



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

ENGENHARIA DE MATERIAIS



ENG 02298 TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**EFEITO DA ALTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO LASER SOBRE A
GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA**

Gustavo Veloso da Silveira
159613

Ivan Guerra Machado
Professor Orientador

DEZEMBRO DE 2012

GUSTAVO VELOSO DA SILVEIRA

EFEITOS DA ALTERAÇÃO DE PARÂMETROS DO PROCESSO LASER SOBRE A GEOMETRIA DO CORDÃO
DE SOLDA

Trabalho Conclusão de Curso submetido à
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia
de Materiais. Sob a orientação do Professor
Ivan Guerra Machado.

Porto Alegre/RS, 2012

AGRADECIMENTOS

A minha família colegas e amigos em especial ao meu pai Fernando a minha mãe Irene e a minha namorada Bianca por todo o apoio, companheirismo e paciência.

Ao professor Ivan pelo apoio e orientação e aos membros do LSTC pela ajuda nos experimentos.

À Liess Máquinas e Equipamentos Ltda. nas pessoas dos Eng. Antonio Forte e Michele G. Gallina pelo apoio incondicional a este trabalho e pela disponibilização de matéria prima e equipamentos.

Ao GAF do LAMEF, na pessoa do professor Marcio por toda a ajuda e por auxiliar nos experimentos de metalografia.

Ao LdTM e seus membros pela ajuda com os ensaios de micro dureza

A todos os professores da UFRGS aos quais eu tive o privilégio de ser aluno e à própria instituição UFRGS pelo ensino de qualidade disponibilizado.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ressonador de uma fonte de laser de rubi. (3).....	3
Figura 2 – Esquema ótico de uma fonte de laser comercial. (7)	7
Figura 3 – Representação de um espelho de focalização parabólico. (8).....	8
Figura 4 – Comparação entre o processo de soldagem laser por condução e por furo controlado. (9)	10
Figura 5 – Esquema do processo de soldagem por furo controlado. (2)	11
Figura 6 – Macrografia de uma junta de aço carbono soldada a laser. (10).....	11
Figura 7– Representação esquemática do comportamento de solda laser por furo controlado em diferentes velocidades de soldagem e potências do laser. (11)	12
Figura 8 – Modos transversais eletromagnéticos. (5).....	14
Figura 9 – Porosidade x Frequência de pulso para soldagem por furo controlado usando uma fonte de CO ₂ . (5).....	16
Figura 10 – Variação da penetração em função da potência para uma dada velocidade de soldagem (5).	16
Figura 11 – Defeitos relacionados à velocidade de soldagem. (5)	18
Figura 12 – Geometrias de cordão para diferentes gases de soldagem. (11).....	21
Figura 13 – Influência da posição focal na penetração para diferentes lentes focais para um aço SAE 1018 (A) e Diâmetro do feixe x Posição focal (B). (5)	22

Figura 14 – (a) Junta de topo, (b) Junta de aresta, (c) Junta por ponto ou sobreposta, (d) Junta de canto, (e) e (f) Junta de aresta, (g) Junta de filete, (h),(i) e (j), junta de aresta. (5)	23
Figura 15 – Corte transversal de sistema de troca térmica <i>pillow plate</i> . (12)	25
Figura 16 – Diagrama de Schaefer com a posição do aço inoxidável AISI 304 demarcada. Adaptado de (14).	26
Figura 17 – Máquina de solda Omega Quadra Clamp 1S. (Fonte: Liess Máquinas e Equipamentos).....	29
Figura 18 – Vista superior dos cordões de solda.....	30
Figura 19 – Representação esquemática do perfil de dureza analisado.	32
Figura 20 – Macrografias: (A) Amostra V5500P1000, (B) Amostra V5500P1250, (C) Amostra V5500P1500, (D) Amostra V5500P1750.....	34
Figura 21 – Macrografias: (A) Amostra V5500P2000, (B) V5500P2375	35
Figura 22 – Macrografias: (A) Amostra P2375V2000, (B) Amostra P2375V3000, (C) Amostra P2375V4000	35
Figura 23- Macrografias: (A) Amostra P2375V5000, (B) P2375V6000	36
Figura 24 – Potência x Penetração	38
Figura 25 – Velocidade de soldagem x penetração	38
Figura 26 – Velocidade de soldagem x Largura do cordão.....	38
Figura 27 – Potência x Largura do cordão	39
Figura 28 – Micrografia da amostra V5500P1000	41
Figura 29 – Micrografia da amostra V5500P2375	42
Figura 30 – Micrografia da amostra P2375V2000	42
Figura 31 – Micrografia da amostra P2375V6000	43
Figura 32 – Perfil de micro dureza para as amostras com potência fixada	44
Figura 33 – Perfil de micro dureza para as amostras com velocidade fixada.	45

RESUMO

Processos de soldagem a LASER possuem grandes vantagens se comparado com processos de soldagem a arco elétrico, principalmente em relação à velocidade de soldagem e precisão, devido às reduzidas dimensões da fonte de energia e alta intensidade da mesma.

Uma das aplicações dos produtos soldados por LASER é o de sistemas de troca de calor “*pillow plate*” normalmente fabricados com aço inoxidável austenítico AISI 304 através de juntas sobrepostas.

Neste trabalho foram avaliados os efeitos da alteração de parâmetros na geometria e nas características do cordão de solda. Para isso foram feitos doze corpos de prova de junta sobreposta de uma chapa de 1,0 mm de espessura sobre uma chapa de 5,0 mm de espessura. em seis corpos de prova foi fixada a potência de soldagem e variada a velocidade de soldagem, nos outros seis foi fixada a velocidade de soldagem e variada a potência.

Foram realizadas as análises da geometria do cordão através de macrografias e os resultados foram comparados com duas equações obtidas da literatura, assim como foram medidos os tamanhos de grão médio austenítico e realizada análise do perfil de micro dureza da chapa sobreposta.

Todas as amostras atingiram penetração suficiente para realizar a junta. A máxima e mínima penetração para o equipamento foi caracterizada assim como os parâmetros ideais para a realização da solda. Uma das equações se mostrou satisfatória na determinação da penetração enquanto que a outra se mostrou insatisfatória. Houve um refino da microestrutura na região do cordão e na ZAC com conseqüente aumento de dureza nestas regiões. As amostras com maior potência e velocidade de soldagem apresentaram porosidade na região da raiz da solda, e a maioria das amostras apresentou porosidade na extremidade do cordão na região da interface entre as chapas.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
1.1 <i>LASER.....</i>	2
1.1.1 LASER de fase sólida	4
1.1.2 LASER de fase gasosa	5
1.1.3 Elementos de focalização óptica.....	7
1.2 <i>Soldagem por LASER.....</i>	9
1.2.1 Soldagem por condução	9
1.2.2 Soldagem por furo controlado (Keyhole welding)	10
1.3 <i>Parâmetros de solda LASER com influência direta na geometria do cordão.....</i>	13
1.3.1 Modo transversal eletromagnético (TEM)	13
1.3.2 Potência.....	15
1.3.3 Velocidade de soldagem	17
1.3.4 Gases de proteção e soldagem	19
1.3.5 Profundidade de foco e distância do ponto focal em relação à superfície da peça.....	21
1.3.6 Tipos de Junta e dimensão da abertura.....	22
1.4 <i>Soldagem de aço inoxidável AISI 304.....</i>	24
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	28
2.1 <i>Material.....</i>	28
2.2 <i>Confecção dos corpos de prova.....</i>	28
2.3 <i>Metalografia e análise da geometria do cordão.....</i>	31
2.4 <i>Micro dureza Vickers</i>	32
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	33
3.1 <i>Geometria do cordão</i>	33
3.2 <i>Tamanho de grão médio e metalografia.....</i>	40
3.3 <i>Micro dureza Vickers</i>	43
5. CONCLUSÕES.....	46
6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	47
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

A utilização do LASER vem se tornando cada vez mais comum e suas aplicações tem se diversificado desde os primeiros estudos de ampliações de radiação eletromagnética na década de 50. Mas foi na década de 80 que o nome LASER ficou amplamente conhecido com a introdução do CD (*compact disc*) e a evolução dos *shows* de luz.

Uma de suas aplicações mais importantes é no processamento de materiais. Soldagem e corte LASER são altamente competitivos com outros processos atuais de mesmo gênero e, portanto são amplamente utilizados na indústria. Porém no Brasil a utilização do LASER para o processo de soldagem é pouco difundida e seu estudo e compreensão é de suma importância para o desenvolvimento nacional. O processo de solda a laser possui como diferencial as altas velocidades de soldagem, a altíssima intensidade de energia, alta precisão, as altas taxas de aquecimento e resfriamento da junta, ZAC com dimensões reduzidas e uma alta relação de penetração/ largura do cordão.

A geometria de um cordão soldado por LASER é influenciada diretamente por uma série de parâmetros, alguns oriundos do material que se deseja soldar e outros das características do equipamento utilizado na soldagem.

O objetivo deste trabalho é avaliar as principais características de um cordão soldado a LASER e a influência dos parâmetros mais flexíveis em um equipamento de solda a LASER (potência e velocidade de soldagem) nestas características.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 LASER

LASER é um feixe de luz amplificada com características coerentes (mesma frequência e fase constante entre si), monocromáticas (todos os fótons possuem mesmo comprimento de onda) e com feixes altamente colimados (feixes quase paralelos). Para melhor compreensão de como é gerado um feixe de LASER é necessário revisar alguns conceitos físicos. Em 1905, Albert Einstein, utilizou os conceitos teóricos postulados por Max Planck em seus estudos sobre o efeito fotoelétrico, Planck postulou que a luz é formada por pacotes discretos e bem determinados de energia (quanta), que vieram a ser chamados de fótons. Em 1913, Niels Bohr apresentou seu modelo atômico, onde os elétrons podem orbitar o núcleo em níveis de energia bem determinados, sendo que em um estado estável de energia os elétrons preenchem os níveis mais baixos de energia, o chamado estado fundamental de energia. Porém se corretamente estimulados os elétrons podem “pular” para um nível de energia mais alto passando para um estado excitado de energia. Após um período de tempo (na ordem de milissegundos) estes elétrons excitados retornam espontaneamente ao seu estado fundamental emitindo um fóton (incoerente) de energia igual à diferença de energia entre o estado fundamental e o estado excitado de determinado átomo. Em 1925, Erwin Schrödinger e Werner Heisenberg postularam que os elétrons são partículas (Heisenberg) que apresentam propriedades ondulatórias (Schrödinger), cujo comportamento pode ser totalmente explicado pelas funções de onda, desenvolvidas por Schrödinger, que prevêm, inclusive, os diferentes níveis de energia que o elétron pode assumir, e as exatas energias associadas a esses níveis. Isso significa que cada tipo determinado de átomo pode ser excitado sempre em quantidades bem definidas, através da absorção de um tipo determinado de fóton, de comprimento de onda específico. Assim sendo, Einstein considerou que quando átomos ou moléculas de um dado material recebem a energia de um fóton oriundo do mesmo material, este tem seus elétrons excitados a um nível mais alto de energia, no entanto se este átomo ou molécula receber a energia de um fóton antes de espontaneamente retornar ao seu estado fundamental o mesmo irá ser estimulado a emitir um fóton em fase (coerente) e com o mesmo comprimento de onda do fóton que o estimulou, o fóton absorvido será emitido espontaneamente após um determinado espaço de tempo. Essa é a base para a amplificação da luz por emissão estimula-

da que deu origem ao nome LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

A geração de um feixe de laser é baseada nestes conceitos. Diferentes materiais podem ser excitados e ter capacidade de gerar um feixe de LASER e podem se apresentar na fase sólida, líquida ou gasosa (1). Um dos lasers mais comuns de utilização em soldagem é o laser de CO₂ (fase gasosa) que produz um feixe de LASER de comprimento de onda $\lambda=10,6$ μm . Os materiais possuem menor absorvância quanto maior o λ incidente sobre o material, pois fótons de menor comprimento de onda possuem uma energia maior, com maior possibilidade de interagir com um numero maior de elétrons ligados (2) e o comprimento de onda do laser de CO₂ é grande em comparação com outras fontes de LASER. Dessa forma materiais como alumínio e cobre são de difícil soldagem tendo em vista sua alta refletividade para este tipo de laser, o cobre é inclusive o principal material utilizado nos espelhos dos equipamentos de laser de CO₂. Os espelhos são de suma importância em qualquer processo que utiliza laser de CO₂ e serão abordados mais adiante.

Outra fonte de LASER de uso comum em soldagem é a de Nd-YAG (fase sólida), que produz um feixe de LASER com $\lambda=1,06$ μm o que confere a possibilidade de conduzir o laser até a peça por meio de fibra ótica, tornando o processo mais versátil (o laser produzido por uma fonte de CO₂ é absorvido pelo vidro tornando este processo inviável para esta fonte de LASER). Adicionalmente o menor comprimento de onda produzido por esta fonte possibilita a produção de um feixe de laser de diâmetro reduzido o que o torna mais competitivo em operações mais precisas e de menor escala.

O LASER é gerado em um dispositivo chamado ressonador representado esquematicamente na figura 1.

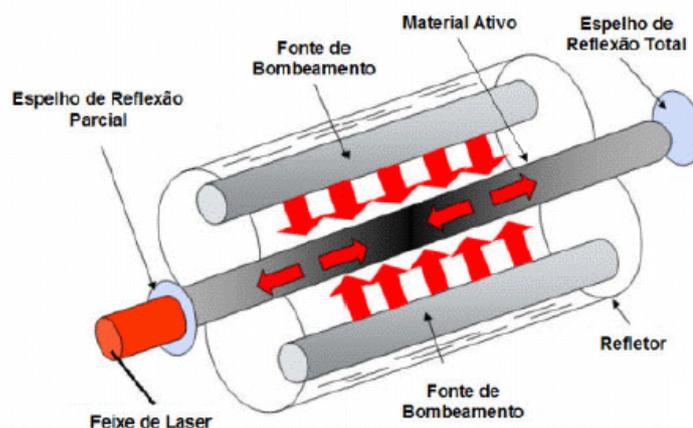


Figura 1 - Ressonador de uma fonte de laser de rubi. (3)

A figura 1 representa um ressonador de uma fonte de laser de rubi, a primeira fonte de laser a ser apresentada para a comunidade científica pelo Dr. Theodore Maiman em 1960 (4). O material ativo representado na figura é um cristal de rubi cilíndrico cujas faces são altamente polidas e paralelas. Para se obter a amplificação por emissão estimulada é necessário criar o fenômeno chamado de inversão da população no qual o número de elétrons no estado excitado de energia supera o número de elétrons no estado fundamental. Para isso os elétrons do cristal de rubi são excitados através da fonte de bombeamento, que neste caso é um flash de luz de uma lâmpada de xenônio, após os primeiros elétrons retornarem ao estado fundamental de energia cada molécula excitada irá emitir um fóton (incoerente), este fóton ao percorrer o caminho no interior do cristal irá se colidir com outras moléculas do cristal que por sua vez terão uma emissão estimulada de fótons (coerentes), esses fótons também estimularão a emissão de novos fótons iniciando um efeito cascata. Nas extremidades do cristal estão posicionados dois espelhos, um com reflexão total e outro de reflexão parcial, dessa forma os fótons gerados tem seu percurso aumentado significativamente no interior do material ativo sendo refletidos de um lado para o outro fazendo com que o número de moléculas excitadas seja ainda maior. O resultado é um feixe de luz concentrado de altíssima energia emitido através do espelho parcialmente reflexivo.

1.1.1 LASER de fase sólida

LASERs de fase sólida utilizam impurezas em uma matriz como meio ativo, por exemplo o LASER de Nd:YAG mencionado anteriormente utiliza íons de Níodimio dispersos em uma matriz de cristal de YAG (granada de ítrio e alumínio), o LASER de rubi utiliza íons de Cr dispersos na matriz de cristal de rubi e o LASER de safira utiliza íons de titânio dispersos na matriz de cristal de safira (Al_2O_3).

O ressonador deste tipo de LASER segue a mesma configuração de um LASER de rubi apresentado na seção 1.1. LASERs de fase sólida têm a vantagem de tempo de vida relativamente longo para estados excitados o que permite um armazenamento de energia mais elevado do que os lasers de fase gasosa e, conseqüentemente, permite ser Q-comutados para gerar elevadas potências de pico em pulsos curtos (5). O “*Q*” de um LASER é a razão entre a energia armazenada no ressonador para a potência dissipada por ciclo do ressonador óptico. Introduzindo um elemento óptico no oscilador que provoca desalinhamento ou opacidade, o cristal LASER será bombeado para completo armazenamento de energia sem perda de energia através do feixe de saída. Se o laser no ressonador é, então, muito rapidamente realinhado ou

o elemento óptico se torna transparente, o cristal de laser vai despejar seus fótons de laser de todos os átomos excitados. Este pulso dura de alguns nano segundos para algumas centenas de nano segundos, dependendo do tipo de interruptor e do design do ressonador. O interruptor Q tem de estar localizado no ressonador (entre os espelhos de laser) e pode ser utilizado com um modo pulsado ou CW (ver item 1.3.2) (6).

Estão contemplados nesta família de LASER os LASERs de Rubi, de Nd:YAG, de semicondutores (diodo), de fibra, de disco, entre outros.

1.1.2 LASER de fase gasosa

Os LASERs do tipo gasoso CO_2 são os mais eficientes para o processamento de materiais em alta potência. Outros gases também podem ser utilizados para produzir LASER mas nenhum possui a eficiência e a capacidade de gerar altas potências, essenciais para o processo de soldagem. Os LASERs de CO_2 são divididos em 3 categorias, fluxo axial lento, fluxo axial rápido e fluxo transversal.

O ressonador de uma fonte de laser de CO_2 possui praticamente os mesmos princípios de funcionamento do ressonador de rubi, porém o material ativo neste caso é uma mistura de gases, entre eles o CO_2 (1-9%) o He (10-55%) e o N_2 (o restante). O gás CO_2 é estimulado por uma fonte de radiofrequência ou por descargas elétricas e o papel do Helio é acelerar o retorno dos elétrons do CO_2 ao seu estado fundamental de energia enquanto que o papel do Nitrogênio é estimular a excitação das moléculas de CO_2 . Os gases podem ser armazenados em cilindros separados sendo misturados nas proporções diretamente no ressonador ou podem ser armazenados pré-misturados em um cilindro individual. Os gases tem um tempo de vida útil na cavidade ressonante de modo que devem ser renovados em um dado período de tempo pré estabelecido para garantir a qualidade do feixe de laser.

- **Fluxo axial lento**

É o mais simples dos LASERs de CO_2 . Nele o fluxo de gás flui na mesma direção do eixo óptico do ressonador e do bombeamento (rádio frequência ou descarga elétrica). O fluxo é mantido contínuo para evitar a contaminação do gás por moléculas de $\text{CO} + \text{O}$ provenientes da redução do CO_2 pelas descargas elétricas. O resfriamento se dá por condução através das paredes do tubo ressonador com a passagem de um líquido que é resfriado por um dispositivo externo de troca de calor. A potência deste tipo de LASER é proporcional ao comprimento do

tubo ressonador a aproximadamente 80W por metro de tubo. Um tubo ressonador curvado é utilizado para atingir potências de até 1KW ao invés de simplesmente aumentar o comprimento do tubo (1).

- **Fluxo axial rápido**

Este tipo de LASER possui praticamente a mesma configuração de um laser de fluxo axial lento com a diferença de que este possui uma bomba para circular o gás rapidamente através do ressonador e sistema de refrigeração o que permite uma refrigeração mais eficiente e conseqüente maior potência disponível para o feixe de LASER tipicamente mais de 2 KW por metro de tubo. Atualmente LASERs de fluxo axial rápido podem fornecer potências de até 6KW (1).

- **Fluxo transversal**

O LASER de fluxo transversal opera bombeando a mistura de gases que é recirculada em alta velocidade no sentido transversal ao bombeamento e ao eixo da cavidade ressonante. Por ter um ressonador com um volume grande em contraste com o seu comprimento o feixe de laser pode ser refletido através de vários espelhos aumentando o caminho percorrido entre a região de bombeamento. Devido a este longo caminho ótico em um ressonador de comprimento reduzido este tipo de LASER atinge as maiores potências(atualmente na ordem de 50KW) com suas dimensões mais compactas.

Após deixar o ressonador o feixe de laser é “moldado” por uma série de espelhos e filtros para que o mesmo se torne um feixe altamente colimado e com o diâmetro de feixe especificado para a dada fonte de laser. A figura 2 mostra um esquema de caminho ótico em uma fonte de laser de fluxo axial rápido comercial.

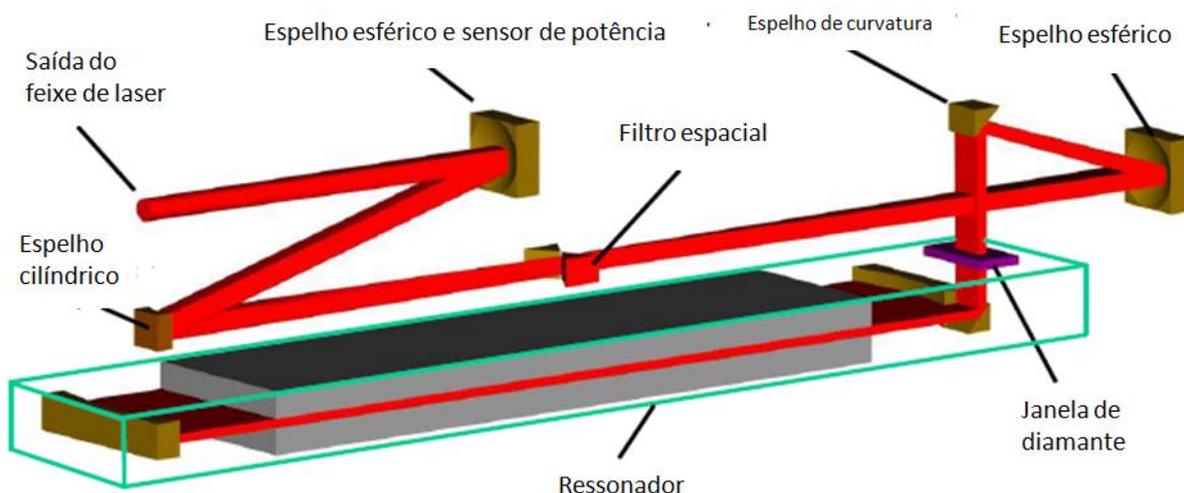


Figura 2 – Esquema óptico de uma fonte de laser comercial. (7)

1.1.3 Elementos de focalização óptica

A grande maioria dos sistemas para processamento de materiais por laser são automatizados e são construídos de forma a atender às necessidades individuais de cada processo como por exemplo o objetivo (se soldagem ou corte), o tipo de fonte laser, o tipo de junta de soldagem, as dimensões dos componentes a serem trabalhados etc., mas a maioria possui alguns componentes em comum como um centro de processamento de dados para converter os comandos CNC em movimentos através de servo-motores, um sistema de transporte do feixe de laser desde a fonte até a peça, uma lente (ou espelho) de focalização, um sistema para extração de fumos e resíduos, um sistema de refrigeração para espelhos e fonte laser, um sistema de alimentação de gases, e um cabeçote com bocal.

Um dos componentes mais importantes para o processamento de materiais por laser é a lente ou espelho de focalização. O feixe de laser, ao sair da fonte tem um diâmetro que varia de 15mm a 75mm. Para lasers com até 5 kW de potência o feixe pode ser manipulado através de lentes transmissivas, mas para potências maiores são utilizados espelhos com um sistema adequado de refrigeração por água (2). Para fontes de laser de CO₂ o material mais utilizado para a confecção dos espelhos é o cobre, devido à alta reflexão deste material para o comprimento de onda do laser gerado por esta fonte.

A principal propriedade de um espelho ou lente de focalização é o comprimento focal que é definido pela distância entre o centro do espelho e o plano focal. Espelhos com um comprimento focal grande tem uma maior profundidade de campo, o que dá uma maior tolerância para irregularidades na superfície plana. O espelho pode ser colocado a uma distância

maior da peça de trabalho, reduzindo a possibilidade de dano, e proporcionando mais espaço para outros equipamentos. No entanto, um grande comprimento focal produz um maior tamanho de ponto focalizado com uma densidade de energia inferior. Uma óptica com um comprimento focal curto produz um pequeno ponto focalizado, mas extrema precisão é necessária para realizar o pleno potencial de focagem, e a proximidade com a peça também pode tornar o acesso mais difícil. Na figura 3 está representado um espelho parabólico, um dos vários tipos de espelhos de focalização utilizados em processamento de materiais a laser, o comprimento focal está representado por “ f' ” na figura 3.

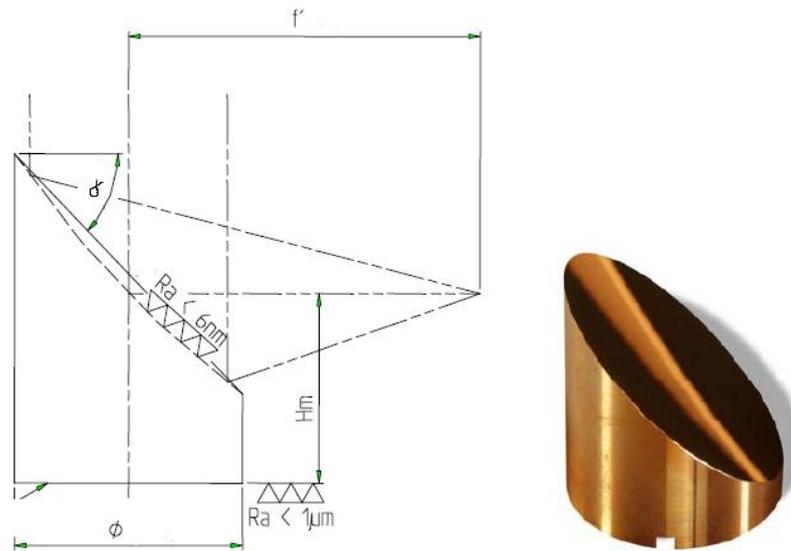


Figura 3 – Representação de um espelho de focalização parabólico. (8)

O diâmetro mínimo teórico do feixe no ponto focal, D_f , para um feixe de laser de diâmetro original, D_o , comprimento de onda, λ e modo TEM₀₀ (ver item 1.3.1) pode ser focalizado é dado por (2):

$$D_f = \frac{4\lambda f'}{\pi D_o} \quad \text{Equação 1.}$$

A equação 1 demonstra o benefício de usar espelhos com um comprimento focal curto e uma fonte de laser de comprimento de onda curto a fim de obter um diâmetro pequeno do feixe no ponto focal.

1.2 Soldagem por LASER

1.2.1 Soldagem por condução

Na soldagem por condução o feixe de laser é focado sobre o material causando a fusão do mesmo sem que ocorra sublimação significativa do material, utilizando intensidades do feixe usualmente na ordem de 1000 W/mm^2 . Estão contemplados nesta família de processos os processos de brasagem, solda branda e soldagem convencional. Existem dois modos de efetuar uma solda por condução a laser, por aquecimento direto e por transferência de energia.

Na soldagem por aquecimento direto, a condução de calor é governada pela condução térmica entre a fonte de calor e a superfície afetada do material, onde o material é fundido superficialmente originando a junta. Apenas uma pequena porção superficial do material sofre fusão devido à reduzida área de atuação do feixe de laser e a máxima penetração neste modo de soldagem é da ordem de 2 mm onde a potência do laser é da ordem de dezenas de Watts.

O princípio da soldagem por transferência de energia é a de adicionar compostos que absorvem a energia do feixe de laser (dado o comprimento de onda da fonte) na região do material onde se deseja efetuar a solda, estes compostos aquecem até a temperatura de fusão do material base (que não sofre aquecimento pelo laser) fundindo o mesmo e após solidificar a junta é formada. Fontes de laser de Nd-YAG são usualmente usadas para a soldagem de polímeros através deste modo de soldagem (alguns polímeros são “transparentes” para o comprimento de onda emitido por este tipo de fonte laser)

A geometria da junta pode ser comparada a geometria observada nos processos mais tradicionais de soldagem a arco elétrico, tendo um perfil mais arredondado com reduzida razão de largura/profundidade. A figura 4 demonstra a comparação deste processo com o processo por furo controlado (Item 1.3) onde pode se ver nitidamente a diferença de penetração característica entre estes dois processos. O principal parâmetro que caracteriza a diferença entre os dois processos é a densidade de potência que atinge valores bem mais altos na soldagem por furo controlado.

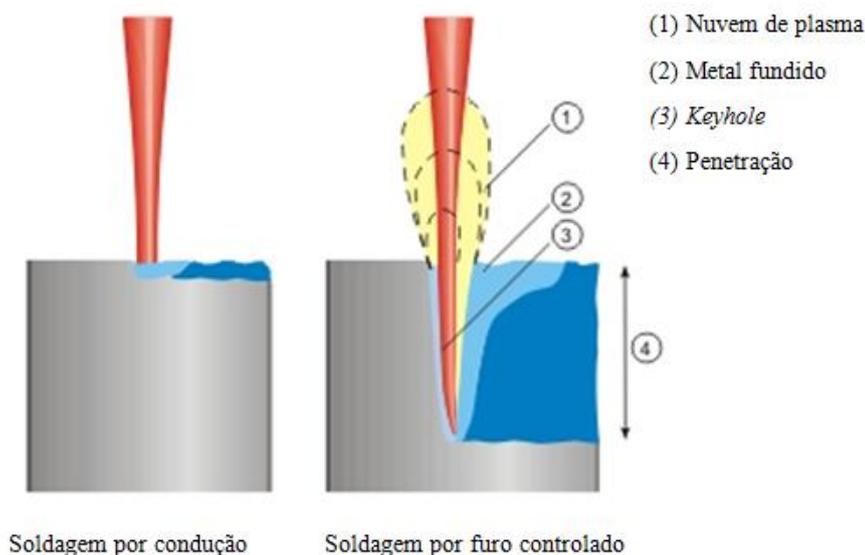


Figura 4 – Comparação entre o processo de soldagem laser por condução e por furo controlado. (9)

1.2.2 Soldagem por furo controlado (*Keyhole welding*)

Na soldagem por furo controlado a intensidade incidente do laser é tal que ocorre a sublimação do metal. Usualmente a transição de soldagem por condução para a soldagem por furo controlado, mantendo-se o a estabilidade do processo, se inicia em 10000 W/mm^2 e é baseada na criação de um capilar de metal sublimado (*keyhole*) no interior do material por aquecimento local até a temperatura de sublimação. A pressão de vapor resultante dentro do material cria um capilar de aprox. 1,5 vezes o diâmetro do feixe de laser no ponto focal, que é movido através do material pelo dispositivo de soldagem ao longo do contorno a ser soldado, uma poça de metal fundido é formada em volta do capilar de vapor e atinge temperaturas superiores às de poças de fusão de processos tradicionais a arco elétrico. A pressão hidrostática, a tensão superficial da massa fundida, e a pressão de vapor no interior do capilar atingem um equilíbrio, evitando que o capilar entre em colapso (figura 5). Para manter este equilíbrio é necessário um balanço entre velocidade de soldagem e a potência de soldagem. Com o avanço do feixe de LASER em relação ao material há a junção da poça líquida devido à força da gravidade formando assim a junta.

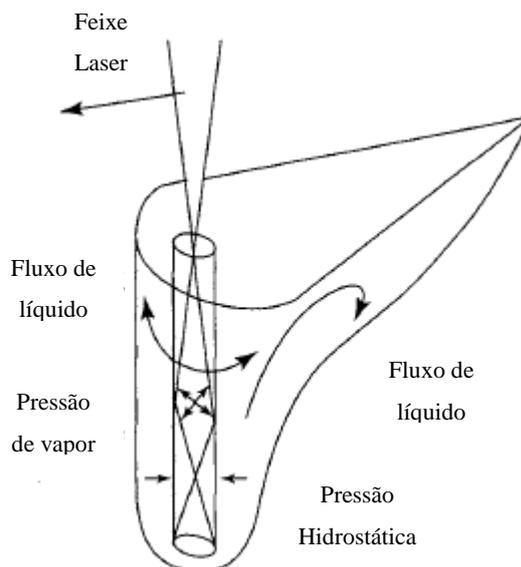


Figura 5 – Esquema do processo de soldagem por furo controlado. (2)

Este tipo de soldagem produz juntas muito estreitas com uma alta razão de penetração / largura do cordão e como consequência produz uma ZAC (zona afetada pelo calor) muito mais estreita se comparada com outros processos tradicionais de soldagem conforme ilustrado na Fig. 6 (em alguns casos não é possível identificar a ZAC). Fontes laser de CO_2 são mais econômicas para a soldagem linear e rotacional de juntas simétricas já que o feixe pode ser manipulado de maneira relativamente fácil com o uso de espelhos. Peças tridimensionais mais complexas são mais facilmente soldadas com fontes laser de Nd: YAG emitido por meio de um cabo de fibra óptica através de um braço robótico. A soldagem de aços inoxidáveis é amplamente utilizada com este processo devido à facilidade de manter a estabilidade do *keyhole*. Processos mais atuais de soldagem LASER podem atingir penetrações de até 45mm utilizando fontes laser de CO_2 de alta potência.

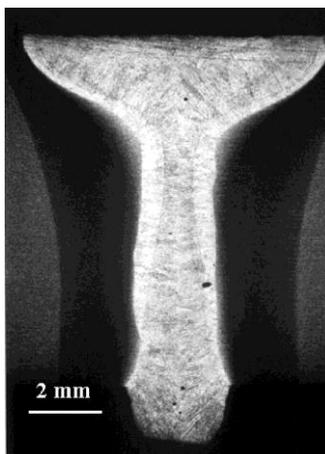


Figura 6 – Macrografia de uma junta de aço carbono soldada a laser. (10)

A energia é absorvida pelo material através de dois mecanismos, os quais somados determinam a energia global transferida para o material. Absorção de Bremsstrahlung inversa (transferência de energia de fótons em elétrons) é o mecanismo dominante em baixas velocidades de soldagem e ocorre no plasma parcialmente ionizado formado acima e no interior do capilar. Absorção de Fresnel por múltiplas reflexões nas paredes internas do capilar é o mecanismo dominante a elevadas velocidades de soldagem, e é dependente da polarização do feixe. Plasma (vapor ionizado) e pluma (material vaporizado) facilitam a transferência de energia do feixe para o material, mas eles também desfocam o feixe de laser, reduzindo a sua densidade de energia (2).

O comportamento do processo de soldagem por furo controlado em diferentes situações de velocidade de soldagem e de potência do laser são ilustrados na figura 7 (11).

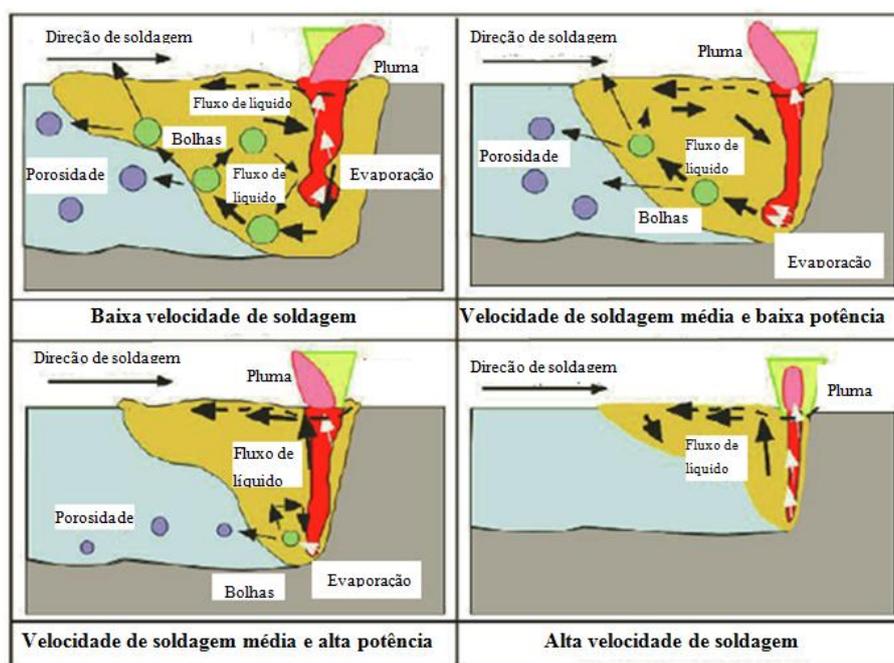


Figura 7– Representação esquemática do comportamento de solda laser por furo controlado em diferentes velocidades de soldagem e potências do laser. (11)

Com baixas velocidades de soldagem o capilar de vapor é mais suscetível a entrar em colapso, dessa forma o feixe de laser atinge a poça de metal fundido ao invés de sofrer múltiplas reflexões no interior do capilar de vapor, assim é gerado um fluxo descendente do metal fundido causado pela pressão de recuo originada da evaporação da frente líquida colapsada. Esse comportamento pode gerar bolhas oriundas da evaporação intensa de metal o que pode originar poros na junta solidificada (11).

Aumentando-se levemente a velocidade de soldagem, uma intensa evaporação se dá na parte frontal do fundo do *keyhole*, onde a camada de metal fundido é mais estreita, deformando a parte traseira do fundo do *keyhole*, onde a camada de metal fundido é menos espessa, gerando bolhas nesta região que podem subir até desaparecer do metal fundido.

Se a tensão superficial do material é suficientemente alta, de forma a manter a estabilidade do *keyhole* a intensa evaporação na ponta do *keyhole* pode causar um fluxo ascendente do material fundido gerando pequenas bolhas nesta região o que pode levar à porosidades na raiz da junta.

Quando a velocidade de soldagem é alta o suficiente, a estabilidade do *keyhole* e a forma como a pluma é ejetada verticalmente previnem a formação de bolhas de modo que haja pouca ou nenhuma porosidade na junta.

Normalmente as bolhas que por consequência formarão porosidade na junta são formadas na ponta do *keyhole* como descrito anteriormente, para evitar a formação das bolhas alguns procedimentos são comprovadamente eficazes, como aumento da velocidade de soldagem, soldagem com penetração completa, leve inclinação do feixe laser na direção de soldagem, frequência de pulsação do laser apropriada, soldagem híbrida com TIG ou MIG em altas correntes, entre outros.

1.3 Parâmetros de solda LASER com influência direta na geometria do cordão.

A geometria de um cordão de junta soldada a LASER possui influência de diversos parâmetros, sejam eles oriundos do equipamento utilizado para a soldagem ou do material que se deseja soldar. Entre eles podem ser citados, diferentes comprimentos de onda, a potência do laser, densidade de potência, qualidade do feixe, diâmetro do feixe, TEM (Modo Transversal Eletromagnético), distância entre a peça e o ponto focal, a velocidade de soldagem, refletividade para o comprimento de onda do feixe, difusividade térmica, tensão superficial, teor de elementos voláteis, fatores ambientais, gás de proteção, o fluxo de gás e vácuo e assim por diante (11).

1.3.1 Modo transversal eletromagnético (TEM)

Dois modos espaciais são geralmente usados para descrever o feixe: longitudinal e transversal. Eles são essencialmente independentes uns dos outros, uma vez que a dimensão

transversal de um ressonador é normalmente consideravelmente menor do que a dimensão longitudinal.

O modo longitudinal é normalmente ignorado na caracterização do feixe, uma vez que tem pouca influência sobre as características do feixe. O modo eletromagnético transversal (TEM) é de importância muito maior. O TEM descreve a variação na intensidade do feixe com a posição de um plano perpendicular à direção de propagação do feixe. Ele caracteriza a intensidade máxima do feixe a partir de seu eixo central.

O TEM é determinado pela geometria da cavidade, o alinhamento e espaçamento interno da cavidade óptica, a distribuição de ganho e propriedades de propagação do meio ativo, e presença de aberturas no ressonador. Em lasers de gás, o fluxo do gás também tem influência sobre o modo gerado. O TEM é descrito por um conjunto de índices que dependem da simetria do feixe (TEM_{plq}), onde p é o número de campos radiais zero, l é o número de campos angulares de zero e q é o número de campos longitudinais zero (5). Como mencionado anteriormente os campos longitudinais exercem pouca influência nas características do feixe e, portanto normalmente não são representados no índice.

A figura 8 demonstra esquematicamente as características e respectivos índices dos principais TEMs de utilização para o processamento de materiais.

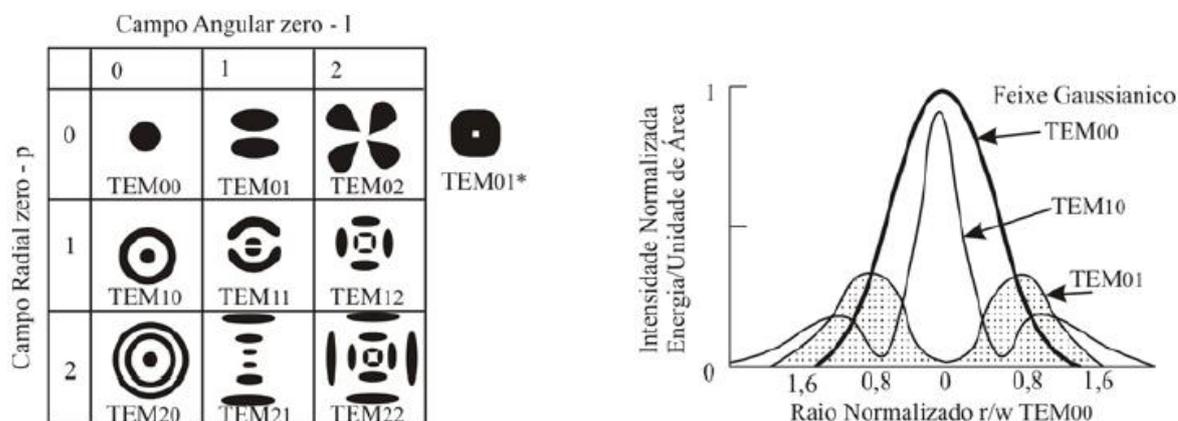


Figura 8 – Modos transversais eletromagnéticos. (5)

O modo TEM₀₀ possui uma distribuição de energia com formato gaussiano conforme ilustrado na figura, dessa forma há uma concentração de energia no centro do feixe o que também ocorre para o modo TEM₁₀, sendo esses modos preferenciais na soldagem por furo controlado. O modo TEM₀₁* é gerado alternando-se dois modos TEM₀₁ ortogonais.

A maioria dos lasers de CO₂ com fluxo axial lento de gás operam em modos de baixos índices devido à geometria longa e estreita do ressonador.

Devido a essa distribuição de energia do feixe determinada pelos modos transversais magnéticos, os mesmos tem influência direta sobre a geometria do cordão de solda.

1.3.2 Potência

A potência, a velocidade de soldagem e a distância do ponto focal em relação à superfície da peça são os principais parâmetros para o estudo da geometria do cordão de solda, pois dado um equipamento de solda LASER e o material que se deseja soldar são, geralmente, os únicos parâmetros os quais o operador pode ter a liberdade de variar para se obter uma geometria do cordão otimizada.

Existem dois modos de aplicar a potência de um LASER sobre um material, o modo de onda contínua (*continuous wave* - CW) e o modo pulsado. No modo contínuo a potência do laser não varia durante o processo de soldagem (a não ser no início e no fim de cada cordão onde a potência varia gradualmente para evitar defeitos como porosidade e mordeduras). No modo pulsado o laser opera em duas faixas de potência denominadas potência base e potência de pico, as potências são alternadas em uma dada frequência chamada de frequência de pulso.

Penetração é função da potência e, portanto, se a potência de pico é aumentada por pulsos, haverá uma penetração maior dada uma potência média. Isso pode ser mais acentuado do que o esperado. Por exemplo, para uma solda no modo pulsado com pulso de 100-500 Hz e uma potência de pico de duas vezes a potência média, uma melhoria de penetração de 30% tem sido relatada na soldagem em aço inox 304 (5). O pico de potência aumentada também significa melhor soldagem de material com alta refletância, uma vez que o *keyhole* é iniciado mais rapidamente. Com o uso de uma potência média de 1 kW, potência de pico de 2kW, frequência de 500 Hz, utilizando uma fonte de Nd: YAG, uma liga de alumínio 6181 foi soldada a cerca de 3 vezes a velocidade de soldagem no modo contínuo com 1 kW de potência ou com um melhoria de 60% na penetração na mesma velocidade de soldagem. Maior poder de pico significa também uma maior tolerância para a posição focal e o modo pulsado significa menos energia depositada na peça de trabalho, levando a uma reduzida distorção. A porosidade também pode ser reduzida ao ajustar a frequência de pulso com a frequência ressonante da poça líquida como ilustrado na figura 9.

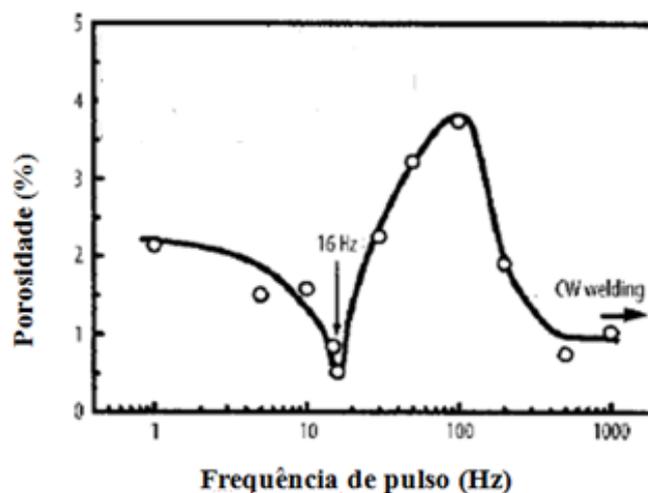


Figura 9 – Porosidade x Frequência de pulso para soldagem por furo controlado usando uma fonte de CO₂. (5)

Potência e velocidade de soldagem geralmente são associadas e, para uma dada velocidade de soldagem, a penetração aumenta proporcionalmente com o aumento da potência (figura 10). Sabe-se que em potências mais altas o intervalo de velocidades de soldagem é maior sendo os limites deste intervalo dados pela falta de penetração a altas velocidades e mordedura a baixas velocidades. A figura 10 mostra a variação na penetração de uma solda LASER para uma dada velocidade de soldagem. Observa-se que a partir de 1000 W a curva muda a sua inclinação, isso porque a soldagem passa do modo de condução para a soldagem por furo controlado.

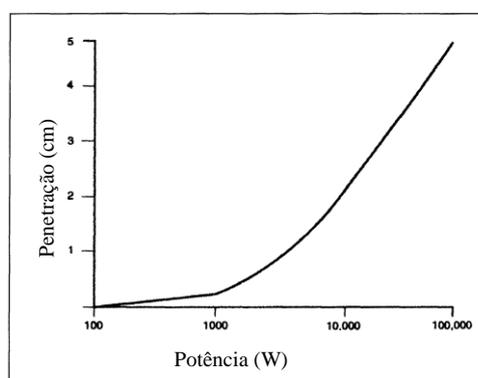


Figura 10 – Variação da penetração em função da potência para uma dada velocidade de soldagem (5).

Atualmente existem LASERs de CO₂ com capacidade de até 50kW de potência, potência suficiente para atingir penetrações de até 40mm em um único passe, porém LASERs com menor comprimento de onda como o de Nd:YAG (capacidade de até 6kW de potência) podem atingir maiores penetrações utilizando a mesma potência de soldagem que um laser de CO₂, isso porque o LASER de Nd:YAG é capaz de produzir um feixe com diâmetro reduzido

obtendo assim uma maior intensidade (além de seu comprimento de onda ser melhor absorvido pelos materiais), outro parâmetro muito importante em soldagem por LASER.

A intensidade, E , é facilmente obtida pela equação 2 abaixo (2):

$$E = \frac{P}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \quad \text{Equação 2.}$$

Onde P é a potência do LASER e D é o diâmetro do feixe no ponto focal.

1.3.3 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem é um dos parâmetros mais visados na indústria, pois a sua otimização pode fazer uma grande diferença de tempo quando se trata de soldagem em larga escala. A velocidade de solda LASER já é inerentemente alta se comparada com outros processos de soldagem a arco elétrico sendo o grande diferencial do processo.

Seus efeitos na geometria do cordão são relativos ao tempo de residência do feixe de LASER sobre a peça, sendo que em menores velocidades o tempo de interação do LASER com uma dada porção de material é maior ocasionando um aumento de penetração, porém este maior tempo de interação também leva a uma maior energia transferida para o material o que pode elevar a distorção.

O tempo de interação, τ , é dado por (2):

$$\tau = \frac{D_f}{V} \quad \text{Equação 3.}$$

Onde D_f é o diâmetro do feixe no ponto focal e V é a velocidade de soldagem.

Velocidades baixas de soldagem também podem desestabilizar o *keyhole* gerando defeitos no cordão. A geometria do cordão é geralmente mais larga em baixas velocidades de soldagem apresentando uma maior susceptibilidade à presença de mordedura, isso porque a poça líquida é larga demais de modo que a tensão superficial não tem força o suficiente para “segurar” a poça causando uma depressão representada esquematicamente na figura 11, D. Em B está representado um defeito associado à altas velocidades de soldagem causado pelo forte fluxo de material fundido em direção ao centro do cordão após a passagem do LASER, o material não tem tempo o suficiente para se distribuir e solidifica com uma saliência no centro do cordão e com mordeduras nas bordas. Se a potência é suficientemente elevada e a poça líquida suficientemente grande, então o mesmo ocorre. O centro da poça tem uma pressão que é uma função da sua tensão superficial e curvatura (5). Isto conduz a uma instabilidade da pres-

são ao longo do comprimento da poça líquida, fazendo com que o haja um deslocamento de metal fundido das áreas com maior pressão para as áreas de menor pressão gerando defeitos com formato de corcova ao longo do da secção longitudinal do cordão. A Figura 11 mostra em “a” uma geometria de solda desejável para uma penetração completa.

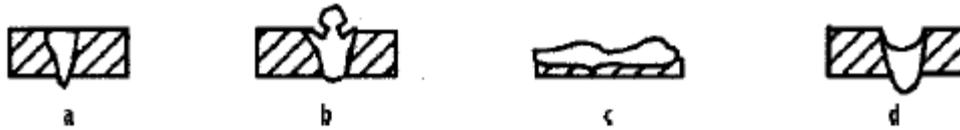


Figura 11 – Defeitos relacionados à velocidade de soldagem. (5)

Para velocidades elevadas de soldagem, o efeito da condução térmica ao redor da solda é minimizado, portanto é possível obter a seguinte equação, derivada de processos de corte a LASER (4):

$$0,483P(1 - r_f) = Vwg\rho C_p T_m \quad \text{Equação 4.}$$

Onde P é a potência, r_f é a refletância, V é a velocidade de soldagem, w é a largura do cordão, g é a penetração. ρ é a densidade do material, C_p é o calor específico do material, e T_m é a temperatura de fusão do material. Para a elaboração desta equação o calor latente foi ignorado, e a potência foi considerada como uma linha de energia ao longo do eixo do feixe. Por isto a equação é mais precisa utilizando como constante 0,25 a 0,3 ao invés de 0,483 e utilizando um feixe finamente focado (5).

Através desta equação é possível determinar a velocidade de soldagem para uma dada junta utilizando uma dada potência. Isolando g , é possível determinar a penetração esperada para os parâmetros utilizados na soldagem.

Outra equação, criada especificamente para processos de soldagem por furo controlado e que considera o calor latente é apresentada a seguir (2):

$$P(1 - r_f) = r_b gVL_v + \left(\frac{g^2}{4}\right) VL_f + \frac{2\pi\lambda(T_f - T_0)}{\ln(8)} \quad \text{Equação 5.}$$

Onde, r_b é o raio do feixe, L_v é o calor latente de vaporização, L_f é o calor latente de fusão, λ é a condutividade térmica, T_f é a temperatura de fusão e T_0 é a temperatura ambiente.

A extensão da ZAC pode ser estimada em função da velocidade de soldagem utilizando a seguinte equação derivada da segunda lei de Fourier assumindo que o número de Fourier é igual a 1 (5):

$$ZAC = \sqrt{\alpha t} \quad \text{Equação 6.}$$

Onde “ α ” é a difusividade térmica do material e “ t ” é o tempo de interação do feixe com o material.

A velocidade de soldagem LASER pode ser alta o suficiente de modo que a poça líquida ainda esteja formada, ou ainda esteja quente o suficiente para reagir com a atmosfera, enquanto o cabeçote de soldagem avança, dessa forma a poça pode ficar fora do raio de ação do gás de proteção ocasionando a formação de óxidos e nitretos indesejáveis no cordão. Nesses casos o cabeçote deve ter uma segunda saída de gás atuando na região previamente soldada.

1.3.4 Gases de proteção e soldagem

Os gases de soldagem tem uma forte influência na geometria do cordão, principalmente no processo por furo controlado isso porque o processo esta diretamente relacionado à formação de plasma o que influencia diretamente na energia absorvida pelo material, o plasma interage com o laser reduzindo a quantidade de energia depositada na peça.

A teoria magnética clássica relaciona o limite de ruptura (ponto no qual um plasma de alta densidade óptica é formado) à força do campo eletromagnético formado pelo feixe de LASER, sendo que o limite de ruptura é inversamente proporcional ao quadrado do comprimento de onda do feixe. No processo de soldagem por furo controlado, os vapores de metal que são gerados têm potenciais de ionização muito menores do que os gases atmosféricos. Tal vapor fornece elétrons livres, que podem absorver diretamente feixes de fótons pelo o processo de Bremsstrahlung inverso, e eventualmente aliado, a ruptura atmosférica ocorre.

O plasma é removido da zona de interação através de um jato de gás que pode acompanhar ou anteceder o feixe de LASER, esse jato é denominado gás de soldagem. A formação de plasma é proporcional ao potencial de ionização do gás, dessa forma para reduzir a produção de plasma no *keyhole* o gás de soldagem com melhor eficiência é aquele com um potencial de ionização maior. Na tabela 1 estão listados os meios de utilização em soldagem LASER e seus respectivos potenciais de ionização

Meio	1° Potencial de Ionização (eV)
Argônio	15,7
Dióxido de Carbono	14,4
Hélio	24,5
Nitrogênio	14,5
Alumínio	6,0
Ferro	7,8

Tabela 1 – Potenciais de ionização para diferentes meios. (2)

Pela tabela podemos observar que o gás com maior potencial para ser usado em soldagem por LASER é o hélio devido ao seu maior potencial de ionização. De fato suas vantagens em relação à utilização se comparada com outros gases de processamento LASER são comprovadas entre elas podemos citar, a criação de um cordão mais estreito com ganho na penetração, ZAC mais estreita, baixa porosidade e maior tolerância para alterações de parâmetros no processo. O argônio é freqüentemente utilizado como substituto do hélio devido ao seu menor preço de mercado, principalmente em LASERs de reduzido comprimento de onda pois estes tem menor interação com o plasma. A utilização de argônio pode causar mordeduras na junta o que pode ser suprimido adicionando à mistura de gás de 1-5% de O₂ ou de 3-25% de CO₂. Freqüentemente o argônio é misturado ao hélio em proporções de até 50% para redução de custos sem alterar significativamente o controle do plasma. Nitrogênio e argônio também são freqüentemente utilizados como gases de proteção devido à sua maior densidade o que mantém o gás próximo do cordão aquecido (2).

A figura 12 mostra as diferentes geometrias de cordão utilizando diferentes gases de soldagem para uma liga de Aço inoxidável AISI 304 com potência de 10 kW a 25mm/s com um laser de CO₂ (11). Podemos observar a vantagem em se misturar Argônio ao Hélio na proporção de 25% com o objetivo de reduzir os custos, pois a geometria do cordão foi praticamente inalterada. Nota-se também que é impraticável a soldagem utilizando-se 100% de argônio devido às reduzidas dimensões do cordão. O Nitrogênio, também utilizado como substituto para o hélio, principalmente em produção em série de um grande número de peças, também teve uma penetração reduzida para os mesmos parâmetros, porém em condições otimizadas de soldagem o mesmo pode apresentar cordões de solda com características semelhantes às apresentadas em soldas utilizando-se o hélio como gás de soldagem.

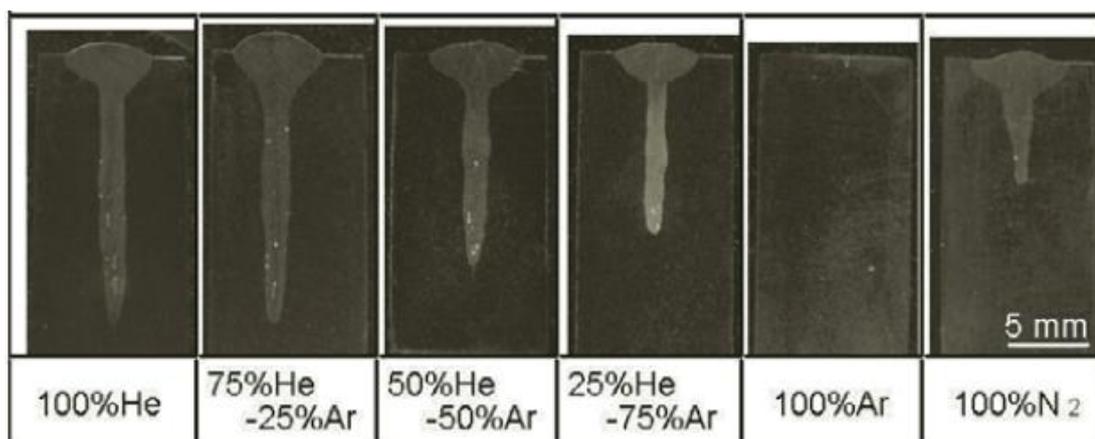


Figura 12 – Geometrias de cordão para diferentes gases de soldagem. (11)

A utilização de N₂ como gás de soldagem apresenta algumas limitações como a necessidade de utilizar uma vazão maior de gás o que pode levar à incorporação de ar no cordão causando porosidade. Na soldagem de aços estruturais o nitrogênio dissolvido no metal fundido se combina com o ferro, formando nitreto de ferro, um composto muito duro e frágil. A absorção de nitrogênio no metal soldado em aços austeníticos aumenta a proporção de austenita no metal solidificado, reduzindo a proporção de ferrita delta, o que pode levar a trincas de solidificação no cordão de solda.

1.3.5 Profundidade de foco e distância do ponto focal em relação à superfície da peça

A profundidade de foco é definida como a distância na qual o diâmetro do feixe focado possui uma variação menor do que 5% ou seja, a distância útil na qual o feixe possui praticamente a mesma intensidade. Para um feixe gaussiano (TEM₀₀) a profundidade de foco (z_f) pode ser descrita por (2):

$$z_f = \pm 2,56 F^2 \lambda \quad \text{Equação 7.}$$

Onde F é igual à distância focal f sobre o diâmetro inicial do feixe D (f/D) e λ é o comprimento de onda do feixe LASER.

A literatura sugere que o ponto focal deve estar 1mm abaixo da superfície da peça para atingir uma máxima penetração, considerando que deve haver um diâmetro mínimo do feixe para que haja uma densidade de potência suficiente para iniciar a formação do *keyhole* e que esta densidade de potência esteja disponível no interior do *keyhole* para que o mesmo mantenha a estabilidade (5).

Na figura 13 estão ilustrados os efeitos da posição do ponto focal em relação à peça sendo que para o aço SAE 1018 a penetração varia mais de 100% comparando a posição do ponto focal exatamente sobre a peça e em torno de 1mm abaixo da superfície da peça(A), podemos observar também que para uma lente com distância focal maior temos uma menor penetração porém uma menor variação na penetração em função da posição do foco em relação à peça isso porque lentes de maior comprimento focal produzem feixes de menor diâmetro e maior profundidade de foco de acordo com a equação 2.

Em (B) é apresentado o diâmetro do feixe em função da distância a partir do foco da lente para dois valores de F . A área sombreada mostra a relação parabólica entre a profundidade de foco, z_f , F e o diâmetro mínimo do feixe. A linha horizontal tracejada representa o diâmetro mínimo do feixe, a uma dada velocidade de soldagem, para a criação do *keyhole*. Analisando as duas figuras percebe-se que a posição ideal do ponto focal varia de acordo com o parâmetro F que sofre influência direta da fonte laser e do espelho de focalização.

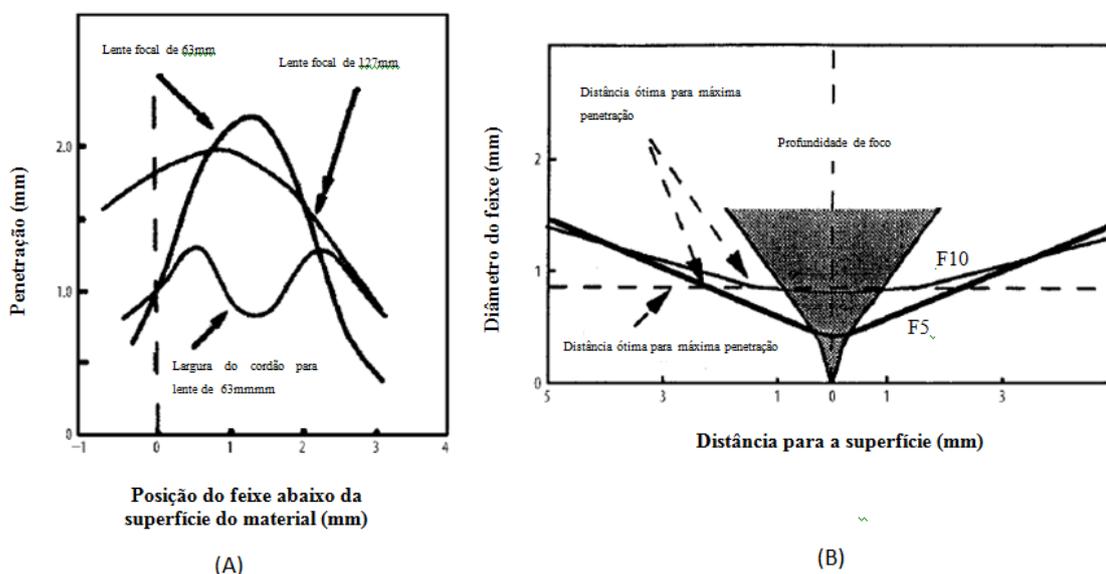


Figura 13 – Influência da posição focal na penetração para diferentes lentes focais para um aço SAE 1018 (A) e Diâmetro do feixe x Posição focal (B). (5)

1.3.6 Tipos de Junta e dimensão da abertura

Uma grande variedade de juntas podem ser feitas em soldagem por LASER de modo que a limitação é o arranjo e geometria do equipamento. Na figura 14 estão alguns exemplos de juntas que podem ser feitas em soldagem por LASER

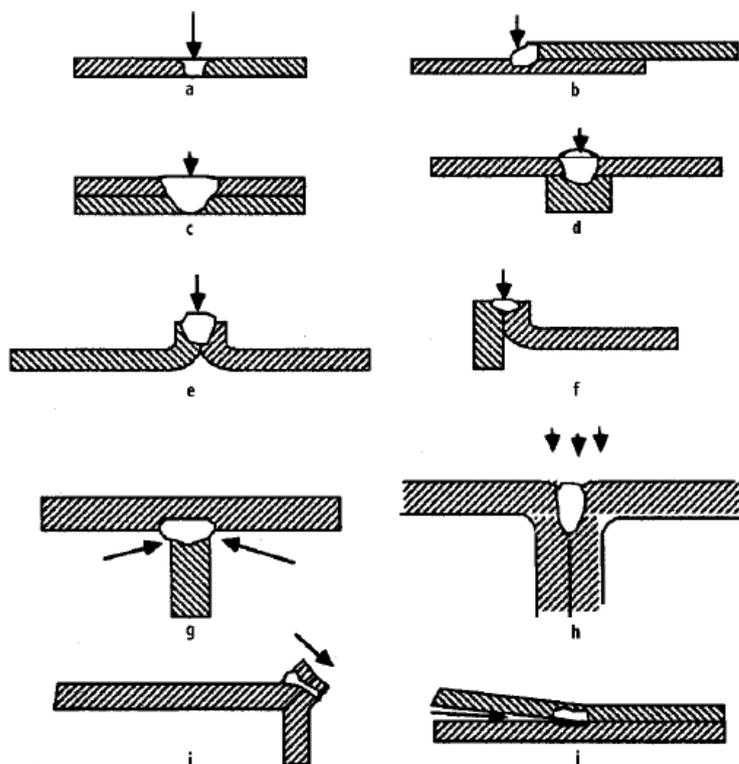


Figura 14 – (a) Junta de topo, (b) Junta de aresta, (c) Junta por ponto ou sobreposta, (d) Junta de canto, (e) e (f) Junta de aresta, (g) Junta de filete, (h),(i) e (j), junta de aresta. (5)

A distância de raiz em juntas de topo deve ser estreita o suficiente para que o feixe de laser não passe diretamente pela junta ou seja a distância de raiz deve ser menor ou igual à metade do diâmetro do feixe de LASER. Isso pode ser obtido por meio de uma precisa preparação das arestas da peça e com um sistema eficiente de fixação da peça pela máquina de solda LASER.

Solda a laser exige uma distância de raiz mais estreita do que os processos tradicionais de soldagem por arco elétrico por causa do pequeno tamanho da fonte de calor, bem como a fato de que a maioria das soldas são autógenas (sem metal de adição). O efeito de uma distância de raiz excessiva é geralmente falta de fusão nos piores casos ou mordedura para aberturas menores. A proporção de mordedura que apresentará uma solda de topo está diretamente relacionada com o tamanho da distância de raiz e a largura da solda, com soldas estreitas sendo mais sensíveis à abertura. A maioria dos profissionais usa uma regra de ouro na qual a abertura máxima deve ser inferior a 5% da espessura da chapa mais fina de material a ser soldado (6). Esta regra aplica-se tanto para soldas de topo e quanto para soldas sobrepostas.

Juntas sobrepostas permitem maior tolerância de posição do feixe, mas há várias limitações. Elas exigem maior energia de soldagem do LASER, porque o componente de topo é fundido sem criar qualquer junta de solda até que o componente de fundo inicia a fusão. Por esta razão, a soldagem sobreposta por LASER deve ser sempre de uma chapa fina sobre uma chapa grossa para minimizar a energia de soldagem e maximizar a velocidade de soldagem. A penetração de solda sobreposta também determina a diluição de dois metais dissimilares. Uma penetração mínima na chapa inferior pode melhorar as características metalúrgicas do cordão de solda.

Na maioria dos casos, é a largura do cordão, na interface que determina a resistência da solda sobreposta, por isso, se a largura do cordão é maior do que a espessura da chapa do componente mais fino a resistência da solda é maximizada.

1.4 Soldagem de aço inoxidável austenítico AISI 304

Os aços inoxidáveis AISI 304 tem uma ampla utilização na indústria devido à suas propriedades, como alta resistência contra a corrosão, elevada tenacidade boa conformabilidade e boa resistência mecânica. Entre as diversas aplicações, pode-se destacar para o aço inoxidável austenítico 304 soldado por LASER sistemas de troca de calor comumente chamados "pillow plate". *Pillow plates* são chapas soldadas através de juntas sobrepostas, que são posteriormente expandidas com um meio adequado, geralmente água, formando região na qual o meio de aquecimento ou resfriamento irá fluir de forma a trocar calor com o produto que se deseja aquecer ou resfriar. Estes sistemas de troca térmica possuem a vantagem de haver uma grande área de troca e um volume maior de "área molhada" (região na qual o meio de troca térmica irá fluir), além de resistirem a altas pressões de trabalho devido às características otimizadas da junta soldada por LASER gerando assim uma melhor eficiência em relação aos sistemas de troca térmica concorrentes. Na figura 15 esta ilustrado o *pillow plate* com um corte transversal demonstrando a área molhada do sistema.

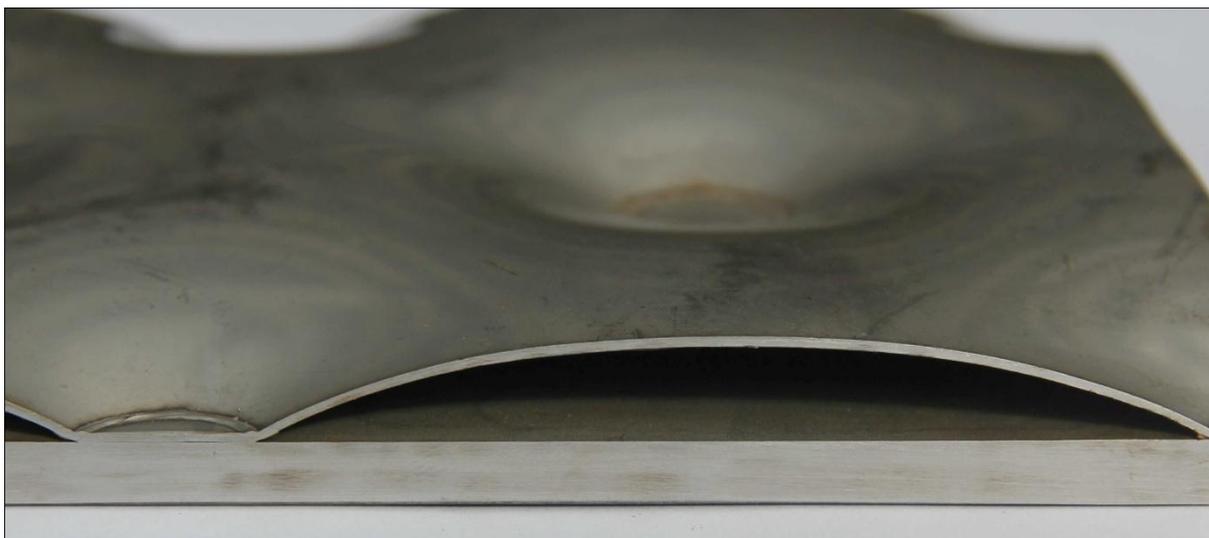


Figura 15 – Corte transversal de sistema de troca térmica *pillow plate*. (12)

É possível prever a microestrutura do metal de solda de aços inoxidáveis através do diagrama de Schaeffer sabendo a sua composição química (tabela 2). Para isso Schaeffler considerou no eixo y os elementos gamagênicos e no eixo x os elementos alfa gênicos conforme ilustrado na figura 16. A posição do aço inoxidável AISI 304 neste diagrama esta representada por um ponto vermelho. Pode-se presumir que a maior parte da microestrutura formada será austenita com 5 a 10% de formação de ferrita delta. Porém este diagrama não leva em consideração a taxa de resfriamento e foi construído com base em processos de fusão a arco elétrico e, portanto somente fornece uma quantidade estimada de ferrita delta na microestrutura final do metal de solda. Devido as altas energias e taxas de resfriamento do processo de soldagem por LASER esse diagrama deve ser utilizado com precaução (2).

C (% máx.)	Mn (% máx.)	P (%máx)	S (% máx.)	Si (% máx)	Cr (%)	Ni (%)	Outros elementos
0,08	2,00	0,045	0,030	1,00	18-20	8-10,50	(--)

Tabela 2 – Composição química de aço inoxidável AISI 304. (13)

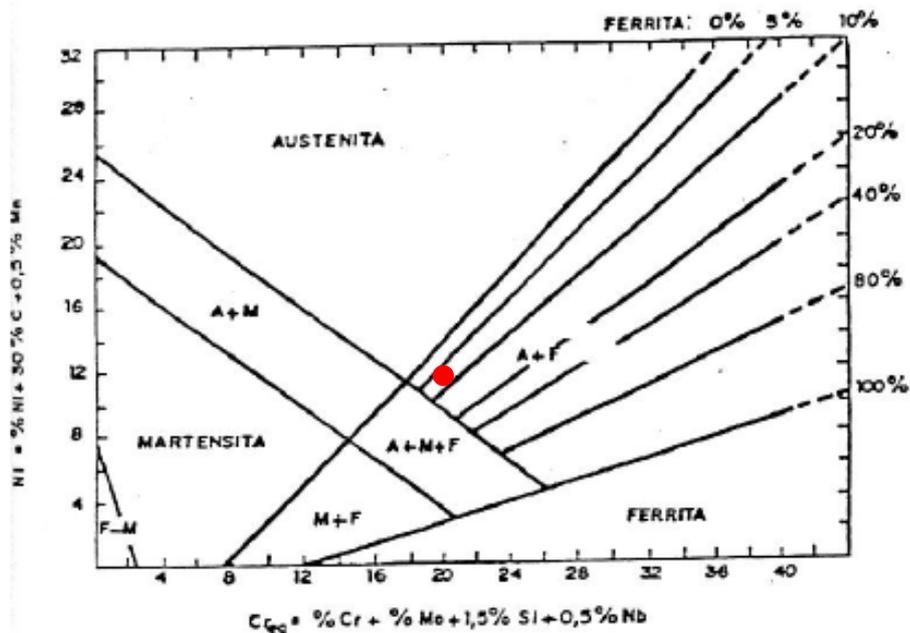


Figura 16 – Diagrama de Schaeffler com a posição do aço inoxidável AISI 304 demarcada. Adaptado de (14).

As soldas dos aços inoxidáveis austeníticos podem solidificar inteiramente como austenita ou inicialmente como austenita e posteriormente como ferrita ou inicialmente como ferrita e depois como austenita ou ainda inteiramente como ferrita, à medida que a relação $(Cr/Ni)_{eq}$ aumenta. Posteriormente, durante o resfriamento parte da ferrita formada durante a solidificação pode se transformar em austenita.

A transformação da ferrita delta em austenita é completa somente se o aço permanecer por um tempo suficientemente longo na faixa de temperatura na qual a cinética é mais favorável. Este não é geralmente o caso das soldas, onde o resfriamento rápido causa a retenção de ferrita delta até a temperatura ambiente. A morfologia e quantidade de ferrita irá depender da composição química e da velocidade de resfriamento. Quanto maior for esta velocidade, menor deve ser a extensão desta transformação. Em soldagem por LASER no modo de onda contínua foi reportada uma solidificação ferrítica-austenítica onde a ferrita delta é termodinamicamente a primeira fase a solidificar, sendo esta presente em pequenas quantidades no metal de solda à temperatura ambiente (15).

A soldagem dos aços austeníticos apresenta alguns problemas característicos como trincas de solidificação, sensitização e em menor escala a formação de fase sigma.

Trincas de solidificação estão associadas à presença de segregações (principalmente de S, Si e P) que levam a formação de filmes líquidos nos contornos ocasionando trincas.

Estas trincas se formam a altas temperaturas próximas da linha sólidos do material e geralmente afloram na superfície do cordão sendo facilmente detectadas por ensaios com líquido penetrante. A prevenção da formação deste tipo de trincas em aços inoxidáveis austeníticos é feita de modo a garantir a presença de ferrita delta na microestrutura final do metal de solda. A ferrita delta dilui em maior proporção do que a austenita os elementos formadores de filme, desta forma não haverá segregação e, portanto evita-se a formação deste defeito. Estima-se que uma quantidade de 3% a 8% de ferrita delta na microestrutura seja suficiente para prevenir este defeito (2).

A sensitização ocorre devido à precipitação de carbonetos de cromo na região do contorno de grão austenítico, tornando esta região empobrecida em cromo e, portanto mais suscetível à corrosão. A precipitação destes carbonetos ocorre na faixa de temperatura de 450°C a 850°C se o material permanecer por tempo suficiente nesta faixa de temperatura. A sensitização ocorre nas regiões da ZAC onde as taxas de resfriamento são menores, em soldagem por LASER as taxas de resfriamento são muito superiores aos processos a arco elétrico, sendo assim não há tempo o suficiente para a precipitação destes carbonetos e a probabilidade de haver sensitização é mínima (6).

A fase sigma é um composto intermediário de Cr-Fe na proporção aproximada de um átomo de Cr para cada átomo de ferro e seu principal problema é a fragilidade a frio. A formação de fase sigma é muito rara em soldagem de aços inoxidáveis austeníticos, pois é necessária a permanência do material em grandes períodos de tempo a temperaturas superiores a 600°C. Em soldagem por LASER, cujas taxas de resfriamento são altíssimas, não deve ocorrer a formação desta fase (15).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Material

Para a realização deste estudo foram utilizadas duas chapas de aço inox AISI 304 com diferentes espessuras que passaram por diferentes processos de laminação. A chapa de 1,0 mm de espessura, com acabamento superficial 2B, foi laminada à frio, recozida, decapada, com posterior passe de laminação a frio com rolos polidos. A chapa de 5,0 mm de espessura, com acabamento superficial N°1, foi laminada a quente, recozida e decapada. Abaixo segue tabela com a composição química típica do material.

3.2 Confeção dos corpos de prova

As chapas de aço inox AISI 304 foram cortadas por LASER formando um retângulo de 300 mm x 150 mm. Posteriormente ao corte, as chapas foram rebarbadas com uma esmerilhadeira angular para otimizar o contato entre as duas chapas, então foram limpas com auxílio de limpa vidros comercial sem compostos orgânicos voláteis e um pano de feltro até a remoção total de oleosidade e sujidades. Após, as chapas foram posicionadas de maneira sobreposta e ponteadas com uma máquina de solda TIG sem metal de adição ao longo de todo o seu perímetro para garantir a posição relativa de uma chapa sobre a outra.

As chapas foram então soldadas a LASER na empresa Liess Máquinas e Equipamentos utilizando uma máquina de solda LASER Omega Quadra Clamp 1S (figura 17). A máquina utiliza uma fonte LASER de CO₂ Rofin Sinar DC025 com potência máxima de 2500 W, produz um feixe gaussiano no modo TEM₀₀ e opera no modo de onda contínua, o espelho de focalização é um espelho parabólico refrigerado a água com distância focal de 200 mm conferindo um diâmetro do feixe no ponto focal $D_f = 0,135$ mm. Como gás de soldagem foi utilizada uma mistura de 80% de Hélio com 20% de Argônio, para o gás de proteção foi utilizada uma mistura de 95% de N₂ com 5% de H₂. O ponto focal foi posicionado a 1 mm abaixo da superfície da chapa.



Figura 17 – Máquina de solda Omega Quadra Clamp 1S. (Fonte: Liess Máquinas e Equipamentos)

No total foram realizados doze cordões de junta sobreposta com 100 mm de comprimento no sentido da largura das chapas anteriormente preparadas. Para evitar a influência de um cordão sobre o outro, as soldas foram realizadas a uma distância média de 20 mm de um cordão para o outro. Todos os parâmetros citados anteriormente foram mantidos constantes, os corpos de prova foram separados em dois grupos, em um deles foi mantida uma potência constante e foi variada a velocidade de soldagem, no outro grupo foi mantida a velocidade de soldagem constante e foi variada a potência de soldagem conforme tabela 3 a seguir.

Amostras com Potência Fixada em 2375 W	Velocidade de soldagem (mm/min)	Amostras com velocidade fixada em 5500 mm/min	Potência de Soldagem (W)
P2375V1000	1000	V5500P1000	1000
P2375V2000	2000	V5500P1250	1250
P2375V3000	3000	V5500P1500	1500
P2375V4000	4000	V5500P1750	1750
P2375V5000	5000	V5500P2000	2000
P2375V6000	6000	V5500P2375	2375

Tabela 3 – Parâmetros utilizados para a confecção dos corpos de prova

As chapas com os cordões de solda foram então serradas em pedaços menores com uma serra fita. Uma tira com aproximadamente 20 mm de largura foi serrada no sentido perpendicular aos cordões de solda para posterior preparação. A figura 18 a seguir mostra a vista superior dos cordões soldados.



Figura 18 – Vista superior dos cordões de solda

A tira foi então serrada com uma serra metalográfica com refrigeração a água de forma a separar individualmente os cordões de solda em amostras menores. Um cuidado especial foi tomado para garantir a perpendicularidade do cordão em relação à superfície de análise com o propósito de garantir a confiabilidade das medidas das dimensões do cordão.

As amostras foram então embutidas de duas em duas em baquelite, utilizando uma embutidora Thermopress.

3.3 Metalografia e análise da geometria do cordão

Para realização de metalografia as amostras embutidas foram lixadas manualmente com lixas d'água de diferentes granulometrias progressivamente, passando pelas lixas #100, #400, #600 e #1200. Após, as amostras foram polidas com auxílio de politriz, utilizando pasta diamantada com granulometria de 1μ . A amostra P2375V1000 foi excluída das análises devido à geometria irregular do cordão, ocasionada principalmente pelo fato de o *keyhole* ser muito instável à baixas velocidades.

O cordão de solda e o contorno de grão foram então revelados com um ataque eletrolítico utilizando uma solução de ácido oxálico diluído em água deionizada na proporção de 1:10 utilizando uma ddp de 8 mV por aproximadamente 45 segundos. Após as amostras foram limpas com água e posteriormente foram embebidas em álcool e secadas com auxílio de um secador de cabelo.

As amostras reveladas foram analisadas e fotografadas com um microscópio Olympus BX51M com câmera digital acoplada. Para a análise do cordão de solda foi necessário a composição panorâmica de imagens com o software Microsoft Image Composite Editor a fim de obter uma única imagem com a totalidade da geometria do cordão. Os cordões de solda foram então dimensionados com auxílio do software Image J quanto à penetração, largura do cordão na superfície, largura do cordão à meia penetração e largura do cordão na posição da junta. O tamanho de grão médio foi determinado na região da ZAC na chapa sobreposta e comparado com o tamanho de grão médio do material base.

Adicionalmente os dados de penetração obtidos com a metalografia foram comparados com dados teóricos extraídos das equações 4 e 5. Na equação 4 foi utilizada a refletância $r_f = 0,35$ e como constante 0,35 ao invés de 0,483 e a largura do cordão “w” foi utilizado os dados obtidos experimentalmente a $\frac{1}{2}$ penetração. Para equação 5 foi utilizado $r_f = 0,35$. Os dados da tabela 4 complementam o restante dos parâmetros utilizados para os cálculos.

Propriedades térmicas de aços AISI 304	
λ (J/s.m.K)	25.5
C_p (j/kg.K)	450
a (m ² /s)	0.0000072
T_m (K)	1773
T_v (K)	3300
L_m (J/m ³)	2203600000
L_v (J/m ³)	48794000000

Tabela 4 – Propriedades térmicas de aços AISI 304. (2)

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Geometria do cordão

Como visto anteriormente, as dimensões do cordão estão diretamente relacionadas aos parâmetros de velocidade e potência de soldagem. A penetração é a característica mais influenciada por estes parâmetros seguida da largura na superfície, sendo essas características diretamente proporcionais à potência de soldagem e inversamente proporcionais à velocidade de soldagem. Com as equações 2 e 3 pode-se calcular a intensidade do feixe e o tempo de residência do feixe sobre a peça para os parâmetros utilizados neste trabalho. Os dados calculados se encontram na tabela 5 a seguir.

Amostras com intensidade fixada em $1.66E+05$ W/mm ²	Tempo de residência do feixe (s)	Amostras com tempo de residência fixado em $4.09E-07$ s	Intensidade do feixe (W/mm ²)
P2375V1000	2.25E-06	V5500P1000	6.99E+04
P2375V2000	1.13E-06	V5500P1250	8.73E+04
P2375V3000	7.50E-07	V5500P1500	1.05E+05
P2375V4000	5.63E-07	V5500P1750	1.22E+05
P2375V5000	4.50E-07	V5500P2000	1.40E+05
P2375V6000	3.75E-07	V5500P2375	1.66E+05

Tabela 5 – Tempos de residência e intensidade do feixe para as amostras

As macrografias das amostras se encontram nas figuras 20, 21, 22 e 23. Nota-se claramente que se trata de soldagem por furo controlado com cordões de alta razão de penetração/largura do cordão. As penetrações variaram de 1,29 mm para a amostra V5500P1000 até 5,46 mm para a amostra P2375V2000, caracterizando a mínima e máxima penetração atingida pelo equipamento operando o mesmo de modo a preservar a integridade de seus componentes, considerando que potências muito altas ou muito baixas podem diminuir a vida útil da fonte de LASER e velocidades muito altas podem diminuir a vida útil dos componentes mecânicos do equipamento. As larguras dos cordões na superfície tiveram uma variação de 0,81 mm para a amostra V5500P1000 até 2,59 mm para a amostra P2375V2000 já as larguras de cordão medidas à meia penetração e na interface das chapas obteve uma menor variação, de 0,34 mm até 0,94 mm respectivamente para as amostras V5500P2375 e P2375V2000. Isso devido ao fato que na superfície do material o feixe LASER é absorvido de forma mais eficiente com menos influência do plasma gerado no interior do capilar.

A maioria das amostras, com exceção da amostra P2375V2000 e P2375V4000, apresentaram porosidade localizada na extremidade do cordão na região da interface entre as chapas, provavelmente devido ao efeito da distância de raiz. Já as amostras P2375V5000, P2375V6000 e V5500P2000 apresentaram porosidade na região da raiz do cordão, nota-se que as três amostras que apresentaram esta porosidade possuem alta velocidade de soldagem e intensidade do feixe. Segundo (11), provavelmente a velocidade de soldagem não é alta o suficiente para a dada intensidade do feixe, e devido à intensa evaporação de material no fundo do *keyhole* um fluxo ascendente de metal fundido “aprisionou” as bolhas formadas gerando porosidade nesta região. No entanto, como a análise se deu em um corte transversal do cordão de solda não se pode afirmar que não haja porosidade nas demais amostras nem que a porosidade encontrada nessas amostras é regular ao longo do cordão de solda. A amostra que apresentou a melhor condição de soldagem foi a V5500P1250, pois obteve penetração suficiente com uma largura de cordão na junta razoável e utilizou uma baixa potência com uma alta velocidade otimizando os custos e o tempo do processo.

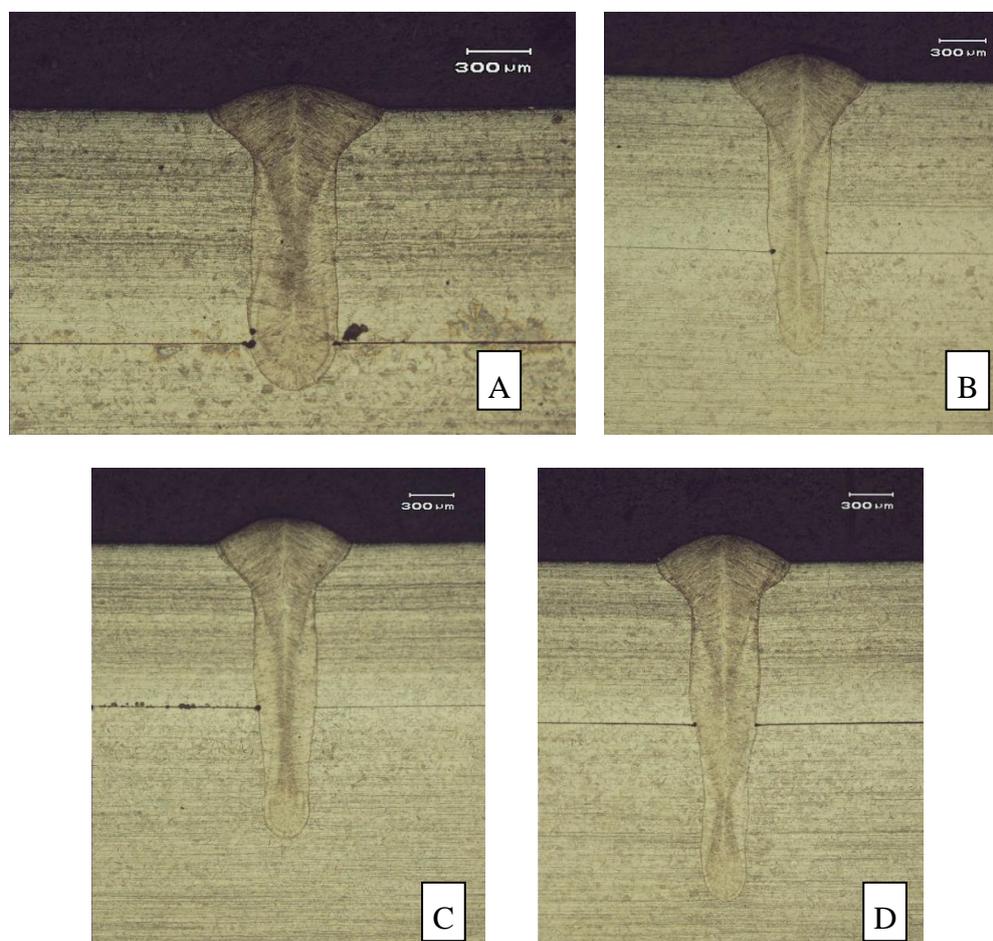


Figura 20 – Macrografias: (A) Amostra V5500P1000, (B) Amostra V5500P1250, (C) Amostra V5500P1500, (D) Amostra V5500P1750.

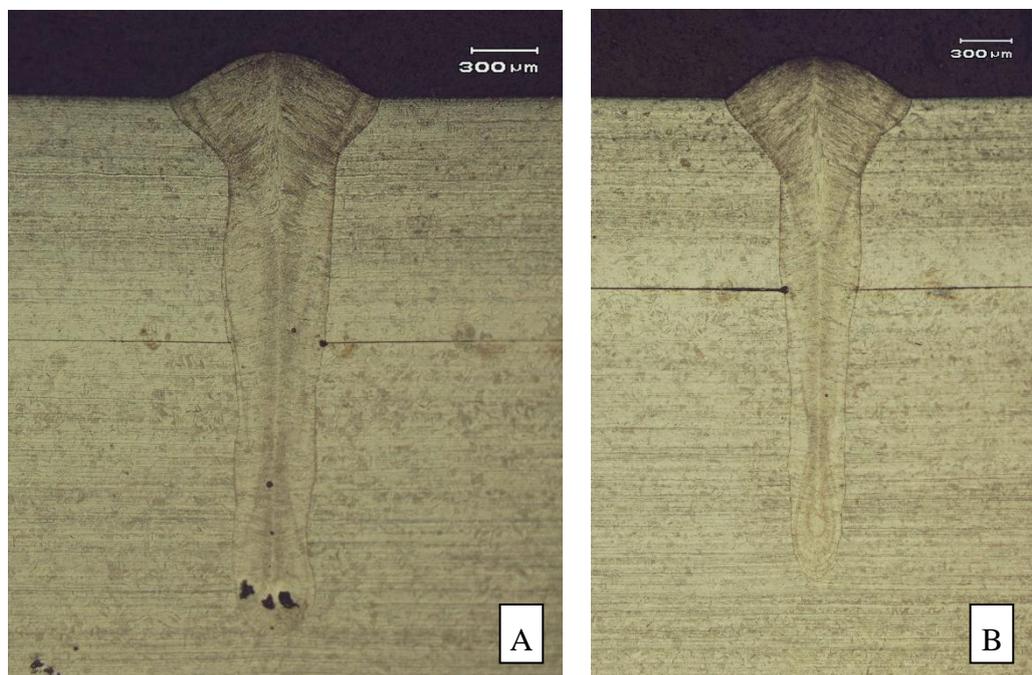


Figura 21 – Macrografias: (A) Amostra V5500P2000, (B) V5500P2375

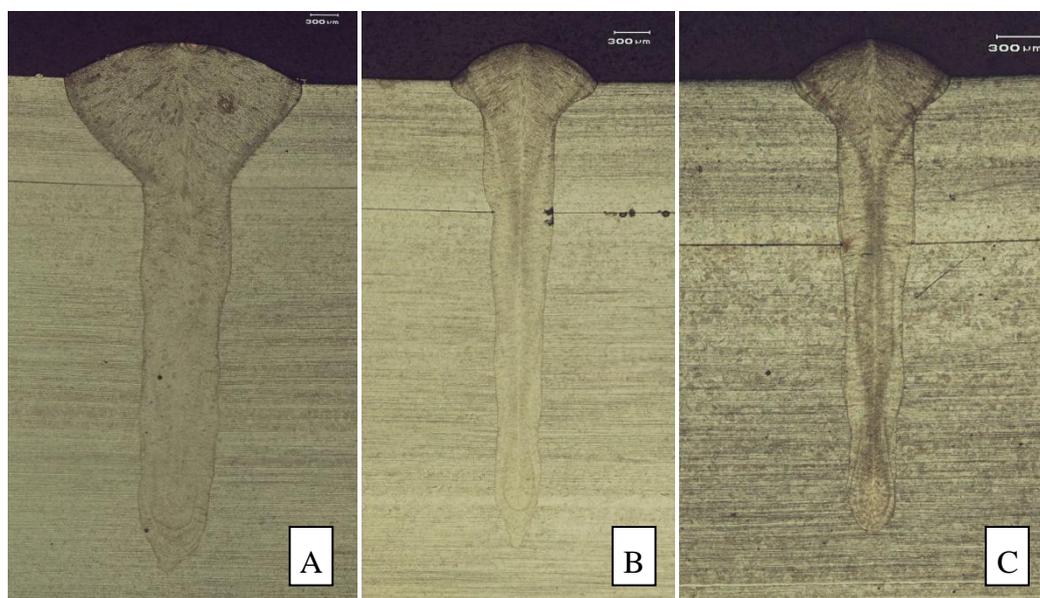


Figura 22 – Macrografias: (A) Amostra P2375V2000, (B) Amostra P2375V3000, (C) Amostra P2375V4000



Figura 23- Macrografias: (A) Amostra P2375V5000, (B) P2375V6000

As tabelas 6 e 7 apresentam os resultados da análise da geometria do cordão através das macrografias. Com estes resultados elaboraram-se os gráficos representados nas figuras 24, 25, 26, e 27. Fica evidente a grande influência da alteração dos parâmetros velocidade de soldagem e potência de soldagem na penetração atingida. Ao fixar a velocidade e variar a potência observa-se uma tendência a linearidade em relação à penetração. Fixando a potência e variando-se a velocidade nota-se uma mudança de inclinação da curva, de maneira que a mesma diminui em velocidades mais altas.

A largura do cordão na superfície é aproximadamente duas vezes mais larga do que a largura medida em maiores penetrações e, com exceção da amostra P2375V2000, o cordão apresentou uma largura praticamente constante com os parâmetros de solda avaliados. Dessa forma pode-se afirmar que a influencia da alteração dos parâmetros estudados é muito maior sobre a penetração do que sobre a largura do cordão, sendo que para maiores intensidades e tempos de residência do feixe sobre a peça maior a razão penetração/largura do cordão.

Amostra P2375V2000	Largura na superfície (mm)	2.59
	Penetração (mm)	5.46
	Largura a 1/2 penetração (mm)	0.81
	Largura na Junta (mm)	0.94
Amostra P2375V3000	Largura na superfície (mm)	1.22
	Penetração (mm)	3.87
	Largura a 1/2 penetração (mm)	0.4
	Largura na Junta (mm)	0.5
Amostra P2375V4000	Largura na superfície (mm)	1.04
	Penetração (mm)	2.97
	Largura a 1/2 penetração (mm)	0.38
	Largura na Junta (mm)	0.46
Amostra P2375V5000	Largura na superfície (mm)	1.04
	Penetração (mm)	2.66
	Largura a 1/2 penetração (mm)	0.35
	Largura na Junta (mm)	0.42
Amostra P2375V6000	Largura na superfície (mm)	0.97
	Penetração (mm)	2.53
	Largura a 1/2 penetração (mm)	0.38
	Largura na Junta (mm)	0.38

Tabela 6 – Resultados da análise da geometria do cordão para as amostras com potência fixada.

Amostra V5500P1000	Largura na superfície (mm)	0.81
	Penetração (mm)	1.29
	Largura a 1/2 penetração (mm)	0.39
	Largura na Junta (mm)	0.38
Amostra V5500P1250	Largura na superfície (mm)	0.85
	Penetração (mm)	1.72
	Largura a 1/2 penetração (mm)	0.38
	Largura na Junta (mm)	0.35
Amostra V5500P1500	Largura na superfície (mm)	0.9
	Penetração (mm)	1.93
	Largura a 1/2 penetração (mm)	0.4
	Largura na Junta (mm)	0.37
Amostra V5500P1750	Largura na superfície (mm)	0.89
	Penetração (mm)	2.25
	Largura a 1/2 penetração (mm)	0.4
	Largura na Junta (mm)	0.42
Amostra V5500P2000	Largura na superfície (mm)	0.92
	Penetração (mm)	2.37
	Largura a 1/2 penetração (mm)	0.37
	Largura na Junta (mm)	0.42
Amostra V5500P2375	Largura na superfície (mm)	1.05
	Penetração (mm)	2.71
	Largura a 1/2 penetração (mm)	0.34
	Largura na Junta (mm)	0.42

Tabela 7 – Resultado da análise da geometria do cordão para as amostras com velocidade fixada

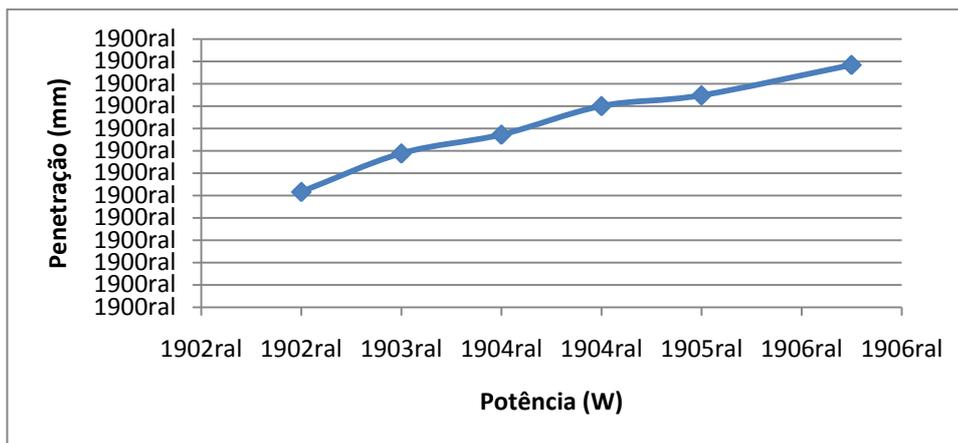


Figura 24 – Potência x Penetração

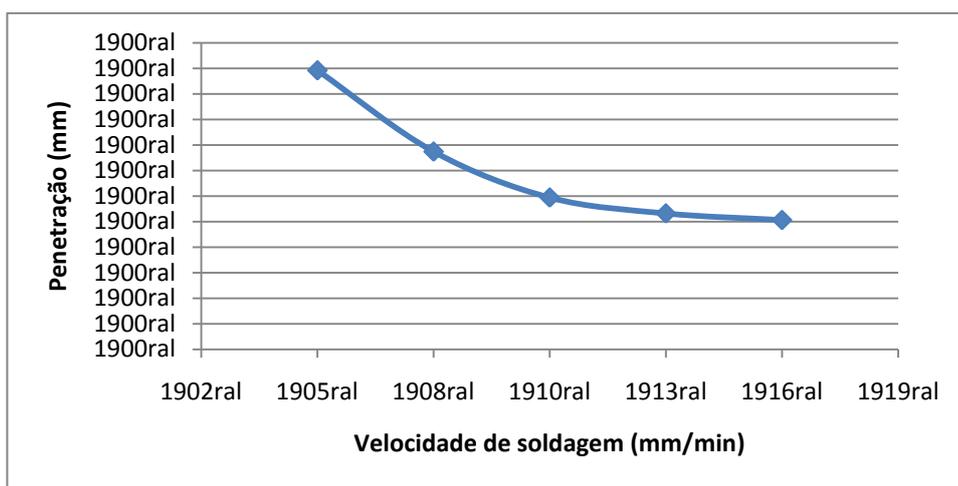


Figura 25 – Velocidade de soldagem x penetração

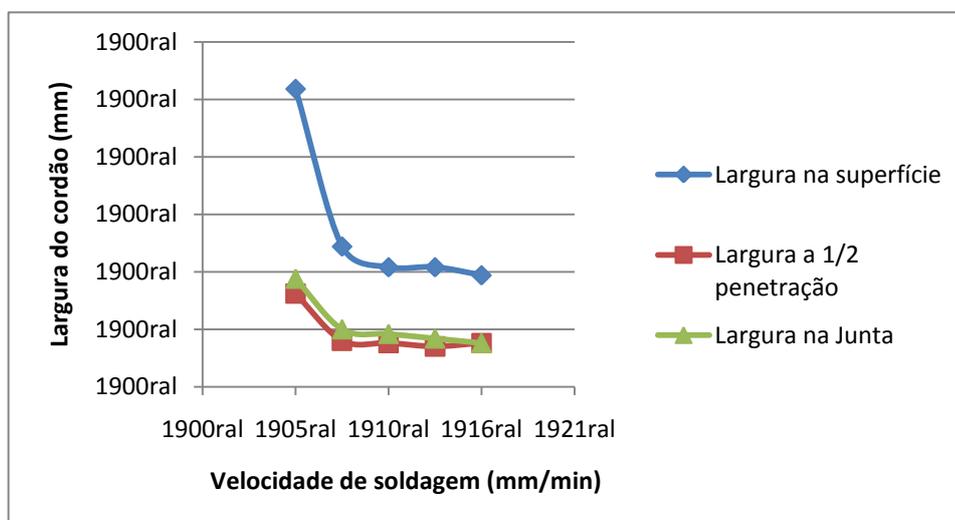


Figura 26 – Velocidade de soldagem x Largura do cordão

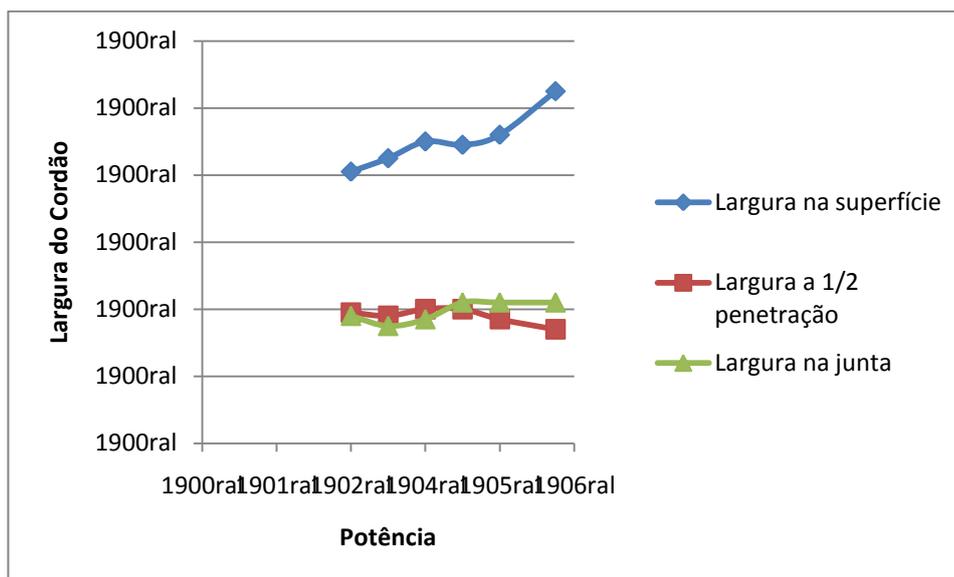


Figura 27 – Potência x Largura do cordão

Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com resultados obtidos através das equações 4 e 5 e são apresentados na tabela 8 e 9. A equação 5 apresentou resultados mais coerentes com os resultados obtidos experimentalmente, de modo que os resultados obtidos apresentaram um desvio máximo de 13,8 % em relação ao resultado obtido experimentalmente, já os resultados obtidos pela equação 4 apresentaram um desvio máximo de 24,4 %.

A equação 5 demonstrou ser uma fonte confiável para a predição de penetração dados os parâmetros de soldagem para o aço inoxidável AISI 304, principalmente devido ao fato de a mesma considerar o calor latente de fusão e de vaporização, porém é necessária a avaliação de pelo menos dois corpos de prova para determinar a absorção do feixe pela amostra de modo a obter resultados mais condizentes. Pode-se observar que os resultados obtidos para as amostras com velocidade fixada possuem menor desvio em relação aos resultados obtidos com a potência fixada para esta equação.

	Penetração medida	Penetração calculada por (1)	Diferença (%)	Penetração calculada por (2)	Diferença (%)
P2375V2000	5.46	5.49	0.5%	6.79	24.4%
P2375V3000	3.87	3.98	2.8%	4.53	17.1%
P2375V4000	2.97	3.38	13.8%	3.4	14.5%
P2375V5000	2.66	2.95	10.9%	2.95	10.9%
P2375V6000	2.53	2.63	4.0%	2.26	-10.7%

Tabela 8 – Comparação de resultados obtidos experimentalmente com resultados calculados através das equações x e y para as amostras com potência fixada.

	Penetração medida	Penetração calculada por (5)	Diferença (%)	Penetração calculada por (4)	Diferença (%)
V5500P1000	1.29	1.34	3.9%	1.04	-19.4%
V5500P1250	1.72	1.63	-5.2%	1.30	-24.4%
V5500P1500	1.93	1.90	-1.6%	1.48	-23.3%
V5500P1750	2.25	2.16	-4.0%	1.72	-23.6%
V5500P2000	2.37	2.41	1.7%	2.13	-10.1%
V5500P2375	2.71	2.77	2.2%	2.75	1.5%

Tabela 9 – Comparação de resultados obtidos experimentalmente com resultados calculados através das equações 4 e 5 para as amostras com velocidade fixada.

4.2 Tamanho de grão médio e metalografia

Através das micrografias determinou-se o tamanho de grão austenítico médio das amostras no metal base da chapa superior e na ZAC. Com os resultados pode-se observar um refino no tamanho de grão na região da ZAC analisada. A região de refino de grão de uma ZAC normalmente não ocorre na região adjacente ao metal de solda, nessa região geralmente há um crescimento de grão. As altas velocidades de soldagem e a largura reduzida do cordão de solda podem ter contribuído para este resultado tornando a região de crescimento de grão ínfima ou inexistente. Mesmo assim não é possível identificar a ZAC apenas pelas micrografias. As micrografias das amostras V5500P1000, V5500P2375, P2375V2000 e P2375V6000 são apresentadas nas figuras 28, 29, 30, e 31 respectivamente. Nas figuras 30 e 31 o metal de solda apresenta uma microestrutura semelhante à de ferrita delta (áreas circuladas), um importante constituinte na microestrutura de uma junta soldada de aço inoxidável austenítico devido à maior solubilidade S e P em relação à austenita. Estes compostos podem induzir trincas de solidificação no cordão de solda se não houver ferrita suficiente na microestrutura para solubilizá-los. Nenhuma das amostras apresentou formação de trincas, dessa forma pode-se afirmar que há ferrita delta suficiente na microestrutura de todas as amostras. Não foi detectada a presença de precipitados como carbonetos ou nitretos na microestrutura principalmente devido as altas taxas de resfriamento inerentes do processo, a precipitação destes compostos exige um tempo mínimo de permanência a altas temperaturas o que não ocorre com os parâmetros utilizados neste trabalho.

Analisando o cordão de solda apresentado na figura 18 pode se afirmar que a proteção gasosa foi eficiente, pois o cordão apresentou coloração que variou de palha para um azul escuro, o que é aceitável para a soldagem de aços inoxidáveis austeníticos (1).

A tabela 10 apresenta os resultados da análise do tamanho de grão austenítico médio. Não houve uma dispersão significativa dos resultados entre as amostras de modo que não pode-se afirmar uma influência dos parâmetros de soldagem no tamanho de grão austenítico.



Figura 28 – Micrografia da amostra V5500P1000



Figura 29 – Micrografia da amostra V5500P2375



Figura 30 – Micrografia da amostra P2375V2000

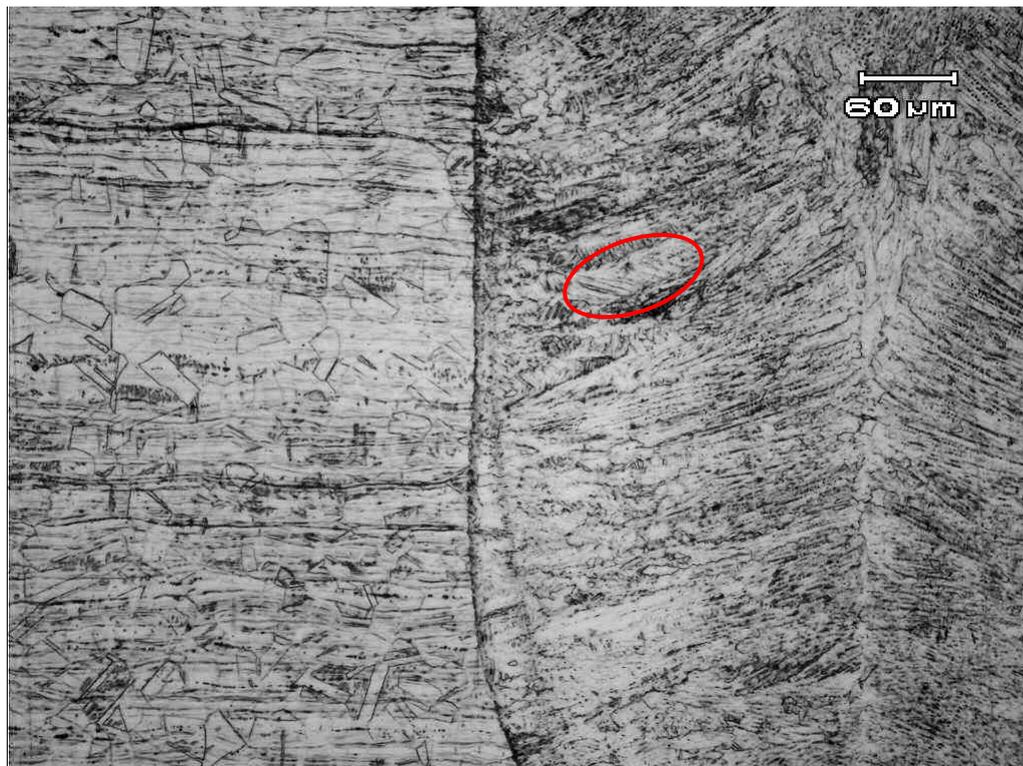


Figura 31 – Micrografia da amostra P2375V6000

Amostra	Tamanho de Grão Médio (μm)
V5500P1000	9,2
V5500P1250	9,6
V5500P1500	8,2
V5500P1750	9,3
V5500P2000	10,4
V5500P2375	8,7
P2375V2000	9,8
P2375V3000	10,3
P2375V4000	10,5
P2375V5000	10,8
P2375V6000	8,2
Metal base	14,2

Tabela 10 – Tamanho de grão austenítico médio medido na ZAC da chapa superior.

4.3 Micro dureza Vickers

A análise do perfil de micro dureza é uma importante ferramenta na avaliação de um cordão de solda, pois permite avaliar se houve ganho ou perda de propriedades na junta em relação ao metal base. As figuras 32 e 33 apresentam os resultados obtidos para as amostras

com potência fixada e velocidade fixada respectivamente. Analisando-se os resultados observa-se um aumento de dureza na região do cordão de solda e na ZAC em comparação com a dureza medida no metal base. Isso só pode ter ocorrido devido ao fato de haver um refino na microestrutura nestas regiões, o que foi observado na análise do tamanho de grão austenítico médio, visto que a solda foi realizada sem metal de adição e com materiais de mesma composição química.

A dureza média do metal base ficou em torno de 194 HV, a média das durezas medidas na região da ZAC foi de 206 HV e na região do cordão foi de 219 HV. Houve uma certa tendência à redução da dureza à medida que as indentações se afastam do centro do cordão de solda, embora não tenha se observado isto em todas as amostras. Não é possível identificar uma relação entre as durezas medidas e os parâmetros de soldagem utilizados.

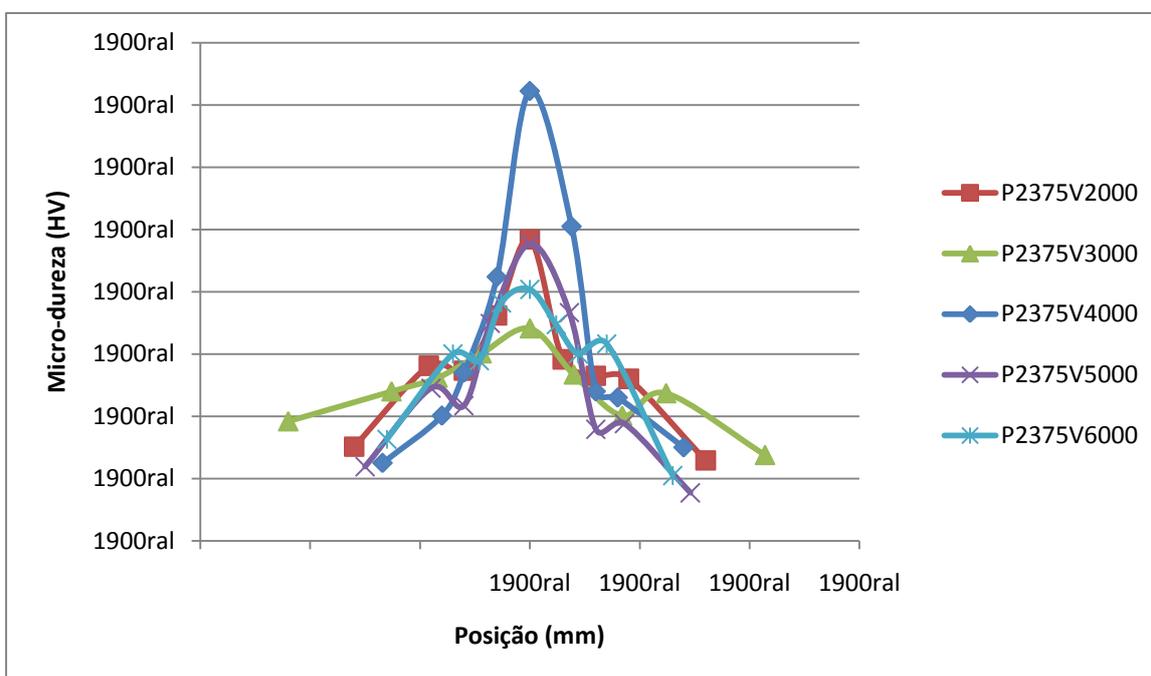


Figura 32 – Perfil de micro dureza para as amostras com potência fixada

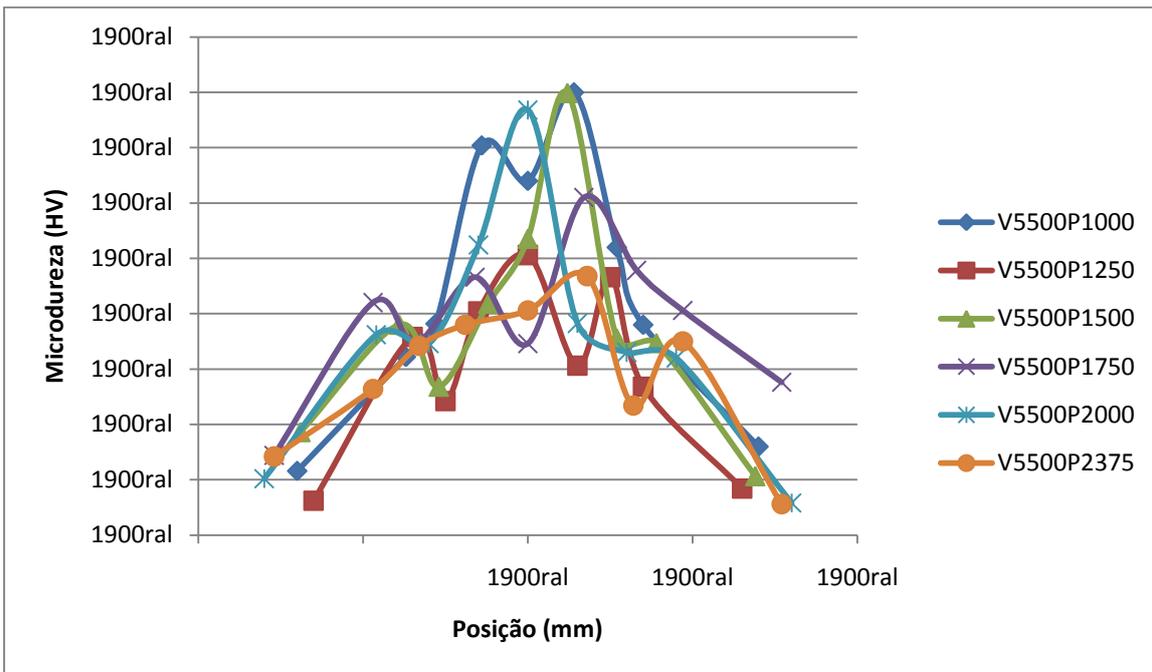


Figura 33 – Perfil de micro dureza para as amostras com velocidade fixada.

5. CONCLUSÕES

À partir dos dados obtidos com as análises pode-se caracterizar a máxima e mínima penetração atingida para os parâmetros avaliados dada a capacidade da máquina de solda, sendo a mínima penetração de 1,29 mm e a máxima de 5,46 mm. A solda realizada com potência de 2375 W e velocidade de soldagem de 1000 mm/min apresentou cordão extremamente irregular com grandes poros, tornando inviável a soldagem com estes parâmetros enquanto que a amostra V5500P1250 foi considerada a que utilizou os melhores parâmetros de soldagem para esta junta obtendo uma geometria de cordão satisfatória com uma alta velocidade de soldagem e utilizando uma baixa potência otimizando assim os custos e o tempo de processo. Observou-se uma maior influência dos parâmetros velocidade de soldagem e potência na penetração do que na largura do cordão, sendo que a relação penetração/largura do cordão aumenta para maiores potências e velocidades de soldagem. Obteve-se um resultado satisfatório na predição da penetração para a equação 5 enquanto que para a equação 4 os resultados apresentaram uma grande diferença entre o calculado e o medido experimentalmente.

A maioria das amostras apresentou porosidade nas extremidades do cordão, na interface entre as chapas, provavelmente devido ao efeito da abertura de raiz. Também foi encontrada porosidade na região da raiz da solda para as amostras com maior potência e velocidade de soldagem, provavelmente devido ao fluxo ascendente de metal fundido resultante da intensa evaporação de metal nesta região, causando o aprisionamento das bolhas e provocando a porosidade.

Foi identificada ferrita delta na microestrutura do metal de solda, o que esta de acordo com os dados da literatura, a presença desta microestrutura foi suficiente para inibir a formação de trincas de solidificação em todas as amostras. Não foram identificados precipitados em nenhuma das amostras devido as altas taxas de resfriamento inerentes ao processo.

Houve um aumento de dureza na região do cordão e na ZAC devido ao refino da microestrutura nestas regiões, porém não pode-se concluir que há uma relação entre os parâmetros avaliados e estes resultados mas sim que este refino é inerente ao processo em si.

6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

As análises realizadas neste trabalho podem ser feitas com outros materiais, alterando-se diferentes parâmetros como a mistura de gases utilizados e a distância do plano focal em relação à superfície da peça.

Uma análise da porosidade ao longo do cordão para diferentes parâmetros de soldagem pode ser feita através de ensaios de raios X.

Em alguns casos é necessária uma sobreposição de cordões de solda, uma análise dos efeitos desta sobreposição sobre a microestrutura e propriedades da junta e da ZAC pode ser realizada.

Ensaio mecânicos como ensaios de tração e de fadiga em juntas soldadas por LASER também surgem como sugestões para futuros trabalhos a serem realizados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **O'Brien, R. L.** *AWS Welding Handbook, 8ª Ed., Vol. 2.* Miami : American Welding Society, 1991.
2. **Eur. Ing., Ceng, Fimmm John C. Ion.** *Laser Processing of Engineering Materials* . s.l. : Elsevier , 2005.
3. [Online] [Citado em: 12 de Setembro de 2012.] http://www.ebah.com.br/content/ABAAABY_cAC/seminario-cores-1.
4. **Machado, I. G.** *Soldagem e técnicas conexas: Processos.* Porto Alegre : s.n., 1996.
5. **William M. Steen, Jyotirmoy Mazumder.** *Laser Materials Processing, 4ª Ed.* Nova York : Springer London Dordrecht Heidelberg, 2010.
6. **Ready, John F.** *LIA Handbook of Laser Material Processing.* Orlando : Laser Instituct of America Magnolia Publishing, 2001.
7. [Online] [Citado em: 17 de Outubro de 2012.] http://www.rofin.com/en/products/co2_lasers/slab_laser/.
8. [Online] [Citado em: 3 de Outubro de 2012.] <http://www.kuglerofamerica.com/index.php?Parabolic-mirrors&vl=2050>.
9. [Online] [Citado em: 3 de Outubro de 2012.] http://www.rofin.com/en/applications/laser_welding/.
10. **A., Cardella e E., Rigal.** The manufacturing technologies of the european breeding blankets. *Journal of Nuclear Materials.* 2004, Vol. 329.
11. **Katayama S., Kawahitoa Y., Mizutania M.** Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting welding penetration and welding defects. *Physics Procedia.* 2010, p 9.
12. <http://www.keppels.nl/en/producten/pillowplate-laserwelding/single-embossed-pillowplate/>. [Online] [Citado em: 15 de dezembro de 2012.]
13. **Chiaverini, Vicente.** *Aços e Ferros Fundidos.* São Paulo : ABM, 1988.

14. **Paulo J. Modenesi, Paulo V. Marques, Dagoberto B. Santos.** Introdução à metalurgia da soldagem. Belo Horizonte : s.n., 2012.
15. **A. Zambon, F. Bonollo.** Rapid solidification in LASER welding of stainless steels. *Materials Science and Engineering*. 1994, A178.
16. **Yan J., Gao M., Zeng X.** Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybridwelding. *Optics and Lasers in Engineering*. 2010, 48.
17. **ASM International.** *Metallography and Microstructures* . Materials Park : ASM International, 2004. ISBN.
18. **J.C., Ion, H.R., Shercliff e M.F., Ashby.** Diagrams for LASER Materials Processing. *Acta Metall. Mater.* 1992, Vol. 40.
19. **P., Sathiya, M.Y. AbdulJaleel.** Measurement of the bead profile and microstructural characterization of a CO2 laser welded AISI 904L super austenitic stainless steel. 2010, 42.
20. **E-384, ASTM.** Standar method for Knoop and Vickers Hardness of Materials; Rev 11; 2012.
21. **E-112, ASTM.** Standard Test Methods for determining average grain size. 2010.