

Soldagem a Laser

Sumário

O QUE É SOLDA A LASER?.....	4
EXISTEM DOIS TIPOS DE SOLDAGEM A LASER:.....	4
SOLDAGEM DE CONDUÇÃO TÉRMICA.....	4
SOLDAGEM DE FECHADURA.....	4
VANTAGENS DA SOLDAGEM A LASER.....	5
APLICAÇÕES APRIMORADAS.....	8
PRINCÍPIO DA SOLDA A LASER.....	8
AMPLIFICAÇÃO (CAVIDADE ÓPTICA).....	8
FOCALIZAÇÃO (UNIÃO DE MATERIAIS).....	9
CONSTRUÇÃO DO LASER DE CORPO SÓLIDO (LASER A RUBI, LASER YAG).....	10
FUNCIONAMENTO SIMPLIFICADO.....	11
CONSTRUÇÃO DE LASER GASOSO (LASER DE CO ₂).....	12
ESTRUTURA E MEIO ATIVO.....	12
PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO (BOMBEAMENTO).....	13
O PAPEL DOS GASES E A EFICIÊNCIA.....	13
APLICAÇÕES EM SOLDAGEM.....	13
MODOS DE OPERAÇÃO.....	14
ALTA POTÊNCIA E PENETRAÇÃO.....	15
LASER DE FIBRA (FIBER LASER).....	16
PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO APRIMORADO.....	16
VANTAGENS CHAVE.....	17
CONSIDERAÇÃO IMPORTANTE.....	18
COMPRIMENTO DE ONDA E O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.....	18
ONDA DE RÁDIO:.....	19
MICRO ONDAS:.....	19
ONDAS INFRAVERMELHO.....	20
LUZ VISÍVEL.....	20
ULTRAVIOLETA.....	20
RAIOS X.....	21
RAIOS GAMA.....	21
PERIGOS E RISCOS NA SOLDAGEM A LASER.....	24
RADIAÇÃO LASER PRIMÁRIA (RISCO ÓPTICO).....	24
RISCOS ELÉTRICOS E DE INCÊNDIO.....	24
RISCOS POR SUBPRODUTOS DA SOLDAGEM.....	24
MEDIDAS DE CONTROLE E SEGURANÇA.....	25
PROTEÇÃO INDIVIDUAL (EPIS) NA SOLDAGEM A LASER.....	25
PROTEÇÃO OCULAR: ÓCULOS DE PROTEÇÃO ESPECÍFICOS.....	26
PROTEÇÃO CORPORAL.....	26
EPC: CÉLULA DE SOLDA (ENCLAUSURAMENTO).....	27
CONCLUSÃO E PRECAUÇÕES.....	28
AMBIENTE.....	28
CONTENÇÃO E RESTRIÇÃO DE ACESSO.....	28
CONTROLES DE INFRAESTRUTURA.....	29
GERENCIAMENTO DE SUBPRODUTOS E SINALIZAÇÃO.....	29
COLORIMETRIA.....	29
PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS.....	29

MATERIAL DE ADIÇÃO.....	32
CONSUMÍVEIS.....	32
ÓPTICA DE FOCAGEM (LENTE).....	32
GÁS DE PROTEÇÃO (GÁS DE ASSISTÊNCIA)	32
MATERIAL DE ADIÇÃO	33
TOCHA.....	33
ESTRUTURA E RESFRIAMENTO	33
COMPONENTES CONSUMÍVEIS DA ÓPTICA	34
QUANDO FAZER A TROCA DAS LENTES:.....	39
O PRINCIPAL INDICADOR DE PROBLEMA.....	39
PROBLEMAS DA LENTE:	40
FUNÇÕES MÚLTIPLAS DAS LENTES.....	42
ORIENTAÇÃO CORRETA DE INSTALAÇÃO (POLARIDADE DA LENTE)	42
ALINHAMENTO DO LASER.....	43
TÉCNICAS DE SOLDAGEM	44
ÂNGULO DA TOCHA E SEGURANÇA ÓPTICA	44
MODOS DE SOLDAGEM.....	45
EQUIPAMENTOS.....	48
ALIMENTADOR DE ARAME (PARA SOLDAGEM NÃO AUTÓGENA).....	51
BOCAIS DA TOCHA:	52
SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO (CHILLER).....	52
SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO PARA INICIAR A SOLDAGEM	53
GÁS	54
FUNÇÕES SECUNDÁRIAS DO GÁS (RESFRIAMENTO E LIMPEZA).....	55
COMPARAÇÃO DE GASES	56
MATERIAIS A SEREM SOLDADOS.....	56
CARACTERÍSTICAS DA SOLDA A LASER.....	57
PROCESSO DE LIMPEZA DE PEÇAS	58
PRINCÍPIO E CAPACIDADE	59
TÉCNICAS DE OPERAÇÃO EM LIMPEZA.....	59
PROCESSO DE CORTE A LASER	60
PARÂMETROS DE SOLDAGEM EM LASER PULSADO.....	61
PARÂMETROS DE ENERGIA DO PULSO	62
PARÂMETROS DE FREQUÊNCIA E MOVIMENTO	63
PRINCÍPIOS PARA SER TER UMA SOLDA A LASER	63
PRÉ-REQUISITOS E CONTROLES FUNDAMENTAIS	63
VANTAGENS E DEMANDAS DE APLICAÇÃO	64
PRECAUÇÕES.....	64
Proteção contra Radiação Laser (Pele)	64
PROTEÇÃO CONTRA RISCO TÉRMICO (CALOR)	65
PROTEÇÃO E INTEGRIDADE DO EQUIPAMENTO (RISCO ELÉTRICO E FÍSICO).....	65

O QUE É SOLDA A LASER?

A **solda a laser** (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) **um** feixe de luz é gerado e, em seguida, focalizado em um ponto minúsculo (com cerca de 0.2 mm a 0.6 mm de diâmetro) para unir materiais. A alta densidade de energia no foco do laser (potências que podem atingir 10^6 W/cm^2 aquece o material rapidamente. Essa energia funde instantaneamente os materiais base. Se a potência for muito alta, pode até vaporizar uma parte do material, criando um "keyhole" (buraco de chave) preenchido com vapor metálico, o que permite soldar materiais mais espessos.

À medida que o feixe se move, o material fundido resfria e solidifica, formando a solda.

EXISTEM DOIS TIPOS DE SOLDAGEM A LASER:

SOLDAGEM DE CONDUÇÃO TÉRMICA

Esta modalidade é caracterizada por uma **baixa densidade de potência** no foco.

- **Mecanismo:** O feixe de laser atinge a superfície e a energia é primariamente absorvida e transferida para o interior do material através de **condução térmica**. A superfície é aquecida acima do ponto de fusão, mas abaixo do ponto de vaporização.
- **Características:**
- **Densidade de Potência:** Baixa, tipicamente abaixo de 10^5 W/cm^2 .
- **Poça de Fusão:** Larga e rasa, com uma razão profundidade-largura inferior a 1.
- **Aplicação:** Ideal para **chapas finas** (até cerca de 0.5 mm), soldas que exigem um acabamento **liso e estético** (cosmético) e onde a alta resistência estrutural não é o requisito principal.

SOLDAGEM DE FECHADURA

Este é o modo mais comum para soldas estruturais, usando uma **alta densidade de potência**.

- **Mecanismo:** A alta energia do laser **vaporiza** instantaneamente o material no ponto de foco. Isso cria um canal estreito e profundo, preenchido com vapor metálico e plasma, conhecido como **"Keyhole"** (buraco de chave). Este canal

permite que o feixe de laser penetre profundamente no material, garantindo a fusão em toda a espessura da junta.

- *Nota:* A temperatura no interior do *keyhole* pode exceder 10.000 K.
- **Características:**
 - **Densidade de Potência:** Alta, tipicamente superior a 10^6 W/cm^2 .
 - **Poça de Fusão:** Estreita e muito profunda, resultando em uma **razão profundidade-largura elevada** (maior que 1, frequentemente 5:1 ou mais).
 - **Aplicação:** Usada para soldar **materiais mais espessos a alta velocidade**, produzindo soldas de **alta resistência** e com uma Zona Afetada pelo Calor (ZAC) muito estreita.

Característica	Soldagem por Condução Térmica	Soldagem por Penetração (Keyhole)
Densidade de Potência	Baixa ($< 10^5 \text{ W/cm}^2$)	Alta ($> 10^6 \text{ W/cm}^2$)
Mecanismo de Energia	Condução Térmica	Vaporização (Criação do Keyhole)
Profundidade de Solda	Rasa	Profunda
Forma do Cordão	Largo e em forma de crescente	Estreito e em forma de "V" profundo
Aplicações Típicas	Estética, vedação, chapas finas	Estrutural, alta resistência, materiais espessos

Tabela 1

VANTAGENS DA SOLDAGEM A LASER

A soldagem a laser é um processo de alta tecnologia que oferece benefícios significativos em comparação com métodos de soldagem convencionais.

Desempenho e Qualidade do Processo

Vantagem	Detalhamento Técnico
Alta Velocidade e Produtividade	O processo é extremamente rápido , resultando em altos índices de produção (ciclo de trabalho que pode chegar a 100%).
Baixa Deformação e Tensão Residual	Devido à Zona Afetada pelo Calor (ZAC) ser muito estreita (HAZ), a introdução de calor no material é mínima, o que resulta em baixa distorção do material e menor necessidade de retrabalho pós-soldagem.
Soldas de Alta Qualidade e Precisão	Produz cordões de solda estreitos, profundos e geometricamente perfeitos , garantindo alta resistência mecânica e estanqueidade.
Flexibilidade de Processo	Capacidade de realizar solda autógena (sem material de adição) e não autógena (com material de adição).
Soldagem de Materiais Diferentes	É um dos poucos métodos capazes de unir com sucesso materiais dissimilares ou metais de difícil soldabilidade.

Tabela 2

Eficiência Operacional e Versatilidade

Vantagem	Detalhamento Técnico
Alto Grau de Automação	O processo é facilmente automatizado e integrado a sistemas robóticos, permitindo repetibilidade e precisão consistentes, essenciais para a indústria 4.0.
Baixo Custo Operacional (Energia)	O custo de energia por metro de solda é relativamente baixo, e a alta deposição em relação ao custo de energia é favorável, resultando em eficiência energética.
Versatilidade Multifuncional	Muitos sistemas a laser podem ser configurados para realizar corte de chapas ou limpeza de superfície da peça no mesmo equipamento.
Solda "Higiênica"	O processo é limpo, sem contato e sem geração de fumos excessivos ou escória, sendo ideal para aplicações nas indústrias alimentícia e médica.

Tabela 3

Desvantagens da Soldagem a Laser

Desvantagem	Detalhamento Técnico
Custo Inicial Elevado do Equipamento	O custo do equipamento (fonte laser, óptica, sistemas de refrigeração e segurança) é significativamente mais alto do que os equipamentos de soldagem convencionais.
Necessidade de Profissionais Qualificados	Requer profissionais qualificados para operação, programação e manutenção dos sistemas ópticos e robóticos complexos.
Desafios com Materiais Refletivos	Materiais com alta refletividade e condutividade térmica (como alumínio e cobre) podem absorver mal o feixe inicial, dificultando a soldagem e exigindo lasers de comprimento de onda específico ou fontes de potência muito alta.
Requisitos de Segurança e Infraestrutura	A área de solda deve ser fechada e controlada devido à alta intensidade do laser e à emissão de radiação, exigindo medidas de segurança rigorosas (EPIs e barreiras de proteção).
Sensibilidade e Manutenção Óptica	Os componentes ópticos (lentes e espelhos) são bastante delicados e caros, podendo ser danificados facilmente por poeira ou respingos, necessitando de cuidados constantes com a tocha e mangueira de proteção.

Tabela 4

APLICAÇÕES APRIMORADAS

A tabela de aplicações original já está excelente, mas a separei para manter a consistência do formato:

Setor de Aplicação	Exemplos Específicos
Automotivo	Soldagem de componentes de carroceria, transmissões, eixos e baterias de veículos elétricos.
Aeroespacial	União de componentes estruturais leves, pás de turbinas e peças de ligas exóticas.
Eletrônica	Soldagem de componentes sensíveis, invólucros de baterias e microeletrônica de precisão.
Medicina	Fabricação de instrumentos cirúrgicos, implantes, <i>stents</i> e componentes de dispositivos médicos.
Joalheria e Ferramentas	Reparo de moldes de injeção de alta precisão e soldagem de joias delicadas.

Tabela 5

PRINCÍPIO DA SOLDA A LASER

O processo começa com a **excitação de átomos** em um **Meio Ativo** (ou material de ganho), que pode ser um cristal sólido, um gás ou uma fibra óptica.

1. **Fonte de Alimentação:** Uma fonte de energia primária (elétrica, flash lamp, ou outro laser) é usada para injetar energia no Meio Ativo.
2. **Bombeamento:** Esta energia é absorvida pelos átomos do Meio Ativo, elevando os elétrons para um nível de energia superior (estado excitado).
3. **Inversão de População:** O objetivo é criar uma condição onde haja mais átomos no estado excitado do que no estado fundamental – esse é o estado de **Inversão de População**, essencial para a operação do laser.

AMPLIFICAÇÃO (CAVIDADE ÓPTICA)

A luz é amplificada através do processo de **Emissão Estimulada** em uma **Cavidade Óptica** (também conhecida como Ressonador).

1. **Emissão Estimulada:** Um elétron no estado excitado é "estimulado" por um fóton (partícula de luz) que passa. Isso faz com que o elétron caia para o nível de

energia inferior, liberando **outro fóton** que é **idêntico** ao fóton incidente (mesmo comprimento de onda, mesma fase e mesma direção).

2. **Ressonador:** O Meio Ativo é colocado entre dois espelhos: um **espelho totalmente refletor** e um **espelho semirefletor** (parcialmente transparente). Esses espelhos formam a cavidade óptica.
3. **Amplificação:** Os fótons idênticos ricocheteiam entre os espelhos, estimulando mais emissões e amplificando a luz.
4. **Saída do Feixe:** O **espelho semirefletor** permite que uma pequena parte dessa radiação altamente amplificada "vaze" continuamente, formando o feixe de laser de saída. Este feixe é **colimado** (paralelo) e **monocromático** (possui um comprimento de onda específico).

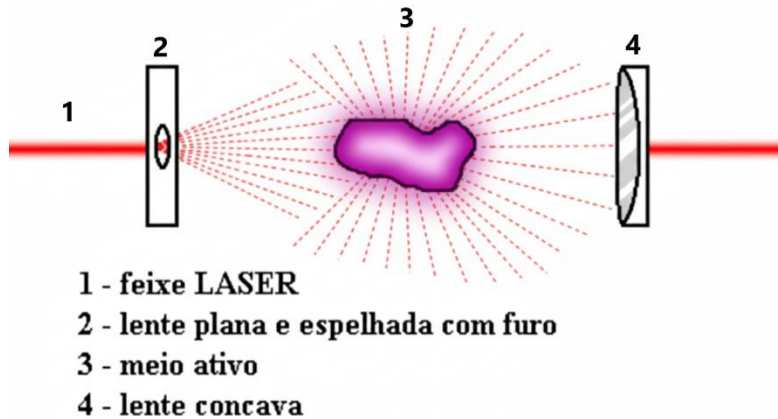


Figura 1

FOCALIZAÇÃO (UNIÃO DE MATERIAIS)

O feixe de laser de saída é guiado e, finalmente, focado na peça de trabalho.

1. **Óptica de Focagem:** O feixe de laser é direcionado através de um sistema óptico (geralmente lentes ou espelhos parabólicos). Este sistema concentra a energia do feixe em um **ponto focal minúsculo** (com diâmetro tipicamente inferior a 1 mm).
2. **Densidade de Potência:** Essa focalização cria uma **altíssima densidade de potência** (energia por área, frequentemente superior a 10^6 W/cm^2) na superfície ou no interior da peça.

3. **Fusão:** Essa energia concentrada aquece rapidamente o material a temperaturas extremas, fundindo-o instantaneamente. O movimento do feixe de laser sobre a junta, seguido

CONSTRUÇÃO DO LASER DE CORPO SÓLIDO (LASER A RUBI, LASER YAG)

A descrição de um laser de corpo sólido, simplificada, seria um cristal envolvido por uma lâmpada de flash, sendo as extremidades da cavidade são plano-paralelas e metalizadas, com uma superfície refletora e a outra parcialmente transparente. Forma-se então o ressonador ótico. Os íons de Cr atingem um valor limiar e um raio de luz (impulso) passa pela superfície final semitransparente. Desta forma obtém-se um raio de luz em feixe estreito, paralelo e coerente. O raio de luz surgido desta forma é concentrado numa superfície muito pequena por apenas uma lente e serve como fonte de energia. O laser a rubi tem um grau de rendimento de aproximadamente 0,1%. O laser YAG de ítrio-alumínio-granada é mais apropriado para solda. Seu grau de rendimento está entre 0,2% a 3%.

Ressonador Ótico:

1. **Meio Ativo (Cristal):** É o componente central onde ocorre a geração da luz laser.
 - **Laser a Rubi:** Utiliza um cristal de óxido de alumínio (Al_2O_3) dopado com íons de **Cromo** (Cr^{3+}), que são os responsáveis pela emissão de luz no comprimento de onda vermelho (694.3 nm).
 - **Laser Nd: YAG:** Utiliza um cristal de **Ítrio-Alumínio-Garnet** ($Y_3Al_5O_{12}$ - YAG) dopado com íons de **Neodímio** (Nd^{3+}). É o mais comum em soldagem, operando em um comprimento de onda de 1064 nm (no infravermelho próximo).
2. **Fonte de Bombeamento:** Fornece a energia necessária para excitar os átomos (elétrons) no meio ativo.
 - Historicamente, são usadas **lâmpadas de flash** ou lâmpadas de arco de alta intensidade, que envolvem o cristal.
 - Lasers Nd: YAG modernos e mais eficientes são frequentemente bombeados por **diodos semicondutores** (Diode-Pumped Solid-State Lasers - DPSS).
3. **Cavidade Ótica (Ressonador):** Estrutura que envolve o meio ativo e define o caminho da luz.
 - É formada por duas extremidades **plano-paralelas** do cristal ou por dois espelhos externos:
 - Um **Espelho Totalmente Refletor** (metálico).
 - Um **Espelho Semi refletor** (parcialmente transparente), que permite a saída controlada do feixe.

FUNCIONAMENTO SIMPLIFICADO

1. **Bombeamento:** A energia da lâmpada de flash (ou diodo) excita os íons Cr^{3+} (Rubi) ou Nd^{3+} (YAG), levando-os a um estado de alta energia.
2. **Emissão Estimulada:** Quando os íons atingem o **valor limiar** (Inversão de População), um fóton inicia o processo de **emissão estimulada**.
3. **Amplificação:** Os fótons ricocheteiam entre os espelhos do ressonador, amplificando-se mutuamente em um feixe **coerente** (em fase).
4. **Saída do Laser:** O feixe de luz amplificado é liberado através da superfície **semitransparente**, resultando em um **raio de luz estreito, paralelo e coerente**.
5. **Focalização:** Uma **lente única** (ou um sistema óptico) é utilizada para **concentrar** (focar) essa energia em uma **superfície muito pequena** na peça de trabalho.

Característica	Laser a Rubi (Cr^{3+})	Laser Nd: YAG (Nd^{3+})
Modo de Operação	Apenas pulsado (baixa frequência)	Pulsado ou Onda Contínua (CW)
Comprimento de Onda	694.3 nm (Vermelho)	1064 nm (Infravermelho Próximo)
Grau de Rendimento	Aproximadamente 0.1%	0.2% a 3% (até 30% em sistemas DPSS)
Aplicações	Principalmente perfuração e medição (uso histórico)	Soldagem , corte e marcação
Vantagem	Baixo rendimento e baixa potência	Maior rendimento e potência , e o comprimento de onda de 1064 nm é bem absorvido pela maioria dos metais.

Tabela 5

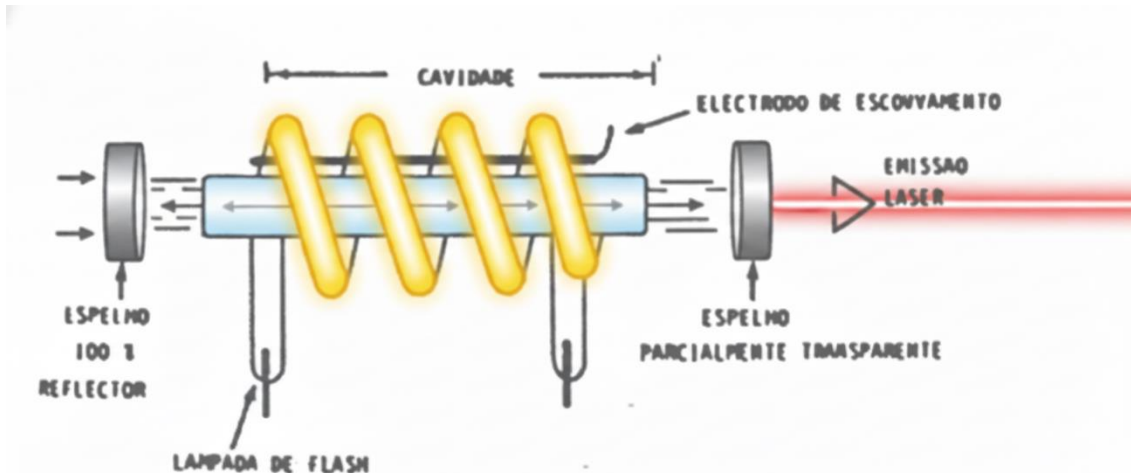


Figura 2

CONSTRUÇÃO DE LASER GASOSO (LASER DE CO₂)

O laser a CO₂, chamados de Lasers de alta potência, largamente empregados para solda e corte. O ressonador ótico, neste caso, consiste de um tubo de descarga de gás pelo qual passa o gás de laser, aqui uma mistura de CO₂, N₂, He. Neste é aplicada uma tensão contínua da ordem de dezenas de KV. O meio laser tem uma pressão de operação de aproximadamente 100 mbar. O calor de perda que surge na descarga elétrica deve ser eliminado pois o laser só trabalha de modo eficiente com uma temperatura abaixo de 200o C.

ESTRUTURA E MEIO ATIVO

1. **Meio Ativo:** Consiste em uma **mistura de gases** circulante, geralmente CO₂, N₂ (Nitrogênio) e He (Hélio), confinados em um **tubo de descarga de gás** que forma o ressonador ótico.
2. **Ressonador Ótico:** É o tubo de descarga, com extremidades seladas por espelhos (um refletor total e um semirefletor) para amplificar a luz.
3. **Comprimento de Onda:** O laser CO₂ emite luz no **infravermelho distante** (cerca de 10.6µm). Este comprimento de onda é muito bem absorvido por não-metais (como plásticos, madeira e tecidos) e, com alta potência, também é eficaz na soldagem de metais.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO (BOMBEAMENTO)

1. **Bombeamento Elétrico:** Uma **tensão contínua** elevada (da ordem de dezenas de kV é aplicada ao longo do tubo de descarga, criando uma **descarga luminosa elétrica** no gás de baixa pressão (aproximadamente 100 mbar).
2. **Excitação do N_2 :** A energia elétrica excita primeiramente as moléculas de **Nitrogênio (N_2)**.
3. **Transferência de Energia:** O N_2 excitado colide com as moléculas de CO_2 , transferindo a energia de forma eficiente e levando as moléculas de CO_2 ao seu estado excitado (Inversão de População).
4. **Emissão:** O CO_2 excitado retorna ao seu estado fundamental, liberando fótons no comprimento de onda de 10. μm , que são amplificados pelo ressonador.

O PAPEL DOS GASES E A EFICIÊNCIA

- N_2 (Nitrogênio): É o principal responsável pela **transferência de energia** para o CO_2 .
- He (Hélio): É crucial para **resfriar o meio ativo** e auxiliar no retorno rápido das moléculas de CO_2 ao estado fundamental.

GERENCIAMENTO TÉRMICO

A eficiência do laser CO_2 depende da temperatura.

- O **calor de perda** gerado pela descarga elétrica deve ser **continuamente eliminado**, pois o laser só opera eficientemente a temperaturas **abaixo de 200°C**. O hélio e sistemas de circulação/resfriamento são essenciais para manter esta condição.

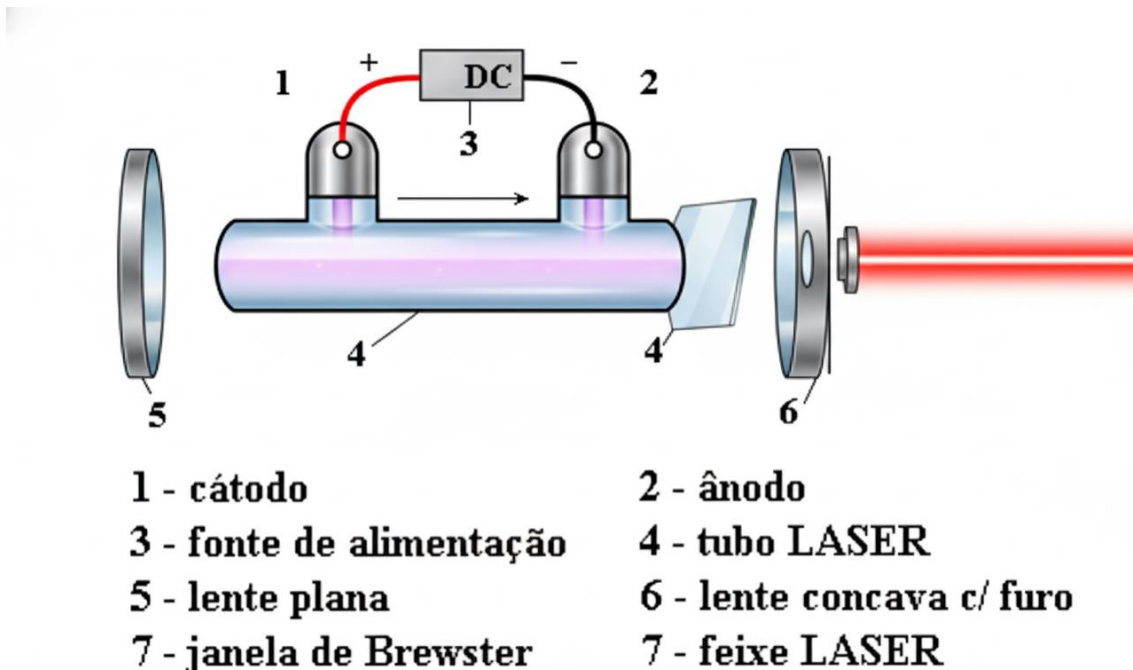
POTÊNCIA E CONSTRUÇÃO COMPACTA

- O raio laser tem uma potência que pode atingir até 700 W por metro de comprimento do ressonador.
- Para alcançar **altas potências** (de 1 kW até 45 kW) em uma **construção compacta**, o tubo ressonador é frequentemente "**dobrado**" ou construído em arranjos multicanaís (como lasers *Fast Axial Flow* ou *Transverse Flow*), reduzindo a dimensão física do equipamento.

APLICAÇÕES EM SOLDAGEM

O laser CO_2 é conhecido por sua capacidade de soldar com **alta penetração e velocidade**.

- **Modo de Operação:** Pode trabalhar em **operação contínua (CW)** ou **pulsada**.
- **Capacidade:** Devido à sua alta potência e bom grau de rendimento (que pode variar de **5% a 20%**), é usado para soldar **chapas mais espessas**.
- Com um laser de alta potência, como um de 45 kW, é possível atingir penetrações de solda de até 38.0 mm em aço.



- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 1 - cátodo | 2 - ânodo |
| 3 - fonte de alimentação | 4 - tubo LASER |
| 5 - lente plana | 6 - lente côncava c/ furo |
| 7 - janela de Brewster | 7 - feixe LASER |

Figura 3

O laser a CO_2 trabalha em operação contínua ou pulsada. Devido à sua potência alta e do bom grau de rendimento, pode ser usado para soldar chapas mais espessas, no caso de aço, chega-se hoje até 38,0 mm com um laser de 45 KW, na Tabela abaixo descreve-se alguns tipos.

MODOS DE OPERAÇÃO

O Laser CO_2 oferece flexibilidade de uso por operar em dois modos principais:

- **Operação Contínua (CW - Continuous Wave):**
 - O feixe de laser é emitido de forma **ininterrupta** com potência constante.
 - É o modo ideal para processos que exigem **altas velocidades de soldagem** e a união de **chapas mais espessas** com alta penetração.
- **Operação Pulsada:**
 - A energia é liberada em **impulsos curtos e repetitivos**.
 - É usado para soldar materiais sensíveis ao calor ou para soldas de **ponto**, onde o controle preciso da energia (e, conseqüentemente, da ZAC) é fundamental.

ALTA POTÊNCIA E PENETRAÇÃO

O Laser CO_2 é classificado como um **Laser de Alta Potência**, o que se deve, em parte, ao seu **bom grau de rendimento** (eficiência), que converte uma porcentagem significativa da energia elétrica de entrada em luz laser de saída.

- **Capacidade Industrial:** Devido à sua alta potência, é o sistema de escolha para soldar **chapas mais espessas**.
- **Exemplo Extremo:** Com sistemas de laser CO_2 de altíssima potência, como o citado **45 kW**, é possível atingir penetrações de solda em aço de até **38,0 mm**. Esta é uma capacidade de penetração comparável a processos tradicionais, mas com a precisão e a estreiteza do feixe laser.

Tipo de Laser CO_2	Característica Principal	Potência Típica	Aplicações
Fluxo Lento (Slab)	Compacto, gás se move lentamente, menor potência.	Baixa a Média (até 1 kW)	Soldagem de precisão, corte de materiais finos.
Fluxo Rápido (Fast Axial Flow)	O gás é forçado axialmente em alta velocidade, excelente qualidade de feixe.	Média a Alta (até 10 kW)	Soldagem e corte de alta velocidade.
Fluxo Transversal (Transverse Flow)	O gás flui perpendicularmente ao eixo do ressonador, ideal para resfriamento de alta potência.	Alta (até 20 kW ou mais)	Soldagem pesada e corte de materiais espessos.

Tabela 6

LASER DE FIBRA (FIBER LASER)

O **laser de fibra** representa a geração mais recente e avançada de lasers de estado sólido, superando amplamente os lasers CO_2 e Nd: YAG em eficiência e qualidade de feixe. Seu sucesso reside no uso da **fibra óptica dopada** como o meio ativo, que é o coração do sistema.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO APRIMORADO

O laser de fibra transforma a energia elétrica em luz de alta precisão através de um processo extremamente eficiente:

1. **Fonte de Bombeamento:** O processo começa com a conversão de eletricidade em luz "**bruta**" por meio de **diodos semicondutores (diodos de bombeamento)**.
2. **Meio Ativo (Fibra Dopada):** Essa luz é injetada no **revestimento da fibra óptica** (fibra de vidro). O **núcleo da fibra** é dopado com elementos de terras raras, como **Itérbio (Yb)**, **Neodímio (Nd)**, ou **Érbio (Er)**.
3. **Geração e Amplificação:** O núcleo dopado absorve a luz dos diodos. Os elementos de terras raras possuem **altíssimos índices de aproveitamento de energia** (grande eficiência quântica), gerando e amplificando o feixe de laser por **emissão estimulada** enquanto a luz viaja pelo núcleo da fibra.
4. **Guia do Feixe:** A fibra óptica não apenas gera a luz, mas também atua como a **cavidade óptica** e o **sistema de entrega** do feixe. O feixe laser de alta potência e precisão é guiado pelo núcleo da fibra até o ponto de aplicação (cabeça de corte ou soldagem).



Figura 4

VANTAGENS CHAVE

A arquitetura do laser de fibra oferece benefícios que revolucionaram a soldagem e o corte industriais:

- **Qualidade de Feixe Superior:** O feixe de laser é **coerente** e tem uma **divergência extremamente baixa**, permitindo que seja focado em um ponto focal menor do que outros lasers. Isso se traduz em maior **densidade de potência**.
- **Alta Eficiência e Baixo Custo Operacional:** Os diodos de bombeamento e a natureza da fibra garantem uma **alta eficiência de conversão** (podendo ultrapassar 30%), reduzindo significativamente o consumo de energia e os custos operacionais em comparação com lasers CO_2 .
- **Design Compacto e Flexível:** A fibra óptica é flexível e robusta, tornando o sistema de laser **compacto** e fácil de integrar em robôs e sistemas automatizados, permitindo maior **operação mais segura** devido ao feixe estar contido na fibra.
- **Versatilidade de Comprimento de Onda:** A escolha de diferentes elementos de dopagem permite criar feixes com uma **ampla gama de comprimentos de onda**, otimizando a absorção em diversos materiais. Por exemplo, o Itérbio (o mais comum) emite em $1.064 \mu m$, ideal para metais.

CONSIDERAÇÃO IMPORTANTE

É crucial entender que, embora o gerador laser seja o mesmo, a **óptica terminal** (cabeça de trabalho) deve ser específica:

"Uma **cabeça de corte a laser padrão não pode ser usada para soldagem** e uma **cabeça de soldagem a laser não atende às velocidades e à qualidade de corte** exigidas na maioria das aplicações industriais."

Isso ocorre porque as lentes e o fluxo de gás de assistência são otimizados de maneira diferente para cada função (o corte requer alta precisão e gás de assistência para remover material, enquanto a soldagem requer foco e gás de proteção para evitar oxidação).

COMPRIMENTO DE ONDA E O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

O **Comprimento de Onda** (λ) é a distância espacial entre dois picos ou vales sucessivos de uma onda. No contexto da soldagem a laser e das tecnologias de laser, o comprimento de onda é crucial, pois determina como a luz (radiação eletromagnética) **interage** com o material, influenciando a absorção, a reflexão e, conseqüentemente, a eficácia do processo.

A luz emitida por qualquer fonte, incluindo lasers, faz parte do **Espectro Eletromagnético**, que é a gama completa de todas as frequências e comprimentos de onda possíveis.

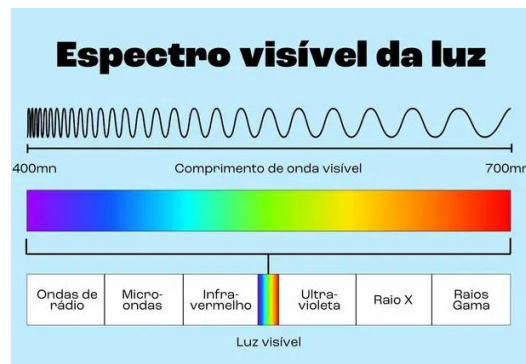


Figura 5

O espectro está dividido por faixas, da menor frequência (maior comprimento de onda) para a maior frequência (menor comprimento de onda):

Faixa de Radiação	Comprimento de Onda (λ)	Frequência (f)	Característica Principal
Onda de Rádio	Mais de 1 m	Baixa (até 300 MHz)	Não ionizante. Transmite informação.
Micro-ondas	1 m a 1 mm	300 MHz a 300 GHz	Aquecimento (fornos) e comunicação (radares).
Infravermelho	1 mm a 700 nm	300 GHz a 430 THz	Radiação térmica (calor). Invisível ao olho.
Luz Visível	400 nm a 700 nm	430 THz a 750 THz	A única faixa perceptível pelo olho humano.
Ultravioleta (UV)	400 nm a 10 nm	Maior que 750 THz	Maior energia, pode quebrar ligações químicas.
Raios X	10 nm a 0.01 nm	3×10^{16} Hz a 3×10^{19} Hz	Altamente energéticos. Usados em imagem médica.
Raios Gama	Menos de 0.01 nm	Mais de 3×10^{19} Hz	Radiação de mais alta energia. Ionizante.

Tabela 7

ONDA DE RÁDIO:

Uma onda não visível ao olho nu, ela transmite informações em um curta e de media distancias e não afetam a visão, são uma forma de radiação eletromagnética não ionizante, o que significa que têm baixa frequência e energia insuficiente para causar danos às células do corpo humano, incluindo as dos olhos.

MICRO ONDAS:

Em um forno de micro-ondas, um dispositivo chamado magnétron gera essas ondas, que são refletidas pelas paredes metálicas do forno e cozinham os alimentos ao fazer as moléculas de água vibrar e gerar calor ("As micro-ondas são ondas eletromagnéticas cujos comprimentos de onda estendem-se entre 1 m e 1 mm ou 300 GHz e 300 MHz")

ONDAS INFRATERMELHO

O infravermelho é uma onda eletromagnética de frequência menor que a luz visível (300 GHz a 430 THz) e, portanto, invisível ao olho humano. A maior parte da radiação térmica emitida pelos corpos que se encontram em temperatura ambiente é radiação infravermelha. Por tratar-se de uma faixa de frequências muito grande, com diversas aplicações tecnológicas, o infravermelho é subdividido em regiões menores: infravermelho próximo, médio e longínquo."

LUZ VISÍVEL

O intervalo do espectro eletromagnético que pode ser visto pelo olho humano é conhecido como luz visível, cujo comprimento de onda estende-se entre 400 nm e 700 nm, portanto, todas as imagens que vemos tratam-se da interpretação que o cérebro produz das ondas eletromagnéticas que forem emitidas ou refletidas pelos corpos ao redor de nós. O olho humano é capaz de perceber essas frequências de luz graças a dois tipos especiais de células que revestem o fundo do olho: os cones e os bastonetes.

Os cones e os bastonetes são células fotorreceptoras, isto é, são capazes de perceber sinais luminosos. Enquanto os bastonetes são responsáveis pela percepção de movimento e pela formação de imagens em preto e branco (como quando tentamos enxergar no escuro), os cones nos proporcionam a visão em cores. Existem três tipos de cones no olho humano e cada um deles é capaz de perceber uma das seguintes cores: vermelho, verde ou azul.

Para a Física, portanto, as cores que enxergamos não passam de fenômenos fisiológicos que dependem da captação de luz e da sua interpretação pelo cérebro. Além disso, a proporção entre cada uma das frequências de vermelho, verde e azul é capaz de produzir todos os tons que conhecemos. Quando emitidas juntas, essas três cores produzem a luz branca, que não se trata de uma cor, mas de uma superposição das frequências visíveis.

ULTRAVIOLETA

A radiação ultravioleta corresponde ao conjunto de frequência de ondas eletromagnéticas que são maiores que as frequências da luz visível e menores que as frequências dos raios-X. Esse tipo de radiação tem três subdivisões que não são exatas: ultravioleta próximo (380 nm a 200 nm), ultravioleta distante (200nm a 10 nm) e ultravioleta extremo (1 a 31 nm).

Os raios ultravioletas também podem ser subdivididos em raios UV-A (320-400 nm), UV-B (280-320 nm) e UV-C (1-280 nm). Tal classificação diz respeito às

formas de interação dessas frequências de ultravioleta com os organismos vivos e com o meio ambiente.

Apesar de todas serem produzidas pelo Sol, 99% da radiação ultravioleta que chega à superfície da Terra é do tipo UV-A, a radiação UV-B, no entanto, apesar de menos presente, é a principal responsável pelos danos causados à pele humana, como queimaduras e danos às moléculas de DNA das células epiteliais.

O UV-C, por sua vez, é o ultravioleta de maior frequência, capaz de destruir micro-organismos e esterilizar objetos. Toda a radiação UV-C produzida pelo Sol é absorvida pela atmosfera terrestre."

RAIOS X

Os raios X são uma forma de radiação eletromagnética de frequência mais alta que o ultravioleta, no entanto, sua frequência é inferior à frequência característica dos raios gama. Os raios X estendem-se pelo espectro eletromagnético entre as frequências de 3.10^{16} Hz e 3.10^{19} Hz, que correspondem a comprimentos de onda muito pequenos, entre 0,01 nm e 10 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)."

RAIOS GAMA

Os raios gama são uma forma de radiação eletromagnética de alta frequência (entre 10^{19} Hz e 10^{24} Hz), geralmente, produzidos pelo decaimento nuclear de elementos radioativos, pela aniquilação entre pares de partículas e antipartículas, ou ainda em fenômenos astronômicos de grandes proporções, como no surgimento de novas e supernovas, colisões de estrelas e erupções solares.

A radiação gama transporta uma enorme quantidade de energia, sendo capaz de atravessar obstáculos como paredes de concreto com relativa facilidade. Além disso, é uma radiação altamente ionizante, capaz de causar danos irreversíveis a diversos tecidos. Apesar de seus perigos, a radiação gama é largamente usada na medicina nuclear, para o tratamento do câncer e também em cirurgias complexas, como na remoção de tumores intracranianos."

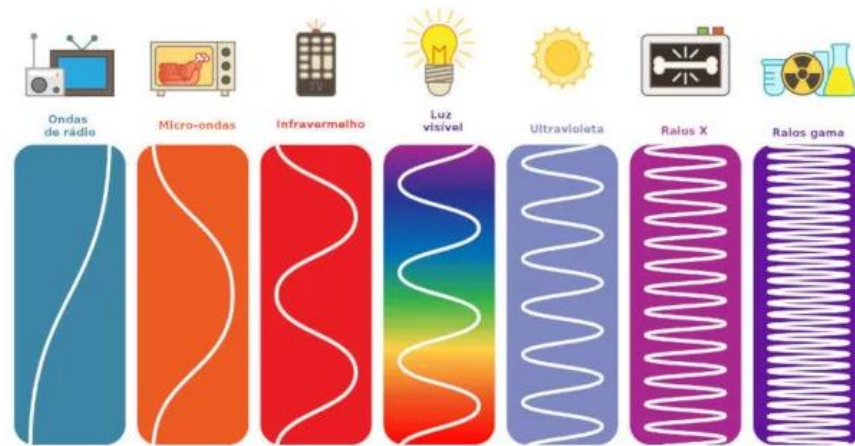


Figura 6

O comprimento de onda popular em lasers de fibra IPG é de 532 nm. Esta é uma luz laser verde, que é basicamente o segundo harmônico do laser de 1064 nm. O comprimento de onda de 532 nm é frequentemente usado em aplicações, onde é necessária uma taxa de absorção mais alta em alguns materiais em comparação com o comprimento de onda de 1064 nm. Por exemplo, é ótimo para marcar alguns plásticos e semicondutores. A luz verde pode ser mais facilmente absorvida por esses materiais, resultando em marcas claras e precisas. Existem também lasers de fibra IPG com comprimentos de onda na faixa ultravioleta (UV), geralmente em torno de 355 nm. Os lasers UV são usados para tarefas de processamento muito finas e delicadas. Eles têm uma alta energia de fóton, o que lhes permite quebrar ligações químicas em materiais sem causar danos excessivos ao calor.

INFRAVERMELHO

O infravermelho é o **calor** que irradia dos corpos em temperatura ambiente. É subdividido em:

- **Próximo (NIR):** Mais usado em lasers industriais (1064 nm do Nd: YAG e Laser de Fibra).
- **Médio (MIR) / Longínquo (FIR):** Inclui o laser CO_2 (10.6 μm ou 10600 nm).

LUZ VISÍVEL (400 NM A 700 NM)

É a porção do espectro que o olho humano consegue processar.

- **Cores:** A percepção das cores resulta da interpretação cerebral das diferentes frequências (comprimentos de onda) de luz captadas pelos **cones** (visão colorida) e **bastonetes** (movimento/preto e branco) no fundo do olho.
- **Luz Branca:** É a superposição de todas as frequências visíveis.

ULTRAVIOLETA (UV)

Possui energia suficiente para ser **ionizante** em suas faixas mais curtas (UV-C).

- **UV-A (320 nm a 400 nm):** Maior parte da radiação UV que atinge a Terra.
- **UV-B (280 nm a 320 nm):** Principal responsável por danos à pele (queimaduras, danos ao DNA).
- **UV-C (1 nm a 280 nm):** Absorvido pela atmosfera. Usado em esterilização por sua capacidade de destruir microrganismos.

Laser	Comprimento de Onda (λ)	Faixa do Espectro	Aplicação Típica
Laser de Fibra (Fundamental)	1064 nm	Infravermelho Próximo	Soldagem e corte de metais.
Laser CO_2	10600 nm (10.6 μ m)	Infravermelho Longínquo	Corte e soldagem de não-metals e metais espessos.
Laser de Fibra (Segundo Harmônico)	532 nm (Luz Verde)	Luz Visível	Marcação de semicondutores e plásticos, onde se necessita de maior absorção do que 1064 nm.
Laser de Fibra (Terceiro Harmônico)	355 nm (UV)	Ultravioleta	Processamento muito fino e delicado (<i>cold processing</i> - processamento a frio). A alta energia do fóton quebra ligações químicas (ablação) com dano térmico mínimo .

Tabela 8

PERIGOS E RISCOS NA SOLDAGEM A LASER

A soldagem a laser é um processo de alta eficiência, mas a intensa energia do feixe e outros fatores operacionais geram **riscos significativos** que exigem rigorosas medidas de segurança.

Os principais perigos estão relacionados à radiação laser primária e aos subprodutos do processo de soldagem:

RADIAÇÃO LASER PRIMÁRIA (RISCO ÓPTICO)

Este é o perigo mais crítico e imediato, pois o feixe de laser é altamente concentrado e pode causar danos em milissegundos.

- **Danos aos Olhos:** A radiação laser é perigosa porque pode ser focada pelo cristalino diretamente na retina, causando **lesões irreversíveis** e até **cegueira permanente**.
- Lasers na faixa do **Infravermelho Próximo** (como o de Fibra e Nd: YAG - 1064 nm) são particularmente perigosos porque são **invisíveis** e penetram o olho, sendo focados na retina.
- Lasers CO_2 (10.6 μm) são absorvidos pela córnea, causando **queimaduras** nessa região, mas também são perigosos.
- **Danos à Pele:** O feixe de laser pode causar **queimaduras graves** na pele exposta devido à sua alta densidade de potência.

RISCOS ELÉTRICOS E DE INCÊNDIO

Equipamentos a laser de alta potência operam com voltagens e correntes elevadas.

- **Choque Elétrico:** O sistema de bombeamento e a fonte de alimentação representam um risco de **choque elétrico fatal**.
- **Incêndio:** A alta energia concentrada do feixe pode iniciar incêndios se atingir materiais inflamáveis próximos à área de trabalho.

RISCOS POR SUBPRODUTOS DA SOLDAGEM

A interação do laser com o material base e os revestimentos produz subprodutos tóxicos ou perigosos.

- **Fumos e Gases Tóxicos:** A vaporização do material gera **fumos** (partículas finas) e gases que podem ser tóxicos, especialmente ao soldar materiais revestidos (ex: zinco, cromo) ou ligas que contêm elementos como berílio, cádmio ou chumbo.
- **Emissão de Raio X:** Lasers de **altíssima potência** (geralmente acima de 15 kW) podem gerar **Raios X secundários** quando o feixe atinge o material.
- **Ruído:** A criação do *keyhole* e os processos de vaporização podem gerar **níveis de ruído** prejudiciais.
- **Respingos e Partículas:** O processo de soldagem de alta intensidade gera **respingos** de metal fundido que podem voar e causar queimaduras ou danos aos componentes ópticos do equipamento.

MEDIDAS DE CONTROLE E SEGURANÇA

A minimização desses riscos exige a implementação de um rigoroso plano de segurança, conforme normas internacionais (como ANSI Z136.1):

- **Contenção do Feixe:** O feixe de laser deve ser **totalmente contido** por meio de **células de trabalho fechadas** e **barreiras de proteção** (enclausuramento).
- **EPIs Adequados:** Uso obrigatório de **óculos de segurança** com a **densidade óptica (OD)** e o **comprimento de onda** corretos para bloquear o feixe específico do laser em uso.
- **Ventilação e Exaustão:** Sistemas de **exaustão localizados** e eficazes são essenciais para remover fumos e gases tóxicos da zona de trabalho.
- **Interlocks de Segurança:** Mecanismos que desligam o laser imediatamente se a porta de segurança for aberta ou se houver falha no sistema de contenção.

PROTEÇÃO INDIVIDUAL (EPIs) NA SOLDAGEM A LASER

O uso de Equipamentos de Proteção Individual (**EPIs**) é fundamental na soldagem a laser devido aos riscos únicos apresentados pelo feixe de alta energia (radiação primária e secundária) e pelos subprodutos do processo.

É importante notar que a **Célula de Solda** é um **EPC (Equipamento de Proteção Coletiva)**, não um EPI. A célula de solda, ou enclausuramento, é a primeira e mais importante barreira de segurança.

PROTEÇÃO OCULAR: ÓCULOS DE PROTEÇÃO ESPECÍFICOS

A proteção dos olhos é a prioridade máxima. Os óculos de proteção para laser não são genéricos, mas sim projetados para bloquear comprimentos de onda específicos e proteger contra a potência do laser.

- **Necessidade:** O feixe de laser, mesmo refletido, pode causar **danos irreversíveis** à **retina** e/ou **córnea** em milissegundos. Lasers invisíveis (como os de Fibra ou CO_2) são particularmente perigosos, pois o dano ocorre sem aviso.
- **Seleção:** Os óculos devem ser **dimensionados com base na onda emitida** pelo equipamento. É obrigatório consultar o manual do equipamento para determinar:
 - **Comprimento de Onda (Filter Range):** O espectro de luz que o laser emite (CO_2 em 10600 nm, Fibra em 1064 nm, rubi em 694 nm, etc.).
 - **Densidade Óptica (OD - Optical Density):** A capacidade da lente de atenuar o feixe a um nível seguro, especificada para o comprimento de onda do laser.
- **Faixas de Luz Relevantes:** Os lasers industriais frequentemente operam nas faixas de **Infravermelho (IF)** e **ultravioleta (UV)**.



Figura 7

PROTEÇÃO CORPORAL

Embora o laser não cause **queimadura por calor** da mesma forma que um arco elétrico, o feixe concentrado pode causar queimaduras diretas ou indiretas (respingos de metal).

- **Roupas Específicas:** É recomendado o uso de **roupas de tecido antichama** (como 100% algodão pesado, aramida ou fibra cerâmica) para cobrir toda a pele.
- **Finalidade:** Proteger contra **respingos** de metal fundido gerados pela soldagem e **reflexões secundárias** do feixe de laser (que podem causar danos à pele).
- **Luvas e Aventais:**
- **Luvas de Raspa** ou materiais resistentes ao calor devem ser usadas para proteger as mãos e antebraços contra **respingos de metal quente** e calor de contato com a peça soldada.
- **Aventais** oferecem proteção diferenciada ao tronco.

EPC: CÉLULA DE SOLDA (ENCLAUSURAMENTO)

A **Célula de Solda** ou **Enclausuramento** não é um EPI, mas o equipamento de segurança mais crítico:

- É uma **barreira física** que circunda o processo de soldagem para **conter todo o feixe de laser**.
- É construída com materiais que absorvem ou refletem a radiação laser de forma segura e geralmente incorpora **mecanismos de intertravamento (interlocks)** que desligam o laser se as portas forem abertas durante a operação.
- As paredes devem ser não reflexivas para evitar maior propagação de ondas.



Figura 8

CONCLUSÃO E PRECAUÇÕES

Dada a crescente popularização da solda a laser, é vital ter em mente que:

- A seleção de EPIs deve ser **cientificamente baseada** no comprimento de onda e potência do laser (não na cor da roupa).
- A **proteção coletiva** (célula de solda) deve estar sempre funcional.
- A segurança na soldagem a laser vai além da proteção contra o calor, focando na proteção contra a **radiação eletromagnética** do feixe.

AMBIENTE

O ambiente ao ser realizado a solda deve estar bem restrito, ou seja, ou seja, deve ser apropriado para executar a solda. Para ter um ambiente propício a solda a laser deve se ter: uma célula de soldagem ou uma sala onde somente esteja o soldador (caso tenha mais de uma pessoa na sala ambas devem estar com óculos de solda a laser), as paredes devem estar com tinta não reflexiva, o teto deve estar no mínimo a 5 metro de onde for executado a solda, ter um exaustor de fumos caso seja solda de materiais não ferrosos e ou ligas nobres e **Áreas de trabalho sinalizadas** (loais onde o laser é usado devem ter avisos de perigo claros).

CONTENÇÃO E RESTRIÇÃO DE ACESSO

A restrição é a primeira linha de defesa contra os perigos do laser.

- **Célula de Soldagem (Enclausuramento):** É o método mais seguro e preferencial em ambientes industriais. A célula é uma **cabine fechada** que confina o processo, impedindo que o feixe de laser escape.
 - Este sistema permite que o operador trabalhe fora da área de risco direto e geralmente classifica o sistema como **Laser de Classe 1** (seguro sob todas as condições razoáveis de operação).
- **Sala Restrita (Área Controlada de Laser):** Se a soldagem não puder ser totalmente enclausurada, a sala inteira se torna a área controlada.
 - Acesso restrito: **Somente o soldador** (ou pessoal treinado e autorizado) pode estar na sala.

- **Uso de EPIs:** Qualquer pessoa dentro da área controlada, incluindo visitantes, **deve usar óculos de proteção** apropriados para o comprimento de onda do laser em operação.

CONTROLES DE INFRAESTRUTURA

O projeto da sala deve minimizar a reflexão e dispersão da luz laser.

- **Paredes e Teto:** As paredes devem ser pintadas com **tinta não reflexiva** para absorver o máximo de radiação dispersa possível e evitar reflexões secundárias perigosas.
- **Altura do Teto:** A menção à altura mínima do teto (cerca de 5 metros) visa garantir que o feixe refletido, no caso de um laser de alto poder, não retorne ao nível dos olhos com energia perigosa.

GERENCIAMENTO DE SUBPRODUTOS E SINALIZAÇÃO

Além da radiação, o ambiente deve gerenciar os subprodutos tóxicos e informar sobre o risco.

- **Exaustão de Fumos:** É obrigatório o uso de **exaustor de fumos** (ventilação local exaustor) para remover **fumos e gases tóxicos** gerados durante o processo.
- Isto é vital ao soldar **materiais não ferrosos** (como alumínio e cobre) ou ligas nobres, que podem liberar partículas perigosas no ar quando vaporizadas.
- **Sinalização de Perigo:** A área de trabalho deve ser **claramente sinalizada** com placas de advertência de "**Perigo Laser**" (identificando a classe do laser) nas entradas, portas e ao redor da célula de soldagem. Esta sinalização deve estar acesa durante a operação do laser.

COLORIMETRIA

Cada laser emite uma faixa de cor e essa cor consegue se propagar mais ou menos no ambiente ela reage mais ou menos com o ambiente a sua volta (**colorimetria em laser** refere-se ao estudo da interação da luz laser com diferentes cores e pigmentos)

PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

O funcionamento baseia-se na absorção seletiva da energia do laser pelo pigmento (cromóforo):

- **Absorção Seletiva:** Cada cor absorve melhor um comprimento de onda (cor) de luz específico. O laser emite luz monocromática (de um único comprimento de onda) e coerente, permitindo que a energia seja direcionada para um pigmento específico, minimizando danos aos tecidos ou materiais circundantes.
- **Contraste e Aquecimento:** Na gravação a laser, o material é intensamente aquecido pelo raio, alterando sua cor e criando contraste. O nível de aquecimento e o tempo de exposição determinam a cor final, especialmente em metais como o aço inox.

Diagrama Concetual: Absorção vs. Potência na Solda a Laser de Fibra

Tipo de Material / Cor Visível	Absorção Relativa ad Laser Infravermelho (~1070 nm)	Potência Relativa Necessária para Soldar	Comportamento Chave
 Plásticos Escuros / Pretos	Muito Alta (~90% ou mais)	Muito Baixa	Absorve quase toda a energia; soldagem rápida.
 Aços (Inox, Carbono)	Alta a Moderada (~35-40% inicial)	Baixa a Moderada	Muito Baixa
 Plásticos Claros / Transparente	Muito Baixa (Transmissão >80%)	Absorção eficiente; aumenta muito após o "Keyhole."	Inviável / Muito Alta não funde superfície.
 Metais Altamente Refletivos (Cobre, Alumínio)	Muito Baixa (~4% inicial)	Muito Alta (~4% inicial)	Maior parte refletida; exige alta potência ou laser azul/verde.

Princípio Fundamental

$$P < \frac{1}{A} A$$

Alta Absorção → Baixa Potência
Baixa Potência → Alta Potência

Figura 9

Onde:

- P é a potência do laser (controlada pelo operador).
- A é a absorção do material ao comprimento de onda do laser (propriedade intrínseca do material/cor).

- Um material escuro (alta absorção, alto A) aquecerá muito mais rapidamente do que um material claro (baixa absorção, baixo A) sob a mesma potência.

MATERIAL DE ADIÇÃO

O material de adição é o mesmo utilizado no processo GMAW. Exemplo: Se você for trabalhar com uma liga de aço inox utilizasse o arame de aço inox. O diâmetro dos arames é recomendado de 0.8 a 2.0.

CONSUMÍVEIS

Os consumíveis essenciais para a soldagem a laser são componentes que se desgastam ou são utilizados no processo e precisam ser substituídos regularmente para manter a qualidade e a eficiência da solda.

- Lentes
- Gás (Argônio, nitrogênio ou oxigênio)
- Material de adição

ÓPTICA DE FOCAGEM (LENTE)

As lentes são o componente óptico mais crítico na **cabeça de soldagem** e são consideradas consumíveis devido ao desgaste e contaminação.

- **Função:** O sistema óptico final (que pode incluir múltiplas lentes, como L1, L2, ...) tem a função de receber o feixe de laser colimado (paralelo) e **focá-lo em um ponto minúsculo** na peça de trabalho, garantindo a alta densidade de potência necessária para a soldagem.
- **Desgaste:** As lentes podem ser danificadas por:
 - **Contaminação:** Poeira, fumos metálicos e respingos de solda.
 - **Dano Térmico:** Absorção de energia laser (especialmente se estiverem sujas), causando superaquecimento e fissuras.
- **Substituição:** A limpeza e a substituição periódica das lentes são vitais para preservar a **qualidade do feixe** e evitar a perda de potência.

GÁS DE PROTEÇÃO (GÁS DE ASSISTÊNCIA)

O uso de um gás de proteção é fundamental na maioria das aplicações para proteger tanto o material fundido quanto a óptica do laser.

MATERIAL DE ADIÇÃO

O material de adição, ou arame de solda, é necessário quando a soldagem não é **autógena** (fusão apenas do material base).

TOCHA

A **Tocha** é o componente terminal, responsável por receber o feixe de alta potência da fibra óptica e, através de um complexo sistema óptico, **focá-lo com precisão** na peça de trabalho.

ESTRUTURA E RESFRIAMENTO

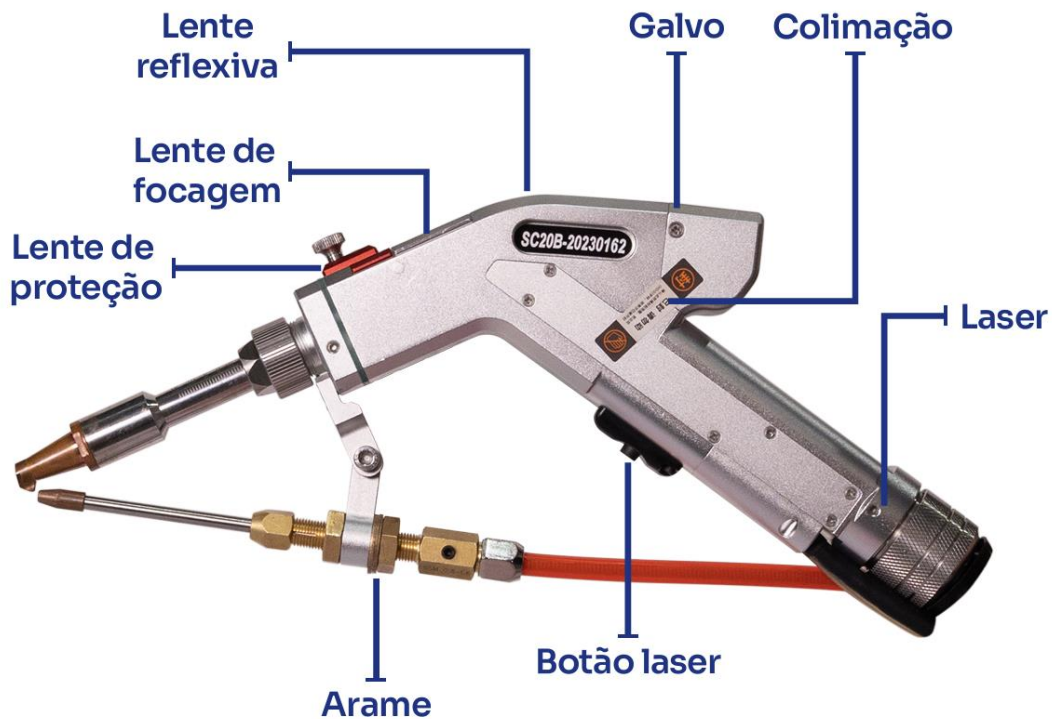


Figura 10

- **Material:** A tocha é frequentemente construída em **alumínio** por ser um material leve e com boa dissipação térmica.

- **Resfriamento:** Devido à altíssima densidade de energia, a tocha deve ser **ativamente refrigerada**. O resfriamento é realizado por:
 - **Água Desmineralizada:** Circula através de um **chiller** (resfriador) para remover o calor das lentes e do corpo da tocha.
 - **Gás Inerte de Proteção:** O fluxo de gás (Argônio, Nitrogênio, etc.) também ajuda a refrigerar as lentes e a proteger a poça de fusão.
- **Óptica Interna:** A tocha pode conter de **4 a 6 lentes** (ou mais) que trabalham em conjunto para colimar, focar e proteger o feixe.

A tocha tem uma regulagem em seu pescoço essa regulagem pode ser usada para cada material sendo aço carbono um pescoço mais longo e para ligas nobres um pescoço mais curto.

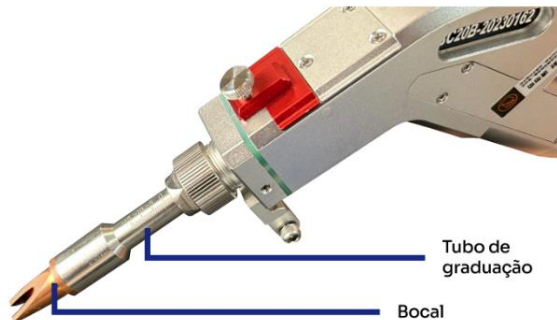


Figura 10

- **Aço Carbono:** Requer tipicamente um **pescoço mais longo** (maior distância de trabalho) para acomodar o processo de soldagem, que pode envolver mais respingos.
- **Ligas Nobres (Inox, Titânio):** Utiliza um **pescoço mais curto** (distância menor) para garantir maior precisão e uma proteção gasosa mais eficaz e concentrada, minimizando a oxidação da poça de fusão.

COMPONENTES CONSUMÍVEIS DA ÓPTICA

Os componentes ópticos devem ser manuseados com extremo cuidado e são os principais consumíveis da tocha.

LENTE DE PROTEÇÃO (TAMPA PROTETORA)

- **Função:** É a primeira linha de defesa, atuando como um "fusível" óptico. Ela protege as lentes internas mais caras (focagem e reflexiva) contra contaminação por **fumos, respingos de metal e retro reflexão** da onda emitida pela solda.

1. Vedação da mola
2. Parafuso de bloqueio
3. Lente de proteção (qualquer lado)
4. Anel de pressão da lente

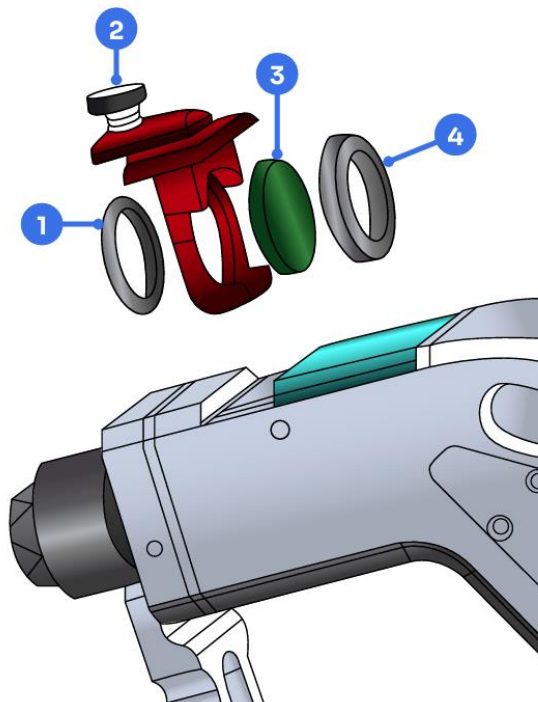


Figura 11

Procedimento de Troca (Exemplo):

1. Girar e remover o **parafuso (ou anel de retenção) (Número 2)**.
 2. Retirar o **conjunto** da tocha com delicadeza.
 3. **Rosquear o protetor (Número 4)** para liberar a lente.
- **Manutenção:** É a lente mais frequentemente substituída e pode ser limpa com **álcool isopropílico** se for constatado que está em bom estado (sem arranhões ou danos por calor).

Nota de Manutenção: Sempre use luvas ao manusear lentes. A gordura e a sujeira das mãos absorvem a energia do laser e podem causar **danos permanentes** ou **queima rápida** da lente, afetando drasticamente a qualidade do feixe e a eficiência da soldagem.

LENTE DE FOCAGEM

Lente de focagem lente que atuam como o foco do feixe potencializando ou não o laser. percebe que essa parte tem duas lentes uma atua como uma segunda proteção e a outra como a lente de foco em si. Para efetuar a troca deve-se desparafusar essa parte e tirar essa parte do dispositivo, os demais sistemas para a troca da lente são semelhantes ao anterior.

- **Função:** É a lente mais importante para o desempenho da soldagem, pois **foca o feixe** em um ponto minúsculo. A potência e a densidade de energia do laser são diretamente determinadas por sua integridade.
- **Sistema de Duas Lentes:** Muitas vezes, essa seção possui duas lentes: uma que atua como **segunda proteção** e a outra como a **lente de foco em si**.
- **Troca:** Semelhante à lente de proteção, requer o **desparafusar a** seção correspondente para remover o conjunto óptico.

Nota de Manutenção: Sempre use luvas ao manusear lentes. A gordura e a sujeira das mãos absorvem a energia do laser e podem causar **danos permanentes** ou **queima rápida** da lente, afetando drasticamente a qualidade do feixe e a eficiência da soldagem.

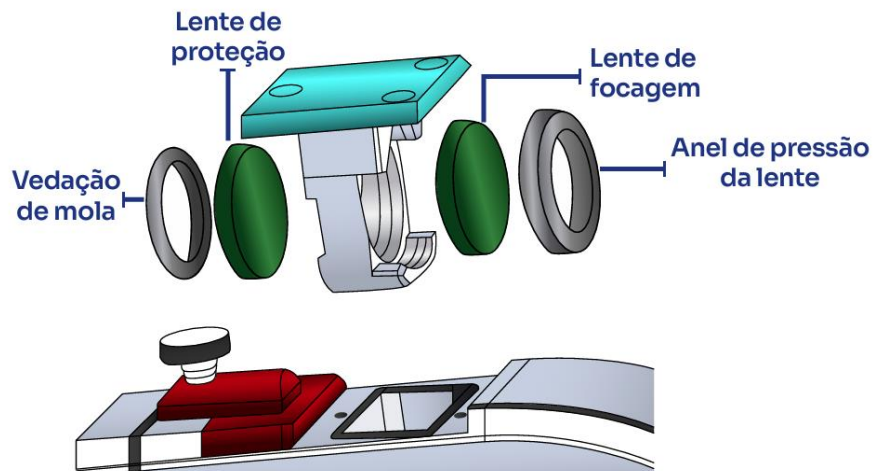


Figura 12

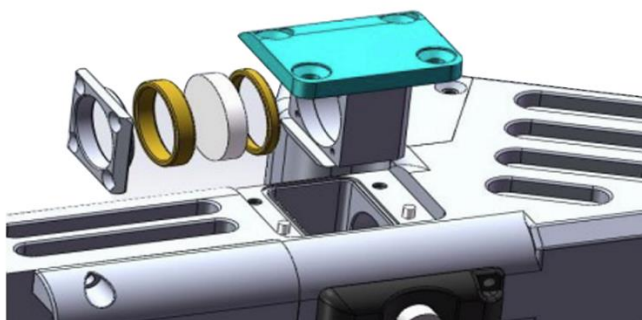


Figura 13

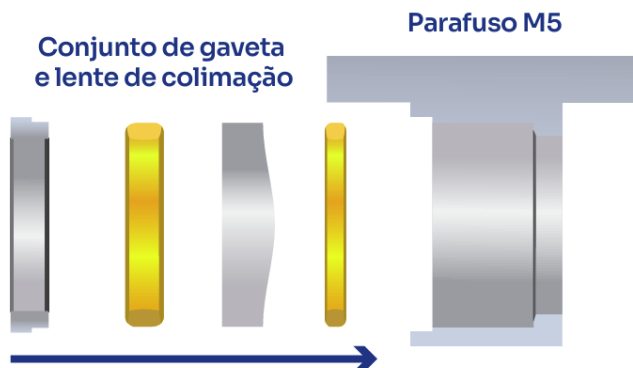


Figura 14

LENTE REFLEXIVA (OU COLIMADORA)

Lente que atua extraído o faixe da fibra ótica e direcionando para si. Sendo uma lente convexa e pouco se degrada ao ser conservada as demais lentes. O que faz ela ter uma troca baixa, somente por mau uso ou periódica pelo tempo em si.

- **Função:** Geralmente uma **lente convexa** (ou conjunto de lentes), ela tem duas funções principais:
 - **Extraír/Colimar:** Recebe a luz da fibra ótica e a transforma em um feixe paralelo.
 - **Direcionamento:** Direciona o feixe amplificado para o sistema de focagem.
- **Durabilidade:** Por estar mais protegida dentro da tocha e longe da zona de respingos, ela **se degrada menos** e sua troca é menos frequente, sendo geralmente feita apenas por mau uso (danos internos) ou por manutenção periódica.

Nota de Manutenção: Sempre use luvas ao manusear lentes. A gordura e a sujeira das mãos absorvem a energia do laser e podem causar **danos permanentes** ou **queima rápida** da lente, afetando drasticamente a qualidade do feixe e a eficiência da soldagem.

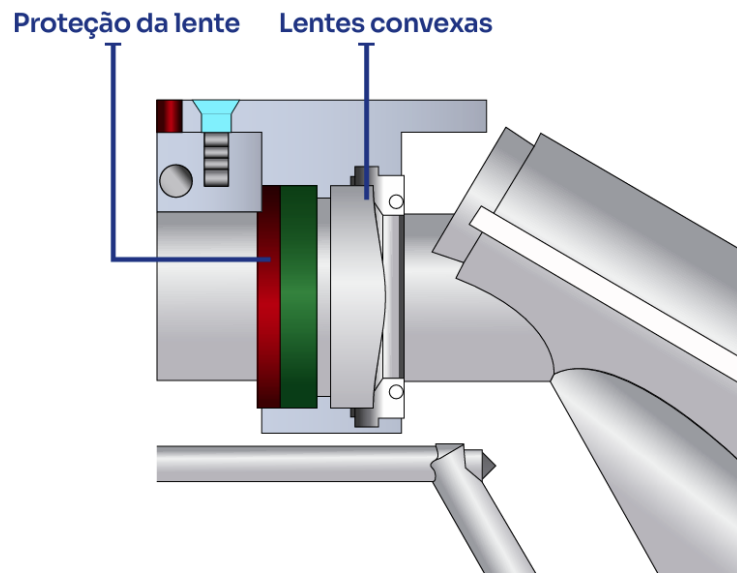


Figura 15

QUANDO FAZER A TROCA DAS LENTES:

O prazo para a troca das lentes consumíveis em uma tocha de soldagem a laser, como as utilizadas em sistemas de fibra, não é fixo, mas sim uma **estimativa baseada na intensidade de uso e na limpeza do ambiente.**

Componente Óptico	Prazo Médio (Estimativa)	Fator de Risco Principal
Lente de Proteção	14 a 21 dias	Exposição direta a fumos e respingos de solda.
Lente de Focagem Principal	Média de 6 meses	Contaminação lenta e danos por calor devido ao feixe concentrado.
Lente Colimadora (Reflexiva/Convexa)	Baixa Frequência (Por Mau Uso ou Periódica)	Geralmente protegida; a degradação ocorre por mau uso, falha de resfriamento ou manutenção periódica.

Tabela 9

Nota: Esses prazos são apenas guias. Uma produção 24/7 em um ambiente sujo exigirá trocas muito mais frequentes do que um uso esporádico em um laboratório limpo.

O PRINCIPAL INDICADOR DE PROBLEMA

O método mais confiável para constatar a necessidade de troca ou limpeza de uma lente é o **monitoramento da temperatura e da potência do feixe.**

Quando o equipamento está "**se elevando rapidamente**" (ou seja, quando a temperatura de um componente óptico, como a lente de proteção ou o colimador, sobe rapidamente), isso indica que uma lente está absorvendo energia em vez de transmiti-la.

O QUE ACONTECE:

1. **Contaminação:** Poeira, óleo (gordura das mãos) ou respingos aderem à superfície da lente.
2. **Absorção:** A sujeira absorve a energia laser que deveria passar através dela.

3. **Superaquecimento:** A lente absorve energia, aquece rapidamente e pode rachar ou queimar o revestimento antirreflexo, degradando permanentemente a qualidade do feixe.
4. **Alerta do Sistema:** Sensores de temperatura na tocha (sensores de **falha de lente**) detectam o aumento de temperatura e alertam o operador para a necessidade de interrupção imediata da produção.

PROBLEMAS DA LENTE:



Figura 16: Lente queimada

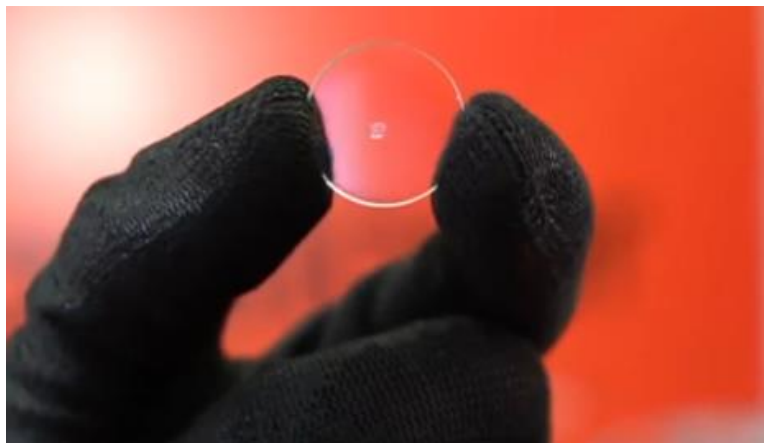


Figura 17: Lente com buraco

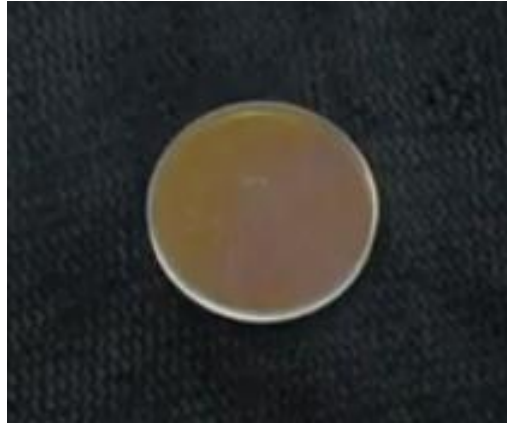


Figura 18: Lente se torna opaca

Problema	Descrição e Causa	Consequência no Processo
Lente Queimada	Ocorre quando contaminantes (poeira, óleo) ou respingos de metal na superfície da lente absorvem a energia do laser. O superaquecimento resultante causa manchas escuras ou carbonização .	Perda de Potência do feixe na peça e superaquecimento na tocha, podendo levar a rachaduras na lente ou danos às lentes internas.
Lente com Buraco	Um defeito grave, geralmente causado por um respingo de metal fundido de alta energia que atingiu a superfície da lente ou por um dano pontual severo por calor (má absorção do feixe).	Distorção Crítica do Feixe , focalização incorreta e risco de danos em cascata (a luz dispersa danifica outros componentes ópticos).
Lente Opaca	Ocorre devido ao acúmulo de fumos metálicos e contaminantes no revestimento da lente (o que reduz a transparência) ou por desgaste químico.	Absorção e Dispersão da luz, resultando em perda de potência na peça e soldas de baixa qualidade.

Tabela 10

É fundamental seguir um protocolo rigoroso ao manusear a óptica para maximizar sua vida útil:

- **Luvas:** Sempre use luvas ao manusear as lentes (ou qualquer componente óptico). A gordura das mãos pode deixar resíduos que causam absorção de laser e danos por calor.
- **Limpeza:** Se a lente estiver apenas suja, ela pode ser limpa com **álcool isopropílico** de grau óptico e lenços especiais (nunca use papel ou panos comuns, que podem arranhar a superfície).
- **Inspeção:** Inspeccione visualmente as lentes com cuidado (geralmente sob luz brilhante) em busca de arranhões, furos ou manchas de queimadura antes de decidir se a limpeza é suficiente ou se a troca é obrigatória.

FUNÇÕES MÚLTIPLAS DAS LENTES

É comum que o mesmo equipamento laser de alta potência possa ser usado para diferentes processos, exigindo a troca da cabeça de focagem ou da lente:

- **Lentes para Soldagem:** Projetadas para focar o feixe em um ponto pequeno e denso para criar o *keyhole* e a solda.
- **Lentes para "Limpeza" (Remoção de Camada):** Algumas lentes ou cabeças ópticas são projetadas para **desfocar** o feixe ligeiramente ou usar **padrões de varredura** de laser (como lasers de *scanner*) para realizar a **limpeza a laser** (remoção de tinta, ferrugem ou camadas de superfície).

ORIENTAÇÃO CORRETA DE INSTALAÇÃO (POLARIDADE DALENTE)

A orientação correta das lentes de focagem e colimadoras é crucial para a qualidade do feixe. A **lente de proteção** é geralmente **simétrica** e **não tem lado**, mas as lentes internas são **assimétricas** (plano-convexa ou menisco) e devem ser instaladas corretamente.

LENTE DE FOCAGEM (FOCUS LENS)

A lente de focagem recebe o feixe **colimado** (paralelo) e o concentra.

- **Instalação Correta:** A parte **convexa** (curva) deve estar voltada para o **operador/mangueira** (lado de entrada do feixe), e a parte **reta** (plana) ou de menor curvatura deve estar voltada para o **bocal de solda** (lado de saída).
- **Razão:** Essa orientação minimiza as aberrações esféricas, garantindo a melhor qualidade e foco do feixe.

LENTE COLIMADORA (COLLIMATOR LENS)

A lente colimadora recebe a luz da fibra (que é divergente) e a transforma em um feixe **colimado** (paralelo).

- **Instalação Correta:** A parte **plana** (ou de menor curvatura) deve estar voltada para a **mangueira** (lado de entrada do feixe/fibra), e a parte **convexa** (curva) deve estar voltada para o **bocal de solda** (lado de saída/direção da lente de foco).
 - *Razão:* O objetivo é maximizar a eficiência e a qualidade do feixe antes que ele chegue à lente de focagem.

ALINHAMENTO DO LASER

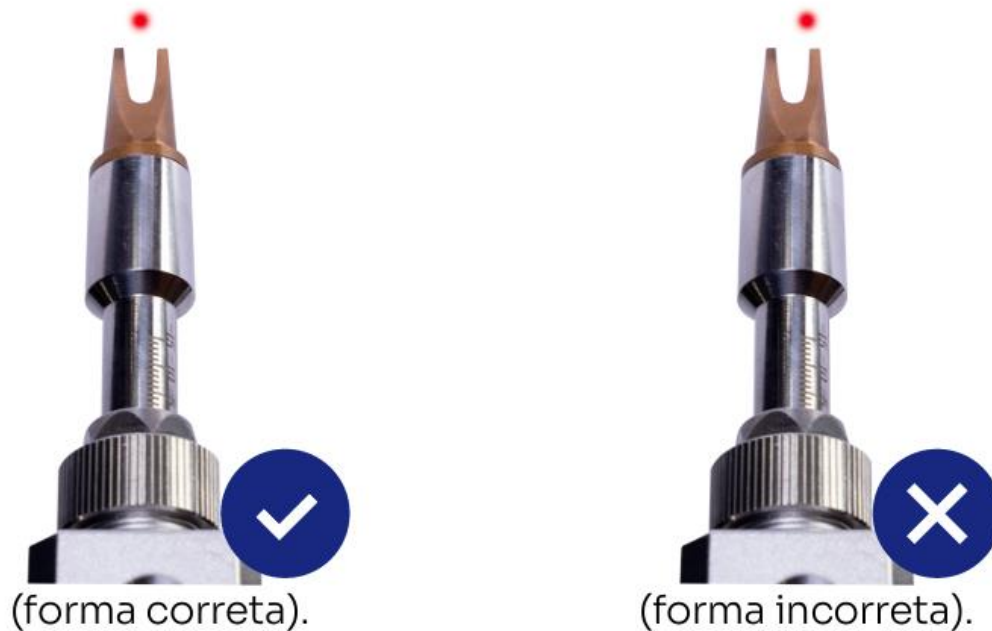


Figura 19

O alinhamento refere-se ao ajuste fino do caminho do feixe de laser dentro do sistema óptico (principalmente na tocha/cabeça de soldagem) e em relação à peça de trabalho.

- **Objetivo:** O laser deve estar **centralizado** (perfeitamente coaxial) com o eixo óptico da tocha. Isso garante que o feixe passe com precisão pelo centro de todas as lentes e atinja o ponto focal exato na peça.

- **Procedimento:** O alinhamento é feito tipicamente através da **inserção de valores de correção** no equipamento (sistema de controle CNC ou software de controle do laser). Esses valores ajustam pequenos espelhos (se houver) ou a posição do ponto de entrada do feixe na óptica.
- **Consequência de Mau Alinhamento:**
 - **Perda de Potência:** Se o feixe não estiver centralizado, ele pode ser "cortado" (clipado) pela borda das lentes, resultando em perda de potência.
 - **Danos às Lentes:** O feixe descentralizado pode atingir as bordas das lentes, danificando o revestimento antirreflexo e causando **superaquecimento** e falha prematura do componente.
 - **Qualidade da Solda:** O foco não será circular e uniforme, resultando em soldas de qualidade inferior.
 - **Danos na tocha:** por conta do feixe não estiver alinhado caso o operador utilize opção Zig Zag o laser pode pegar na lateral da tocha e ou no bico o que pode ocasionar danos na tocha contaminação na solda por serem materiais diferentes.

TÉCNICAS DE SOLDAGEM

É fundamental que a **tocha e o equipamento** (principalmente o meio ativo e a óptica) estejam em uma temperatura de **25°C ou mais frio**. Os lasers de alta potência geram muito calor. Manter o sistema resfriado (pelo *chiller*) garante a **estabilidade do feixe** e evita o superaquecimento e a falha dos componentes ópticos mais sensíveis.

- **Segurança:** A colocação do **clipe de segurança** (ou *interlock*) garante que o sistema de segurança da tocha esteja ativo, impedindo a emissão acidental do laser.

ÂNGULO DA TOCHA E SEGURANÇA ÓPTICA

A **posição da tocha** em relação à peça é um parâmetro crítico que afeta a absorção da energia e, principalmente, a segurança do sistema óptico.

- **Ângulo de Trabalho:** A tocha deve ser posicionada em um ângulo de **45° a 60° em relação à peça**. Uma maneira prática de conseguir um ângulo de aproximadamente 45° é segurar o punho da tocha de forma relativamente **plana** em relação à superfície de peça a ser soldada.
- **Propósito:** Este ângulo inclinado é essencial para:

1. **Segurança:** Garantir que o feixe de laser, quando **refletido pela poça de fusão** (especialmente em materiais reflexivos como o alumínio), **não retorne diretamente para a tocha** e danifique as lentes internas e o núcleo da fibra óptica.
2. **Qualidade da Solda:** Melhora a absorção da energia pelo material e o fluxo do gás de proteção sobre a poça de fusão.

MODOS DE SOLDAGEM

O laser permite a união de materiais com ou sem a introdução de um consumível.

- **Soldagem Autógena:**
 - **Definição:** O processo onde a união é feita apenas pela **fusão e solidificação do material base, sem a adição de metal extra.**
 - **Aplicação:** Usado para juntas de alta precisão com folgas mínimas, onde a composição do material base é suficiente para o resultado final.
- **Soldagem Não Autógena:**
 - **Definição:** O processo que utiliza um **material de adição** (arame ou vareta consumível) para preencher a junta entre os materiais base.
 - **Aplicação:** Essencial para preencher folgas maiores, reforçar a junta ou modificar a composição química e as propriedades metalúrgicas da solda.

PARÂMETROS TÉCNICOS ALIMENTADOR

AÇO INOXIDÁVEL - SEM ARAME

Espessura	Potência	Frequência	Ciclo	Swing Freq.	Swing Diam.
1.0	300 - 500	1.000 Hz	100%	300mm/s	2mm
1.5	500 - 700	1.000 Hz	100%	300mm/s	2mm
2.0	700 - 900	1.000 Hz	100%	300mm/s	2mm
2.5	900 - 1.300	1.000 Hz	100%	300mm/s	2mm
3.0	1.300 - 1.500	1.000 Hz	100%	200mm/s	2mm
3.5	1.500 - 1.700	1.000 Hz	100%	200mm/s	2mm
4.0	1.700 - 2.000	1.000 Hz	100%	200mm/s	2mm

AÇO INOXIDÁVEL - COM ARAME

Espessura	Potência	Frequência	Ciclo	Sw Freq.	Sw Diam.	Mat.	Espes.
1.0	300 - 500	1.000 Hz	100%	400mm/s	1.5-2	0.8	95
1.5	500-700	1.000 Hz	100%	400mm/s	2-3	1.0	90
2.0	700-900	1.000 Hz	100%	300mm/s	2.5 - 3.5	1.2	90
2.5	900-1.300	1.000 Hz	100%	300mm/s	3 - 4	1.2	85
3.0	1.300-1.500	1.000 Hz	100%	200mm/s	3 - 4	1.6	70
3.5	1.500-1.700	1.000 Hz	100%	200mm/s	4 - 5	1.6	70
4.0	1.700-2.000	1.000 Hz	100%	200mm/s	4 - 5	1.6	65

ALUMÍNIO - SEM ARAME

Espessura	Potência	Frequência	Ciclo	Swing Freq.	Swing Diam.
1.0	600w	1.000 Hz	100%	300mm/s	2mm
1.5	700w	1.000 Hz	100%	300mm/s	2mm
2.0	900w	1.000 Hz	100%	300mm/s	2mm
2.5	1.200w	1.000 Hz	100%	300mm/s	2mm
3.0	1.400w	1.000 Hz	100%	200mm/s	2mm
3.5	1.600w	1.000 Hz	100%	200mm/s	2mm
4.0	1.900w	1.000 Hz	100%	200mm/s	2mm

ALUMÍNIO - COM ARAME

Espessura	Potência	Frequência	Ciclo	Sw Freq.	Sw Diam.	Mat.	Espes.
1.0	400 - 600	1.000 Hz	100%	400mm/s	1.5-2	0.8	95
1.5	500-700	1.000 Hz	100%	400mm/s	2-3	1.0	90
2.0	700-900	1.000 Hz	100%	300mm/s	2.5 - 3.5	1.2	90
2.5	900-1.200	1.000 Hz	100%	300mm/s	3 - 4	1.2	85
3.0	1.300-1.500	1.000 Hz	100%	200mm/s	3 - 4	1.6	70
3.5	1.500-1.700	1.000 Hz	100%	200mm/s	4 - 5	1.6	70
4.0	1.700-2.000	1.000 Hz	100%	200mm/s	4 - 5	1.6	65

Figura 20

Além dessas opções temos a “Velocidade de recuo” que seria após terminar o cordão de solda o arame retrocede um pouco evitando que o arame fique preso na chapa.



Figura 21

EQUIPAMENTOS



Figura 22

1. Lentes
2. Pescoço da tocha
3. Suporte das lentes
4. Suporte para o material de adição

Componente	Função
Lentes	Inclui as lentes de proteção, focagem e colimadora; essenciais para guiar e focar o feixe.
Pescoço da Tocha	Seção ajustável que define a Distância de Trabalho (DTS) entre o bico e a peça.
Suporte das Lentes	Estruturas internas que fixam e mantêm o alinhamento das lentes.
Bocais da Tocha (Bicos)	Componentes de saída que direcionam o gás de proteção e são trocados conforme o tipo de junta (topo, filete, sobreposição, etc.). O aparelho pode funcionar sem bico para certas aplicações, como corte ou limpeza.

Tabela 11

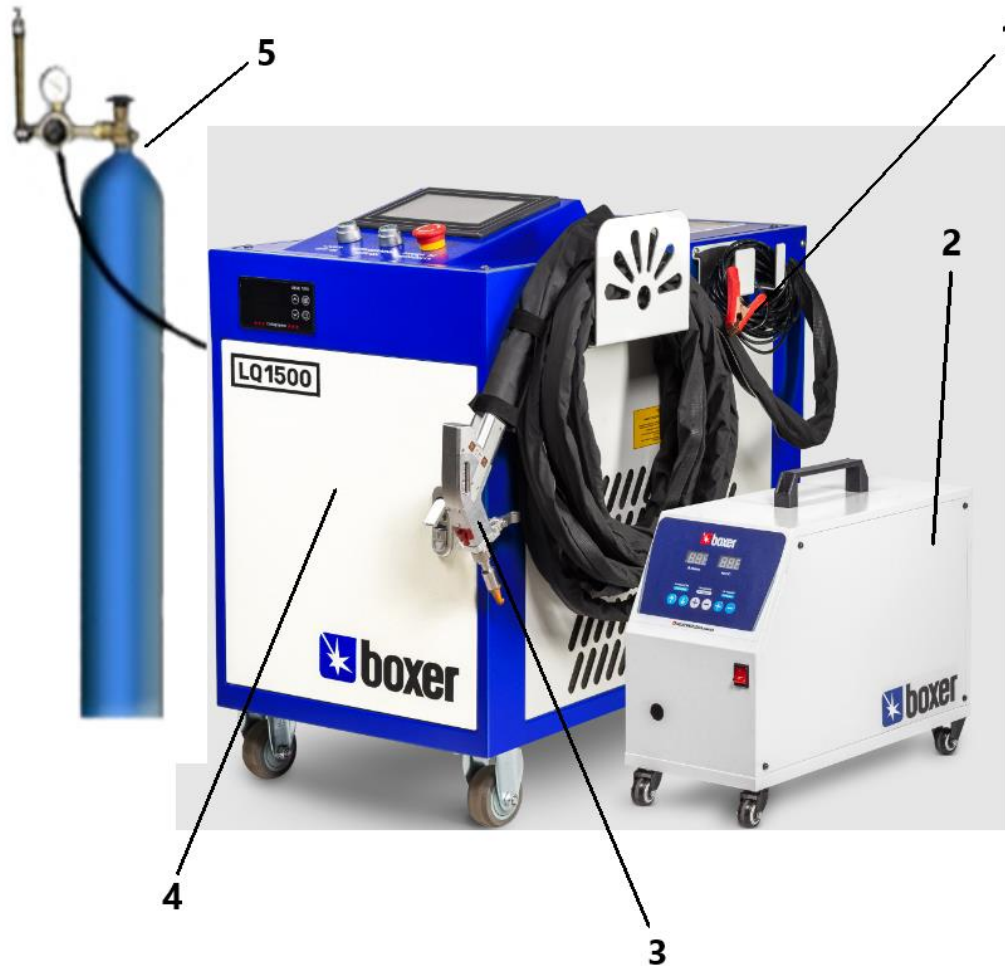


Figura 23

1. clipe de segurança
2. Alimentador de arame
3. Tocha de soldagem
4. Máquina de solda
5. Cilindro e Manômetro

Componente	Função
Clipe de Segurança	Garra ou sensor de contato colocado na peça. Atua como um mecanismo de segurança (<i>interlock</i>), garantindo que o laser só possa ser acionado quando houver contato com a chapa.
Alimentador de arame	Guia o arame de adição na direção correta da poça de fusão.
Cilindro e Manômetro	Fornecem e controlam o fluxo e a pressão do gás de proteção (Argônio, Nitrogênio, etc.).

Tabela12

Clipe de segurança: garra que se coloca na peça para que a peça possa ser soldada.



Figura 24

ALIMENTADOR DE ARAME (PARA SOLDAGEM NÃO AUTÓGENA)

O alimentador de arame no processo a laser é **similar aos processos GMAW (MIG/MAG)**, mas geralmente com maior precisão no controle da velocidade.

- **Estrutura:** É uma **Unidade Alimentadora de Arame com movimentação de quatro rolos**, garantindo tração e velocidade constantes, essenciais para a estabilidade da solda.
- **Componentes Chave:**
 1. **Bocal da Alimentação do Arame**
 2. **Roldana de Alimentação do Arame (Tracionador)**
 3. **Roldana de Pressão (Tracionador)**
 4. **Guia de Arame**
 5. **Bocal da Entrada do Arame**

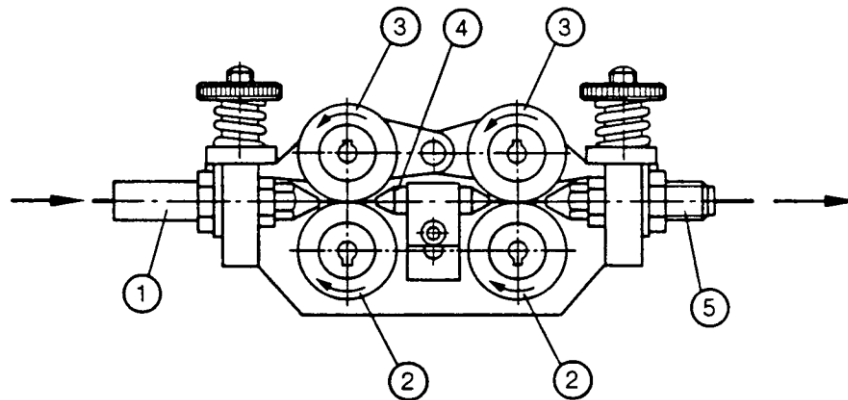


Figura 25

Aqui vemos como funciona alimentador de arame tradicional.

BOCAIS DA TOCHA:



Figura 26

Esses bocais / bicos, são de acordo com o tipo de solda a ser aplicado, exemplo: Solda de topo, Solda de filete, solda de sobreposição etc... Existe um bico para corte e para limpeza o aparelho funciona sem bico.

SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO (CHILLER)

O *chiller* é essencial para lasers de alta potência para gerenciamento térmico.

- **Função:** Equipamento que **refrigera** e mantém a **máquina de solda** (fonte laser) e a **tocha** na temperatura ideal de operação, tipicamente **abaixo de 25°C**.
- **Meio:** Utiliza **água desmineralizada** em circuito fechado, pois a água desmineralizada minimiza a corrosão e a condutividade elétrica.



Figura 27



Figura 28

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO PARA INICIAR A SOLDAGEM

Para garantir a segurança e a qualidade do processo, o operador deve seguir a seguinte sequência:

1. **Inspeção e Configuração das Lentes:**
 - Verificar as **lentes** quanto à limpeza e danos.
 - **Trocar as lentes** se necessário (especialmente se o processo mudar de soldagem para **limpeza** ou vice-versa).
2. **Ligar o Chiller:** Ligar o sistema de refrigeração para garantir que a temperatura do equipamento esteja **abaixo de 25°C**.
3. **Ligar o Laser:** Acionar a fonte laser.
4. **Parametrizar a máquina de acordo com o que for executar (solda, tipo de solda ou limpeza)**
5. **Conexão de Segurança:** Colocar o **clipe de segurança** na chapa de trabalho.
6. **Execução da Solda (Ângulo):** Posicionar a tocha em um ângulo de **45° a 60°** (punho plano) para evitar que o feixe refletido retorne e danifique as lentes.

GÁS

O gás é um consumível crucial na soldagem a laser, atuando em duas frentes principais: **proteção metalúrgica** e **proteção da óptica** (resfriamento e limpeza).

GASES:

- - Hélio (He): Melhor desempenho técnico
Potencial de ionização: 24,6 eV (mais alto)
Formação de plasma: Muito baixa
Potência na superfície do material: Máxima
Reflexão do feixe: Mínima
- - Nitrogênio (N₂): Desempenho intermediário
Potencial de ionização: 15,6 eV
Formação de plasma: Moderada
Potência na superfície do material: Média
Reflexão do feixe: Média
- - Argônio (Ar): Pior desempenho para laser de alta potência
Potencial de ionização: 15,8 eV
Formação de plasma: Alta
Potência na superfície do material: Baixa
Reflexão do feixe: Alta

Proteção contra Oxidação:

- Esta é a função mais importante. O calor intenso do laser derrete o metal, criando uma poça de fusão extremamente quente. O gás de proteção **isola** essa poça da atmosfera circundante (ar), evitando que o **oxigênio** e o **nitrogênio** do ar reajam com o metal fundido.

Supressão de Plasma:

- A alta densidade de energia do laser vaporiza uma pequena porção do metal, formando uma **pluma de vapor metálico** ou **nuvem de plasma** (gás ionizado) acima da poça de fusão.
- Este plasma pode **absorver** ou **refletir** a energia do feixe de laser, impedindo que atinja o metal com força total. O gás de proteção, especialmente o **Hélio** (devido à sua alta energia de ionização), ajuda a **dissipar** ou **suprimir** a formação desse plasma, garantindo que o laser seja utilizado de forma mais eficaz e que a penetração da solda seja estável.

FUNÇÕES SECUNDÁRIAS DO GÁS (RESFRIAMENTO E LIMPEZA)

O gás de proteção também desempenha um papel vital na manutenção e no processo:

- **Resfriamento da Tocha e Lentes:** O fluxo contínuo de gás inerte através do bocal da tocha contribui para o **resfriamento da tocha e das lentes de proteção**, ajudando a dissipar o calor gerado pelo feixe e pelos respingos.

COMPARAÇÃO DE GASES

Embora o **Argônio** seja o mais comum devido ao seu bom desempenho e inércia, outros gases têm usos específicos, mas com ressalvas:

Gás	Propriedades e Uso	Recomendação
Argônio (Ar)	Inerte e denso, proporciona excelente proteção e é comum em quase todos os metais.	Altamente recomendado para metais reativos (Titânio, Alumínio) e aços inoxidáveis.
Nitrogênio N_2	Mais barato, mas reativo com alguns metais (pode causar nitretos e porosidade em aços inoxidáveis e ligas de Alumínio).	Uso limitado, geralmente em aços de baixo carbono.
Oxigênio O_2	Não é usado para proteção em soldagem de alta qualidade; é usado como gás de assistência em corte a laser para facilitar a oxidação e remoção do material.	Não recomendado para soldagem.
Hélio He	Inerte e leve , mais caro. É o mais eficaz para suprimir o plasma, aumentando a profundidade de penetração.	Usado quando a máxima penetração e velocidade são necessárias.

Tabela 13

MATERIAIS A SEREM SOLDADOS

O processo de **soldagem a laser** é extremamente versátil e capaz de unir uma vasta gama de materiais, incluindo metais de alta condutividade e até mesmo materiais não metálicos. Sua capacidade de soldar é determinada, em grande parte, pelo comprimento de onda do laser e pela densidade de potência aplicada.

O laser é eficaz na soldagem de:

- **Aço Carbono:** É um material ideal para a soldagem a laser, permitindo altas velocidades e profundidades de penetração, especialmente com lasers de Fibra e CO_2 .

- **Alumínio:** Embora seja um material com **alta refletividade** (principalmente para lasers de 1064 nm), o laser de alta potência consegue iniciar a fusão rapidamente, sendo usado na indústria automotiva e aeroespacial.
- **Cobre:** Semelhante ao alumínio, possui **alta condutividade térmica e elétrica**. Sua soldagem é mais eficiente com lasers de **comprimentos de onda mais curtos** (como 532 nm - luz verde) ou lasers de fibra de alta potência para superar a refletividade inicial.
- **Ligas Nobres:** Inclui **aços inoxidáveis, titânio** e ligas de níquel. Estes materiais são frequentemente soldados a laser para garantir juntas limpas, de alta resistência e com mínima distorção e oxidação (uso indispensável de gás de proteção).
- **Polímeros:** Lasers de CO_2 (10.6 μm) são excelentes para soldar a maioria dos plásticos devido à sua alta taxa de absorção nesse comprimento de onda. A soldagem de polímeros geralmente ocorre por condução e não por *keyhole*.

A principal característica que torna o laser adequado para essa variedade de materiais é o seu **aporte de calor altamente concentrado e localizado**, o que minimiza a Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e a distorção.

CARACTERÍSTICAS DA SOLDA A LASER

Diferente dos processos a arco elétrico onde regulamos os amperes e volts no processo a laser regulamos a potência de feixe, que é regulada em watts. Os parâmetros usados são:

- Potência
 - Frequência de oscilação
 - Amplitude da oscilação
 - Sistema pulsado
 - Velocidade de recuo
 - Velocidade de soldagem
 - Distância Focal
 - Parâmetros de Geometria e Auxiliares
- Potência: valor energético aplicando na peça para efetuar a solda. Regula a quantidade de energia entregue ao material por unidade de tempo, afetando diretamente a **profundidade de penetração** e a velocidade máxima de soldagem.
 - Frequência de oscilação: A velocidade da **varredura do laser** (o movimento "zig zag" ou de oscilação). Controla a rapidez com que o feixe se move lateralmente.

- Amplitude da oscilação: ajuste de largura da soldagem, seria a largura do cordão. Define a distância máxima do movimento lateral do feixe, controlando a largura efetiva da solda.
- Alguns equipamentos possuem o sistema pulsado que seria uma regulagem na máquina onde se pode dimensionar o tempo que se faz a poça de fusão, o tempo que se para, e o tempo que retorna o feixe de laser (seria o tempo de intervalo para cada feixe de laser na peça, semelhante ao processo GMAW).
- **Função:** Regulagem que permite dimensionar o processo em termos de **pulsos de energia**. Permite definir o **tempo que se faz a poça de fusão** (duração do pulso), o **tempo de intervalo** (tempo que se para) e o tempo que o feixe retorna.
- Velocidade de recuo, quando o equipamento encera a solda o material de adição fica fundido a peça o sistema de velocidade de recuo é um artifício que quando se interrompe a soldagem o material de adição regressa a tocha sem fica preso a peça.
- Velocidade de Soldagem: A velocidade de movimento da tocha ou da peça ao longo da junta. Afeta diretamente o aporte de calor por unidade de comprimento e a penetração.
- Distância Focal: A posição do foco do laser em relação à superfície da peça. Afeta a densidade de potência e se a solda será por condução ou *keyhole*.
- Tamanho do pescoço é o dimensionamento de distância da lente de proteção para com a peça de maneira segura deixando o laser "mais ou menos forte". É o dimensionamento da **distância da lente de proteção para com a peça**.
- **Impacto:** Afeta a **densidade de potência** no ponto focal. Ao alterar esta distância, você muda a forma como a energia é concentrada, o que pode deixar o laser "mais ou menos forte" em termos de densidade de potência.

PROCESSO DE LIMPEZA DE PEÇAS

A **limpeza a laser** é uma aplicação moderna e eficiente que utiliza o mesmo equipamento de soldagem a laser (geralmente laser de fibra pulsado de alta potência) para remover contaminantes da superfície sem danificar o material base.

Para alternar da função de soldagem para a função de limpeza, são necessárias algumas alterações rápidas no equipamento:

1. **Alteração da Óptica:** É necessário **trocar a lente** na tocha de soldagem para uma lente específica para limpeza. Esta lente pode ter um foco diferente ou ser projetada para trabalhar com varredura (scanning).

2. **Remoção do Bocal:** Geralmente, a **ponta (bocal) da tocha é removida** para que o feixe de limpeza (que pode ter uma forma e largura diferente) não seja obstruído.
3. **Configuração do Software:** A função é ativada **alterando a configuração na tela da máquina de "Solda" para "Limpeza"**. O equipamento se reinicia e carrega os parâmetros otimizados para a limpeza.

PRINCÍPIO E CAPACIDADE

A limpeza a laser é uma técnica de **ablação**, onde a energia do laser vaporiza ou queima rapidamente a camada contaminada.

- **Alta Potência e Velocidade:** O equipamento utiliza sua **alta potência** para realizar a **remoção rápida** e eficiente de contaminantes, como:
 - **Ferrugem** (óxidos de ferro)
 - **Pintura antiga**
 - **Óleos e graxas**
 - **Oxidações** diversas
- **Não Danifica o Material Base:** O processo é de alta precisão. O laser é ajustado para que o contaminante (que absorve a energia de forma diferente) seja removido, enquanto o material base (por ter um limite de ablação mais alto) permanece intacto.
- **Aplicações:** É eficaz em diversas superfícies, como **chapas de aço, folhas de flandres e moldes enferrujados**.
- **Padronização:** A máquina pode trabalhar com uma **largura de limpeza fixa** (por exemplo, 80 mm), garantindo a uniformidade e a qualidade do resultado em toda a superfície.

TÉCNICAS DE OPERAÇÃO EM LIMPEZA

Os parâmetros de operação para limpeza diferem dos de soldagem:

- **Distância e Ângulo:** O princípio de **angulação da tocha (45°)** é mantido para evitar o retorno do feixe refletido para a óptica. No entanto, a **distância de trabalho** (distância da tocha à peça) é significativamente **maior** (cerca de 60 cm no mínimo) do que na soldagem, pois o laser precisa ter espaço para a varredura e o foco é menos intenso.

- **Segurança:** O equipamento pode **funcionar sem o clipe de segurança** (sensor de contato), pois a limpeza geralmente não requer o mesmo aterramento e o processo é menos focado e mais controlado pela varredura óptica.



Figura 29

PROCESSO DE CORTE A LASER

O processo de **corte a laser** utiliza o feixe de alta potência para fundir ou vaporizar o material ao longo de um caminho predefinido. Este processo difere da soldagem em vários parâmetros, sendo a escolha do gás de assistência um fator crítico.

Para o corte, a prioridade é a máxima concentração de energia em um ponto:

- **Foco Concentrado:** Para iniciar o corte, é essencial um **feixe concentrado**. Para isso, os parâmetros que causam dispersão ou movimento do feixe são **zerados**:
 - **Frequência de Oscilação:** Deve ser zerada.
 - **Opção Zig zag (Wobble):** Deve ser desativada.

Gás Recomendado	Função no Corte	Observações
Nitrogênio N_2	Ideal para corte por fusão (ou corte limpo). Refrigera melhor as lentes e a zona de corte, além de propiciar a expulsão do material (escória) de forma mais eficaz devido à sua alta pressão.	Produz cortes limpos e sem óxidos.
Argônio Ar	Pode ser utilizado, mas é uma alternativa ao Nitrogênio. É um gás inerte, mas geralmente é menos eficaz que o N_2 na expulsão da escória e tem custo mais elevado.	Usado principalmente quando a formação de nitretos é inaceitável.
Oxigênio O_2	Não Recomendado neste contexto.	O oxigênio é usado em corte por oxidação (corte reativo), onde ele reage com o metal aquecido para auxiliar a queima. Embora comum em alguns lasers CO_2 , em sistemas de fibra modernos, o corte por fusão com Nitrogênio é frequentemente preferido para evitar a formação de óxidos (que são duros e difíceis de pintar).
Ar Comprimido	Não Recomendado (e nunca se utiliza).	Contém umidade, óleo e partículas que contaminam a óptica e o material, além de Oxigênio, o que pode levar à oxidação do corte.

Tabela 14

PARÂMETROS DE SOLDAGEM EM LASER PULSADO

Os parâmetros listados são cruciais para o controle da energia e do aporte de calor em sistemas de **soldagem a laser pulsada**.

PARÂMETROS DE ENERGIA DO PULSO

Parâmetro	Detalhamento Técnico
Potência do Laser (P)	Refere-se à taxa de energia liberada. Em lasers pulsados, costuma-se usar a Potência Média ou a Potência de Pico . É o principal valor para determinar a profundidade de fusão máxima que pode ser alcançada.
Energia de Pulso (E)	A energia total gerada pelo laser em um único pulso (medida em Joules, J). Determina o tamanho da energia de aquecimento e afeta diretamente o grau de fusão do metal, controlando a largura e a profundidade de um ponto de solda individual. $E = P(\text{pico}) \times T$ onde P(pico) é a potência de pico e T é a largura de pulso.
Largura de Pulso (T)	O tempo de duração de um pulso de laser.
Efeito da Largura de Pulso:	* Largura Pequena: A energia do laser é concentrada, resultando em alta densidade de potência. Isso aumenta a profundidade de fusão e torna o desempenho da soldagem mais estável. * Largura Grande: A energia é distribuída por uma área maior, reduzindo a densidade de potência . Isso aumenta a largura da solda e a área de aquecimento, mas diminui a profundidade de fusão .

Tabela 15

PARÂMETROS DE FREQUÊNCIA E MOVIMENTO

Parâmetro	Detalhamento Técnico
Frequência de Pulso (f)	Refere-se a quantos pulsos a máquina pode emitir em um segundo (medida em Hz). Ajusta o número de vezes da corrente de soldagem por pulso.
Relação Frequência/Energia:	Quanto maior a frequência, menor será a saída de energia de cada pulso individual (para uma dada potência média). A frequência deve ser ajustada para garantir uma sobreposição adequada dos pontos de fusão, criando um cordão contínuo e homogêneo.
Velocidade de Soldagem (v)	A velocidade do movimento da tocha ao longo da junta. Afeta o volume de entrada de calor por unidade de tempo .
Efeito da Velocidade:	* Velocidade Rápida: Reduz o aporte de calor por unidade de comprimento, tornando a profundidade de fusão rasa . * Velocidade Baixa: Aumenta o aporte de calor, podendo causar derretimento excessivo e até perfuração da peça.
Recomendação:	Para chapas finas ou alta produtividade, recomenda-se o uso de alta velocidade com potência e foco ajustados.

Tabela 16

PRINCÍPIOS PARA SER TER UMA SOLDA A LASER

Os pontos listados representam tanto os **pré-requisitos** (princípios de segurança e qualidade) quanto as **vantagens** (resultados e aplicações) que impulsionam o uso da soldagem a laser na indústria, especialmente no processamento de chapas finas.

PRÉ-REQUISITOS E CONTROLES FUNDAMENTAIS

- **Ter um Ambiente Controlado:** Este é um **princípio de segurança (EPC)** crucial. A alta densidade de potência do laser exige que o ambiente seja restrito e seguro.
- **Contenção do Feixe:** O feixe laser deve ser contido por uma **célula de soldagem (enclausuramento)** ou a sala inteira deve ser uma **Área Controlada de Laser** com acesso restrito e sinalização.

- **Proteção Óptica:** Minimizar superfícies reflexivas e garantir o uso correto de **EPIs** (óculos de proteção).
- **Necessidade de um Cordão Higiênico e Bonito:** Este é um **princípio de qualidade** inerente ao processo.
- A soldagem a laser, por ser um processo **sem contato** e que requer o uso de **gás de proteção inerte**, produz cordões de solda **limpos (higiênicos)**, **estreitos** e com excelente **acabamento estético**, minimizando a necessidade de limpeza pós-soldagem.

VANTAGENS E DEMANDAS DE APLICAÇÃO

- **Distorção Mínima em Chapas Finas:** Esta é uma das principais **vantagens técnicas** da soldagem a laser.
- O processo aplica um **aporte de calor altamente concentrado** em um ponto muito pequeno (foco).
- O calor é removido rapidamente, resultando em uma **Zona Afetada pelo Calor (ZAC)** extremamente estreita.
- Isso minimiza as tensões residuais e o empenamento (distorção) da peça, o que é crítico ao trabalhar com **chapas finas** e de alta precisão.
- **Demanda em Larga Escala em Chapas Finas:** O laser é o processo ideal para a **produção em massa (larga escala)** de produtos com chapas finas, como na indústria automotiva e de eletrodomésticos.
- Sua **alta velocidade de soldagem** e a facilidade de **automação** (integração robótica) garantem alta produtividade, repetibilidade e baixo custo por peça soldada.

PRECAUÇÕES

Proteção contra Radiação Laser (Pele)

- **Não direcione a luz do laser para a pele. A exposição direta pode causar queimaduras graves na pele.**
- O feixe de laser de alta potência pode causar **danos térmicos imediatos e severos** (queimaduras de terceiro grau) ao atingir a pele. É obrigatório usar **roupas de proteção antichama** e garantir que o feixe esteja sempre contido ou direcionado para a peça de trabalho.

PROTEÇÃO CONTRA RISCO TÉRMICO (CALOR)

- Não toque na peça de trabalho que está sendo soldada ou que acabou de ser soldada.
- Não segure a peça com as mãos nuas.
- Não solda a peça segurando-a com as mãos.
- A energia concentrada do laser aquece a peça a temperaturas extremamente altas, causando fusão. A peça de trabalho permanece **quente** por um período após a soldagem, representando um grave **risco de queimadura por contato**. A peça deve ser manuseada sempre com **luvas de raspa** ou ferramentas apropriadas.
- **Segurar a peça durante a soldagem é estritamente proibido** e extremamente perigoso devido ao risco de exposição direta ao calor e respingos, além da radiação refletida.

PROTEÇÃO E INTEGRIDADE DO EQUIPAMENTO (RISCO ELÉTRICO E FÍSICO)

- Não pise, estique ou torça o cabo de alimentação e quaisquer cabos de conexão.
- A máquina de solda a laser, especialmente a fonte de alimentação e o *chiller*, opera com **alta voltagem**. Danificar os cabos de alimentação ou cabos de interconexão (incluindo o cabo de fibra óptica) pode levar a:
 - **Risco de Choque Elétrico:** Exposição de fios energizados.
 - **Falha do Equipamento:** Interrupção do fornecimento de energia ou do sinal de controle.
 - **Dano à Fibra Óptica:** O cabo da tocha é frágil e sua torção pode danificar a fibra, comprometendo o feixe de laser e exigindo reparo caro.