

## INVESTIGAÇÃO METALOGRÁFICA DA ZONA AFETADA PELO CALOR DA ESTRUTURA SOLDADA DE AÇO MARAGING COM AISI 8630 MODIFICADO\*

*Cristiana dos Santos Nunes<sup>1</sup>  
Regina Coeli Araújo Vieira<sup>2</sup>  
Archimedes Fortes Avelino Júnior<sup>3</sup>  
Maria da Penha Cindra Fonseca<sup>4</sup>  
Hamilton Ferreira Gomes de Abreu<sup>5</sup>*

### Resumo

A soldagem de uniões dissimilares é muito comum em sistemas usados na exploração de petróleo e produção em águas profundas no mar. Comumente envolve soldagem de tubos de aço de baixo carbono com aços forjados baixa liga, muitas vezes, com revestimento interno de Inconel com o objetivo de reduzir o nível de tensões residuais seguidos de tratamentos térmicos de pós-soldagem. Uma técnica alternativa para reduzir as tensões residuais é utilizar um eletrodo que, durante o processo de resfriamento passa por uma transformação martensítica em uma temperatura relativamente baixa, de modo que a deformação resultante da transformação compense a contração durante o processo de resfriamento. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar o emprego do *maraging* como metal de solda em união dissimilar de materiais aplicadas na indústria do petróleo. Foram usadas amostras de aços estruturais chanfradas em meio-v e soldadas utilizando varetas. Os níveis de tensões residuais e microestruturas da zona afetada pelo calor (ZAC) foram investigados. Uma verificação importante foi que a junta soldada apresentou tensões compressivas no metal de solda.

**Palavras-chave:** Maraging; Soldagem; Tensão residual.

### METALLOGRAPHIC INVESTIGATIONS OF THE HEAT-AFFECTED ZONE IN MARAGING WITH AISI 8630 MODIFIED STEEL WELDED STRUCTURE

#### Abstract

The welding of dissimilar joints is very common in systems used in oil exploration and production in deep waters. Commonly involves welding low carbon steel pipes with low alloy forged steel, more often, with cladding of Inconel. An alternative technique for reducing residual stresses is to use a filling material that during the cooling process undergoes a displacive transformation at a relatively low temperature so that the deformation resulting from the transformation compensates the contraction during the cooling process. Thus, the aim of this study is to evaluate the use of maraging 250 (Mar 250) as weld metal in dissimilar union of materials applied in the oil industry. It has been used samples of structural steels in mid-v and welded using welding rods. The levels of residual stress and microstructure of the heat-affected zone (HAZ) were investigated not only in the joint welded with Mar 250 but also in a joint welded with a conventional filler metal. An important result of this work is that the welded joint where the Mar250 was used presented compressive stresses in the weld metal and heat affected zone.

**Keywords:** Maraging; Welding; Residual stress.

- <sup>1</sup> *Doutor, professora, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Fortaleza, Fortaleza, CE, Brasil.*
- <sup>2</sup> *Graduanda, aluna do curso de Engenharia Metalúrgica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*
- <sup>3</sup> *Doutorando, aluno do curso de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*
- <sup>4</sup> *Doutor, professora, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.*
- <sup>5</sup> *Doutor, professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem de uniões dissimilares é muito comum em sistemas usados na exploração de petróleo e produção em águas profundas no mar. Comumente envolve soldagem de tubos de aço de baixo carbono com aços forjados baixa liga, muitas vezes com revestimento interno de Inconel. A parte de aço forjado sofre muitas vezes um processo de amantecimento com eletrodo de aço carbono antes da solda da junta. O processo de amantecimento é seguido por um processo de alívio de tensões residuais. A maneira convencional de reduzir o nível de tensões residuais em juntas soldadas é aplicar tratamentos térmicos pós-soldagem [1]. Dependendo do tamanho e da complexidade das partes a serem soldadas, este pode tornar-se um problema sério. Uma técnica alternativa para reduzir as tensões residuais é a utilizar um material de adição que, durante o processo de resfriamento passa por uma transformação martensítica em uma temperatura relativamente baixa, de modo que a deformação resultante da transformação compense a contração durante o processo de resfriamento. Embora muitos trabalhos tenham sido publicados nesta direção usando ligas de Fe-Ni-Cr, a maioria deles esbarra numa perda de tenacidade no metal de solda. Os aços maraging de base quaternária Ni-Co-Mo-Ti conseguem aliar boa tenacidade com alta resistência mecânica. No estado solubilizado e puramente martensítico, o aço *maraging* apresenta-se dúctil e razoavelmente trabalhável a frio devido ao baixo teor de carbono (<0,02%) e ao alto teor de níquel [2]. Estes aços pertencem a uma família de materiais com temperatura  $M_s$  abaixo de 200°C e, mesmo sem o tratamento térmico final do envelhecimento, tem resistência mecânica superior a dos aços carbono e baixa liga usados nestas uniões [3].

A literatura recente tem reportado experimentos de soldagem utilizando metais de adição de solda nos quais a transformação martensítica se inicia em temperaturas em torno de 180° C [4]. Durante a transformação martensítica o metal de solda se expande. A expansão resulta no aparecimento de tensões residuais compressivas na solda e no seu entorno. O aparecimento destas tensões compressivas resulta em um substancial aumento da resistência a fadiga.

Há uma grande concentração de esforços em pesquisas no projeto de juntas soldadas, nas quais uma transformação cisalhante compense as tensões resultantes do processo de resfriamento [5]. Em temperaturas mais baixas, durante o processo de resfriamento, a transformação na solda ocorrerá sob a influência destas tensões e as aliviarão. Acredita-se que a extensão deste alívio de tensões depende do processo de seleção de variantes e este processo de seleção está ligado à textura cristalográfica que aí se desenvolve.

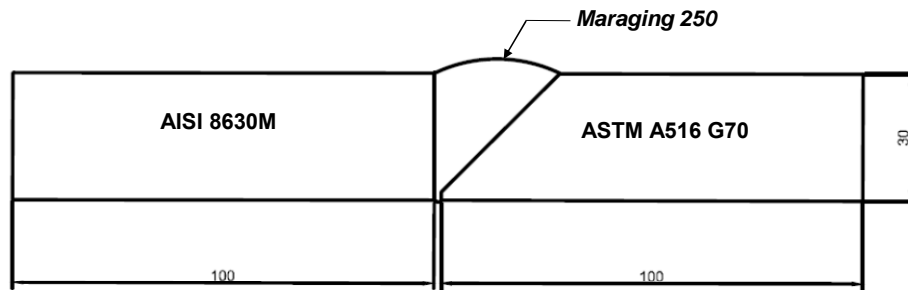
Neste trabalho utilizou-se um material de adição de Maraging 250 na soldagem de uma junta dissimilar AISI 8630 e o aço estrutural ASTM A516 G70. As tensões residuais na junta se apresentaram totalmente compressivas sem necessidade de tratamento térmico de alívio de tensões após a solda.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

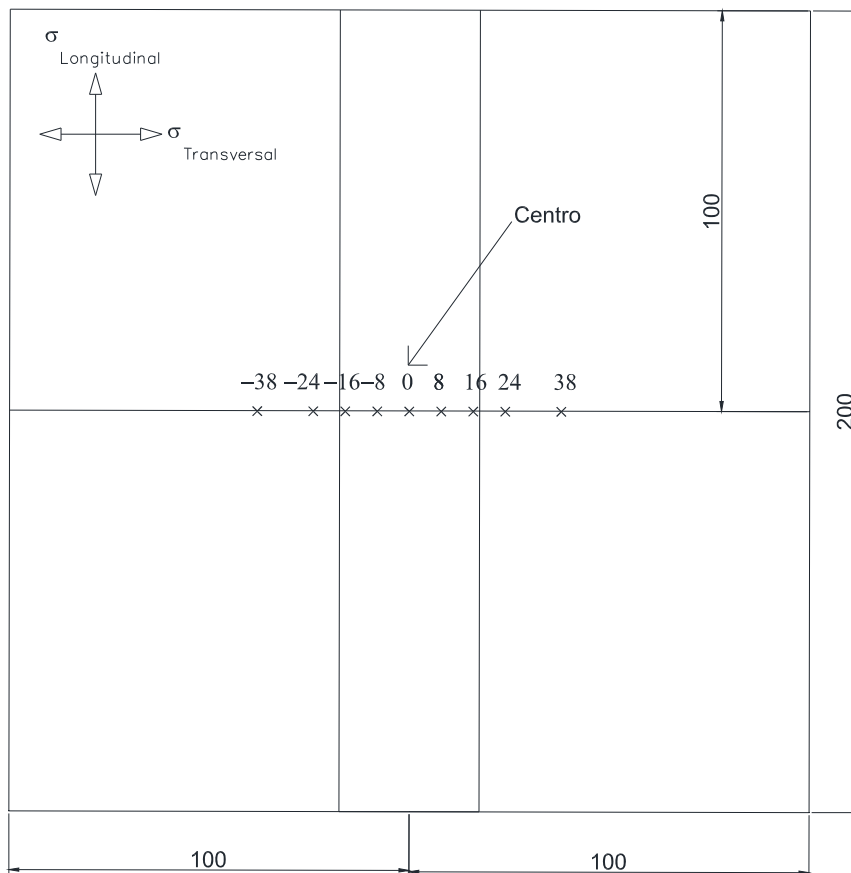
### 2.1 Confeção da Junta Dissimilar

A junta soldada foi projetada com duas chapas de aços dissimilares, o aço baixa liga AISI 8630 modificado (8630M) e o aço estrutural ASTM A516 G70 com as

dimensões mostradas na Figura 1. Na figura 1b estão marcados os pontos onde foram medidas as tensões residuais.



(a)



(b)

**Figura 1-** (a) seção transversal da junta soldada; (b) vista superior da chapa soldada.

Antes da soldagem, a chapa de aço AISI 8630M foi austenitizada a 860°C por 30 minutos e então temperada em água e finalmente revenida a 700°C por 3h. A chapa de aço ASTM A516 G70 foi usada por ser um material típico de tubulações usadas na indústria do petróleo. No processo de soldagem o consumível utilizado na forma vareta foi o MG 701 TIG (maraging 250) com diâmetro de 1,2 mm foi usado. A composição química do aço e do consumível de solda estão apresentadas na Tabela 1 e as respectivas propriedades mecânicas na Tabela 2.

**Tabela 1.** Composição química dos metais de base e consumível de solda (%em peso).

	C	Si	Mn	Ni	Co	Mo	P	Al	S	Fe
Metal base AISI 8630M	0,36	0,3	0,86	0,81	-	0,38	0,006	0,02	-	Balanço
Metal base ASTM A516 G70	0,28	0,15 -	0,85 -	-	-	-	0,025	-	0,025	Balanço
MG 701 TIG vareta	0,02	0,40 0,50	1,20 0,10	19,25	7,5	4,6	-	-	-	Balanço

**Tabela 2.** Propriedades mecânicas dos metais de base e consumível de solda.

	Tensão de escoamento/MPa	Limite de resistência à tração/MPa
Metal base AISI 8630M	621	948
Metal base ASTM A516 G70	260	485 – 620
MG 701 TIG vareta	1675	1682

O metal de base ASTM A516 Gr70 foi usinado e preparado com chanfro em  $\frac{1}{2}$  V com ângulo de  $45^\circ$ . A soldagem foi realizada em instalação da Petrobras com soldador qualificado desta companhia. Foi empregado o processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) manual. A velocidade de soldagem foi cronometrada e determinada pela média de 10 cordões de solda sobre uma placa de aço ASTM A516 G70 com a dimensão do metal de base que constituía a junta soldada. A soldagem foi realizada com pré-aquecimento e uso de restrições na direção longitudinal do cordão de solda, com o objetivo de reduzir as distorções residuais e manter a peça na posição correta, minimizando a movimentação das peças enquanto a solda era realizada. Os parâmetros de soldagem estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Parâmetros de soldagem

Parâmetros	
Voltagem (V)	15
Corrente (A)	170
Velocidade de soldagem ( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )	745

## 2.2 Análise de Tensões Residuais

Após a soldagem, as tensões residuais foram medidas pela técnica de difração de raios-X pelo método  $\text{sen}^2\psi$  baseado na lei de Bragg usando o analisador de tensões *Xstress 3000* (X-ray Stress Analyzer, v.1.22e). O parâmetro experimental usado no estudo foi: tensão da fonte de radiação 30kV, corrente 6,7 mA, radiação  $\text{CrK}\alpha$  ( $\lambda_{\text{CrK}\alpha}=2.29092 \text{ \AA}$ ) com pico de difração de  $2\theta=156^\circ$ , difratando o plano {211} da fase ferrítica para os metais de base e o *Maraging 250*, para medir as alterações no espaçamento de rede. Para este estudo os ângulos de inclinação foram  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  e  $45^\circ$ . A análise foi feita no meio do metal de solda, nas direções longitudinal e transversal em 09 pontos de medição no topo da superfície como indicado na Figura 1b.

## 2.3 Avaliação Microestrutural

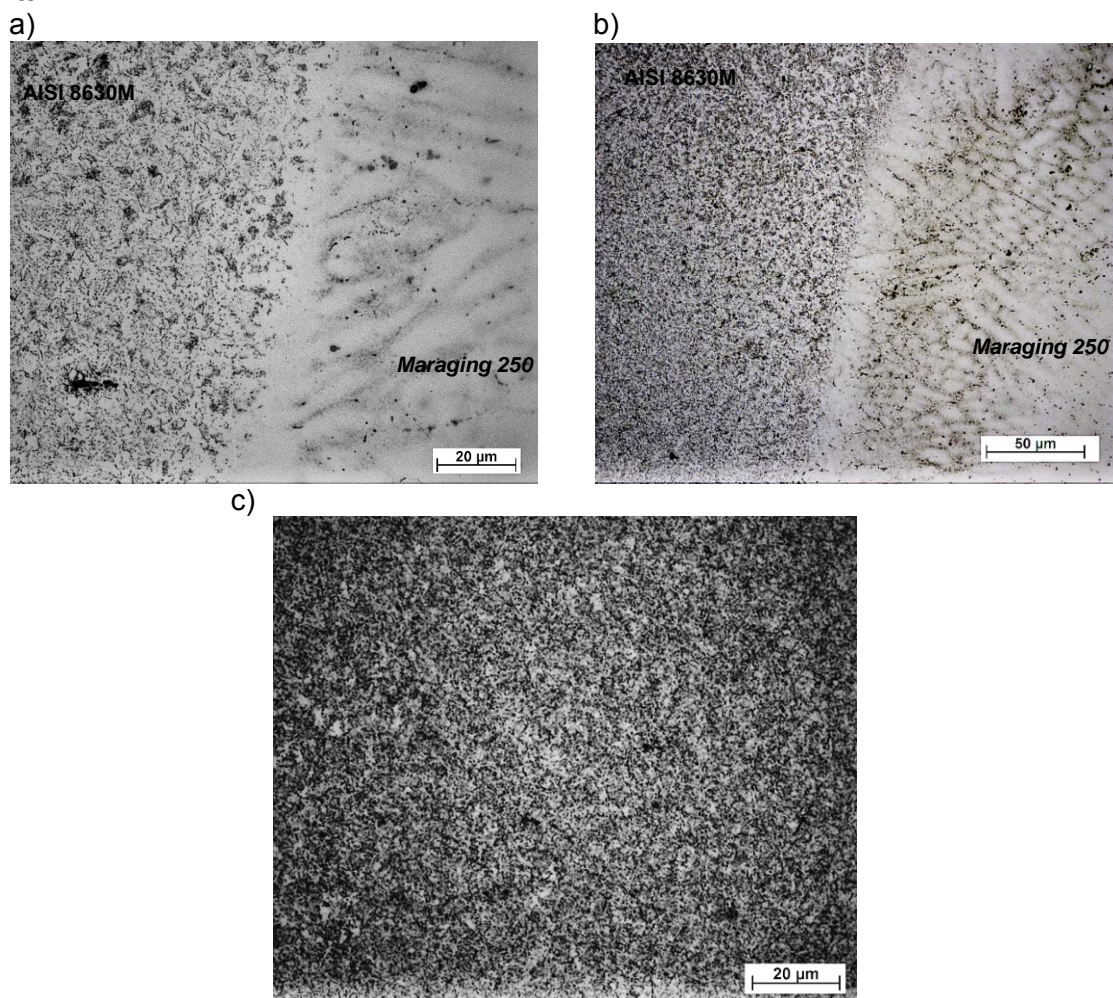
Após a soldagem amostras da junta soldada foram extraídas para as análises microestruturais utilizando microscopia óptica. As amostras passaram por todos os processos de preparação metalográfica; corte, lixamentos com lixas de carbetto de

silício com granulometrias 100, 220, 320, 400, 600, 1200, 2000 e 2500 mesh, polimento com pasta de diamante granulometria de 6, 3, 1 e 1/4  $\mu\text{m}$ . Para revelar a microestrutura do metal de base e metal de solda Maraging 250 foram utilizados Nital 2% (98ml de álcool PA + 2ml de  $\text{HNO}_3$ ), ácido crômico 10% (ataque eletrolítico, 6V) e para o metal de solda Maraging 250: Reagente Marble (10g de  $\text{CuSO}_4$  + 50ml  $\text{HCl}$  + 50ml de água destilada), Picral Modificado, Nital 1%. As análises foram feitas em um Microscópio Óptico de marca Zeiss e microscópio eletrônico de varredura Veja-Tescan com sistema de análise de energia dispersiva de raios-X (EDX) Bruker acoplado.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Microestrutura

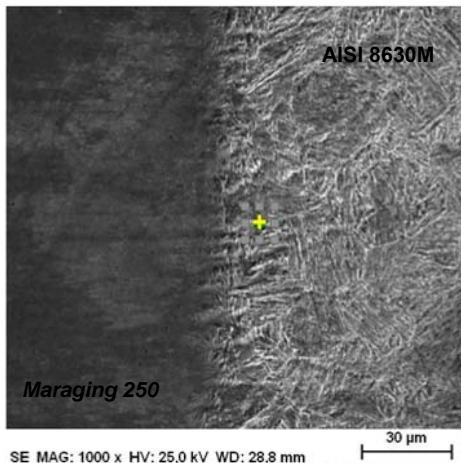
Na Figura 2 é apresentada a microestrutura encontrada na ZAC da amostra soldada no lado do aço AISI 8630M. A microestrutura encontrada é composta basicamente por martensita revenida. A formação dessa zona de grão grosseiro pode ser resultante da ausência de carbono ocasionada pela difusão do metal de solda no metal base. As áreas com baixo teor de carbono tornam possível a formação da fase ferrita.



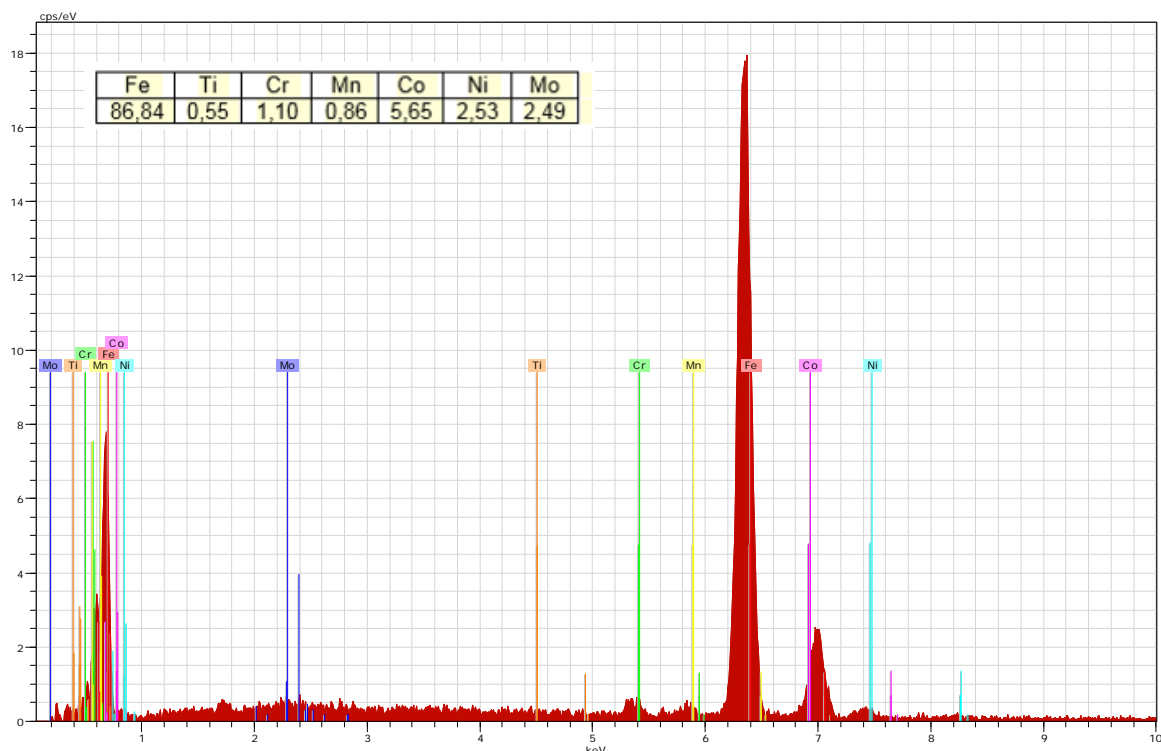
**Figura 2** – Microscopia ótica mostrando a microestrutura de a) Interface entre MB (AISI 8630M) e metal de solda próximo a raiz da solda, aumento de 1000X b) Interface entre MB (AISI 8630M) e metal de solda na região intermediária entre o topo e a raiz da solda, aumento de 500X, c) ZAC no aço AISI 8630M, aumento 1000X.

Na zona afetada pelo calor, próxima à linha de fusão, foi realizado EDX. A Figura 3 é apresentado o espectro de energia dispersiva do ponto em destaque da cor amarelo no metal de base. Analisando com mais detalhe a região da ZAC no ponto destacado em amarelo próximo à linha de fusão, na figura 3b, o ferro do aço AISI 8630M se difundiu no *maraging* 250 e o surgimento dos picos de níquel e cobalto garantiram a estrutura martensítica típica dos aços *maraging*. Analisando o ponto de medição o cobalto do metal de solda de *Maraging* 250 se difundiu com o metal de base AISI 8630M surgindo um pico de 5,65% de cobalto na ZAC.

a)



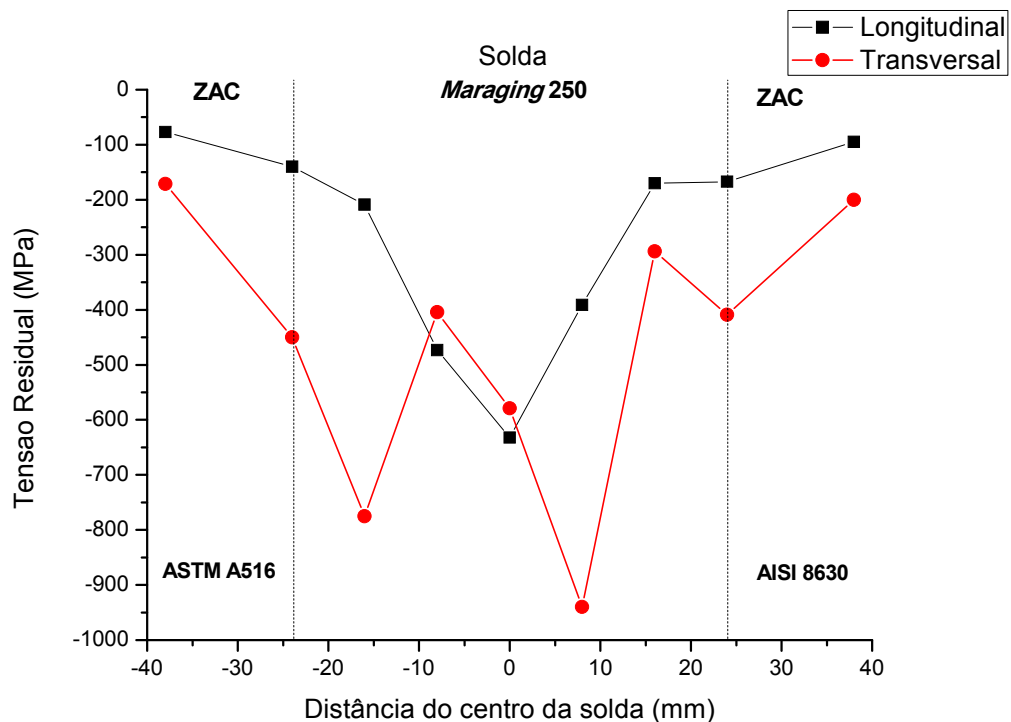
b) Espectro de EDX



**Figura 3** – Perfil de composição química na ZAC a) localização do ponto de medição b) composição química do metal de base AISI 8630M (% em peso).

### 3.2 Distribuição das Tensões Residuais

Na figura 4 estão representados os perfis de tensões residuais, enquanto as linhas verticais demarcam a margem do metal de solda, abrangendo uma faixa de 12 mm à direita e 12 mm à esquerda do centro da solda. A tensão residual máxima foi encontrada no metal de solda de -940 MPa na direção transversal e -632 MPa na direção longitudinal. Os perfis das tensões residuais expostos se apresentam compressivos em natureza, em toda a região medida, tanto no metal de solda; quanto na zona afetada pelo calor (ZAC) e nos metais de base. Este é um padrão de tensões residuais tipicamente observados quando um consumível de solda com transformação de fases no estado sólido é usado (1). Admite-se que as transformações de fase adifusionais devido ao emprego do metal de adição de aço *Maraging 250* tenha sido a principal fonte das tensões residuais compressivas na junta. A redução na magnitude da tensão residual na zona afetada pelo calor pode ser devido ao fato de que esta zona está mais próxima do metal de base não afetado que é resistente e que reduz a capacidade de absorver a tensão do material adjacente da zona afetada pelo calor.



**Figura 4** – Distribuição da tensão residual no topo da superfície na placa soldada com o consumível MG 701 TIG.

## 4 CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser extraídas deste trabalho

1. A microestrutura encontrada na ZAC é composta basicamente por martensita revenida.
2. O cobalto do metal de solda de *Maraging 250* se difundiu com o metal de base AISI 8630M surgimento um pico de 5,65% de cobalto na ZAC.
3. As tensões residuais medidas na difração de raios-X demonstraram na junta soldada com eletrodo MG 701 TIG (*maraging 250* – baixa transformação martensítica) maiores intensidades de tensões residuais compressivas

## Agradecimentos

Os autores são gratos pela assistência da Prof. M. P. Cindra Fonseca e Tiago com os experimentos.

## REFERÊNCIAS

- 1 Rajad, D., Heat Effects of Welding – Temperature Field, Residual Stress, distortion. Springer-Verlar. 1992
- 2 Tariq, F.; Baloch, R. A.; Ahmed, B.; Naz, N. Investigation into microstructures if *maraging* steel 250 weldments and effect of post-weld heat treatments. Journal of Materials Engineering and Performance. Vol. 19(2). March 2010 (264 -273).
- 3 INCO. The 18 percent nickel *Maraging* steels: Engineering properties. Source book on *Maraging* steels, ASM, p. 351 – 377, 1979.
- 4 Francis, J.A., Kundu, S., Bhadeshia, H. K. D. H., Stone H. J., Rogge R. B., Transformation temperatures and welding residual stresses in ferritic steels Pressure Vessel Technol. (2009) V. 131, Issue 4, 041401.
- 5 Withers, P. J.; Bhadeshia, H. K. D. H., Residual stress. Part 1 – Measurement techniques. Materials Science and Technology. Vol. 17, pp. 355 – 385. 2001