológicos quanto mecânicos e eletrônicos.

Os requisitos de serviço em setores como o aeroespacial, que incluem componentes que exigem alta resistência à fadiga, demandam rigorosos padrões de qualidade, que avaliam critérios relacionados à integridade interna da solda e à presença de defeitos como trincas, poros e tensões internas. Além disso, leis e acordos mundiais que visam a redução da emissão de CO₂¹ trazem demandas contínuas à adaptação dos materiais, como carros com chapas mais leves e finas e metais com microestrutura mais complexa. Ainda assim, atualmente, tais especificidades acarretam em dificuldades no controle de defeitos no momento da união e da montagem desses veículos.

Foi reportado na literatura que a formação de defeitos como poros pode ser facilmente identificada em soldas profundas, produzidas pelo fenômeno denominado *keyhole* (MATSUNAWA, 2001). Os poros são uma preocupação, pois atuam como concentradores de tensão, reduzindo a resistência dos materiais e deixando-os suscetíveis a falhas catastróficas. No intuito de reduzir os defeitos de soldagem, pesquisas na área de soldagem a laser visam verificar o efeito de parâmetros como formato e modulação de potência, velocidade de soldagem e profundidade de foco, com o objetivo de obter juntas de solda com melhores

¹ Cf. EUROPEAN COMMISSION. *Reducing CO2 emissions from passenger cars* [s.d.]. Disponível em: <https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en>. Acesso em: 20 jan 2019.

acabamentos, menores zonas termicamente afetadas e menos defeitos para aplicações de alta performance.

A modulação da potência possibilita a manipulação do formato de onda e é utilizada tanto em processo a laser quanto em processos a arco, com o objetivo de entregar a energia de maneira intermitente ou variante. A intermitência redistribui a energia anteriormente mencionada, alterando a forma com que o calor é entregue ao material e, assim, aumentando as possibilidades de combinação de parâmetros do feixe e da interação do feixe com a peça, o que traz vantagens à busca pela otimização no processo de soldagem a laser. Alguns parâmetros, como o tempo de pulso ligado (t_{on}), tempo de pulso desligado (t_{off}), frequência e formato de pulso são passíveis de controle, possibilitando a manipulação das características finais e dos fenômenos presentes na junta durante a soldagem, como o *keyhole* e a formação de defeitos.

É sabido que, para alguns casos específicos, a modulação da potência do laser traz muitas vantagens comparada ao modo contínuo, tendo em vista os diversos defeitos inerentes ao processo de soldagem, como por exemplo, trincas, falta de fusão, falta de penetração, mordeduras e inclusões. Em outras publicações, é relatada como um método que entrega juntas de solda mais estreitas e profundas (ZHANG et al., 2014), além de reduzir a porosidade da solda de materiais metálicos (MATSUNAWA et al., 2003) (MATSUNAWA et al., 1998).

Nesse sentido, cabe mencionar alguns resultados de trabalhos que avaliaram o método de modulação da potência do laser. O estudo de Kuo e Jeng (2005), por exemplo, reportou a redução de porosidade e, conseqüentemente, valores mais elevados de resistência à tração em chapas de aço inoxidável SAE 304L e de liga Inconel 690 com 3 mm de espessura, modulando a potência de saída de um laser Nd:YAG. Da mesma maneira, a pesquisa de Eberle e Richter (1994) concluiu que modulação por combinação de laser contínuo com laser pulsado aumentou a soldabilidade de ligas de alumínio, gerando cordões mais profundos e uniformes, com aplicação de potências médias muito menores. Heider (2015) alcançou um estado mais estável de processamento de soldagem a laser de ligas de Cu através da modulação da potência do laser. Além disso, o pesquisador observou uma redução na quantidade de respingos e poros, além de menores flutuações na profundidade de penetração. Stritt (2011) utilizou a modulação da potência do laser para investigar a transição do regime de condução para o regime *keyhole* de uma liga de alumínio e uma liga de aço. O formato sinusoidal de potência possibilitou ao pesquisador, devido a variação de potência com o tempo, identificar com mais clareza o início da transição entre os dois regimes. Shao (2017) utilizou a modulação da potência do laser obter diferentes tipos de coloração em seu trabalho de pigmentação de nanopartículas para segurança

contra falsificações. A coloração das nanopartículas eram fortemente dependentes do calor a elas incidido. A modulação permitiu a obtenção de diferentes tipos de pigmento graças a diferente forma de entrega do calor às partículas. Ning (2019) obteve uma melhor eficiência na energia de soldagem de uma liga de magnésio AZ31 com alta refletividade modulando um laser infravermelho com a potência em formato sinusoidal. Os pesquisadores observaram que uma vez aberta a cavidade *keyhole*, a refletividade caía, e o aumento da potência via modulação era mais bem aproveitado. Matsunawa et al. (2003) também chegaram a cordões de solda mais profundos e estreitos soldando um aço inox AISI 304L com laser de potência modulada, mantendo a potência média do pulso contínuo. Schaeffer et al. (2017) obtiveram sucesso na eliminação de trincas a quente de um aço temperado 42CrMoS4 através da modulação com grandes amplitudes. Hugenschmidt (1987) demonstrou experimentalmente que a frequência de pulso de 100 Hz combinada com altas potências de saída resulta em um melhor acoplamento do que os de soldas produzidas a pulso contínuo, além de constatar que a qualidade final da solda foi melhorada pela modulação, apresentando menos defeitos. Por fim, Wilden et al. (2009) obtiveram microestruturas de grão mais refinado quando soldaram amostras de titânio grau 1, aço inoxidável austenítico e alumínio; os pesquisadores observaram também a mudança no crescimento de grão dessas amostras de colunar para equiaxial, demonstrando mais um artifício possibilitado pelo método da modulação.

Tendo em vista os trabalhos citados, são claros os benefícios provenientes do método de modulação de potência do laser, o que abre espaço para mais investigação na busca de componentes de alta performance e com menos defeitos.

1.1 JUSTIFICATIVA

A tentativa de redução ou supressão dos defeitos de soldagem anteriormente citados, bem como a busca por soldas mais profundas, geram, hoje, considerável gasto energético e financeiro por parte da comunidade acadêmica e do mercado na busca pela obtenção de juntas de solda com mais alta performance. Como já mencionado, o laser possibilitou a automatização e o controle mais refinado no processo de soldagem, que há muito já trouxe problemas de repetibilidade e de precisão. Apesar dessas melhorias, alguns desafios ainda são visíveis.

Desde o final do século passado a utilização da modulação da potência do laser com o objetivo de reduzir defeitos provenientes da soldagem, vem abrindo caminho para novos métodos de entrega de energia do laser. Hoje, novas tecnologias de programação possibilitam

o controle ainda mais preciso das rampas de potência, da velocidade de soldagem e da frequência de pulso, tornando viáveis inúmeras combinações de parâmetros e, conseqüentemente, aumentando a versatilidade do processo.

Outros autores previamente citados utilizaram-se da mesma metodologia para fins de redução de defeitos como trincas a quente, porosidade e respingos, além da busca de melhoramento de algumas características físicas e estruturais como aumento da razão de aspecto, refino de grão e menor ZAC. Todavia, através de pesquisa na literatura, foi observado um espaço tecnológico de investigação em duas vertentes na utilização do método discutido: o estudo das tensões internas residuais provenientes da soldagem via potência modulada do laser e o da influência do formato de entrega de energia do laser na morfologia final do cordão, tornando interessante para o presente trabalho a abordagem dessas duas vertentes.

As tensões residuais influenciam fortemente no desempenho mecânico de peças estruturais, podendo facilitar o aparecimento de trincas e de deformações e empenamentos indesejados. Ademais, transformações de fase são fontes de tensões residuais, uma vez que podem produzir expansões de volume (MACHERAUCH; WOHLFAHRT, 1977), fazendo com que a redução dessas tensões seja desejada em componentes suscetíveis a transformações de estrutura com variação de volume.

Em seguida, a segunda vertente trata da avaliação do formato de entrega de energia do laser. A modulação via linguagem de comando numérico possibilita a manipulação total da energia do laser, permitindo a aplicação de rampas de elevação de potência, patamares com tempos bem determinados, ondas curvas com formatos senoidais e rampas de descida até o desligamento total. A forma com a qual a potência é entregue ao material é de grande influência nas características finais em cordões de solda (KAWAGUSHI; TSUKAMOTO, 2003), visto que uma grande quantidade de fenômenos é observado durante a abertura e fechamento da cavidade de soldagem, alterando-se a absorvidade do material, seu estado físico e sua superfície.

As informações acima citadas justificam e abrem caminho para a primeira exploração a nível metalúrgico, através desse trabalho, do método de modulação de potência no laboratório LMP/Laser, que até então utilizava unicamente o método tradicional de potência contínua na produção de soldas a laser. Em seguida, já dentro do escopo da pesquisa, pretende-se aplicar o método de modulação de potência, avaliando metalurgicamente as soldas produzidas em diferentes materiais de grande utilização industrial, gerando documentação e capital intelectual para trabalhos futuros desde os ensaios e avaliações mais iniciais, apenas observando os cordões

visualmente, até análises de estruturas mais complexas como tensões residuais, tamanho de grão e porosidade. Os aços escolhidos como substrato dessa pesquisa foram os SAE 1020, 1045 e 4140. A escolha desses aços é justificada pela grande utilização pela indústria metalúrgica e pelo diferente grau de temperabilidade e elementos de liga entre eles, o que sugere diferentes níveis de tensões residuais e outras características que serão investigadas durante o trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o efeito da modulação da potência do laser nos aços SAE 1020, 1045 e 4140 durante o processamento de soldagem, comparando com a soldagem dos mesmos aços em regime contínuo, observando as diferenças e possíveis melhorias no que se refere a defeitos, morfologia e tensões residuais.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a profundidade de soldagem e aspectos gerais da morfologia de soldas produzidas sob os regimes de condução de calor e *keyhole*.
- Avaliar o efeito da frequência de modulação na quantidade final de poros das soldas.
- Analisar e comparar, utilizando ensaios de furo cego, os estados de tensão residual de soldas produzidas via potência contínua e modulada.
- Avaliar o efeito da distribuição de potência via modulação por degraus no tamanho de grão da ZF de soldas produzidas via laser.
- Comparar, a nível de profundidade de soldagem e porosidade, soldas produzidas sob diferentes formatos de modulação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção tem como objetivo a revisão das tecnologias empregadas neste trabalho, possibilitando ao leitor o conhecimento do objeto de estudo, desde o equipamento utilizado até o processamento em si, trazendo conceitos físicos, químicos e mecânicos essenciais para a completa compreensão da pesquisa, detalhando o laser e os processos que vão da interação com a matéria à sua aplicação na soldagem e os objetivos na produção de soldas sem defeitos e de boa qualidade.

2.1 LASER

A compreensão do uso da ferramenta laser no processamento dos materiais é de extrema importância para o entendimento deste trabalho, uma vez que suas variações de uso serão peça-chave no aspecto final do material processado. Por esse motivo, o objetivo desta seção é explicar de uma forma geral como é produzida a luz laser e quais os fenômenos e vantagens que levam ao processamento de materiais através dessa técnica.

2.1.1 Conceito e geração da luz laser

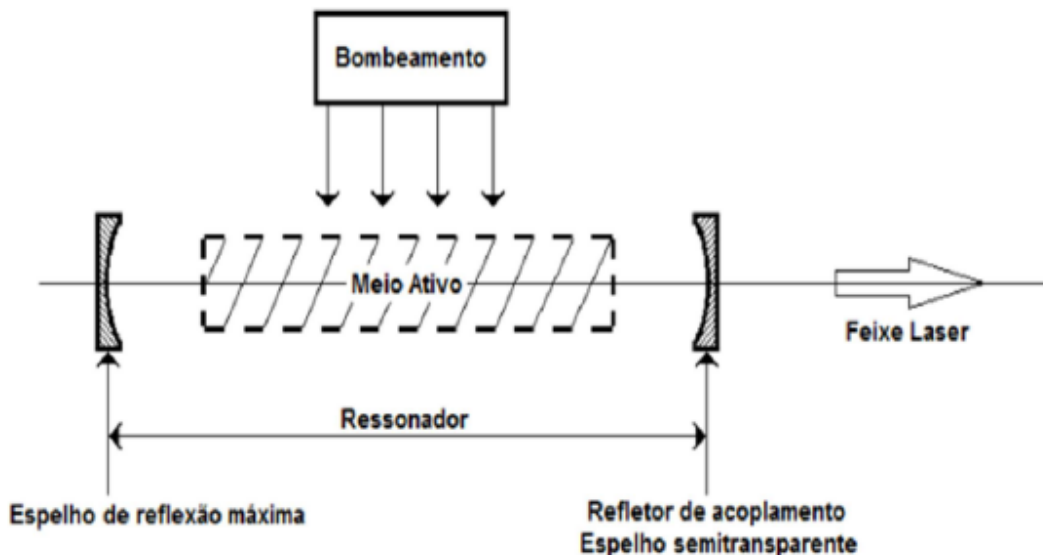
A palavra laser é um acrônimo para “*light amplification by stimulated emission of radiation*”, que em tradução livre significa “amplificação de luz por emissão estimulada de radiação”. A tecnologia foi primeiramente proposta teoricamente por Schawlow e Townes (1958), tendo o primeiro protótipo sido criado por Maimann em 1960, e vem sendo utilizada desde então para diversos tipos de aplicação, desde os campos da engenharia – através de processamentos como soldagem, corte, marcação, polimento, entre outros – até a área da medicina oftalmológica e estética, por exemplo (LAWRENCE et al., 2017). O uso do laser na indústria aumentou consideravelmente a automatização e a reprodutibilidade dos componentes a ele submetidos, melhorando a qualidade final e a velocidade de processamento de materiais, além de reduzir sensivelmente os custos com retrabalhos e refugos. Esses resultados estimularam as pesquisas visando ao emprego do laser em variados campos industriais, como o das indústrias naval, automobilística, aeronáutica e de máquinas (STEEN; MAZUMDER, 2010).

A justificativa para essa série de vantagens vem da natureza energética do feixe do laser, por conta de sua alta conversão de energia quando interage com um meio. Além disso, a aparelhagem do laser possibilita o total controle da quantidade, do formato e da distribuição da energia que será entregue durante o processamento, tornando-o preciso e reproduzível (POPRAWA, 2011).

A radiação laser é um tipo de radiação eletromagnética monocromática, coerente e colimada (STEEN; MAZUMDER, 2010). Uma característica importante e que possibilita o uso do laser como fonte de processamento é que ele é capaz de emitir luz com comprimento de onda (λ) único e definido. O comprimento de onda está relacionado à energia do fóton, e, assim, exerce uma forte influência na interação entre laser e matéria, além de ser a grandeza fundamental da diferenciação dos tipos de laser encontrados na indústria.

Para produzir um feixe de laser, são necessários 3 componentes básicos representados pela Figura 1: um meio ativo, que atua como o amplificador de luz; uma fonte de bombeamento de energia, que excitará o meio ativo através da transferência de energia; e um ressonador óptico, componente responsável pela reflexão, distribuição, condução e transmissão do feixe de laser (STEEN; MAZUMDER, 2010).

Figura 1 - Esquema básico dos componentes principais de um laser.



Fonte: adaptado de Hitz et al. (2012)

Os materiais sólidos são os meios ativos mais comuns, como por exemplo o rubi, Nd:YAG e Nd:glass e os gases como CO₂, CO, argônio e nitrogênio. Cada distinto meio ativo produzirá um feixe de laser com comprimento de onda bem definido. As fontes mais usadas

incluem lâmpadas de luz incoerente, lasers, elétrons (descargas de gás ou feixes de elétrons), reações químicas, feixes de íons e fontes de raios-x. A potência de saída pode ser controlada tanto pela potência de bombeamento quanto pela quantidade de meio ativo (STEEN; MAZUMDER, 2010). A Tabela 1 apresenta alguns tipos diferentes de laser, bem como seus comprimentos de onda e faixas de potência utilizáveis. Este trabalho concede destaque especial ao laser de fibra por ter sido aquele utilizado no processamento.

Tabela 1 - Tipos de laser e seus comprimentos de onda e faixas de potência.

| Laser | Faixa de Potência (W) |
|---|------------------------------|
| Apontadores Laser | 1-5 mW |
| Leitor de CD-ROM | 5 mW |
| Leitores de DVD | 5-10 mW |
| Gravadores de CD | 100 mW |
| Gravadores de DVD | 400 mW |
| Maioria dos Lasers de microusinagem | 1-20 W |
| Lasers cirúrgicos de CO ₂ | 30-100 W |
| Lasers de corte de CO ₂ utilizados na indústria | 10-3000 W |
| Saída alegada do laser de CO ₂ para uso militar desenvolvido pela Northrop Grumman | 100 kW |

Fonte: elaborada pelo autor (2020).

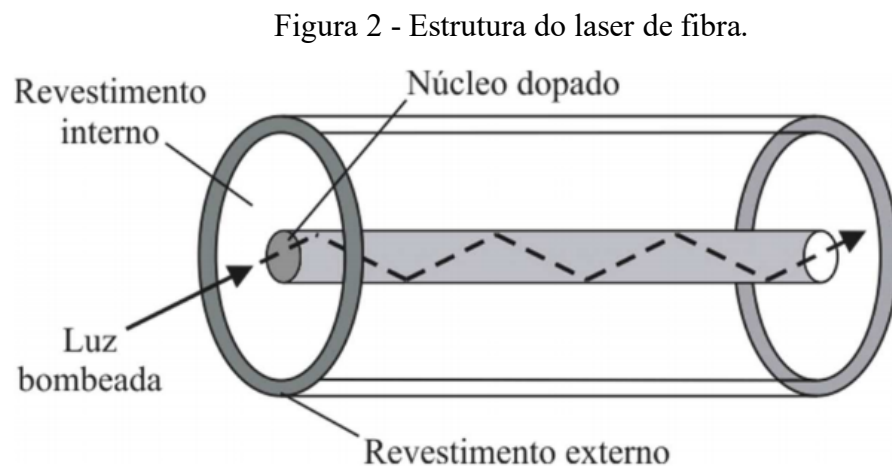
2.1.2 Laser de fibra

Um laser de fibra é um laser cujo ressonador é baseado em uma fibra óptica dopada no núcleo e recoberta por um revestimento. A energia luminosa é bombeada através do revestimento para o núcleo, e, assim, na fibra dopada, se estabelece a ressonância dos fótons no comprimento de onda específico. Fontes de bombeamento podem ser lasers de diodo ou até mesmo outros lasers de fibra. Os espelhos nas extremidades da fibra dopada do núcleo são substituídos por uma grade de Bragg em cada extremidade, sendo totalmente refletiva em uma extremidade, e parcialmente transmissiva na outra extremidade da fibra. Em decorrência de seu grande comprimento e seu pequeno diâmetro, a dissipação da energia não transformada em radiação laser é realizada pela superfície da fibra. O laser de fibra emite um feixe de baixa divergência e com comprimento de onda na ordem de 1060 – 1085 nm.

A morfologia da fibra é de grande importância nas características finais do laser e na qualidade final da energia gerada. A estrutura inclui um núcleo interno dopado e um externo não dopado pelo qual a luz é canalizada, possuindo um revestimento externo. O núcleo externo não dopado orienta a luz de bombeamento ao longo da fibra. A emissão estimulada passa através do centro do núcleo externo enquanto o interno, que contém o dopante, é estimulado a emitir mais radiação a partir da energia que recebe do bombeamento.

Uma grande vantagem do laser de fibra é o longo comprimento do meio de ganho, o que favorece o bombeamento, oferecendo alta eficiência na conversão de fótons. Além disso, a condução do feixe é facilitada devido à flexibilidade da fibra óptica e à baixa perda de energia, levando a energia a posições não usuais de processamento.

A fibra óptica na fonte de laser de fibra é dotada de um núcleo dopado com íons de terras raras, principalmente os de érbio (Er), neodímio (Nd), itérbio (Yb), túlio (Tm) ou praseodímio (Pr) (PASCHOTTA, 2019). A energia que provoca a emissão estimulada é bombeada para dentro do revestimento da fibra central, como ilustrado na Figura 2.



Fonte: adaptada de Dong e Samson (2016).

Muitas mudanças e progressos vem sendo obtidos na tecnologia laser, com o desenvolvimento de novos meios de geração e o gradual aumento de potências máximas possíveis (INJEYAN; GOODNO, 2011). Uma larga utilização do laser de Nd é observada atualmente na indústria, devido ao seu uso inicial nos primeiros lasers de estado sólido. Porém, há um interesse especial pelo uso do Yb como elemento dopante. Comparado ao Nd, os íons de Yb apresentam melhor eficiência de conversão elétrica-óptica e maior possibilidade de alteração da emissão dentro da faixa de comprimento de onda emitido, que varia em torno de 1

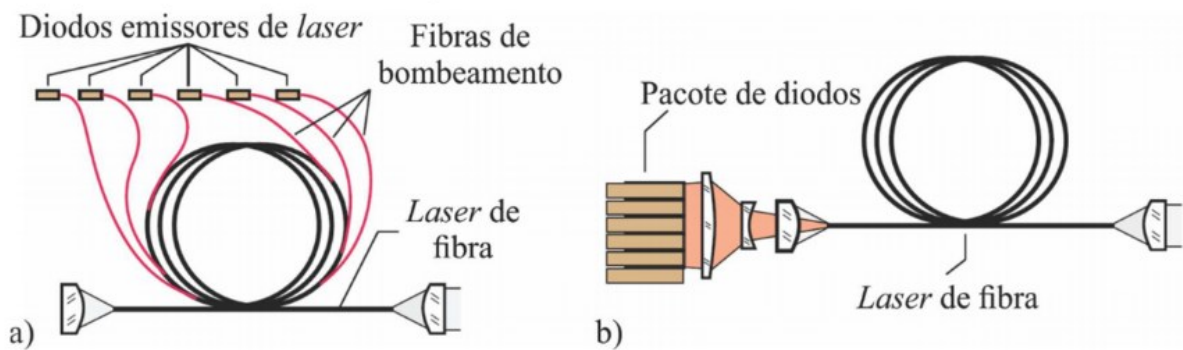
μm (TER-MIKIRTYCHEV, 2016). A fibra ativa possui alguns décimos de milímetros de diâmetro e vários metros de comprimento, o que contrasta com outras fontes de estado sólido. Em uma fonte de laser Nd:YAG, por exemplo, os cristais do núcleo dopado têm de 8 a 10 mm de diâmetro e de 100 a 200 mm de comprimento. Isso confere a fibra óptica uma maior relação superfície/volume, que facilita o resfriamento, possibilitando o arrefecimento via ar, em comparação com o laser Nd:YAG que o arrefecimento exige meios líquidos para uma remoção de calor desejável. Este desenvolvimento reflete, sobretudo, na possibilidade de utilização do laser como forma de processamento, ampliando sua versatilidade como ferramenta.

O laser de fibra vem ganhando destaque, principalmente no início deste século, devido à sua comercialização para equipamentos industriais e militares. Uma série de vantagens justifica essa maior utilização do laser de fibra. Comparados à tecnologia Nd:YAG e CO₂, destacam-se, segundo Injeyan & Goodno (2011):

- a) confiabilidade e robustez;
- b) maior eficiência energética;
- c) baixa necessidade de manutenção;
- d) equipamento com pequenas dimensões e volume;
- e) capacidade de operação no modo Contínuo (CW) em grandes potências e com excelente qualidade de feixe;
- f) rápida inicialização e operação em máxima potência, sem necessidade de ciclos de aquecimento;
- g) flexibilidade na entrega do feixe para a operação, devido à condução por fibra;
- h) baixo custo (em relação a outros lasers).

Recentemente, o desenvolvimento da tecnologia de geração de laser de fibra em múltiplos módulos que utilizam diodos (PASCHOTTA, 2019) como fonte de bombeamento, tornou possível o alcance de potências na ordem de grandeza de 100 kW (KATAYAMA, 2015). Em resumo, a luz laser é gerada dentro de cada diodo e então a potência final será a combinação de cada módulo ligado, como ilustra a Figura 3. A utilização dos diodos permite o alcance de uma melhor eficiência global em comparação com outros meios de bombeamento.

Figura 3 – Construção de um laser de fibra empregando: a) fibras de bombeamento e b) pacotes de laser de diodo.



Fonte: adaptada de Poprawe (2011).

Essa combinação de módulos tem como peça-chave o combinador de feixes, que possibilita que altas magnitudes de potência sejam alcançadas. A adição de módulos pode acrescentar cada vez mais a potência final da geração do laser até o ponto limite onde o combinador consiga somar as energias recebidas.

Embora o laser de diodo possua melhor eficiência de conversão, como anteriormente mencionado, o laser de fibra apresenta melhores características de qualidade de feixe emitido. Seu formato alongado e diâmetro reduzido faz com que a distribuição de energia seja próxima a gaussiana, ao passo que nos diodos, devido ao seu princípio construtivo, apresentam distribuição de energia irregular. Os fundamentos de qualidade de feixe serão apresentados com mais detalhes em seções posteriores.

2.1.3 Física da geração da radiação laser

A amplificação da radiação e a consequente produção da luz laser são resultados da interação entre a energia fornecida pela fonte de bombeamento e os átomos e moléculas do meio ativo. Sistemas atômicos (como átomos, íons e moléculas) possuem estados de energia definidos. Em um átomo, cada órbita ocupa certo nível energético. A transição entre o nível de energia E_1 para o nível E_2 resulta na absorção de energia. Ao ocorrer o retorno ao nível de energia menos energético, a emissão de um fóton de frequência ν_{12} é observada. Essa energia é dada pela Equação 1, sendo h a constante de Planck.

$$h\nu = |E_1 - E_2| \quad (1)$$

Em relação às transições de níveis de energia, há três processos principais, identificados por Einstein, através dos quais os átomos interagem com campos eletromagnéticos:

1. Absorção;
2. Emissão espontânea;
3. Emissão estimulada.

O primeiro mecanismo de interação caracteriza-se pela absorção de um fóton por um sistema em um estado de energia mais baixo, saltando para um estado de energia mais excitado. Em um segundo momento, ocorre a emissão do fóton – que pode se dar de maneira espontânea ou estimulada. Espontaneamente, quando o átomo decai novamente para o nível 1 de energia, o excedente $h\nu$ é liberado em forma de um novo fóton de direção e polarização aleatória.

Já o processo estimulado é o reverso da absorção, e é o que ocorre na produção do laser. O átomo cede seu excesso de energia para o meio através de um fóton, pelo estímulo de outro fóton incidente, e adquire coerência, ou seja, o fóton adicionado possui então a mesma frequência, a mesma fase, o mesmo sentido e a mesma polarização e se propagará na mesma direção da onda que o estimulou. O número de fótons coerentes liberados dependerá da quantidade de átomos presentes no estado excitado; portanto, a emissão do feixe de laser só acontecerá quando existir uma inversão de população de elétrons, por conta da qual eles se encontrarão em maior número nos níveis superiores de energia em relação ao nível mais estável, sendo suscetíveis ao estímulo (STEEN; MAZUMDER, 2010).

Os três processos são ilustrados pela Figura 4 por dois sistemas separados por uma energia $h\nu$, em que h é a constante de Planck e ν é a frequência de onda.

Figura 4 - Interação da radiação com a matéria.

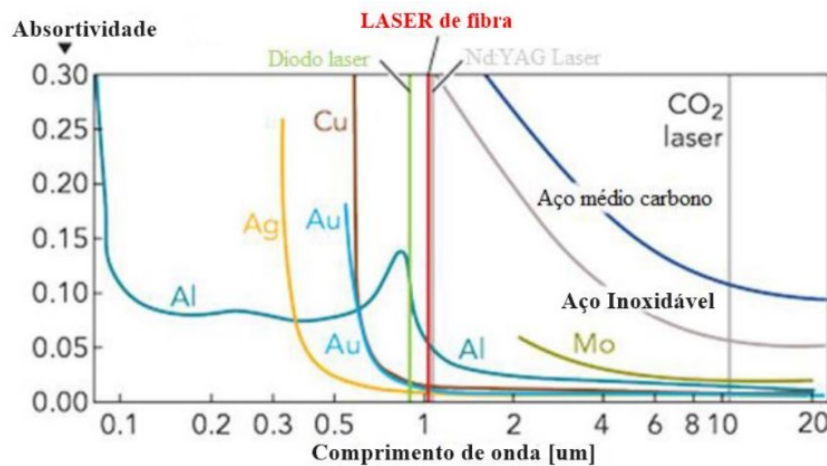


Fonte: adaptado de Hitz et al (2012)

2.1.4 Interação laser-matéria

A interação entre o feixe de laser e o material incidido exige a compreensão de fenômenos como a reflexão e a absorção da radiação. Como mencionado na seção anterior, cada tipo de meio ativo produz um laser de caráter monocromático e de comprimento de onda bem definido. Desse modo, diversos tipos de laser, com uma enorme gama de comprimentos de onda, são possíveis de serem gerados, existindo fatores de absorção específicos da interação entre um determinado material e um determinado comprimento de onda, como ilustrado na Figura 5. Isso quer dizer que cada material possui sua característica própria de absorção de radiação laser para cada comprimento de onda emitido.

Figura 5 - Interação laser-matéria para diferentes comprimentos de onda de laser (λ) e diferentes materiais.



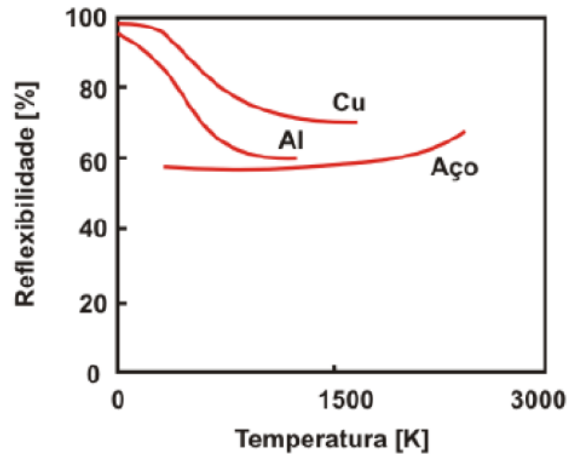
Fonte: Baumbach et al. (2017)

Os valores do coeficiente de absorção dos materiais variam com sua refletividade, seguindo a Equação 2, para materiais opacos (STEEN; MAZUMDER, 2010):

$$\text{Refletividade} = 1 - \text{absortividade} \quad (2)$$

A refletividade indica a quantidade de laser que é refletida pela superfície do material da peça. A alta refletividade de certos materiais, como alumínio e cobre, dificulta seu processamento via essa técnica. Entretanto, algumas variáveis como a temperatura e a texturização da superfície podem aumentar ou diminuir a absorvidade desses materiais, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Efeito da temperatura na refletividade dos materiais.



Fonte: Steen & Mazumder (2010)

Devido ao aquecimento instantâneo do material promovido pelo laser, pode-se afirmar que sua absorção varia no decorrer do processamento, levando a instabilidades.

Quanto menor o comprimento de onda do laser incidente, mais fótons energéticos podem ser absorvidos por um número maior de elétrons ligados. Então, a refletividade decai e a absorvidade na superfície aumenta, como ilustrado na Figura 5.

Nesse sentido, Poprawe (2011) traz uma definição menos genérica sobre a absorção dos materiais. Em seu livro, o autor define a energia absorvida como sendo dependente do coeficiente de absorção (A) da intensidade (I) e do comprimento de onda do laser (λ); já a intensidade (I) é definida como dependente do raio do feixe (r), do tempo de incidência efetiva (t) e também do comprimento de onda (λ) (Equação 3).

$$W_A = \iint A(\lambda; I) I(\lambda; r; t) d^2r dt \quad (3)$$

A absorção de energia depende também de variáveis externas ao material, como acabamento superficial, condição de oxidação da superfície, polimento e geometria. O diâmetro do feixe que é incidido sobre a peça depende do comprimento de onda, da qualidade do feixe gerado na fonte e do sistema óptico de foco utilizado. O índice de absorção do laser também varia com o estado físico do material submetido a processamento, sendo de extrema importância para processamentos onde há fusão e vaporização de material, como no caso da soldagem. Matsunawa (2008) afirmou que a absorvidade de um material submetido a soldagem a laser aumenta quando passado do estado sólido para o líquido e continua a aumentar quando passado

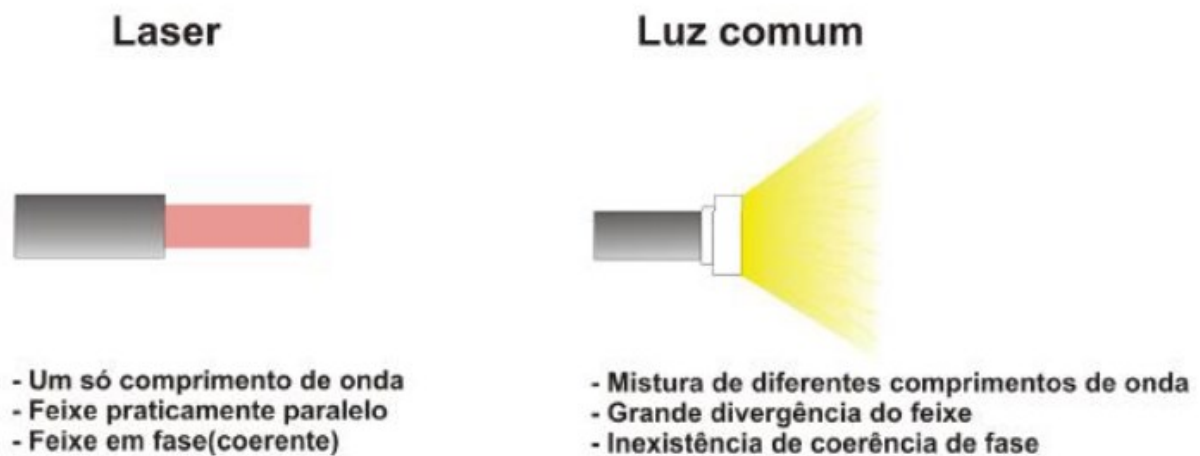
do estado líquido para o gasoso, criando instabilidades nos transportes de massa e movimentos de convecção e evaporação durante o processamento de soldagem.

Analisando as equações e a quantidade de variáveis, portanto, torna-se evidente a enorme gama de possibilidades de interação e entrega de energia do laser aos componentes soldados via essa tecnologia.

2.1.5 Características da radiação e do feixe

A coerência da radiação laser é o que possibilita seu emprego em diversas aplicações tecnológicas. Ela pode ser utilizada desde a identificação e caracterização de estruturas de átomos até controlar reações químicas complexas. Pela sua direcionalidade, esta pode transportar energias por longas distâncias ou focar essa energia sobre áreas de tamanho micrométricos. Por esse motivo, o laser é uma luz diferente de qualquer outra fonte luminosa. Na Figura 7 é mostrado um esquema comparativo entre o laser e a luz comum.

Figura 7 - Comparação entre luz comum e luz laser.



Fonte: Rzany (1995)

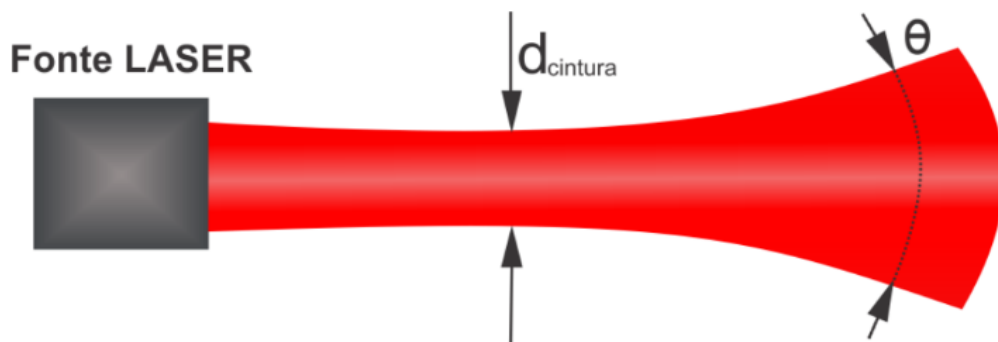
A qualidade do feixe é um fator de extrema importância para processamentos a laser. É ela que vai conferir precisão, qualidade e bom acabamento aos processos, além de ser uma característica essencial de compreensão, visto que o feixe é a ferramenta principal de processamento. Nas fontes laser de alta potência, a capacidade de focalização do laser é um fator crítico, visto que uma focalização eficiente se traduz em um feixe de diâmetro reduzido e maior densidade de potência, com menor profundidade de campo. A capacidade de focalização

do feixe do sistema laser é frequentemente atribuída a qualidade do feixe, podendo ser mensurada de diversas maneiras. Segundo a norma ISO 11146-1 (2005) e 1999, os parâmetros que mensuram a qualidade do feixe de um laser são:

- O número BPP (*beam parameter product*), que é dado pelo produto entre o ângulo de divergência do campo distante de um feixe (Θ) e o raio do feixe em seu ponto mais estreito, a cintura do feixe $\frac{dcintura}{2}$, como representado na Figura 8. Quanto menor o BPP de um laser, maior a profundidade de foco, sendo dado pela Equação (4):

$$BPP = \frac{\left(\frac{dcintura}{2}\right) * \Theta}{4} \quad (4)$$

Figura 8 - Características do feixe laser.

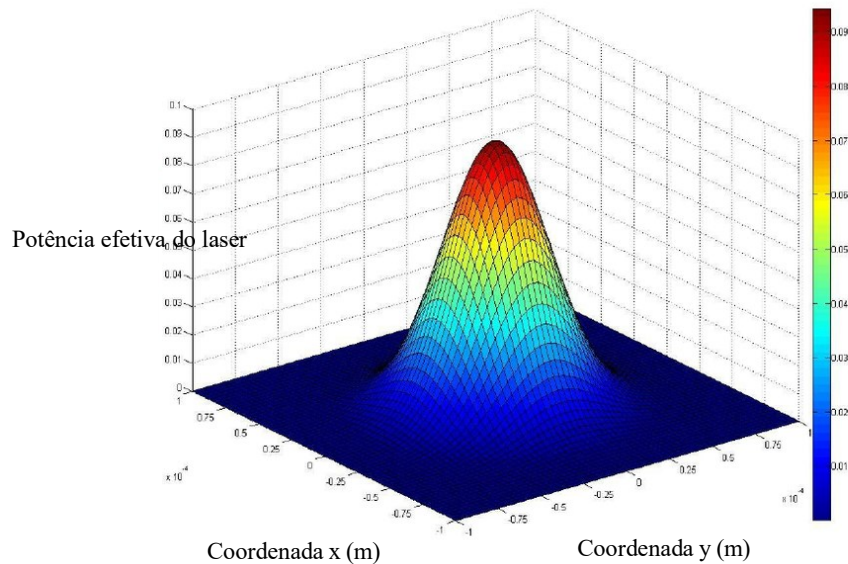


Fonte: adaptado de Suder (2011)

- O fator M^2 , chamado de fator de qualidade do feixe. Ele traça uma comparação com um feixe de formato gaussiano, considerado ideal, medindo o nível de divergência a esse estado. Por exemplo, um feixe que possui valor de $M^2 = 1,2$, irá fornecer um diâmetro do feixe maior em 20% comparado ao um laser ideal gaussiano ($M^2 = 1$) (ION, 2005). O fator M^2 é definido pela Equação (5):

$$M^2 = BPP * \frac{\pi}{\lambda} \quad (5)$$

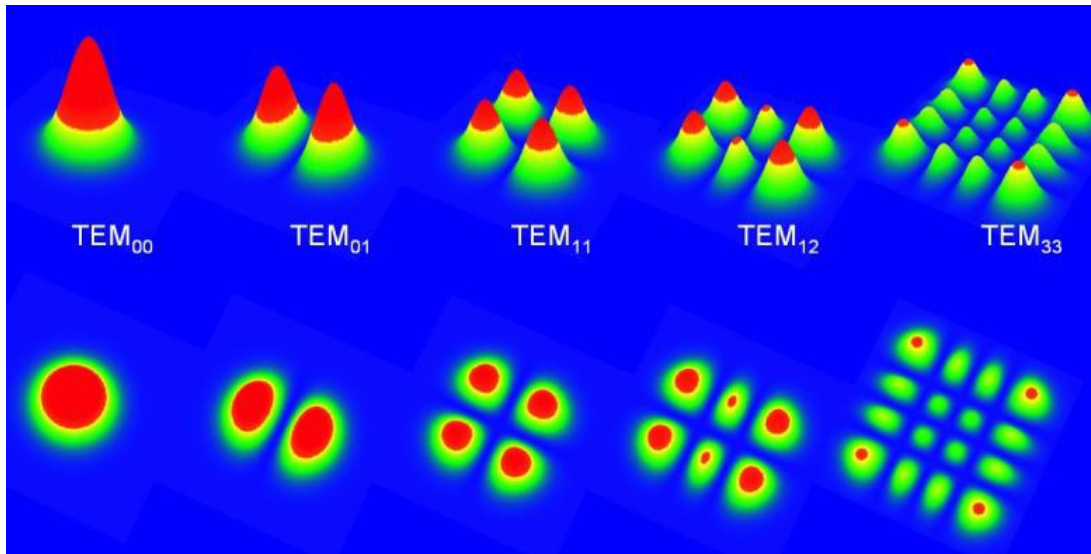
A Figura 9 ilustra um feixe laser com $M^2 = 1$ ou gaussiano. Mostrando a distribuição de energia em torno do feixe.

Figura 9 - Distribuição gaussiana de energia do feixe do laser, $M^2=1$ 

Fonte: Chong et al. (2014)

Outra característica importante do feixe laser é a sua distribuição transversal de energia, também conhecida como modo eletromagnético transversal, do inglês *Transverse Eletromagnetic mode* (TEM), e significa a maneira como a energia se distribui ao longo do eixo paralelo ao eixo de emissão do laser. Essa característica tem como variáveis dependentes o meio ativo da fonte de geração, a potência máxima de aplicação e o sistema óptico utilizado na colimação do feixe. Na Figura 10, são mostrados alguns modos de distribuição transversal do feixe laser. É importante frisar que os modos diferentes do TEM₀₀ não são usuais e tornam-se quase impraticáveis para processamentos de soldagem.

Figura 10 - Modo eletromagnético transversal do feixe laser.

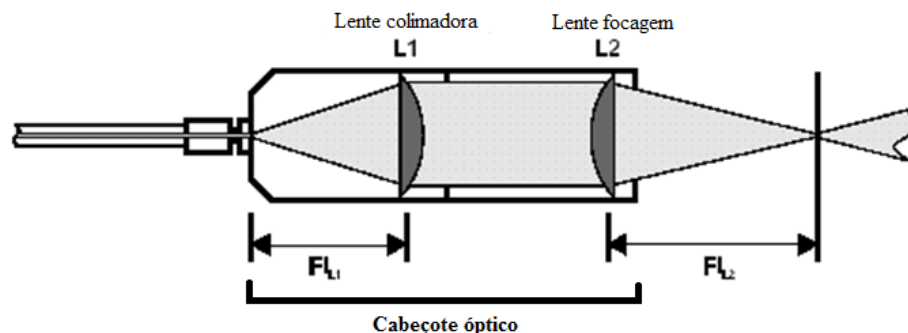


Fonte: Rzany (1995)

O parâmetro TEM exerce grande influência na interação do laser com o material, sendo o feixe TEM_{00} o que mais se aproxima da distribuição normal (gaussiana) de energia e o utilizado neste trabalho, devido a não disponibilidade dos demais modos. Esse formato permite menor diâmetro focal e, conseqüentemente, maior concentração de energia no centro da distribuição, facilitando o processamento.

O parâmetro TEM possui forte dependência do sistema de lentes e de focalização do laser. Esta aparelhagem é de extrema importância para que o feixe obtido seja de distribuição bem definida, de pequena dimensão e de foco bem definido. Ao sair da fibra, o feixe laser sofre uma divergência, como é ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Sistema óptico do cabeçote laser.



Fonte: Souza (2017)

O sistema óptico do cabeçote deve condicionar o feixe através de um conjunto de lentes até que o feixe seja direcionado a um ponto focal definido, que será o ponto onde a energia do laser estará mais concentrada. Os componentes do sistema óptico tem de estar livres de contaminações ou impurezas, visto que esses agentes podem reduzir a qualidade final do feixe incidido. As lentes são trocadas esporadicamente devido a respingos de processamento que acabam deixando marcas irremovíveis no conjunto.

2.1.6 Soldagem a laser

Por definição, a soldagem é uma operação que visa obter a coalescência (junção, aderência) localizada, obtida pelo aquecimento através de aplicação de energia até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição (JENNEY; O'BRIEN, 1997).

Na literatura, a soldagem a laser usualmente leva a nomenclatura de LBW, do inglês *laser beam welding*, e consiste na incidência de luz laser como fonte de energia para o processo de fusão de dois materiais. Esse procedimento, em conjunto com a soldagem por feixe de elétrons ou de íons, representa o que há de mais alta tecnologia em processos de soldagem com alta densidade de energia.

Materiais podem ser processados via soldagem a laser através de dois mecanismos, que dependem de características do feixe como densidade de energia empregada e da solda como morfologia final:

- a) Soldagem por condução de calor;
- b) Soldagem por penetração profunda ou *keyhole*.

A densidade de energia é dada pela relação entre a potência (W) e a área do foco incidente (cm^2) – W/cm^2 . Atenção especial será dada a cada modo de soldagem nas próximas duas seções.

A soldagem a laser é utilizada em diversos setores da indústria: naval, biomedicina e biomecânica, elétrica, eletrônica, aeroespacial, entre outras (DAVIM, 2012). Esse processamento apresenta diversas vantagens quando comparado àqueles via chama ou arco elétrico:

- a) a zona termicamente afetada (ZTA) é pequena;
- b) a quantidade de energia total (calor) é baixa;

- c) as velocidades de soldagem podem ser elevadas, chegando a atingir valores superiores a 10 m/min (OLSEN, 2009);
- d) não há contaminação por contato durante o processo;
- e) permite profundas penetrações com um cordão estreito;
- f) a exatidão alcançável com o processo é elevada;
- g) baixas taxas de deformação e distorções nas peças processadas;
- h) pode requerer, mas, em geral, não necessita de tratamento térmico posterior.

Para menores velocidades de resfriamento, os grãos localizados na região próxima à da solda tendem a coalescer. Pelo fato de o feixe de laser ser uma das fontes de maior densidade de energia disponíveis hoje na indústria (STEEN; MAZUMDER, 2010), a energia total envolvida no processo de soldagem a laser é relativamente pequena, comparando com outros processos de soldagem, resultando em uma ZTA mais estreita e que normalmente não apresenta região de crescimento de grão definida bem como menores graus de distorção.

Contudo, algumas desvantagens e limitações da tecnologia a laser podem ser listadas, destacando-se:

- a) dificuldade de processar materiais com alta refletividade, como o alumínio;
- b) os investimentos iniciais para aquisição do equipamento e operação (recursos humanos especializados), ainda são elevados;
- c) necessidade de treinamento especial dos operadores (devido à automatização e à periculosidade do processo);
- d) necessidade de infraestrutura de segurança rebuscada, em especial quando se trata de lasers de alta potência;
- e) torna-se difícil de operar “em campo” devido à infraestrutura necessária à fonte laser e às restrições de segurança;
- f) as superfícies que formam a junta devem ser de boa qualidade, macro e micro geométrica, além de necessitar de cuidado quanto à fixação das peças soldadas para que o processo seja possível e estável;
- g) na maior parte das aplicações, é um processo automatizado, sendo necessário empregar manipuladores robóticos ou máquinas automáticas (numericamente comandadas, por exemplo);

A maioria das vantagens citadas são provenientes da natureza concentrada da energia do laser. Essa característica faz com que menores quantidades de energia sejam necessárias para

fundir o material, aquecendo menos os componentes e exercendo menores mudanças microestruturais no material soldado (PROPawe, 2011).

Em relação às desvantagens, o custo de aparelhamento, a infraestrutura e a operação são os maiores obstáculos à utilização do laser como tecnologia. Além disso, o maquinário responsável pela movimentação feixe-peça é, em geral, de alto custo, dificultando a implementação. Apesar dessas observações, a implementação da tecnologia a laser ainda se torna rentável a longo prazo, tendo em vista as vantagens e melhorias na peça processada citadas acima.

Alguns exemplos de pesquisas recentes em torno da soldagem a laser, são listadas:

- Soldagem a laser pulsado ultrarrápida de cerâmicos, com pulsos de femtossegundo, analisando a distribuição de calor e seu efeito em componentes sensíveis a temperatura (PENILLA, 2019).

- Soldagem a laser de materiais dissimilares como cobre e aço inoxidável, analisando as dificuldades de acoplamento (ANTONY, 2020).

- Soldagem a laser de dispositivos biomédicos e materiais de implantes (QUAZI, 2020).

- Soldagem a laser de penetração profunda de chapas grossas de aço inoxidável austenítico usando um laser de fibra de 20 kW (FANG, 2020).

- Soldagem autógena de ligas de nióbio, visando avaliação de parâmetros e microestrutura (GUPTA, 2020).

- O efeito dos parâmetros de soldagem na formação de poros na soldagem híbrida MIG e laser pulsado da liga de alumínio A7N01P (HUANG, 2020).

- Análises em tempo real das características físicas e térmicas do *keyhole* (ZOU, 2016);

- Soldagem de materiais dissimilares como aço e alumínio, ou metais e polímeros (SUN, 2015).

O processamento de soldagem poder ser com ou sem material de adição (autógeno). A soldagem autógena, sem material de adição, exige que a junta de solda não apresente folgas, garantindo que o feixe não passe pela fenda e atinja a mesa de trabalho. Na soldagem com adição de material, a energia absorvida para fundir o material de adição é subtraída da energia total do processo, diminuindo a capacidade de soldagem.

Além dos processos citados, um processo que combina a soldagem a laser com a soldagem TIG ou MIG/MAG, denominado soldagem híbrida, também é utilizado,

principalmente para soldagem de alta penetração ou de juntas com fendas mais afastadas. Esse tipo de soldagem, todavia, não terá enfoque neste trabalho.

O processamento de soldagem, como a maioria dos processamentos que envolvem ciclos térmicos, fluxo de massa e mudanças de estado físico, é altamente suscetível a defeitos que prejudicam a qualidade final e as propriedades do componente. Esses defeitos surgem de desvios de otimização no processo de soldagem, como falhas de alinhamento, de produção ou focagem do feixe, além de má determinação dos parâmetros de soldagem, que levam, como já mencionado, instabilidades do *keyhole*. Algumas imperfeições são associadas à geometria da solda e podem ser vistas a olho nu, enquanto outras são a nível microestrutural e só podem ser detectadas via ensaios destrutivos ou não destrutivos.

Boa parte dos trabalhos acadêmicos envolvendo soldagem a laser tem o objetivo de reduzir os defeitos, possibilitando a obtenção de soldas com propriedades mecânicas de alta performance e de qualidade.

A seguir, serão listados alguns tipos de defeitos comuns em soldas e suas possíveis causas (ION, 2005):

- **Excesso de preenchimento:** quando há excessiva convecção da raiz da solda até o topo, ultrapassando o plano normal do componente. Esse defeito pode se manifestar devido a quatro razões principais em soldagens autógenas: baixa velocidade de soldagem; contração da chapa; excesso de pressão do gás de proteção; e fluxo longitudinal de material do componente, levando volume para dentro da solda.

- **Mordeduras:** se caracteriza como um desnível de material devido à falta de preenchimento nas laterais da solda. Pode reduzir a resistência a fadiga por ser um concentrador de tensões. Pode normalmente ser evitado reduzindo-se a velocidade de soldagem ou a potência.

- **Falta de fusão:** pode ser causada pela má preparação da superfície da amostra, pelo mal posicionamento ou pela falta de energia. Também pode agir como concentrador de tensões. A falta de fusão é resultado principalmente da má parametrização do processamento, como potência insuficiente, velocidade excessiva ou ponto de foco incorreto.

- **Humping:** caracteriza-se por descontinuidades no cordão no formato de ondas periódicas formadas pela dinâmica dos fluidos da solda durante o avanço do laser. É constituído por pequenas corcovas no sentido longitudinal e dificilmente é evitado devido à frequência intrínseca de fluxo de massa do *keyhole*. Essa frequência é causadora de outros defeitos, como aprisionamento de ar (poros) e falta de fusão.

- **Trincas:** geralmente ocorrem em materiais com baixa ductilidade, como materiais de alta liga e sensíveis a transformações martensíticas. A redistribuição dos elementos intersticiais devido à fusão e à solidificação nestes materiais causa a formação de tensões internas residuais que agem como esforços que, somados aos esforços externos inerentes à aplicação dos componentes, podem causar o colapso da peça. Outros fenômenos podem induzir a formação de trincas a quente, como o coalescimento dos grãos na zona fundida, impurezas concentradoras de tensão, elevado ciclo térmico, entre outros.

- **Porosidade:** a porosidade em soldas pode surgir via três mecanismos (ZHANG, 2019): aprisionamento de vapores do metal de base pela solidificação do metal na solda, segregação de hidrogênio ou porosidade induzida pela instabilidade do *keyhole*. Pode ser classificada como fina ou grosseira, e é diferenciada pelo diâmetro médio e o formato do poro (0,5 mm). A porosidade fina é geralmente composta por poros arredondados e bem distribuídos, constituídos de gases pouco solúveis na estrutura metálica. Por outro lado, a porosidade grosseira é caracterizada por grandes e amorfas bolhas distribuídas aleatoriamente através da solda. Esse tipo de porosidade surge comumente devido a instabilidades no *keyhole*, criando vácuos de gás de proteção que são aprisionados na solidificação. Os poros reduzem as propriedades mecânicas da solda por serem concentradores de tensão, levando a falhas de fadiga ou deformações. Os poros também podem ser sítios de nucleação de trincas, sendo os poros de hidrogênio os mais nocivos a trincas a frio. A porosidade pode ser evitada reduzindo-se a velocidade de soldagem, alterando o ponto focal do feixe de laser, modulando a potência do laser com o objetivo de reduzir a velocidade de fechamento do *keyhole*, evitando o aprisionamento de gás, assegurando que o material esteja livre de óxidos, entre outros métodos.

- **Respingos:** são partículas de metal que são expelidas durante o processamento e aderem à superfície do componente soldado. Podem surgir devido a instabilidades do *keyhole* e ou à volatilidade do material soldado. Como são removidos após a soldagem, os respingos em geral não afetam as propriedades mecânicas da solda.

2.1.7 Soldagem a laser por condução de calor

Convencionalmente, a soldagem a laser é considerada de condução se a densidade de energia por centímetro cúbico é baixa; nesse caso, não há significativa evaporação. A soldagem por condução de calor é governada pela condução clássica de uma superfície mais quente, irradiada pelo laser, para a mais fria, com a solda sendo produzida através da fusão de porções

do material de base. As primeiras soldagens a laser por condução, realizadas nos anos de 1960, usavam lasers pulsados de baixa potência de CO₂ e de rubi para soldar conexões de fios (ION, 2005). Atualmente, a soldagem por condução pode ser usada para soldar fios e chapas finas de diversos metais e ligas, em várias configurações, utilizando lasers de CO₂, Nd:YAG e diodos. Além disso, sua precisão e reduzido número de defeitos, permite sua utilização na área biomédica, eletrônica e de biomateriais.

A razão de aspecto, dada pela relação entre a profundidade e largura do cordão, é comumente encontrada menor ou igual a 1 no caso da soldagem por condução de calor (CHANG; NA, 2002), limitando esse modo de soldagem a penetrações menos profundas. É preciso considerar que o mecanismo de condução apresenta relativa estabilidade resultando em soldas com menos defeitos (como poros), que, por sua vez, são geralmente decorrentes do aprisionamento de gases durante o processo.

Os aportes de calor e ciclos térmicos nesse tipo de soldagem são rápidos, resultando em estrutura granular refinada, menores ZTAs e defeitos, produzindo soldas com boas propriedades mecânicas. Por conta de sua boa estabilidade, a qualidade do feixe do laser nesse tipo de soldagem não é tão determinante. Ademais, a possibilidade de utilização de feixes com maiores diâmetros permite que o alinhamento entre as juntas possa ser menos sensível, na ordem de milímetros e não micrometros, como acontece na soldagem por penetração profunda.

Também devido ao menor aporte térmico e reduzida área de transformações de fase, a soldagem por condução de calor apresenta, normalmente, soldas com poucas distorções e tensões residuais, característica importante para o caso de soldagens de placas finas, sensíveis a esse tipo de tensões.

Como discutido, o baixo aporte térmico desse modo de soldagem é o responsável pelas suas principais características finais, podendo-se citar outras como (ION, 2005):

- Baixa segregação de elementos fragilizantes como fósforo e enxofre;
- Evita a dissolução de precipitados que agem como reforço estrutural em ligas.
- Baixo surgimento de trincas.
- Reduzido número de poros.

2.1.8 Soldagem de penetração profunda - *keyhole*

A compreensão do outro modo de soldagem, o modo *keyhole*, é de grande importância para esse trabalho, pois o modo *keyhole* é o que governa os fenômenos presentes na soldagem

de grandes penetrações, utilizada largamente na indústria como forma de união de placas e materiais espessos. Seu entendimento vem ao encontro da produção desse trabalho e da utilização da modulação da potência do laser, método que tem grande influência na formação, manutenção e fechamento dessa cavidade.

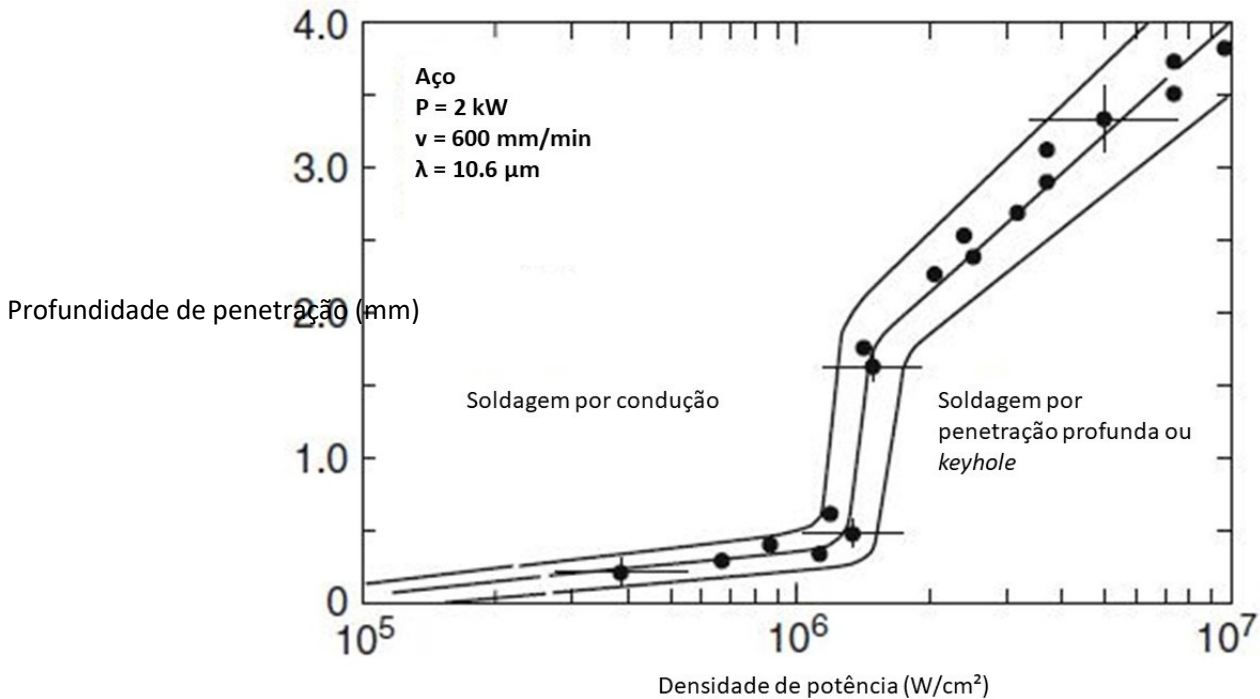
O modo *keyhole* é caracterizado pela alta densidade de energia (dependendo das variáveis do feixe como qualidade e focagem, e do material com absorvidade, podendo variar entre 10^4 W/cm² e 10^{12} W/cm²). O feixe é focado sobre ou no interior da peça aquecendo-a até a formação de uma cavidade repleta por vapor ionizado devido à vaporização de uma parcela do material e a uma força de recuo que empurra o material fundido. Essa cavidade, com grande relação profundidade/diâmetro, é denominada *keyhole* e ocorre como consequência do equilíbrio entre densidade, viscosidade e pressão de vapor na poça fundida. Uma vez que os vapores metálicos contidos no *keyhole* apresentam elevada eficiência de absorção da energia do laser, a radiação, ao entrar na cavidade, reflete-se múltiplas vezes nas superfícies laterais do capilar (KANNATEY-ASIBU, 2009). Este efeito, de acordo com a norma DIN32511, é denominado *deep penetration welding effect* (efeito da soldagem de penetração profunda). Existem dois modos de absorção de energia por parte do material através do laser. A primeira chama-se absorção *Bremmsstrahlung* reversa (transferência de energia dos fótons os elétrons) e ela tem espaço no plasma ionizado que se localiza dentro e acima da cavidade, sendo o mecanismo dominante para baixas velocidades de soldagem. O segundo modo chama-se absorção Fresnel que consiste em múltiplas reflexões nas paredes da cavidade, dominante para velocidades elevadas de soldagem. O plasma (gás ionizado) e a pluma de vapor (material vaporizado) facilitam a transferência de energia do laser para o material, devido ao seu alto grau de absorção, porém, eles também atrapalham a focalização do feixe reduzindo a densidade de potência.

As demandas por estabilização do *keyhole* são muitas devido a sua natureza. Velocidades excessivas acarretam no colapso da cavidade, enquanto velocidades muito baixas fazem que a poça se torne exageradamente larga e ceda. O formato e o tamanho da cavidade variam durante o processamento. Quando o feixe é cessado, vários processos ocorrem: o plasma dentro da cavidade é extinto, a pressão de vapor decai, e o *keyhole* colapsa devido a tensão superficial e a gravidade (ION, 2005).

Este modo de soldagem permite a junção de materiais com maiores espessuras devido à sua maior densidade de energia, apresentando fatores de forma (relação profundidade de soldagem/largura de cordão) que podem atingir ordem superiores a 10:1 (OLSEN, 2009)

(AHMED, 2005). A Figura 12, mostra, de forma esquemática, os intervalos de parâmetros onde atuam os dois mecanismos de soldagem.

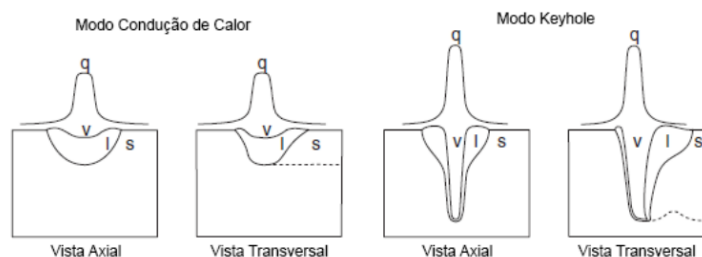
Figura 12 - Intervalos de parâmetros onde atuam os dois mecanismos de soldagem a laser em aços.



Fonte: Propawe (2011)

É possível notar através da Figura 12, a correlação existente entre profundidade de penetração e densidade de potência no resultado dos dois regimes de soldagem. A baixas densidades de potência, no regime de condução, baixas penetrações são atingidas. O inverso acontece quando densidades de potência maiores são aplicadas. A Figura 13 ilustra de maneira esquemática a morfologia das soldas em regime de condução de calor e em regime *keyhole*.

Figura 13 - Representação esquemática dos mecanismos de soldagem a laser: condução e *keyhole*.

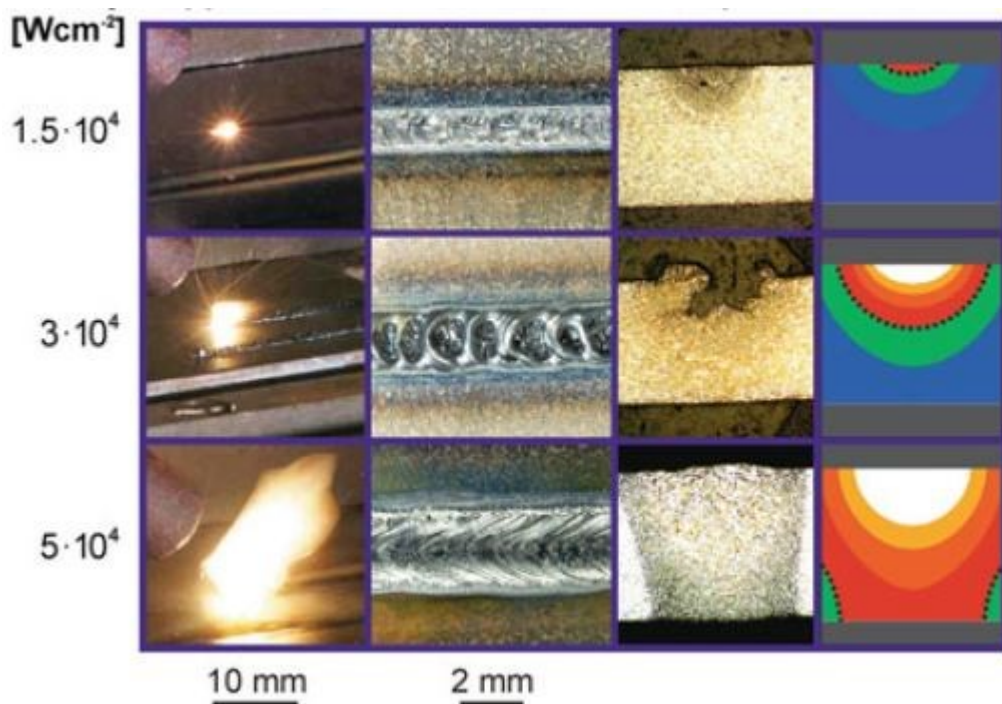


Fonte: Olsen (2009)

Nota-se que a principal distinção entre os dois modos se faz na magnitude de penetração das soldas, devido à natureza da cavidade criada a altas densidades de energia.

A Figura 14 mostra, através de fotografias de topo, vários aspectos de soldas produzidas sob os dois regimes. A primeira coluna apresenta o comportamento de interação do feixe do laser com a peça em diferentes níveis de energia.

Figura 14 - Aspectos externos e internos do laser e da soldagem por condução e *keyhole*.



Fonte: Ion (2005)

É possível notar uma grande diferença no brilho e na produção de vapores entre as três imagens, características que justificam a grande preocupação existente em relação a segurança do operador durante os processamentos. A segunda coluna mostra os aspectos superficiais da solda, como largura, rugosidade e coloração. A aparência não desejável da segunda foto sugere a má parametrização da solda produzida e as instabilidades provenientes do processo. Essas instabilidades inerentes tem, atualmente, motivado diversas pesquisas, como as citadas na introdução desse trabalho, que buscam processamentos mais controlados que gerem menos defeitos. A terceira coluna representa através de fotos o comportamento ilustrado e descrito na Figura 13, mostrando um corte transversal da solda e sua respectiva penetração. Por fim, a última coluna simula numericamente a distribuição de calor durante a interação do feixe do laser com o componente, ilustrando como acontece a absorção de energia e sua subsequente

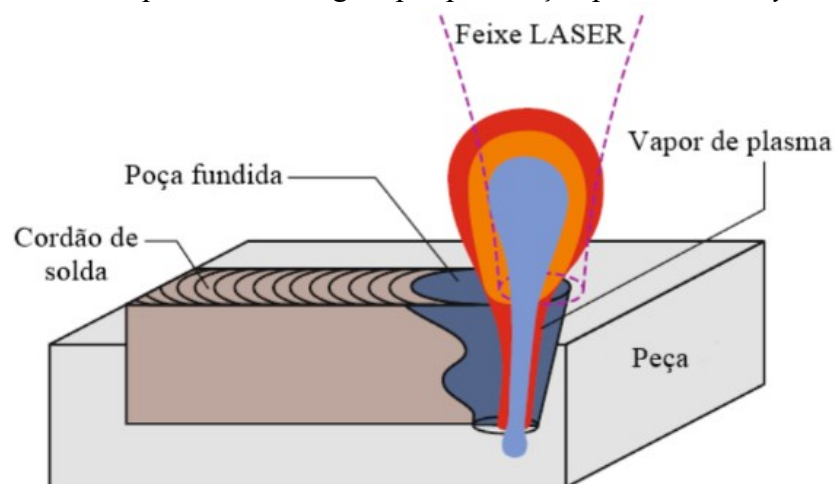
distribuição através da peça. A última coluna é de grande importância para esse trabalho, visto que a maioria dos efeitos estudados durante sua realização, provenientes das diferentes formas de entrega de energia, são devido a distribuição do calor durante o regime *keyhole*.

A Figura 14 ainda apresenta, na sua segunda coluna, imagens de topo de soldas a laser. É possível notar em todos os cordões, que foram produzidos sob o regime contínuo de soldagem (CW), estrias periódicas, provenientes de ciclos de fusão e solidificação e abertura e fechamento do *keyhole*. Essas marcas evidenciam que, mesmo para soldas produzidas sob potências contínuas, instabilidades, ciclos periódicos de fluxo de massa e frequências térmicas atuam fortemente sobre os aspectos finais da solda. Esses fenômenos serão discutidos posteriormente neste trabalho.

Como mencionado em seções anteriores, a refletividade da superfície é um dos fatores mais importantes na absorção do laser. Por isso, a formação do *keyhole* pode não ocorrer em diferentes materiais submetidos à mesma densidade de energia. Materiais mais reflexivos, por exemplo, necessitam de mais energia para o início da formação da cavidade. Além disso, variáveis como a temperatura e o estado físico da peça alteram a taxa de absorção do feixe.

O mecanismo *keyhole* também possibilita a soldagem de componentes de maior espessura devido à grande capacidade de penetração. A Figura 15 ilustra essa capacidade de maneira esquemática, mostrando o mecanismo *keyhole* com a coluna de vapor rodeada pela poça líquida que avança sobre o componente.

Figura 15 - Esquema da soldagem por penetração profunda – *Keyhole*.

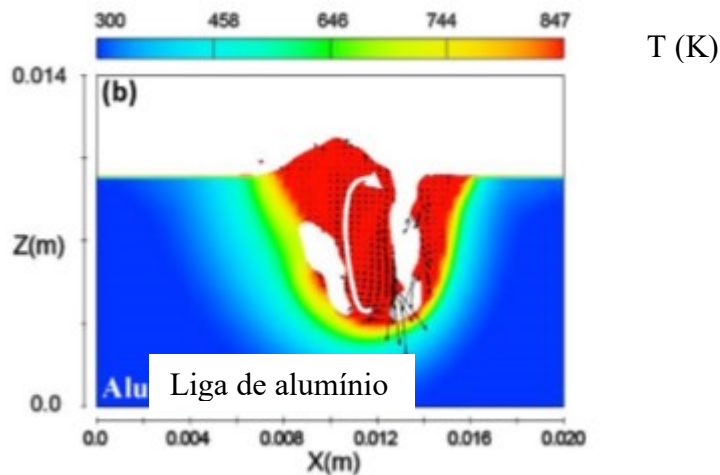


Fonte: adaptado de Propawe (2011).

Como na soldagem através de outras fontes de calor, a presença de defeitos em componentes soldados a laser é comum. Em geral, porosidade, trincas, distorções e falta de fusão são os problemas mais recorrentes, o que faz com que a tentativa de redução dessas falhas seja um tema de estudo bastante profícuo.

Alguns autores se dedicaram, em pesquisas recentes, a entender melhor o mecanismo da soldagem de penetração profunda devido a sua alta complexidade no que diz respeito a fluxo de calor e de massa, vaporização de material, formação de plumas de plasma, formação de degraus no interior da cavidade, flutuações de absorção do feixe e reflexões nas paredes da cavidade, entre outras características que podem ou não estimular a aparição de defeitos. Huang et al. (2018) identificaram que a instabilidade e as oscilações do *keyhole* eram responsáveis pelo aprisionamento de bolhas pela solidificação em ligas de alumínio e aço, formando altos níveis de porosidade nas duas ligas, defeito que reduz substancialmente as propriedades mecânicas da liga (LU, 2015). Os pesquisadores simularam matematicamente o fluxo de massa e de calor e obtiveram respostas do fenômeno de aprisionamento de bolhas devido ao *keyhole* como mostra a Figura 16.

Figura 16 - Fluxo de massa e de calor durante a soldagem de uma liga de alumínio.

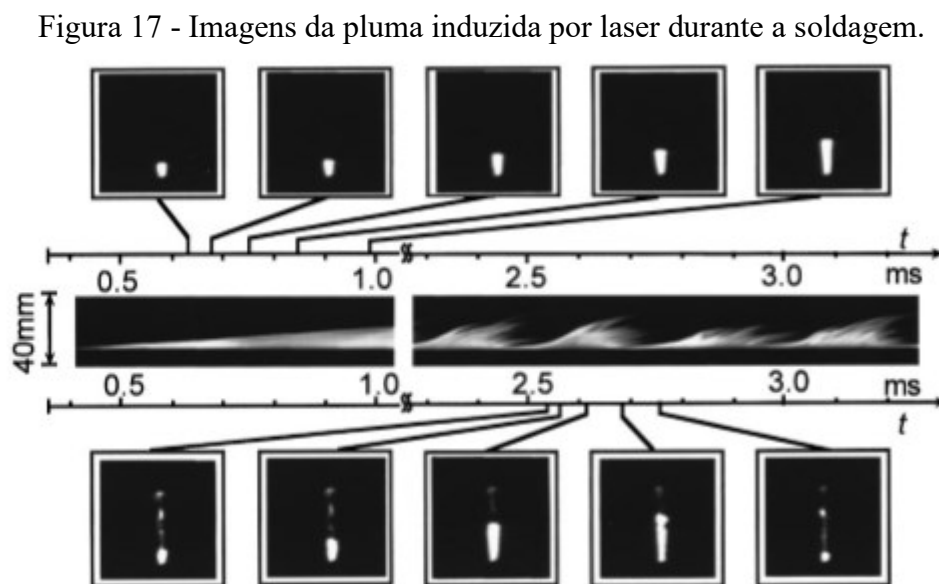


Fonte: Huang et al (2018).

Através da Figura 16, nota-se o movimento circular da poça fundida na direção da soldagem, deslocando a massa fundida em direção a cavidade *keyhole*. Esse movimento segundo os pesquisadores, se repete ao longo da produção do cordão, formando bolhas de gás com composição parecida com a do gás de proteção, demonstrando seu aprisionamento.

Pesquisa de Matsunawa (1998) observou, através de imagens em tempo real via transmissão de raios-x, diversos fenômenos relacionados à formação do *keyhole* e seu subsequente fechamento utilizando laser com potência modulada com pulsos retangulares de 10 ms de duração, com média de potência entre 2,5 kW até 5 kW: a superfície do componente começa a se fundir 0.2 ms após o início da irradiação, através do modo de condução; após 1 ms, o surgimento do *keyhole* pode ser observado pela aparição de uma depressão no centro da poça fundida; após 0.8 ms da cessão do feixe, o *keyhole* se fecha, levando mais 8 ms para a total solidificação da poça. Esses valores confirmaram que, mesmo para a maior frequência de modulação (100 Hz) utilizada em seu trabalho, ou seja, menor tempo contínuo de interação feixe-peça (5 ms), um ciclo completo de abertura e fechamento de *keyhole* é observado. Aumentando-se o tempo de interação e as reflexões internas do feixe, e, conseqüentemente, reduzindo a frequência de modulação, o *keyhole* é mantido aberto por mais tempo e, assim, mais energia é absorvida, devido às grandes reflexões do feixe laser que ocorrem dentro da cavidade *keyhole* e à maior absorvidade do material líquido, fazendo com que o cordão esteja exposto a mais instabilidades de processo.

Além disso, Matsunawa observou as flutuações da nuvem de plasma durante a formação e a manutenção da cavidade *keyhole* através de câmeras de ultra velocidade. A Figura 17 ilustra os resultados.

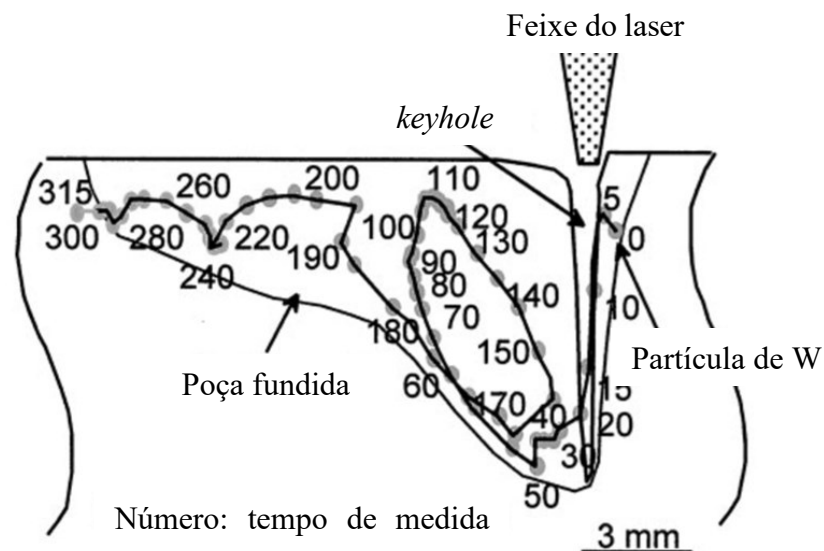


Fonte: Matsunawa et al. (1998)

Como pode ser visto na faixa central da imagem, a pluma começa a se formar já no início da soldagem, se desenvolvendo até a abertura total do *keyhole* em 1 ms. Neste momento, a pluma começa a flutuar periodicamente, com alta velocidade no início de cada flutuação. Essa geração e extinção periódica coincidiu, segundo o autor, completamente com as oscilações do *keyhole*. Essa observação sugeriu que a energia do feixe não é uniformemente absorvida pela parede do *keyhole* devido a evaporação perturbar a interação feixe-peça.

Em trabalho posterior, Matsunawa (2001) utilizou partículas de tungstênio para acompanhar o fluxo de massa durante soldagens a laser de penetração profunda. As partículas mantinham-se no estado sólido durante o processamento e suas trajetórias foram medidas através de imagens de transmissão de raio-x em tempo real. A trajetória do fluxo de massa da poça fundida encontrada pelo pesquisador pode ser vista na Figura 18.

Figura 18 - Fluxo de massa durante soldagem a laser contínua.

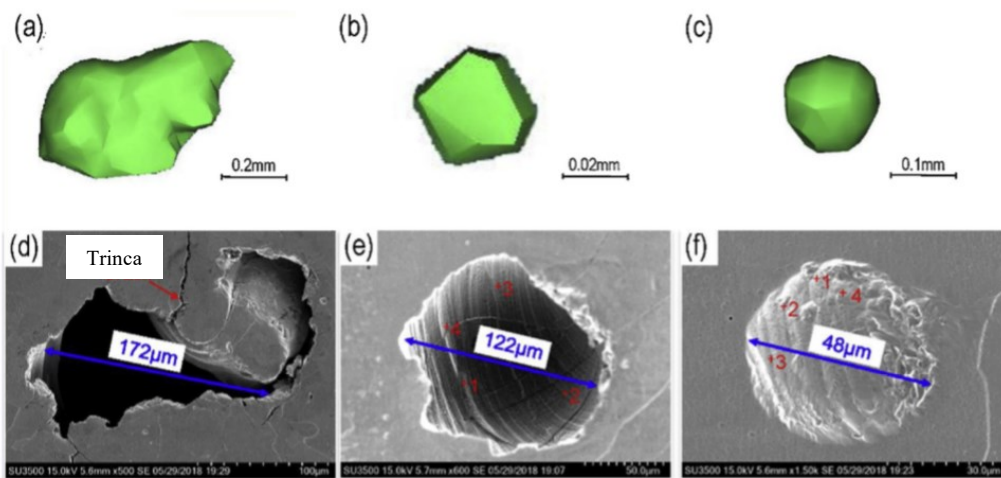


Fonte: adaptada de Matsunawa (2001)

A Figura 18 obtida por Matsunawa, demonstrando o fluxo de massa, comprova a complexidade do regime *keyhole* e sua conseqüente dificuldade de estabilização. No que tange a soldagem a laser, o controle do *keyhole* é certamente um dos maiores desafios encontrados atualmente, devido à grande quantidade de defeitos provenientes de sua instabilidade. Pesquisas atuais, incluindo esse trabalho, buscam a redução do surgimento dos defeitos de soldagem, utilizando ferramentas cada vez mais sofisticadas, como a modulação de potência.

Pesquisa de Zhang et al. (2019) se dedicaram a entender melhor os tipos de porosidade e como se formavam durante soldagens de penetração profunda com laser de fibra de uma liga de molibdênio dopada com Ce_2O_3 (NC-Mo). Os pesquisadores utilizaram ensaios não destrutivos e ensaios de tomografia com o tomógrafo de alta potência e alta resolução YXLON CT Modular para caracterizar a porosidade a nível quantitativo e qualitativo. A Figura 19 ilustra as imagens dos poros observados por Zhang e obtidas via tomografia.

Figura 19 - Reconstruções 3D e imagens reais da morfologia dos tipos de poros encontrados na liga de molibdênio.



Fonte: Zhang et al. (2019)

A diversidade de formatos dos poros encontrados, incluindo poros grandes sem formato definido, poros grandes com formato esférico, e poros pequenos, fizeram os pesquisadores questionarem suas origens. A explicação dos autores para a formação de cada tipo de poro é descrita:

- Os poros do tipo grande e sem forma, são largamente encontrados em soldagens a laser de penetração profunda e são decorrentes das flutuações violentas do *keyhole*, como já mencionado anteriormente por outros trabalhos. A pressão de recuo e as oscilações aprisionam gases provenientes da vaporização, formando bolhas irregulares e grandes.

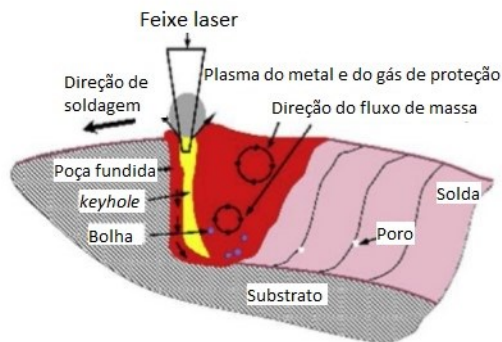
- Geralmente, os poros regularmente esféricos são formados porque as bolhas formadas pela vaporização não conseguem flutuar e sair da poça fundida antes da solidificação. O tamanho das bolhas, o tamanho da poça fundida e a velocidade de soldagem são fatores importantes que influenciam se as bolhas podem sair ou não. Além disso, quanto mais profunda a poça fundida, maior o tempo necessário para que as bolhas no fundo da poça flutuem; quanto

mais rápida for a velocidade de soldagem, mais rápida será a taxa de solidificação e mais bolhas são aprisionadas.

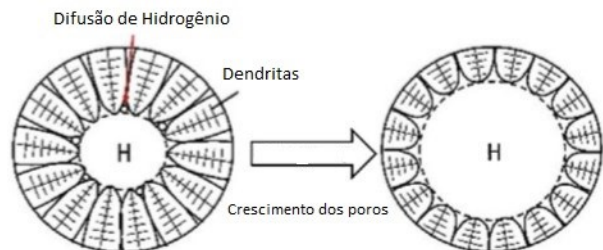
- Os poros pequenos e de formato esférico, segundo os autores, apresentaram outro mecanismo de formação. Durante a soldagem, o hidrogênio segregado devido a mudança de fase do material de base flui para a poça fundida. Devido à solubilidade do H ser muito diferente no molibdênio líquido e sólido, esse elemento segrega durante a soldagem. À medida que o comportamento da cristalização prossegue, a concentração de hidrogênio na frente da cristalização se eleva. Dessa maneira, após o hidrogênio atingir um estado supersaturado, as bolhas se acumulam formando poros, conforme mostrado na Figura 20 ilustrada pelos autores.

Figura 20 - Mecanismos de formação de poros: a) poros induzidos pelas oscilações do *keyhole*, b) poros induzidos pela segregação de hidrogênio.

(a) Macrocavidade



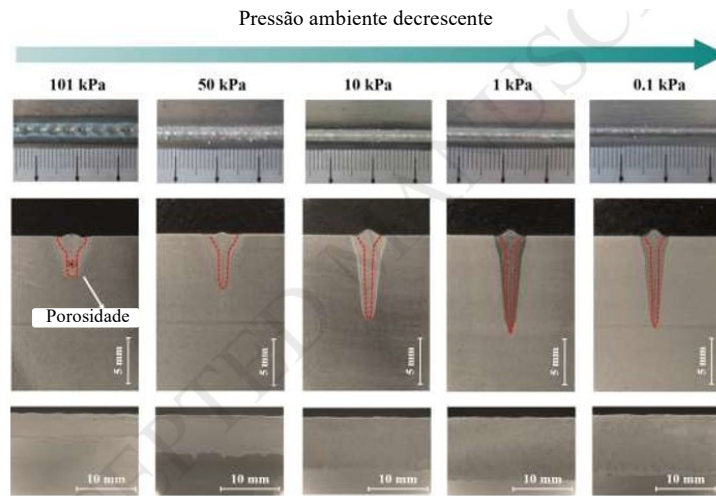
(b) Microporosidade esférica



Fonte: adaptada de Zhang (2019)

Pesquisa recente de Jiang et al. (2019), avaliou a estabilidade do *keyhole* realizando soldagens em chapas de aço da terceira geração (*High-strength steels*) de 20 mm de espessura em ambiente de baixa pressão. A fonte laser utilizada foi a mesma deste trabalho, um laser de fibra IPG YLS-10000 com potência máxima de 10 kW. Os pesquisadores aplicaram pressões decrescentes desde a atmosférica, e os resultados das seções transversais das soldas autógenas produzidas com potência de 5 kW, velocidade de 1 m/min e distância focal de 0 mm são ilustrados na Figura 21.

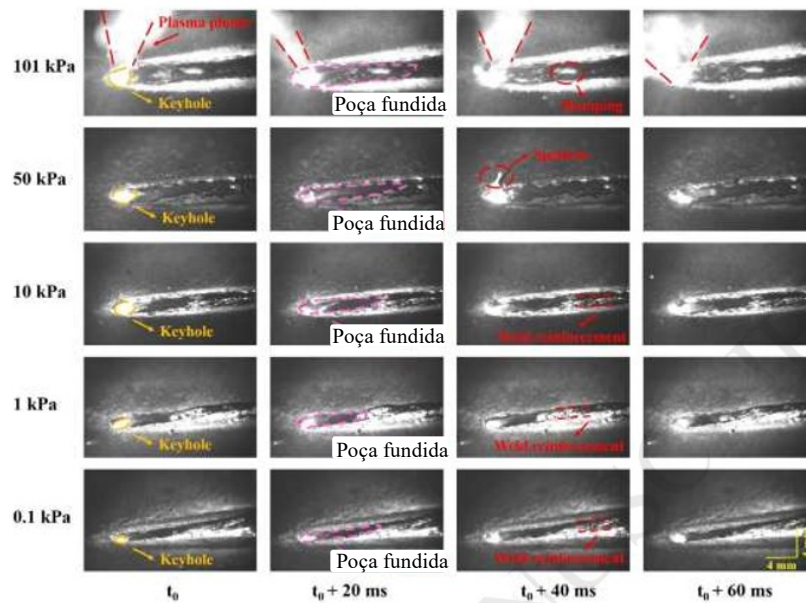
Figura 21 - Seções transversais de soldas produzidas sob diferentes pressões ambientes.



Fonte: adaptada de Jiang (2019)

À medida que a pressão atmosférica foi reduzida, cordões de solda mais profundos foram obtidos, sugerindo que a estabilidade do processamento e consequentemente do *keyhole* fora aumentada gradativamente. Câmeras de alta velocidade foram utilizadas pelos autores de modo a observar o interessante comportamento dos cordões a baixa pressão. A Figura 22 mostra fotos em alta velocidade do comportamento de interação feixe-peça nas pressões estudadas.

Figura 22 - Vistas de topo de soldas produzidas sob diferentes pressões ambientes.



Fonte: Jiang et al. (2019)

As imagens mostraram que a largura da poça fundida foi sensivelmente reduzida com a redução de pressão ambiente. Além disso, a abertura de saída do *keyhole* também foi reduzida, tornando-se mais estável. Para determinar as razões para a maior estabilidade do *keyhole* a baixas pressões, o balanço de pressão de dentro do *keyhole* sob pressão atmosférica e sob pressão reduzida foram analisados pelos autores. Sobre pressão atmosférica, a pressão de vapor (P_v) tende a manter o *keyhole* aberto, enquanto a pressão ambiente (P_o), a tensão superficial (P_σ) e a pressão hidrostática (P_h) tendem a fechá-lo, como na Equação 6:

$$P_v = P_o + P_\sigma + P_h \quad (6)$$

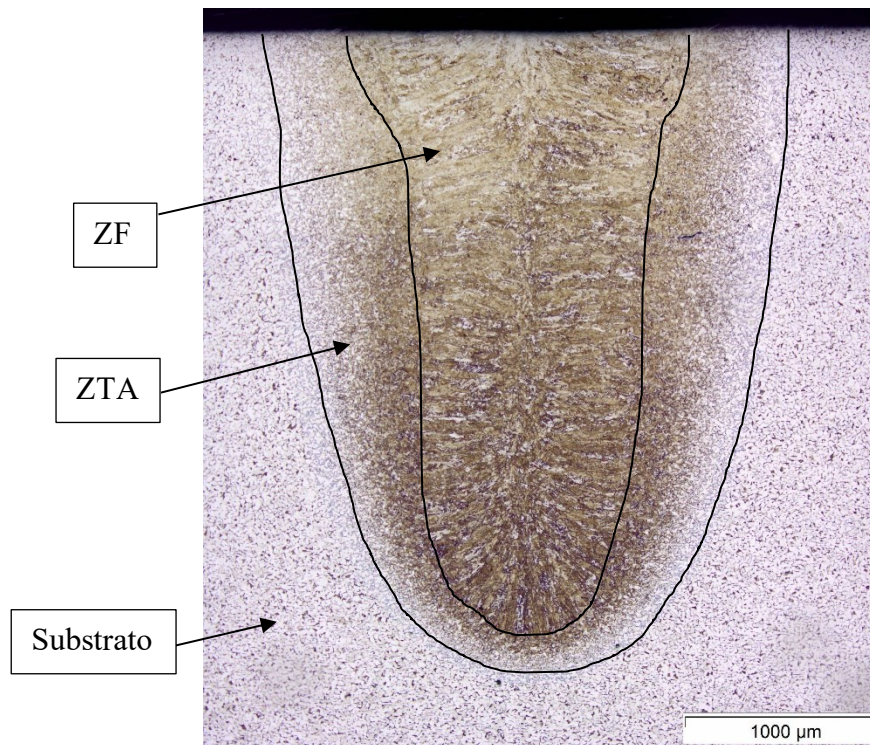
Nesse sentido, reduzindo-se a pressão atmosférica, uma menor resistência para a manutenção do *keyhole* é encontrada, facilitando o equilíbrio entre forças. As conclusões desse trabalho são de grande valor para a continuidade das pesquisas envolvendo soldagem de penetração profunda, abrindo possibilidade imensas na exploração de ambientes de baixa pressão.

2.1.9 Soldagem a laser de aços baixo e médio carbono

Por serem aços frequentemente empregados em diversos setores da indústria, existem muitas informações disponíveis sobre o comportamento dos aços carbono durante a soldagem a laser. Sabe-se que os defeitos mais frequentes nesse tipo de metal são os poros e as trincas a quente (ION, 2005). Gases como monóxido de carbono são liberados e aprisionados durante a solidificação na soldagem, formando porosidade.

Os aços carbono possuem reflexibilidade moderada para o comprimento de onda do laser de fibra (1070 μm), o que o tornou adequado para a utilização nesse trabalho. A Figura 23 mostra uma seção transversal de um aço carbono SAE 1020 soldado a laser com penetração profunda e suas respectivas características de solda. O aço SAE 1045 possui microestrutura semelhante, apresentando apenas maior presença de martensita devido a maior porcentagem de carbono em sua composição.

Figura 23 - Seção transversal de um aço SAE 1020 soldado via laser de penetração profunda.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

A microestrutura apresentada é de baixa complexidade, sendo constituída majoritariamente por martensita (devido à elevação de dureza medida) e pequenas ilhas de ferrita na zona fundida, bem como ferrita e perlita na ZTA e no substrato, principalmente devido à ausência de elementos de liga. A microestrutura e a dureza desenvolvidas na solda dependem das variáveis de processo. Energias médias de soldagem produzem, em geral, microestruturas mistas de martensita e ferrita em aços de médio carbono.

Esses aços possuem boa soldabilidade e usinabilidade, devido à sua alta tenacidade e ductilidade provenientes do baixo teor de elementos de liga, como citado anteriormente. Essa característica, no entanto, traz a necessidade de observação com a geração de descontinuidades e oxidação, pela ausência de elementos como Mn, que dessulfurizam os aços.

Pode-se afirmar que o aço possui uma boa soldabilidade quando não requer grandes preparações ou especificidades antes do processamento. A fusão e a solidificação do material não trazem características que prejudiquem as propriedades mecânicas da solda, obtendo um componente soldado com poucos defeitos de alta complexidade.

2.1.10 Soldagem a laser do aço SAE 4140

O aço da série SAE 4140, também conhecido como aço-cromo-molibdênio, é classificado como aço de médio carbono ligado para beneficiamento. Este possui, em sua composição química, de 0,3 a 0,5% de carbono, 0,8 a 1,1% de cromo e 0,15 a 0,25% de molibdênio, justificando sua classificação (ROCHA, 2004). Os elementos de liga são adicionados visando a melhora em algumas propriedades essenciais para a aplicação desse aço na indústria, como resistência mecânica, dureza e tenacidade. Nesse sentido, o aço SAE 4140 apresenta características como alta temperabilidade, usinabilidade razoável devido a sua alta dureza e má soldabilidade, devido principalmente à presença de elementos de liga e à consequente elevada temperabilidade, que o torna extremamente susceptível a trincas (METALS HANDBOOK, 1992).

Em geral, os componentes de aço SAE 4140 soldados necessitam de tratamento térmico posterior devido à formação de martensita na sua ZTA. O tratamento térmico alivia tensões residuais e eleva a tenacidade das zonas temperadas durante o processamento de soldagem, reduzindo a suscetibilidade à formação de trincas, trincas induzidas por hidrogênio e fraturas.

Neste trabalho, esse aço foi soldado e submetido apenas a ensaios de furo cego para avaliar as tensões residuais provenientes do processamento de soldagem a laser de potência contínua e modulada, justamente devido a sua alta suscetibilidade a trincas e tensões.

2.1.11 Soldagem a laser de potência modulada

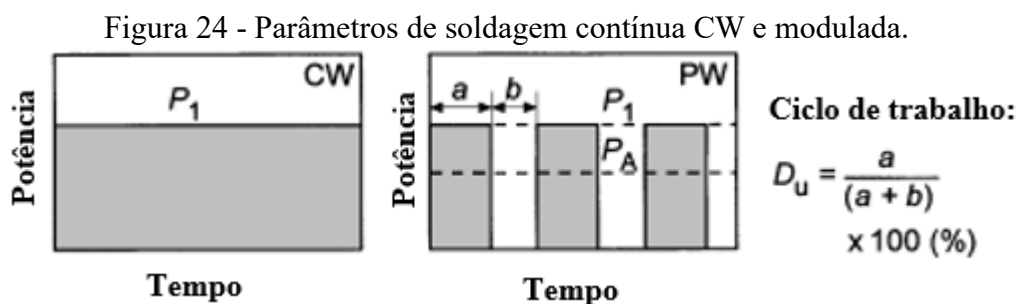
A entrega de energia através do laser pode ser distribuída de inúmeras maneiras através da modulação de sua potência, ou seja, ao invés de realizar uma emissão contínua durante a soldagem, esta emissão passa a ser feita por pulsos, numa frequência definida, e com formato de onda também previamente estabelecido. Podem ser gerados pulsos retangulares, senoidais, em forma de trapézio, com rampas de subida e descida, existindo uma potência de base e uma de pico que distribuem a potência média a uma certa frequência. A modulação faz com que fenômenos físicos como a solidificação e o *keyhole*, por exemplo, possam ser mais bem controlados, evitando o aparecimento de defeitos típicos de soldagem (HUANG, 2018). Graças a máquinas CNC e à linguagem computacional, um alto grau de confiabilidade é atingido no

que diz respeito à precisão quantitativa e temporal da interação entre o feixe de laser e o material, provendo alta performance às peças submetidas a esse processamento.

Antes de aprofundar a categorização do processamento via potência modulada, cabe diferenciar este processo daquele chamado de potência pulsada. No processo pulsado, o ressonador é mantido ligado durante todo o tempo, existindo um portão que libera a energia criando o efeito de separação de pulso. A potência do pulso é dependente do tempo em que esse portão libera o pulso, regido pela relação $P_{\text{peak}} = E/t$, em que P_{peak} é a potência do pico, E é a energia em Joules e t é o tempo; ou seja, a energia do pulso E é resultado de uma divisão entre a potência do laser (P) e a frequência de pulso (f). O tempo de pulso do laser pulsado pode chegar a magnitudes de femtossegundo, entregando energias de pico altíssimas, enquanto os pulsos de potência do laser modulado são, em geral, distribuídos em tempos da magnitude de microssegundo.

Por outro lado, para a obtenção de potência modulada, o laser contínuo (CW) é ligado, desligado, acrescido ou reduzido, com o auxílio de programação, controlando a potência entregue pelo feixe; ou seja, o ressonador não é mantido ligado durante todo o processo (ao contrário do que ocorre no processo pulsado). Alguns aparatos de laser são equipados com um modulador de onda, que possibilita que o formato de onda do laser seja controlado, possuindo formatos senoidais, de pirâmide ou retangulares, um exemplo é ilustrado na Figura 25.

Os parâmetros de modulação ilustrados na Figura 24, passíveis de controle são: a) o ciclo de trabalho – que é a porcentagem do tempo em que o laser fica ligado –, b) a frequência, que é correlacionada com os tempos de pulso (a na Figura) e c) o intervalo de potências (b na Figura), existindo ainda os parâmetros usuais da soldagem a laser como velocidade de soldagem, diâmetro do feixe, profundidade de focagem do laser e potência média.



Fonte: Matsunawa et al. (1998)

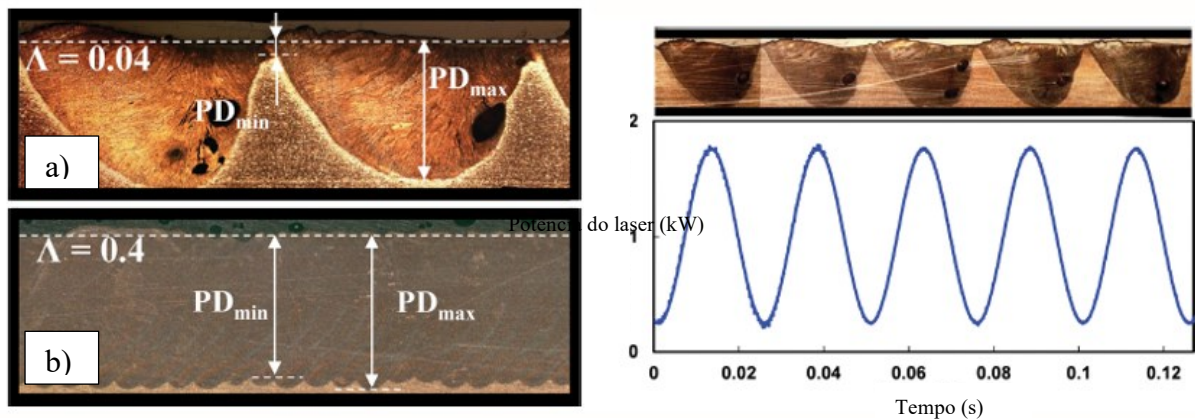
No exemplo da Figura 24, algumas diferenças entre os modos contínuo e modulados podem ser notadas. Nota-se que a potência não varia com o tempo no gráfico à esquerda. Esse gráfico apresenta o comportamento típico de parâmetros de soldagens com potência contínua (CW). Por outro lado, observando o gráfico à direita, nota-se uma variação de potência com o tempo. Nesse caso, a onda retangular ou quadrada foi usada como exemplo. O laser é ligado a uma potência P_1 por um tempo a . Em seguida, seu desligamento abrupto mantém-se durante o tempo b , a potência de 0 kW com o processo se repetindo. Os valores de a e b determinarão o ciclo de trabalho do processo, descrito pela equação presente na figura. Esses valores também tem influência sobre a frequência de modulação, que obedece a Equação (7):

$$f = \frac{1}{(a+b)} \quad (7)$$

Com f sendo a frequência, medida em Hertz, e a e b sendo os tempos de oscilação medidos em segundos. Como mencionado no início da seção, outros formatos de onda podem ser utilizados, como sinusoidais como ilustrado na Figura 25, piramidais ou até pulsos sobre pulsos, não sendo necessário que a potência mínima atinja o valor zero.

Como para o processo de soldagem contínuo, uma boa escolha dos parâmetros do processo modulado é essencial para a produção de soldas íntegras e de boas propriedades. A frequência de modulação, ou seja, quantas aplicações de potência são incididas no material por segundo, é um parâmetro de elevada importância pois rege a maneira como os pulsos irão interagir entre si, formando o cordão de solda. Heider et al. (2015) estudaram a frequência de modulação em soldagens de cobre a velocidade de 6 m/min e obteve, através de cortes longitudinais na região da solda, micrografias mostrando o comportamento da penetração obtida pela soldagem. A Figura 25 mostra as imagens obtidas por Heider.

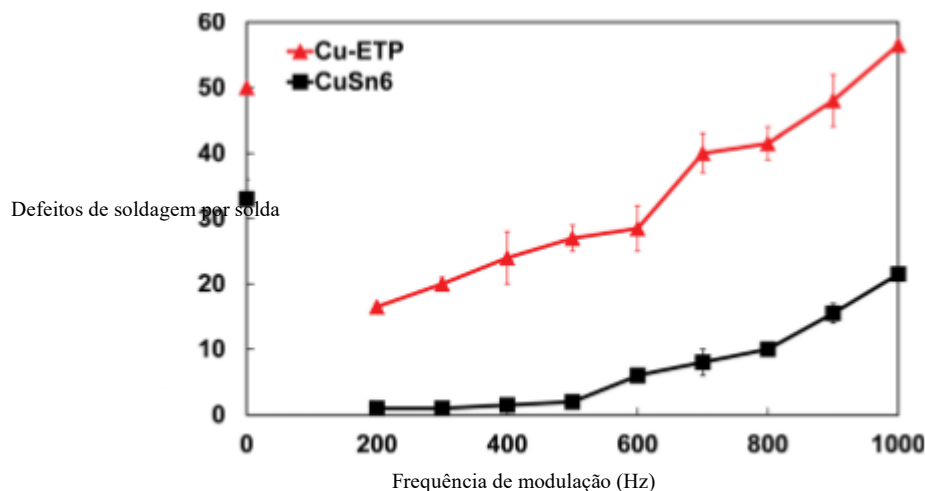
Figura 25 - Soldas produzidas a (a) baixas frequências de modulação (40 Hz) e (b) altas frequências (400 Hz) para uma velocidade de soldagem de 6 m/min.



Fonte: Heider (2015)

Heider observou que, para a velocidade estudada, as soldas produzidas à frequência de 40 Hz apresentaram características semelhantes a soldas de ponto, como mostra a seção transversal do primeiro quadrante da imagem. Esse comportamento foi creditado à alta velocidade de soldagem, uma vez que a separação de pulsos se mostrou muito elevada, causando a descontinuidade de penetração. Por outro lado, o pesquisador reportou que, para altas frequências acima de 600 Hz, a sobreposição de pulsos tornava a soldagem semelhante à de potência contínua, possibilitando o aparecimento dos defeitos típicos deste modo de soldagem. O pesquisador então analisou diversas frequências de modulação e mediu a quantidade de defeitos para cada solda produzida. Os resultados encontram-se na Figura 26.

Figura 26 - Efeito da frequência de modulação na quantidade de defeitos das ligas Cu-ETP e CuSn6.



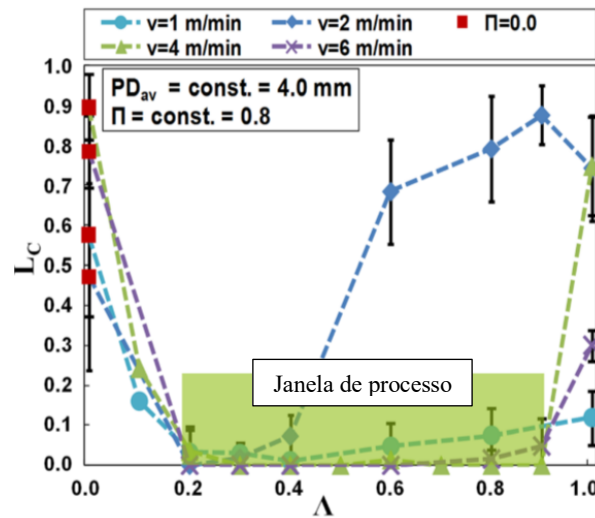
Fonte: Heider et al. (2015)

As altas frequências utilizadas por Heider são devido a elevada velocidade de soldagem (6 m/min) parametrizada pelo pesquisador, exigindo que mais pulsos por segundo fossem incididos para uma sobreposição adequada. Através da imagem, percebe-se que quanto mais ao encontro de um regime contínuo de potência devido a uma alta sobreposição de pulsos, valores mais próximos ao número de defeitos do modo contínuo são gerados. Dessa forma, conclui-se que uma boa parametrização se torna necessária visando sobreposições de pulsos adequadas.

Como anteriormente mencionado, a presença de trincas de solidificação e porosidade são dois grandes problemas na soldagem a laser de aços com elevado teor de carbono. A velocidade do ciclo térmico na soldagem a laser é extremamente alta por natureza da fonte de calor concentrado; assim, a suscetibilidade de trincas de solidificação aumenta muito em relação à soldagem a arco, por exemplo. Sobre esse assunto, pesquisadores (MATSUNAWA, 1994) (KATAYAMA et al., 1997) explicaram o mecanismo do processo de solidificação rápida, mostrando que a adição de calor controlada durante a solidificação pode regular a taxa de crescimento da dendrita, o que reduz a suscetibilidade de formação das trincas a quente de forma eficaz.

Além desses pesquisadores, Schaefer et. al (2017) investigaram a influência da modulação de potência na aparição de trincas a quente em no aço 42CrMoS4 revenido. Os pesquisadores utilizaram diferentes frequências normalizadas de modulação (Λ), que são calculadas utilizando a velocidade de soldagem, e fixaram a amplitude de potência (Π), que é a diferença entre a potência máxima e mínima, buscando os melhores resultados para a soma total do comprimento das trincas dividido pelo comprimento total da solda (L_c). Os resultados são sumarizados na Figura 27.

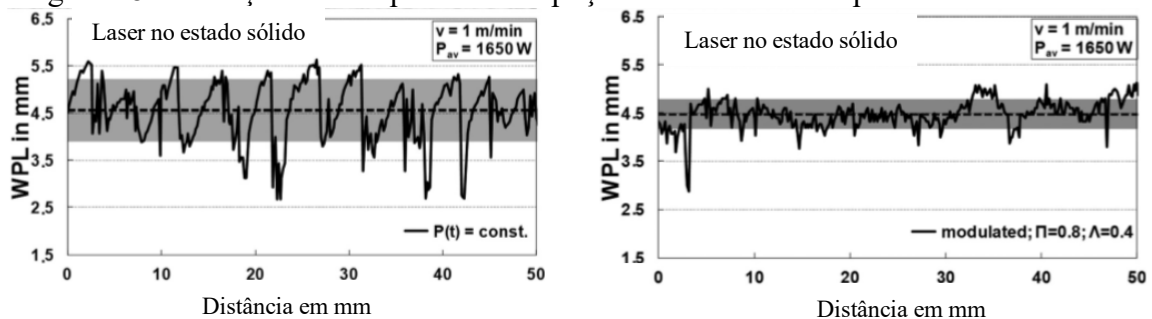
Figura 27 - Efeito da frequência normalizada de modulação sobre o comprimento acumulado de trincas.



Fonte: adaptada de Schaefer et al. (2017)

Nota-se claramente uma influência da modulação na redução do comprimento total de trincas do aço estudado. Os valores para todas as velocidades foram reduzidos de 0.5 a 0.9 para aproximadamente 0,05 para frequências relativas de 0.2 a 0.4, elevando-se lentamente até 0.8 a velocidade maiores do que 1 m/min. Para explicar os resultados a nível da instabilidade do *keyhole*, Schaefer mediu, via imagens de raios-x, as magnitudes de flutuação da cavidade durante os ensaios de soldagem contínua e modulada observando o comprimento da poça fundida em tempo real. A Figura 28 compara os valores de comprimento da poça fundida encontrados pelo pesquisador para cada modo de soldagem.

Figura 28 - Variação do comprimento da poça fundida durante o processamento a laser.



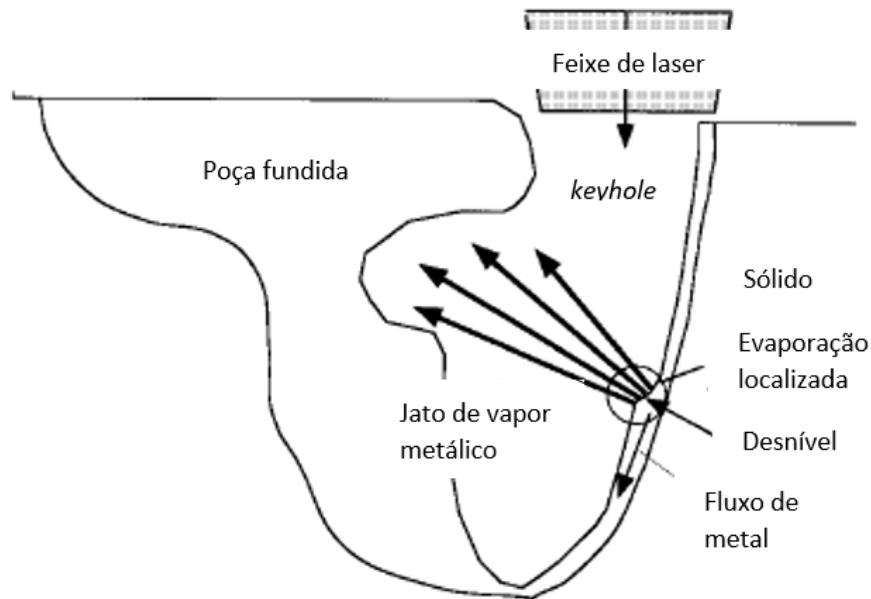
Fonte: adaptada de Schaeffer et al. (2017)

Os gráficos da Figura 28 mostram magnitudes de flutuação muito maiores para a solda produzida sob regime contínuo de potência. Nota-se que comprimento da poça variou entre

valores de 2,5 mm e 5,5 mm, caracterizando uma amplitude média de variação de aproximadamente 0,64 mm, em contraste, os valores médios de flutuação da solda produzida via regime modulado não ultrapassaram 0,30 mm. Através dos resultados, os pesquisadores sugeriram uma interligação entre as flutuações de profundidade de cordão (*keyhole*) com o aparecimento de trincas a quente, e concluíram uma apreciável melhora no controle na aparição desse defeito de soldagem.

No que tange à porosidade, o caso característico anteriormente citado é observado: durante a soldagem a laser, bolhas compostas do gás de proteção e do metal do componente na fase gasosa são formadas na base e na parte média do *keyhole* (MATSUNAWA, 2001) (MATSUNAWA et al., 2003) (MATSUNAWA et al., 1998). Para tentar explicar esse fenômeno, os autores supracitados observaram diretamente o *keyhole* através de um método de sistema de imagem via transmissão de raios-x e concluíram que a absorção do feixe de laser não ocorre uniformemente na parede frontal do *keyhole* durante todo o processo. Uma importante observação feita por Matsunawa et al. (1998), através do mesmo método, e comentada em trabalho citados anteriormente foi a de que o *keyhole* não se mantém estável mesmo em materiais submetidos à soldagem de potência contínua, flutuando violentamente, com uma frequência intrínseca, formando essa porosidade característica. Os pesquisadores também atribuíram esse comportamento à formação e à flutuação da pluma de vapor, porém encontraram um desnível de alto ângulo durante a abertura do *keyhole*, como mostra a Figura 29, e creditaram a esse desnível a vaporização de material e seu subsequente aprisionamento. Eles observaram que a pluma proveniente da evaporação do metal no desnível empurrava o metal líquido para a direção das flechas, sendo mais facilmente aprisionado durante o fluxo de massa do *keyhole*.

Figura 29 - Evaporação localizada de metal na parede frontal do *keyhole* e seu efeito na perturbação na estabilidade da parede traseira da poça fundida.

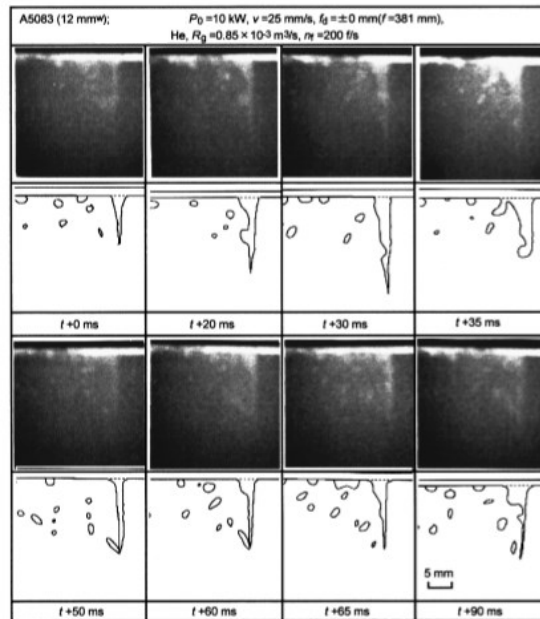


Fonte: adaptada de Matsunawa et al. (1998)

Na tentativa de lidar com este problema, Matsunawa et al. (1998) utilizaram pulsos retangulares de 10 ms de duração, com média de potência entre 2,5 kW até 5 kW. Ele observou diversos fenômenos relacionados à formação do *keyhole* e seu subsequente fechamento: a superfície do componente começa a se fundir 0.2 ms após o início da irradiação, através do modo de condução; após 1 ms, o surgimento do *keyhole* pode ser observado pela aparição de uma depressão no centro da poça fundida; após 0.8 ms da cessão do feixe, o *keyhole* se fecha, levando mais 8 ms para a total solidificação da poça.

Os resultados para soldagem localizada de laser pulsado e também na soldagem a laser de potência contínua mostraram que uma larga cavidade é formada no fundo do *keyhole* quando o laser é desligado de maneira abrupta, como mostra a Figura 30.

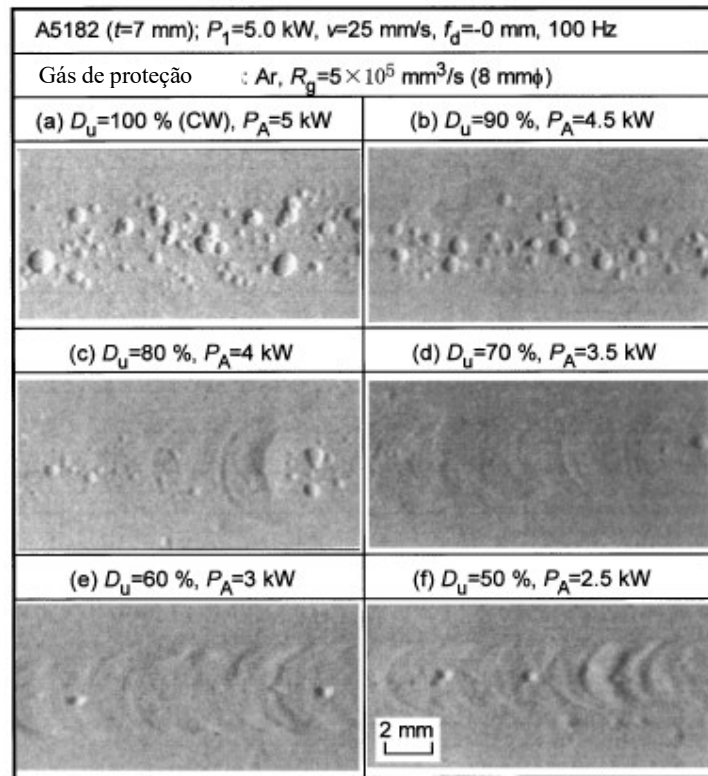
Figura 30 - Imagem de transmissão de raio-x mostrando a dinâmica do *keyhole* em soldagem de potência contínua.



Fonte: Matsunawa et al. (1998)

Os pesquisadores então modularam a potência do laser pulsado de modo a atenuar o desligamento e o conseqüente resfriamento da poça fundida e perceberam que isso deslocava os poros em direção à superfície do componente até seu subsequente desaparecimento. Esse resultado sugeriu que o mesmo método pudesse ser testado também em soldagem profunda de laser contínuo, confirmado posteriormente pelos autores. Outra maneira encontrada pelos pesquisadores de eliminar a presença de poros após a solidificação foi modular a potência do laser em ondas retangulares com frequências determinadas. Os resultados mostraram que os poros criados pelas primeiras ondas eram eliminados pelas ondas seguintes se a razão de sobreposição de pulsos fosse adequada, forçando uma oscilação controlada no *keyhole*. A Figura 31 mostra as seções longitudinais das amostras estudadas.

Figura 31 - Efeito da modulação da potência contínua do laser na redução da porosidade.

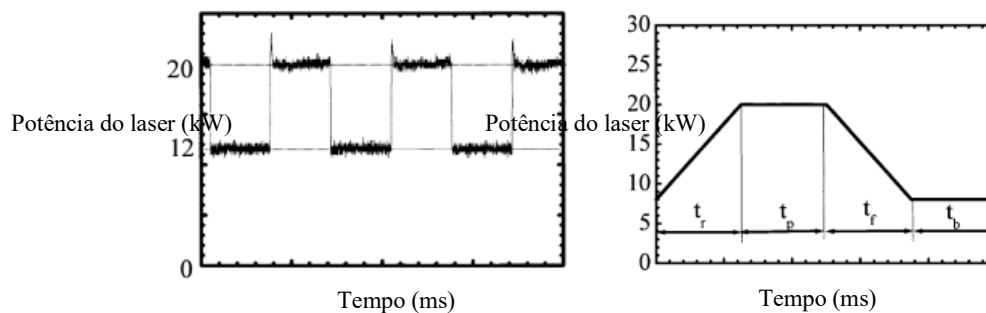


Fonte: Matsunawa (1998)

A figura mostra a eficácia do método na redução acentuada de porosidade nas ligas estudadas.

Tsukamoto et al. (2003) também buscaram correlacionar a formação de poros e respingos com as instabilidades do *keyhole*. Os pesquisadores utilizaram um laser de CO₂ de potência máxima de 20 kW para soldar de forma contínua e modulada um aço de baixo teor de carbono (JIS SM490C). Dois formatos de modulação foram utilizados e são esquematizados na Figura 32.

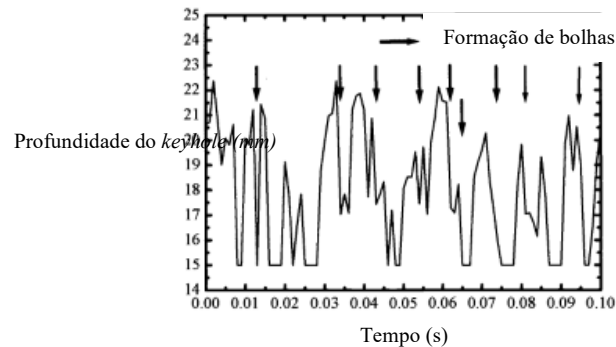
Figura 32 - Formatos de modulação de potência do laser.



Fonte: Tsukamoto (2003)

A figura mostra a tentativas dos autores em entender a utilização de ondas quadradas e com rampas na modulação. Imagens de transmissão de raio-x de alta velocidade captaram as flutuações do *keyhole* e os pesquisadores correlacionaram a formação das bolhas a esse fenômeno. O gráfico da Figura 33 ilustra os resultados.

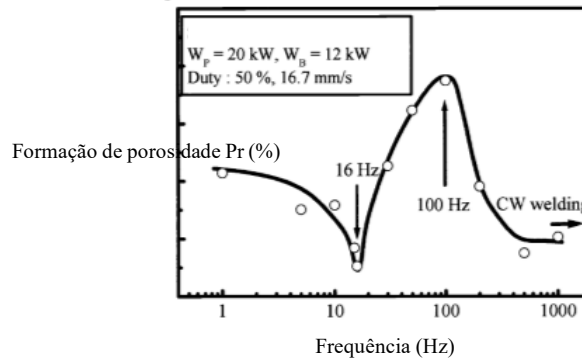
Figura 33 - Correlação entre a formação de bolhas e as oscilações de profundidade do *keyhole*.



Fonte: adaptada de Tsukamoto (2003)

É possível notar uma clara dependência da aparição de bolhas com as flutuações de profundidade do *keyhole*, mais precisamente quando a profundidade do *keyhole* decresce abruptamente, causada pela absorção irregular da energia do laser, devido à presença de vapores e plasma que absorvem a energia do feixe. Além disso, através das imagens de raio-x, os autores também concluíram que a incidência de respingos é ligada a formação de bolhas devido ao turbulento fluxo de massa causado por elas. Os pesquisadores então tentaram medir a frequência dessas oscilações e aplicar uma frequência controlada com a mesma magnitude, afim de forçar um controle de oscilações. Para isso, a modulação de potência do laser foi aplicada, e os resultados a nível de porosidade e a nível de emissão de luz devido as perturbações do *keyhole* são ilustrados pelo gráfico da Figura 34.

Figura 34 - Efeito da frequência de modulação de formato quadrado na formação de porosidade.

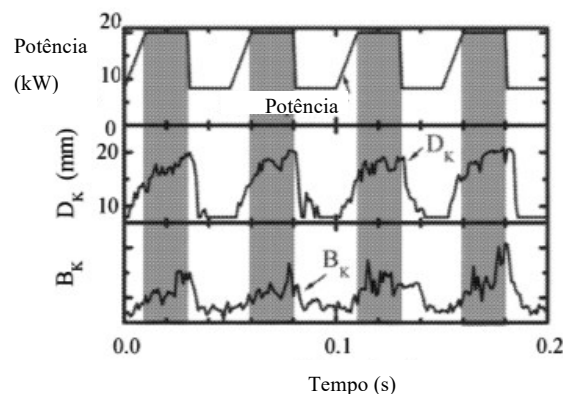


Fonte: adaptada de Tsukamoto (2003)

Os autores afirmaram que como a perturbação da cavidade é causada pela interação do metal fundido com o laser, se a frequência de pulso corresponder à frequência própria da oscilação da poça de fusão, o metal fundido retornará ao *keyhole* apenas enquanto a energia do laser estiver baixa (durante o período de energia de base). Na frequência incompatível, no entanto, o metal fundido às vezes entra na cavidade durante o período de pico de potência. Isso causa a intensa evaporação devido à interação, resultando na perturbação do *keyhole*.

Utilizando-se agora da frequência ótima encontrada, os pesquisadores investigaram o comportamento das oscilações do *keyhole* durante os picos modulados de potência através da captação de luminosidade durante a soldagem. O resultado é mostrado na Figura 35.

Figura 35 - Variações da luminosidade (B_k) e profundidade do *keyhole* durante os pulsos modulados de laser.

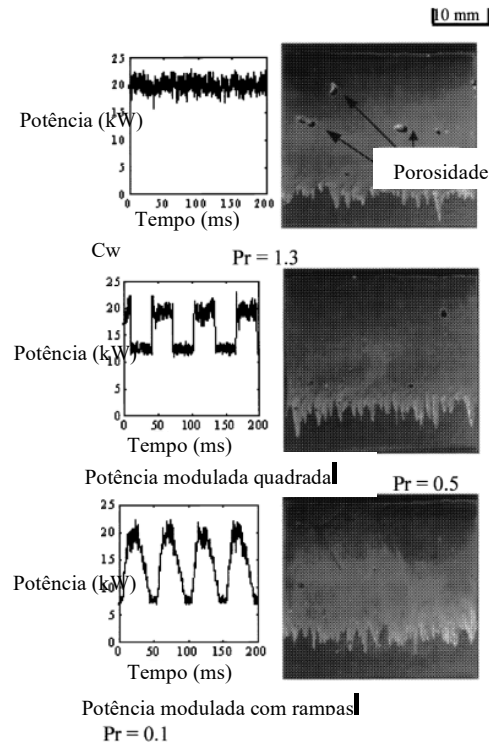


Fonte: adaptada de Tsukamoto (2003)

A figura mostra que os maiores picos de luminosidade durante a soldagem surgem quando a potência é reduzida, por outro lado a redução de profundidade do *keyhole* é acentuada

nessa condição. Os pesquisadores creditaram esse fato à oscilação agressiva do *keyhole* devido à redução de potência abrupta. Por esse motivo, uma rampa de descida de potência foi aplicada, resultando nos resultados da Figura 36.

Figura 36 - Supressão da porosidade via modulação de potência em formato de trapézio.



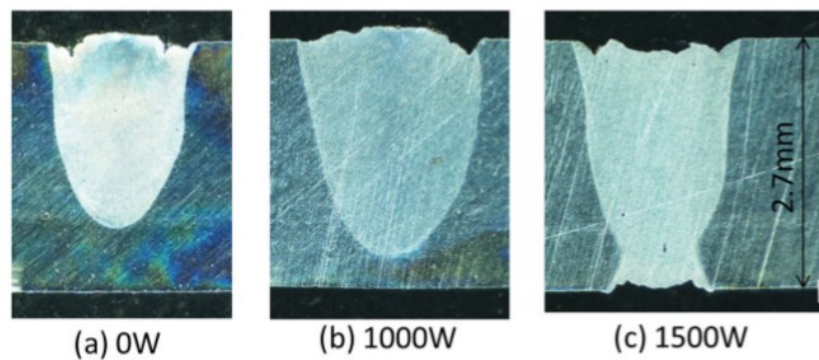
Fonte: adaptada de Tsukamoto (2003)

A figura mostra uma comparação entre os três modos de soldagem estudados pelos autores. Os resultados evidenciam e confirmam as discussões realizadas pelos autores no que se refere a formação de porosidade. O ensaio de potência contínua foi o que apresentou maior porosidade relativa $Pr = 1.3$. Em seguida, a modulação em onda quadrada resultou na redução da porosidade para $Pr = 0.5$, caindo para 0.1 para a solda produzida com rampas atenuando a aplicação de potência.

Zhang et al. (2014) buscaram correlacionar a profundidade de penetração da solda com os parâmetros de frequência em amplitude de potência para a liga de magnésio de alta reflexibilidade AZ31, utilizando um laser de fibra com diâmetros focais de 400 μm e 200 μm . Os resultados mostraram que a modulação da potência do laser em formato sinusoidal reduziu em 33% a energia necessária para penetrar a chapa de 2,7 mm da liga de magnésio.

Os resultados mostraram que o acréscimo da amplitude de modulação (diferença entre $P_{\text{máx}}$ e P_{min}) produziu soldas mais profundas, como mostra a Figura 37, com a mesma média de potência (2 kW), mesma velocidade de soldagem (5 m/min) e mesma frequência de modulação (300 Hz), tornando o processamento mais eficiente a nível de energia.

Figura 37 - Seções transversais de soldas autógenas da liga AZ31 soldadas via laser a) potência contínua b) de potência modulada de formato sinusoidal com 1000 W de amplitude e c) modulada com 1500 W de amplitude.



Fonte: Zhang (2014)

Os pesquisadores creditaram os resultados a maior potência máxima atingida pelo ensaio com amplitude de 1500 W. Esse ensaio teve como potência máxima 3500 W e mínima 500 W, fazendo com que a potência instantânea de incidência seja maior do que as demais, causando maiores penetrações.

Uma seleção de outros artigos que se utilizam da modulação de potência do laser como artifício para melhorar os aspectos gerais da junta soldada é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Estado da arte do método de modulação de potência de laser.

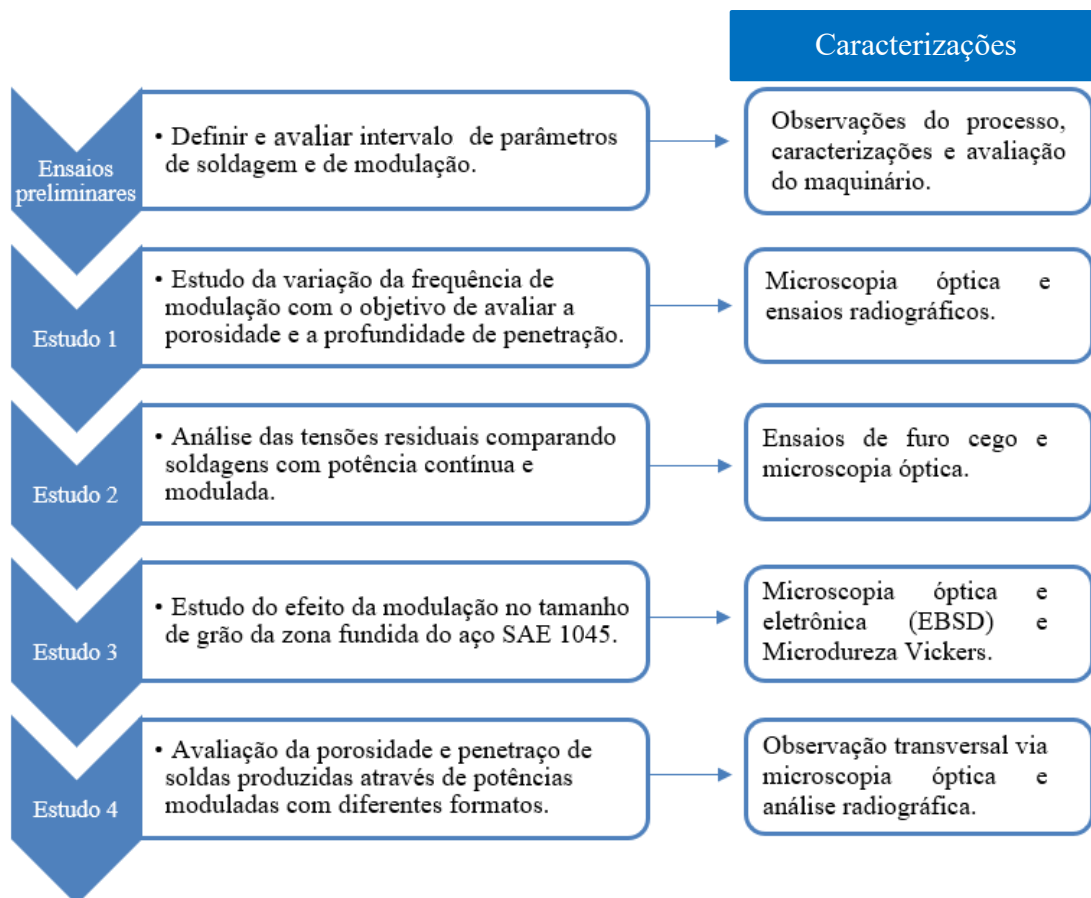
| Título | Autores | Objetivo | Material | Resultado | Justificativa dos autores |
|--|---------------------------|--|------------------|--|---|
| Effects of Power Modulation, Multipass Remelting and Zr Addition Upon Porosity Defects in Laser Seal Welding of End Plug to Thin-Walled Molybdenum Alloy | Zhang et al. (2019) | Reduzir a quantidade de poros e aumentar a penetração. | Liga Mo (NC-Mo) | Pouca redução da porosidade, porém incremento na penetração de soldagem. | Mudança no aporte de energia, interação feixe-amostra, fluxo de massa e reflexões na cavidade. |
| Influence of laser power modulation on the time-resolved temperature distribution in the weld pool during laser welding of copper to aluminum | Jarwitz et al. (2015) | Estabilizar as oscilações na soldagem de cobre e alumínio | Cu-OF e Al99.5 | A modulação conferiu maiores estabilidades ao processo em frequência entre 100 e 300 Hz. | Os sinais de temperatura e o gradiente de temperatura oscilam principalmente com a respectiva frequência da modulação de potência do laser, o que leva a uma faixa de flutuação de temperatura significativamente reduzida (até 70%). |
| Laser Power Modulation to Minimize the Electrical Resistance of Aluminum-Copper Welds. | F. Fetzer et al. (2015) | Minimizar a resistividade elétrica de soldas Alumínio-Cobre. | Cu-OF Al99.5 | A modulação não alterou a resistividade, mas estabilizou as flutuações de profundidade de penetração da solda. | Diferentemente do modo contínuo, as flutuações do keyhole são controladas pela frequência de modulação, o que permite obterem-se penetrações mais uniformes ao longo da solda. |
| Effects of pulse shape modulation in Nd:YAG laser beam welding on the weld pool flow and solidification | J. Wilden et al. (2009) | Reduzir o tamanho de grão na zona fundida. | X5CrNi 18-10 | Redução do tamanho de grão na zona fundida e sua mudança da morfologia colunar para equiaxial. | A adição de uma segunda etapa de modulação gera um subresfriamento da magnitude de 100 K o que estimula a nucleação homogênea. Além disso, a modulação tende a estabilizar a frequência intrínseca do keyhole, o que também estimula este tipo de nucleação. |
| Direct observation of keyhole behavior during pulse modulated high-power Nd:YAG laser irradiation. | S. Fujinaga et al. (2000) | Atingir maior profundidade de solda sem defeitos. | Aço inox SAE 304 | Maior profundidade de solda com redução de porosidade. | O aumento da potência devido à sobreposição de energia causou maior penetração do feixe do laser. Observou-se que aumentos de energia abruptos causavam respingos e desligamentos repentinos causavam poros, sendo o modelo piramidal o de melhor aproveitamento. |

3 MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para atingir de forma satisfatória os objetivos detalhados na seção 1.2, a presente pesquisa se baseou na produção de cordões de solda de 50 mm utilizando parâmetros de base similares aos encontrados na literatura. O objetivo de avaliar o efeito da modulação nos aspectos gerais da solda, como morfologia, defeitos e tensões residuais, veio da necessidade da utilização desse processamento na indústria para unir materiais cada vez mais complexos e com demandas cada vez mais exigentes.

A revisão da literatura mostrou que o ponto chave da produção de soldas profundas e de boa qualidade e com boas propriedades mecânicas vem da estabilização do *keyhole*. O trabalho foi dividido em 4 estudos sequenciais isolados entre si, porém com contribuições pontuais entre os estudos. O procedimento experimental adotado neste trabalho encontra-se no fluxograma da Figura 38, onde a rota de processamento e a caracterização das amostras são ilustradas.

Figura 38 - Fluxograma de atividades experimentais.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

A primeira etapa foi a de parametrização. Nos ensaios preliminares, cordões de solda foram produzidos utilizando emissão de potência contínua a partir de parâmetros da literatura julgados necessários para se atingir cordões no regime de condução de calor e *keyhole*. Em seguida, cordões com emissão de potência modulada foram produzidos baseados na parametrização prévia e também nos parâmetros encontrados na literatura.

Após a parametrização, os quatro estudos foram produzidos estudando a variação de alguns parâmetros de modulação, como frequência e formato de entrega de energia.

Concomitantemente a cada estudo, os cordões foram caracterizados avaliando-se os aspectos morfológicos, qualidade final das soldas, defeitos e tensões residuais. As caracterizações foram a nível microestrutural através de microscopia óptica e eletrônica, ensaios radiográficos, microdureza Vickers e de furo cego, visando a comparação entre os métodos utilizados para soldagem. Todos os cordões foram realizados de maneira autógena, sem adição de material.

O ponto chave deste capítulo é esquematizar como o trabalho partiu da produção de cordões de solda de potência contínua até a produção dos cordões de forma modulada, bem como mostrar de que forma as soldas foram caracterizadas, a fim de comparar os dois métodos de soldagem e destacar suas diferenças.

3.1 APARATO EXPERIMENTAL

3.1.1 Fonte laser

Para a execução do procedimento de soldagem, foi utilizada uma fonte de laser YLS 10000, com potência máxima de 10 kW, da empresa IPG Photonics, disponível no Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina (LMP/UFSC). As informações sobre o formato de modulação e sua aplicação na fonte será apresentado em seção posterior.

A fonte utilizada neste trabalho contém um laser de fibra (Yb, Itérbio) com comprimento de onda na faixa de 1070 a 1080 nanômetros. A fonte pode ser utilizada para trabalhos de soldagem, corte, *cladding*, entre outros. A Figura 39 apresenta a fonte disponibilizada no laboratório LMP/Laser e a Tabela 3 suas características principais.

Tabela 3 - Características do laser.

| Características ópticas da fonte | | | | |
|----------------------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Fonte | Modo de operação | Potência máxima de saída (kW) | Comprimento de onda (nm) | Diâmetro do feixe (μm) |
| IPG Photonics | CW/Modulado | 10 | 1070 | 800 |

Figura 39 - Fonte LASER IPG Photonics® YLS - 10000.



Fonte: Souza (2017)

Por ser uma fonte de alta potência, seu manuseio requer diversos cuidados com segurança e operação, que serão abordados nas seções posteriores.

3.1.2 Cabeçote óptico

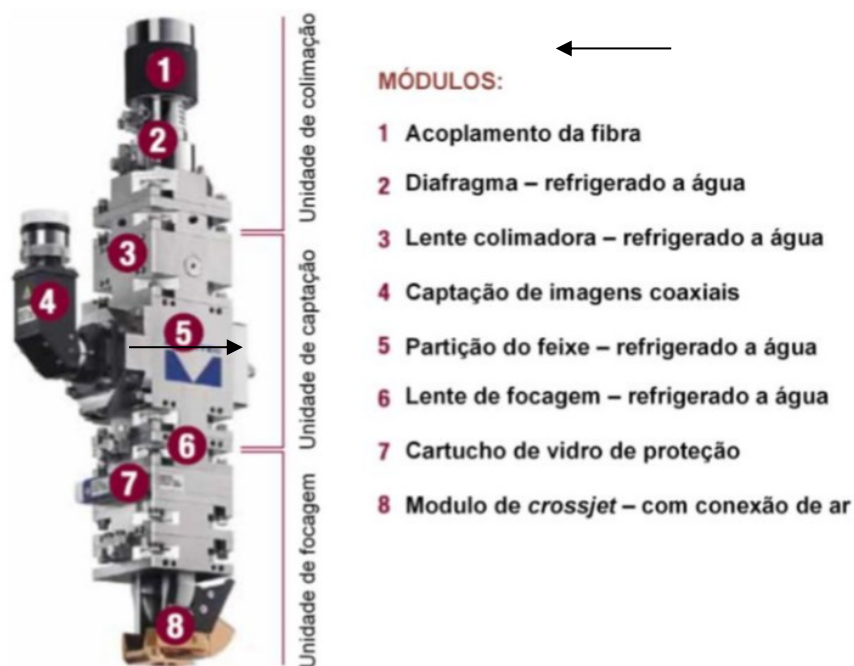
Assim como a fonte laser, as características do cabeçote também definem que tipos de processos podem ser realizados, bem como suas funcionalidades. O cabeçote utilizado nesse trabalho é de modelo YW52, da marca Precitec, com uso específico para o processamento de soldagem. A fibra óptica é fixa na parte superior do cabeçote com o feixe de radiação laser passando por dois módulos: um diafragma e uma lente colimadora, ambos refrigerados por água. Em seguida, passa pelo módulo de partição do feixe, também refrigerado a água, no qual é instalada, lateralmente, uma câmera de captação de imagens coaxiais do fabricante Kappa Optronics, modelo CF 8/5 MX. Essa câmera é utilizada no posicionamento do laser em relação à peça, por exemplo, na zeragem de percurso e no acompanhamento de processo durante a

soldagem. O último módulo óptico desse cabeçote é responsável pelo foco do feixe, contendo a lente de focagem, a partir da qual é definida a distância focal de trabalho.

Um fluxo de ar comprimido de alta velocidade, chamado de *crossjet*, é acionado com um fluxo transversal ao laser, fazendo com que as partículas que se movem no sentido do feixe sejam empurradas para longe, impedindo a contaminação do sistema.

A lente colimadora do sistema laser possui distância focal de 150 mm e a lente de foco de 300 mm, introduzindo uma relação de 2:1 ao diâmetro focal (*spot size*). Dessa forma, a fibra de 400 μm de seção transversal utilizada neste trabalho disponibiliza feixes de laser com no mínimo 800 μm ou 0,8 mm de diâmetro focal. A Figura 40 ilustra o cabeçote utilizado para os experimentos.

Figura 40 - Visão geral do cabeçote óptico



Fonte: Precitec (2015)

3.1.3 Sistema de controle e mesa de processamento

Para o controle dos parâmetros e de movimento da mesa de trabalho, foi utilizado um sistema de movimentação por comando numérico CNC SINUMERIK 840D SL da empresa Siemens®. O sistema comanda 3 eixos cartesianos ortogonais, sendo dois deles localizados na

mesa XY da Figura 41, sobre a qual é montado o sistema de fixação dos corpos de prova, e o eixo vertical Z, no qual é acoplado o cabeçote de soldagem. A movimentação relativa entre o corpo de prova e o cabeçote que emite o feixe de laser é comandada via linguagem de programação, mais precisamente via Código-G, padronizado pela norma ISO 1056, em um dispositivo CNC integrado também ao painel de comando do laser, permitindo a introdução dos parâmetros de entrada de emissão do laser para o processamento, como potência, posições dos eixos, velocidades de avanço entre outros (GUTJAHR, 2017).

A Figura 41 mostra a mesa de movimentação utilizada para peças e componentes de pequenas dimensões. As amostras são fixadas na mesa através de parafusos e a mesa se movimenta durante todos os ensaios, sendo o feixe de laser fixo e apontado para o mesmo ponto. O SINUMERIK 840D SL possibilita o comando simultâneo de até 32 eixos.

Figura 41 - Sistema de movimentação para peças de pequenas dimensões.



Fonte: Souza (2017)

Um ponto de alimentação de gases de proteção é instalado junto ao sistema de movimentação, composto de quatro saídas com quatro diferentes gases de proteção: ar, argônio, gás carbônico e nitrogênio. A vazão dos gases pode ser configurada entre 2 e 25 l/min. O gás argônio foi o selecionado para utilização durante todo o trabalho e seu fluxo foi estabilizado em 10 l/min.

3.1.4 Segurança e infraestrutura

A manipulação da tecnologia laser de alta potência pode ser muito perigosa se os devidos cuidados e normas não forem cumpridos, oferecendo riscos à saúde dos operadores e

às pessoas ao entorno dos processos. As normas e suas utilizações precisam estar esclarecidas para todos que venham a trabalhar com essa tecnologia.

Existem dois aspectos principais que precisam ser notados quando se trata de segurança em um ambiente com laser: a classe do laser e o comprimento de onda. Essas características definem quais cuidados devem ser tomados durante a operação. A norma ANSI Z136 (ANSI, 2009) classifica a fonte laser em 5 classes, que dizem respeito aos perigos quando em contato com humanos:

Classe 1 e 1M: produzem radiação visível ou invisível. Sob todas as condições normais de operação, são considerados incapazes de causar lesão por contato direto com o feixe.

Classe 2 e 2M: lasers que produzem radiação visível de baixa potência, não podendo exceder 1×10^{-3} W. A proteção dos olhos normalmente é feita naturalmente pelo piscar de olhos. Porém, a incidência direta nos olhos é proibida por esta norma.

Classe 3: lasers que emitem moderado nível de radiação visível ou invisível e requerem um controle mais rigoroso que as classes 1 e 2. A classe 3 abrange feixes com potência entre 1×10^{-3} e 5×10^{-3} W. Não é recomendado que operações sejam feitas a olho nu e nem com auxiliares ópticos, como binóculos, podendo causar lesões na retina. Lasers desta classe abrangem todo o espectro de radiação, desde o ultravioleta ao infravermelho, no qual os extremos não são percebidos a olho nu.

Classe 3B: lasers que produzem radiação visível e invisível, com potência entre 5×10^{-3} e 500×10^{-3} W, considerados de potência média, e capazes de produzir lesões quando dirigidos diretamente aos olhos. lasers desta classe podem produzir reflexões perigosas, mas normalmente não produzem reflexões difusas críticas e não oferecem risco de incêndio.

Classe 4: lasers que emitem radiação visível e invisível, capazes de causar lesões aos olhos e à pele. Produzem reflexão direta e difusa e oferecem risco de incêndio. Pertencem a classe 4 lasers com potência média maior que 0,5 W.

A fonte laser de fibra YPG usada para os experimentos de modelo YLS-10000, com 10 kW de potência de saída e um comprimento de onda de 1,070 micrometros, corresponde à classe 4, que é o risco máximo, pois oferece perigos à pele e danos aos olhos em caso de exposição direta e indireta.

Para ser condizente com as exigências de segurança necessárias para ambientes onde laser de alta potência são utilizados, o laser utilizado neste trabalho foi instalado em um ambiente que fornece segurança adequada ao operador e aos demais espaços do laboratório, como ilustrado na Figura 42. As paredes da sala foram preenchidas com areia seca no seu

interior e as portas e janelas foram fabricadas com chapas de aço com paredes duplas, permitindo também seu preenchimento. A areia retarda o atravessamento caso o laser seja incidido sobre as paredes ou janelas (GUTJAHR, 2017).

Figura 42 – Vista superior do ambiente projetado para prover segurança a durante processamentos a laser no laboratório LMP/Laser.



Fonte: (GUTJAHR, 2017)

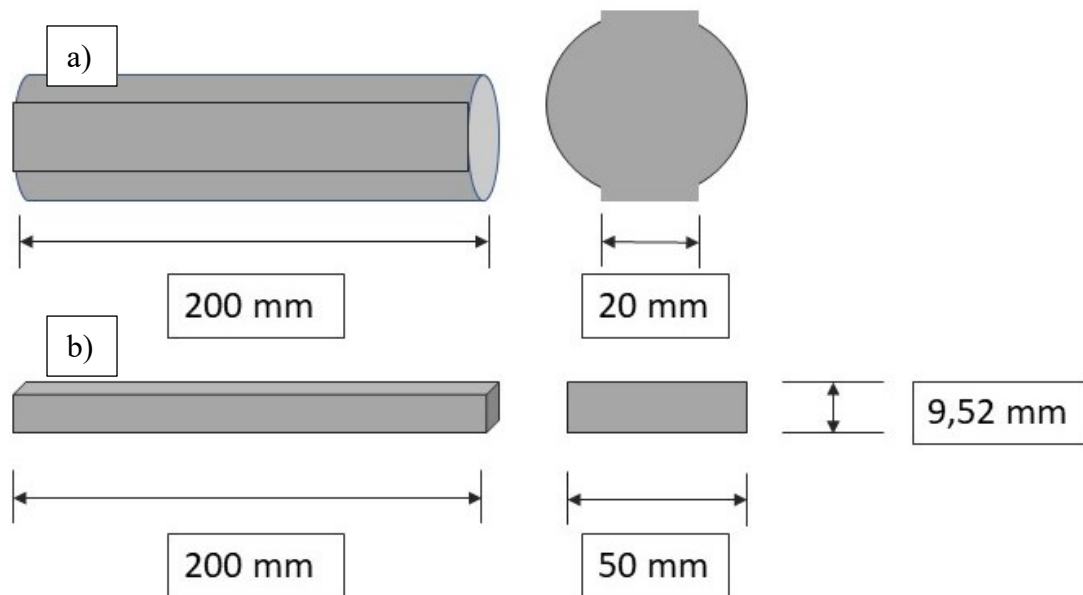
Através da figura, nota-se que o operador fica isolado da sala de processamento durante todo o tempo do laser ligado, essa configuração é denominada acesso Excluído, onde toda a operação e o equipamento ficam isolados e controlados remotamente. Da sala de comando pode-se controlar todo o processo através da interface de programação, possibilitando ao operador acompanhar e intervir no processo.

Um sistema de exaustão retira os gases provenientes dos processamentos através de um sistema de aspiração e filtragem, embora ainda seja necessária a utilização de equipamentos de proteção individual no retorno à sala após processamentos.

3.1.5 Materiais

Os materiais utilizados como substrato de soldagem foram um aço SAE 1045 e um aço SAE 1020, ambos em formato de barra chata, com as dimensões 50 mm x 200 mm x 9,52 mm adquiridos da empresa Mkraft Comércio de Metais LTDA, com sede em Joinville-SC. Além desses, um aço SAE 4140 em formato cilíndrico, com duas superfícies planas, foi adquirido da empresa Villares. A espessura de 9,52 mm das barras chatas foi escolhida por ser uma espessura de fácil acesso no comércio de barras e por ser de um valor de ordem de grandeza interessante para o estudo de penetração profunda a laser. A Figura 43 esquematiza as características físicas dos corpos de prova utilizados nesse trabalho.

Figura 43 - Esquema das características físicas dos corpos de prova a) aço SAE 4140 e b) aços SAE 1020 e 1045.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

A escolha dos aços com essa composição não foi randômica. Algumas características motivadoras foram cruciais para a seleção dos aços SAE 1020 e 1045 neste trabalho. Como citado anteriormente na revisão de literatura, os aços escolhidos possuem entre suas características principais o baixo custo, a disponibilidade no mercado no que tange à composição e também o formato em barra chata, que facilita a manipulação e a aplicação na mesa de trabalho. Porém, o fator mais importante no momento de seleção foi a relativa facilidade de soldagem em relação a materiais com altos índices de reflexão e microestrutura

complexa. A escolha de um material de soldabilidade simples possibilita a avaliação das características mais frequentemente encontradas na soldagem a laser no geral. Este trabalho visa, desde sua concepção, analisar os aspectos mais naturais da solda como profundidade e razão de aspecto, além dos defeitos mais comuns encontrados na literatura, como poros e tensões residuais elevadas. A baixa complexidade dos aços SAE 1020 e 1045 possibilita com mais facilidade a avaliação desses aspectos.

O aço SAE 4140 foi utilizado unicamente no estudo das tensões residuais pela sua maior temperabilidade, o que eleva, como citado na seção 2.1.10, sua suscetibilidade a distorções e tensões internas, devido à transformação martensítica, que confere ao material transformado um ganho de aproximadamente 4% em volume, expandindo todo o reticulado das periferias da solda.

As composições químicas segundo a norma ABNT NBR NM 87:2000 dos aços utilizados no trabalho estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição química dos aços utilizados neste trabalho.

| | %C | %Mn | %P | %S | %Cr | %Mo |
|-------------------------|-------------|-------------|---------|---------|------------|-------------|
| Aço SAE 1020 | 0,18 - 0,23 | 0,30 - 0,60 | < 0,030 | < 0,050 | 0 | |
| Aço SAE 1045 | 0,43 - 0,50 | 0,60 - 0,90 | < 0,040 | < 0,050 | 0 | |
| Aço SAE 4140 | 0,38 - 0,43 | 0,75 - 1,00 | < 0,035 | < 0,040 | 0,80 – 1,1 | 0,15 - 0,25 |

3.2 PARAMETRIZAÇÃO

3.2.1 Ensaios preliminares

A definição dos parâmetros para os ensaios preliminares de soldagem contínua teve como base a dissertação de mestrado de Souza (2017), intitulada “Aplicação de um laser de fibra de alta potência para soldagem autógena de juntas espessas”, produzida sob a infraestrutura do LMP/UFSC e defendida diante do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. Os parâmetros, vistos na Tabela 5, foram aplicados apenas ao aço SAE 1020 e reavaliados em busca unicamente da obtenção de soldas íntegras, com reduzido número de defeitos, como as produzidas por Souza.

Tabela 5 - Parâmetros de soldagem autógena com potência contínua.

| Aço SAE 1020 | | | |
|------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| Experimento (n°) | Posição focal (mm) | Velocidade (m/min) | Potência (kW) |
| CT1 | - 6 | 3 | 4 |
| CT2 | - 6 | 1 | 2 |

Os parâmetros da Tabela 5 estão representados pelo gráfico de distribuição de potência da Figura 44.

Figura 44 - Distribuição de energia dos experimentos a) CT1 b) e CT2.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

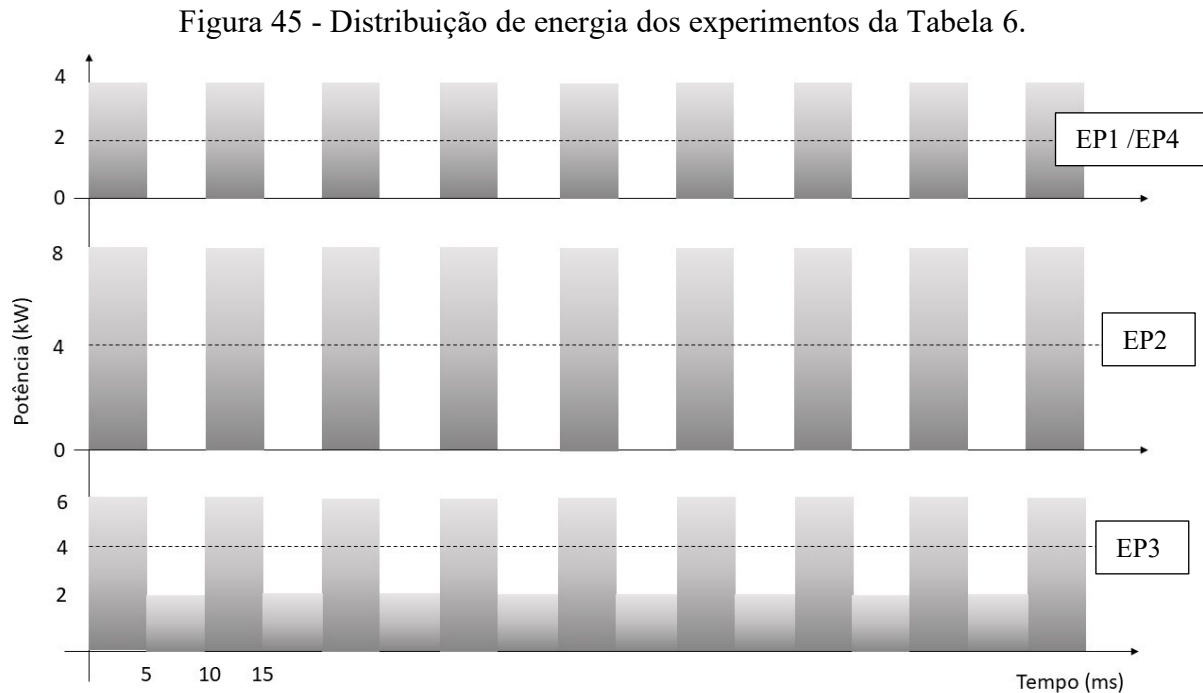
Em seguida, ainda nos estudos preliminares, os parâmetros de modulação foram aplicados em cima dos parâmetros da Tabela 5 de soldagem contínua, com base na literatura (MATSUNAWA, 1998), variando-se a potência em busca de um intervalo de processamento que conferisse à solda características de regime de condução de calor e *keyhole*, mantendo reduzido o número de defeitos. Os parâmetros foram repetidos para 3 amostras afim de obter maior espaço amostral. Essa aplicação foi inédita no laboratório LMP/Laser. O mecanismo de modulação consistiu em ligar e desligar o laser através de comando numérico, com os tempos de laser ligado (t_{on}) e desligado (t_{off}) bem determinados graças ao software de comando do laser.

A Tabela 6 mostra os parâmetros da bateria de ensaios preliminares de modulação. Os valores de posição focal foram mantidos constantes para todos os ensaios.

Tabela 6 - Etapa 1: parâmetros dos testes iniciais de soldagem com potência modulada.

| Aço SAE 1020 (Posição focal -6 mm) | | | | | | |
|------------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|--------------------------------|
| Experimento (n°) | Potência de pulso (kW) | Potência de base (kW) | Potência média (kW) | t_{on}/t_{off} (ms) | Frequência (Hz) | Velocidade de soldagem (m/min) |
| EP1 | 4 | 0 | 2 | 5 | 100 | 3 |
| EP2 | 8 | 0 | 4 | 5 | 100 | 3 |
| EP3 | 6 | 2 | 4 | 5 | 100 | 3 |
| EP4 | 4 | 0 | 2 | 5 | 100 | 1 |

Para melhor visualização, os parâmetros EP1, EP2, e EP3 da Tabela 6 estão representados pelo gráfico de distribuição de potência da Figura 45. As linhas pontilhadas representam a potência média aplicada em cada processamento.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

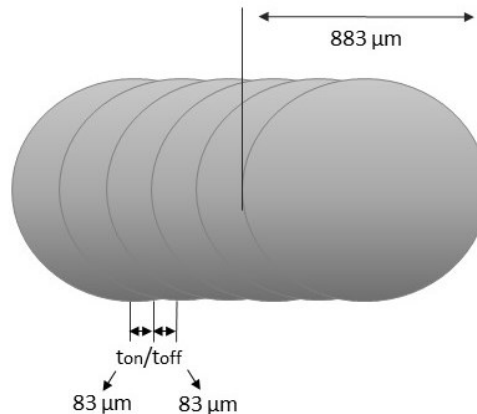
A frequência foi definida em 100 Hz devido ao cálculo, através da Equação 8, da porcentagem de sobreposição dos pulsos, com base na pesquisa de Heider (2015), que provou que taxas muito baixas de sobreposição (< 50%) apresentavam soldas com descontinuidades de penetração e maiores taxas de defeitos, enquanto soldas com sobreposição muito elevadas (> 90%) apresentavam característica de soldas produzidas via potência contínua. Alguns trabalhos como Tsukamoto et al. (2003) obtiveram outras frequências ótimas, porém, é preciso levar em consideração outros aspectos durante essa definição, como velocidade de soldagem, viscosidade do material, qualidade e diâmetro do feixe.

$$\text{sobreposição} = \left(\frac{\text{velocidade de soldagem} \left(\frac{\mu\text{m}}{\text{ms}} \right) \times \text{toff}(\text{ms})}{\text{diâmetro focal do feixe} (\mu\text{m})} - 1 \right) \times (-100) \quad (8)$$

A Figura 46 mostra um esquema da sobreposição de pulsos da bateria de ensaios preliminares. Seguindo os parâmetros de velocidade de soldagem de 1 m/min, de t_{on}/t_{off} de 5

ms e o diâmetro focal do feixe laser de 800 μm , o valor de 90% de sobreposição é encontrado. Essa porcentagem, limite superior da pesquisa realizada por Heider, foi escolhida devido ao objetivo do estudo posterior, de avaliar a redução na frequência de modulação e, conseqüentemente, da sobreposição dos pulsos.

Figura 46 - Aspecto das soldas produzidas com 90% de sobreposição de pulsos.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

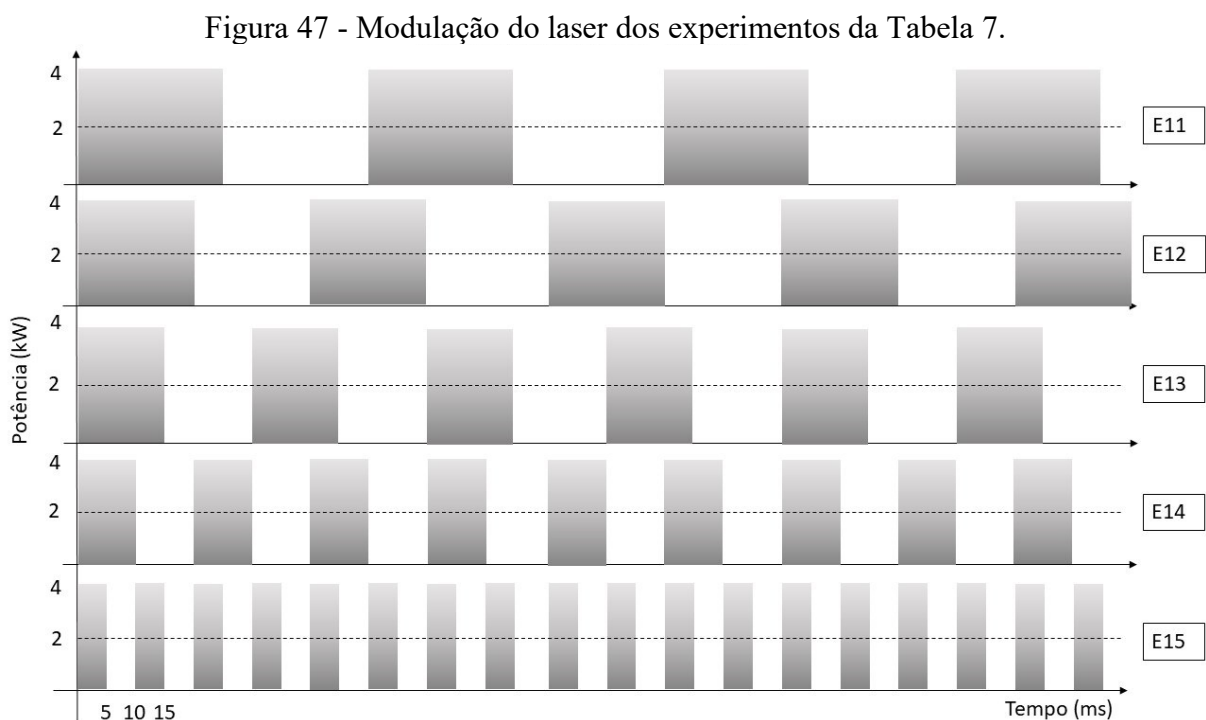
3.2.2 Primeiro estudo: efeito da frequência

A definição do intervalo de processo, com as potências e velocidades determinadas pela bateria de ensaios preliminares, abre espaço para o estudo da frequência de modulação, cujos parâmetros podem ser vistos na Tabela 7, através da manipulação do tempo de pulso, influenciando na porcentagem de sobreposição do feixe laser. O material soldado nesse estudo foi o aço SAE 1020 e os resultados foram analisados quanto ao nível de porosidade e aos aspectos morfológicos do cordão de solda. Cada parâmetro foi aplicado em três amostras para fim de repetibilidade e espaço amostral.

Tabela 7 - Estudo da variação da frequência de pulso.

| Aço SAE 1020 (Posição focal -6 mm e velocidade de soldagem = 1 m/min) | | | | | | |
|---|---------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Experimen to (n°) | Potência de pulso (kW) | Potência de base (kW) | Potência média (kW) | t_{on}/t_{off} (ms) | Frequência (Hz) | Sobreposição de pulsos (%) |
| E11 | 4 | 0 | 2 | 25 | 20 | 47,11 |
| E12 | 4 | 0 | 2 | 20 | 25 | 58,33 |
| E13 | 4 | 0 | 2 | 15 | 33 | 68,75 |
| E14 | 4 | 0 | 2 | 10 | 50 | 79,80 |
| E15 | 4 | 0 | 2 | 5 | 100 | 90,59 |

Os parâmetros da Tabela 7 estão representados pelo gráfico de distribuição de potência da Figura 47. As linhas pontilhadas representam a potência média aplicada em cada processamento. Uma solda de referência em regime contínuo não foi levada em consideração nesta seção devido ao fato de a mesma, para os parâmetros escolhidos, apresentar características do regime de condução de calor (como as apresentadas nos ensaios CT1 e CT2), não sendo comparáveis as soldas moduladas, produzidas sob o regime *keyhole*. Ademais, essa seção não objetiva comparar ensaios contínuos e modulados, mas a modulação de potência em si, buscando a melhor magnitude de frequência para uso nos estudos posteriores.

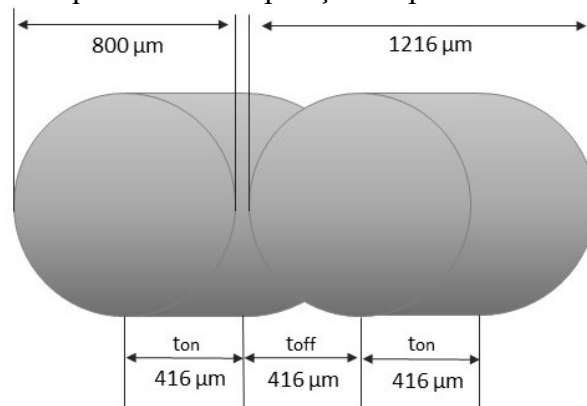


Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Este estudo serviu de base para a escolha da frequência nos estudos subsequentes, sendo escolhida aquela com menor porcentagem de poros, maior e mais uniforme grau de penetração.

O esquema de sobreposição de pulsos do ensaio E11, com 47,11% de sobreposição é ilustrado na Figura 48, mostrando como a periferia do pulso subsequente se sobrepõe ao centro do pulso anterior. Como discutido na seção de qualidade do feixe, sabe-se que distribuição de energia do feixe do laser não é uniforme, sendo dependente dos fatores M^2 e BPP. Essa não uniformidade não garante a porcentagem de sobreposição dos pulsos, devido o laser utilizado no trabalho não possuir $M^2 = 1$, portanto, os valores trazidos são aproximados.

Figura 48 - Esquema de sobreposição de pulsos do ensaio E11.

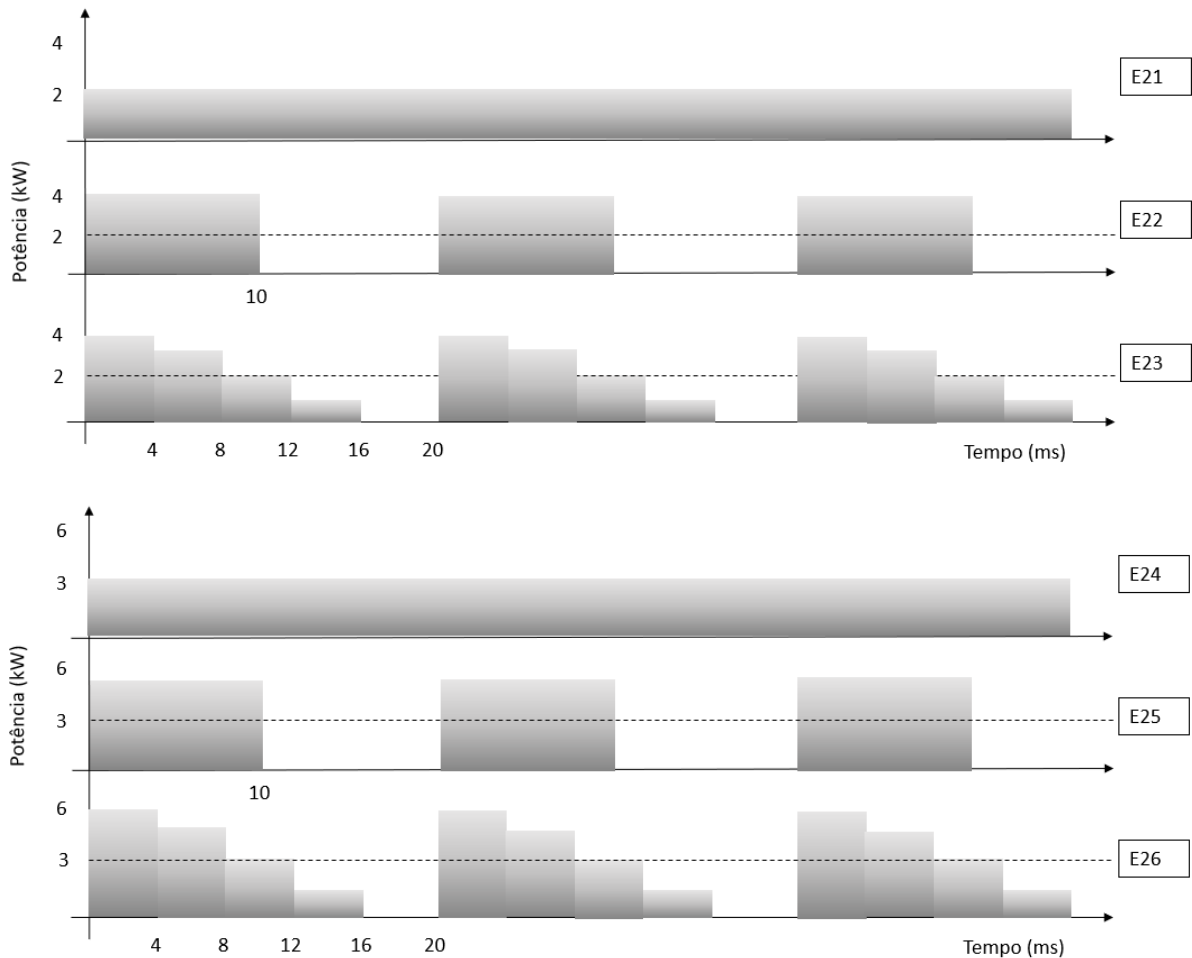


Fonte: elaborada pelo autor (2020)

3.2.3 Segundo estudo: tensões residuais

A parametrização do segundo estudo consistiu na avaliação de dois formatos de modulação: modulação em forma quadrada e em degraus, atenuando a redução da potência até zero, a fim de diminuir possíveis tensões residuais provenientes do processamento de soldagem. Com o objetivo de atingir penetrações de magnitudes diferentes (modo de condução e modo *keyhole*) e conseqüentemente introduzir tensões residuais diferentes, duas velocidades de soldagem foram aplicadas 2 m/min para as amostras E21, E22 e E23, e 0,5 m/min para as amostras E24, E25, e E26, bem como duas diferentes potências médias (2 e 3 kW). Os aços utilizados neste estudo foram o SAE 1045 e o SAE 4140, devido às suas aproximadas porcentagens de carbono, mas suas diferentes porcentagens de elementos de liga, o que altera seus valores de temperabilidade e tenacidade. A posição focal foi mantida em -6 mm e os parâmetros estão ilustrados na Figura 49.

Figura 49 - Parâmetros de soldagem do segundo estudo.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Para cada parâmetro, três repetições de ensaio de soldagem foram realizadas e para cada cordão feito, uma medida de furo cego foi realizada, obtendo-se um espaço amostral de três medidas por parâmetro. As análises das tensões resultantes foram feitas apenas a nível de tensões tratativas, devido a esse esforço ter trazido valores mais críticos em relação as tensões de escoamento do material de base, que são comumente definidas sob esforços de tração.

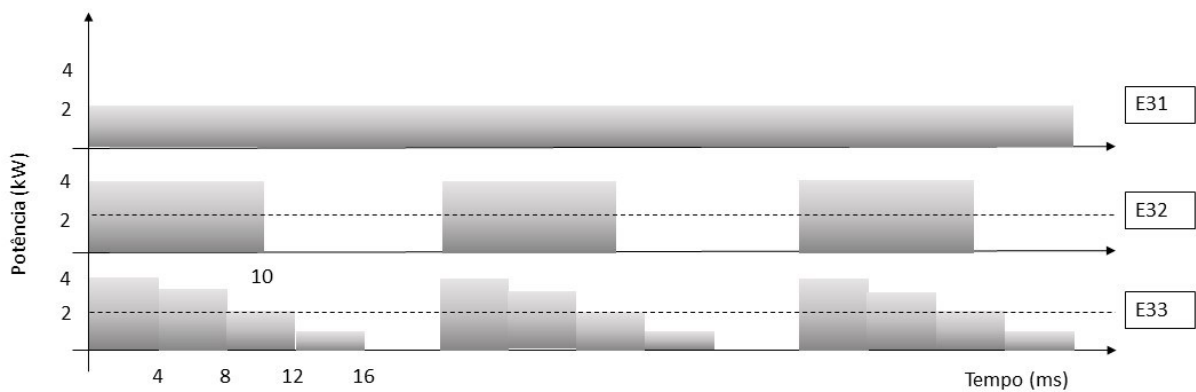
3.2.4 Terceiro estudo: análise do tamanho de grão

O terceiro estudo inserido neste trabalho tem como parametrização as mesmas curvas dos ensaios E21, E22 e E23, do segundo estudo, seguindo como objetivo a análise de tamanho de grão médio da zona fundida de cada solda produzida. Este estudo foi focado sobre soldas produzidas pelo modo de condução, de menor penetração, por considerar que a medição de tamanho de grão seria facilitada devido a, como mencionado na seção de revisão, menos

fenômenos afetarem esse tipo de soldagem. Por esse motivo, a velocidade de soldagem de 2 m/min foi utilizada, combinada com potências médias de 2 kW. As amostras utilizadas foram de aço SAE 1045.

Sabe-se, através da literatura, que o tamanho de grão de amostras metálicas fundidas é fortemente dependente do ciclo térmico a elas submetido (REED-HILL, R.E., ABBASCHIAN, R., ABBASCHIAN, 2010). O aquecimento é o agente motor principal atuante no coalescimento dos grãos após a nucleação, fazendo com que sua expansão possa ser efetuada por aumento de volume ou pelo englobamento de grão menores de sua periferia, sob a lógica de mais calor, maior o tamanho de grão. Nesse sentido, a modulação da potência objetiva alterar o aporte térmico da soldagem contínua visando evitar o coalescimento do grão durante a soldagem. O crescimento do grão na região da solda prejudica as propriedades mecânicas da solda uma vez que os contornos de grão atuam como barreiras de movimentação de discordâncias, o que aumenta a tenacidade a fratura da solda, tornando-as mais resistentes a trincas (REED-HILL, R.E., ABBASCHIAN, R., ABBASCHIAN, 2010) e quanto maior o grão, menor a densidade de contornos, reduzindo essas propriedades. As curvas dos parâmetros são ilustradas na Figura 50.

Figura 50 - Parâmetros de soldagem do terceiro estudo.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Cada parâmetro foi ensaiado com duas repetições, totalizando três amostras por parâmetro.

3.2.5 Quarto estudo: variação do formato de modulação

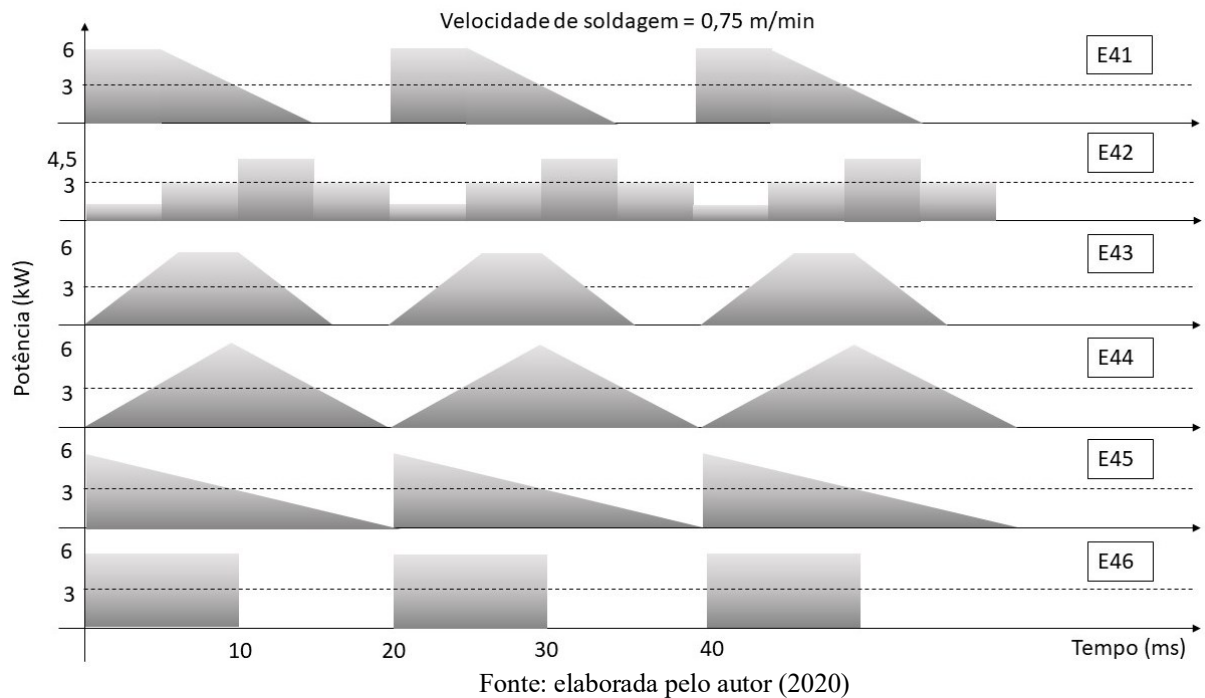
Tsukamoto, Kawagushi, Arakane e Honda (2003), em sua pesquisa mencionada na seção de revisão, variaram o formato de modulação da potência do laser e relataram que descidas abruptas de potência aumentavam a porosidade relativa final dos componentes soldados a laser. Pulsações quadradas ligam e desligam o laser, fazendo com que a interação com a amostra ocorra sempre nas extremidades de potência, podendo causar respingos e má qualidade na superfície da solda. Em razão disso, o quarto estudo deste trabalho avaliou o formato da potência do laser, adicionando rampas de subida e de descida ao processo. Os parâmetros estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Etapa 3: estudo da forma de modulação de potência.

| Aço SAE 1020 (Posição focal -6 mm) | | | | | | |
|--|------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|--------------|-------------------------|
| Velocidade de soldagem = 0,75 m/min | | | | | | |
| Experimento (n°) | Potência de pulso (kW) | Potência de base (kW) | Potência média (kW) | Rampa de subida (W/ms) | Patamar (ms) | Rampa de descida (W/ms) |
| E41 | 6 | 0 | 3 | - | 5 ms | - |
| E42 | 6 | 0 | 3 | - | - | 600 W/ms |
| E43 | 6 | 0 | 3 | 600 W/ms | - | 600 W/ms |
| E44 | 6 | 0 | 3 | 1200 W/ms | 5 ms | 1200 W/ms |
| E45 | 4,5 | 1,5 | 3 | - | - | - |
| E46 | 6 | 0 | 3 | - | 10 ms | 600 W/ms |

Os parâmetros da Tabela 8 estão representados pelo gráfico de distribuição de potência da Figura 51.

Figura 51 - Distribuição de energia dos experimentos da Tabela 8.



A frequência de modulação foi mantida a 50 Hz e o material escolhido para a soldagem foi o aço SAE 1020. Atenção especial foi tomada para que a potência média e a frequência de todos os ensaios fossem mantidas constantemente em 3 kW e 50 Hz, a fim de não haver divergências na posterior comparação entre os ensaios. Cada parâmetro foi repetido por duas vezes, totalizando três amostras por ensaio.

3.3 CARACTERIZAÇÕES

As caracterizações microestruturais e as análises dos defeitos foram realizadas simultaneamente à produção dos cordões preliminares e dos cordões dos quatro estudos, visando à otimização dos parâmetros de soldagem.

3.3.1 Microscopia Óptica

A microscopia óptica foi realizada utilizando um microscópio óptico (MO) Leica®, modelo DM 4000 MLED, com preparação metalográfica padrão, com o objetivo de avaliar, através de cortes transversais das soldas, a profundidade do cordão e suas respectivas

características como ZTA, tamanho de grão, fases e microestruturas presentes, possíveis mordeduras, faltas de fusão e defeitos.

Todas as amostras passaram por preparação metalográfica padrão (lixamento, polimento com alumina de granulometria de 3 e 1 μm e ataque químico (Nital 2%)) antes da observação e captura de imagens no microscópio. As profundidades das soldas e outros aspectos quantitativos foram mensurados através do software ImageJ, com referência das barras de escala introduzidas pelo sistema de captura de imagem do microscópio.

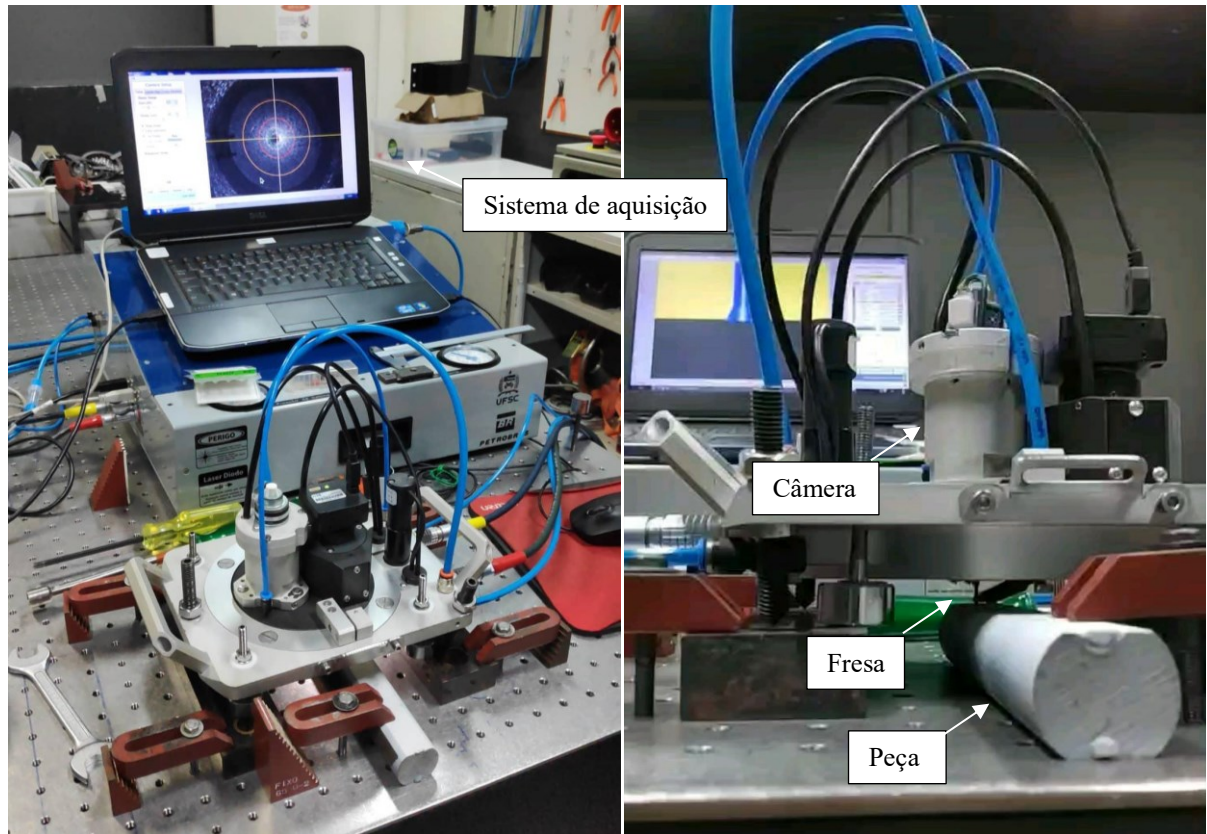
3.3.2 Ensaios radiográficos

Para avaliar de forma qualitativa e quantitativa a presença de poros, foi utilizado o método radiográfico marca GE, modelo: ERESKO 65 MF4 Control com Capacidade de 300 KeV (0,3 MeV) -10 mA cedido pelo laboratório de soldagem LABSOLDA / UFSC. O método consiste na inspeção não destrutiva baseada no gradiente de absorção da radiação penetrante pela peça que está sendo inspecionada. A diferença de densidade, de variação da espessura ou de características de absorção pela composição do material terá como resultado diferentes regiões absorvendo quantidades distintas da radiação penetrante. As amostras tiveram suas superfícies lixadas antes das análises visando à remoção de descontinuidades e buracos deixados pelo processamento de soldagem, agentes que poderiam atrapalhar a visualização dos poros na revelação da radiografia.

3.3.3 Método do furo cego

Com o objetivo de medir as tensões residuais na região do cordão, foi utilizada a técnica do furo cego, que se baseia na deformação aliviada pela introdução de um furo de pequenas dimensões na superfície do componente. O método de aquisição deste alívio de tensões é através de interferometria óptica, a partir de equipamentos dedicados desenvolvidos junto ao LABMETRO / UFSC e ilustrado na Figura 52.

Figura 52 - Equipamento de medição de tensões residuais via furo cego.



Fonte: elaborada pelo autor (2020).

Todos os furos tiveram a penetração de 1 milímetro e foram realizados a 3 milímetros do centro do cordão de solda. As amostras foram encaminhadas ao LABMETRO logo após o processamento de soldagem, visando manter todos os estados de tensão provenientes do ensaio e tiveram suas superfícies pintadas para melhor contraste e aquisição do furo pelo interferômetro óptico. Cada ensaio teve duas repetições, totalizando três amostras por ensaio, e cada solda foi submetida a uma análise de furo cego, totalizando espaço amostral de três para um.

3.3.4 Microdureza Vickers

As medidas de microdureza seguiram padrão Vickers através de um microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2 cedido pelo LABCONF/UFSC. As amostras foram lixadas e polidas até a total remoção de defeitos de superfície e total reflexividade. Cada ensaio teve a repetição de duas amostras, totalizando três amostras, e para cada amostra foram feitas 20 medidas de endentação. A técnica consiste na aplicação de uma pressão bem definida sobre a amostra

exercida sobre um endentador de diamante em formato de pirâmide de base quadrada. A resistência que amostra exhibe contrapondo a pressão do endentador é o que define a magnitude de penetração do material adiamantado. Em seguida, através de microscopia óptica, as dimensões da endentação são medidas e calculadas em razão de dureza Vickers, fornecendo o valor.

De acordo com a norma, a distância entre cada endentação deve ser maior do que as dimensões de 3 vezes a diagonal de cada marcação e são necessárias no mínimo 5 medições para a obtenção de uma média de valor de microdureza.

3.3.5 Microscopia eletrônica de varredura

Para a quantificação do tamanho de grão foi utilizada técnica EBSD, que se baseia na difração de elétrons retroespalhados pelos planos cristalográficos da amostra, gerando informações sobre orientação cristalográfica, caracterização de morfologia de grão e conseqüentemente seus contornos. A técnica é possível através do acoplamento de um detector EBSD da marca NordlysNano a um microscópio eletrônico de varredura JEOL modelo JSM-6701F com fonte FEG (Field Emission Gun) localizado no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica – UFSC. As amostras foram metalograficamente preparadas de forma padrão e posteriormente submetidas a polimento iônico com o objetivo de reduzir a amorfização da superfície decorrente do polimento mecânico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção serão discutidos detalhadamente os resultados obtidos em cada estudo desse trabalho. Os resultados serão distribuídos em cinco seções, como apresentado no fluxograma da Figura 38, respeitando o desenvolvimento do trabalho realizado na seguinte ordem: ensaios preliminares, estudo da frequência de modulação, estudo das tensões residuais, estudo do tamanho de grão e, por fim, o estudo do formato de entrega de energia via modulação de potência.

É importante salientar que os estudos são independentes, ou seja, nenhum resultado entre estudos foi comparado. Todas as comparações foram realizadas entre ensaios do mesmo estudo, visando maior confiabilidade de resultados. Isso se deve à alta complexidade do processamento de soldagem no que diz respeito à transferência de calor. Ensaios realizados com velocidade diferentes, por exemplo, não devem ser comparados quantitativamente a nível de entrega de energia, devido a mudanças na dinâmica do *keyhole* e conseqüentemente dos aspectos da solda.

Alguns parâmetros dos estudos dois, três e quatro foram importados dos estudos anteriores, devido a melhores condições apresentadas pelas soldas produzidas sob os parâmetros específicos utilizados, não configurando como regra geral para outros parâmetros.

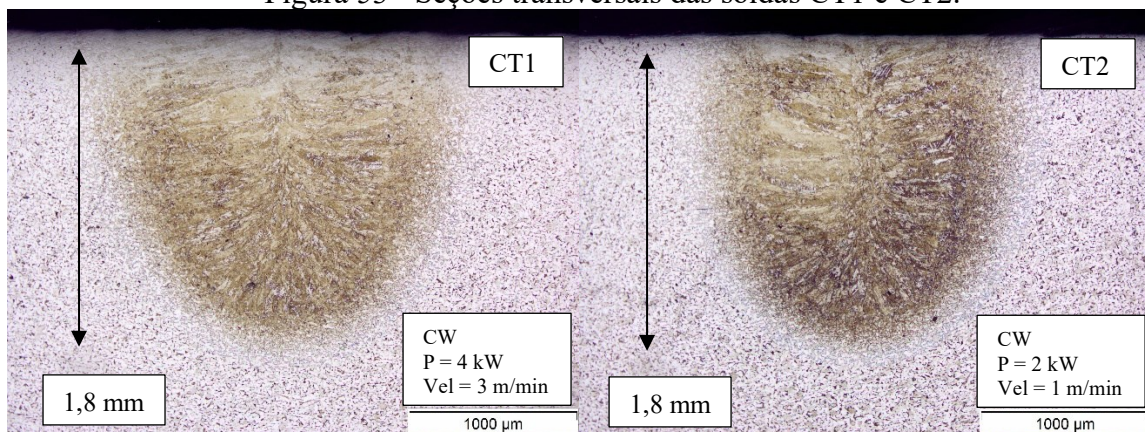
Em resumo, os resultados obtidos nesta pesquisa são resultado das condições específicas a que esse trabalho foi submetido. Sabe-se, via seção 2.1, que processamentos a laser são suscetíveis a muitas variáveis internas e externas de processo, que regem a qualidade final dos componentes processados. Por essa razão, não é garantido que a reprodução de parâmetros seja a única maneira de obter os mesmos resultados, sendo importante a reprodução completa de todas as variáveis de processo. Porém, os resultados obtidos podem ser usados com segurança como guias para futuros trabalhos, se bem documentados e respeitadas as condições de contorno.

Nessa seção, serão apresentadas micrografias de seções transversais e longitudinais de soldas, gráficos, tabelas, lâminas radiográficas e esquemas, visando ilustrar e tornar compreensíveis os resultados alcançados.

4.1 ENSAIOS PRELIMINARES

A parametrização inicial deste trabalho partiu do objetivo de se produzirem soldas no regime de condução e de penetração profunda (*keyhole*), estudando ambos os regimes para processamento posterior, com maior atenção dada ao regime *keyhole* devido a sua maior complexidade e utilização na indústria que utiliza fontes laser de alta potência. Como mencionado na seção de revisão, pesquisas de Ion et al. (2005) sugeriram uma relação entre parâmetros e profundidade de penetração na soldagem a laser apresentando valores de 1,5 mm de penetração para o incremento de cada 1 kW de potência a uma velocidade de 1 m/min, em comprimento de onda laser de aproximadamente de 1000 μm . Souza (2017) confirmou a aproximação, através de soldagens feitas na mesma fonte laser e na mesma estrutura física deste trabalho. Nesse sentido, os parâmetros dos ensaios CT1 e CT2 e EP1 a EP4 (Tabela 5) foram escolhidos, e as seções transversais das soldas resultantes estão apresentadas nas Figuras 53, 54 e 56 a seguir, e foram obtidas através de microscopia óptica. A Figura 53 mostra a seção transversal das primeiras soldas produzidas, conduzidas sobre o regime de potência contínua.

Figura 53 - Seções transversais das soldas CT1 e CT2.

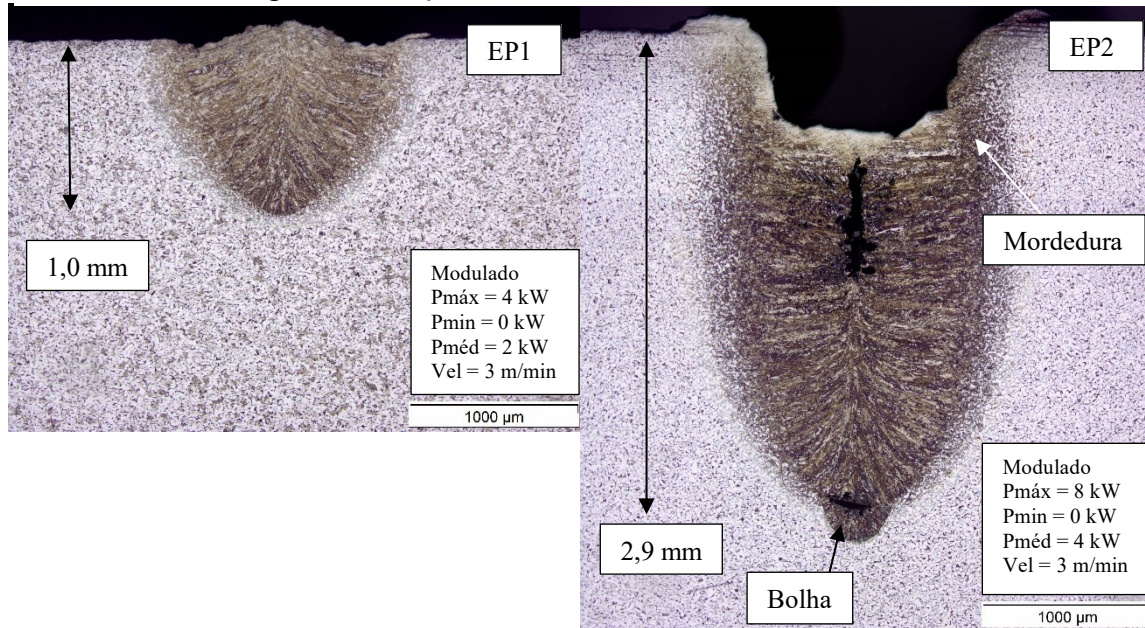


Fonte: elaborada pelo autor (2020)

A produção dessas soldas teve como objetivo atingir uma sequência de parâmetros que conferisse a solda características desejáveis de penetração e de integridade de superfície. Dessa forma, analisando a figura, as soldas CT1 e CT2 apresentaram penetração suficiente para posterior análise dos estudos do regime de condução. Comparando as soldas entre si, nota-se que, devido aos diferentes valores de velocidade e potência, os cordões apresentaram profundidade similar. Como já mencionado na seção de revisão, o efeito do aumento da velocidade fez com que a solda com maior potência não atingisse profundidades maiores. Inspeções visuais de topo e as imagens de seção transversal confirmam a integridade das soldas produzidas sob esses parâmetros.

As seções transversais das amostras EP1 e EP2 são ilustradas na Figura 54.

Figura 54 - Seções transversais das soldas EP1 e EP2.

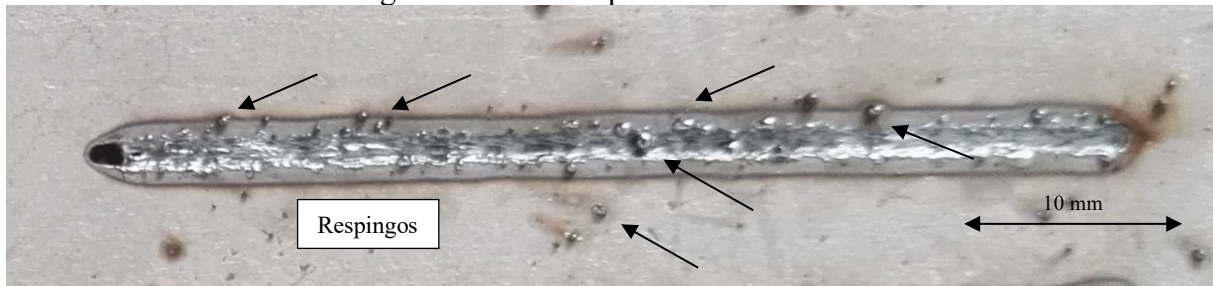


Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Os ensaios com potência modulada foram realizados sob duas velocidades (1 e 3 m/min) e sob diferentes potências, a fim de analisar os mesmos aspectos citados para o caso das soldas contínuas CT1 e CT2. Como ilustrado na seção 3.2.1, os ensaios modulados se basearam em ondas quadradas, onde o laser é ligado e desligado mantendo uma potência média constante de metade do valor da potência máxima aplicada. O cordão de solda EP1 da Figura 54 mostra que o regime de condução foi predominante durante o processamento. A razão de aspecto de aproximadamente 1:1 confirma essa tese, sugerindo que, para maiores penetrações e consequente aplicação do regime *keyhole*, a potência deve ser acrescida ou a velocidade de soldagem diminuída. Esses parâmetros foram aplicados no cordão seguinte. O cordão EP2, produzido com o dobro de potência, pode ser observado na mesma figura. A seção transversal mostra uma grande falta de preenchimento na região superior da solda. Sugere-se, como mencionado na seção que abordou os defeitos de soldagem, que essa falta de preenchimento seja proveniente da alta potência de soldagem combinada à alta velocidade, o que resulta na grande concentração de respingos, os quais ejetam o metal da poça fundida. Além disso, nota-se o defeito de bolha aprisionada, possivelmente proveniente das oscilações do *keyhole* mencionadas e esquematizadas na seção de revisão. A Figura 55 ilustra uma imagem de topo

do cordão de solda EP2, com as flechas indicando a presença de respingos e o mal aspecto superficial da solda. As imagens da solda EP2 sugerem a má escolha de parâmetros para esse cordão, devido à grande quantidade de defeitos.

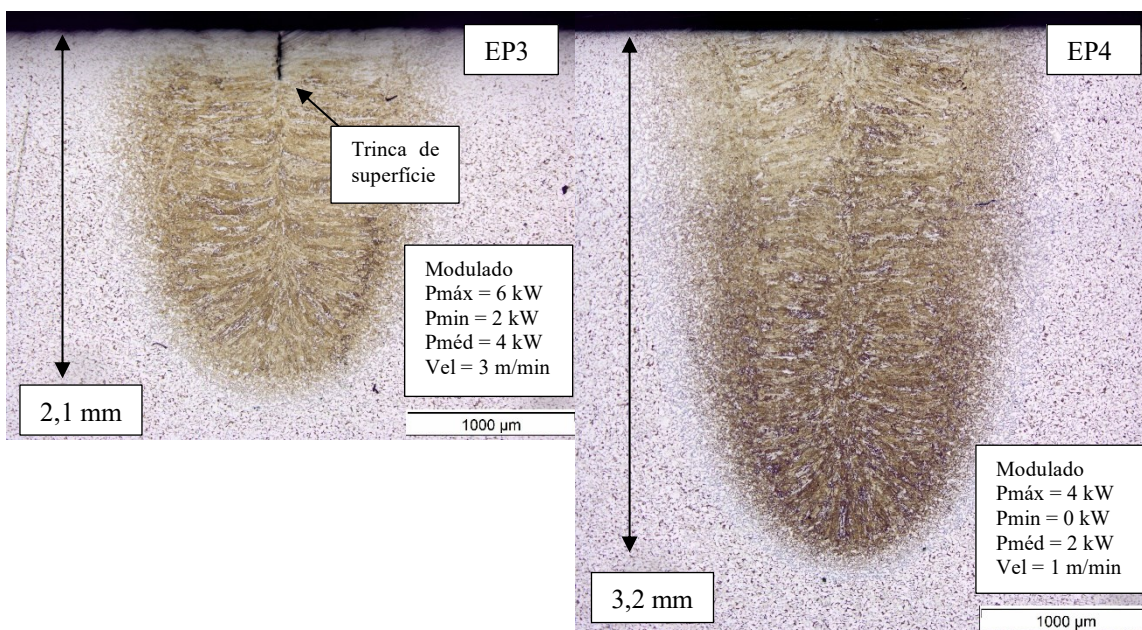
Figura 55 - Vista superior da solda EP2.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

A Figura 56 ilustra a segunda tentativa de produção de cordões de solda com potência modulada.

Figura 56 - Seções transversais das soldas EP3 e EP4.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Analisando as seções transversais da Figuras 56, nota-se, à primeira vista, cordões com uma melhor integridade. A solda EP3 produzida a 3 m/min com potência média de 4 kW apresentou, ao contrário da solda EP2, reduzida quantidade de defeitos tanto superficiais, quanto internos, devido à menor potência máxima aplicada (6 kW). Esse resultado sugere uma

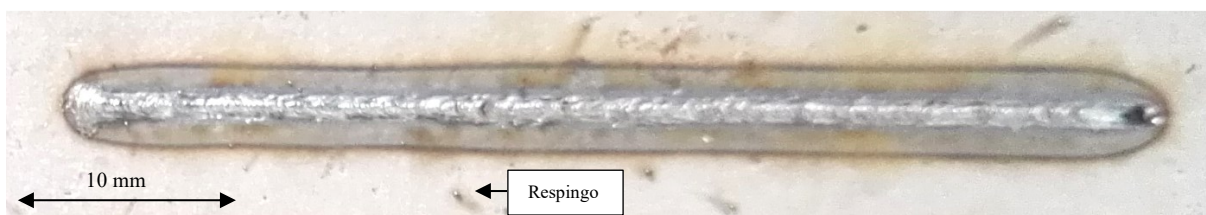
maior influência da potência máxima nos defeitos superficiais, visto que a potência média foi mantida a 4 kW, ao aplicar-se uma potência mínima de 2 kW. Além disso, a solda EP3 atingiu uma penetração de 2,1 mm, sendo 0,8 mm menor do que a da solda EP2, também sugerindo uma maior influência da potência máxima sobre a penetração da solda, como observado por Zhang (2014).

Além disso, a magnitude de penetração sugere que o modo *keyhole* foi predominante durante a soldagem das amostras EP2 e EP3, devido à razão de aspecto maior que 1:1, apesar da densidade de energia calculada ($3 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$) se encontrar no limite entre os dois modos de soldagem. Contudo, o trabalho objetivou penetrações maiores a fim de provocar maiores perturbações na poça fundida, buscando entender a procedência dos defeitos provenientes dessas perturbações. Por esse motivo, a velocidade de soldagem foi reduzida a 1 m/min no ensaio EP4 subsequente.

Analisando a imagem da seção transversal do cordão EP4, fica evidente a qualidade superior desse cordão no que diz respeito aos defeitos. Ademais, esse cordão foi o que apresentou maiores valores de penetração, com uma razão de aspecto de aproximadamente 3:1. Uma análise interessante dos cordões pode ser feita a nível de aporte energético. Sabe-se, através da observação dos parâmetros, que os cordões CT1, EP2 e EP3 com mesmas velocidades de soldagem foram produzidos com a mesma quantidade média de energia cedida pelo feixe, 4 kW. Porém, nota-se que, entre si, todos possuem profundidades de soldagem e defeitos diferentes. Essa análise sugere que o comportamento do *keyhole* não foi o mesmo para os ensaios, tornando essa hipótese passível de discussão. O mesmo comportamento pode ser observado entre os cordões EP4 e CT2, soldados a potência média de 2 kW.

A imagem da vista de topo da Figura 57 mostra que o cordão resultou também em uma reduzida quantidade de respingos e mordeduras, tornando esse cordão o de parâmetros mais adequados dentre aqueles que tiveram penetração profunda, sendo os parâmetros de velocidade (1 m/min) e potência (máx. 4 kW e mín. 0 kW) reproduzidos para o estudo da frequência subsequente.

Figura 57 - Vista superior do cordão EP4.

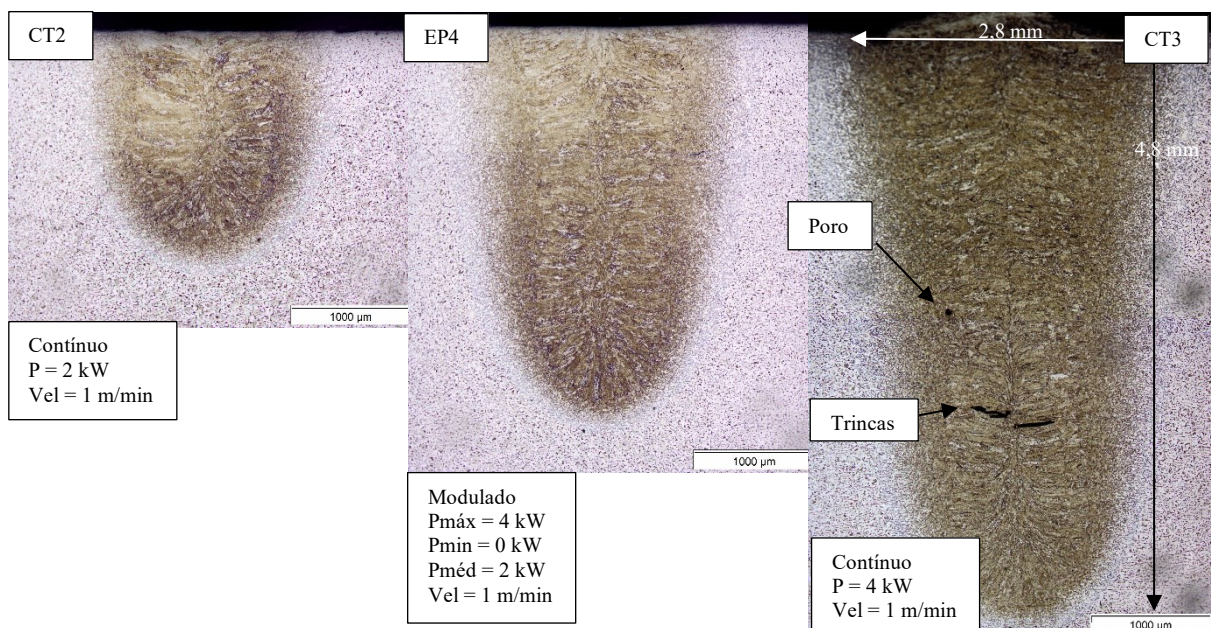


Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Um importante aspecto torna-se perceptível ao se comparar os cordões CT2 e EP4. O primeiro cordão, realizado sob potência contínua de 2 kW e velocidade de soldagem de 1 m/min, apresentou-se sem defeitos de superfície e com profundidade de soldagem de 1,8 mm. Ao mesmo tempo, o cordão EP4, realizado com a mesma magnitude de potência média (2 kW), e mesma velocidade, também apresentou um cordão íntegro, sem defeitos de superfície. Este, todavia, atingiu penetração de quase duas vezes a do cordão CT2, com magnitude de 3,2 mm. Esses resultados de penetração sugerem que o que rege a diferença de profundidade de cordões de solda contínuo e modulados não é apenas a mesma potência média aplicada, mas também a potência máxima. Essa observação concorda com o trabalho de Zhang (2014) e Matsunawa (2003), mencionados na seção de revisão.

Durante o processamento, o laser manteve-se ligado por 3 segundos para a produção de cada cordão de 50 mm de comprimento da bateria de ensaios de potência contínua, a uma velocidade de 1 m/min. Por outro lado, para o caso dos cordões produzidos de forma modulada, o tempo de laser ligado é reduzido a 1,5 segundo, devido ao desligamento entre cada pulso. Isso mostra uma eficiência energética cerca de 77% maior para o caso da potência modulada em forma quadrada, produzindo cordões com magnitudes de profundidade quase duas vezes maiores daqueles produzidos com potência contínua, utilizando a mesma energia média. Para melhor ilustrar essas comparações, a Figura 58 coloca lado a lado os cordões CT2 e EP4, além de mais um cordão, denominado CT3, produzido de forma contínua com potência de 4 kW e velocidade de 1 m/min.

Figura 58 - Seções transversais dos cordões CT2, EP4 e CT3.

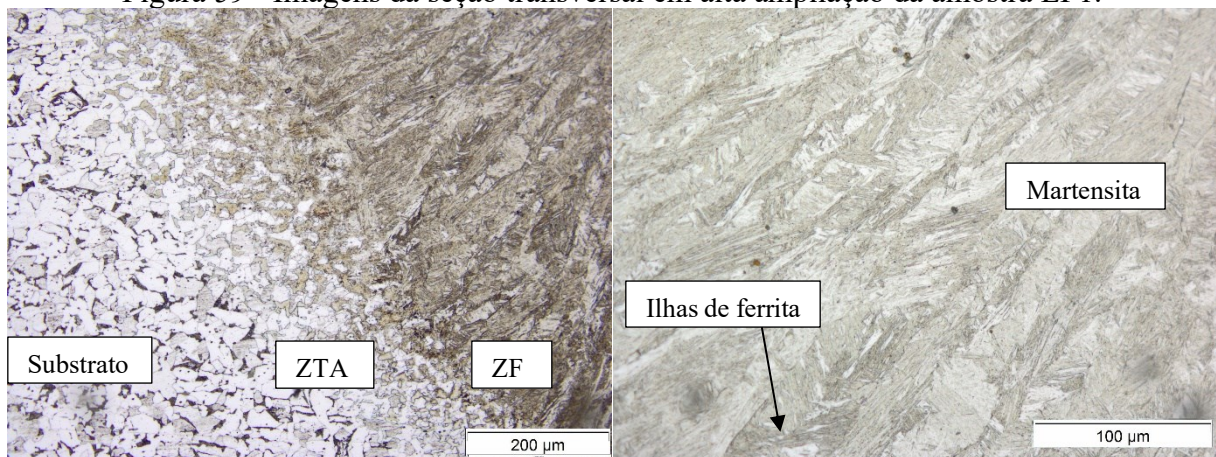


Fonte: elaborada pelo autor (2020)

A Figura 58 mostra a influência da potência e da forma como ela é entregue na profundidade de penetração e na geração de defeitos das soldas a laser. Os cordões CT2 e EP4 possuem potências médias equivalentes (2 kW), porém o segundo apresenta maior profundidade. Em seguida, comparando-se os cordões EP4 e CT3, que possuem potências médias diferentes (2 e 4 kW), mas a mesma potência máxima (4 kW), ambos apresentam diferentes profundidades de penetração. A comparação desses três cordões prova que a potência média de soldagem também possui uma parcela de influência na magnitude de penetração, além da potência máxima, como já constatado anteriormente.

Os ensaios preliminares e as micrografias apresentadas acima possibilitam a análise de diversos aspectos importantes para a continuidade desse estudo a nível de compreensão do método de modulação a laser, microestrutura, morfologia e defeitos de soldagem. Todos os cordões, sem exceção, das Figuras 53, 54 e 56, apresentaram perlita e ferrita no substrato, fora das ZF e ZTA, caracterizando a estrutura do aço SAE 1020. Além disso, todos eles apresentaram martensita (identificada pelo aumento da dureza na região) e pequenas ilhas de ferrita no interior da ZF, devido ao tratamento térmico de têmpera induzido pela fusão e solidificação da soldagem. A Figura 59 a seguir mostra, através de microscopia óptica de maiores ampliações (200x e 500x), a microestrutura dos cordões de solda.

Figura 59 - Imagens da seção transversal em alta ampliação da amostra EP1.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Os resultados preliminares dão suporte aos estudos que são listados a seguir nesta pesquisa. Eles mostraram que velocidades de 1 m/min são mais adequadas para magnitudes de potência média de 2 kW, para a produção de soldas de penetração profunda. Essa velocidade

ainda deixa margem para um aumento de potência média para até 3 kW, utilizando-se potências máximas de 6 kW, devido à qualidade do cordão EP3. Os resultados preliminares ainda mostraram que velocidades de em torno de 3 m/min são adequadas para a obtenção de soldas íntegras dentro do regime de condução, podendo ser escolhidas velocidades próximas a esse valor, se aplicadas potências médias de até 2 kW.

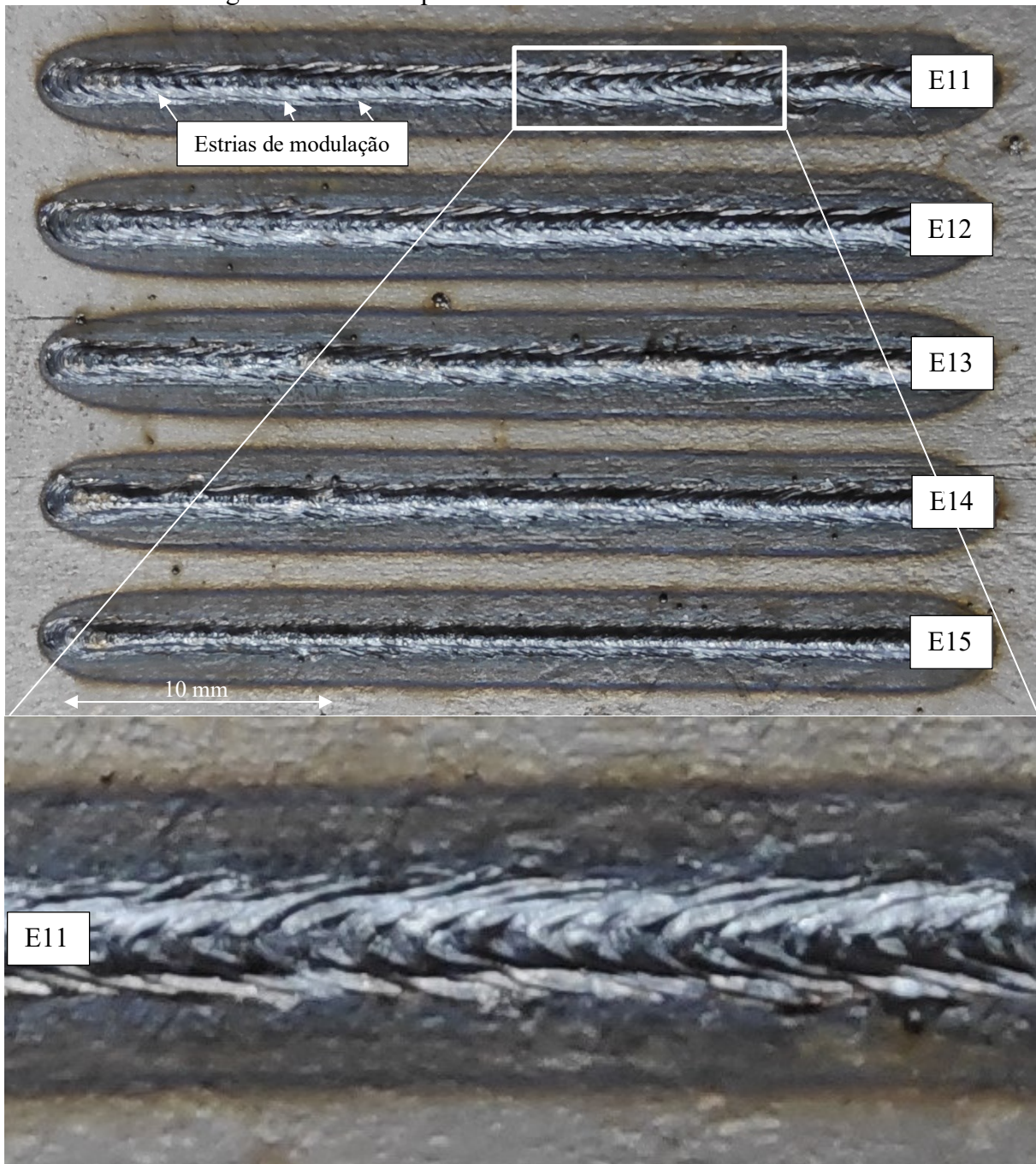
Por fim, o estudo preliminar ainda provou o sucesso na implementação do método graças ao controle preciso e instantâneo observado durante o processo de ligamento e desligamento do laser, dos tempos de pulso e da aplicação de potência. Além disso, o método mostrou eficiência da soldagem a laser de potência modulada em produzir cordões de boa qualidade e de penetração profunda com maior eficiência energética.

4.2 ESTUDO DA FREQUÊNCIA DE MODULAÇÃO

O estudo preliminar possibilitou a seleção de uma janela de parâmetros aplicáveis para a produção de cordões de solda com aspectos desejáveis tanto no modo de condução quanto no modo *keyhole*. Para o estudo da frequência, um conjunto de parâmetros do estudo preliminar foi escolhido e fixado, a fim de se analisar unicamente diferentes frequências de modulação e seus efeitos na morfologia e nos defeitos dos cordões produzidos. O esquema de distribuição de energia dos ensaios é mostrado na Figura 47, trazendo como foram produzidas as soldas deste estudo.

A vista de topo das soldas E11 a E15 produzidas é ilustrada na Figura 60. Os cordões apresentaram baixa quantidade de respingos e nenhuma manifestação de mordeduras, confirmando o aspecto dos ensaios preliminares.

Figura 60 - Vista superior a olho nu das soldas E11 a E15.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Algumas análises podem ser feitas através da Figura 60. Nota-se, à primeira vista, uma diferença de largura e a aspecto superficial entre os cordões E11 e E15. Como mostra a imagem ampliada, estrias ou escamas são observadas com mais evidência na superfície do cordão E11, devido à menor frequência de modulação, o que possibilita um maior afastamento entre os pulsos, tornando mais evidente o efeito de modulação de potência. É possível calcular a distância entre os pulsos utilizando a velocidade de soldagem e o tempo em que o laser

permanece desligado (t_{off}). Sabe-se que, para o ensaio E11, cada pulso é mantido ligado por 25 ms, como o ciclo de trabalho é de 50%, o tempo em que o laser é mantido desligado é o mesmo. A velocidade de soldagem aplicada foi a de 1 m/min, ou, em conversões diretas, 0,017 milímetros/ms. Multiplicando o t_{off} pela velocidade, sabe-se que o deslocamento entre cada pulso é de 0,4 mm. Quanto maior a frequência, menor o t_{off} , e conseqüentemente, menor a distância entre pulsos.

Em decorrência do fato de o tempo de laser ligado e desligado no ensaio E11 atingir valores de 25 ms, o tempo de interação contínuo do laser, para este ensaio, é mais longo. Esse fato explica a maior largura do cordão soldado sob essas condições, como pode ser observado na Figura 60. Essas observações corroboram com o trabalho de Matsunawa (1998) previamente mencionado na seção 2.1.8 que aborda o tempo de interação entre cada pulso e as múltiplas reflexões no interior do *keyhole* na soldagem modulada. As imagens de seção transversal das amostras E11 a E15 são apresentadas na Figura 61.

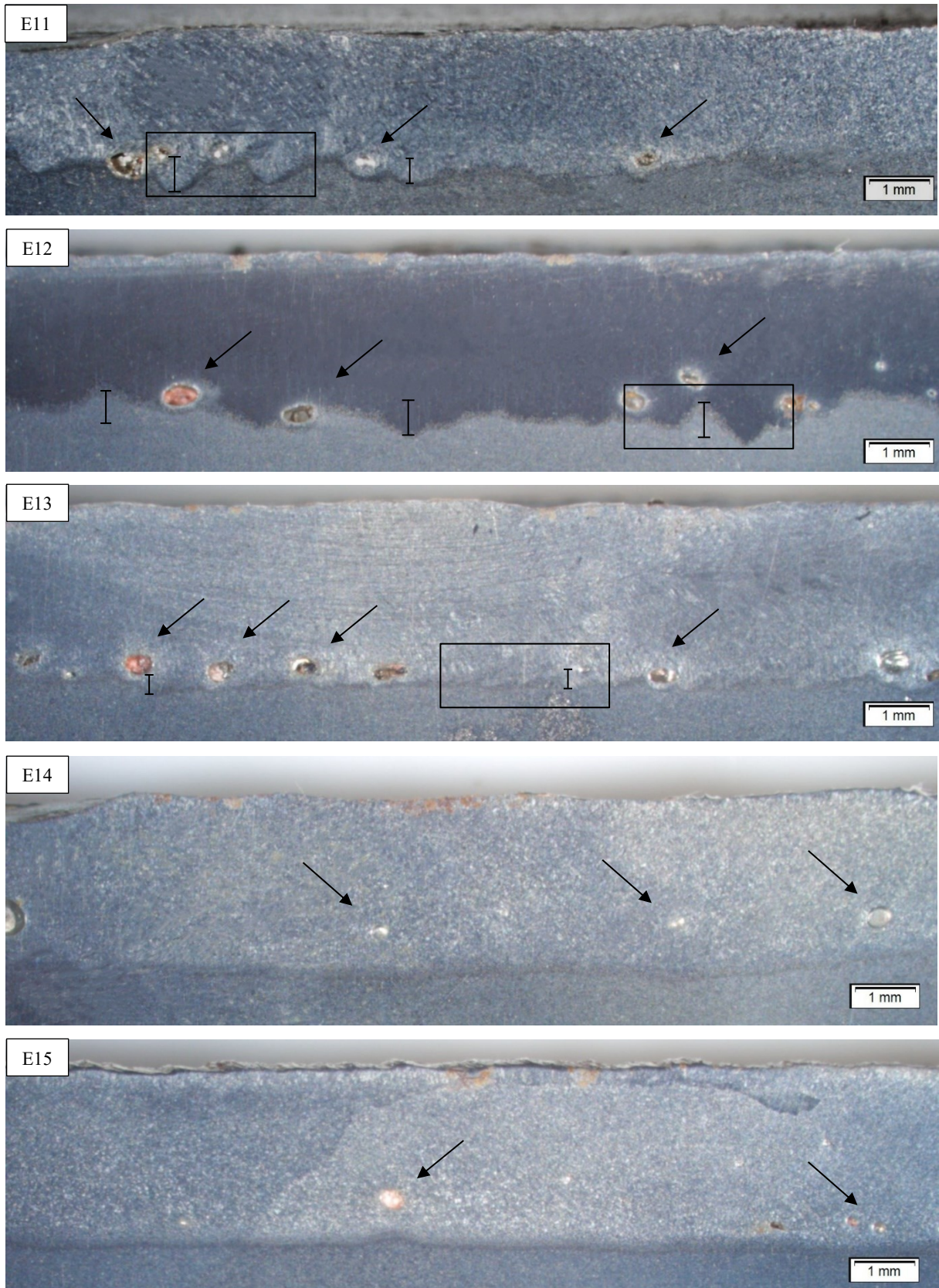
Figura 61 - Seção transversal dos cordões E11 a E15.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Através das imagens, nota-se, à primeira vista, algumas diferenças entre as soldas produzidas a nível de profundidade de cordão e a nível de porosidade. Porém, simples imagens de uma seção não são bons indicadores de morfologia, devido ao pouco espaço amostral, por isso, com o objetivo de melhor analisar essas características, cortes longitudinais através da solda foram realizados e em seguida a seção longitudinal de cada cordão foi preparada metalograficamente e submetida a ataque químico para posterior análise via microscopia óptica. As seções longitudinais são ilustradas na Figura 62.

Figura 62 - Seções longitudinais das soldas E11 a E15.

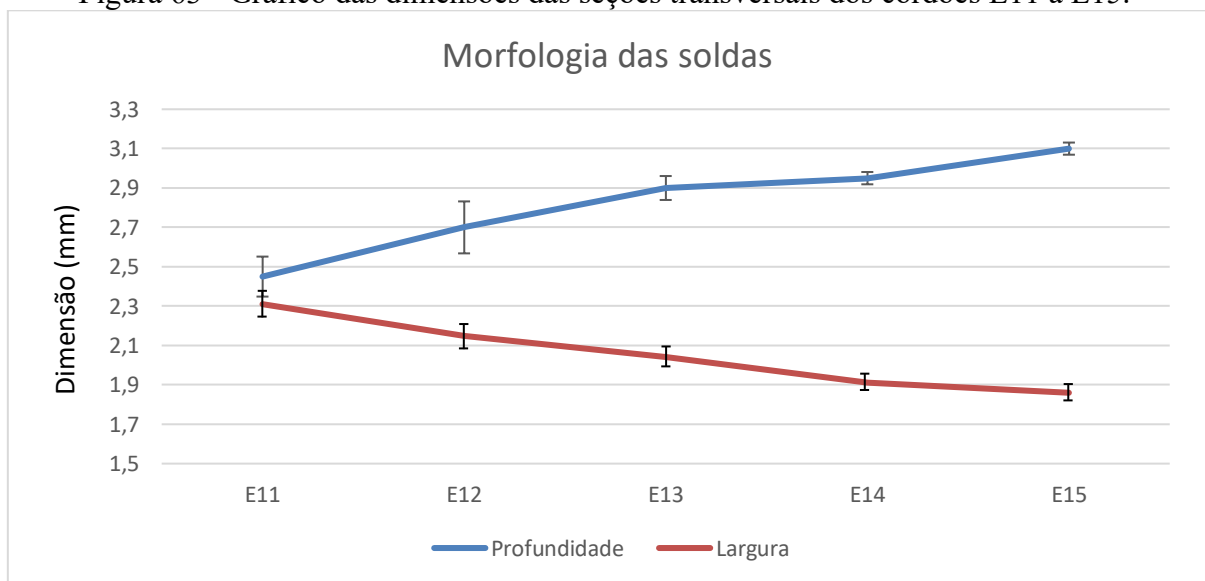


Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Os cordões produzidos a baixas frequências de modulação apresentaram mais deformidades de penetração, que variam ao longo do eixo longitudinal. É mesmo possível notar, nas zonas marcadas por retângulos na imagem, uma periodicidade nas oscilações de profundidade, podendo ser resultado dos pulsos do laser e suas respectivas penetrações, ou das flutuações naturais do *keyhole*, formando uma estrutura serrilhada na base das soldas. Essas discontinuidades prejudicam a qualidade final da solda uma vez que os componentes podem não ser soldados completamente, não atingindo a profundidade desejada, e assim introduzindo instabilidades nas propriedades mecânicas durante os esforços submetidos às peças soldadas.

A Figura 63 resume as características morfológicas das soldas desse estudo. Os valores de profundidade são médias aritméticas de cinco valores de profundidade obtidas ao longo de três cordões produzidos sobre os mesmos parâmetros, com um desvio padrão ilustrado no gráfico.

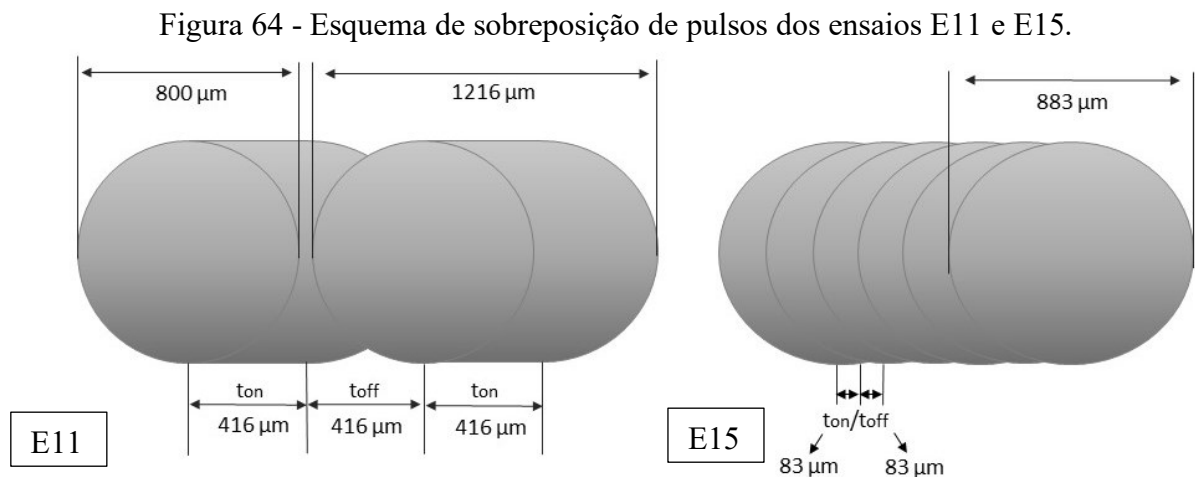
Figura 63 - Gráfico das dimensões das seções transversais dos cordões E11 a E15.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Nota-se, que como discutido no parágrafo anterior, o cordão E11 produzido com menor frequência de modulação apresentou uma largura de 0,5 mm maior que aquele soldado à maior frequência. Esse valor corresponde a uma largura 24% maior em valores relativos comparado ao cordão E15. Analisando agora a profundidade, nota-se que o cordão E15 foi aquele que atingiu maior penetração, com valores cerca de 26% maiores que o cordão E11. Nota-se uma tendência de alta muito clara de comportamento de profundidade, para os casos estudados. Os cordões produzidos sob maiores valores de frequência possuem melhor

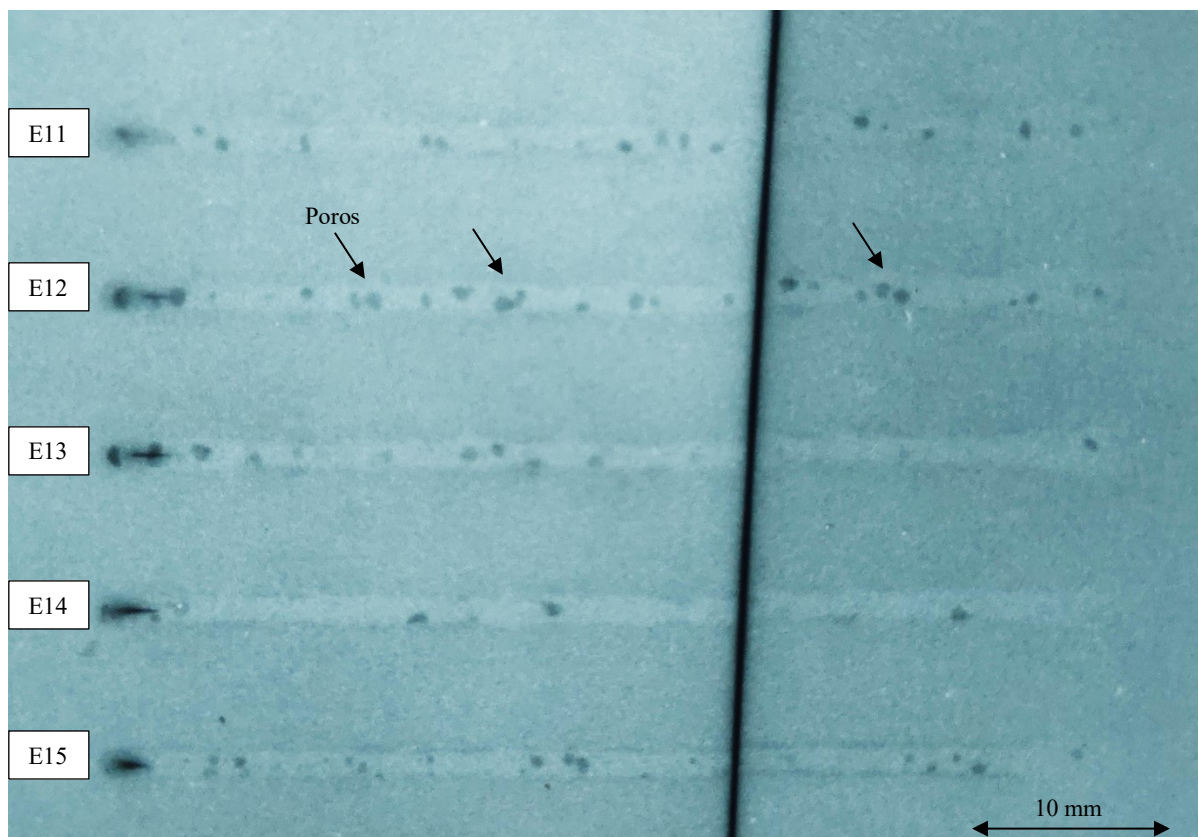
regularidade de penetração, além de atingirem maiores valores absolutos. A explicação para esse efeito pode ser encontrada na porcentagem de sobreposição de pulsos de potência. Os ensaios realizados a baixa frequência de modulação apresentaram porcentagens de sobreposição de pulsos na ordem de 50 a 60% (ver Tabela 7), valores os quais as imagens sugerem não garantir uniformidade de entrega de energia suficiente para que a penetração seja homogênea. Além disso, sabe-se que o feixe do laser possui uma distribuição de energia não uniforme, sendo o centro mais energizado que as periferias. Essa característica ressalta que o valor de sobreposição dos pulsos pode ser ainda menor para todos os casos estudados, dependendo da qualidade do feixe e os fatores M^2 e BPP. O esquema de sobreposição de pulsos dos ensaios E15 e E11 são ilustrados na Figura 64, com o sombreado dos círculos simulando a distribuição gaussiana de energia.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Ainda observando as imagens da Figura 62, nota-se, através das marcações por flechas, a elevada presença de poros localizados principalmente na base dos cordões. Para melhor observar esse fenômeno através de todo o volume do cordão, ensaios radiográficos foram realizados e uma foto da lâmina resultante está apresentada na Figura 65 a seguir.

Figura 65 - Lâmina radiográfica das soldas E11 a E15.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

A radiografia da Figura 65 mostra nitidamente a presença de poros para todos os ensaios realizados, com a amostra E14 sendo a com níveis mais moderados de porosidade relativa. Como citado por diversos autores na seção de revisão, durante a soldagem a laser, bolhas formadas devido a vaporização do material e/ou compostas do gás de proteção são formadas na base e na parte média do *keyhole*, devido as oscilações causadas por diversos fatores já discutidos. Nesse sentido, a grande presença de porosidade, exceto na amostra E14, sugere que as modulações de potência da maioria das frequências utilizadas nesse estudo não foram capazes de estabilizar de forma eficaz as oscilações do *keyhole* nem puderam eliminar os poros através da sobreposição de pulsos de forma a fazer com que as bolhas flutuassem até a superfície. Isso evidencia a grande dificuldade de estabilização da cavidade mesmo em ensaios com frequência de oscilação controlados.

Cabe uma discussão sobre as possíveis razões para as quais a solda E14 tenha apresentado menor teor de porosidade. Segundo estudo de Zhang (2019) previamente mencionado na seção de revisão, 3 tipos de poros são comumente encontrados em soldas a laser, sendo formados ou pelas oscilações do *keyhole*, pela formação de bolhas devido à vaporização

do material de base, ou por segregação de hidrogênio. Avaliando-se qualitativamente os poros observados através das seções longitudinais e pela radiografia, nota-se que os mesmos possuem em sua maioria, tamanhos grandes, formatos predominantemente esféricos, embora alguns sejam irregulares e encontram-se na base do cordão. Essas características sugerem que sua formação acontece principalmente devido a dois dos fatores citados anteriormente: ao aprisionamento dos vapores do material de base, devido à alta velocidade de soldagem, e as oscilações do *keyhole* que aprisionam os gases de proteção devido ao seu fechamento abrupto.

Analisando agora o fato de apenas a amostra E14 ter apresentado quantidade reduzida de poros, sugere-se que a porcentagem de sobreposição dos pulsos nesse ensaio tenha favorecido uma maior estabilização do *keyhole*, ao impor uma sobreposição de pulsos com frequência definida, fazendo com que as flutuações fossem também melhor controladas.

Esta seção buscou estudar o efeito da frequência de modulação nas propriedades morfológicas da solda e na porosidade. Através das imagens e gráficos produzidos durante este estudo, chegou-se à conclusão de que o tempo de pulso possui grande influência nos fenômenos que ocorrem durante a soldagem por penetração profunda, no que se refere à abertura, à manutenção e ao fechamento do *keyhole* e também no que tange a sobreposição dos pulsos e sua importância para penetrações uniformes e liberação de porosidade via pulsos subsequentes. Seguindo a premissa deste estudo de obter soldas de alta performance, o cordão E14 produzido sob frequência de modulação de 50 Hz foi aquele que melhor se aproximou das demandas iniciais de qualidade, sendo essa frequência de modulação reproduzida para os estudos na sequência.

4.3 ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS

As tensões residuais e as conseqüentes distorções são fenômenos frequentes em juntas soldadas. Essas tensões são aquelas que permanecem na peça quando todas as solicitações externas são removidas e são frequentes em componentes soldados devido às grandes variações térmicas e microestruturais do processo. A presença dessas tensões pode causar trincas, falta de estabilidade dimensional e suscetibilidade à fratura frágil, diminuindo a vida útil do componente (MODENESI, 2008).

O estudo desta seção tem como objetivo a avaliação das tensões residuais, via ensaios de furo cego, em soldas produzidas via potência contínua e modulada. Como anteriormente mencionado, a origem das tensões residuais pode ser creditada às variações de temperatura da

região submetida ao processamento, criando um gradiente térmico tanto ao longo do processo quanto ao longo da peça, submetendo a amostra a variações dimensionais devido a dilatações térmicas e eventuais transformações de fase. Ao alterar-se a forma de entrega de energia ao componente, da forma contínua à forma intermitente, por exemplo, os ciclos térmicos no interior da peça também se alteram, fazendo com que os fenômenos observados sejam diferentes.

O mesmo formato de modulação foi utilizado em duas baterias com velocidades de soldagem e potências médias distintas, visando a análise das tensões em ambos os regimes, de condução e de *keyhole*. Primeiramente, processamentos de soldagem via potência contínua foram produzidos objetivando a comparação com os processos modulados. Em seguida, dois processamentos utilizando diferentes formatos de potências moduladas foram aplicados. O primeiro modo de entrega baseou-se na onda intermitente, atingindo a potência máxima e mínima com o mesmo tempo de patamar, formato utilizado nos estudos anteriores. O segundo modo baseou-se na redução gradual da potência máxima até zero, com os degraus possuindo o mesmo tempo de patamar. A potência média foi mantida constante e equivalente para os três ensaios de cada bateria, obtendo, dessa forma, magnitudes equivalentes de aporte térmico.

Os aços escolhidos para soldagem nesse ensaio foram o aço SAE 1045 e o aço SAE 4140. A grande diferença entre esses aços é a temperabilidade. O primeiro, por possuir menor teor de elementos de liga, apresenta menor temperabilidade e dureza. Esse fator influencia no estado final de tensões visto que materiais mais duros têm menor tendência a relaxamento de tensões via deformação e são mais sensíveis a formação de trincas.

Cada ensaio teve três repetições e todos eles foram submetidos a um procedimento de furo cego, sendo médios os valores de tensão apresentados. O teste se baseia na perfuração gradual de uma cavidade na região que se deseja avaliar. Essa perfuração permite que o componente alivie suas tensões através de distorções possibilitadas pelo espaço criado pelo furo. Essas distorções são medidas pela captura de imagens do furo ao longo da perfuração. O intervalo de maior confiança das medidas encontra-se entre as profundidades de 0,2 mm e 0,8 mm, devido a possíveis alterações na superfície do material e possíveis deformações da fresa no fim do curso de furação. Todos os furos foram realizados a 3 mm do centro da solda, como representado na Figura 66, com as amostras sendo previamente pintadas de branco para melhor contraste de captura de imagem. Um furo em uma região afastada da solda foi feito com o objetivo de avaliar as tensões de referência da amostra sem processamento, medindo o estado das tensões provenientes do processo de fabricação das barras chatas utilizadas na pesquisa.

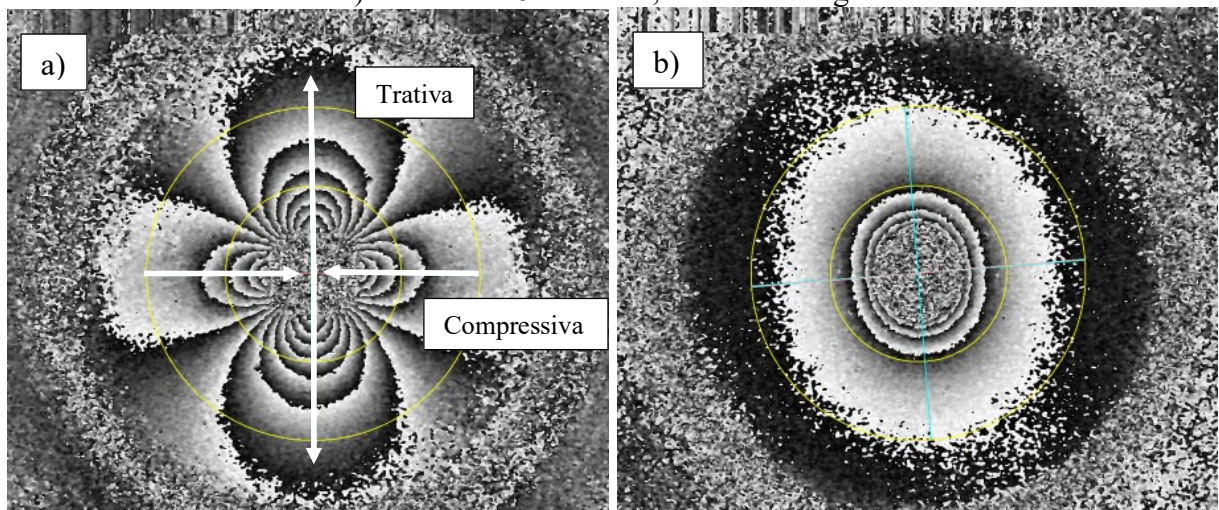
Figura 66 - Vista de topo da solda após pintura e perfuração do furo cego.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

As imagens com as franjas captadas via contraste durante o procedimento de furação são exemplificadas na Figura 67. As franjas mostram os estados de tensão decorrentes da relaxação do material após a perfuração. A franja apresentada na Figura 67a ilustra o resultado do furo da amostra E25 com tensões residuais consideráveis em sua estrutura, realizado perto da solda, enquanto a franja em b mostra um furo da mesma solda com estados mais relaxados de tensão, realizado longe do cordão, como citado acima.

Figura 67 - Franjas de contraste do teste de furo cego de a) amostra E25 tensionada, perto da solda e b) amostra E25 relaxado, com furo longe da solda.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Os valores nominais de tensão de escoamento para o material de base são encontrados na Tabela 9. Esses valores demonstram quando o material começa a se deformar quando submetido ao regime de tração. Esses valores podem ser comparados com os obtidos pelos ensaios de tensão residual, afim de saber a criticidade das tensões presentes internamente e a susceptibilidade do material tensionado de se romper ou trincar.

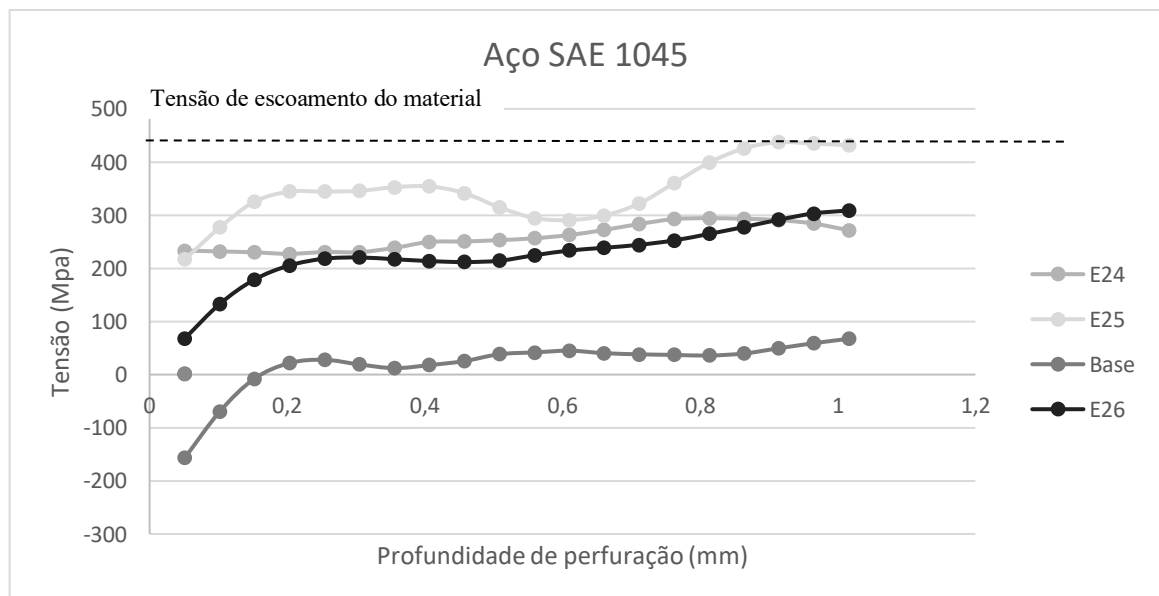
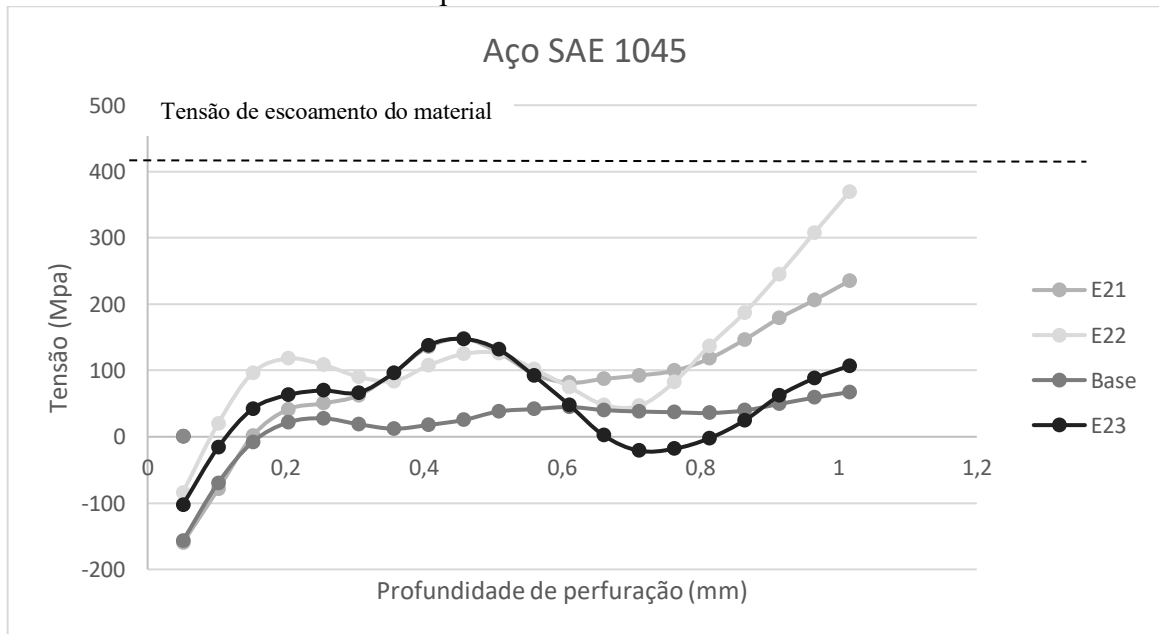
Tabela 9 - Valores de tensão de escoamento do material de base.

| Aço normalizado laminado e recozido | Tensão de escoamento (MPa) |
|-------------------------------------|----------------------------|
| SAE 1045 | 415 |
| SAE 4140 | 655 |

Fonte: ASTM International (1991).

Os valores em MPa de tensão residual dos ensaios E21 a E26 das amostras de aço SAE 1045 estão apresentados nos gráficos da Figura 68 a seguir.

Figura 68 - Valores de tensões residuais dos cordões do aço SAE 1045 soldados sob os parâmetros E21 a E26.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Uma série de análises pode ser realizada através dos gráficos da Figura 68:

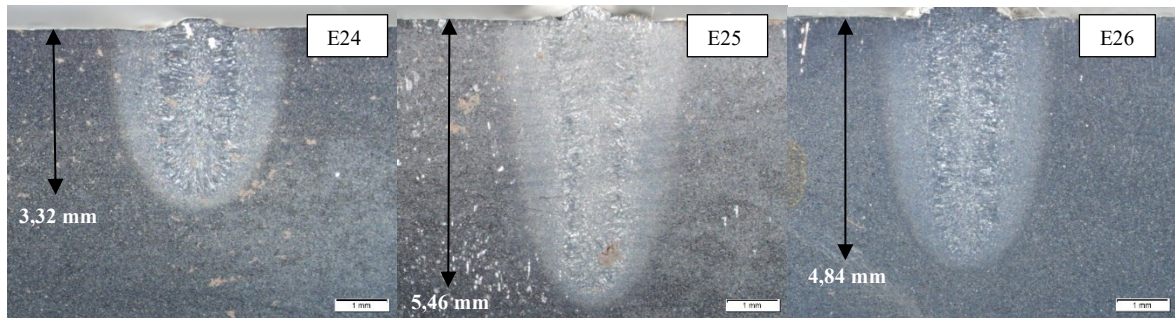
- Os valores de tensão para o furo base são próximos a zero, o que confirma o estado inicial de tensões nulo do material. Essa característica facilita a interpretação dos resultados dos furos próximos a solda.

- Os ensaios E21, E22 e E23, conduzidos a maior velocidade de soldagem (2 m/min) e menor potência média (2 kW), apresentaram, dentro do intervalo de confiança (0,2 a 0,8 mm), valores muito similares de tensões residuais entre si e entre a amostra base, mostrando que a modulação, neste caso, não causou efeito nas tensões residuais das amostras soldadas. Esse resultado pode ser creditado ao baixo aporte térmico aplicado nessa bateria de ensaios, e conseqüentemente, ao fato de as soldas terem sido produzidas sob regime de condução de calor. Por esse motivo, as micrografias de seção transversal dessas amostras não serão apresentadas. Como citado na seção 2.1.7, a soldagem por regime de condução não apresenta grandes quantidades de fluxo de massa ou fenômenos físicos durante o processo, além de fundir quantidades menores de volume do material de base devido a não vaporização de material e baixa penetração. Nesse sentido, o ensaio de furo cego confirma o que foi citado na literatura demonstrando o baixo estado de tensões residuais dessas amostras.

- Em contraste com as amostras anteriores, as soldas E24, E25 e E26 apresentaram valores elevados de tensões residuais, cerca de 200 MPa acima dos valores do material de base. Os diferentes parâmetros utilizados para essa bateria, como velocidade reduzida (0,5 m/min) e maior potência média (3 kW), produziram soldas com maior aporte térmico, fazendo que o regime de soldagem predominante fosse o de penetração profunda. Observando novamente o gráfico, nota-se que o ensaio modulado E25 foi o que apresentou maiores valores de tensões residuais, seguido pelos ensaios contínuo E24 e modulado E26, que apresentaram valores similares. A linha pontilhada, que indica a tensão limite de escoamento do aço SAE 1045, é quase atingida pelas tensões residuais da amostra E25 a 0,8 mm de profundidade, sugerindo que a amostra possa estar sob falha iminente, susceptível a aparição de trincas ou deformações.

A Figura 69, que traz as seções transversais das amostras E23, E24 e E25 traz aspectos que podem auxiliar na compreensão desses resultados.

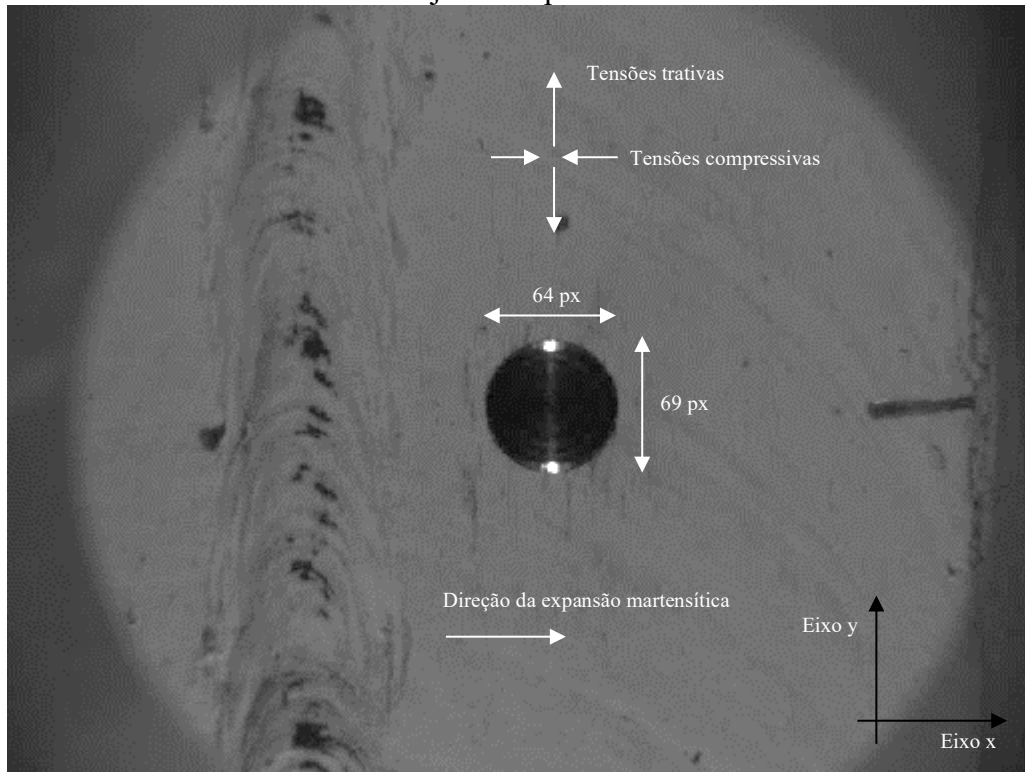
Figura 69 - Seções transversais das amostras de aço SAE 1045 submetidas aos ensaios E24 a E26.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Sabe-se, através da literatura, que o processamento de soldagem nos aços SAE 4140 induz à transformação martensítica na zona fundida, devido ao alto gradiente térmico de processo. A transformação martensítica é uma mudança de fase displasiva, onde não ocorre difusão, fazendo com que haja uma expansão de volume de em torno de 4%. Como mencionado na seção de materiais e métodos, o ensaio de furo cego alcança apenas 1 mm de profundidade nas amostras analisadas. Nesse sentido, observando a amostra E25, é possível notar uma maior largura de cordão à nível de profundidade de em torno de até 2 mm, e conseqüentemente, maior volume de martensita transformado nessa região, sugerindo que a martensita presente no cordão exerça pressão sobre o furo cego próximo. Para melhor visualização, a Figura 70 mostra uma foto aproximada do furo cego da amostra E25, medindo seu formato encontra-se alongado na mesma direção do cordão (eixo y), caracterizando as tensões como trativas na direção da solda e compressivas na perpendicular (eixo x). Esse padrão de formato de furo foi observado para todos os cordões produzidos por soldagem de penetração profunda, confirmando os valores de tensão residual positivos dos gráficos.

Figura 70 - Imagem de topo do cordão analisado por furo cego do aço SAE 1045 soldado sobre o conjunto de parâmetros E25.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Novamente, o gráfico da Figura 68 mostra que o ensaio E25 apresentou os maiores valores de tensões residuais, em torno de 350 MPa, com tensões principais trativas. O ensaio E25 tem como característica principal a modulação quadrada, aquela que liga e desliga intermitentemente o laser entre sua potência máxima e zero. Como esses ensaios têm como característica um maior patamar de espera na potência máxima (10 ms), soldas mais profundas são produzidas e é mais provável que mais tensões sejam introduzidas nesse ensaio, devido ao grande gradiente de energia ao desligar-se o laser após a introdução de 6 kW de potência.

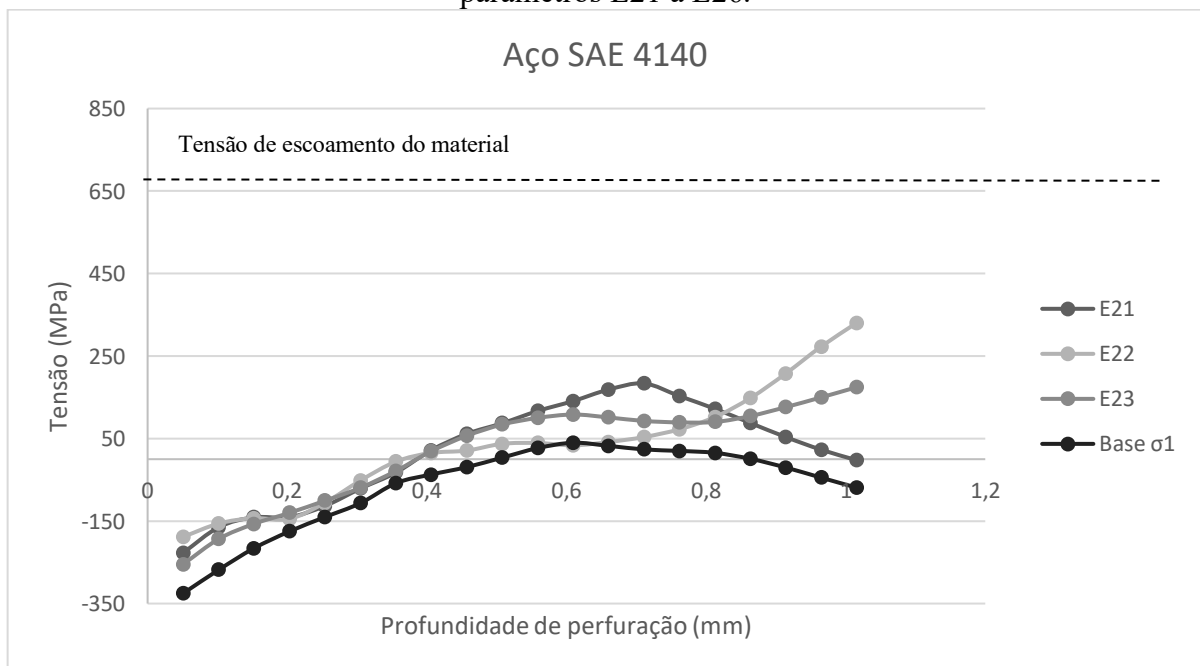
Nota-se, porém, que o resultado mais interessante para essa bateria de ensaios é o da amostra E26. O ensaio modulado com redução gradual de potência (E26) teve os menores valores médios de tensões residuais, em torno de 250 MPa, similares ao da solda produzida sob o modo contínuo, mas produzindo soldas em média 64% mais profundas. Como anteriormente mencionado, sabe-se que as tensões residuais são predominantemente provenientes de gradientes térmicos muito bruscos, fluxos de massa intensos no *keyhole*, dilatações térmicas heterogêneas ou transformações de fase onde há alterações de volume ao longo do componente. A soldagem a laser é um processamento onde a energia muito concentrada torna os ciclos

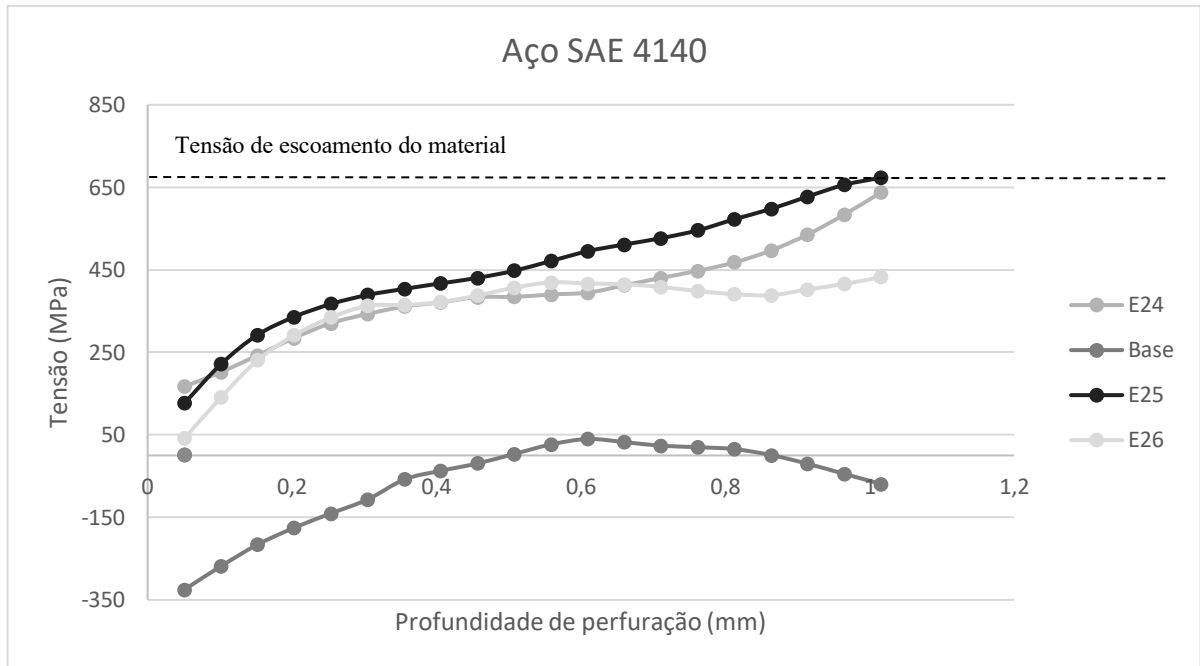
térmicos extremamente rápidos. Apesar do pequeno volume de interação laser-peça, é inevitável que a região afetada pelo calor fique introduzida de tensões. A modulação de potência em degraus, nesse caso, atenua o gradiente térmico através da redução gradual de energia até zero, possibilitando um escoamento menos brusco do calor através do material. Além disso, a frequência de pulso controlada pode ajudar a reduzir o fluxo aleatório de massa do *keyhole*. Esses dois fatores combinados podem justificar os resultados encontrados.

As micrografias da Figura 69 ainda confirmam que os três ensaios podem ser caracterizados como soldagens de penetração profunda, devido a elevada razão de aspecto dos cordões. Pode-se observar ainda, que amostra soldada sob os parâmetros E26 atingiu a maior média de penetração, em torno de 5,5 mm. Isso se deve, como mencionado no parágrafo anterior, ao maior tempo (10 ms) de permanência na potência máxima (6 kW), para esse cordão, o que contribui para maior penetração. Além disso, a amostra E24, produzida sob regime contínuo, foi a que apresentou menores magnitudes de penetração, devido ao já mencionado efeito da potência máxima de modulação.

A Figura 71 a seguir ilustra a partir de dois gráficos os resultados de tensão residual via ensaio de furo cego para a amostra de aço SAE 4140. As amostras foram soldadas sob os mesmos parâmetros E21 a E26.

Figura 71 - Valores de tensões residuais dos cordões do aço SAE 4140 soldados sob os parâmetros E21 a E26.





Fonte: elaborada pelo autor (2020)

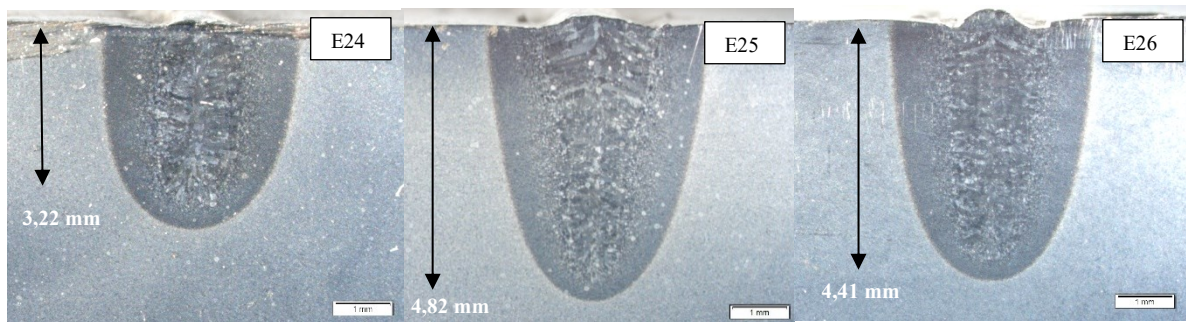
Nota-se, através da figura, que as amostras E21 a E23 do aço SAE 4140 se comportaram de forma análoga às amostras E21 a E23 do aço SAE 1045, mesmo com o fato de o primeiro aço possuir maior temperabilidade. Esses resultados comprovam que valores reduzidos de tensões residuais são introduzidos para soldagens a laser realizados no modo de condução de calor, devido as razões citadas na análise anterior. Da mesma forma que para a amostra de aço SAE 1045, o ensaio E26 foi o que apresentou os menores valores de tensão residual, uma média de cerca de 200 MPa para a profundidade de 0,8 mm, para as 3 repetições com o aço SAE 4140, confirmando a tese discutida no parágrafo anterior. O segundo gráfico da Figura 71 mostra o comportamento das tensões residuais para as amostras de aço SAE 4140 soldadas com os parâmetros E24 a E26. Os valores variaram entre 250 e 650 MPa, muito mais elevados do que os valores da amostra de aço SAE 1045. Resultados de Kumar et al. (2013) para a tensões residuais medidas em soldas a laser foram semelhantes. Os pesquisadores soldaram a laser um aço ligado ASTM A387 com potência constante de 8 kW utilizando um laser de CO₂ com potência máxima de 10 kW e velocidade de 1,5 m/min. Os resultados mostraram tensões na ordem de 500 MPa nos arredores da solda. Esses valores ficam entre os encontrados nos aços SAE 1045 e SAE 4140 desse trabalho, também devido a composição química semelhante do aço estudado pelo pesquisador. Costa et al. (2010) também realizaram medições de tensão residual em um aço 40.CrMnNiMo soldado em um laser Nd:YAG. O aço estudado por Costa possui composições de carbono semelhantes ao desse trabalho. Os

resultados para tensão residual também se mostraram semelhantes aos obtidos por esse estudo (cerca de 400 MPa), confirmando a confiabilidade do método.

Os valores mais elevados para o aço SAE 4140 podem ser explicados devido à maior temperabilidade desse aço, o que produz soldas com maiores volumes de martensita, e, por consequência, maior expansão heterogênea de volume. Comparando-se com os valores de tensão limite de escoamento da Tabela 9, nota-se que as amostras E24 e E25 possuem tensões internas beirando ao colapso, devido aos fenômenos induzidos pela soldagem, como o ciclo térmico, fluxos de massa e transformações de fase. Silveira et al (2017) soldaram aços SAE 4140 através do mesmo laser de fibra de 10 kW utilizado nesse trabalho. Os pesquisadores utilizaram três diferentes velocidades de soldagem e duas potências distintas com o objetivo de produzir soldas passantes em tarugos de 18 mm de espessura. Os resultados das soldas não foram satisfatórios pois foram observadas quantidades elevadas de trincas que resultaram no colapso da união. Os resultados de Silveira corroboram com os níveis de tensão obtidos no presente trabalho, mostrando na prática a presença de trincas de soldagem.

A Figura 72 mostra imagens das seções transversais dos ensaios E24 a E26.

Figura 72 - Seções transversais das amostras de aço SAE 4140 submetidas aos ensaios E24 a E26.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

As macrografias mostram comportamentos semelhantes no que diz respeito à morfologia dos cordões, com o ensaio E24, produzido com potência contínua, sendo o de menor penetração, e o E25, o de maior. Essas características confirmam a conclusão anterior de que a modulação é capaz de produzir cordões mais profundos com magnitudes de tensão residual semelhantes àqueles produzidos via potência contínua.

4.4 ESTUDO DO TAMANHO DE GRÃO

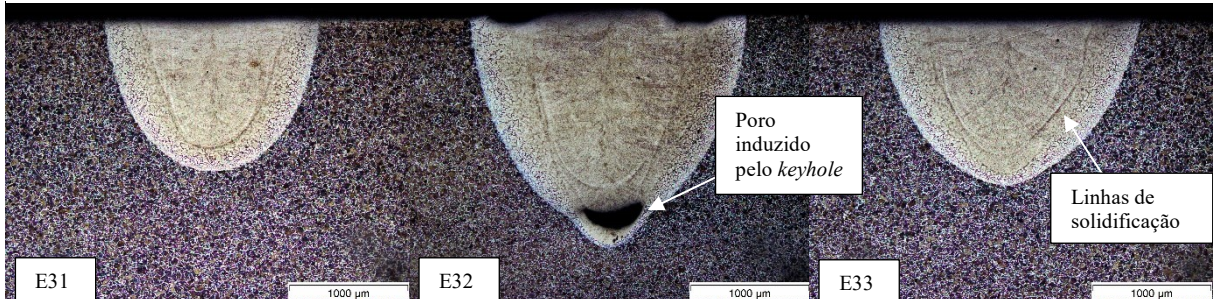
Todos os materiais de engenharia policristalinos são constituídos por milhões de pequenos cristais. Um grão é um cristal isolado na matéria em estado sólido, que possui um conjunto de átomos empilhados em um padrão regular com repetição (SILVA, A.L.V.C., MEI P.R., 2010). O tamanho do grão é importante fator para a avaliação das propriedades mecânicas de um material policristalino, em especial a dureza, a resistência à corrosão e o limite de escoamento (REED-HILL, R.E., ABBASCHIAN, R., ABBASCHIAN, 2010). Isso se deve à sua capacidade de impedir a movimentação das discordâncias, fenômeno fortemente ligado à deformação plástica dos materiais, fazendo com que um maior esforço aplicado seja necessário para que a deformação ocorra, melhorando as propriedades mecânicas dos materiais com menor tamanho de grão. Na soldagem, a redução de tamanho de grão traz uma vantagem ainda mais especial, que é o aumento da tenacidade. Como previamente mencionado, os ciclos térmicos rápidos combinados com os altos aportes de calor fazem com que as soldas a laser sejam extremamente suscetíveis a trincas. A elevação da tenacidade reduz essa suscetibilidade pois provê ao material mais capacidade de absorver as tensões residuais e a propagação de trincas. Além disso, os contornos de grão, mais numericamente presentes para o caso de grãos menores, agem como barreiras para o avanço das trincas e diminuem seu comprimento médio, ajudando o material a ser menos sensível a esse tipo de defeito.

Nesse sentido, o estudo dessa seção teve como objetivo avaliar o tamanho de grão da ZF das soldas de aço SAE 1045 produzidas no regime de condução. As curvas dos processamentos de soldagem desse estudo estão ilustradas na Figura 50.

A velocidade dos ensaios foi definida em 2 m/min visando, como mencionado, produzir soldas apenas no regime de condução. Tal objetivo foi traçado devido ao fato de este regime apresentar menos fenômenos que pudessem interferir na nucleação e coalescimento do grão, buscando analisar apenas a influência da modulação de energia nessa característica.

As seções transversais das amostras soldadas são ilustradas na Figura 73 a seguir.

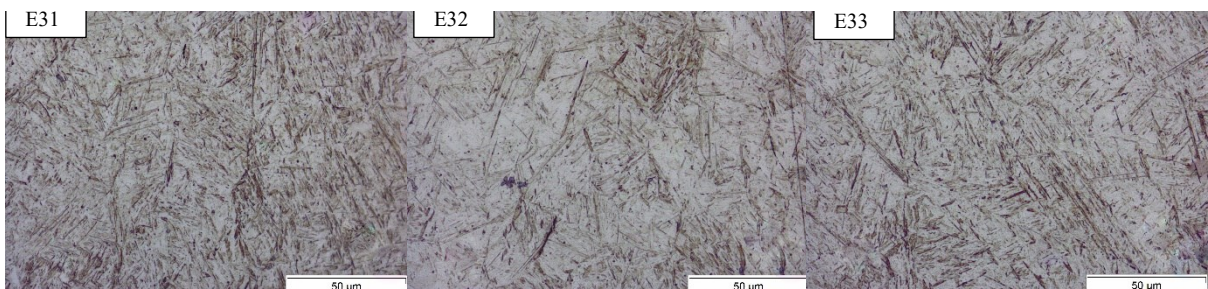
Figura 73 - Seções transversais das amostras de aço SAE 1045 submetidas aos ensaios E31 a E33.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

A Figura 73 torna possível notar, devido à soldagem no regime de condução, novas características no que se refere às soldas moduladas. A profundidade de penetração das soldas moduladas não atingiu valores muito maiores comparados à profundidade da solda contínua, ao contrário das soldas produzidas pelo mecanismo *keyhole*. Isso pode ser creditado ao menor aporte térmico empregado às amostras. Pelo fato de o principal mecanismo de transmissão de calor desse modo de soldagem ser a condução, o aumento da potência máxima não confere grandes alterações na profundidade de penetração, devido à ausência de um mecanismo de transporte de calor mais agressivo, como o do *keyhole*. Observando-se atentamente a zona fundida, podem-se notar linhas de solidificação tanto para o ensaio contínuo E31 quanto para os ensaios modulados E32 e E33. Contudo, é possível perceber que a quantidade de linhas é diferenciada para cada ensaio, sendo uma para o primeiro ensaio, duas para o segundo e cinco para o terceiro. Esses números coincidem com a quantidade de degraus de potência de cada ensaio, sugerindo que cada degrau submete a amostra a uma diferente etapa de fusão e solidificação durante a soldagem. A Figura 74 mostra uma imagem de seção transversal ampliada em 1000x da região central da zona fundida das amostras E31 a E33.

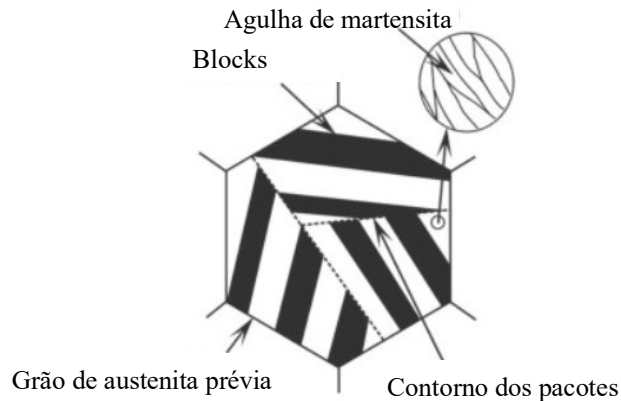
Figura 74 - Seções transversais ampliadas em 1000x das amostras E31 a E33.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Observando a Figura 74 nota-se que as agulhas de martensita da amostra E32 apresentam estrutura mais alongada que os ensaios E31 e E33. As agulhas são estruturas que crescem a partir dos contornos de grão da austenita prévia durante a transformação martensítica. Quanto maior o grão austenítico prévio, maior o alongamento e largura das agulhas, como mostra a Figura 75.

Figura 75 - Esquema das agulhas de martensita dentro de um grão austenítico.



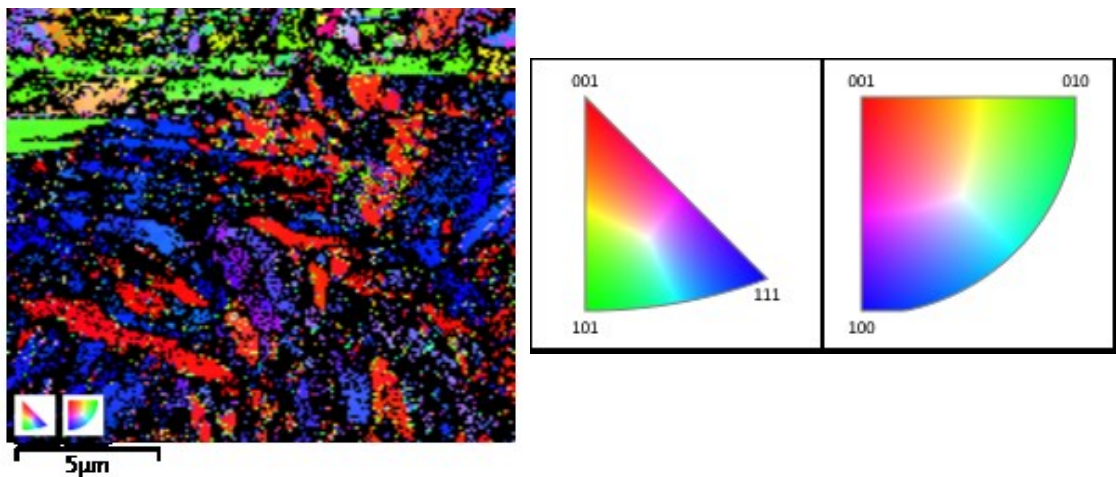
Fonte: adaptado de Maki (2012)

O aumento do tamanho do grão austenítico pode ser explicado de diferentes maneiras, do ponto de vista de cinética de solidificação. Sabe-se que o coalescimento de grãos em materiais é estimulado e suprimido por diversos aspectos metalúrgicos. Através da presença de calor por uma certa quantidade de tempo suficiente, o grão tende a coalescer devido à absorção de energia através do meio. Além disso, sabe-se que o coalescimento pode ser reduzido pela adição de certos elementos de liga. Não é o caso do aço SAE 1045, ausente desses elementos. O ensaio E32, como anteriormente mencionado, é o que tem o mais longo patamar de tempo na potência máxima de 4 kW. Esse tempo pode ser determinante no coalescimento dos grãos durante a soldagem. Além disso, o dobro da potência máxima e conseqüentemente o dobro do aporte térmico aplicado quando o laser está ligado, em relação ao ensaio contínuo, pode fazer com que o tempo de laser desligado não seja suficiente para a extração de calor entre os pulsos, levando a um estado de coalescência de grãos.

Apesar de serem úteis para fator de comparação, como mencionado no parágrafo anterior, as imagens ampliadas via microscopia óptica não possibilitaram medir com precisão a microestrutura granular das amostras E31, E32 e E33. Por essa razão, as amostras passaram por uma preparação especial na tentativa de obtenção de mapas cristalográficos através do

método de EBSD (*electron back-scattered diffraction*). A técnica permite ver, através dos mapas, onde exatamente cada grão começa e termina possibilitando a medida real do tamanho de cada um deles. As amostras foram polidas com polimento iônico e inseridas no microscópio eletrônico de varredura. O resultado das análises do mapa cristalográfico da amostra E31 dentro da ZF é apresentado na Figura 76.

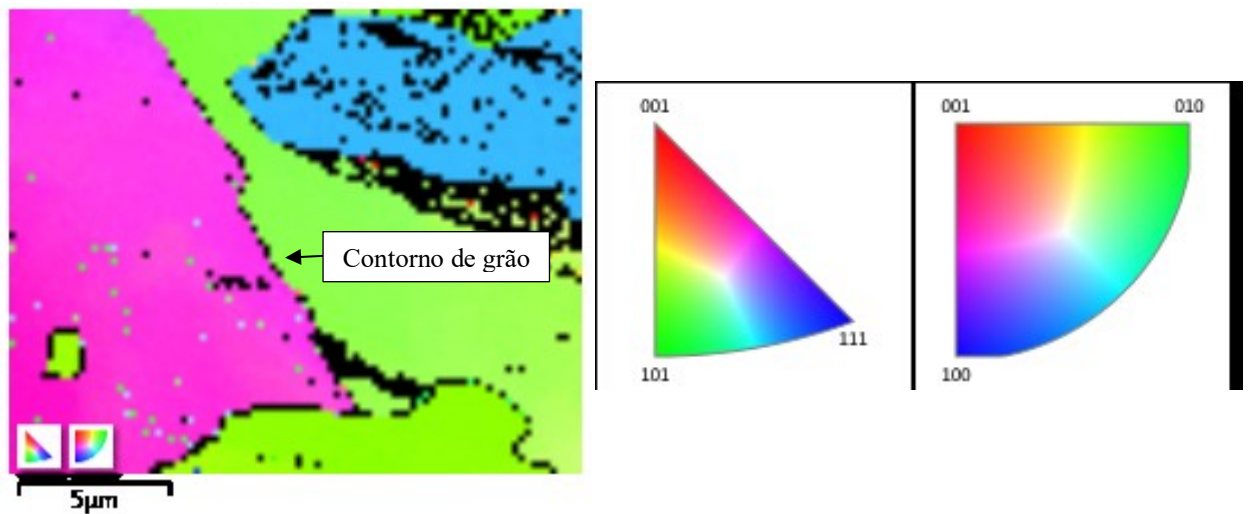
Figura 76 - Mapa cristalográfico da ZF da amostra E31 obtido via técnica de EBSD.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

O padrão cristalográfico da Figura 76 mostra a dificuldade de detecção das orientações cristalinas pelo microscópio eletrônico devido, provavelmente, ao alto grau de amorfização da camada analisada, possivelmente por conta das deformações causadas durante o lixamento e o polimento padrão. Por essa razão, diversas tentativas de melhoramento da superfície foram realizadas buscando melhores mapas cristalográficos. A tensão e o tempo de polimento iônico foram variados de 30 min a 3 horas e de 3 V para 6 V, na tentativa de diminuir a amorfização da superfície de análise, mas nenhum dos resultados das amostras foi mais bem-sucedido. Análises foram então realizadas no substrato ferrítico/perlítico da amostra, ou seja, fora da ZF, buscando zonas mais moles e metalurgicamente menos complexas devido à ausência de martensita (e, assim sendo, menos amorfização). O resultado está ilustrado na Figura 77.

Figura 77 - Mapa cristalográfico do substrato da amostra E31 obtido via técnica de EBSD.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

A Figura 77 ilustra um mapa com melhor captação da textura cristalográfica através de EBSD para a região fora da ZF analisada. O resultado corrobora com a teoria de que a martensita, por ser uma microestrutura de dureza elevada, prejudica a preparação metalográfica prévia à análise, exigindo outros métodos de polimento para que a superfície seja completamente livre de camadas amorfas e, assim, os padrões dos cristais sejam bem detectados.

Por consequência da não identificação dos contornos de grão via microscopia óptica nem eletrônica, um outro método, indireto, de medição de tamanho de grão foi utilizado, correlacionando a microdureza da ZF ao tamanho de grão médio da região através da equação de Hall-Petch. Como mencionado anteriormente, o tamanho de grão é relacionado com a dureza do material porque seus contornos agem como barreiras para a movimentação de discordâncias, ou seja, quanto mais contornos, mais resistente é o material, tornando possível a elaboração de uma relação matemática entre esses fatores.

Alguns fatores presentes nessa bateria de ensaios possibilitaram o uso dessa relação como medida indireta de tamanho de grão, uma vez que existem diversos mecanismos de endurecimento em materiais metálicos. Esses fatores são importantes para excluir outras possibilidades de ganho de dureza e estão listados a seguir:

- Comportamento semelhante de solução sólida e precipitados.
- Aporte térmico médio constante.
- Mesma microestrutura resultante na ZF para os três ensaios.

- Estados de tensão residual semelhantes para amostras de baixa liga².

Nesse sentido, a relação entre a tensão de escoamento e o tamanho de grão foi matematicamente elaborada por Hall-Petch e demonstrada na Equação 9 (SMITH, HASHEMI, 2006).

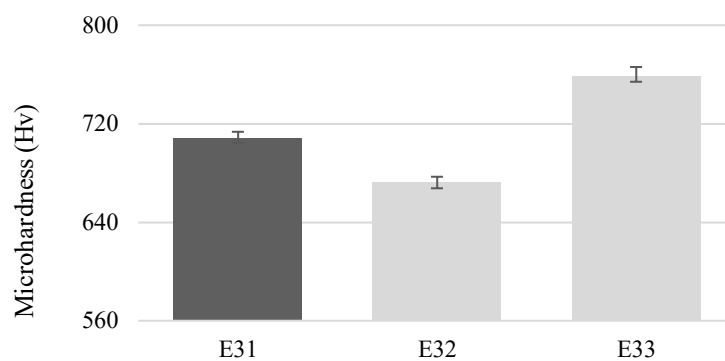
$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (9)$$

Onde σ_y corresponde a tensão de escoamento, σ_0 é uma constante do material que corresponde a tensão inicial para movimentação de discordâncias, k_y é a constante de resistência, típica para cada material e d é o tamanho médio de grão. Uma relação análoga, mostrada na Equação 10, foi feita por Hall Petch, correlacionando o tamanho de grão a microdureza do material, sendo H_y a microdureza e H_0 uma constante do material que corresponde à tensão inicial para movimentação de discordâncias.

$$H_y = H_0 + k_y d^{-1/2} \quad (10)$$

Nesse sentido, os valores de microdureza Vickers das amostras submetidas a esse estudo são apresentados no gráfico da Figura 78. Os valores são médias aritméticas de 20 medições para cada uma das 3 amostras diferentes submetidas aos mesmos parâmetros.

Figura 78 - Valores de microdureza Vickers da ZF das amostras E31 a E33.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

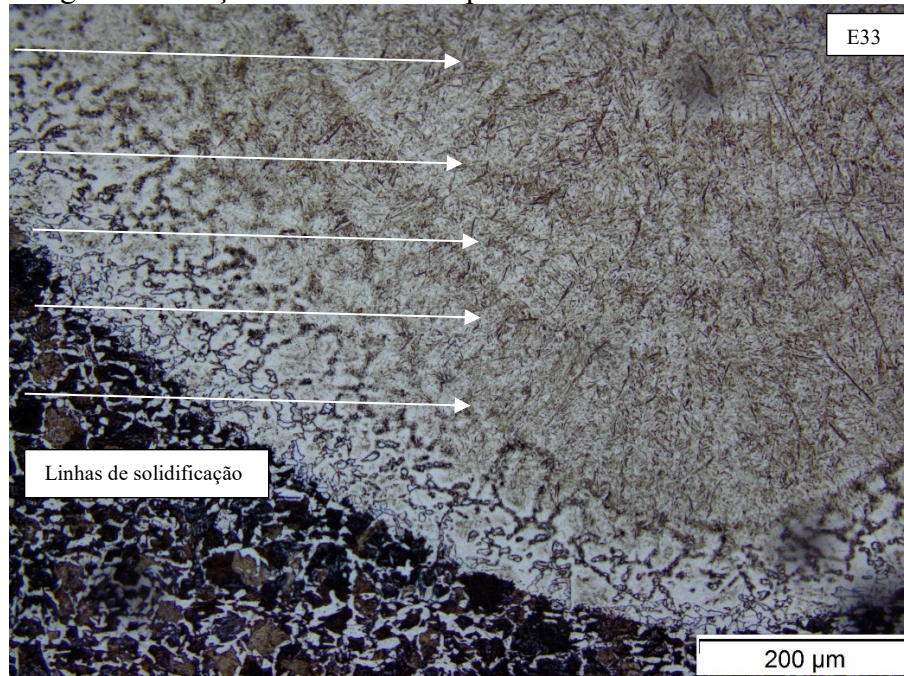
O gráfico mostra um decréscimo na dureza da amostra E32, aquela cuja potência máxima (4kW) é mantida por maior tempo, e um acréscimo na dureza da amostra E33, aquela

² Cf. o estudo de tensões residuais deste trabalho.

com mais degraus de potência. O resultado da amostra E32 confirma a observação das imagens da Figura 75, onde pode-se notar uma estrutura de agulhas mais grosseira. Por outro lado, no caso das amostras E31 e E33, pouca diferença é identificada via microscopia óptica, mas uma diferença de 50 Hv de dureza é observada.

Estudos prévios de Reddy e Mohandas (2001) relataram que a agitação do aço inoxidável ferrítico fundido durante a solidificação fazia com que a estrutura dendrítica se fragmentasse e também com que os grãos se destacassem uns dos outros e das paredes do molde, o que fez com que a estrutura granular final se tornasse mais refinada. A modulação da potência do laser traz a mesma característica de agitação da poça fundida, uma vez que os pulsos são intermitentes e com potências diferentes. Esse fenômeno pode ser observado através das linhas de solidificação aparentes na Figura 79 a seguir e mencionadas anteriormente nessa seção. Para o caso da amostra E33, cinco linhas de solidificação são notadas, sugerindo que, para cada ciclo, cinco pulsos agitam a poça fundida, colaborando para o fenômeno de fragmentação da estrutura de fusão e, assim, para a possível redução do tamanho de grão, segundo esse mecanismo.

Figura 79 - Seção transversais ampliadas em 200x da amostra E33.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Analisando, desta forma, os resultados de microdureza para as duas soldas produzidas sob o regime modulado, pode-se entender que o tamanho de grão resultante não depende

somente da modulação, mas também do tempo dos patamares de potência e da quantidade de degraus de energia aplicados. Para o caso específico estudado, um balanço entre esses dois fatores torna-se essencial para a obtenção de diferentes valores de microdureza, sugerindo uma estrutura granular mais refinada. Ainda, buscando uma agitação mais forte da ZF, torna-se importante uma boa parametrização de sobreposição de pulsos, o que contribuirá fortemente para a refusão da estrutura criada pelo pulso anterior, estimulando a quebra dos grãos previamente formados.

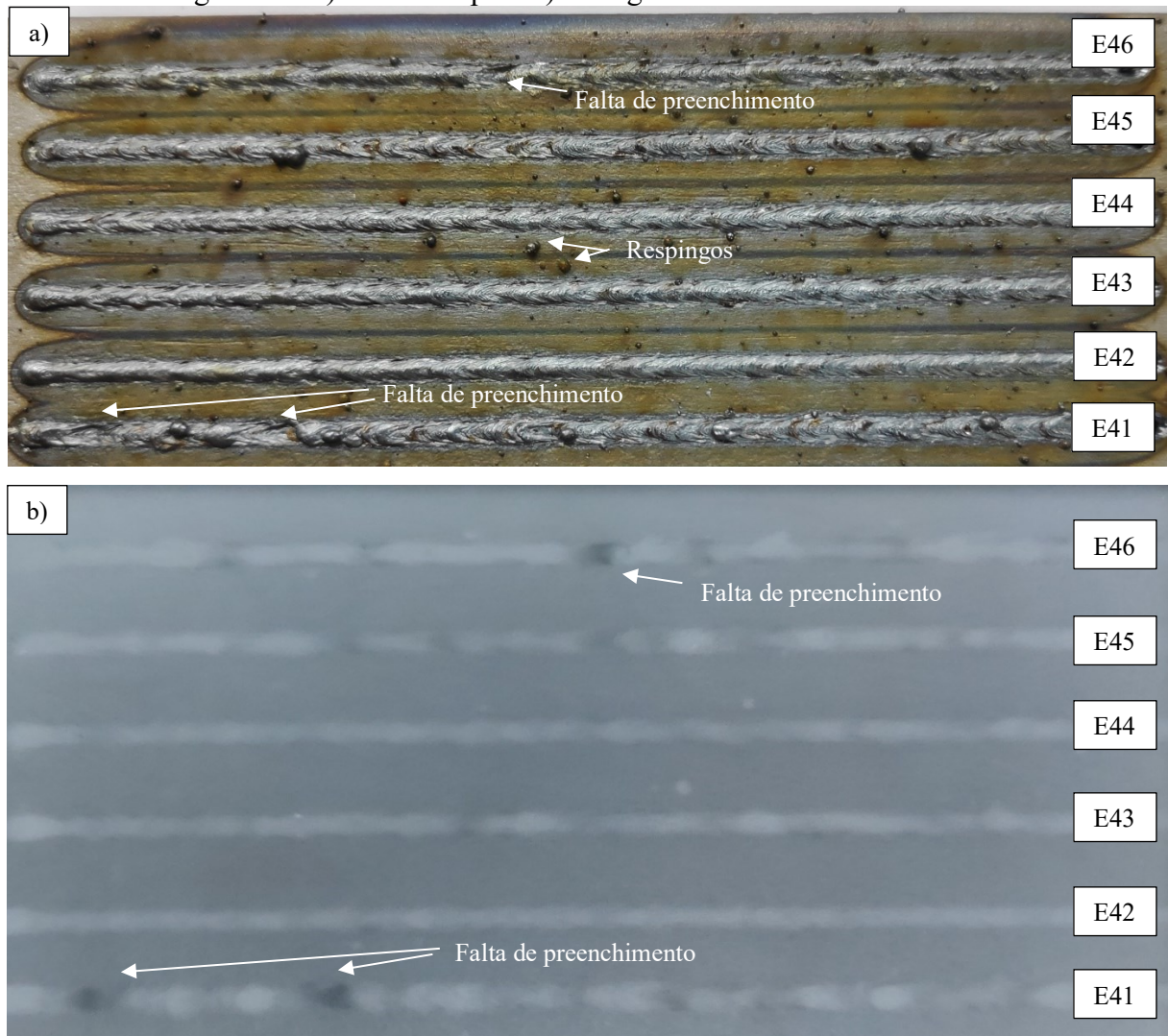
4.5 ESTUDO DO FORMATO DE MODULAÇÃO

Os estudos anteriores possibilitaram a definição dos parâmetros de soldagem e modulação, mostrando as características das soldas resultantes a nível de mecanismos de soldagem (condução ou *keyhole*), defeitos (poros, trincas, respingos), tensões residuais e tamanho de grão. Viu-se que a modulação, para o mecanismo de soldagem *keyhole*, traz um aumento na profundidade de soldagem, além de reduzir a porosidade se frequências específicas forem bem aplicadas.

O presente estudo busca extrair e reunir as melhores condições observadas nos estudos anteriores e comparar entre si diferentes formatos de entrega de energia no aço SAE 1020, aplicando-se a mesma frequência de modulação e potências médias elevadas, combinadas com mais baixas velocidades de soldagem, visando soldas de maiores penetrações e os possíveis defeitos decorrentes do maior aporte térmico. Assim, busca-se atingir altas profundidades através do regime *keyhole*, observando a formação de poros, a qualidade superficial e a morfologia das soldas resultantes. O aço SAE 1020 foi escolhido nesse caso por possuir menor teor de carbono e elementos de liga, tornando mais simples algumas observações iniciais.

A vista de topo e a lâmina radiográfica das soldas produzidas são apresentadas na Figura 80 a seguir, mostrando a qualidade da superfície dos cordões, a nível de rugosidade e respingos, e a análise de porosidade dos cordões.

Figura 80 - a) vista de topo e b) radiografia das amostras E41 a E46.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

Através da Figura 80 a) e b), torna-se possível a realização de uma análise individual de cada cordão de solda. Nota-se que os cordões E41 e E46 são os que apresentam menor qualidade superficial, apresentando mordeduras e grande quantidade de respingos e irregularidades. Por outro lado, o cordão E42 é aquele que apresenta melhor uniformidade de topo e um padrão radiográfico mais limpo. A razão para esse fenômeno, analisando os parâmetros desses três cordões, deve estar ligada à potência máxima e à forma de aplicação de energia de cada ensaio. Os cordões E41 e E46 são aqueles onde a potência máxima é atingida sem rampas e são mantidas por mais tempo, 10 e 5 ms, respectivamente. Essa característica pode ser a responsável pelo elevado número de respingos e irregularidades, uma vez que ela torna mais turbulentos a abertura e o fechamento do *keyhole* para cada ciclo. Esse efeito foi

observado por Kawagushi e Tsukamoto (2003), que relataram uma maior instabilidade do *keyhole* para tempos curtos de rampas de subida e descida de potência. Em contrapartida, o cordão E42 é aquele que apresenta a menor potência máxima aplicada, de 4,5 kW, e possui um degrau de subida e um de descida de potência, suavizando a abertura e o fechamento do *keyhole*, tornando o cordão mais uniforme. Analisando agora os cordões que atingiram a potência máxima de 6 kW com rampas, e que tiveram menores tempos de potência de pico, é possível notar uma maior regularidade e menor presença de respingos no topo da solda, provavelmente devido as características de suavização de entrega de energia.

A análise radiográfica mostrou que, para todos os ensaios, a porosidade relativa foi ausente³, provavelmente devido a três razões principais:

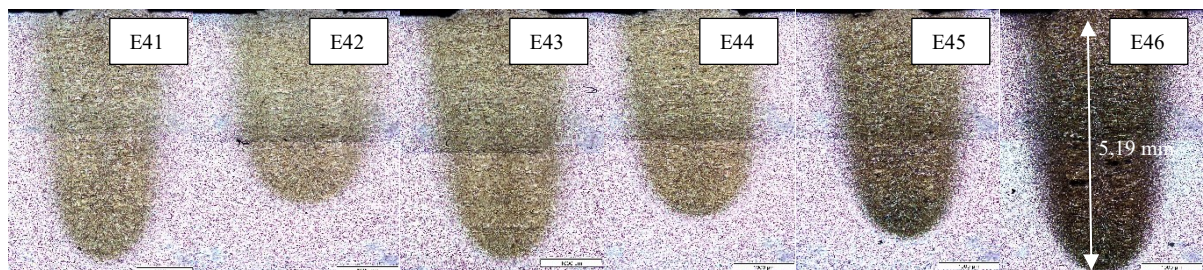
- Pela otimização da frequência de modulação em 50 Hz realizada no segundo estudo desse trabalho, que através de uma sobreposição de pulsos otimizada faz com que o pulso subsequente ajude a expulsar a bolha produzida no pulso anterior.

- A baixa velocidade de soldagem, que possibilitou, através do tempo mais elevado para total solidificação, que a bolhas formadas pelo *keyhole* e pela vaporização imergissem, através do pulso subsequente, para fora da peça.

- Pelas rampas de potência que, através do controle de frequência e redução gradual de potência, atenuaram as oscilações de penetração do *keyhole* fazendo com que menos bolhas fossem aprisionadas.

A Figura 81 ilustra as seções transversais das amostras submetidas aos ensaios E41 a E46, mostrando suas respectivas morfologias.

Figura 81 - Seção transversal dos cordões produzidos sob os parâmetros E41 a E46.



Fonte: elaborada pelo autor (2020)

É possível notar, através da Figura 81, algumas diferenças morfológicas nos cordões de solda. Observa-se que os cordões E41 e E46 são aqueles que atingiram maiores

³ Para melhor visualização, comparar com Figura 65.

profundidades de soldagem. Como mencionado nesse mesmo estudo, os ensaios E41 e E46 são os que possuem o tempo maior de permanência na potência de pico, fazendo com que haja mais tempo para que a energia da potência máxima seja entregue e absorvida pelas paredes do *keyhole*, resultando na penetração do material. Analogamente à explicação dos parágrafos anteriores, o cordão E42 é aquele que apresenta menor penetração, devido a sua potência máxima ser 1,5 kW menor do que a potência dos demais ensaios, confirmando a importância da potência máxima nos ensaios com potência modulada onde a potência média é mantida constante.

Este último estudo teve o objetivo de combinar diversos aspectos avaliados pelas seções anteriores, resultando na combinação de parâmetros otimizados por este trabalho ou pela literatura:

- Velocidades de soldagem reduzidas, possibilitando altas penetrações e a expulsão das bolhas.

- Potências médias de 3 kW e velocidades de 0,75 m/min produzindo soldas em regime *keyhole* com menos defeitos superficiais.

- Rampas e degraus de potência, que produziram soldas com menos tensões residuais e menor tamanho de grão.

Essa série de fatores resultou em seis soldas com elevada penetração e reduzida presença de poros. Abrindo espaço para análises mais profundas dessas soldas a nível de tamanho de grão, tensões residuais e quantidade de trincas em trabalhos futuros.

5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados na seção anterior possibilitaram estabelecer uma série de conclusões a respeito do emprego da técnica de soldagem a laser com potência modulada, as quais podem ser pontuadas a seguir:

- A modulação da potência produziu soldas mais profundas para o regime *keyhole*, sendo a potência máxima de entrega de energia e o tempo de patamar os fatores determinantes para a magnitude de penetração. Já para soldas produzidas no regime de condução, a modulação não foi responsável por grandes alterações de profundidade.
- As análises radiográficas mostraram que, se bem definida e combinada com a velocidade de soldagem, a frequência de modulação pode ser um artifício na redução de porosidade de soldas a laser, devido ao melhor controle dos fenômenos oscilatórios do *keyhole* que aprisionam gases por conta de instabilidades e também devido à remoção do gás aprisionado pelo primeiro pulso através do pulso subsequente. Uma análise de comparação com regime contínuo que apresente a mesma magnitude de penetração pode ser feita em trabalhos futuros.
- Ensaio de furo cego mostraram que degraus de potência introduzidos via modulação foram eficazes na redução de tensões residuais de soldas produzidas a laser graças à atenuação do gradiente térmico durante o ciclo de soldagem, além disso, o melhor controle das oscilações do *keyhole* devido a estabilização precisa da frequência de oscilação via modulação pode ter reduzido o fluxo aleatório de massa na cavidade, causando menos distorções.
- Análises de imagem não foram eficazes na medição de tamanho de grão, devido à complexidade da fase formada na ZF, porém, medidas de microdureza podem sugerir, de maneira indireta, que cordões de solda com grãos mais refinados na ZF foram obtidos através de soldagem com potência modulada com degraus, devido à possível agitação e quebra da estrutura previamente solidificada pelo pulso subsequente, fazendo com que novos sítios de nucleação de grão sejam criados e assim produzidos novos grãos com volumes médios reduzidos. Contudo, uma atenção especial é requerida ao número de

degraus de potência, à potência máxima e à frequência de modulação visando à redução do coalescimento por exposição alongada ao calor.

- Modulações com rampas de potência mostraram-se mais eficazes do que formatos quadrados para o melhoramento da superfície de soldas produzidas com mesmas potências médias. Além disso, a combinação otimizada de parâmetros possibilitou a produção de soldas sem porosidade aparente, possivelmente devido à baixa velocidade de soldagem utilizada, que permitiu que os pulsos expulsassem as bolhas até a superfície do cordão, a atenuação de potência por consequente das rampas, melhorando a estabilização do processo e a frequência otimizada aplicada, que melhor controlou os fenômenos oscilatórios da cavidade.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Acompanhamento in situ das flutuações do *keyhole* através de mecanismos de gravação, medidores fotossensíveis, transmissão de raio-x ou pelo método de *Digital Image Correlation* (DIC).

- Aplicação da modulação a laser em materiais mais moles com estruturas menos complexas que facilitariam sua análise granulométrica via EBSD, para a medição via imagem dos grãos.

- Análises de tomografia para analisar de maneira qualitativa e quantitativa as possíveis trincas devido a soldagem a laser de potência contínua e modulada sobre o aço SAE 4140.

- Aplicação de rampas de potência e outros formatos de modulação para a análise de tensões residuais em soldas a laser.

- Aplicação da modulação em juntas reais, observando como se comporta a modulação da potência em soldas passantes.

- Utilizar a modulação a laser em ensaios de fusão seletiva a laser, visando reduzir os defeitos típicos de processamento.

- Testar o método modulado em revestimento via laser, possibilitando a redução de trincas da camada revestida.

- Combinação da emissão de potência modulada com laser TIG ou MIG, explorando suas vantagens em relação a melhor eficiência energética e consumo da tocha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI® Z136.1 - Use of LASER. USA, 2009.
- ANTONY, K.; RAKESHNATH, T. R. Dissimilar laser welding of commercially pure copper and stainless steel 316L. **Materials Today: Proceedings**, 2019.
- AHMED, N. **New developments in advanced welding**. 1.ed. Cambridge: Woodhead, 303 p., 2005.
- ASTM International, ASTM Metals Handbook. **Heat Treating**. v. 4, 1991.
- ASTM E-837, Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method. **Annual Book of ASTM Standards**, American Society for Testing of Materials, v. 3, n. 1, 2002.
- BAUMBACH, N.; KÜHL, P.; KARAM, J.; JONKERS, J.; VILLARREAL-SAUCEDO, F.; REYES, M. A cutting-edge solution for 1µm laser metal processing. **High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems VI**, SPIE, 2017/02.
- BEYER, E.; WISSENBACH, K. Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung. Berlin, Heidelberg: **Springer Berlin Heidelberg**, 1998.
- CARVALHO, S. M. **Estudo da soldabilidade a laser e a TIG do titânio comercialmente puro grau 2 empregado em sistemas pneumáticos de aeronaves**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- CHANG, W. S., NA, S. J. A study on the prediction of the laser weld shape with varying heat source equations and the thermal distortion of a small structure in micro-joining. *J. Materials Processing Technology*, v. 120, n. 1-3, pp. 208-214, 2002.
- CHONG, T.; DEEPANKAR, P.; HAIJUN, G.; BRENT, S. **A Two-Dimensional Analytical Evaluation of Temperature Fields in Selective Laser Sintering**. Conference paper. 2014.
- COSTA, J.; PIRES, J.; ANTUNES, F.; NOBRE, J.; & BORREGO, L. Residual stresses analysis of ND-YAG laser welded joints. **Engineering Failure Analysis**, v. 17(1), pp. 28–37, 2010.
- DAVIM, J. P. **Lasers in Manufacturing**. 1.ed. Hoboken: Wiley, 306 p., 2012.
- DONG, L.; SAMSON, B. **Fiber Lasers: Basics, Technology, and Applications**. Boca Raton: CRC Press, p. 324, 2016.
- EBERLE, H-G; RICHTER, K.; SCHOBBER, H. Welding of aluminum alloys with modulated lasers. **Conference proceedings of SPIE 2207**, pp. 184-191. 1994.
- FANG, C.; XIN, J.; DAI, W.; WEI, J.; WU, J.; SONG, Y.; **Journal of Laser Applications**. v. 32, n.p. 2020.

GUTJAHR, J. **Desenvolvimento e implementação de um sistema CNC, modular e reconfigurável, para processos LASER**. Dissertação (Engenharia de Controle e Automação) – EMC/UFSC, Florianópolis. 2016.

GUPTA, S.; DATTA, S.; JAYPURIA, S.; PRATIHAR, D.; SAHA, P. **Advances in Materials and Manufacturing Engineering**. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore, 397-404. 2020.

HEIDER, A.; WEBER, R.; HERRMANN, D.; HERZOG, P.; GRAF, T. Power modulation to stabilize laser welding of copper. **Journal of Laser Applications**, v. 27, n. 2, 2015.

HITZ, C. B.; EWING, J. J.; HECHT J. **Introduction to Laser Technology**. 4a ed. Piscataway: Wiley-IEEE Press, 2012.

HUANG, S.; YANG, X.; CHEN, H.; CHUANG, C.; XU, L. Effect of droplet transfer on pore formation in laser-pulsed metal inert gas hybrid welding of A7N01P aluminum alloy. **Journal of Laser Applications**, v. 32, n.p., 2020.

HUANG, L.; HUA, X.; WU, D.; LI, F. Numerical study of keyhole instability and porosity formation mechanism in laser welding of aluminum alloy and steel. **Journal of materials processing technology**, v. 252, pp. 421-431, 2018.

HUGENSCHMIDT, M. Improved energy transfer in laser-target interaction processes by using repetitively pulsed laser. In: E. Baum, C. G. Koop, V. A. Kulkerny, K. R. Magiawala, J. Shwartz, Dr. Salman Rosenwaks (Eds.), **Gas Flow and Chemical Lasers**, Berlin: Springer, pp 169-174. 1987.

ION, J. C. **Laser Processing of Engineering Materials**. Amsterdam: Elsevier, pp. 395-455. 2005.

INJEYAN, H., GOODNO, G. D. **High-Power Laser Handbook**. 1.ed. New York: Mc Graw-Hill, 618 p. 2011.

JENNEY, C.; O'BRIEN, A. (Eds.) **Welding science and Technology**. Miami: American Welding Society, 1997.

JIANG, M.; CHEN, X.; CHEN, Y.; TAO, W. Increasing keyhole stability of fiber laser welding under reduced ambient pressure. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 268, pp. 213-222, 2019.

JIN, X.; LI, L.; ZHANG, Y. A heat transfer model for deep penetration laser welding based on an actual keyhole. **Int. J. Heat and Mass Transfer**, n. 46, pp. 15-22, 2003.

KANNATEY-ASIBU, E. **Principles of laser materials processing**. New Jersey: John Wiley, 2009.

KATAYAMA, S.; MIZUTANI, M.; MATSUNAWA, A. Modelling of Melting and Solidification Behavior During Laser Spot Welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 2, n. 1, pp. 1-9, 1997.

KUMAR, S.; KUNDU, A.; VENKATA, K. A.; EVANS, A.; TRUMAN, C.; FRANCIS, J.; BHANUMURTHY, P.; BOUCHARD, P.; DEY, G. K. Residual stresses in laser welded ASTM A387 Grade 91 steel plates. **Materials Science and Engineering**: v.575, pp. 160–168, 2013.

KUO, T. Y.; JENG, S. L. Porosity reduction in Nd–YAG laser welding of stainless steel and inconel alloy by using a pulsed wave. **J. Phys. D**, v. 38, pp. 722–728, 2005.

Laser safety manual. Seattle: University of Washington, IEC 60825-1, 2007.

LAWRENCE, J. **Advances in laser materials processing: Technology, research and application**. Coventry: Woodhead Publishing, 2017.

LU, F.; LI, X.; LI, Z.; TANG, X.; CUI, H. Formation and influence mechanism of keyhole-induced porosity in deep-penetration laser welding based on 3D transient modeling. **J. Heat Mass Trans.** v. 90, pp. 1143–1152, 2015.

MACHERAUCH, E.; WOHLFAHRT, H., Different sources of residual stress as a result of welding. **Proceedings of the International Conference on Residual Stress in Welded Construction and their Effects**. London, pp. 267-282, 1977.

MAIMANN, T. H. Stimulated Optical Radiation in Ruby. **Nature**, v. 187, n. 4736, p. 493-494, 1960.

MAKI, T. Morphology and substructure of martensite in steels. **Phase Transformations in Steels: Diffusionless Transformations High Strength Steels Modelling and Advanced Analytical Techniques**. n.p., 2012.

MATSUNAWA, A. Problems and solutions in deep penetration laser welding. **Sci. Technol. Weld. Join.**, v. 6, pp. 351–354, 2001.

MATSUNAWA, A. **Defects Formation Mechanisms in Laser Welding and Their Suppression Methods**. Proceedings of ICALEO 94, Orlando: Laser Institute of America, v. 79, pp. 203 – 209, 1994.

MATSUNAWA, A.; MIZUTANI, M.; KATAYAMA, S.; SETO, N. Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding. **Weld. Int.**, v. 17, pp. 431–437, 2003.

MATSUNAWA, A.; KIM, J. D.; SETO, N.; MIZUTANI, M.; KATAYAMA, S. Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding. **J. laser Appl.**, v. 10, pp. 247–254, 1998.

MELO, L. **Powder Jet Particle Density Distribution Analysis and Qualification for the LASER Metal Deposition**. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

METALS HANDBOOK. **Weldability of Steel**. 10ed. Ohio: *American Society for Metals*, v.6, 1992.

MIRIM, D. C. **Investigação da tensão residual na soldagem laser entre aço carbono AISI 1010 e o aço inoxidável AISI 304**. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MODENESI, P. J.; **Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico**. Dissertação – (Mestrado em Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Minas Gerais, Pampulha, 2008.

NING, J.; ZHANG, L.; YIN, X.; ZHANG, J.; NA, S. Mechanism study on the effects of power modulation on energy coupling efficiency in infrared laser welding of highly-reflective materials. **Materials and Design**, v. 178, n.p, 2019.

OLSEN, F. O. **Hybrid Laser-Arc Welding**. 1.ed. Boca Raton: CRC Press, 328 p, 2009.

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

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

PRECITEC. Welding Head YW52. Gaggenau: Precitec. 172 p, 2011.

PENILLA, E.; DEVIA-CRUZ, L. F.; WIEG, A. T.; MARTINEZ-TORRES, P.; CUANDO-ESPITIA, N.; SELLAPPAN, P.; KODERA, Y.; AGUILAR, G.; GARAY, J. E. Ultrafast laser welding of ceramics, **Science**, v. 365, pp. 803-808, 2019.

POPRAWA, R. (Ed.). **Laser application technology**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

QUAZI, M.; ISHAK, M.; FAZAL, M. A.; ARSLAN, A.; RUBAIEE, S.; AIMAN, M. QABAN, A.; YUSOF, F.; SULTAN, T. ALI, M.; MANLADAN, S. ‘A comprehensive assessment of laser welding of biomedical devices and implant materials: recent research, development and applications’, **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences**, n.p., 2020.

REED-HILL, R.E.; ABBASCHIAN, R.; ABBASCHIAN, L. **Physical Metallurgy principles**, 4a ed. Boston: Cengage Learning, 749 p, 2010.

REDDY, G.; MOHANDAS, T. Explorative studies on grain refinement of ferritic stainless-steel welds. **Journal of Materials Science Letters**, v. 20, pp. 721-723, 2001.

ROCHA, M. A. C.; **Análise das propriedades Mecânicas do aço SAE 4140 com estrutura Bifásica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2004.

RZANY, B. *Laserstrahlschneiden*. **Deutsch Verlag für Schweisstechnik (DVS)**, Düsseldorf, 1995.

Safety of laser products.: *International Electrotechnical Commission*, Geneva, 2001.

SCHAWLOW, A. L.; TOWNES, C. Infrared and optimal masers. *Phys. Rev.*, v. 112, pp. 1940–1949, 1958.

SCHAEFER, M.; KESSLER, S.; SCHEIBLE, P; GRAF, T. Modulation of the laser power to prevent hot cracking during laser welding of tempered steel. *J. Laser Appl.*, v. 29, n. 4, pp. 042008 – 042008-4, 2017.

SHCHERBAKOV, E.; FOMIN, V., ABRAMOV, A., FERIN, A., MOCHALOV, D. GAPONTSEV, V. Industrial Grade 100 kW Power CW Fiber Laser. *Adv. Solid-State Lasers Congr.* v. 5, p. 4, 2013.

SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R. **Aços e ligas especiais**. 3º ed. São Paulo: Edgard Blücher, 664 p. 2010.

SMITH, W. F; HASHEMI, J. **Foundation of Materials Science and Engineering**. 4a ed. , USA: McGraw-Hill, 2006.

SOUZA, T. **Aplicação de um LASER de fibra de alta potência para soldagem autógena de juntas espessas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. **Laser Material Processing**. 4a. ed. London: Springer London, 2010.

STRITT, P.; WEBER, R.; GRAF, T.; MULLER, S.; EBERT, C. Utilizing Laser Power Modulation to Investigate the Transition from Heat-Conduction to Deep-Penetration Welding. *Physics Procedia*, v. 12, pp. 224-231, 2011.

SUDER, W. **Study of fundamental parameters in hybrid laser welding**. Tese de doutorado. Universidade de Cranfield. Cranfield. 2011.

SUN, J.; YAN, Q.; GAO, W.; HUANG, J. Investigation of laser welding on butt joints of Al/steel dissimilar materials'. *Materials & Design*, v. 83, pp. 120– 128, 2015.

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

TSUKAMOTO, S.; KAWAGUCHI, I.; ARAKANE, G.; HONDA, H. **Keyhole behavior in high power laser welding**. Conference proceedings of spie – First International Symposium on High-Power laser Macroprocessing, v. 4831, pp. 251-256, 2003.

VEDENOV, A. A.; GLADUSH, G. G.; DROBYAZKO, S. Y.; PAVLOVICH, Y.; SENATOROV, Y. M. Physical laws governing the interaction of pulse-periodic CO2 laser radiation with metals. *Sov. J. Bahim Electron*, v. 15, pp. 32-36, 1985.

WAHL, T.; SCHOLZ, J.; DAUSINGER, F. Tiefschweißen mit gepulstem CO₂-Laserstrahl. **W. Waidelich (Ed.). Laser: Optoelektronik in der Technik /Optoelectronics in Engineering**, Berlin: Springer, pp. 539-543, 2009.

WILDEN, J.; JAHN, S.; KOTALIK, P.; NEUMANN, T. P.; HOLTZ, R. Effects of pulse shape modulation in Nd:YAG laser beam welding on the weld pool flow and solidification. **Proceedings of the ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference – MSEC 2009**, Indiana, pp. 1-7, 2009.

ZHANG, L.; LIU, J.; PEI, J.; NING, J.; ZHANG, L.; LONG, J.; ZHANG, G.; ZHANG, J.; NA, S. Effects of Power Modulation, Multipass Remelting and Zr Addition Upon Porosity Defects in Laser Seal Welding of End Plug to Thin-Walled Molybdenum Alloy. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 41, pp. 197-207, 2019.

ZHANG, L.-J.; ZHANG, X.-J.; NING, J.; & ZHANG, J.-X. Modulated fiber laser welding of high reflective AZ31. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 76 (1-4), pp. 721–733, 2014.

ZOU, J. L.; WU, S. K.; YANG, W. X.; HE, Y.; XIAO, R. S. A novel method for observing the micromorphology of keyhole wall during high-power fiber laser welding. **Materials & Design**, v. 89, pp. 785–790, 2016.