

# USO DO PROCESSAMENTO POR ATRITO COM PINO NÃO CONSUMÍVEL PARA REPARO DE DEFEITOS DE SOLDAGEM EM AÇOS API X70<sup>1</sup>

Víctor Ferrinho Pereira<sup>2</sup>  
Tarcila Sugahara<sup>3</sup>  
Leonardo da Paixão Carvalho<sup>4</sup>  
Ricardo Reppold Marinho<sup>5</sup>  
Maysa Terada<sup>6</sup>  
Antonio José Ramirez<sup>7</sup>

## Resumo

A soldagem por Atrito com Pino Não Consumível (SAPNC) vem sendo amplamente estudada visando a parcial substituição dos tradicionais métodos de soldagem na produção, reparo e montagem de peças e equipamentos. Trata-se de um processo com diversas vantagens para aplicações em condições extremas, o qual ainda é pouco utilizado comercialmente no processamento e soldagem de materiais com elevada temperatura de fusão como aços. Mesmo sendo um processo com elevada reprodutibilidade e com baixa taxa de formação de defeitos, como todo processo, o SAPNC está sujeito a falhas causadas por desalinhamentos entre as partes a serem soldadas, utilização de parâmetros inadequados ou uso de ferramentas desgastadas. Deste modo, o reparo de defeitos de soldagem necessita de total atenção, tanto quanto a tecnologia, metalurgia e desempenho das juntas soldadas. Este trabalho apresenta o estudo do Processamento por Atrito com Pino Não Consumível (PAPNC) de defeitos resultantes do SAPNC, do aço API X70, utilizado na fabricação de dutos relacionados com a cadeia de exploração, produção e transporte de petróleo, gás e bicomcombustíveis.

**Palavras-chave:** SAPNC; Reparo de defeitos; Aço API X70.

## USE OF FRICTION STIR PROCESSING IN REPAIR OF WELDING DEFECTS OF API X70 STEEL

### Abstract

Friction Stir Welding has been object of intensive research aiming the partial substitution of conventional welding processes. This process present several advantages to be used commercially in extreme conditions, as welding high melting temperature materials, as steel. Even with the high reproducibility and low defect formation rate, such defects may appear due to misalignments, unfitted parameters or ware tools. Therefore several aspects of the repair of these FSW defects must be addressed. Here is presented a study of friction stir processing of FSW defects on API X70 open to the surface.

**Key words:** Friction stir welding; Processing of welding defects; API X70 steel.

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

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Eng<sup>o</sup> de Suporte Projetos Industriais, Laboratório Nacional de Nanotecnologia, Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), Campinas, SP, Brasil.

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Eng<sup>o</sup> de Suporte Projetos Industriais, Laboratório Nacional de Nanotecnologia, CNPEM, SP, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico, Eng<sup>o</sup> de Equipamentos, Petrobras, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

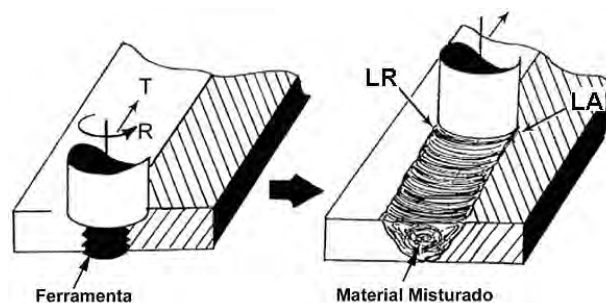
<sup>5</sup> Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Engenheiro de Equipamentos, Petrobras, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>6</sup> Dra. em Tecnologia Nuclear – Materiais, Eng<sup>o</sup> de Suporte Projetos Industriais, Laboratório Nacional de Nanotecnologia, CNPEM, Campinas,, SP, Brasil.

<sup>7</sup> Dr. em Engenharia Metalúrgica, Pesquisador, Laboratório Nacional de Nanotecnologia, CNPEM, Campinas, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de SAPNC (Soldagem por Atrito com Pino Não Consumível), conhecido em inglês como *Friction Stir Welding (FSW)* trata-se de uma tecnologia que permite a união e processamento de materiais no estado sólido. Este processo foi desenvolvido e patenteado em 1991 pelo centro de pesquisa inglês TWI - *The Welding Institute* em Cambridge, Reino Unido, e apresenta inúmeras vantagens econômicas e técnicas sobre outros processos de união.<sup>(1)</sup> Esta técnica, derivada da soldagem convencional por atrito, utiliza uma ferramenta não consumível para produzir calor ao longo da junta por atrito, ao mesmo tempo em que causa uma deformação plástica severa do material, resultando na "mistura mecânica" do material amolecido. A Figura 1 apresenta um esquema do processo de soldagem (união) por atrito com pino não consumível.



LA= Lado de Avanço, LR= Lado de Retrocesso da soldagem.

**Figura 1.** Esquema do processo de soldagem por atrito com pino não consumível.

Durante a soldagem, uma ferramenta cilíndrica é posta em alta rotação e é introduzida no meio da junta a ser produzida, a qual, devido às elevadas cargas envolvidas, devem estar bem fixadas para evitar deslocamentos.

Uma protuberância (pino) no extremo da ferramenta penetra no material até o ombro da ferramenta encostar na superfície da junta, gerando o calor necessário para formação da região plástica. Uma vez que se atinge o aquecimento e plastificação necessários no material ao redor da ferramenta, esta é deslocada ao longo da junta, produzindo a união. Entre as vantagens deste processo em relação a outros processos de soldagem envolvendo fusão, podem ser ressaltadas: (i) A excelente reprodutibilidade e total automação inerente ao processo que facilita a sua execução remota em condições extremas, como por exemplo, em grandes profundidades ou em ambientes insalubres; (ii) Eliminação todos os possíveis defeitos ou dificuldades relacionadas com o processo de solidificação, permitindo ainda a união de materiais "não soldáveis" por fusão ou materiais dissimilares com certo grau de incompatibilidade metalúrgica; (iii) Temperaturas relativamente baixas associadas ao processo, resultando em menores distorções e tensões residuais, e em modificações metalúrgicas menos acentuadas na zona termicamente afetada (ZTA).<sup>(2-6)</sup> Além disso, não se esperam problemas quanto à fragilização por hidrogênio em aços devido à sua natureza de processo no estado sólido. Adicionalmente, a soldagem no estado sólido por SAPNC elimina os fumos de soldagem que podem ser prejudiciais à saúde do soldador.

Pelo fato de não ocorrer fusão do material em nenhum momento durante a soldagem por SAPNC, os defeitos decorrentes desse tipo de soldagem são diferentes dos defeitos associados aos processos convencionais de soldagem. Os defeitos discutidos neste trabalho são decorrentes de falhas no fluxo do material

durante o processo de união. Os vazios encontrados ao longo da junta surgem devido ao aquecimento e do fluxo insuficientes, formando micros ou macrodefeitos volumétricos ao longo da junta soldada. Eles podem ainda comprometer a qualidade da junta formando uma região passível de corrosão e comprometer a performance mecânica da junta. Estes defeitos podem não se estar abertos à superfície do material, sendo em alguns casos de tamanhos inferiores aos detectados por ensaios não destrutivos, geralmente utilizados na fabricação.

Neste trabalho foi estudado o processamento ou reparo de um defeito de soldagem de SAPNC no aço API 5L X70 (limite de escoamento mínimo de 480 MPa), utilizado na fabricação de dutos de grandes espessuras.<sup>(7)</sup> O defeito aberto à superfície de falta de preenchimento foi corrigido através do processamento por Processamento por Atrito com Pino Não Consumível (PAPNC) da região defeituosa a fim de provocar uma nova mistura do material.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

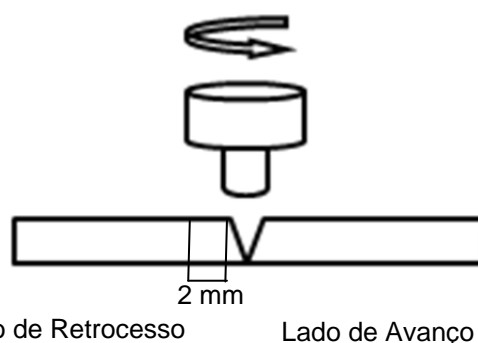
O trabalho apresentado foi desenvolvido em chapas de aço API 5L X70 produzido pela empresa Usiminas e com a composição química e propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química e propriedades mecânicas do aço API 5L X70

C	Si	Mn	Cu	Cr	Al	Ni	P	Ti	V	LE (MPa)	LR (MPa)	Ceq.	AL
0,08	0,16	1,66	0,02	0,02	0,03	0,24	0,13	0,01	0,05	533	616	0,38	41,7%

*Nota: Certificado do material cedido pela Usiminas. LE=Limite de Escoamento; LR= Limite de Resistência à Tração; AL=Aalongamento; Ceq.=Carbono Equivalente.*

As chapas foram usinadas com as dimensões de 500 x 95 x 9,5 mm e um chanfro em V de 1 mm em cada chapa conforme mostrado no esquema da Figura 2. Esse chanfro simula uma abertura entre as chapas, que ocasiona defeitos de falta de fluxo de material durante a SAPNC.



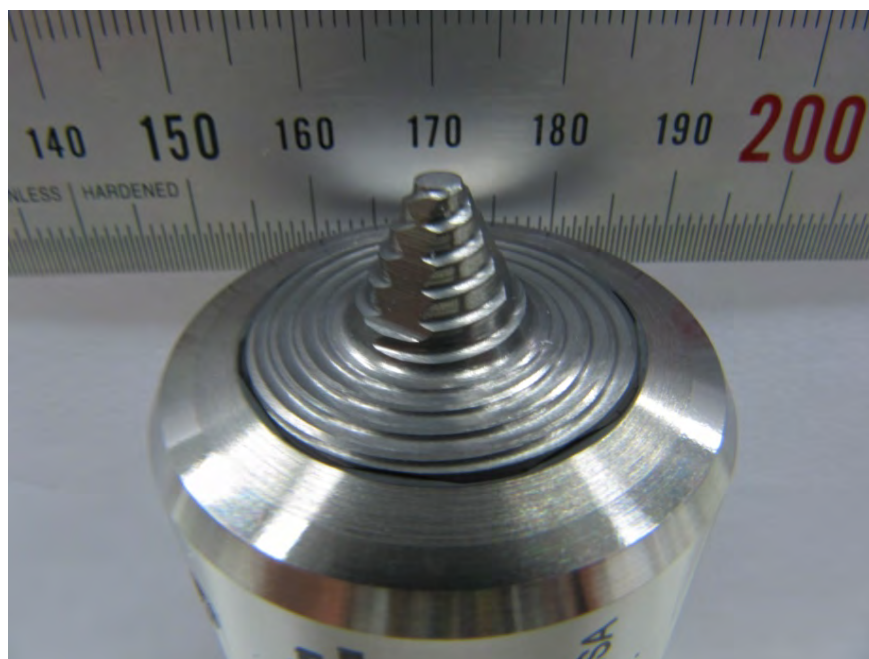
**Figura 2.** Esquema de montagem das chapas a serem soldadas com chanfro em V. Abertura na superfície de 2 mm.

As soldagens foram realizadas nas instalações do Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano), vinculado ao Centro Nacional de Pesquisas em Energia e Materiais (CNPEM) em Campinas-SP utilizando um equipamento dedicado mostrado na Figura 3.



**Figura 3.** Equipamento para SAPNC no LNNano -CNPEM.

A ferramenta utilizada para realização da soldagem, mostrada na Figura 4 é fabricada de composto de matriz metálica WRe e reforço de nitreto de boro cúbico (WRe/PCBN), possui diâmetro do ombro de 25 mm e comprimento do pino de 9,5 mm.



**Figura 4.** Ferramenta utilizada para soldagens com 9,5 mm de penetração.

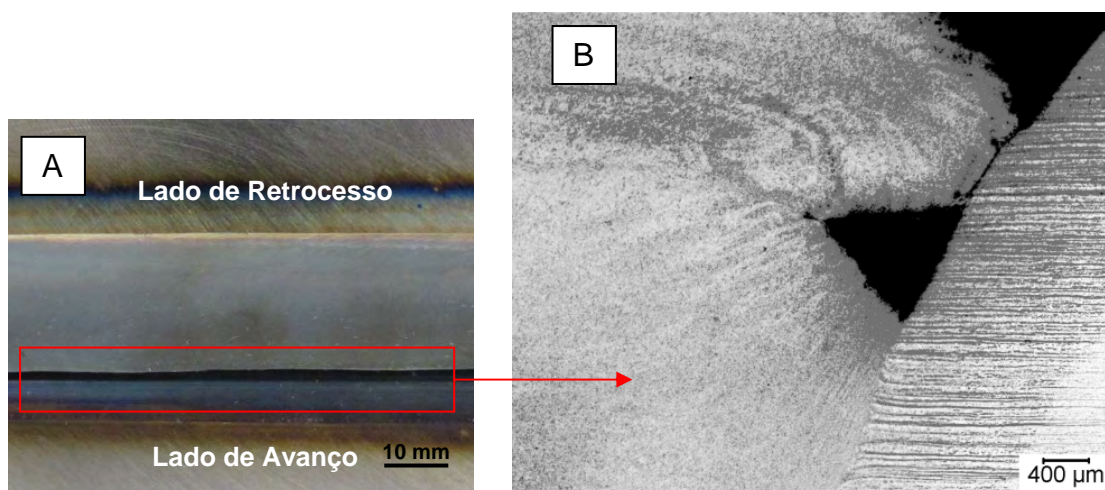
O soldagem efetuada com o intuito de corrigir defeitos do primeiro cordão de soldagem foi feita também com uma ferramenta de WRe/PCBN, porém com comprimento de pino de 6,1 mm conforme apresentado na Figura 5.





**Figura 5.** Ferramenta utilizada pra soldagens com 6,1 mm de penetração.

A primeira soldagem, feita com o a ferramenta com pino de 9,5 mm, apresentou um grande defeito superficial conforme ilustrado na Figura 6, este defeito surge na interface da zona misturada com a zona termicamente afetada no lado de avanço da junta. Esta falha de fluxo na superfície do material ocorreu devido à preparação proposital do chanfro para formação deste tipo de defeito. Este espaçamento não permitiu que o material fluísse adequadamente, consolidando a junta.



**Figura 6.** (a) Imagem do cordão de solda com defeito de falta de fluxo no lado de avanço de soldagem e (b). Seção transversal da junta com defeito por falta de fluxo de material formado próximo a superfície no lado de avanço, na interface entre a zona misturada e a zona termicamente afetada.

O processamento para correção do defeito superficial na junta soldada com SAPNC foi realizada com um deslocamento de 5,5 mm para o lado de avanço da soldagem em relação ao centro da junta e uma ferramenta com pino de 6,1 mm de comprimento. Esse deslocamento foi adotado por coincidir com as imperfeições formadas na junta.

Após o processamento do defeito, foram retiradas amostras da seção transversal da junta para análise metalográfica e verificação da consolidação da junta. O ataque

químico utilizado para revelar o perfil da soldagem e a microestrutura existente foi Nital 2% em temperatura ambiente por 20 segundos.

A análise macrográfica foi realizada no estereoscópio Olympus SZ61 e a micrográfica no microscópio eletrônico de varredura Quanta FEG 650.

Foi feita ainda a aquisição do mapa de microdureza da junta soldada utilizando o microdurômetro LECO, modelo LM 100 AT (200 g/13 s). Todos os equipamentos citados estão instalados no Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano) do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM).

### 3 RESULTADOS

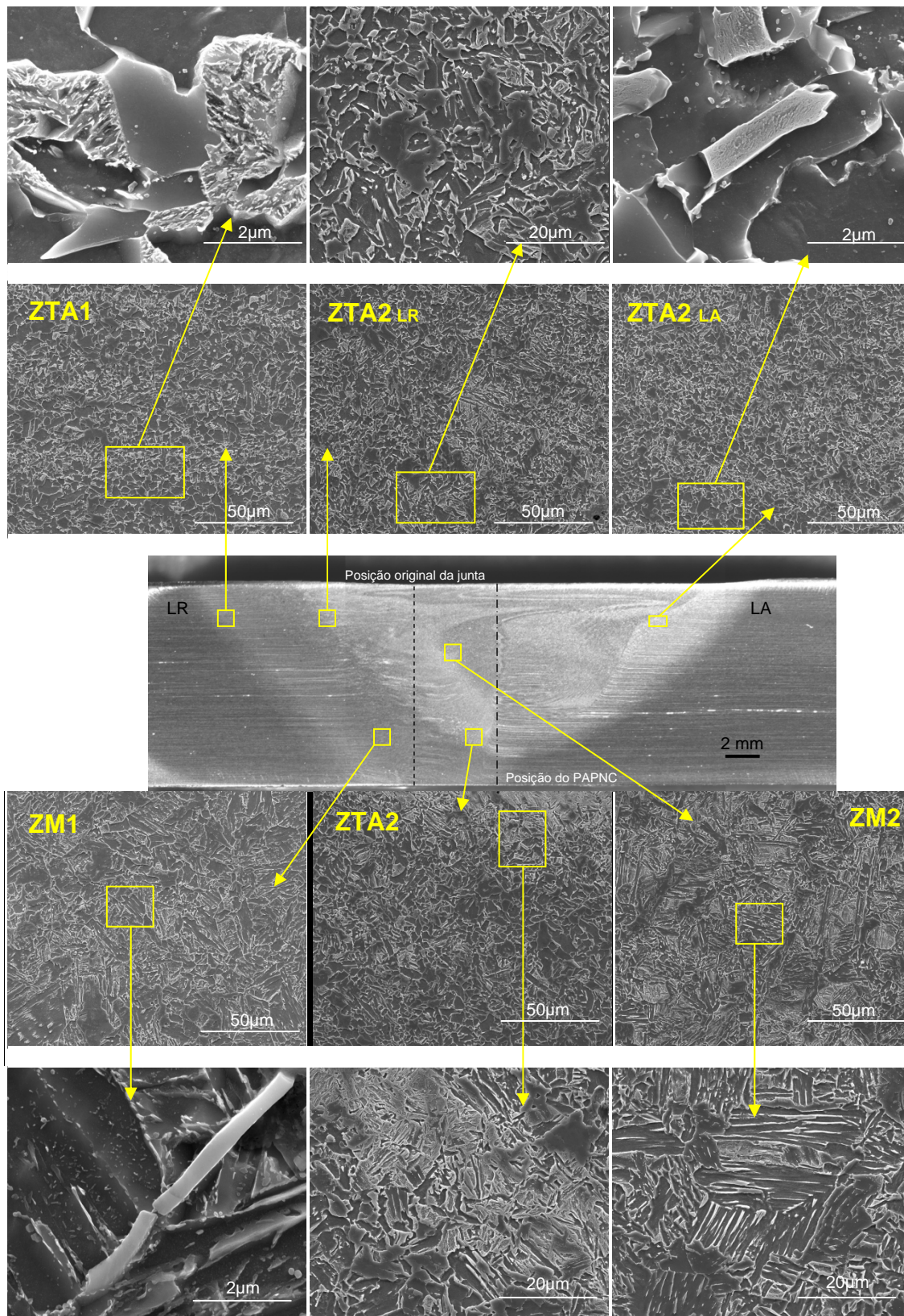
Com dados adquiridos pela instrumentação do equipamento de soldagem foi possível analisar os dados como força normal aplicada na junta pela ferramenta, torque, temperatura da ferramenta (através de um termopar inserido em sua lateral) e com isso calcular o aporte térmico em cada ponto da junta (Tabela 2).

**Tabela 2.** Valores médios obtidos durante as soldagens, na soldagem para união das chapas foi utilizada ferramenta com pino de 6,1 mm e na correção de defeitos 9,5mm

Processo	Comprimento do Pino (mm)	Vel. de Rotação (rpm)	Vel. de Avanço (mm.min <sup>-1</sup> )	mm por rotação	Força Normal (kN)	Torque (N.m)	Aporte Térmico (kJ)
União de chapas (SAPNC)	9,5	350	100	0,29	22	60	1,88
Correção de defeitos (PAPNC)	6,1	300	100	0,33	29	90	1,81

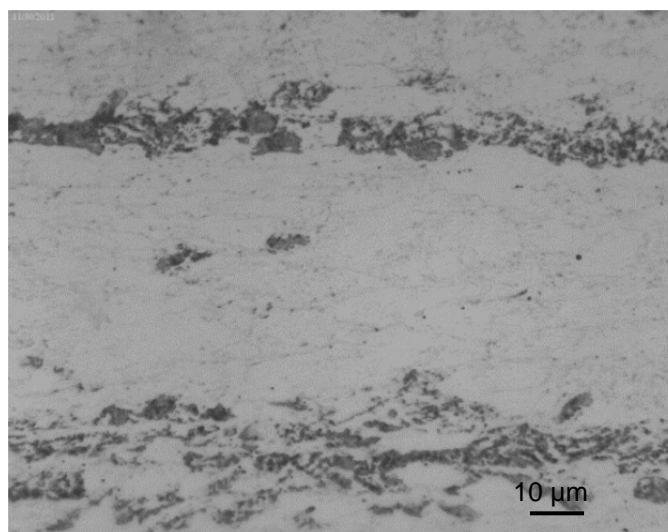
A análise macroestrutural foi realizada com o intuito de ter uma visão geral da junta soldada para verificar se ocorreu completa consolidação da região defeituosa através do processamento. Os resultados indicaram que a região que apresentava a descontinuidade está isenta de defeitos de falha de fluxo de material após o segundo processo de soldagem como apresentado na Figura 7.





**Figura 7.** Macrografia (estereoscópio) e micrografias (MEV) da seção transversal da amostra reparada.

As micrografias feitas no MEV auxiliaram no estudo da microestrutura gerada na região modificada pelo processo de SAPNC após a soldagem (passe 1), no processamento de defeitos (passe 2) (Figura 7), e no metal de base (MB) (Figura 8).



**Figura 8.** Micrografia do metal de base.

Estas destacam as microestruturas formadas em cada região da junta e no metal base: Metal Base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) do lado de retrocesso do passe 1 (ZTA1), ZTA do lado de retrocesso (LR) do passe 2 (ZTA2); ZTA situada na raiz do passe 2; ZTA do lado de avanço (LA) do passe 2 (ZTA2); zona misturada (ZM1) do passe 1 e na ZM do passe 2 (ZM2) (Tabela 3).

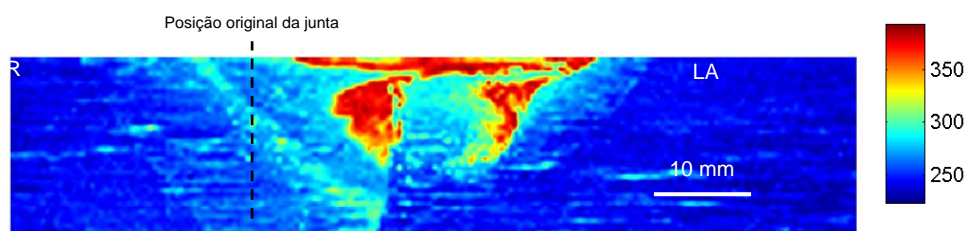
**Tabela 3.** Microestruturas presentes na seção transversal da chapa de aço API X70 soldada por FSW e processada por FSP

Passe	Região	Microestrutura
	MB	perlita, perlita degenerada, ferrita poligonal, MA e bainita coalescida
1	ZTA 1	perlita, perlita degenerada e ferrita poligonal
2	ZTA 2 <sub>LR</sub>	perlita, perlita degenerada, ferrita poligonal, martensita-austenita (MA) e bainita coalescida
2	ZTA 2 <sub>LA</sub>	perlita, perlita degenerada e ferrita poligonal
1	ZM 1	bainita, bainita granular, ferrita poligonal, carbonetos e MA
2	ZTA 2	perlita, perlita degenerada, ferrita poligonal, MA e bainita coalescida
2	ZM 2	bainita, bainita coalescida, ferrita poligonal, carbonetos e martensita*

\* presença indicada pelas medidas de microdureza Vickers.

O mapa de microdureza da junta apresentado na Figura 9 mostra que o valor máximo encontrado na seção transversal da chapa soldada e processada é de aproximadamente 390 HV<sub>0,2</sub>, na ZM2 e o mínimo de dureza é de cerca de 200 HV<sub>0,2</sub>, no metal base. As regiões que apresentaram valores de microdureza mais elevados estão localizadas próximas à superfície da ZM e nas regiões referentes a ZM1<sub>LA</sub> e ZM2<sub>LA</sub>. O incremento da dureza na região soldada se deve a austenitização e subsequente transformações de fases.<sup>(7)</sup> Os valores obtidos são condizentes com a presença de martensita, indicando a presença desta fase, mesmo não tendo sido encontradas evidências por microscopia eletrônica de varredura nestas regiões.





**Figura 9.** Mapa de microdureza Vickers obtido para o aço API X70 após soldagem por FSW e processamento por FSP. Valores medidos com carga de 200 g - 13 segundos.

## 4 DISCUSSÃO

O reparo de defeitos com o uso do PAPNC permitiu o completo preenchimento da região afetada pela falta de fluxo da junta soldada por SAPNC.

Foi verificado que os valores de torque e força normal da soldagem com o pino de 9,5 mm de comprimento estão abaixo dos valores durante o processamento com ferramenta de pino de 6,5 mm. Isso ocorre devido à diferença de parâmetros utilizados.

A análise microestrutural identificou o refinamento dos grãos na zona misturada em relação ao metal de base. Além disso, a ZTA1 manteve a mesma microestrutura: perlita, perlita degenerada e ferrita poligonal. No entanto, na ZTA2 LR foi observada a presença de bainita e MA. Este fato pode ser explicado pela sobreposição da ZTA2 LR com a ZM1. Ou seja, essa microestrutura é decorrente do primeiro passe que foi reaquecido durante o processamento do defeito. É importante ressaltar ainda a formação de bainita coalescida na ZM2 e ZTA2 (raiz e LR) do passe 2, enquanto na ZM do primeiro passe foram observadas somente ferrita poligonal, carbonetos, bainita, bainita granular e MA. Vale destacar que a ZTA2 raiz e a ZM2 também se superpõe com a ZM1.

O mapa de microdureza Vickers identificou que o processamento utilizado para corrigir o defeito não alterou de maneira significativa a dureza máxima da região soldada.

## 5 CONCLUSÃO

O processo de reparação das juntas soldadas utilizando SAPNC com defeitos de fluxo através de um segundo passe de processamento por PAPNC mostrou-se ser uma técnica eficiente. A amostra analisada após os dois processos não apresentou o defeito de fluxo previamente observado no lado de avanço da junta soldada.

A microestrutura da região onde os passes foram sobrepostos apresentou a formação de bainita coalescida. Os constituintes formados na ZM1 (bainita, ferrita poligonal e carbonetos) se mantiveram mesmo após o processamento. Apesar de não ter sido detectada a formação de martensita em nenhuma das amostras analisadas por microscopia eletrônica de varredura, os valores de microdureza Vickers indicam a presença desta fase. Deste modo, testes adicionais são necessários para a comprovação desta hipótese.

A seguir serão realizados estudos de performance mecânica e à corrosão das juntas soldadas por SAPNC com reparo de defeitos por PAPNC.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Usiminas pelo fornecimento do aço API X70 e a Petrobras pelo financiamento e suporte técnico dado ao projeto.

## REFERÊNCIAS

- 1 THOMAS, W. M. et al. Friction Stir Butt Welding, International Patent Appl. No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Appl. nº. 9125978.8, Dec. 1991, U.S. Patent nº. 5,460,317.
- 2 MERAN. C.; KOVAN.V. Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Dissimilar Copper/Brass Joints. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, v.39, p. 521-530, 2008.
- 3 ABDOLLAH-ZADEH, A.; SAEID, T.; SAZGARI, B. J. Microstructural and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminum/Copper Lap Joints. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 460, p. 535 - 538, 2008.
- 4 GERLICH, A.; SU, P.; YAMAMOTO, M.; NORTH, T.H. Material Flow and Intermixing During Dissimilar Friction Stir Welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 13, nº. 3, p. 254 - 264, 2008.
- 5 CHEN, T. J. Process Parameters Study on FSW Joint of Dissimilar Metals for Aluminium-Steel. *Journal of Materials Science*, v. 44, p. 2573 - 2580, 2009.
- 6 CHEN T. P.; LIN, W.B. Optimal FSW Process Parameters for Interface and Welded Zone Toughness of Dissimilar Aluminum-Steel Joint. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 15, nº. 4, p. 279 - 285, 2010.
- 7 SANTOS, T. F. A. et al. Fracture toughness of ISO 3183 X80 (API 5L X80) steel friction stir welds. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 77, p. 2937-2945, 2010.