

Soldagem Gas Metal Arc Welding para união de tubos em aço carbono-manganês: avaliação dos efeitos estruturais e de dureza para re(utilização) de retalhos

Luciano Gotardo Sommacal¹, Kelly Freiberger¹, Cíntia Gabriely Zimmer^{1*}

*Orientadora

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS)
Campus Feliz. Feliz, RS, Brasil.

Resumo: Esta pesquisa surgiu pela preocupação em criar uma solução que possa gerar menos impacto ao meio ambiente. O estudo visa avaliar aspectos macroestruturais, microestruturais e propriedades de dureza decorrentes da soldagem de tubos de aço estrutural, para reaproveitamento de retalhos, os quais seriam descartados. Para tanto foram coletados retalhos de tubos provenientes do processo de fabricação em indústria do segmento metal-mecânico. A união dos retalhos foi feita por meio do processo *Gas Metal Arc Welding*, almejando a produção de cilindros hidráulicos telescópios. Esse processo é amplamente denominado por GMAW, sendo largamente utilizado na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas metálicas na indústria. Sendo assim, foi elaborado um procedimento de soldagem para união dos retalhos de tubos de aço carbono-manganês. Procedeu-se a soldagem e após foram extraídas amostras da região que abrange o material base e a região soldada. As amostras foram preparadas por lixamento, polimento e ataque químico Nital 10%. A avaliação macroestrutural objetivou identificar as regiões características evidenciadas pelo processo de soldagem: zona fundida (ZF), zona afetada termicamente (ZAC) e material base (MB), bem como avaliar possíveis defeitos decorrentes do processo utilizado. A dureza foi medida pelo método Vickers, onde perfis de microdureza foram realizados ao longo da região soldada. Por fim, através da análise microestrutural buscou-se relacionar as zonas identificadas na análise macroestrutural com as microconstituintes observadas. Os resultados mostraram que o procedimento de soldagem foi adequado, evidenciado na análise macroestrutural onde não se observaram defeitos de soldagem. A dureza da região soldada apresentou variações, sendo estas esperadas, pois evidenciou-se diferentes fases formadas ao longo das regiões soldadas. Como perspectivas futuras pretende-se avaliar as propriedades mecânicas, por exemplo, através dos ensaios de tração e vida em fadiga de amostras de tubos soldados para verificar a possibilidade de (re)utilização dos retalhos na produção de novos cilindros hidráulicos.

Palavras-chave: Aço carbono-manganês. Soldagem. Cilindro hidráulico. Ensaio metalográfico. Dureza.

Abstract: This research arose from the concern to create a solution that could generate less impact to the environment. The aim of this study was to evaluate the structural, microstructural and hardness properties due to structural steel tube welding, for reuse of flaps, which would be discarded. In order to do so, pipe flaps were collected from the manufacturing process in the metal-

mechanic industry. The flap union was made using the Gas Metal Arc Welding process, aiming the production of hydraulic cylinders telescopes. This process is widely known as GMAW and is widely used in manufacturing and recovery of parts, equipment and metal structures in the industry. Thus, a welding procedure was developed to join the flaps of carbon-manganese steel tubes. Welding was performed and samples were taken from the region surrounding the base material and the weld region. Samples were prepared by sanding, polishing and 10% Nital etching. The macrostructural evaluation aimed to identify the characteristic regions evidenced by the welding process: ZF, thermal affected zone (ZAC) and base material (MB), as well as to evaluate possible defects resulting from the process used. The hardness was measured by the Vickers method, where microhardness profiles were made along the welded region. Finally, through microstructural analysis, we sought to relate the areas identified in the macrostructural analysis to the observed microconstituents. The results showed that the welding procedure was adequate, evidenced in the macrostructural analysis where no welding defects were observed. The hardness of the welded region presented variations, which were expected, as different phases formed along the welded regions were evidenced. As future prospects it is intended to evaluate the mechanical properties, for example, through tensile and fatigue life tests of welded pipe samples to verify the possibility of (re) use of the flaps in the production of new hydraulic cylinders.

Keywords: Carbon-Manganese Steel. Welding. Hydraulic Cylinder. Metallographic Testing and Hardness.

Introdução

A atividade de movimentação de carga da grande maioria dos produtos está diretamente ou indiretamente relacionada com atuadores hidráulicos, sendo um item de extrema importância para o bom andamento nos mais diversos segmentos. Na agricultura, estão presentes nas plataformas de colheita de soja e milho, na construção civil, estão nos guindastes responsáveis pelo içamento de vigas de concreto e estruturas metálicas, na mineração, fazem parte do processo de lavra através de escavadeiras e caminhões.

No que tange o processo de fabricação dos atuadores hidráulicos, tubos de aço estrutural com costura são itens fundamentais, pois são utilizados para fabricação das camisas e hastes dos cilindros. O processo de fabricação segue a norma DIN EM 10305-2, que trata em detalhes dos tubos com costura trefilados a frio para aplicações de precisão.

Os tubos com costura apresentam esse nome, pois na sua fabricação são dobrados a partir de chapas e costurados pelo processo de soldagem *High Frequency*

Welding (HFW). A Figura 1 mostra a costura do tubo, conforme obtido do fabricante.

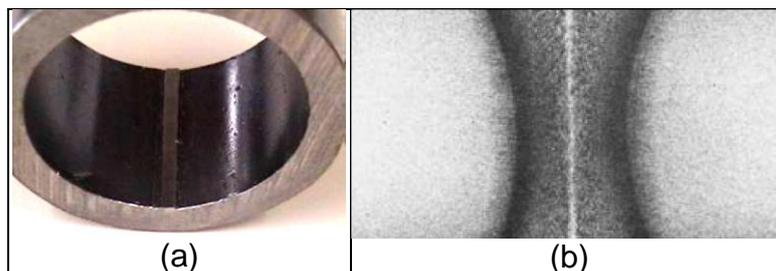


Figura 1 - Tubo com costura (a) e macrografia de uma solda HFW (b).
Fonte: (ANDRADE, 2007) e (BRENSING & SOMMER, 2017)

A diversidade de equipamentos e geometrias exigida pela indústria atual gera a produção de uma gama de cilindros hidráulicos não padronizada. Isso quer dizer que, cada vez mais, desenvolvem-se produtos com geometrias específicas para cada aplicação. Tal fato acaba por gerar níveis elevados de retalhos de matéria-prima que possuem como destino containers de resíduos e que posteriormente são destinados às usinas siderúrgicas para refusão.

A possibilidade de (re)utilização destes retalhos, está fundamentada em dois pilares fundamentais, quando avaliada do ponto de vista da perpetuação e impacto social das empresas:

- ✓ Ganho financeiro: o tubo com costura representa aproximadamente 59% do custo total do cilindro hidráulico telescópico, sendo assim, representa a maior parcela do custo final do produto, (SOMMACAL, 2015).
- ✓ Preservação do meio ambiente: os processos produtivos das organizações geram resíduos que, além de representarem custos para as empresas no tratamento adequado, geram prejuízos na preservação de recursos naturais e energia, podendo deteriorar o meio ambiente quando houver omissão quanto a sua reutilização.

De acordo com pesquisa realizada pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (CHEN, 2010 apud RAZALI & YATIM, 2013), a reciclagem de metais de sucata é bastante vantajosa do ponto de vista sustentável. Segundo o estudo, utilizando sucata reciclada no lugar do minério de ferro virgem, estima-se resultados como: 75% de economia de energia, 90% de redução na utilização de matérias-primas, 86% de redução na poluição do ar, redução de 40% no uso da água, redução de 76% na poluição da água, redução de 97% nos resíduos de mineração. Ainda, conforme o estudo, cada tonelada de aço reaproveitado de sucata de aço seria responsável pela

economia de 1.115 kg de minério de ferro, 625 kg de carvão e 53 kg de pedra calcária.

Nesse contexto, se faz necessário verificar a viabilidade de (re)utilização dos retalhos, por meio da qualificação do processo de soldagem. Como perspectivas futuras pretende-se avaliar as propriedades de resistência mecânica e propriedades de fadiga da união soldada.

Materiais e Métodos

O material desse estudo trata-se de tubos com costura produzidos em aço estrutural, classificados de acordo com a norma DIN EM 10305-2 classe E335+SR e tratados termicamente para alívio de tensões. Utilizando como base de referência (LANCASTER, 1999), o material do tubo é denominado aço carbono-manganês. Isso se deve ao fato de o aço apresentar porcentagens inferiores a 1% de carbono e 1,6% de manganês.

O material de adição utilizado na união é o arame de solda ESAB ER70S-6, que possui diâmetro de 1,2 mm e utiliza gás de proteção com mistura de 82% Argônio (Ar) + 18% gás carbônico (CO₂). Conforme dados dos fabricantes, as características de composição química e propriedades mecânicas dos materiais utilizados estão destacadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

MATERIAL	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Al (%)
Tubo: Aço carbono-manganês (aço E355+SR)	0,194	1,485	0,0122	0,0022	0,007	0,041
Material de adição (ESAB ER70S-6)	0,12	1,80	0,025	0,025	1,15	-

Tabela 1 - Composição química do material de base e material de adição.
Fonte: (MARCEGAGLIA, 2017) e (ESAB, 2016)

MATERIAL	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	ALONGAMENTO (%)
Tubo: Aço carbono-manganês (aço E355+SR)	639	715	16,3
Solda: Material de adição (ESAB ER70S-6)	483	579	26

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do material de base e material de adição.
Fonte: (MARCEGAGLIA, 2017) e (ESAB, 2016)

Tubos com diâmetro de 215 mm, espessura de 9,5 mm e que seriam destinados ao *container* de sucata de uma empresa do segmento metal mecânico da cidade de Caxias do Sul no Rio Grande do Sul, foram selecionados para união de soldagem GMAW. A Figura 2 mostra o depósito de retalhos de tubos da empresa.



Figura 2 - *Container* de armazenamento de retalhos de tubos.
Fonte: (SOMMACAL, 2015)

Os retalhos de tubo, previamente selecionados, passaram pelo processo de usinagem para produção de chanfro em “V” com abertura total de 60 graus, conforme mostra desenho da Figura 3.

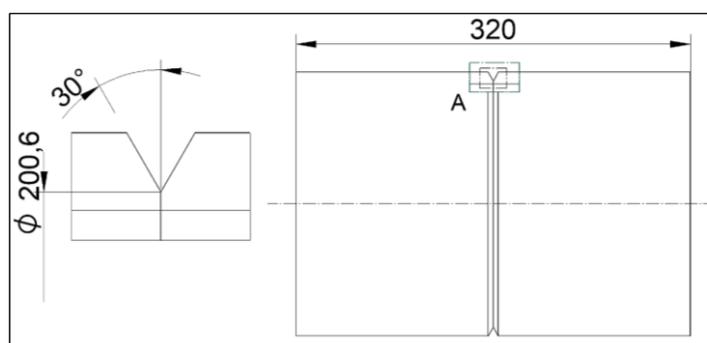


Figura 3 - Geometria do chanfro da união soldada.
Fonte: Autor

Após procedeu-se a limpeza dos retalhos, alinhou-se os tubos pela prática de ponteamto e executou-se o cordão de solda circunferencial, utilizando um robô Kawasaki com aparelho de soldagem acoplado. Os parâmetros de soldagem utilizados seguem na Tabela 3, onde utilizou-se distância entre a tocha e a peça a ser soldado de 5,5 mm e ângulo de soldagem de 20 graus.

PASSE	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	VELOCIDADE (cm/min)	ENERGIA DE SOLDAGEM (J/mm)	OSCILAÇÃO (mm)
1	4,3	190	28	175	0

Tabela 3 - Parâmetros utilizados para programação do robô de solda.
Fonte: Autor

Após o processo de soldagem foram retiradas três amostras com seção aproximada de 25 mm x 10 mm, identificadas conforme Figura 4. No primeiro corpo de prova (CPM_1) há apenas a solda HFW (solda de costura proveniente da fabricação do tubo). No segundo corpo de prova (CPM_2) há a solda circumferencial GMAW (solda utilizada para união dos tubos). No terceiro corpo de prova (CPM_3) há a interseção das duas soldas.

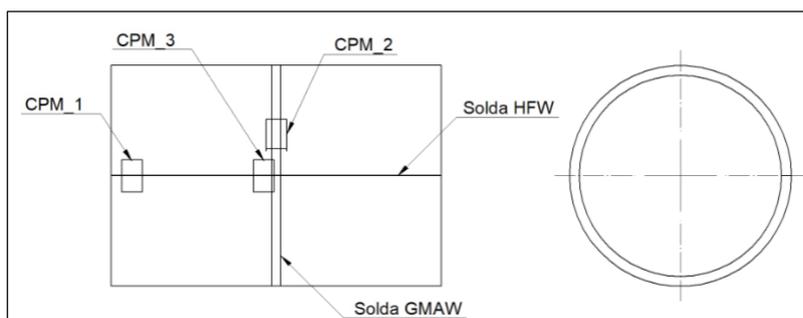


Figura 4 - Identificação das amostras retiradas dos retalhos de tubo pós processo de soldagem.

Fonte: Autor

A preparação das amostras para análise micro e macrográfica foi realizada por meio de lixamento, polimento e ataque químico para revelação da microestrutura, onde se utilizou Nital 10%.

Com auxílio de um microscópio estereoscópico fizeram-se análises em baixas magnificações. Para altas magnificações utilizou-se um microscópio ótico. Analisou-se a homogeneidade da solda, presença ou não de defeitos, tais como, descontinuidades nas juntas soldadas, presença de impurezas, falta de fusão nas regiões de interface das soldas, falta de preenchimento na região de transição entre o material de base e material de adição e por fim a identificação da zona fundida (ZF), zona afetada pelo calor (ZAC) e material base (MB).

As análises de microdureza foram realizadas em um microdurômetro Vickers sob carga de 0,294 N, em perfis retilíneos, com espaçamento de 0,15 mm entre cada endentação. Foram realizadas medições nas amostras em regiões correspondentes a ZF, ZAC e MB. No CPM_1 foram realizadas 32 endentações num perfil de 4,8 mm. Já no CPM_2 foram realizadas endentações na ZF e na interface entre a ZF e ZAC, em ambas foram feitas 23 endentações num perfil de 3,45 mm. Por fim, no CPM_3 foram realizadas 25 endentações num perfil de 3,75 mm.

Resultados

As imagens apresentadas na Figura 5, Figura 6 e Figura 7, mostram as análises macrográficas das amostras soldadas. Em nenhum caso foram evidenciados defeitos, tais como, falta de preenchimento, descontinuidades, falta de penetração, mordeduras ou trincas.

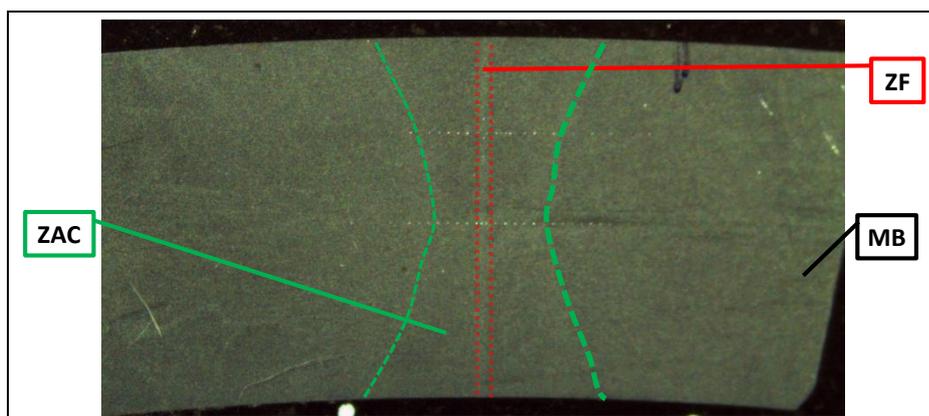


Figura 5 - Macrografia da costura do tubo que apresenta solda HFW (CPM_1).
Fonte: Autor

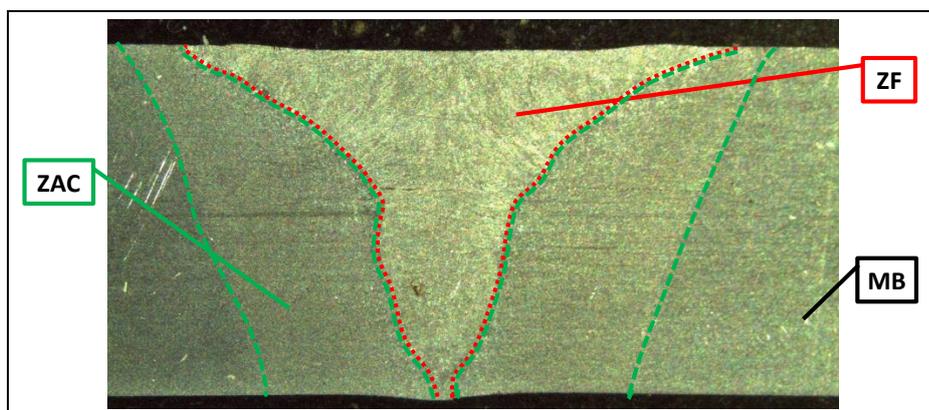


Figura 6 - Macrografia da união dos tubos que apresenta solda GMAW (CPM_2).
Fonte: Autor

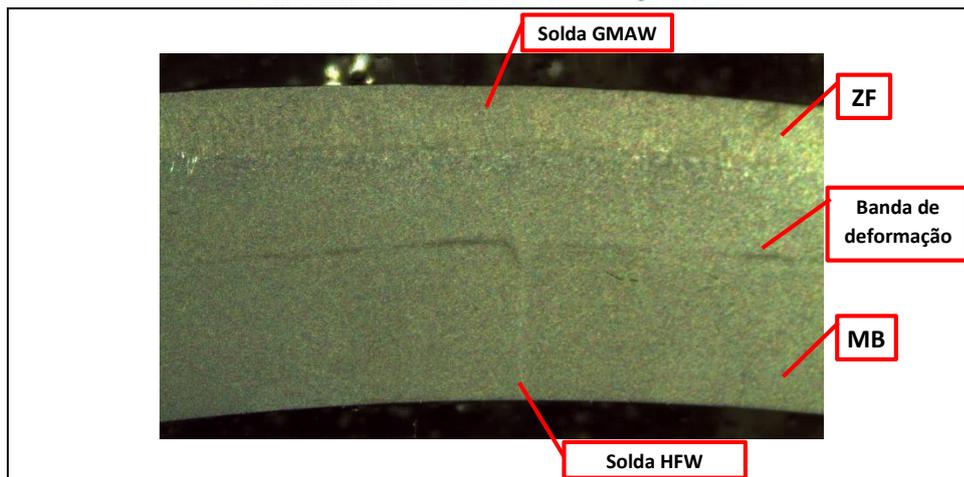


Figura 7 - Macrografia da intersecção da união dos tubos com a costura, a qual apresenta as soldas HFW e GMAW (CPM_3).
Fonte: Autor

As imagens da Figura 8 indicam, por meio de setas, os locais onde foram realizados os perfis de microdureza, enquanto as imagens contidas na Figura 9, Figura 10 e Figura 11 apresentam os resultados das durezas encontradas.

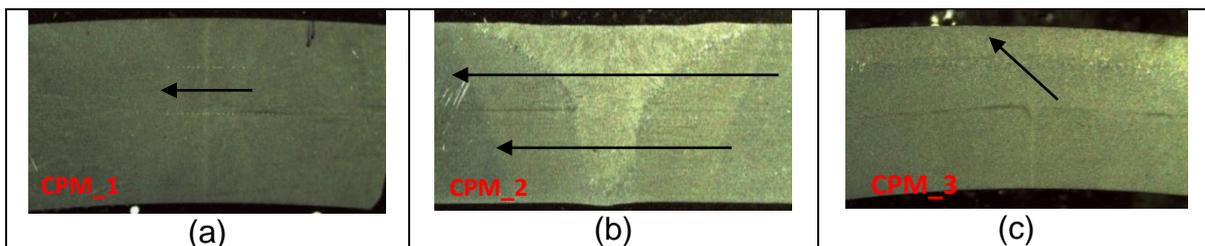


Figura 8 – As setas indicam o local onde foi realizado o perfil de microdureza: (a) costura, solda HFW. (b) união de tubos, solda GMAW. (c) intersecção entre HFW e GMAW.
Fonte: Autor

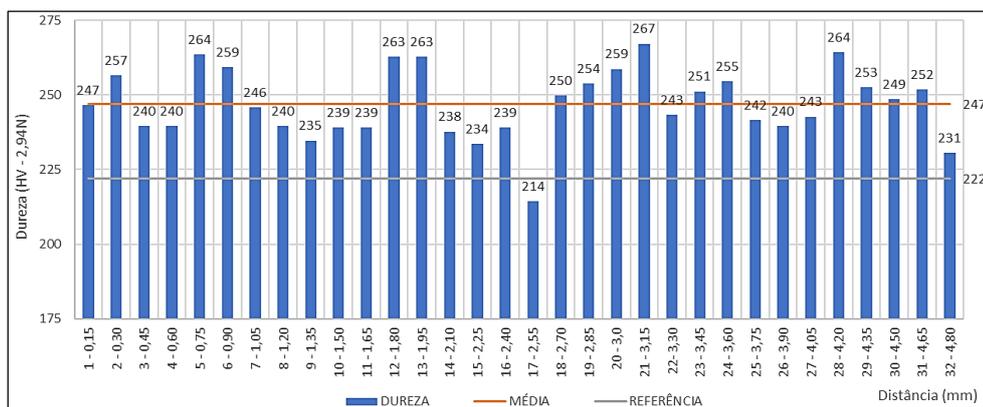


Figura 9 - Dureza Vickers no CPM_1.
Fonte: Autor

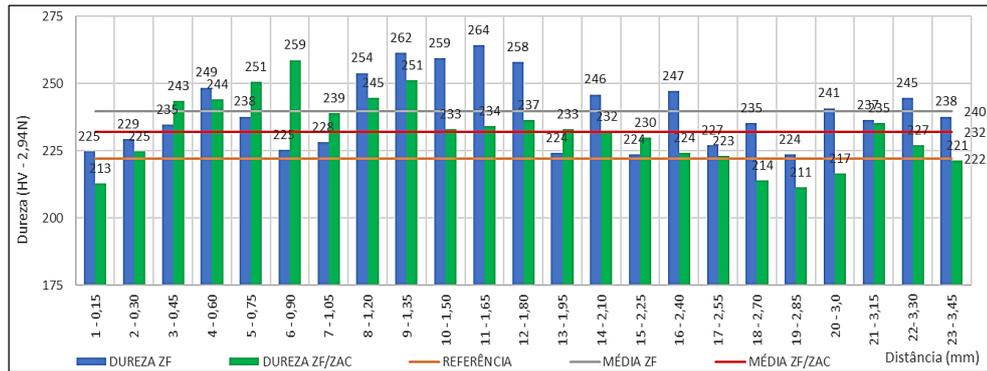


Figura 10 - Dureza Vickers no CPM_2.
Fonte: Autor

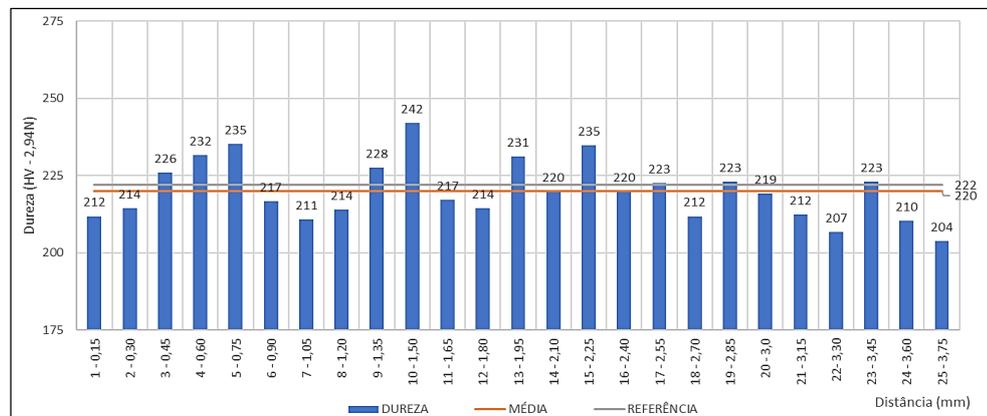


Figura 11 - Dureza Vickers no CPM_3.
Fonte: Autor

As imagens contidas na Figura 12, Figura 13 e Figura 14 mostram as microestruturas observadas nas seções com solda.

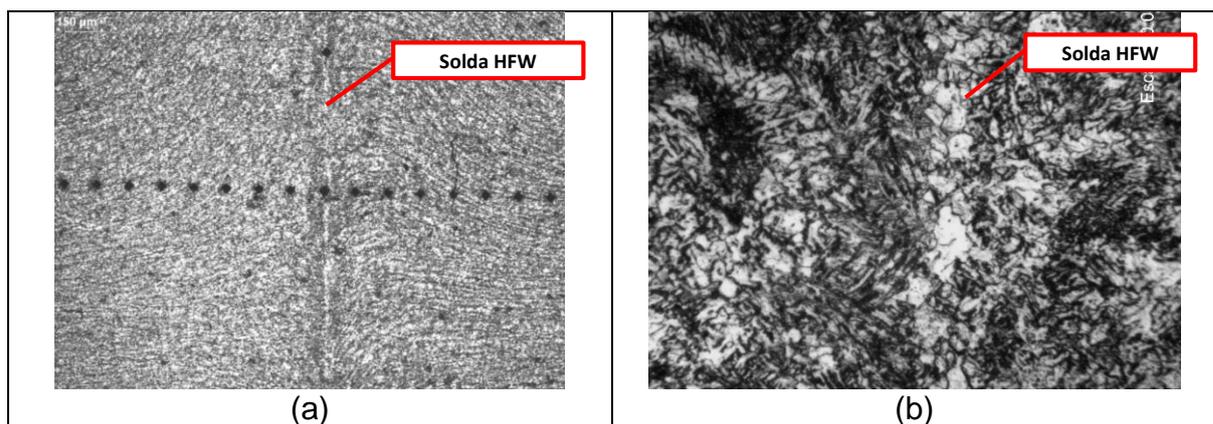


Figura 12 - Microestrutura da costuram, soldagem HFW (CPM_1). (a) Ferrita (fase clara) e Perlita (fase escura) com bandas de laminação horizontal e solda na linha vertical, 40x de aumento. (b) ferrita (fase clara) e martensita (fase escura) 400x de aumento.

Fonte: Autor

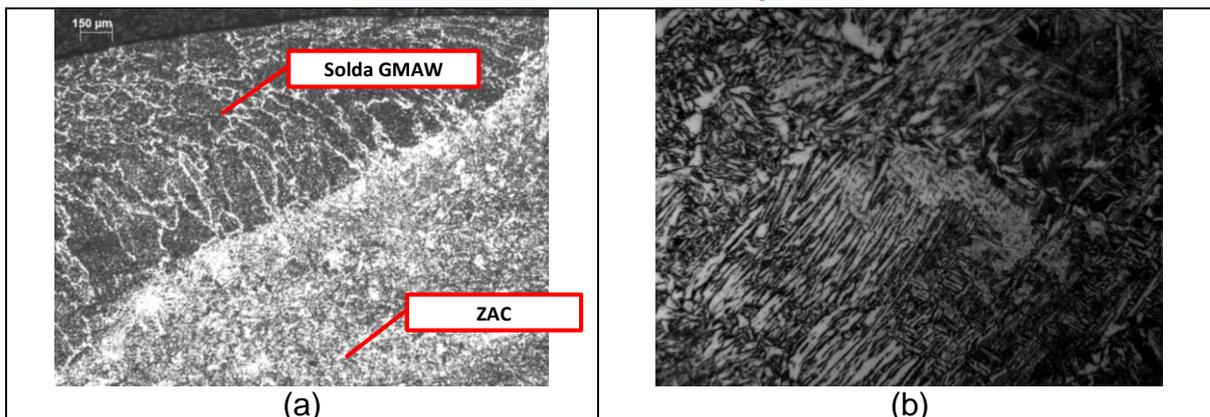


Figura 13 – Microestrutura da união GMAW (CPM_2). (a) a interface entre ZF e ZAC, 40x de aumento. (b) micrografia da ZAC, ferrita acicular fase clara e martensita (fase escura).

Fonte: Autor

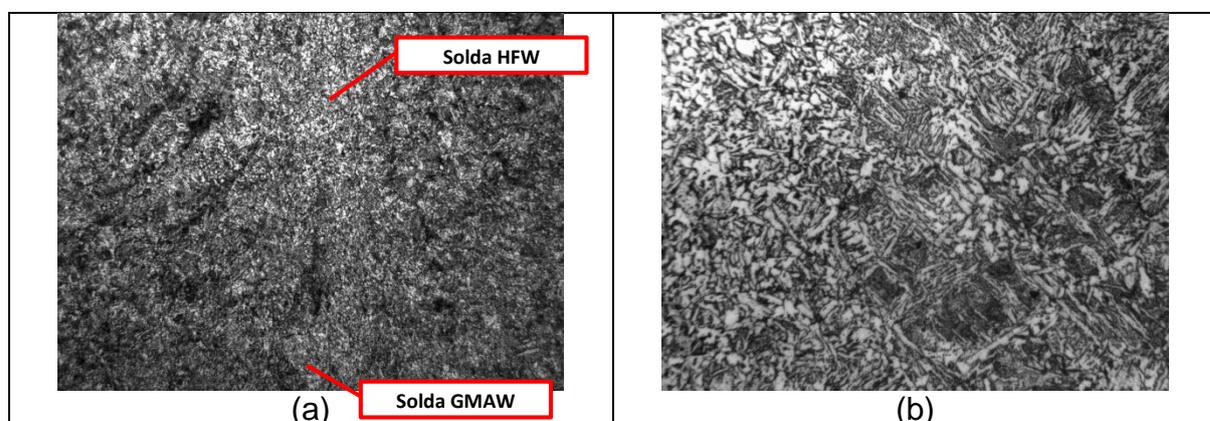


Figura 14 - Microestrutura da intersecção entre GMAW e HFW (CPM_3). (a) região entre o fim da solda HFW e início da GMAW, 100x. (b) intersecção entre as soldas, 400x.

Fonte: Autor

Discussão

A macroestrutura da costura do tubo realizada por soldagem HFW exibiu zona fundida aparente. A região de ZF é tão reduzida pois existe a combinação do efeito Joule nas superfícies de união e o caldeamento imposto pelo recalque dos rolos conformadores.

A macroestrutura da união de dois tubos realizada pela soldagem GMAW evidenciou que o cordão de solda apresentou penetração de raiz e também uma tangência perfeita quanto a superfície do tubo, ou seja, o ângulo do reforço não apresenta risco à segurança do componente. A zona afetada pelo calor, ZAC, apresentou ampla área afetada pelo aporte térmico e o restante da área de material base, MB, não sofreu alteração pelo calor do processo.

A presença da costura interseccionando a solda de união dos tubos, GMAW, não apresentou influência na microestrutura final. Nota-se que ZAC do GMAW é bem maior do que a ZAC do HFW, nesse sentido a costura não afeta negativamente a microestrutura da solda.

A dureza nas três amostras apresentou variações nos resultados em consequência dos processos de soldagem. O aumento da dureza ou redução de dureza, quando comparado com o material de referência, é esperado. Regiões com alto aquecimento e resfriamento rápido geram fase martensítica, a qual tem característica de alta dureza, enquanto regiões mais afastadas com menores taxas de resfriamento formam fase ferrítica, que aliadas ao aumento de grão refletem na diminuição da dureza. Ainda, os resultados mostram que os valores coletados são relativamente homogêneos ao longo de todas as áreas soldadas avaliadas com tendência a uma elevação na região da ZAC e ZF e além disso, ao centro onde existia uma linha escura (segregação) resultou em um pico que passou de 201 para 294 Vickers.

A microestrutura do material base apresentou-se predominantemente composta por ferrita e perlita. Na costura observou-se formação de martensita e ferrita equiaxial.

As linhas de fluxo evidenciadas na análise micrográfica que são geradas em função dos rolos de compressão do processo de soldagem HFW também são confirmadas por (MAKSUTI, MEHMETI, & OETTEL, 2007). Em todos os CPs nas regiões de MB a microestrutura possui matriz ferrita e perlita bandeada, estes fatos são típicos dos aços que passam pelo processo de laminação, o que corrobora com os estudos já realizados por (SANTOS, 2006), (COLPAERT, 2008) e (ROSÁRIO, PAULA, & DINIZ, 2015).

A microestrutura na união da solda GMAW apresentou martensita e ferrita acicular. Nos contornos de grão também observou-se a formação de ferrita alotriomorfa, a qual é formada a temperaturas mais altas, entre 800 °C e 850 °C. No processo de soldagem é possível chegar nessa temperatura.

A análise microestrutural da intersecção da costura com a solda GMAW não apresentou alterações microestruturais consideráveis. Tal fato pode ser explicado pelo alto gradiente de calor gerado no processo GMAW, gerando grande área da ZAC.

Considerações finais

Os resultados obtidos mostraram que o procedimento de soldagem utilizado é adequado, uma vez que a macroestrutura não revelou defeitos.

A dureza da solda apresentou variações, que são claramente justificadas pela diferença das fases formadas nas regiões afetadas pelo calor do processo de soldagem.

Como perspectivas futuras pretende-se avaliar as propriedades mecânicas da liga soldada quanto ao limite de escoamento, resistência a tração e avaliação da vida em fadiga. A partir desses dados pode-se estimar a viabilidade dos retalhos de tubos serem (re)utilizados na produção de novos tubos.

Referências:

ANDRADE, F. **Estudo das propriedades mecânicas de tubos de aço com costura treilados**. Trabalho de Graduação: Departamento de Engenharia de Materiais UFSC. Florianópolis. 2007.

BRENSING, K.H., SOMMER, B. **Steel Tube and Pipe Manufacturing Processes**. Düsseldorf. 2017.

CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CALLISTER, W., RETHWISCH, D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos metalúrgicos comuns**. São Paulo: Blucher, 2008.

ESAB. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev1_apostilasoldagemmigmag_nova.pdf> Acesso em 02/08/2017.

ESAB. **Processo de Soldagem: MIG/MAG (GMAW)**. 2014. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_mig_mag_gmaw.cfm> Acesso em 05/08/2017.

ESAB BR. **Metalurgia da soldagem**. 2004. Disponível em:
<<https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostilametalurgiasoldagem.pdf>> Acesso em 09/08/2017.

ESAB. **MIG/MAG wires (GMAW) mild steel wires**: Weld 70S-6. 2016. Disponível em:
<https://mam.esab.com:8443/assets/1/BDBA5CC688D14EBE822C00D265DF8E7D/doc/25677EF397304C998B81D22DD70F138C/69-en_US-FactSheet_Main-01.pdf>
Acesso em 16/05/2018.

LANCASTER, J. **Metallurgy of Welding**. Ebington: Ebington Publishing, 1999.

MAKSUTI, R., MEHMETI, H., OETTEL, H. **The Influence of the Plastic Deformation on the Metal Flow During High Frequency Electric Resistance Welding of Longitudinally Welded Pipes**. 2007. Disponível em:<<http://elektron.tmf.bg.ac.rs/dpsm2007/proceedings/06-Rrahim%20Maksuti-Beograd-2007.pdf>> Acesso em 16/05/2018.

MARCEGAGLIA. **Cold-drawn welded tubes Standard packaging**. 2017. Disponível em: <http://www.tubes.marcegaglia.com/marcegaglia_product/carbon-steel-cold-drawn-welded-tubes-packaging/> Acesso em 23/10/2017.

MARCEGAGLIA. **Carbon Steel Flats**. Napoli, 2017.

MODENESI, P. **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Belo Horizonte, 2007. Disponível em:
<<http://www.iem.unifei.edu.br/professores/edmilson/Arco.pdf>> Acesso em 22/04/2018.

MODENESI, P. **Introdução à Física do Arco Elétrico**. Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fundamentosfisicos1.pdf>> Acesso em 19/04/2018.

MODENESI, P., MARQUES, P. **Soldagem 1 - Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte, 2000. Disponível em:
<https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/0/03/Perguntas_.pdf> Acesso em 19/05/2018.

MODENESI, P., MARQUES, P., SANTOS, D. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <<http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>> Acesso em 12/05/2018.

RAZALI, Z.B., YATIM, N. **Conceptual Design of Automatic Manipulator for Metal and**

Non-metal Waste Management Application. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, v. 3, p.10 – 14, Malaysia, 2013.

ROSÁRIO, R.S., PAULA, A.S., DINIZ, S.B. **70º Congresso Anual da ABM.**
Encontro

Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, v. 3p. p.1 – 10, Rio de Janeiro, 2015.

SANTOS, F. **Desenvolvimento de ensaios de corrosão-fadiga para juntas soldadas de aço API 5L X60.** Dissertação: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SOMMACAL, L. G. **Análise dos processos de soldagem GMAW, laser e fricção aplicados no reaproveitamento de tubos mecânicos para fabricação de cilindros hidráulicos.** Trabalho de Graduação: Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015.

WARREN, L. **Examining electric resistance weld nuggets in tube and pipe.**

Elgin, 2001. Disponível em:

<<https://www.thefabricator.com/article/shopmanagement/examining-electric-resistance-weld-nuggets-in-tube-and-pipe>> Acesso em 17/05/2018.