

Tema: Soldagem

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NAS PROPRIEDADES METALÚRGICAS EM UMA JUNTA SOLDADA POR FRICÇÃO COM PINO CONSUMÍVEL*

Letícia Pegoraro Leal¹
Bruna Brito Freitas¹
Márcio Medeiros de Magalhães¹
Douglas Martinazz²
Mariane Chludzinsk³
Telmo R. Strohaecker⁴
Marcelo T. Piza Paes⁵
Ricardo Reppold Marinho⁶

Resumo

O mercado mundial está se desenvolvendo continuamente em todos os segmentos com a finalidade de melhorar a qualidade e diminuir os custos. O aperfeiçoamento e a criação de novas técnicas de soldagem são responsáveis por conservar as propriedades mecânicas e realizar as soldas com um menor número de defeitos. Este trabalho apresenta o processo de soldagem por fricção com pino consumível, conhecido como FHPP (*Friction Hydro Pillar Process*) em pino AISI 4340 e chapa AISI 4140. Como toda nova técnica é importante conhecer os parâmetros que serão utilizados no processo. Compreender o efeito da velocidade de rotação, força axial e de forjamento, consumo do pino e taxa de carregamento são necessários para avaliar sua influência na microestrutura da solda. Desta forma, no presente estudo, após a soldagem foram realizadas metalografias, a fim de analisar defeitos macro e microestruturais. Por fim, verificou-se significativa influência dos parâmetros de processo no comportamento metalúrgico da região soldada.

Palavras-chave: Soldagem por fricção com pino consumível; AISI 4340; AISI 4140; Caracterização estrutural.

INFLUENCE OF THE WELDING PARAMETERS BY FRICTION HYDRO PILLAR PROCESS IN THE METALLURGICAL PROPERTIES

Abstract

The global market is being continuously developed in several segments in order to improve quality and reduce costs. The development and introduction of new welding techniques are responsible for achieving adequate mechanical properties and reducing welding defects. This paper presents a friction welding process, Friction Hydro Pillar (FHPP), with a consumable pin AISI 4340 and AISI 4140 plate. As a new technique, it is important to understand the weld parameters such as rotational speed effect, axial force, forging force, burn off and loading rate, needed to evaluate its influence on the weld microstructure. In the present study, metallography was performed in the welded joints in order to analyze macro and microstructural defects. The influence of the process parameters on the metallurgical behavior of the welded region was evaluated.

Keywords: Friction welding with a consumable pin; AISI 4340; AISI 4140; Structural characterization.

¹ Engenheira Metalúrgica, Mestranda, PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, Mestrando, DEMET, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Engenheira Metalúrgica, Dr., PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalúrgico, Prof. Dr., PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁵ Engenheiro Metalúrgico, D.Sc., CENPES, Petrobras, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

⁶ Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., CENPES, Petrobras, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O uso de processos de soldagem para a união e reparo de peças e componentes metálicos é um assunto indispensável em aplicações industriais. Processos convencionais de soldagem apresentam inerentes as suas tecnologias, defeitos e limitações que incentivam o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novos processos, como as técnicas de soldagem por fricção (atrito). Entre elas está a soldagem por fricção com pino consumível (*Friction Hydro Pillar Processing - FHPP*) [1].

FHPP é uma inovadora técnica de soldagem por fricção desenvolvida na década de 1990 pelo TWI capaz de unir e reparar estruturas metálicas [2]. Neste processo, a junta soldada é produzida no estado sólido, uma vez que o calor é gerado através do atrito entre as superfícies dos componentes em contato. O processo envolve a rotação e consumo de um pino em uma matriz com uma cavidade côncava enquanto é aplicada uma força normal. É, então, gerado calor pelo atrito que aquece e plastifica os materiais, propiciando a união metalúrgica entre as partes em contato [3]. A figura 1 apresenta esquematicamente o processo FHPP.

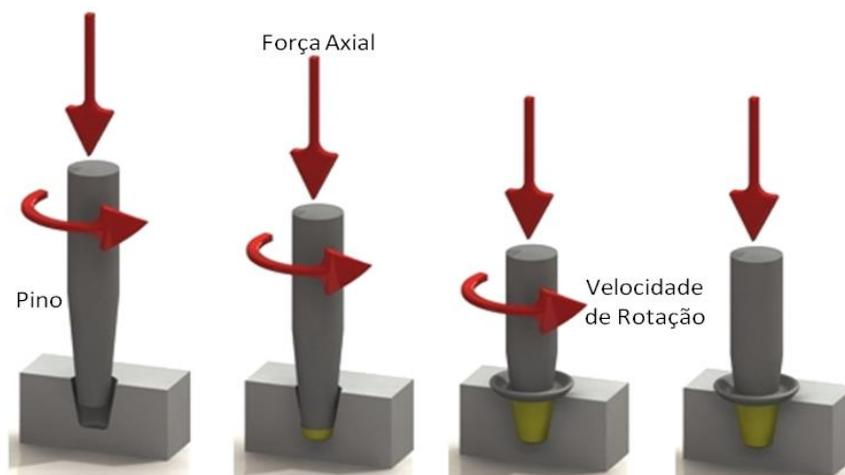


Figura 1. Sequência esquemática do processo de soldagem.

Neste processo há menor geração de calor (menores temperaturas de pico comparado aos processo de soldagem por arco elétrico), já que não ocorre a fusão dos materiais envolvidos, minimizando a ocorrência de efeitos deletérios como a degradação de propriedades mecânicas assim como defeitos associados à solidificação, absorção e evolução de gases (H, O e N) [4].

Vantagens como a possibilidade de produção de juntas soldadas com qualidade superior, por se processar no estado sólido, tornam esta técnica atrativa para a indústria. Como exemplo tem-se o setor petroquímico através do uso desta técnica para o reparo de materiais de difícil soldabilidade tendo-se, ainda, a possibilidade de utilização desta técnica para o reparo de instalações offshore através da soldagem subaquática [5-7].

A técnica de soldagem por fricção com pino consumível pode produzir juntas com menos defeitos por ser processado no estado sólido. O conhecimento dos parâmetros de soldagem, tais como: velocidade de rotação, força axial, torque, comprimento de queima, força de forjamento, é de importância fundamental, já que, a combinação destes parâmetros é responsável pela microestrutura e propriedades mecânicas formadas. [8-10].

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Deste modo, o presente trabalho tem por objetivo aprimorar o conhecimento acerca do comportamento metalúrgico obtido através do processo de soldagem com pino consumível. A realização desse estudo correlaciona o efeito dos parâmetros de soldagem com a morfologia das soldas através da caracterização de juntas soldadas com pino consumível AISI 4340 e chapa AISI 4140. As observações foram realizadas por meio de análises metalográficas (macro e micrografias) e ensaio de microdureza, a fim de observar modificações estruturais e possíveis presença de defeitos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização das juntas soldadas foram utilizadas chapas de aço AISI 4140 e pinos consumíveis de aço AISI 4340 [11]. Esses materiais foram escolhidos por serem aços de alta resistência e baixa soldabilidade. As composições químicas foram obtidas em espectrômetro óptico marca Spectrolab e as médias de três análises efetuadas estão na Tabela 1. Os elementos que variaram de acordo com os aços padrões das normas AISI 4340 e AISI 4140 estão em destaque.

Tabela 1. Composição química do pino e da chapa (% em peso).

	Nomenclatura	C	Si	Mn	P	S	Cr
Pino	SAE/AISI 4340	0,331	0,227	0,815	0,0128	0,0169	0,99
Chapa	SAE/AISI 4140	0,418	0,251	0,612	0,0192	0,0105	0,13 7

	Nomenclatura	Mo	Ni	Cu	V	Ti	Nb
Pino	SAE/AISI 4340	0,151	0,126	0,0828	0,0034	0,0016	0,0016
Chapa	SAE/AISI 4140	0,0107	0,0505	0,114	<0,001	<0,001	<0,001

Os pinos consumíveis e as chapas foram usinados conforme a Figura 2a. Para a realização da soldagem pela técnica FHPP foi utilizada a Máquina de Processos por Fricção (MPF 1000), desenvolvida no Laboratório de Metalurgia Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul [12], mostrado na Figura 2b. A MPF 1000 possui capacidade de força axial de 1000 kN, torque máximo de 1060 Nm e rotação nominal de 1760 rpm, sendo que os parâmetros de processamento utilizados estão apresentados na Tabela 2. Esse equipamento é conectado em um computador, a fim de registrar os dados obtidos, onde também são realizados os comandos dos testes.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

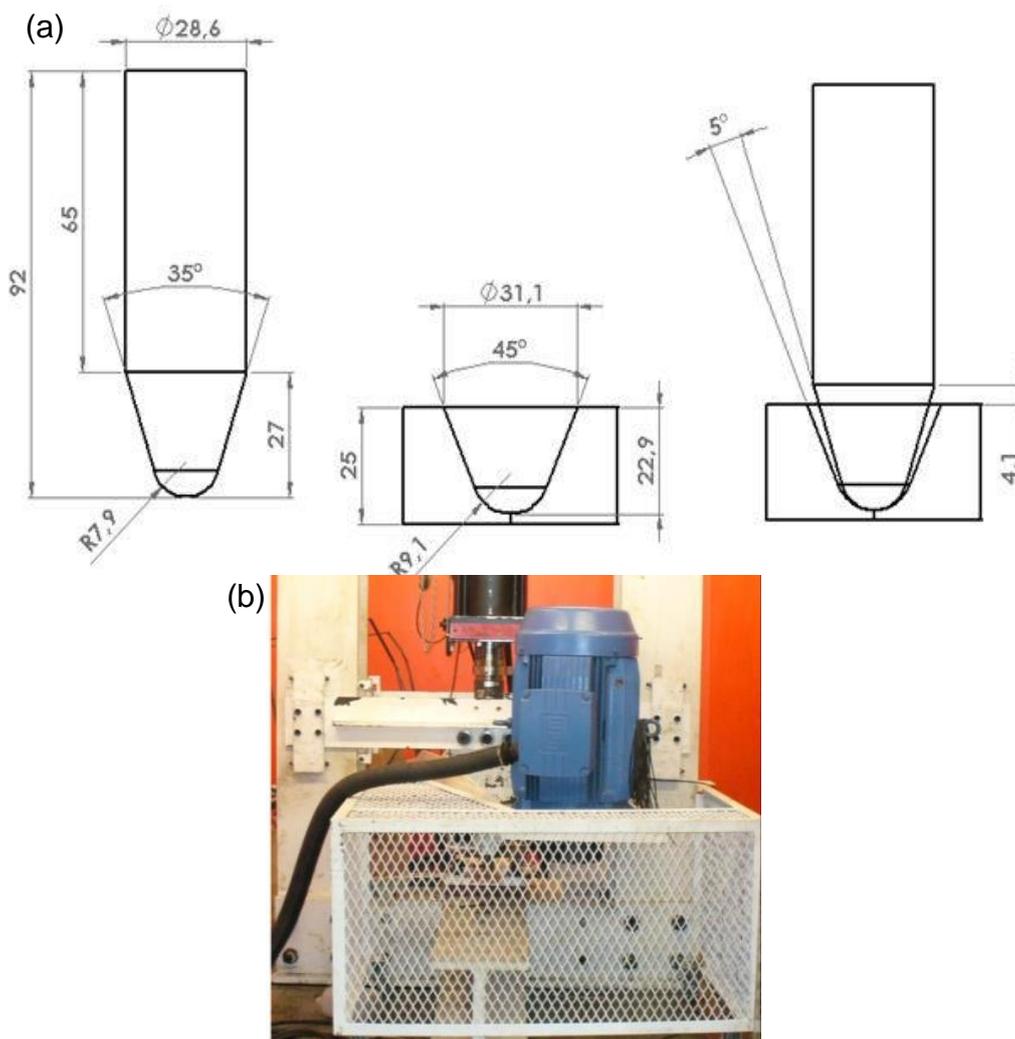


Figura 2. (a) Geometria utilizada para a confecção do pino consumível e da chapa base (medidas em mm); (b) Equipamento de soldagem.

Tabela 2. Parâmetros de Processamento utilizados.

Solda	Rotação (rpm)	Força (kN)	Recalque (kN)	Consumo do Pino (mm)
01	1500	100	150	9
02	1500	100	150	5
03	1500	100	100	9

O procedimento de análise metalográfica foi dividido em macrografias e micrografias. Para as macrografias foi realizada apenas a etapa de lixamento. As micrografias consistiram de embutimento, lixamento e polimento. Após essa preparação, as amostras de macro e micrografias foram atacadas com o reagente químico Nital 2%. A preparação dos corpos de prova foi executada conforme as normas ASTM E3 [13] e ASTM E 340 [14].

Após o ataque, as macrografias tiveram uma inspeção visual, a fim de verificar detalhes de preenchimento. Além disso, elas foram observadas em um microscópio ótico para facilitar a visualização. A Figura 3 mostra as regiões da solda que foram analisadas microestruturalmente. Esse trabalho avaliou a zona afetada pelo calor, conhecida como ZAC e a zona termo-mecanicamente afetadas, chamada de ZTMA. Foi utilizado um microscópio ótico (MO) marca Olympus, modelo BX 51M, com as

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

metalografias obtidas através de câmera digital acoplada ao microscópio. Foram realizadas micrografias das diferentes regiões afetadas identificadas como ZAC_{CHAPA} , $ZTMA_{CHAPA}$, $ZTMA_{PINO}$ e ZAC_{PINO} [15]. A microestrutura da extremidade da chapa e as microdurezas de todas as regiões também foram obtidas. As medidas de microdureza foram realizadas na escala Vickers (HV) com carga de 200 gF e espaçamento de 0,2 mm em um microdurômetro da marca INSTRON modelo Tukon 2100 B.

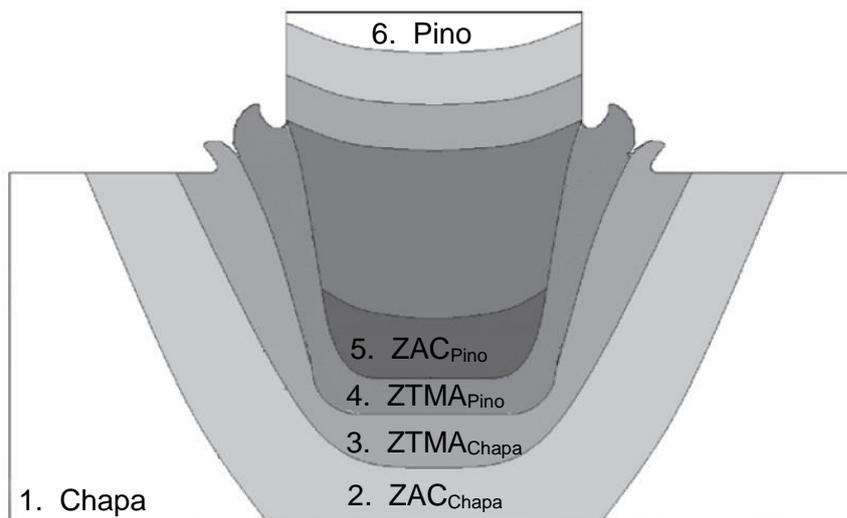


Figura 3. Ilustração das áreas observadas em uma junta soldada pelo processo FHPP [15].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As juntas soldadas foram realizadas de forma que possibilitasse um acompanhamento em tempo real em decorrência do computador acoplado a esse equipamento. Após os testes, são gerados gráficos com os parâmetros de soldagem, havendo, desta forma, precisão e controle sobre esses dados. A Figura 4 exemplifica os parâmetros de força axial e rotação em função do tempo de processamento.

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

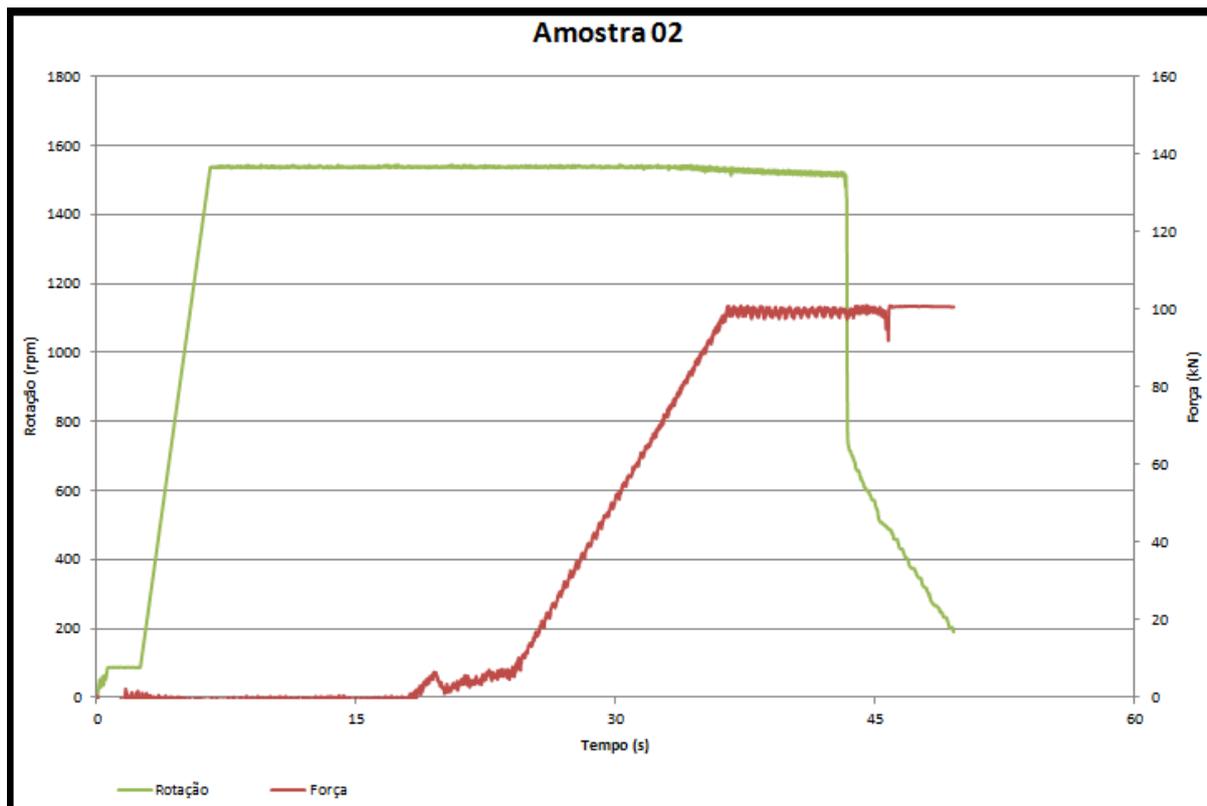


Figura 4. Parâmetros de soldagem correspondente à amostra 2.

Foi realizada uma análise das características em cada amostra. Detalhes e defeitos foram identificados e localizados nas soldas de teste. A Figura 5 (a/b/c) mostra as macrografias das amostras 1, 2 e 3, respectivamente. Essas amostras não apresentaram defeitos nas inspeções visuais, não sendo encontrados problemas tais como discontinuidades e trincas.

Nas análises realizadas no microscópio ótico na solda de teste 1 foram encontradas linhas brancas. Mais detalhes sobre as fases brancas serão descritos nas análises micrográficas, pois essas linhas são referentes às diferentes microestruturas formadas. Foram encontradas inclusões de óxidos/sulfetos observados nas ZAC do pino, próximo à interface de soldagem. Entretanto, a caracterização metalúrgica destes óxidos/sulfetos não será abordada no presente trabalho.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

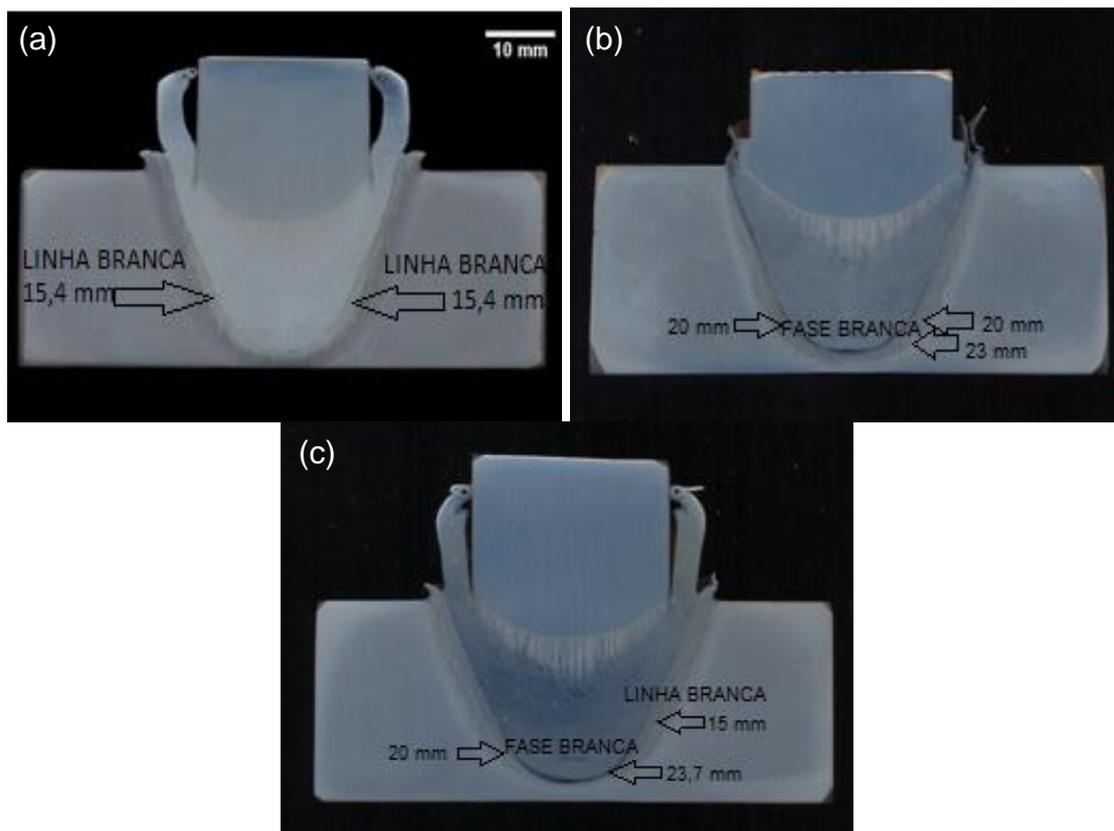


Figura 5. Macrografias das soldas testes com a localização das principais características **(a)** amostra 1; **(b)** amostra 2; **(c)** amostra 3.

Na amostra 2 foram mantidos os parâmetros de força axial, força de forjamento, rotação e taxa de carregamento, modificando-se apenas o consumo, que passou de 9 para 5 mm. Ao modificar esse parâmetro, não foram encontrados óxidos e as linhas brancas foram reduzidas para pontos não alinhados. É importante salientar que não existiu alinhamento, como encontrado na amostra 1.

A amostra 3 teve a força de forjamento diminuída de 150 para 100 kN. Não foram encontrados óxidos, entretanto foram observadas fases brancas, pontuais e alinhadas.

Na Figura 6(a/b) é apresentada a microestrutura da extremidade da chapa da amostra 2, situada na região 1 conforme a Figura 3. Esta é composta predominantemente de Perlita (P) com Ferrita de contorno de grão (FG). A microdureza foi medida e é da ordem de 263 HV. Na extremidade do pino, os valores de microdureza medidos são na ordem de 419 HV. Esses valores de dureza são esperados devido à microestrutura da base ser formada por perlita e ferrita, conforme mostra a figura 5(a/b) e o pino ter microestrutura formada por martensita revenida.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

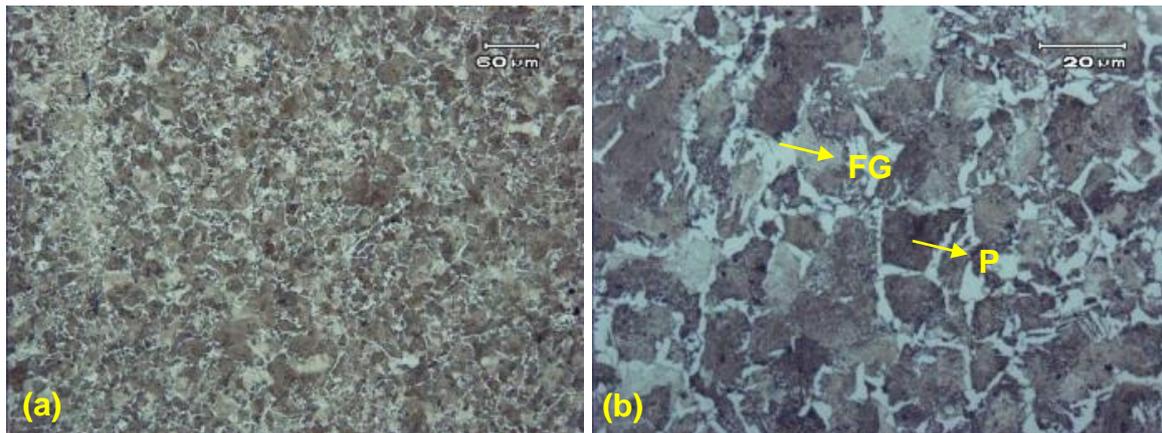


Figura 6. Microestrutura da extremidade da chapa.

Nas Figuras 7 (a/b) e 8 (a/b) são apresentadas microestruturas da amostra 1, anteriormente apresentada na Figura 5a. As micrografias analisadas correspondem às diferentes regiões, definidas conforme a Figura 3. Foram apresentadas micrografias apenas desta amostra devido ao fato de as demais apresentarem um comportamento microestrutural semelhante.

Na ZAC_{CHAPA}, apresentada na Figura 7(a) é observada uma pequena mudança microestrutural em comparação com a extremidade da chapa. Pode-se observar que houve refino do grão perlítico (P) e um aumento da quantidade de ferrita de contorno de grão, o que é condizente com os resultados encontrados no trabalho de Santos [16]. Este procedimento de soldagem gera alta deformação nos materiais envolvidos, além de submetê-los a elevadas temperaturas, o que pode decorrer na recristalização dinâmica dos materiais envolvidos. Desta maneira, esta pode ser uma explicação condizente para a diminuição do tamanho dos grãos [17, 18].

A microdureza dessa região diminuiu de 263 para 254 HV, provavelmente devido ao aumento da ferrita de contorno de grão.

Na Figura 7(b), a ZTMA_{CHAPA} possui uma microestrutura mista de uma fase clara composta por placas e agulhas e uma fase mais escura. A fase clara com ripas foi identificada como martensita revenida (M), a fase escura é composta por ferrita com aglomerados de cementita. A microdureza apresentada pela martensita foi de 543 HV.

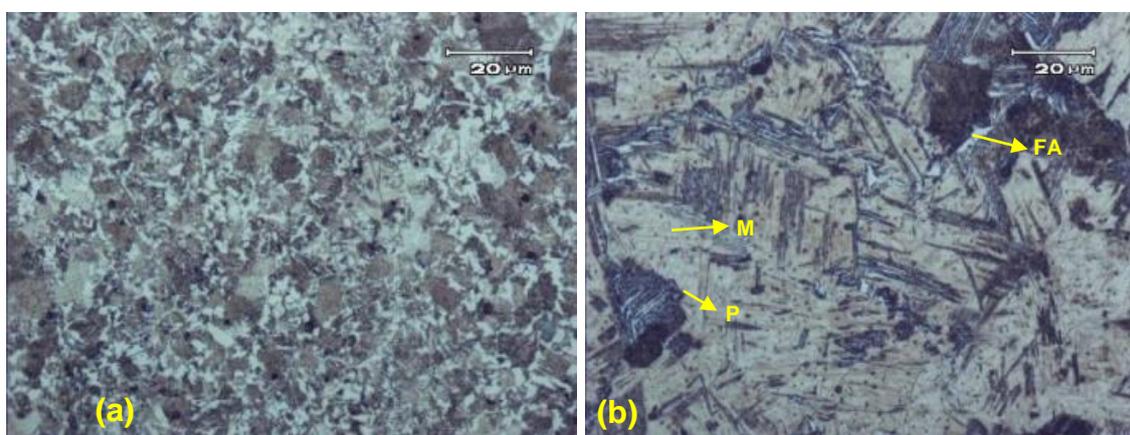


Figura 7. Micrografias da chapa (a) ZAC_{CHAPA} ; (b) ZTMA_{CHAPA}. M=martensita revenida, P=perlita, FA= Ferrita Alotriomórfica.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Na ZTMA_{CHAPA}, próxima à interface, surgem três fases distintas: martensita não revenida (MNR), martensita e novamente a fase escura. Possivelmente a fase branca, mencionada anteriormente é devido à formação da martensita não revenida. A martensita não revenida, foi observada como a fase mais clara da microestrutura da Figura 8(a/b). A martensita revenida, que é a fase de cor intermediária, é proveniente do pino.

A martensita não revenida de alta dureza pode ter sido formada devido aos ciclos térmicos que podem ocasionar austenitização parcial ou total seguida de resfriamento acelerado na ZTMA_{PINO}. A dureza encontrada para a martensita não revenida é da ordem de 805 HV. Essa fase branca, já citada nas análises macrográficas, é responsável por deixar o material fragilizado [16].

Na Figura 8(b) é mostrada a ZAC_{PINO}, onde foram observadas martensita revenida e não revenida, formando um bandejamento de regiões mais claras e mais escuras. Foi visualizado também um alinhamento das fases, mostrando as linhas de fluxo ou planos de cisalhamento. A martensita não revenida apresentou valores de microdureza da ordem de 787 HV.

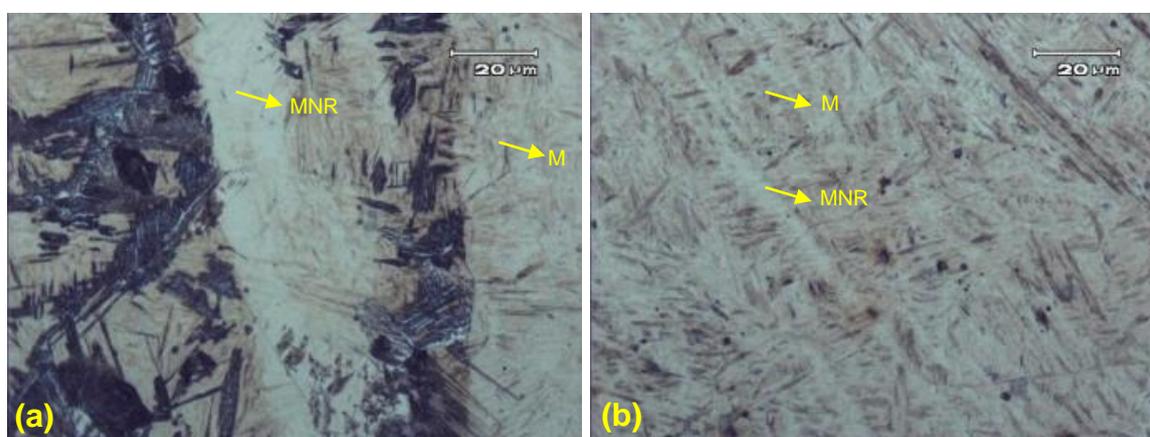


Figura 8. Micrografias do pino (a) ZTMA_{PINO} ; (b) ZAC_{PINO}.

Em todas as amostras foi observada a presença da martensita não revenida, nomeada anteriormente como fase branca. Essa microestrutura é indesejada devido às altas durezas apresentadas. Essa variação brusca na dureza é responsável por deixar o material mais frágil e em muitos casos podendo ocasionar trincas [16]. As possíveis causas para a formação desta fase estão associadas à alta velocidade de resfriamento imposta à junta soldada, devido às elevadas pressões de contato e temperaturas elevadas, ou a combinação destes, associado ao elevado teor de carbono dos materiais avaliados [19,20].

4 CONCLUSÕES

É possível perceber que com a mudança nos parâmetros operacionais, em especial o consumo do pino, ocorrem mudanças nas propriedades metalúrgicas das soldagens apresentadas. Com a diminuição do consumo de pino de 9 para 5 mm e mantendo os outros parâmetros de soldagem é possível perceber uma melhora nas características metalúrgicas do material. Isso é percebido devido à diminuição das bandas brancas, ou seja, a diminuição da martensita não revenida e também pelo desaparecimento dos óxidos/sulfetos. A diminuição dos defeitos vinculados à fase branca foi visualizada com maiores detalhes através das micrografias.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, a CAPES e a PETROBRAS pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- 1 Weld integrity and performance. ASM International; 1997.
- 2 Thomas W, Nicholas ED, S. B. Jones, R. H. Lilly, C. J. Dawes and R. E. Dolby: Friction Forming. TWI, Cambridge, Patent No.: EP 0 602 072 B1, 1992.
- 3 Nicholas ED. Friction processing technologies. *Welding in the World*, 2003; 47(11-12): 2-9.
- 4 Andrews RE, Mitchell JS. *Met. Mater*, 1990; 6 (12): 796-797.
- 5 Unfried J, Hermenegildo TF, Paes MTP, Pope AM, Ramirez AJ. Influence of Process Parameters in the TMAZ Microstructural Evolution of C-Mn Steels Friction Hydro-Pillar Welded Joints. *Proceedings of the 8th International Conference on Trends in Welding Research*. Pine Mountain, Geórgia USA. June, 2008.
- 6 Blakemore GR. Applications of state of the art portable friction welding equipment euro-join. In: *European conference on joining technology, 2.*, Florence; Italy. Genova: Istituto Italiano della Saldatura, p. 127-36, 1984.
- 7 Blakemore GR. Friction welding-technology for the new millennium. In: *Offshore Technology Conference*, 31, Houston, Texas. [S.n.t.]. Paper 11063-MS, 1999.
- 8 Meyer A. Friction hydro pillar processing. Dr.-Ing. Thesis an der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, 2002.
- 9 Pinheiro GA. Local Reinforcement of Magnesium Components by Friction Processing: Determination of Bonding Mechanisms and Assessment of Joint Properties. GKSS, Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht, 2008.
- 10 Pinheiro GA. *Costura por fricção: Fundamentos e Aplicações*. 1º COBEF, 2001.
- 11 Chiaverini V. *Aços e ferros fundidos*. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005.
- 12 Mattei F. *Desenvolvimento de Equipamento para Estudo de Soldagem por Fricção*. Dissertação. PPGE3M: UFRGS, 2011.
- 13 American society for testing and materials. ASTM E3: Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens, 2007.
- 14 American society for testing and materials. ASTM E 340: Standard Test Method Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys, 2006.
- 15 Hattingh DG, Bulbring DLH, Els-Botes A, James MN. Process parameter influence on performance of friction taper stud welds in AISI 4140 steel. *Materials and Design*, 2011; 32: 3421-3430.
- 16 Santos RE, et al.. *Avaliação de Juntas de Aços Soldadas por Atrito com Pino Consumível*. Consolda 2013, Paraná Brasil, 2013.
- 17 Saeid T, Abdollah-Zadeh A, Assadi H, Ghaini FM. Effect of friction stir welding speed on the microstructure and mechanical properties of a duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, 2008; 496: 262-268.
- 18 Padilha AF, Siciliano JRF. *Encruamento, Recristalização, crescimento de grão e textura*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005: 232.
- 19 Liu C, Zhao Z, Liu Y. and Bhole S. D., Friction layers produced in two steels during laboratory friction testing. *Materials Science and Technology*, 2006; 22(1).
- 20 Sture H, Staffan J, Coronel E. On adhesion in tribological contacts - Causes and consequences. 25th IRG-OECD Meeting in Uppsala, June 12-14, 2005

* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*