

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE JUNTAS DE AÇOS MARAGING SOLDADAS POR MEIO DOS PROCESSOS LASER E FEIXE DE ELÉTRONS¹

Henry Wilson Pohling Maximo²

Wagner de Rossi³

Maurício David Martins das Neves⁴

Resumo

Neste trabalho estudaram-se diversas condições de soldagem com laser de Nd:YAG realizada em aço maraging 350 - ASTM A 538 Grade C e os resultados foram comparados com juntas soldadas com o processo feixe de elétrons. As soldagens realizadas com o processo por feixe de elétrons possuem um procedimento de soldagem qualificado. A junta selecionada para a elaboração do trabalho foi do tipo sobreposta com material de base de espessuras diferentes, respectivamente iguais a 1,00 mm e 0,78 mm. As juntas soldadas foram avaliadas por: ensaio de microdureza Vickers e caracterização microestrutural das diversas regiões das juntas soldadas. Os resultados indicam que as condições usadas em ambos os processos de soldagem foram satisfatórios e atingiram a profundidade de penetração mínima desejada.

Palavras-chave: Maraging 350; Soldagem com feixe laser; Soldagem com feixe de elétrons.

EVALUATION OF MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF JOINTS IN MARAGING STEEL WELDED BY LASER AND ELECTRON BEAM WELDING

Abstract

In this work, it is intended to analyze the laser welding in maraging 350 steel ASTM A 538 Grade C and the results were compared with welded joints of electron beam welding. The welding process performed with electron beam welding has a qualified welding procedure. The joint chosen for the preparation of the work was the lap joint type with different thicknesses base material respectively equal to 1,00 mm and 0,78 mm. The welded joints were evaluated by mechanical tests like Vickers microhardness and microstructural characterization of the various regions of the welded joints. The results indicate that the conditions used for both welding process were satisfactory and reached the desired minimum penetration depth.

Key words: Maraging 350; Laser beam welding; Electron beam welding.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro mecânico. Mestrando do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. São Paulo, SP, Brasil.*

³ *Físico. Dr. Pesquisador, IPEN, CNEN. São Paulo, SP, Brasil.*

⁴ *Engenheiro metalúrgico. Dr. Pesquisador, IPEN, CNEN. São Paulo, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os aços maraging são utilizados em aplicações que requerem alta resistência mecânica.⁽¹⁾ bem como em aplicações onde são requeridas de forma combinada boas propriedades magnéticas e alta tenacidade.^(1,2) Outras características importantes motivam diversas aplicações do aço maraging na indústria entre as quais pode-se destacar: variação dimensional mínima após tratamento térmico e adequada soldabilidade,⁽³⁾ em consequência do baixo teor de carbono neste aço.

A denominação maraging é derivada dos termos “MARTensite + AGEhardening” e referem-se aos aços endurecidos pela precipitação de compostos intermetálicos durante um processo de envelhecimento numa matriz martensítica.⁽⁴⁾ Portanto, a elevada resistência mecânica deste material é obtida, em especial, pela precipitação de compostos intermetálicos⁽⁵⁾ em matriz martensítica e não apenas pelo endurecimento por solução sólida do carbono.

A soldagem é um processo de fabricação de grande importância no setor industrial, pois é empregada na montagem e na fabricação de diversos componentes estruturais. Alguns componentes fabricados na indústria utilizam como material o aço maraging, em consequência de suas elevadas propriedades mecânicas.

Em algumas aplicações específicas, como em elementos rotativos de alto desempenho, o aço maraging 350 ASTM A 538 Grade C é submetido a soldagem para montagem de estruturas ou fabricação de componentes. Estes componentes em consequência de sua utilização específica não podem apresentar juntas soldadas com desalinhamento ou empenamento, além da presença de descontinuidades que são interrupções que ocorrem na junta soldada e reduzem suas propriedades mecânicas e metalúrgicas.

Portanto as soldagens efetuadas para estas aplicações devem ser realizadas com um processo que propicie juntas soldadas com: pequena zona afetada pelo calor (ZAC) visando diminuir empenamento, alto padrão de repetibilidade e elevada qualidade. Neste aspecto, os processos de soldagem com fonte de calor focada, tais como o feixe de elétrons e o laser são técnicas naturalmente empregadas na fabricação de juntas que devam possuir elevadas propriedades de desempenho.

Na soldagem com feixe de elétrons, a geometria do cordão (largura e a profundidade de penetração) e a zona afetada pelo calor (ZAC) no material de base (MB) são influenciadas pelas propriedades do feixe e sua interação com o MB. Esta interação depende dos parâmetros do feixe de elétrons incidente e das características do MB. Na literatura estão apresentados estudos sobre a soldagem dos aços maraging usando o processo com feixe de elétrons.^(6,7)

De-feng et al.⁽⁶⁾ analisaram a microestrutura e a dureza do MB e da zona afetada pelo calor (ZAC), além de ter estudado a relação entre ambas no aço maraging 250. A microestrutura da ZAC a partir da linha de fusão foi dividida em quatro regiões diferentes, as quais o autor chamou respectivamente, (i) interface da zona de fusão (ZF) e ZAC, (ii) zona sobreaquecida, (iii) zona de transição e (iv) zona endurecida.

Nesse estudo foi observado que a alta densidade de potência do processo com feixe de elétrons provocou um elevado gradiente de temperatura na solda e proporcionou uma zona de fusão (ZF) com diversas morfologias. Na interface da ZF com a ZAC, os grãos solidificados favoreceram o crescimento epitaxial. Na ZAC, a temperatura alcançada durante o ciclo térmico de soldagem alterou a microestrutura por meio de reações em estado sólido. O tamanho de grão na junta diminui conforme, aumenta a distância da linha de fusão. O tamanho de grão na ZAC próximo a linha de fusão foi

de aproximadamente 45 μm , sendo consideravelmente maior, se comparado aos 20 μm obtidos na distância de 0.5 mm da linha de fusão.

De-feng et al.⁽⁶⁾ ainda observaram que, na interface da linha de fusão e na zona sobreaquecida a dureza foi menor se comparada ao metal de base (MB). Essa redução da dureza foi ocasionada pelo aquecimento nestas regiões que provocou a reversão da fase martensítica revenida e dissolução de precipitados. Na Figura 1 pode-se observar os valores de dureza de acordo com as respectivas áreas da ZAC.

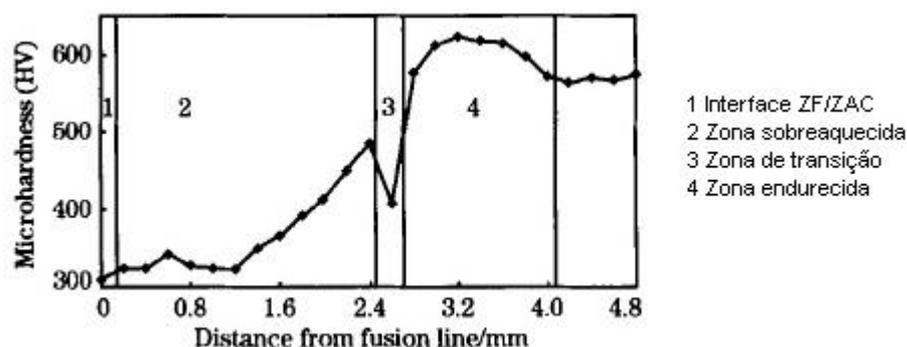


Figura 1. Distribuição de microdureza Vickers em relação à distância da interface ZF/ZAC.⁽⁶⁾

No estudo realizado por Ma Cheng-young⁽⁷⁾ também foi observada a presença de diversas regiões na junta soldada. A região com o menor valor de dureza foi a zona de fusão com 330 HV. Verificou-se uma zona de transição na ZAC, onde a microestrutura foi parcialmente recristalizada e austenitizada, diminuindo a dureza, além de uma região com alta dureza de até 630 HV favorecida pela formação de martensita revenida e também devido aos grãos se manterem finos.

Na soldagem a laser, a dimensão do cordão (largura e a profundidade de penetração) e o tamanho da zona afetada pelo calor (ZAC) no material de base (MB) são influenciados pelas propriedades de interação da radiação laser com o MB.⁽⁸⁾

Modificações nos parâmetros de soldagem do laser implicam na alteração da profundidade de penetração da solda. Existem três níveis de profundidade de penetração na soldagem. A penetração pouco profunda, na qual a soldagem ocorre apenas por condução com densidade de potência inferior a $3 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$. Valores de densidade de potência entre $3 \cdot 10^9$ e $9 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$, apresentam uma penetração profunda, favorecendo a formação do “keyhole”. As soldas realizadas com densidade de potência superior a $9 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$ apresentam excessiva penetração e perda de material.

O mecanismo de alta profundidade de penetração no processo laser é conhecido por “keyhole” sendo obtido de forma similar no processo com feixe de elétrons. Este mecanismo consiste da fusão do MB causando a vaporização da área de incidência do feixe, o que faz com que sejam abertas cavidades na peça, sendo preenchidas, posteriormente, pelo deslocamento do metal fundido sobre o MB.⁽⁸⁾

Segundo Klemens⁽⁹⁾ este tipo de penetração da solda é formado apenas no local onde o feixe incide com alta densidade de potência. O transporte de material ocorre pelo fluxo de metal líquido, entretanto parte do material é transportada na forma de vapor gerando um excesso de pressão, que conduz o fluxo de líquido. Estas observações estão de acordo com Sikman e Morijn^(10,11) que estudaram o efeito do feixe laser na formação de cavidade em uma peça de quartzo.

Uma variável importante na soldagem a laser é a profundidade de penetração, que está relacionada com a densidade de potência do feixe. A densidade de potência é diretamente proporcional à energia e inversamente proporcional ao produto da

largura temporal do pulso e a área de incidência do feixe. Segundo Locke e Hella⁽¹²⁾ e Baardsen, Schmatz, e Bisaro⁽¹³⁾ a penetração aumenta com a elevação da potência incidente de forma linear. De acordo com Jorgensen⁽¹⁴⁾ e McCay e McCay⁽¹⁵⁾ a absorção do feixe é proporcional a resistividade elétrica e pode ser elevada em até 100% na profundidade de penetração pelo uso de gases reativos. Neste trabalho pretende-se analisar e comparar as propriedades da junta sobreposta formada pelo aço maraging 350 soldada pelos processos laser e feixe de elétrons. As juntas soldadas com MB de espessuras diferentes devem ser avaliadas por: microdureza Vickers e caracterização microestrutural das diversas regiões do cordão de solda.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material

O material de base (MB) utilizado neste trabalho é o aço maraging 350 ASTM A 538 Grade C, cuja composição química está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química típica do aço maraging 350

Composição Química (% em peso)								
C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Mo	Ni
0,005	0,040	0,020	< 0,005	0,001	11,99	0,040	4,960	18,210
Cu	Ti	Al	B	Zr	Ca	H	N	O
0,020	1,274	0,076	0,001	0,007	< 0,001	-	0,001	< 0,001

Fonte: Certificado de análise química do fornecedor Villares Metals

A matéria prima para a fabricação das amostras foi obtida a partir de barras. Foram realizados diversos processos de usinagem para a obtenção da geometria na forma de pequenas placas. As amostras foram obtidas nos dois sentidos de laminação da barra (longitudinal e transversal).

Na Figura 2 é apresentada a geometria da junta usada neste trabalho. A junta utilizada é sobreposta e os MB possuem espessuras diferentes, respectivamente, de 1,00 mm (placa superior) e 0,78 mm (placa inferior).

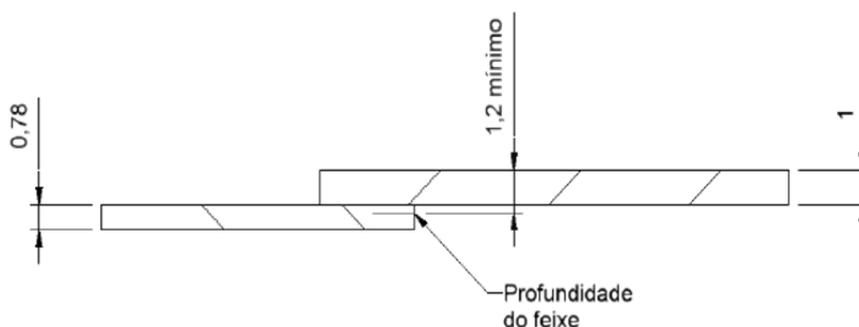


Figura 2. Representação esquemática das dimensões da junta em aço maraging 350.

2.2 Soldagem com Feixe de Elétrons e Laser

A soldagem com feixe de elétrons foi realizada em um equipamento com as seguintes características gerais: tensão máxima de 150 kV, corrente máxima de feixe de 100 mA, comprimento linear de soldagem de até 500 mm e um sistema que opera em 3 eixos (x,y,a) comandados por controle numérico (CNC). A soldagem

com laser foi executada no laser de Nd:YAG, do tipo pulsado, com energia por pulso de até 10 J, taxa de repetição maior que 300 Hz, potência média de 100 W, potência de pico de 3 kW e largura temporal dos pulsos continuamente controlada entre 0,2 e 10 ms.

A soldagem pelo processo feixe de elétrons possui procedimento aprovado para a realização desta soldagem, portanto, possui um conjunto de parâmetros previamente definido e qualificado. Os parâmetros de soldagem utilizados nesta soldagem estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros utilizados para a soldagem com feixe de elétrons

Amostra	Tensão (kV)	I de lente (mA)	I de feixe (mA)	Velocidade (mm/s)	Tipo de onda	Oscilação do feixe (mm)	Frequência de oscilação do feixe (Hz)	Distância focal do feixe (mm)
1	130	2327	3,8	28	Triangular	0,30	250	2676

A soldagem a laser está sendo estudada e não existe um conjunto de parâmetros definido. Portanto, foram realizadas soldagens variando-se os parâmetros conforme indicado na Tabela 3. Foram estudadas quatro condições diferentes variando-se a largura temporal do pulso. O gás de proteção utilizado para a realização das soldas foi o Argônio com uma vazão de 12 litros/min.

Tabela 3. Parâmetros utilizados para a soldagem a laser

Amostra	Velocidade (mm/min)	Frequência (Hz)	Energia (Joule)	Ponto focal do feixe (mm)	Vazão de gás (l/min)	Diâmetro do feixe (mm)	Largura temporal (ms)
1	130	9	6	-1,0	12	0,8	10
2	130	9	6	-1,0	12	0,8	8
3	130	9	6	-1,0	12	0,8	6
4	130	9	6	-1,0	12	0,8	4

2.3 Preparação e Caracterização Microestrutural

Após a realização das soldas, as amostras foram preparadas por técnicas metalográficas que envolveram operações de: corte na seção transversal da junta, lixamento, polimento e ataque químico para revelar a microestrutura. A solução empregada para o ataque químico foi o Nital - 5% em volume (5 % de HNO₃ + 95% de C₂H₅OH).

Após a preparação metalográfica e ataque, as amostras foram caracterizadas por microscopia óptica com analisador de imagens Zeiss modelo Axio Image AI, utilizando-se o recurso de luz polarizada e campo claro, sendo observadas as regiões com as respectivas microestruturas da junta soldada. Foram medidas as dimensões da ZF (largura e profundidade do cordão).

2.4 Ensaio de Microdureza Vickers

Foram realizadas medidas de microdureza Vickers das amostras, com base na norma ASTM E 92-82, utilizando carga de 1Kgf (9,807N) e ambiente controlado sob temperatura de 20°C± 2°C. A quantidade de pontos realizados nas amostras está de acordo com a norma que indica um mínimo de 5 pontos.

O equipamento foi aferido usando padrão de referência e para facilitar e padronizar as distâncias entre as medidas foi elaborado um desenho esquemático de modo a

abrange todas as zonas do material, conforme Figura 3. Os pontos sem preenchimento de cor representam marcações realizadas no MB.

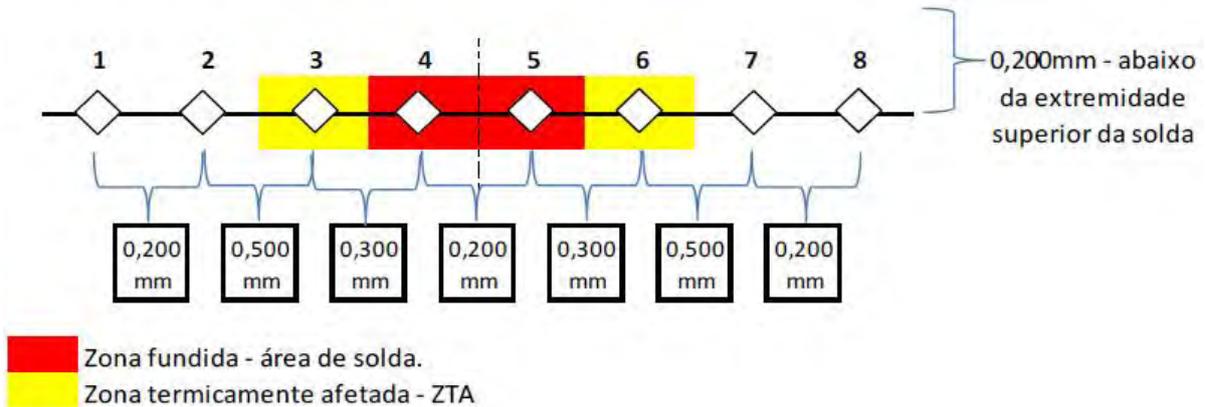


Figura 3. Representação do esquema utilizado para as marcações realizadas no MB.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas as imagens obtidas por microscopia óptica da junta soldada respectivamente dos processos feixe de elétrons e laser. Nestas figuras observam-se três regiões distintas da junta soldada correspondentes a: zona de fusão (ZF), ZAC e MB.

Na Figura 4 verifica-se que a penetração foi total na chapa superior e parcial na chapa inferior. Nestas condições foi possível alcançar a penetração média de (1660 ± 15) e (1688 ± 13) μm respectivamente nas direções transversal e longitudinal. Este valor é considerado adequado, pois atende a recomendação de penetração mínima de 1200 μm . Não foram observadas diferenças significativas da penetração do cordão em relação à utilização da seção transversal ou longitudinal do MB na soldagem com feixe de elétrons.

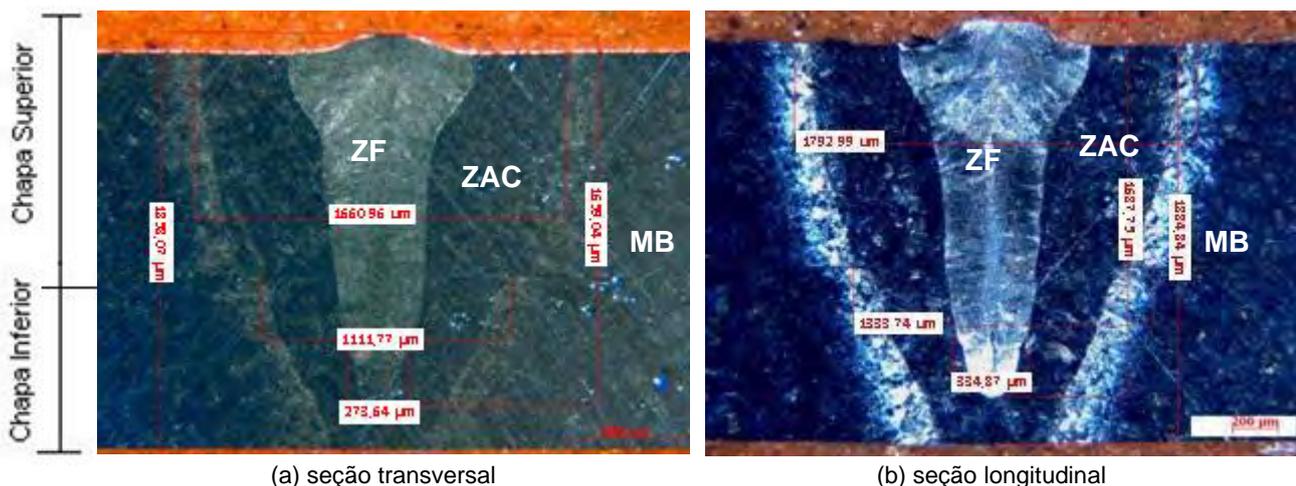


Figura 4. Profundidade de penetração e largura do cordão de solda com Feixe de Elétron (a) seção transversal e (b) seção longitudinal.

Na Figura 5 podem ser observadas as imagens da junta soldada com feixe laser para o tempo de pulso de 4 ms. A penetração alcançada na condição 4 foi de (1236 ± 22) e (1207 ± 16) μm , respectivamente, nas direções transversal e longitudinal.

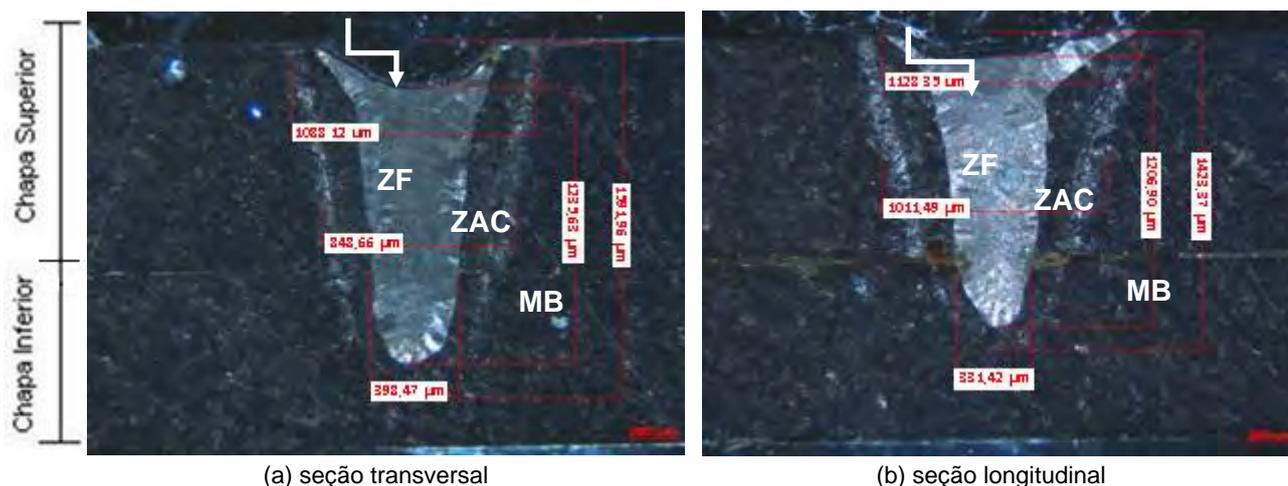


Figura 5. Profundidade de penetração e largura do cordão de solda na soldagem com laser de Nd:YAG (condição 4) (a) seção transversal e (b) seção longitudinal. As setas indicam falta de material na superfície do cordão.

Como os resultados das amostras 1, 2 e 3 não atingiram profundidade de penetração suficiente para unir as chapas, apenas a condição 4 da soldagem a laser com 4 ms foi analisada neste trabalho, pois alcançou a penetração mínima de 1.200 μm . Portanto, as condições com largura temporal (tempo de pulso) de 6, 8 e 10 ms não foram analisadas neste trabalho.

Na Tabela 4 estão mostrados os valores alcançados para a profundidade de penetração e largura do cordão para os dois processos de soldagem nas duas direções de laminação. Comparando-se os valores obtidos nos dois processos de soldagem verifica-se que a penetração foi maior no processo feixe de elétrons. Observou-se a tendência da largura do cordão ser maior no processo laser em relação ao feixe de elétrons. Apesar da menor largura do cordão, o volume da ZF e a penetração são maiores no processo feixe de elétrons, em consequência do maior calor imposto à junta em relação ao processo laser.

Tabela 4. Valores medidos para a penetração e largura do cordão para os processos: Laser (condição 4) e feixe de elétrons

Processo	Laser		Feixe de Elétrons	
	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal
Sentido de laminação				
Dimensões da ZF				
Profundidade de penetração (μm)	1236 \pm 22	1207 \pm 16	1660 \pm 15	1688 \pm 13
Largura do cordão (μm)	398 \pm 29	331 \pm 30	274 \pm 16	335 \pm 17

Os resultados obtidos nas juntas soldadas da Figura 4 não indicaram a presença de descontinuidades. Apenas na soldagem a laser pode ser observada a presença de descontinuidades (Figura 5), na forma de pequenas porosidades e depressões na superfície do cordão na ZF. A presença da porosidade é causada pelo aprisionamento do gás de proteção, enquanto a depressão na superfície da ZF pode ser atribuída ao reduzido tempo de pulso de $4 \cdot 10^{-3}$ segundos (4ms). Esta observação pode ser confirmada em estudos anteriores,⁽¹⁶⁾ na qual o tempo de pulso reduzido pode favorecer a presença de depressões na superfície do cordão, facilitando a concentração de tensão na junta soldada.

Nas Figuras 6 e 7 são observadas as microestruturas obtidas nas seções longitudinais e transversais das juntas soldadas pelos processos feixe de elétrons e

laser. As microestruturas da ZF obtidas nos processos de soldagem apresentam morfologias celular-dendrítica na parte central da ZF (Figuras 6a, 6b, 7a e 7b). Nas regiões próximas da interface com a ZAC (linha de fusão) a morfologia ainda permanece celular-dendrítica, mas observa-se a morfologia mais direcionada em razão da maior extração de calor na direção para o MB (Figuras 6c, 6d, 7c e 7d).

Apesar das microestruturas serem similares observa-se nas amostras soldadas com laser a ZF com uma morfologia um pouco mais fina, em relação às amostras com feixe de elétrons. A razão para a microestrutura ser mais refinada no processo laser está relacionada à maior velocidade de resfriamento da junta, em razão do menor calor imposto ao cordão de solda usado na soldagem deste processo.

Nas Figuras 6e, 6f, 7e e 7f observam-se as regiões da ZAC. Esta região alcançou elevada temperatura permitindo a estabilização do campo austenítico antes do resfriamento rápido provocado pelos processos de soldagem, portanto foram obtidas regiões solubilizadas e com austenita revertida na matriz martensítica.

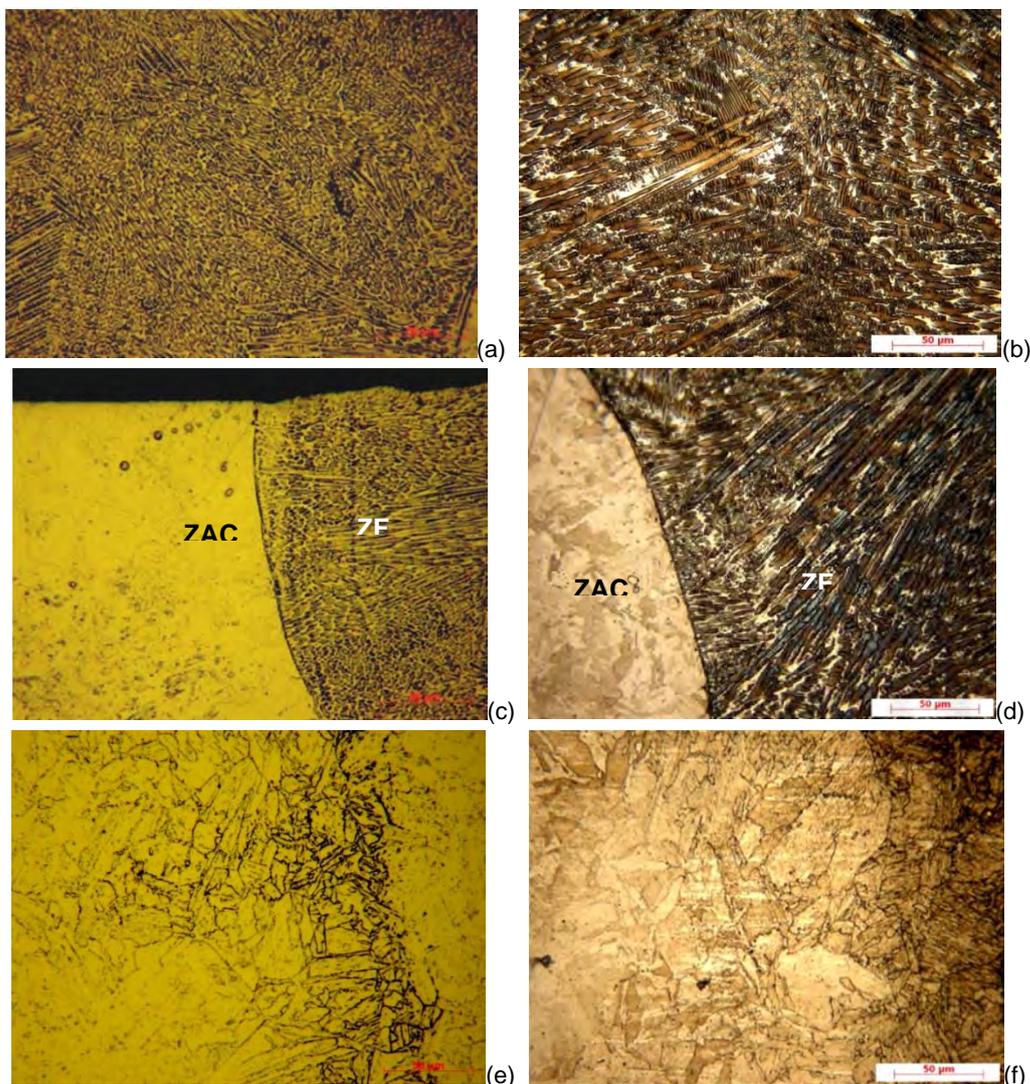


Figura 6. Microestrutura das amostras soldadas com feixe de elétrons (Aumento de 500x) - (a), (c) e (e) seção transversal e (b), (d) e (f) seção longitudinal.

Nas Figuras 6 e 7 não são observadas a presença de discontinuidades, tais como falta de fusão na ZF e trincas na ZAC, indicando a possibilidade de utilizar os dois processos na soldagem deste aço.

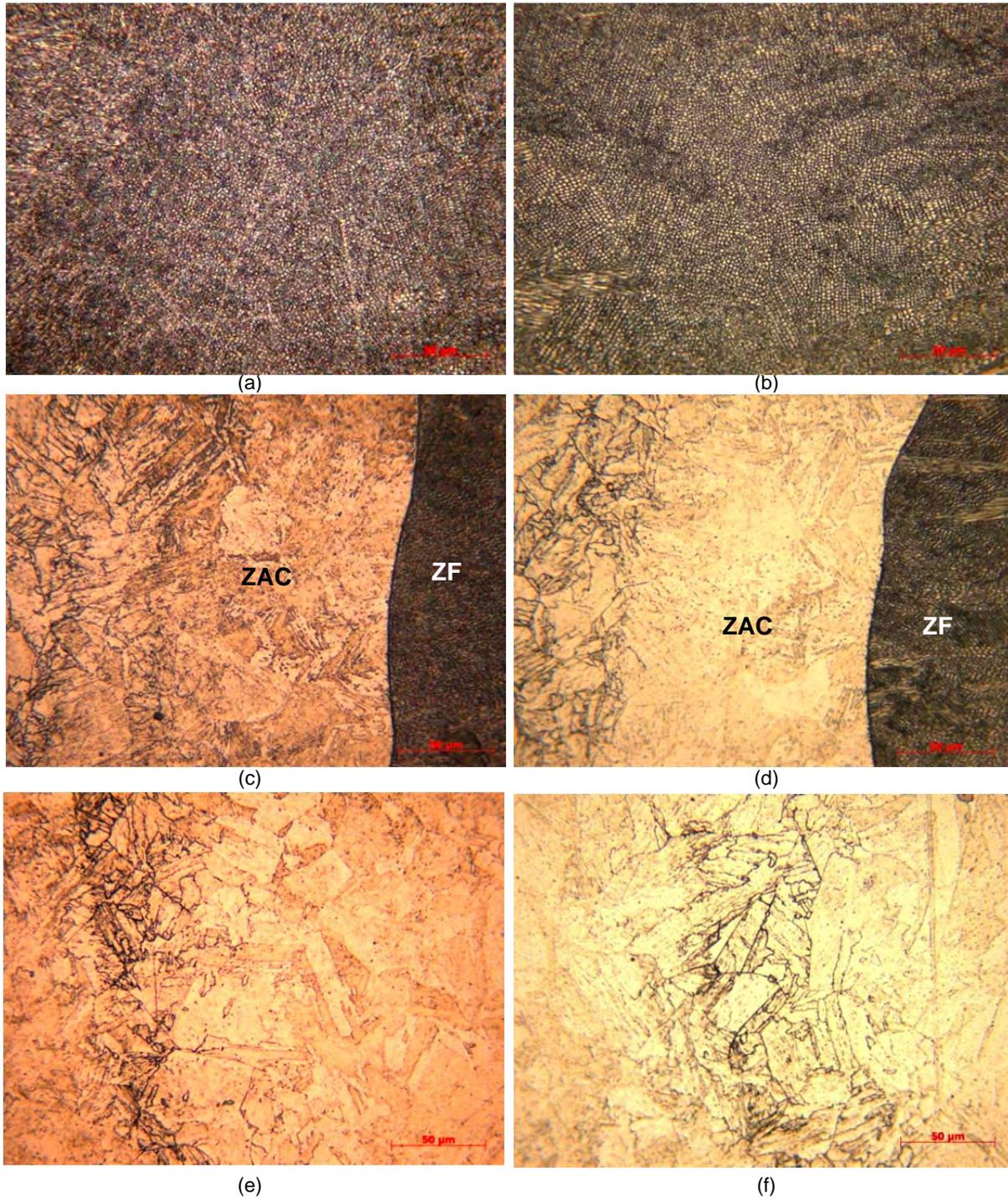


Figura 7. Microestrutura das amostras soldadas com feixe laser (Aumento de 500x) - (a), (c) e (e) seção transversal e (b), (d) e (f) seção longitudinal.

Nas Figuras 8a e 8b são mostrados os resultados de microdureza Vickers em relação ao sentido de laminação longitudinal e transversal para os processos feixe de elétrons e laser. Observa-se que independente do sentido de laminação os valores alcançados de dureza para o mesmo processo são similares. No entanto, entre os processos de soldagem são observados diferenças de comportamento. A variação dos valores de microdureza nas juntas com o processo feixe de elétrons são maiores em relação ao processo laser. A diferença de comportamento está relacionada ao maior calor imposto na junta soldada no processo feixe de elétrons

que provocou em algumas regiões da ZAC um maior aquecimento possibilitando assim, alcançar um maior valor de dureza no resfriamento.

Ocorre uma redução dos valores de microdureza Vickers na ZF e na ZAC próximo da interface com a ZF, em especial pela dissolução de precipitados e maior teor de austenita revertida. Os maiores valores de microdureza Vickers foram obtidos na ZAC da soldagem com feixe de elétrons em distâncias próximas a 1 mm. A dimensão da ZAC no processo de soldagem com feixe de elétrons é maior do que na soldagem a laser. A possível causa para os maiores valores de dureza medidas na solda por feixe de elétrons em relação às medidas na solda a laser, nestes pontos próximos a 1 mm é a maior temperatura alcançada associado ao rápido resfriamento. Os valores de microdureza da ZF e da ZAC podem ser retomados submetendo esta região a tratamentos térmicos após a soldagem para valores próximos ao do MB.

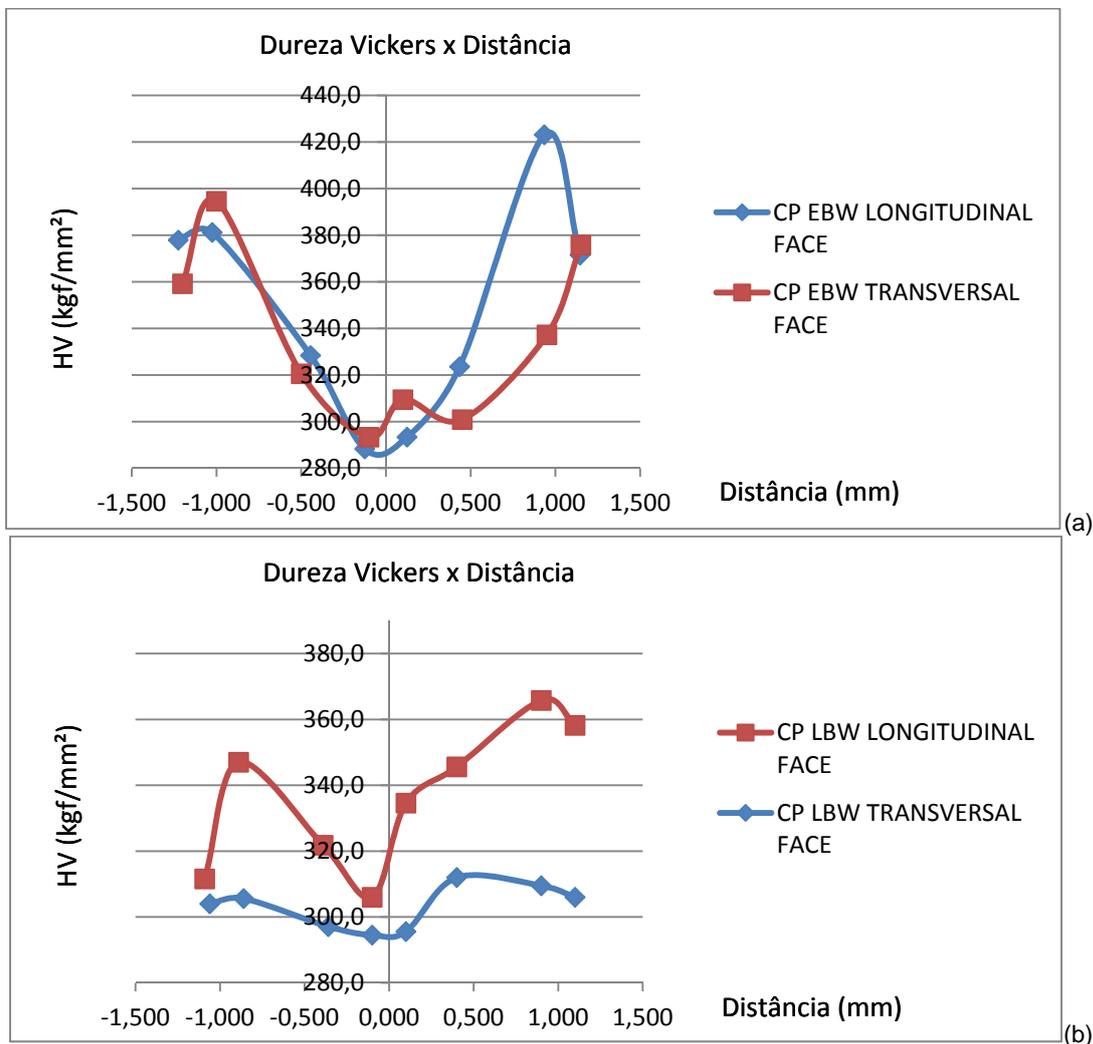


Figura 8. Variação de microdureza Vickers em relação à distância (a) feixe de elétrons e (b) laser.

5 CONCLUSÃO

As juntas soldadas pelo processo por feixe de elétrons e laser atenderam o requisito de penetração mínima de 1.200 μm .

As juntas soldadas com o processo por feixe de elétrons ficaram visualmente melhores, pois não foi verificada a presença de descontinuidades, poros e depressões na superfície do cordão.

Nas juntas soldadas com o processo laser foi verificada a presença de descontinuidades, poros e depressões na superfície do cordão.

As dimensões da ZAC e os valores de microdureza Vickers do processo por feixe de elétrons foram maiores quando comparados às obtidas no processo laser.

O fato de o processo por feixe de elétrons já possuir um procedimento de soldagem qualificado fez com que as amostras soldadas obtivessem melhores resultados em relação ao processo laser. Acredita-se que os parâmetros do processo laser podem ser aperfeiçoados para obtenção de melhores resultados.

REFERÊNCIAS

- 1 R.F.Decker and S.Floreen, Maraging Steels: Recent Developments and Applications. Proc. Symp TMS Annual Meeting, Phoenix, Arizona, p.1-38, 1988
- 2 Ahmed M, Ali A, Hasnain S K and Khan Q. Magnetic properties of maraging steel in relation to deformation and structural phase transformations. Acta metall. mater. V.42, No 3, p.631, 1994
- 3 Lang FH, Kenyon N. Bulletin 159. New York: Welding Research Council, Engineering Foundation; 1971
- 4 V.Da Costa e Silva André Luiz, Roberto Mei Paulo; Aços e ligas especiais – V. 2, 2^a Edição, p.294, 443 – 444, 2006
- 5 Guo Z, Sha W, Vaumousse D. Microestrutural evolution in a PH13-8 stainless steel after ageing. Acta Mater 2003;51:101-16
- 6 MO De-feng, HU Zheng-fei, CHEN Shu-juan, et al. Microstructure and Hardness of T250 Maraging Steel in Heat Affected Zone. Journal of Iron and Steel Research, International, 2009, 16(1): 87-91
- 7 MA Cheng-young, TIAN Zhi-ling, DU Ze-yu, et al. Characterization of the Microstructure and Hardness of the HAZ in a 800 MPa Grade RPC Steel. China Welding, 2005, 14(1): 48
- 8 ASM Metals Handbook – Welding, Brazing and Soldering – V. 6, p. 755-764, 1993
- 9 P.G. Klemens, Keyhole modeling during laser welding. J. APPL. Physics, V. 47, p. 2165-2174, 1976
- 10 J.G. Sickman and R. Morijn, Phillips, Introduction to Modern Optics. Res. Rep., V. 23, P 376, 1968
- 11 E.V. Locke and R.A. Hella, IEEE J. Metal Processing with a Wigh Power CO2 Laser. Quantum Electronics, V.QE-10 No 2, p 179-185, feb 1974
- 12 E.L. Beardson, D.J. Schmatz, and R.E. Bisaro, High speed welding of sheet steel with a CO2 laser. Weld. J., V.52, p 227-229, 1973
- 13 M. Jorgensen,. Constr., V. 12 No 2, p 88 feb 1980
- 14 M.H. Mccay, T.D. Mccay, A. Sedghina-Sab, and D.R. Keefer, Laser Materials Processing III, J. Mazumder and K. Mukherjee, ED., Minerals, Metals, and Materials Society, 1989
- 15 Rossi, W.; Rocha, G. A.; Neves; M. D. M.; Soldagem de aço Inoxidável super Duplex UNS S32750 com laser pulsado de Nd:YAG - 7^o COBEF a ser realizado abril de 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ - Brasil