

SOLDAGEM AUTÓGENA DE GRANDE PENETRAÇÃO A LASER: AÇO SAE 1020 COMO MATERIAL DE PARAMETRIZAÇÃO DE PROCESSO PARA ASTM A516 GR.70

Adriano de Souza Pinto Pereira, adriano.pereira@grad.ufsc.br¹

Walter Lindolfo Weingaertner, w.l.weingaertner@ufsc.br¹

Milton Pereira, milton.pereira@ufsc.br¹

Régis Henrique Gonçalves e Silva, regis.silva@labsolda.ufsc.br¹

Jhonattan Gutjahr, j.gutjahr@posgrad.ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, Florianópolis – SC

Resumo: Processos de soldagem tradicionais não possuem a profundidade de penetração presente na soldagem com lasers de alta potência. A alta densidade de energia presente no foco deste processo permite a soldagem de chapas espessas em tempos de processo reduzidos, sem a necessidade de vários passes e sem causar grande zona termicamente afetada (ZTA). Estas vantagens tornam a soldagem autógena a laser um processo de interesse para a indústria de maquinários de grande porte ou de dutos petrolíferos. O trabalho teve como foco o uso de um aço de equivalente teor de carbono para a parametrização da soldagem autógena a laser do aço ASTM A516 gr. 70. Tal processo entrou em questão por se almejar a execução de um passe de raiz para união de duas chapas espessas sem o gasto desnecessário de amostras de material de elevado valor financeiro. Foi definido através da literatura que o passe de raiz teria 10 mm de profundidade, servindo de base para posterior preenchimento do chanfro existente entre biseis. Tendo esta profundidade de passe em vista, testes foram realizados em SAE 1020 até se alcançar cordões com profundidade adequada. Mesmo que os cordões contivessem pequenos defeitos de solidificação eles foram aceitos, uma vez que era esperado que estes defeitos não se repetissem no aço de diferente composição química. Na sequência, os parâmetros de processo selecionados foram aplicados à liga ASTM A516 gr. 70. Os resultados obtidos em ambos os materiais foram comparados metalograficamente, chegando a conclusões sobre este método de parametrização e sobre o processo de soldagem autógena a laser.

Palavras-chave: Soldagem autógena a Laser; Soldagem de Alta Penetração; Aços Resistentes ao Calor; ASTM A516 gr. 70.

1. INTRODUÇÃO

A literatura especifica a nomenclatura LBW (*Laser Beam Welding*) para os processos de soldagem que se utilizam somente do aquecimento proveniente da incidência de um feixe laser para gerar união (Kou, 2002). Dependendo da densidade de energia sendo utilizada, o processo de soldagem a laser é efetuado em um de dois diferentes modos:

- Soldagem por condução de calor (*Heat Conduction Welding*);
- Soldagem de alta penetração (*Deep Penetration Welding*) (Poprawe, 2011), ou mais conhecida como *Keyhole Welding* (Olsen, 2009).

Este trabalho se aterá ao segundo modo, por esse normalmente visar – como o nome explicita – soldagens de alta penetração. Durante esse processo, a incidência de radiação laser possui uma densidade de energia que é dada pela relação entre a potência do feixe (W) e a área do ponto focal que incide sobre a peça (cm²) - W/cm². Quando a densidade de energia é suficiente para elevar a temperatura de considerável parte do substrato a seu ponto de ebulição, parte do material evapora, formando vapor metálico ionizado, ou plasma. Este plasma tende a se expandir, resultando em pressão que empurra o material fundido, e levando à formação de uma cavidade profunda denominada de *keyhole*. A estabilidade do *keyhole* depende do equilíbrio das forças envolvidas (força de recuo da pressão de vapor, tensão superficial do líquido e forças hidrostáticas causadas pelo atrito do vapor que se move pela superfície fundida) (Bhadeshia, 2005).

Na soldagem por *keyhole* pode haver adição ou não de material à junta. Caso não haja, este processo é caracterizado como autógeno, uma vez que as próprias peças a serem unidas proveem o material para o cordão de solda (Poprawe, 2011). Comparado com os processos de soldagem convencionais - e.g. a soldagem a arco elétrico - a energia incidente na obra durante o processo a laser é pequena. Isso se deve principalmente a facilidade de se concentrar altas quantidades de

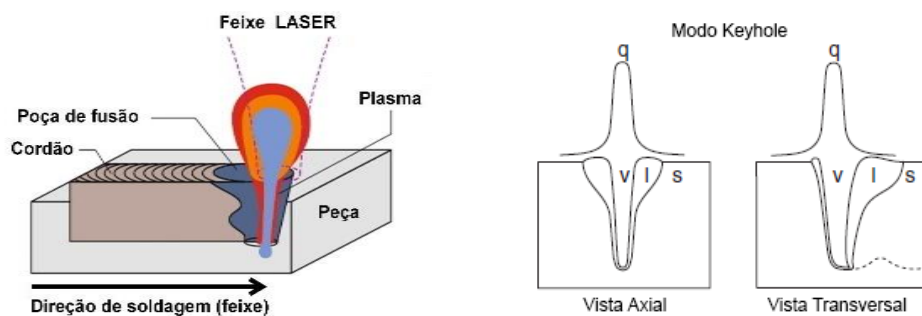
energia à pequena dimensão do ponto focal do feixe de laser. Estas características proporcionam vantagens em relação aos processos de soldagem por chama e arco elétrico, são elas (Davim, 2012, Olsen, 2009 e Poprawe, 2011):

- Zona termicamente afetada (ZTA) pequena, ou seja, baixas taxas de deformação, distorções e alterações microestruturais nas peças processadas;
- Velocidades de soldagem podem elevadas, chegando a atingir valores superiores a 10 m/min;
- Sem contaminação por contato entre ferramenta e obra durante o processo;
- Soldagens profundas com um cordão estreito, a relação entre a profundidade de soldagem e a espessura do cordão, também conhecida como “fator de forma”, pode ser superior a 10:1 (Ahmed, 2005 e Olsen, 2009);
- Exatidão alcançável elevada;
- Baixas taxas de deformação e distorções nas peças processadas;

Contudo há limitações no uso da tecnologia. Dentre elas, destacam-se:

- Dificuldade em processar materiais com alta refletividade ao comprimento de onda utilizado;
- Necessidade de infraestrutura de segurança rebuscada, especialmente quando no uso de altas potências;
- Qualidade das juntas das peças a serem unidas deve ser excelente, para garantir estabilidade de processo;
- Na maior parte das aplicações, é um processo automatizado.

Com relação às desvantagens, a mais restritiva, e não mencionada na listagem, é a relacionada aos custos. As fontes laser, especialmente as de alta potência, ainda são de custo de aquisição relativamente alto (Davim, 2012). No entanto, estes altos custos devem ser considerados sob a perspectiva de que a inserção deste processo pode elevar as taxas de produção consideravelmente (Poprawe, 2011). O processo de soldagem a laser por *keyhole* autógeno é ilustrado esquematicamente pela Fig. (1). Nos esquemas apresentados a seguir, a poça fundida não aparenta ser trespassante, mas em vários casos ela o é. Uma vez que o processo é parametrizado de maneira adequada, a pressão no interior do *keyhole* consegue mantê-lo estável mesmo sob a condição trespassante.



**Figura 1 – Ilustrações do processo de soldagem laser no modo *keyhole*.
(Adaptado de Olsen (2009) e Poprawe (2011))**

No presente trabalho, o objetivo do estudo deste processo é alcançar a soldagem de um passe de raiz de 10 mm de espessura em um chapa de ASTM A516 gr70, material comumente utilizado na fabricação de vasos de pressão para altas temperaturas. A liga ASTM A516 gr70 é comparável ao aço SAE 1020 no que condiz ao teor de carbono, sendo seu diferencial relacionado a elementos de liga que conferem uma melhora considerável em suas características mecânicas e de soldabilidade, além de permitir a manutenção de suas propriedades quando submetido à elevadas temperaturas.

Visando coletar os parâmetros iniciais para processamento, foram utilizados corpos de prova de SAE 1020 como material de ensaio para o processo, devido à disponibilidade deste material e aos menores custos quando comparado com o material mais nobre. Para melhor organização e disposição dos dados obtidos, o estudo foi dividido em três fases de experimentação, as quais serão apresentadas nas seções seguintes.

2. EXPERIMENTAL

Os três parâmetros de processo mais importantes na soldagem autógena por *keyhole* e que foram variados durante os testes são potência de laser (P_L), distância focal (z) e velocidade de soldagem (V). Outros parâmetros, como fluxo de gás de proteção e geometria do feixe de laser foram mantidos constantes durante processamento. Em todos os ensaios de soldagem, foi utilizado o gás argônio (Ar) como gás de proteção, com vazão média de 15 l/min, o feixe de laser foi sempre mantido perpendicular com a superfície do corpo de prova e perfeitamente alinhado com a junta a ser percorrida. Três geometrias de corpos de prova foram utilizadas, uma para cada etapa de experimentação.

Como fonte laser foi selecionada um fonte laser de fibra IPG – YLS 10000, com potência de saída máxima nominal de 10 kW. A óptica utilizada permite concentrar essa energia em um ponto focal de aproximadamente 880 μ m de diâmetro. O cabeçote de soldagem laser está acoplado em um sistema cartesiano de coordenadas, no qual se movimenta

verticalmente no eixo Z. O corpo de prova se movimenta no plano XY. Um sistema de cortina de ar (*crossjet*) supersônico evita que partículas expelidas da região de solda danifiquem a óptica do cabeçote de soldagem.

As propriedades que foram medidas metalograficamente para a avaliação dos cordões a partir da segunda etapa de experimentação são a espessura e profundidade de cordão (quando coerente), e o fator de forma entre esses dois valores também foi calculado. A metalografia de todos os cordões foi estudada em buscas de defeitos microestruturais como poros, escorrimentos ou trincas de solidificação.

2.1. Parametrização Inicial

Para a formação e, sobretudo, para a manutenção do *keyhole*, são necessários parâmetros de processo adequados, que variam para cada material soldado e também de acordo com a espessura a ser soldada. Portanto, os primeiros ensaios realizados para parametrização inicial do processo em SAE 1020 tiveram como objetivo encontrar uma velocidade adequada, bem como uma distância focal que fornecessem uma penetração de 10 mm. O valor de 10 mm de espessura é baseado em uma relação encontrada na literatura, onde para cada 1 kW de laser pode-se obter 1 mm de profundidade de cordão ou mais, ainda com garantia de qualidade e estabilidade do processo. Nos testes iniciais, a potência de laser foi mantida em seu máximo valor possível, visando maiores velocidade de processamento.

O laser é uma ferramenta de trabalho com uma excelente característica de repetitividade e com resposta rápida quando seus parâmetros de processamento são ajustados. Isto permitiu a execução de vários parâmetros em sequência sem interferência mútua. Portanto, para otimizar o uso material, foram feitas variações de parâmetros em um mesmo cordão de solda no corpo de prova, onde cada trecho possui uma parametrização de processo diferente e é devidamente analisado posteriormente. Abaixo, na Fig. (2), há uma ilustração da divisão de diversas amostras em um mesmo corpo de prova. As seções com 50 mm de comprimento são as seções aonde *z* foi alterado para seu próximo valor, pois era esperado que mudanças de posição focal causassem instabilidade de *keyhole*, por esse motivo uma região para estabilização foi adicionada ao tamanho normal de amostra. Cada variação de parâmetro representa uma amostra, sendo uma amostra uma seção do corpo de prova. A Tabela (1) apresenta o conjunto de parâmetros utilizado em cada ensaio.

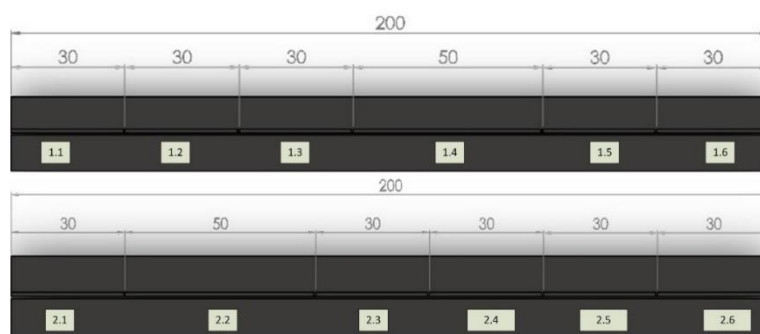


Figura 2 – Divisão dos corpos de prova para parametrização inicial. Medidas em milímetros.

Como pode ser observado, o comprimento de cada corpo de prova da primeira etapa foi de 200 milímetros. Ele foi formado a partir de duas chapas de 30 mm de altura e 10 mm de largura a serem unidas por suas faces maiores. Esta configuração de corpo de prova foi escolhida para avaliar todas as profundidades alcançadas nos testes e poder escolher os parâmetros que atingissem profundidade próximas de 10 mm. A seguir, na Tab. (1), a lista os parâmetros iniciais utilizados nesta primeira etapa de testes.

Tabela 1 - Parâmetros da primeira etapa de ensaios

Identificação	Potência (W)	Posição Focal (mm)	Velocidade (mm/min)	Identificação	Potência (W)	Posição Focal (mm)	Velocidade (mm/min)
1.1	10000	0	500	3.1	10000	-5	500
1.2	10000	0	1000	3.2	8000	-5	400
1.3	10000	0	2000	3.3	6000	-5	300
1.4	10000	0	4000	3.4	4000	-5	200
1.5	10000	-5	500	3.5	10000	-10	500
1.6	10000	-5	1000	3.6	10000	-10	444
2.1	10000	-5	2000	4.1	10000	-10	400
2.2	10000	-5	4000	4.2	10000	-10	364
2.3	10000	-10	500	4.3	8000	-5	500
2.4	10000	-10	1000	4.4	8000	-5	400
2.5	10000	-10	2000	4.5	8000	-5	300
2.6	10000	-10	4000	4.6	8000	-5	200

2.2. Passe de Raiz em SAE 1020

Uma vez que os as amostras da etapa anterior tiveram seus cordões mensurados, seus resultados foram ajustados ou repetidos em quatro novos cordões. Estes novos testes foram executados em corpos de prova de diferente geometria por visarem a simulação de uma solda trespassante. O escoamento vertical de calor de uma peça de 30 mm de espessura para uma de 10 mm de espessura não é o mesmo, de modo que um parâmetro de soldagem que atingiu profundidade próxima a 10 mm na primeira peça pode muito bem trespassar a segunda. Por esse motivo, os melhores resultados da primeira etapa de teste deveriam ser novamente testados nessa nova configuração de experimento antes de serem executados no aço ASTM A516 gr70.

Os corpos de prova desta etapa se constituíam de chapas de SAE 1020 com 10 mm de espessura, 200mm de comprimento e 50 mm de largura. O feixe de laser incidiu perpendicularmente cada chapa em sua maior face, percorrendo 180 de seus 200 mm de comprimento. Dois cordões foram realizados por corpo de prova, um paralelo e devidamente distanciado do outro. Foram efetuadas pausas entre cada cordão para permitir retorno à temperatura ambiente, garantindo condições de processamento equivalentes. Três seções de cada cordão foram avaliada para avaliar a estabilidade do processo.

2.3. Teste em ASTM A516 gr70

A soldagem adequada de duas chapas de ASTM A516 gr70 com 10 mm de espessura é o objetivo final deste trabalho. Portanto, os corpos de prova finais se tratavam exatamente de tais chapas. A grande diferença para os testes realizados na etapa anterior é que esta etapa não simulará a soldagem, processando o centro de uma chapa, mas irá efetivamente unir duas peças. A fresta existente entre as chapas ASTM A516 gr70 pode, concisamente, alterar a dinâmica do *keyhole*, modificando os resultados dos parâmetros escolhidos na segunda etapa, de modo que ambas as peças tiveram suas superfícies de contato e superior fresadas para reduzir este efeito.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados no formatos de tabelas e micrografias. A forma mais comum de avaliação de um cordão de solda é o estudo de sua seção transversal, de modo que micrografias das seções transversais de todos os cordões realizados foram obtidas. Contudo, apenas micrografias da segunda e última etapa de testes serão demonstradas. Para a primeira etapa, apenas observações serão apresentadas.

3.1. Resultados Iniciais

Os resultados iniciais mais promissores foram definidos como os parâmetros 2.4 e 2.5, os dois com z negativo, ou seja, com o ponto de foco do feixe de laser posicionado para dentro do *keyhole*. Concentrar o feixe de laser dentro da amostra aparentou gerar cordões mais estáveis, sem tricas de solidificação ou poros. A porosidade se localizou majoritariamente na parte inferior dos cordões falhos, como exemplificado na Fig. (3). Porosidade nessa região pode ser explicada por instabilidade de *keyhole*, que ao colapsar, gera aprisionamento de gás no fundo da poça fundida.



Figura 3 – Resultado do parâmetro inicial 1.6, porosidade e trinca de solidificação presente.

Trincas de solidificação, cujo exemplo também pode ser visto na Fig. (3), foram encontradas em vários cordões. Contudo, caso não excedessem 10% da profundidade do cordão, foram ignoradas. O valor de 10% foi arbitrariamente definido, simplificando a experimentação. O embasamento teórico para se ignorar esses defeitos se resume à suposta causa destas trincas, a fragilização por enxofre. Por se tratar de um aço carbono simples, o SAE 1020 não possui elementos de liga como o manganês, que combatam a precipitação de compostos como o sulfeto de ferro, que é uma fase frágil causadora deste mecanismo de fragilização. Contudo, uma vez que o objetivo final desse trabalho é soldar o aço ASTM A516 gr70, que possui elementos de liga, incluindo 1 a 1,7% de Mn, que provavelmente sanariam esse problema, as trincas foram ignoradas.

A profundidade máxima de aproximadamente 14,6 mm foi alcançada em um cordão que apenas apresentou porosidade em sua base. Isso prova a capacidade deste limite de potência 10 kW em soldar profundidades maiores que 10 mm de espessura. No entanto, como mencionado, tal cordão não seria próprio para a soldagem de chapas de 10 mm de espessura, pois provavelmente causaria escorrimento de material ao trespassar a amostra.

3.2. Resultados de Passe de Raiz em SAE 1020

A partir dos dois resultados escolhidos, outros dois foram calculados mantendo a emissão de energia por unidade de comprimento (Kaiser et al., 2012) no mesmo valor, apenas alterando posição focal e velocidade de avanço para uma mais lenta. Seus parâmetros são descritos na Tab. (2).

Tabela 2 - Parâmetros da segunda etapa de ensaios

Identificação	Potência (W)	Posição Focal (mm)	Velocidade (mm/min)
5.1	8000	-5	1600
5.2	10000	-10	1000
6.1	10000	-10	2000
6.2	8000	-5	800

As três seções transversais de cada cordão foram analisadas, conforme a Fig. (4), demonstrando uma estabilidade de processo excelente. Os melhores resultados, escolhidos para repetição no material alvo, são os parâmetros 6.1 e 6.2. Ambos trespassaram a amostra. O primeiro apresentou um fator de forma mais alto e uma ZTA baixa, o segundo apresentou uma ZTA maior mas, por possuir maior largura de cordão, é mais tolerante a desvios de junta que poderiam vir a ser encontrados na última fase de testes. Comparando os cordões realizados com seus equivalentes na etapa anterior, foi possível confirmar que a porosidade existente na base dos cordões na etapa inicial é advinda da ausência de um *keyhole* trespassante. Tal característica diminui a probabilidade da formação de porosidade na base do cordão.

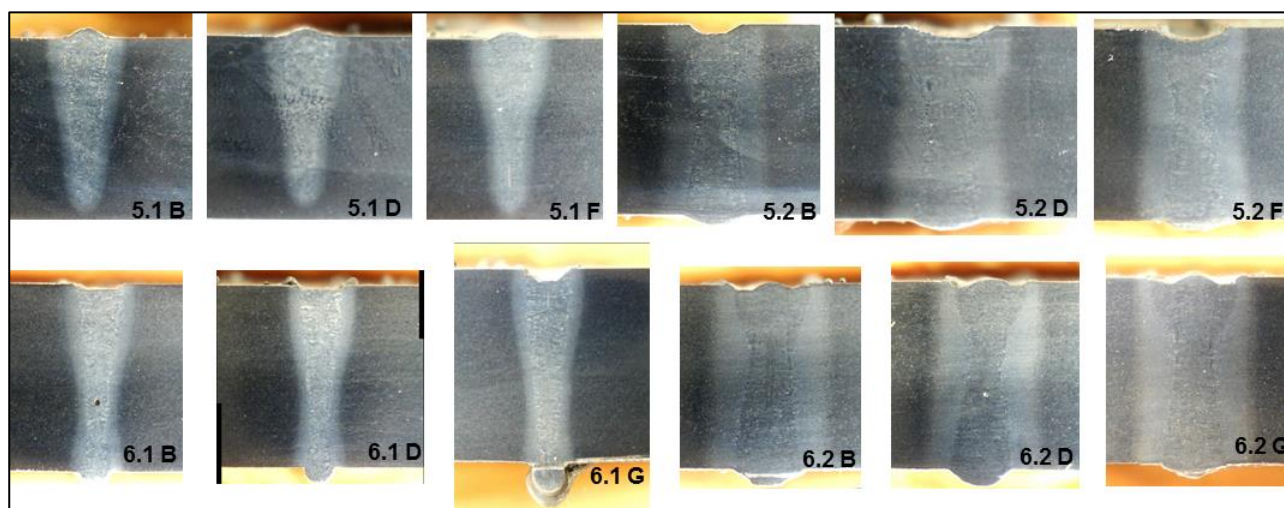


Figura 4 – Macrografias obtidas dos testes realizados na segunda etapa de experimentação, em chapas com 10 mm de espessura.

Por se tratar de soldagem autógena trespassante, é previsível a formação de mordedura na parte superior do cordão, uma vez que não há material para compensar o leve escorrimento que ocorre na parte inferior do corpo de prova. Um efeito que deve ser considerado em testes futuros é o aquecimento do substrato, pois como pode se observar da

metalografia 6.1B para a 6.1G há aumento de escoamento de material. Isto se deve à maior fluidez causada por acréscimo gradativo na temperatura no decorrer do processo.

3.3. Resultados Finais

Os parâmetros 6.1 e 6.2 da etapa anterior tem como equivalentes os parâmetros 7.1 e 7.2 presentes nas metalografias da Fig. (5), respectivamente. Como pode ser observado nessa figura, há duas metalografias referentes ao parâmetro 7.1. Isto ocorre devido ao mesmo fenômeno descrito anteriormente, o aquecimento gradativo do corpo de prova ao longo do processo. Neste caso, este aquecimento possibilitou penetração total e adequada a partir da metade do cordão, 7.1b, contudo, no seu início, 7.1a ocorreu falta de penetração, uma vez que a amostra ainda estava em temperatura ambiente.

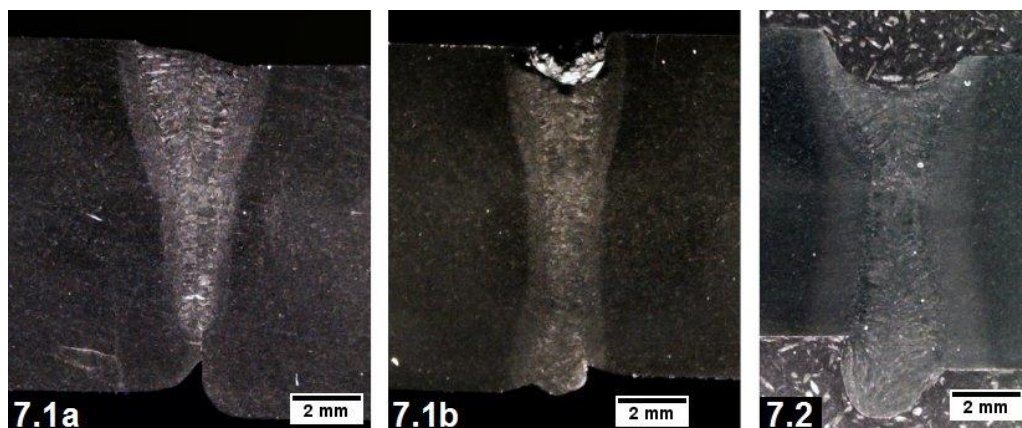


Figura 5 – Macrografias obtidas na terceira fase de experimentação.

Por sua vez o parâmetro 7.2 trespassou completamente o corpo de prova por toda sua extensão, mas apresentou maior escoamento e ZTA que o cordão anterior. Em ambos os casos, os cordões não demonstraram porosidade evidente, muito menos trincas de solidificação, confirmando, mesmo que parcialmente, a suposição feita quanto a fragilização por enxofre recorrente nos cordões realizados em aço SAE 1020. Ambos os cordões aparentaram tolerar o leve desalinhamento entre as peças unidas.

4. CONCLUSÃO

O estudo preliminar deste específico processo de soldagem laser autógena de alta penetração foi bem-sucedido, onde foi alcançada a penetração trespassante de 10 mm de ASTM A516 gr70, com velocidade de processamento atingidas de 2000 mm/min. Nos melhores cordões, de acordo com as análises realizadas, obteve-se uma ZTA pequena e com ausência de macrodefeitos (poros, trincas de solidificação, inclusões). Tal soldagem é perfeita para a execução de um passe de raiz e pode vir a ser de grande proveito para indústria de vasos de pressão.

Foi identificada a potencialidade de aumentar a penetração de solda ainda se utilizando da mesma potência máxima limite de laser (10 kW), uma vez que foram obtidos cordões com até 14,5 mm de profundidade. Para isto, uma diminuição na velocidade de processamento deve vir a ser necessária, sendo preciso maiores investigações para alcançar tais resultados.

Nas três fases de experimentação supracitadas, foram realizadas apenas simples análises metalográficas para análise dos resultados de processamento. Resultados interessantes, e necessários para a completa análise destes cordões, podem advir caso análises de microdureza, de composição química localizada e das transformações microestruturais na ZTA e na região fundida venham a ser feitas em futuros experimentos.

A metodologia de parametrização, se utilizando de aço SAE1020 como material para corpos de prova preliminares, se mostrou válida para o caso em questão, uma vez que os resultados obtidos em seus testes apresentaram considerável coerência com os testes finais realizados em ASTM A516 gr70. Sendo a disparidade de resultado também advinda da leve diferença entre as geometrias do corpos de prova de ambos os materiais, um possuindo junta e desalinhamento e o outro não.

Como pode ser analisado nas seções 2016.09.30-6.2 B-D-G, onde a velocidade de processamento foi diminuída para 800 mm/min e a potência do LASER para 8 kW, a penetração foi completa, no entanto, a ZTA é bastante larga e a região central do cordão apresenta uma clara alteração microestrutural. De qualquer forma, esse resultado prova que, mesmo com a potência de 8 kW, é possível alcançar total penetração de uma junta com 10 mm de espessura.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP - LASER) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) na realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Ahmed, N. (2005), *New Developments in Advanced Welding, Recherche*, Woodhead, Cambridge.
- Bhadeshia, H. (2005), “Laser Processing of Engineering Materials by John C. Ion”, *Surface Engineering*, Vol. 21 No. 3, pp. 164–164.
- Davim, J.P. (2012), *Lasers in Manufacturing, Lasers in Manufacturing*, 1st ed., Wiley, Hoboken.
- Kaierle, S., Barroi, A., Noelke, C., Hermsdorf, J., Overmeyer, L. and Haferkamp, H. (2012), “Review on Laser Deposition Welding: From Micro to Macro”, *Physics Procedia*, Vol. 39, pp. 336–345.
- Kou, S. (2002), *Welding Metallurgy, Structure*, Vol. 822, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- Olsen, F.O. (2009), *Hybrid Laser-Arc Welding*, CRC Press, Boca Raton.
- Poprawe, R. (2011), *Tailored Light 2*, edited by Poprawe, R., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

SAE 1020 STEEL AS PARAMETRIZATION MATERIAL FOR THE LASER DEEP PENetration WELDING OF ASTM A516 gr.70 STEEL

COBEF2017-0689

Abstract: Traditional welding processes do not possess the penetration found in high powered laser welding. The high energy density present at this process' focus allows the weld of thick metal plates, without the need of several processing passes and without causing a wide heat affected zone (HAZ). This advantages make autogenous laser welding of interest to the heavy machinery and oil pipeline industries. This work had as focus the use of a steel with equivalent carbon content for the parameterization of deep penetration laser welding of ASTM A516 gr.70. Such parameterization was developed because the root pass of two thick plates without the unnecessary use of relatively expensive samples was aimed. It was pre-defined, through literature, that the root pass would have 10 mm of depth, serving as base for further filling between bevels. Having this value at sight, tests were performed until the weld beads reached adequate depth. Even if the beads contained small solidification defects they were accepted, once that it was expected of such defects not to be recurrent in the target steel, which has a different chemical composition more proper to welding. In sequence selected welding parameters were applied to the ASTM A516 gr.70 alloy. The obtained results, in both materials, were metallographically compared, coming to conclusions over this parameterization method and the autogenous deep penetration laser welding process.

Key-words: Autogenous laser welding; Deep penetration welding; Heat resistent steels; ASTM A516 gr.70