

# Efeito do tratamento térmico de alívio de tensões na microestrutura e tamanho de grão de um aço microligado

Leandro Macedo Cozza<sup>1</sup>  
Marcos Fernando da Silva Junior<sup>2</sup>  
Jorge Luis Braz Medeiros<sup>3</sup>  
Luciano Volcanoglo Biehl<sup>4</sup>  
Carlos Otávio Dama Martins<sup>5</sup>  
José de Souza<sup>6</sup>

## Resumo

O tratamento térmico de alívio de tensões nos aços microligados pode comprometer as propriedades mecânicas e metalúrgicas, pois as mesmas são obtidas por processamento termomecânico. Nesse sentido, é importante avaliar o efeito desses ciclos térmicos no comportamento desses aços. Os resultados demonstraram metal de base constituído por ferrita e perlita e tamanho de grão com 12  $\mu\text{m}$ . Na zona afetada pelo calor, a microestrutura ficou constituída por ferrita, perlita e bainita, com grãos refinados que ficaram cinquenta por cento (50 %) menores que no metal de base. Na região de intersecção com a zona de fusão, os grãos apresentaram-se na mesma faixa do metal de base, sendo constituídos de ferrita/bainita e martensita. Na zona de fusão, verificou-se a presença de ferrita acicular, bainita e martensita apresentando tamanho de grão com 20  $\mu\text{m}$ . Comprovou-se, com análise estatística, que as variações do tamanho de grão, após o tratamento térmico, não diferem significativamente daquelas encontradas anteriormente.

**Palavras-chave:** AH36. Aço microestrutural. Alívio de tensões.

## Abstract

*The heat treatment of stress relief in microalloyed steels may compromise the mechanical and metallurgical properties, since they are obtained by thermomechanical processing. In this sense, it is important to evaluate the effect of these thermal cycles on the behavior of these steels. The results showed base metal constituted by ferrite and perlite and grain size with 12  $\mu\text{m}$ . In the heat affected zone the microstructure was composed of ferrite, perlite and bainite, with refined grains that were fifty percent (50 %) smaller than the base metal. In the region of intersection with the welding zone the grains were in the same range of the base metal, being constituted of ferrite/bainite and martensite. In the welding zone was observed acicular ferrite, bainite and martensite, presenting a grain size of 20  $\mu\text{m}$ . It was verified with statistical analysis that the grain size variations after the heat treatment did not differ significantly from those previously found.*

**Keywords:** AH36. Microalloyed steel. Stress relief.

1 Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na FURG e bacharel em Engenharia Mecânica Empresarial pela FURG. Bolsista FAPERGS/CAPES/BRASIL. E-mail: lcozza@bol.com.br

2 Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na FURG e bacharel em Engenharia Mecânica pela Faculdade Anhanguera, Rio Grande, RS. E-mail: marcos.fernando.jr@gmail.com

3 Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil. Professor da Escola de Engenharia da FURG. E-mail: jorge.braz@furg.br

4 Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela UFRGS. Professor na Escola de Engenharia da FURG. E-mail: lucianobiehl@furg.br

5 Pós-doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela UFRGS. Coordenador do Departamento de Ciência e Engenharia dos Materiais na Universidade Federal do Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE, Brasil. E-mail: carlosmartins@ufs.br

6 Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela UFRGS. Professor na Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha (FETLSVC), Novo Hamburgo, RS, Brasil. E-mail: josesouza@liberato.com.br

## 1 Introdução

Empregado na construção de cascos em plataformas de petróleo, os aços microligados podem apresentar problemas de integridade estrutural, devido à perda de propriedades mecânicas e metalúrgicas provocada por ciclos térmicos de soldagem. Até a década de 80, eram utilizados aços padrão na construção de plataformas *off-shore*.

No entanto, devido a maior exatidão dos requisitos de projeto, especialmente na tenacidade à fratura, foram desenvolvidos os aços *thermomechanical controlled processing* (TMCP) (LIMA, 2011). Esses materiais estão substituindo outros tipos de aços, incluindo aços estruturais, principalmente devido às suas boas propriedades mecânicas e sua soldabilidade associada à composição química (baixo carbono) e ao processo TMCP.

Nesses aços, alguns tratamentos térmicos podem danificar irreversivelmente a integridade da junta soldada, uma vez que as propriedades físicas e mecânicas foram obtidas pelo processamento termomecânico e não apenas pelas taxas de resfriamento (DE MEESTER, 1997). Nesse caso, o tratamento térmico para alívio de tensões (TTAT) aparece como uma alternativa que pode preservar suas propriedades mecânicas, microestrutura e distribuição de tensões residuais, por ser realizado em temperaturas inferiores à temperatura de recristalização da grande maioria dos aços.

No contexto apresentado, é importante avaliar o efeito do tratamento térmico subcrítico no comportamento da microestrutura desse tipo de aço e a sua contribuição para o entendimento da metalurgia da soldagem, através do estudo do processo de aquecimento em temperaturas mais baixas e reduzidas taxas de resfriamento, após a soldagem de aços baixo carbono e microligados.

## 2 Resumo do estado da arte

Os aços microligados são produzidos por técnicas de laminação controlada e também

por resfriamento acelerado, a fim de se obter resistência mecânica e tenacidade com reduzida adição de elementos de liga. Esses elementos promovem a formação de precipitados que ancoram o crescimento de grão austenítico na zona afetada pelo calor (ZAC), também apresentando esse comportamento com as taxas de resfriamento encontradas nas soldagens multipasses (LIMA, 2011).

Ainda, conforme Lima (2011), a análise química do aço microligado ASTM A131 AH36 revelou níveis muito baixos de carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre e quantidades equilibradas de nióbio, titânio e vanádio. A literatura mostra que esse balanço químico adequado e o baixo carbono equivalente (Ceq), juntamente com o ciclo termomecânico de processamento, asseguraram excelente resistência mecânica e tenacidade do metal de base como também da ZAC e, ainda, com ausência de precipitados frágeis (LIMA, 2011).

Com a finalidade de obter aporte térmico apropriado, na zona afetada pelo calor, na região com grãos com maior crescimento (ZACGG) do aço microligado de alta resistência laminado a quente V-N, foram investigadas quatro diferentes aportes térmicos, em relação à evolução microestrutural, dureza e tenacidade. Os resultados indicaram que o aporte moderado foi considerado ideal com microestrutura formada por ferrita poligonal fina, bainita granular e ferrita acicular com precipitados dispersivos em nano escala de V (C, N) (HU *et al.*, 2013).

A evolução microestrutural e as propriedades mecânicas de um aço X100 foram investigadas com base nos conceitos de TMCP e *high-temperature processing* (HTP). O aço TMCP possui predominantemente ferrita acicular, quando a temperatura final de resfriamento acelerado esteve na faixa de 430 a 540 °C. No entanto, espera-se que o aço HTP tenha principalmente ferrita acicular formada, a temperatura final de resfriamento acelerado próxima de 450 °C; sob condição similar de parâmetros de processo, o aço TMCP possui propriedades

mecânicas superiores em comparação com o aço HTP, o que pode ser explicado pela evolução microestrutural. A excelente tenacidade ao impacto das amostras de TMCP é atribuída principalmente à ferrita acicular e à pequena ferrita poligonal formada como fases de endurecimento por refino de grão, além disso, ambos os aços têm distribuição de tamanho semelhante de precipitados com três morfologias principais, sugerindo que seu efeito de fortalecimento de precipitação é semelhante (LAN *et al.*, 2017).

Segundo Lan *et al.* (2017), a influência do aporte de calor e da zona fundida (ZF) na soldagem com único passe e em multipasses de um aço microligado pelo processo FCAW causou um aumento no tamanho de grão na ZACGG para todas as condições, sendo esse efeito mais acentuado em altos aportes térmicos e uma diminuição de dureza na zona afetada pelo calor de grãos finos (ZACGF). Nos corpos de prova, foi observada uma estrutura de ferrita com lâminas finas de bainita, para aportes elevados, e um aumento de ferrita acicular, à custa de uma menor porcentagem de ferrita, com baixo aporte de calor. Na ZACGF, também foi observada uma estrutura de ferrita poligonal recristalizada.

Na soldabilidade de um aço ligado TMCP para tanques de lastro, foi verificado, por microscopia óptica, que o metal de base consistia de grãos equiaxiais e recristalizados (ferrita e perlita) com alguns grãos perlíticos alongados. A estrutura do material de base foi formada por ferrita/perlita em processo de bandeamento (BAERE *et al.*, 2017).

Na soldagem de um aço microligado, a microestrutura da ZAC, para ambos os experimentos, incluiu ferrita poligonal, ferrita de contorno de grão, ferrita com segunda fase alinhada/não alinhada, ferrita com carbonetos e microconstituintes de martensita/austenita (MA). Os resultados do tamanho de grão do metal de base mostram um intervalo de 8 a 17  $\mu\text{m}$ . Especificamente, o tamanho do grão de ferrita e a estrutura bandeada são devido a mudanças microestruturais que ocorrem durante o

processamento TMCP. A temperatura, durante o processo de soldagem na ZAC, é elevada o suficiente para permitir a transformação parcial da austenita, a partir da região intercrítica (RIBEIRO *et al.*, 2016).

Na soldabilidade do aço ligado (TMCP) para tanques de lastro, foram encontrados microestruturas constituídas por ferrita e perlita, com tamanho médio entre 20 e 30  $\mu\text{m}$  (BAERE *et al.*, (2017).

Os efeitos sobre a microestrutura do aço TMCP, devido ao ciclo térmico, seja de soldagem ou tratamento térmico, podem ser em alguns casos irreversíveis. Novos tratamentos térmicos não restaurarão as propriedades físicas e mecânicas, pois foram obtidos pelo tratamento termomecânico do processo TMCP e não apenas pelo tratamento térmico. A temperatura máxima de TTAT é geralmente limitada a 600 °C pela literatura (LIMA, 2011).

Os aços TMCP não devem ser tratados termicamente pelos ciclos convencionais de normalização, normalização seguida de revenimento ou têmpera. Tais tratamentos térmicos irão deteriorar as propriedades de resistência à tração e/ou tenacidade originais. Se o TTAT for exigido pelos padrões de fabricação do equipamento, ele deverá ser executado com o único propósito de relaxar as tensões residuais e não para melhorar as propriedades mecânicas e metalúrgicas, como é feito com frequência com os aços carbono e baixa liga. Os requisitos dos padrões de fabricação baseiam-se na experiência com os aços C-Mn-Si-S-P e não foram revisados para os aços TMCP. Se exigido pelos padrões de fabricação e montagem e especificações de projeto, o TTAT deve ser executado em temperaturas inferiores a 600 °C, para minimizar os efeitos prejudiciais nas propriedades mecânicas. Técnicas alternativas de alívio de tensões a frio, como martelamento, também devem ser consideradas (DE MEESTER, 1997).

Estudos com um aço TMCP não microligado, com carbono equivalente de 0,38 e TTAT (600 °C/2h), indicaram que não houve melhora

significativa da microdureza e dureza na ZAC e no metal base. Esses resultados são consistentes com as observações metalográficas que demonstraram que a microestrutura não foi significativamente alterada. Ainda assim, os pesquisadores afirmam que, por causa do baixo carbono, equivalente dos aços TMCP, o alívio de tensões não promove variações significativas na microestrutura; esse fato permite prever uma boa tenacidade para o metal de base e para a ZAC (TSAY *et al.*, 1999).

### 3 Materiais e métodos

#### 3.1 Materiais

Como suporte às atividades desenvolvidas, durante o trabalho de pesquisa, foram utilizados diferentes equipamentos, listados a seguir:

- Material de base: chapa de aço microligado, com espessura de 12,5 mm;
- Equipamento de soldagem por eletrodo tubular e gás ativo;
- Máquina de serra-fita;
- Fornos elétricos à resistência;
- Preparação metalográfica: cortadeira metalográfica, lixadeira metalográfica e politriz metalográfica;
- Caracterização metalúrgica: microscópio óptico de luz refletida com sistema de análise de imagens - Olympus GX 51S e espectrômetro de emissão óptica, para análise de ligas Oxford Foundry Master-Pro.

#### 3.2 Metodologia

A primeira etapa consistiu da obtenção das amostras para análise de composição química, realizada por espectrometria de emissão óptica.

O passo seguinte foi a preparação dos corpos de prova e posterior soldagem do aço microligado no processo eletrodo tubular.

Após a soldagem, as amostras que receberam o ciclo de alívio de tensões foram aquecidas em forno a 600 °C por duas horas (sem

atmosfera controlada). Após o desligamento do forno, as amostras permaneceram no interior, por um período de 24 horas, com uma taxa de resfriamento reduzida até a temperatura ambiente.

Em seguida, as amostras passaram para a etapa de preparação metalográfica. Nessa etapa as amostras (sem tratamento térmico e com tratamento térmico) foram analisadas no metal de base, zona afetada pelo calor e zona de fusão em um total de 9 análises por região.

A próxima fase consistiu na caracterização metalúrgica, através da utilização do microscópio óptico, para captura das imagens da microestrutura das zonas de soldagem.

Ao finalizar com a etapa de análise do tamanho de grãos ferríticos, medidos pelo método planimétrico, que consistiu na contagem do número de grãos dentro de uma área conhecida, de acordo com a norma ASTM E112 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS, 2013).

Foi realizada análise estatística por meio de análise de variância (ANOVA) e posterior análise pelo teste de *Tukey* para comparação de diferenças significativas entre as médias do tamanho de grão, após o alívio de tensões.

### 4 Resultados e discussões

#### 4.1 Composição química

A tabela 1 apresenta a composição química, analisada para o aço microligado, utilizado neste trabalho.

Todos os elementos encontraram-se dentro dos valores estipulados pela norma ASTM A131A/A131M (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS, 2001).

Cabe salientar a baixa quantidade de carbono, característica dos aços microligados produzidos pelo processo TMCP e, conseqüente, baixo carbono equivalente, possibilitando uma boa soldabilidade, para esses aços, inclusive omitindo o fator pré e pós-aquecimento, quando da aplicação da soldagem.

Tabela 1 – Composição química do aço

Elemento químico	Análise 1 (%)	Análise 2 (%)	Análise 3 (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)
C	0,0961	0,0877	0,0949	0,0929	0,0037
Mn	1,4400	1,4300	1,4500	1,4400	0,0082
Si	0,2920	0,2790	0,3210	0,2973	0,0176
P	0,0065	0,0071	0,0078	0,0071	0,0005
S	0,0121	0,0113	0,0105	0,0133	0,0007
Al	0,0278	0,0338	0,0478	0,0365	0,0084
Cu	0,0119	0,0124	0,0139	0,0127	0,0008
Cr	0,0095	0,0088	0,0096	0,0093	0,0004
Ni	0,0108	0,0105	0,0110	0,0108	0,0002
Nb	0,0318	0,0317	0,0310	0,0315	0,0004
Ti	0,0146	0,0147	0,0145	0,0146	0,0001
V	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0000
Mo	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0000
Ceq	0,3399	0,3297	0,3405	0,3367	0,0050

Fonte: Os autores (2018).

Outro fator importante, detectado na análise química, foram as quantidades encontradas de nióbio, titânio e ainda traços de vanádio e molibdênio em sua composição. Esses elementos químicos, associados ao processo de fabricação, contribuem para as excelentes propriedades mecânicas, para esses materiais, apesar da quantidade de carbono limitada.

4.2 Comparação entre a microestrutura do metal de base, antes e após o tratamento térmico

A figura 1 mostra a presença de ferrita e perlita. Na amostra, é possível verificar a estrutura de bandeamento característico, o qual é típico do processo TMCP, desses tipos de aço.

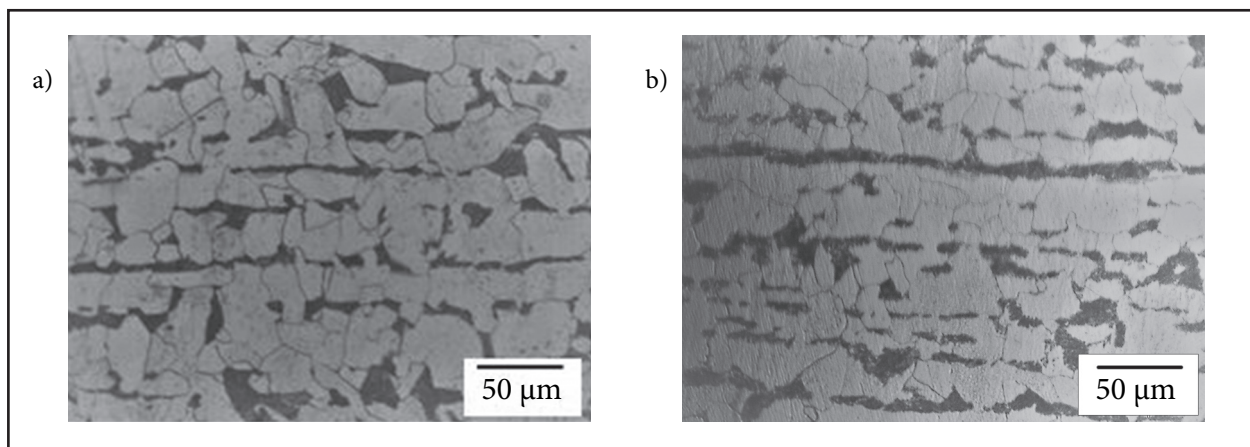


Figura 1 – Caracterização do MB (50x): a) antes do TTAT e b) depois do TTAT

Fonte: Os autores (2018).

O material original apresentou bandeamento. Após o alívio de tensões, a ferrita seletiva e perlita continuaram no metal de base, identificando que ela não apresentou dispersão em sua

morfologia com o tratamento subcrítico. Para eliminação do bandeamento, seria necessário causar uma conformação mecânica e um tratamento térmico de normalização no material. Já,

na região da zona afetada pelo calor e da zona fundida, o alívio de tensões poderia contribuir para a diminuição parcial ou total das tensões residuais que por ventura surgissem, devido à soldagem realizada.

#### 4.3 Comparação entre a microestrutura da ZACGG, antes e após o tratamento térmico

Após a análise do metal de base, foi realizada a análise microestrutural da ZAC. Primeiramente, foram analisados os microconstituintes da ZACGG, como pode ser visto na figura 2. Deve-se notar que as amostras

foram analisadas novamente, antes e após o tratamento térmico.

As transformações microestruturais nessa região são afetadas pelo ciclo térmico e pelos passes subsequentes. Assim, o pico de temperatura do último passe excede a temperaturas da região intercrítica e, com o resfriamento, a microestrutura foi constituída de ferrita de contorno de grão (GF), ferrita poligonal (PF) e ferrita alinhada com carbonetos (FS (A)), ferrita desalinhada com carbonetos FS (NA) e ferrita com carbonetos agregados (FC), além de martensita.

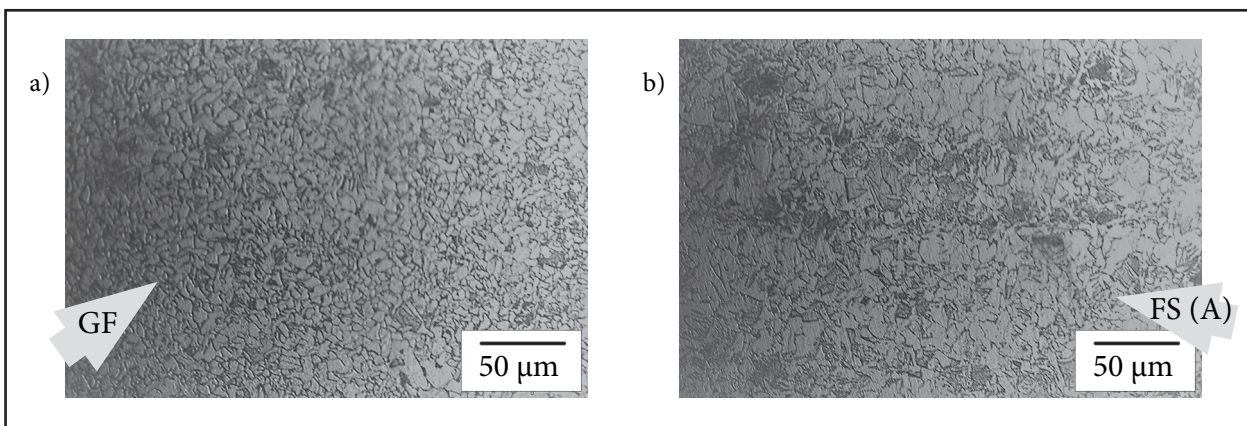


Figura 2 – Caracterização da ZACGG (50x): a) antes do TTAT e b) depois do TTAT  
Fonte: Os autores (2018).

#### 4.4 Comparação entre a microestrutura da ZACGF, antes e após o tratamento térmico

A estrutura foi então formada por perlita (P) e ferrita poligonal (PF), formada pela decomposição de austenita em altas temperaturas (figura 3).

Nessa região, durante a soldagem, a temperatura foi suficiente para formar a austenita. Entretanto, o pico de temperatura alcançado não foi suficiente para dissolver os precipitados (carbonetos e nitretos), conforme foi verificado também no trabalho de Ribeiro *et al.* (2016).

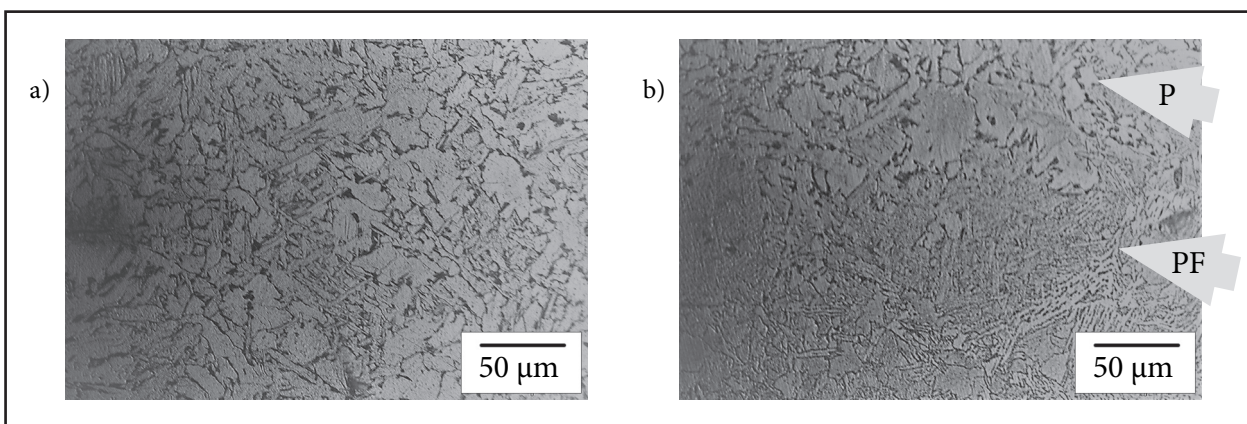


Figura 3 – Caracterização da ZACGF (50x): a) antes do TTAT e b) depois do TTAT  
Fonte: Os autores (2018).

#### 4.5 Comparação entre a microestrutura da zona fundida, antes e após o tratamento térmico

Na zona fundida, verificou-se uma microestrutura formada por ferrita de contorno

de grão (FG), ferrita acicular (FA) e ferrita com segunda fase, alinhada (FS (A)), que se desenvolveu, a partir da ferrita de contorno de grão (GF) (figura 4).

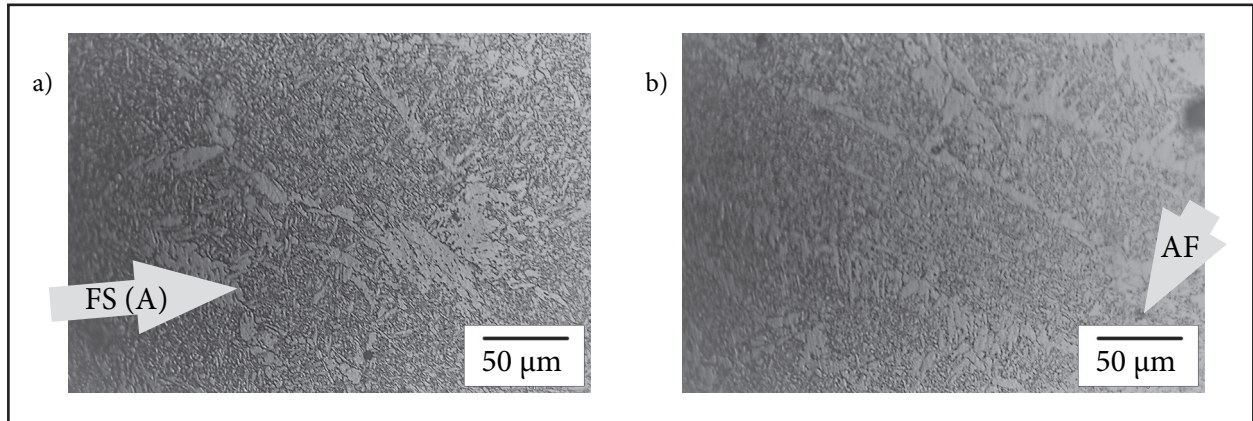


Figura 4 – Caracterização da MS (50x): a) antes do TTAT e b) depois do TTAT  
Fonte: Os autores (2018).

#### 4.6 Comparação entre o tamanho de grão das regiões da junta soldada, antes do tratamento térmico

As imagens obtidas por microscopia óptica mostraram metal de base (estrutura bandeada) com presença de ferrita com

granulometria de 12 µm. O tamanho de grão ferrítico na ZACGF foi 50% menor que no MB. Na zona fundida, foram observados grãos com 20 µm. Na tabela 2, pode ser visto o comparativo mais detalhado entre o tamanho do grão nas regiões da junta soldada.

Tabela 2 – Tamanho de grão, conforme a região da junta soldada

	Tamanho 1 (µm)	Tamanho 2 (µm)	Tamanho 3 (µm)	Média (µm)	Desvio padrão (µm)
MB	13	12	12	12	0,4714
ZACGF	6	5	6	6	0,4714
ZACGG	13	13	13	13	0,0000
ZF	21	19	20	20	0,8165

Fonte: Os autores (2018).

Na região mencionada, é possível relacionar o tamanho do grão aos ciclos térmicos. Nessa região, o tempo não é suficiente para dissolver completamente os precipitados, impedindo o crescimento do grão austenítico. O grão no ZACGG encontrou-se na mesma faixa do MB, já que na soldagem multipasse a microestrutura pode ser afetada pelos ciclos térmicos e refinada pelas

passagens subsequentes de soldagem, conforme foi verificado também no trabalho de Ribeiro *et al.* (2016).

#### 4.7 Comparação entre o tamanho de grão das regiões da junta soldada, após o alívio de tensões

As imagens obtidas por microscopia óptica mostraram metal de base, com presença

de ferrita, com grão de 12  $\mu\text{m}$ . O tamanho de grão ferrítico no ZACGF foi 50% menor que em MB. Na ZF, foram observados grãos com

19  $\mu\text{m}$ . Na tabela 3, pode ser visto o comparativo mais detalhado entre o tamanho do grão nas regiões da junta soldada, após o TTAT.

Tabela 3 – Tamanho de grão, conforme a região da junta soldada após TTAT

	Tamanho 1 ( $\mu\text{m}$ )	Tamanho 2 ( $\mu\text{m}$ )	Tamanho 3 ( $\mu\text{m}$ )	Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão ( $\mu\text{m}$ )
MB	12	11	13	12	0,4722
ZACGF	5	6	6	6	0,2061
ZACGG	12	11	13	12	0,6370
ZF	20	19	18	19	0,7067

Fonte: Os autores (2018).

Após a TTAT, houve variação menor que 10%, no tamanho de grão, nas regiões avaliadas, provavelmente, devido a erros de contagem do número de grãos no método planimétrico. Isso confirma que o tratamento térmico não altera significativamente o tamanho do grão nesse tipo de aço.

4.8 Comparação entre o tamanho de grão das regiões da junta soldada, antes e após o tratamento térmico

Como mostra a figura 5, há uma diminuição na variação percentual de 8 a 5% nas regiões da ZACGG e ZF, respectivamente, após o tratamento térmico.

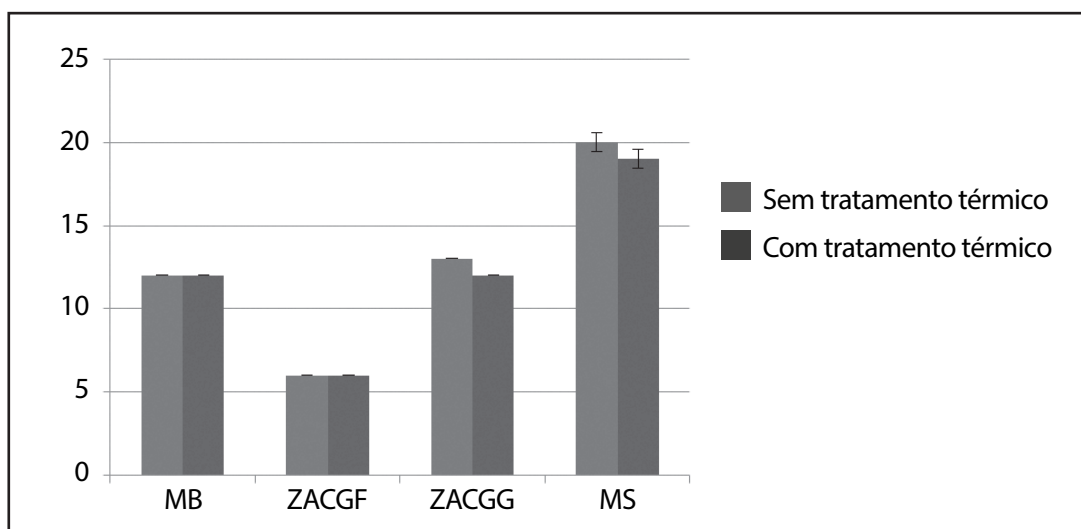


Figura 5 – Comparação do tamanho de grão entre as regiões da solda, antes e após o tratamento térmico  
Fonte: Os autores (2018).

O resultado do valor da diferença mínima significativa ( $dms = 2,26$ ), encontrada pelo teste de Tukey, é maior que todas as diferenças entre as médias das regiões de solda, indicando que não há diferença estatística significativa.

## 5 Conclusão

A partir da análise microestrutural e do tamanho de grão de um aço microligado, após o alívio de tensões, verificou-se que o material



não apresentou modificações no bandejamento. Após o ciclo térmico, a ferrita e a perlita continuaram no metal de base, identificando que o mesmo não apresentou dispersão em sua morfologia com o subcrítico. Para a eliminação do bandejamento, é necessário utilizar conformação mecânica e tratamento térmico na temperatura de recristalização do material.

A análise de imagens apresentou metal de base com presença de ferrita/perlita e tamanho de grão com 12  $\mu\text{m}$ . Na ZACGF, o grão foi 50% menor que no metal de base. Enquanto, na ZACGG, esteve na mesma faixa de MB, formando ferrita/bainita e martensita/austenita. Na zona fundida, verificou-se a presença de ferrita/ferrita acicular/ferrita de contorno de grão, com segunda fase alinhada com 20  $\mu\text{m}$ . Após o TTAT, houve variação menor que 10% no tamanho de grão, nas regiões avaliadas. Comprovou-se, por meio de análise de variância (ANOVA) e posterior análise pelo teste de *Tukey*, para comparação de médias que as variações do tamanho de grão, após o tratamento térmico, não diferem significativamente daquelas encontradas, antes do alívio de tensões.

### Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS. **ASTM A131A/A131M**: standard specification for structural steels for ships. West Conshohocken, 2001.

\_\_\_\_\_. **ASTM E112**: standard test methods for determining average grain size. West Conshohocken, 2013.

BAERE, K. *et al.* Assessment of corrosion resistance, material properties, and weldability of alloyed steel for ballast tanks. **Journal Marine Science and Technology**, n. 22, p. 176-199, Jul. 2017.

DE MEESTER, B. The weldability of modern structural TMCP steels. **ISIJ International**, v. 37, n. 6, p. 537-551, Feb. 1997.

HU, J. *et al.* Effect of welding heat input on microstructures and toughness in simulated CGHAZ of V-N high strength steel. **Materials Science and Engineering A**, n. 577, p. 161-168, Apr. 2013.

LAN, L. *et al.* Phase transformation, microstructure, and mechanical properties of X100 pipelines steels based on TMCP and HTP concepts. **Journal of Materials Science**, n. 52, p. 1661-1678, Oct. 2017.

LIMA, C. A. S. **Influência do tratamento térmico de alívio de tensões associado à elevada energia de soldagem na tenacidade da zona termicamente afetada de um aço TMCP microligado aplicado em estruturas off-shore**. 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, Brasil, 2011.

RIBEIRO, A. C. N. *et al.* Evaluation of AH36 microalloyed steel welded joint by submerged arc welding process with one and two wires. **Materials Research**, v. 19, n. 1, p. 143-152, Nov. 2016.

TSAY, L. *et al.* Microstructures and fatigue crack growth of EH 36 TMCP steel weldments. **International Journal of Fatigue**, v. 21, n. 8, p. 857-864, Set. 1999.

