

ANÁLISE DE SOLDA EM ESTRUTURA METÁLICA PELO PROCESSO MIG/MAG

WELD ANALYSIS IN METALLIC STRUTURE BY THE MIG/MAG PROCESS

Thomas Röhsig thomas_rohsig@hotmail.com

Graduado em Engenharia Mecânica – Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil).

Sandra Raquel Kunst tessaro.sandra@gmail.com

Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil).

Leonardo Félix Scheffel scheffel1234@gmail.com

Graduando em Engenharia Mecânica pela Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil).
Bolsista de iniciação científica na Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil).

Luciane Taís Fuhr luciane.fuhr@gmail.com

Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais pela Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil).
Professora da Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil).

Carlos Leonardo Pandolfo Carone carloscarone@feevale.br

Doutor em Tecnologia em Ciências dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil).
Professor na Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil).

Fernando Dal Pont Morisso morisso@feevale.br

Doutor em Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil).
Professor na Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil).

Jane Zoppas Ferreira jane.zoppas@ufrgs.br

Doutor em Electrochimie pela Universite de Paris VI (Pierre et Marie Curie) (Paris/França).
Professor na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil)

Cláudia Trindade Oliveira cto@feevale.br

Doutora em Tecnologia em Ciências dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil).
Professora na Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil).

RT&T | a. 10 | n. 2 | p. 33-58 | jul./dez. 2019

Recebido em: 20 de outubro de 2017 | Aprovado em: 20 de março de 2018

Sistema de Avaliação: Double Blind Review | DOI: <https://doi.org/10.25112/rtt.v10i2.1901>

RESUMO

O processo de soldagem em estruturas metálicas possui destaque dentro da indústria metalúrgica, pois é a melhor maneira de unir materiais com baixo custo, quando comparado a outros métodos. Diversos são os segmentos de mercado onde se faz necessário o uso de estruturas metálicas soldadas. Estruturas metálicas possuem algumas vantagens sobre os sistemas construtivos convencionais, tais como precisão, devido ao fato de os elementos serem produzidos em fábrica, possibilidade de seções menores, construções com maiores vãos e rapidez na execução da obra. A soldagem de estruturas metálicas pelo processo MIG/MAG tem se mostrado muito eficiente, sendo o método mais utilizado nas soldas de emendas dessas estruturas. O presente trabalho relata uma análise laboratorial através de metalografia da solda em questão, avaliando o seu comportamento microestrutural e sua composição química em diferentes zonas. Portanto, este trabalho tem como objetivo geral analisar a microestrutura formada em determinada parte de uma estrutura metálica soldada. Para tanto, inicialmente foi realizado o acompanhamento termográfico da estrutura durante o processo de soldagem, seguido da retirada dos corpos de prova. O processo metalográfico possibilitou análises de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e análises de EDS. Os resultados mostraram um crescimento já esperado dos grãos na região da solda e apresentaram variações em relação à composição química ao longo da área soldada.

Palavras-chave: Estruturas metálicas. Soldagem. Corrosão.

ABSTRACT

The welding process in metal structures is prominent within the metallurgical industry, as it is the best way to join materials with low cost when compared to other methods. Several are the market segments where it is necessary to use welded metal structures. Metal structures have some advantages over conventional construction systems, such as accuracy due to the fact, that the elements are produced in the factory, smaller sections are possible, constructions with bigger spans besides the speed in the execution of the work. The welding of metallic structures by the MIG / MAG process has been proved very efficient and is the most used method for this purpose in the welds of joints of these structures. The present work reports a laboratory analysis through metallography of the weld in question, evaluating its microstructural behavior and its chemical composition in different zones. Therefore, this work has as general objective to analyze the microstructure formed in certain part of a welded metal structure. To do this, the thermographic monitoring of the structure was carried out during the welding process, followed by the removal of the samples. The metallographic process allowed the analysis of optical microscopy, scanning electron microscopy and EDS analysis. The results showed an expected growth of the grains in the region of the weld and showed variations in relation to the chemical composition along the welded area.

Keywords: Metal structures. Welding. Corrosion.

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é o processo de união permanente mais utilizado mundialmente nas emendas de estruturas metálicas e, tem como principal vantagem a capacidade de manter as propriedades químicas e mecânicas do material em uma solda de união. É um processo que possui grande versatilidade e economia, evitando perdas oriundas da interrupção do serviço (WAINER, 1992; MOURÃO, 2011; MACHADO, 1996; PFEIL, 2014). Entre os processos de soldagem destaca-se o MIG/MAG, que utiliza arco elétrico com proteção gasosa, apresenta excelente produtividade, decorrente da alimentação contínua do arame eletrodo, sendo portanto semiautomático, possibilitando a soldagem de diversos tipos de materiais (MARQUES, 2013). Os processos de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa vêm recebendo constantes melhorias no campo da informática e da eletrônica, o que possibilita um domínio mais preciso dos fenômenos envolvidos na operação de soldagem. A possibilidade desse controle, proporciona o entendimento de como a condição operacional pode influenciar na estrutura final do metal depositado, para que se obtenha características superiores externas, aspecto superficial, e internas, no aspecto microestrutural, quando comparados às condições de operações básicas. Por outro lado, o processo gera aquecimento da estrutura até a temperatura de fusão do metal de adição, o que pode afetar o desempenho da estrutura soldada (PEREIRA, 2013). Portanto, este trabalho tem como objetivo geral analisar a microestrutura formada em determinada parte de uma estrutura metálica soldada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SOLDAGEM

É definido como soldagem o processo de união entre duas partes metálicas, com a utilização de uma fonte de calor, aplicando-se ou não pressão. O resultado deste processo é a solda (WAINER, 1992). Para Wainer, todo processo de soldagem deve atender alguns requisitos como:

- Gerar uma quantidade de energia capaz de unir dois materiais, similares ou não;
- Remover as contaminações das superfícies a serem unidas;
- Evitar que o ar atmosférico contamine a região durante a soldagem;
- Assegurar o controle da transformação de fases, para que a solda obtenha as propriedades almejadas, sejam elas físicas, químicas ou mecânicas.

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2013) a soldagem é o processo de união de metais mais importante utilizado industrialmente. Este processo, juntamente com a brasagem, tem significativa

aplicação desde a indústria microeletrônica até a produção de navios além de estrutura com milhares de toneladas de peso. O processo de soldagem é utilizado na produção de simples estruturas como portões e grades e, também em estruturas de grande responsabilidade como estruturas metálicas, indústria petrolífera, química e nuclear, assim como na produção de artesanato, joias e objetos de arte (PANNONI, 2011).

Uma variedade de processos empregados na recuperação e fabricação de peças, equipamentos e estruturas metálicas é atendido pelo termo "soldagem". Normalmente o processo de soldagem é encarado como um processo de união, entretanto, hoje em dia a soldagem e a variação dos seus processos, permitem o uso para deposição de material em superfícies, afim de recuperar peças com desgaste ou para formar uma superfície com características especiais (MARQUES, 2013; PARDAL, 2011).

2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

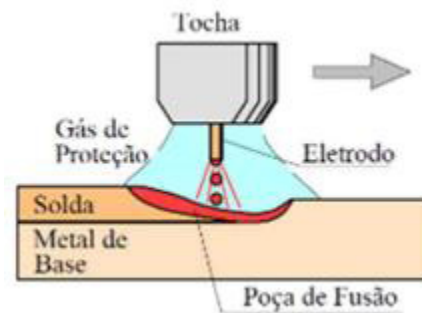
Segundo Wainer, Brandi e Mello (1992), os processos de soldagem são classificados conforme a natureza da união ou conforme o tipo de fonte de energia utilizado. Pelos tipos de fonte de energia, a classificação é feita conforme o processo de soldagem que pode ser: mecânico, químico, elétrico e radiante. Na fonte mecânica o calor é produzido pelo atrito, por ondas de choque ou pela deformação plástica do material. Na fonte química o calor é produzido em reações químicas exotérmicas, como na reação de oxirredução do alumínio ou por exemplo na queima de um combustível em forma de chama. Na fonte elétrica o calor é fornecido pela formação de um arco elétrico ou com a passagem de uma corrente elétrica, onde o aquecimento se dá por meio da corrente, potencial de ionização e outros parâmetros de solda, no primeiro caso, e no segundo acontece pelo efeito joule. E na fonte radiante o calor é produzido por um laser de radiação eletromagnética ou por uma quantidade de elétrons acelerados por meio de um potencial.

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2013), um modo de classificar os processos de soldagem, é juntá-los em dois grupos, baseado praticamente no método predominante utilizado para fabricar a solda: soldagem por pressão (deformação) ou soldagem por fusão. Existem cerca de 100 processos de soldagem e técnicas conexas reconhecidos pela *American Welding Society (AWS)*, englobando corte térmico e pulverização térmica. Esses processos estão estruturados em treze grupos: 1) soldagem a arco elétrico; 2) soldagem em fase sólida; 3) soldagem por oxigás; 4) soldagem por resistência elétrica; 5) brasagem; 6) solda branda; 7) soldagem com alta densidade de energia; 8) outros processos de soldagem; 9) pulverização térmica; 10) união por adesivo; 11) corte térmico com oxigênio; 12) corte térmico por arco; 13) outros métodos de corte. Neste artigo seria dado ênfase ao processo MIG/MAG utilizado neste trabalho.

2.3 SOLDAGEM MIG/MAG (*GAS METAL ARC WELDING - GMAW*)

No processo de soldagem a arco com proteção gasosa, a união das peças metálicas é gerada pelo aquecimento das mesmas com o arco elétrico formado entre a peça e o eletrodo consumível sem revestimento. A região de solda é protegida contra contaminações atmosféricas, por meio do uso de um gás ou uma mistura de gases, que podem ser ativos ou inertes. No Brasil este processo é nomeado como *Metal Active Gas* (MAG) quando a mistura ou o gás utilizado são ativos e nomeado como *Metal Inert Gas* (MIG) quando para a proteção da solda são utilizados um gás ou uma mistura de gases inertes. A Figura 1 ilustra o processo (MARQUES, 2013).

Figura 1 - Processo de soldagem MIG/MAG.



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense, 2013.

Conforme Wainer, Brandi e Mello (1992), o processo de soldagem MIG é apropriado para aços carbono, aços inoxidáveis, alumínio e ligas, aços de baixa, média e alta liga, cobre e ligas e magnésio e ligas. Já o processo de soldagem MAG é apropriado para aços de baixa liga e aços de baixo carbono. Para Wainer, Brandi e Mello (1992), as principais vantagens do processo MIG/MAG são:

- Eletrodo sem revestimento é alimentado continuamente;
- Soldagem pode ser realizada em diversas posições;
- Alta velocidade de soldagem;
- Processo bastante versátil, semiautomático podendo ser modificado para automático;
- Complicações como distorções e tensões residuais diminuídos;
- É possível controlar a penetração e a diluição durante a soldagem.

No processo soldagem MIG/MAG existe a possibilidade de se soldar uma extensa faixa de espessuras, tanto em metais não ferrosos como em ferrosos, os diâmetros dos eletrodos podem variar geralmente entre 0,8 e 2,4 mm. O processo MIG é utilizado tanto para soldagem de materiais não ferrosos como alumínio, magnésio, cobre, níquel e suas ligas e o processo MAG é utilizado somente em materiais ferrosos, tendo o CO₂ ou misturas abundantes neste gás utilizadas como proteção (MARQUES, 2013; TATAGIBA, 2012).

2.3.1 GASES DE PROTEÇÃO

O processo de soldagem MIG/MAG para produzir soldas de qualidade exige um fluxo de gás em torno do metal de base, tendo como principal função proteger a poça de fusão e as gotas metálicas. O gás é nomeado de proteção, mas também executa outras funções como controlar a operacionalidade e transferência metálica, estabilizar o arco, influenciar nas propriedades mecânicas, geometria e características metalúrgicas da solda. A eficiência da proteção decorre da eficácia do conjunto em excluir os gases do meio ambiente, levando em consideração o tipo de gás utilizado além da configuração do bocal da tocha e da vazão do gás (VEIGA, 2011).

Os gases utilizados na soldagem MIG/MAG podem ser ativos, inertes ou mesmo uma mistura destes. A escolha do gás tem influência nas propriedades, como por exemplo: transferência de metal, características do arco, penetração, formato e largura do cordão de solda, velocidade de soldagem, mordeduras e custo de operação. Para a soldagem de metais não ferrosos são utilizados principalmente os gases inertes puros, especialmente nos mais reativos como magnésio, titânio e alumínio, já para a soldagem de ferrosos ocorre a adição de gases ativos (que contêm oxigênio), ocasionando uma sensível melhora na estabilidade do arco e a transferência de metal (a emissão de elétrons é facilitada pela presença de óxidos). A utilização do CO₂ pode reduzir os custos da soldagem. O CO₂ é inerte a temperatura ambiente, mas se decompõe em CO e O quando exposto às altas temperaturas do arco elétrico de soldagem, tornando-se assim ativo (MARQUES, 2013).

2.3.2 ARAMES ELETRODOS

O arame eletrodo juntamente com os gases de proteção, são os principais consumíveis do processo de soldagem MIG/MAG. São compostos de metais ou ligas metálicas e dispõem de condições superficiais, dimensões, dureza e composição química precisamente reguladas. Arames com características como as já citadas, desreguladas ou com má qualidade, podem gerar falhas no processo de soldagem como discontinuidades no cordão de solda, instabilidade no arco e falhas na alimentação (MARQUES, 2013). Arames de aço utilizados para a soldagem MIG/MAG são tipicamente cobreados, a explicação para este

revestimento é que a camada de cobre melhora o contato elétrico entre o mesmo e o bico de soldagem na tocha e ainda protege o arame contra a corrosão. Portanto, é uma forma de revestimento catódico, que tem uma espessura mínima e o elemento protetor mais nobre que o protegido, isolando assim o arame do meio corrosivo. Para a produção destes arames são utilizados métodos industriais de deposição química e eletrolítica e processos que utilizam produtos químicos e ácidos. Esses produtos, podem ficar impregnados em irregularidades da superfície do arame durante as etapas de fabricação, o que contribui para corrosão do cobre o/ou do aço e ainda a formação da pilha galvânica que acarreta em uma acentuada corrosão localizada (MARQUES, 2013).

2.4 ZONAS DA JUNTA SOLDADA

Zona do metal de solda é constituída por uma mistura homogênea do metal de base fundido com metal de adição e geralmente utilizada no estado bruto de fusão. Zona não misturada fundida, tem espessura muito fina e é formada exclusivamente pelo metal de base fundido, pois o mesmo solidifica antes de haver uma mistura como metal de adição. Zona de interface da solda, é a zona que demonstra a divisão entre o metal de base e o metal fundido, a sua identificação é dificultada em metais puros. Zona parcialmente fundida, gerada pela liquação de segregações ou impurezas, na periferia de grãos com baixo ponto de fusão, acontece logo após a interface de solda e no metal de base. Zona afetada pelo calor (ZAC), em decorrência da temperatura máxima alcançada, pelo tempo de retenção do metal de base na mesma e pelas taxas de resfriamento e aquecimento, existe uma zona onde não ocorre nenhuma forma de fusão, mas alterações alotrópicas relevantes são produzidas no estado sólido, como transformações de fase e crescimento do grão. Normalmente mostra várias regiões com características que variam conforme o metal de base. Zona do metal de base inalterado, é formada pelo resto da peça, onde não houve mudança metalúrgica, mas pode conter alta tensão residual que pode ocasionar sérios efeitos para o aproveitamento da peça (NOGUEIRA, 2015; MACHADO, 1996). Os processos de soldagem em sua maioria, principalmente os por fusão, possuem zonas distintas mostradas na Figura 2. Conforme Machado (1996), é importante esclarecer que cada zona possui um conjunto de detalhes.

Figura 2 – Zonas da junta soldada.



Fonte: Machado, 1996.

2.5 ZONA AFETADA PELO CALOR (ZAC)

Na soldagem de aços carbono e aços-liga a zona afetada pelo calor tem especial importância na relação das propriedades da união soldada. As altas temperaturas obtidas na ZAC, fazem com que ocorram alterações na estrutura do metal de base, e em consequência disso, nesta zona, ocorrem modificações nas propriedades mecânicas. Com ampla quantidade de estruturas com diferentes propriedades na região da ZAC estas modificações podem ser administradas pelo resfriamento da peça. Os efeitos do resfriamento na soldagem são influenciados pelo aporte de calor, pelas temperaturas aplicadas na união e pela espessura do metal de base (VEIGA, 2011). Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2013), a ZAC é uma região do metal de base não fundida que alterou suas propriedades e/ou microestrutura decorrente do ciclo térmico de soldagem. Na região, as temperaturas de pico foram superiores à temperatura crítica de material em questão e inferiores à temperatura de fusão. Na zona afetada pelo calor, ao contrário do metal de base, não é possível alterar a composição química, assim, é necessário utilizar aços de elementos de ligas e teores de carbono para que se obtenham as propriedades mecânicas desejadas para o projeto. Na união soldada são obtidas inúmeras curvas de resfriamento contínuo, a curva do metal de solda é influenciada pelo baixo teor de carbono e pelo teor de oxigênio. Na ZAC acontece um crescimento de grão, aumentando assim a temperabilidade dos aços, o que favorece a formação de microconstituintes formados em temperaturas baixas, abaixo de 500 °C. Juntamente com a região de crescimento do grão se encontra uma outra região em que se dá o refino do grão, causando nessa região a diminuição da temperabilidade no mesmo aço (WAINER, 1992).

3 EXPERIMENTAL

A estrutura utilizada consistiu de um perfil dobrado, de aço laminado a quente ASTM A36, com dimensões de 75 x 160 x 75 mm e espessura de $\frac{1}{4}$ " (6,35 mm). A composição química do material está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço ASTM A36.

Composição Química				
C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)
0,25	1,35	0,04	0,05	0,4

Fonte: Gerdau S.A., 2017.

O processo de soldagem empregado foi o MAG (Gas Metal Arc Welding - GMAW), utilizando como gás de proteção uma mistura de argônio com gás carbônico na proporção de 85% Ar e 15% CO₂ com vazão de 17 L.min⁻¹. O metal de adição utilizado no processo foi o arame de diâmetro de 1,0 mm cobreado manganês-silício AWS ER70S-6 conforme a norma American Welding Society (AWS) 5.18, com composição química de 0,8% de C, 1,5 % de Mn e 0,9% de Si. Os parâmetros de soldagem utilizados foram: corrente: 380 A, tensão: 23 V, velocidade de soldagem: 48 cm.min⁻¹ e aporte térmico de 1.093 kJ.mm⁻¹. Os cordões de solda foram obtidos por meio de uma solda de topo em I em ambos os lados do perfil (Figura 3), com um afastamento de 3 mm entre as peças.

Figura 3 – Junta soldada de topo em ambos os lados.

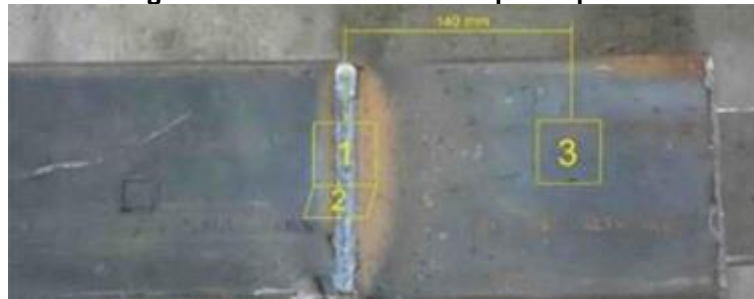


Fonte: Elaborado pelos autores.

O corte foi realizado conforme ilustrado na Figura 4, que resultou em três corpos de prova. Os corpos de prova 1 (seção longitudinal) e 2 (seção transversal) foram retirados na região do cordão de solda e

o outro (3) retirado a 140 mm da região da solda, centralizado no perfil. A escolha dos corpos de prova foi resultado das análises de termografia em que se escolheu como solda as que tenham temperaturas inferiores a fusão do material.

Figura 4 - Área de coleta dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Após o processo de corte, os três corpos de prova foram submetidos ao processo metalográfico, sendo lixados em sequência nas lixas SiC com granulação #600, #800, #1200, #2400 e #4000 e, em seguida, polidas com pasta de diamante, com o auxílio da politriz modelo POLIPAN-U da marca Pantec.

Nas análises técnicas, foi utilizada uma câmera termográfica para a obtenção de imagens que ilustram a dissipação do calor no perfil soldado. A marca da máquina utilizada é Testo, modelo 875-2, a qual trabalha em uma faixa de temperatura que compreende de 0 °C a 357 °C. As amostras polidas foram fotografadas no microscópio ótico de modelo Stemi 508, marca Zeiss, para visualização e distinção das zonas do metal de base, metal de adição e zona afetada pelo calor, para, posteriormente, serem analisadas no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) da marca Jeol, modelo JSM-6510LV. Previamente as amostras foram atacadas com Nital 5% por 1 minuto. As análises de Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) foram realizadas no metal de base afastado da junta soldada, e em pontos próximos, como metal de adição e zona afetada pelo calor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

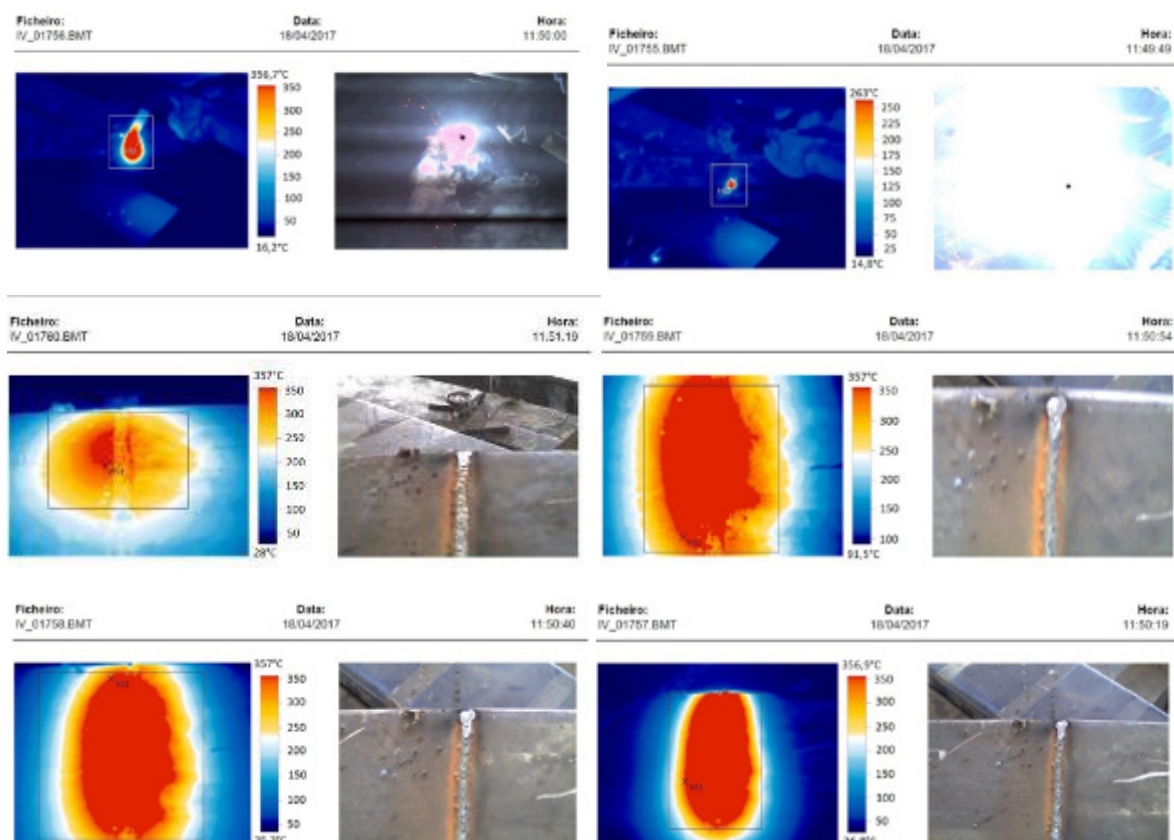
Neste capítulo serão discutidos através de embasamentos teóricos os resultados obtidos nos ensaios detalhados no capítulo anterior. Para isso, os ensaios de caracterização também serão correlacionados para um melhor entendimento da análise da microestrutura formada em determinada parte de uma estrutura metálica soldada. Para tanto, inicialmente foi realizado o acompanhamento termográfico

da estrutura durante o processo de soldagem, seguido da retirada dos corpos de prova. O processo metalográfico possibilitou análises de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e análises de EDS.

4.1. ANÁLISE DE TERMOGRAFIA

A Figura 5 mostra as análises termográficas, de acordo com o tempo, durante a soldagem da junta. Observa-se que nos instantes iniciais, durante a abertura do arco elétrico, a temperatura máxima registrada foi de 263 °C a uma distância de 2 m do local da solda. Cabe salientar que a escala indicada na termografia está limitada pela faixa de temperatura da câmera. Neste caso, como a solda atinge a temperatura de fusão do material, provavelmente, a temperatura atingiu valores maiores do que o registrado, onde a escala registra a cor vermelha.

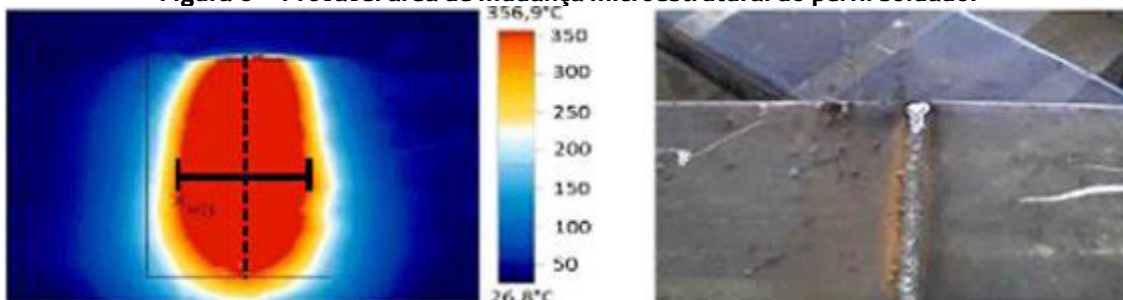
Figura 5 – Termografia realizada durante a soldagem.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Depois disso, observa-se um aumento até 356,7 °C, com a solda praticamente finalizada. Em seguida, com a câmera a aproximadamente 30 cm do local da solda, observam-se variações bem definidas de coloração na solda. O valor máximo de temperatura observado foi de 356,9 °C. Após isso, as temperaturas estão bem definidas ao longo da solda, indicando áreas com baixas temperaturas. De acordo com a literatura, as temperaturas em torno de 100 a 300° C não são suficientes para que ocorra mudança de fase, e conforme Wainer, Brandi e Mello (1992), os grãos não sofrem alteração de tamanho e forma em temperaturas abaixo de 700 °C. No entanto, a região amarela (250-300 °C) começa a se destacar e ocupar lugar da região vermelha (acima de 357 °C). Posteriormente, observa-se uma diminuição da temperatura ao longo da peça, ocupando a região que antes era vermelha. Isto aponta uma variação de temperatura, indicando a provável modificação microestrutural ao longo da solda. Portanto, a figura 6 (a qual foi obtida da Figura 5) a região que supostamente deve conter mudança microestrutural encontra-se a aproximadamente 30 mm para cada lado, a partir do cordão de solda.

Figura 6 – Provável área de mudança microestrutural do perfil soldado.

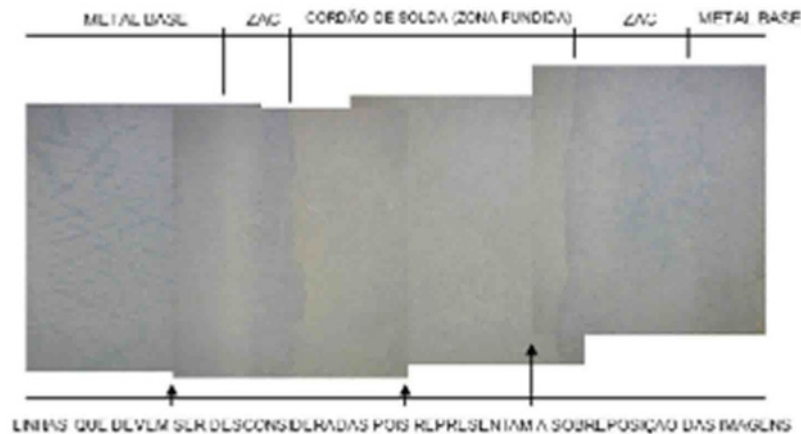


Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ÓTICA

As Figuras 7 e 8 mostram as imagens dos corpos de prova 1 e 2, referente à área de solda, em seção longitudinal e transversal, respectivamente. De acordo com a Figura 6, corpo de prova 1 (CP1) pode-se identificar as zonas que constituem a junta soldada, que é formada, tanto pelo metal de base, quanto pelo ZAC, em ambos os lados e pelo o cordão de solda (Zona Fundida, ZF). Cabe salientar que, o cordão de solda medido na Figura 7 corresponde a 12,1 mm.

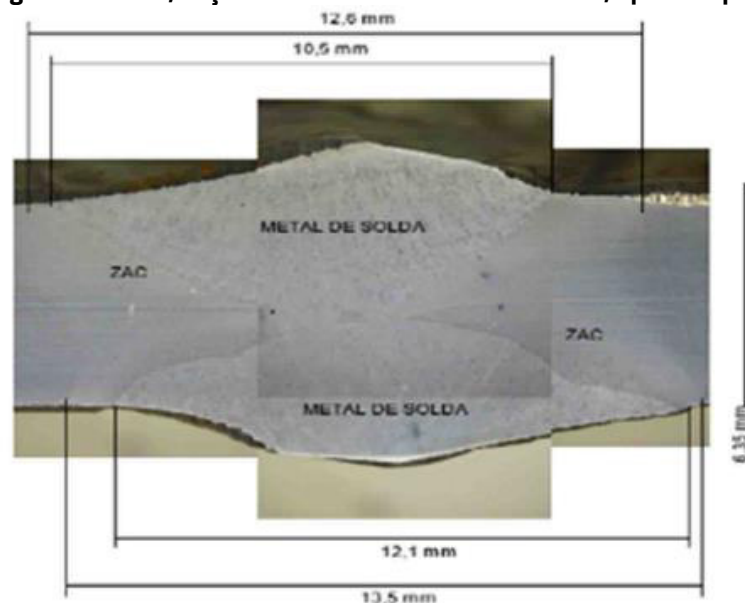
Figura 7 – Micrografia do CP 1, seção longitudinal ao cordão de solda, após ataque metalográfico.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 8 mostra a seção transversal do CP 2. Nela estão identificadas a zona afetada pelo calor (ZAC), com dimensões de 12,6 mm no primeiro cordão de solda e 13,5 mm no segundo. A zona circunda os dois cordões e as ZF com dimensões de 10,5 mm no primeiro e 12,1 mm no segundo, respectivamente. Observa-se que é possível identificar as zonas originadas pela soldagem, o que impactou na diferença de microestrutura ao longo da solda.

Figura 8 – Micrografia do CP 2, seção transversal ao cordão de solda, após ataque metalográfico.



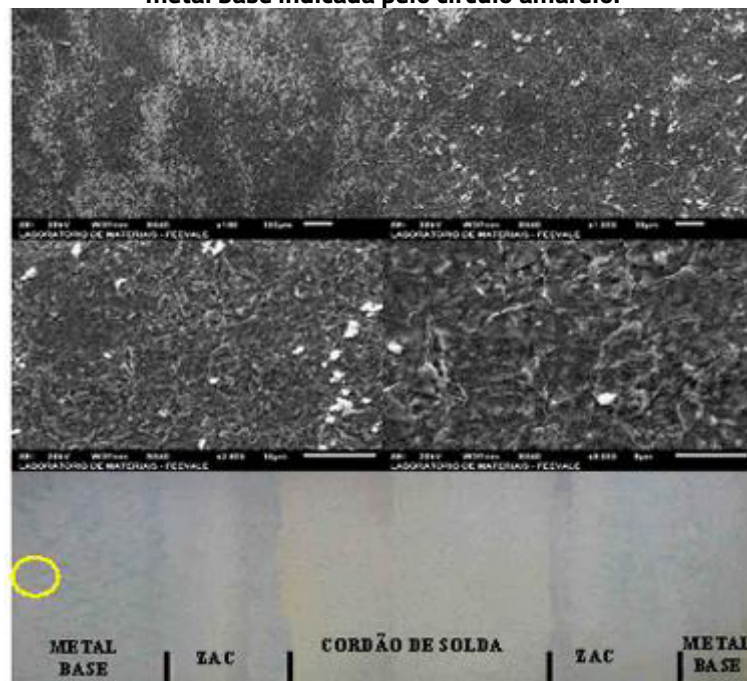
Fonte: Elaborado pelos autores.

4.3 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A Figura 9 mostra a microestrutura em uma região afastada da junta soldada, após ataque com Nital 5%. A região de análise na estrutura está sinalizada com um círculo amarelo na imagem inferior da Figura.

Na magnificação em 100x, duas áreas distintas aparecem na superfície da amostra. A área mais clara corresponde à área de mais ataque químico na amostra, onde se observa uma região contendo grãos bem definidos (magnificações 2.500x e 5.000x). Na região de análise encontra-se o metal de base, que não mostrou alterações nos grãos devido à temperatura da solda. Os grãos apresentam tamanho aproximado de 5 μm .

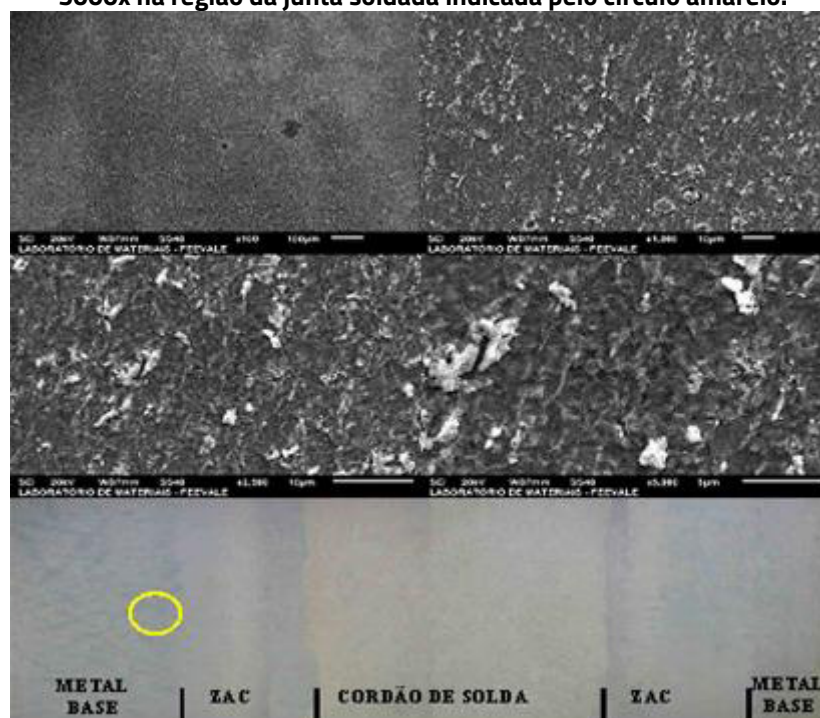
Figura 9 - CP 1, ataque com Nital 5% por 1 minuto. Aumentos de 100x, 1000x, 2500x e 5000x na região do metal base indicada pelo círculo amarelo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 10 mostra uma região do CP próxima à ZAC, conforme indicado pelo círculo amarelo.

Figura 10 - CP 1, ataque com Nital 5% por aproximadamente 60 segundos. Aumentos de 100x, 1000x, 2500x e 5000x na região da junta soldada indicada pelo círculo amarelo.

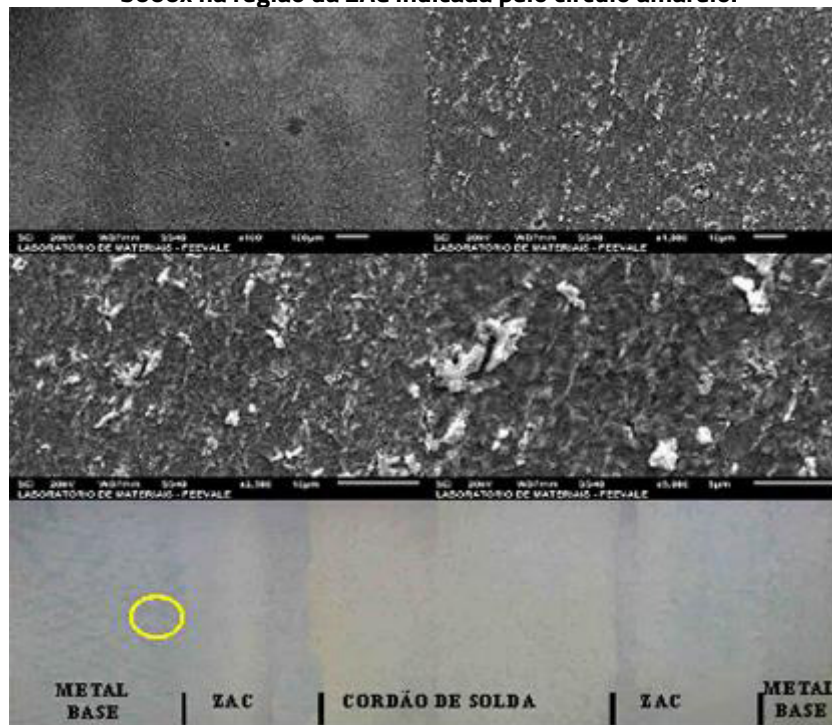


Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se que os grãos apresentam tamanho maior em comparação à amostra afastada da junta soldada (magnificações de 1.000x e 2.500x). Este comportamento já era esperado, uma vez que ocorre aumento de temperatura e resfriamento ao ar nessa região. Isso faz com que ocorra uma reorganização dos átomos na estrutura cristalina, minimizando possíveis tensões decorrentes do processo de fabricação da estrutura metálica.

A Figura 11 mostra a micrografia da amostra retirada da ZAC, junto ao cordão de solda.

Figura 11 - CP 1, ataque com Nital 5% por aproximadamente 1 minuto. Aumentos de 100x, 1000x, 2500x e 5000x na região da ZAC indicada pelo círculo amarelo.



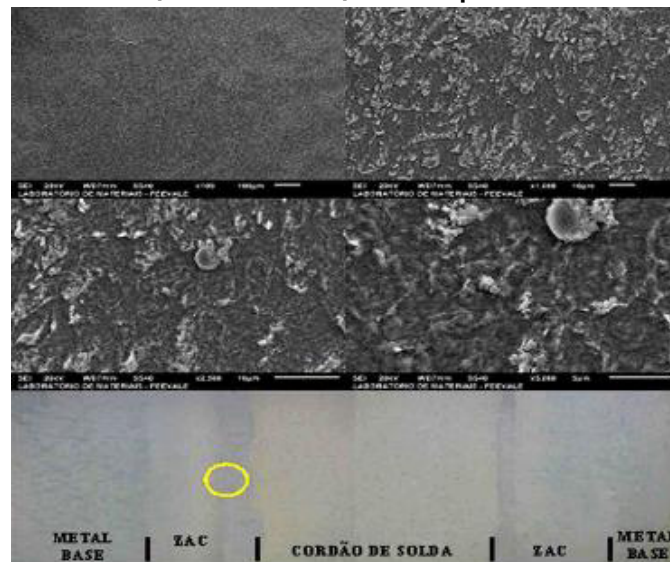
Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 12 mostra a microestrutura da região da zona fundida, ou seja, a área do cordão de solda que foi depositado para se obter a junta soldada.

Pode-se notar que em algumas regiões não é possível identificar a presença dos grãos com contornos bem definidos (magnificações de 1.000x e 2.500x). Observa-se que o grão apresenta tamanho maior em comparação às demais áreas analisadas.

Observa-se um aumento no tamanho do grão, para aproximadamente 10 µm. Isto indica que ele praticamente duplicou de tamanho com a solda.

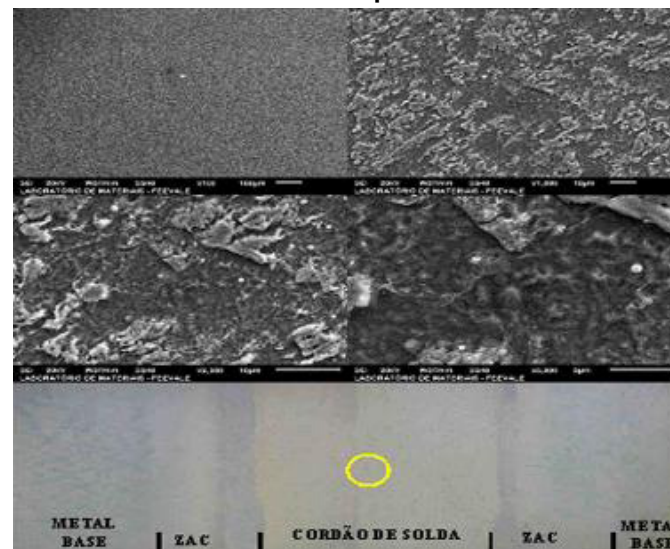
Figura 12 - CP 1, ataque com Nital 5% por 1 minuto. Aumentos de 100x, 1000x, 2500x e 5000x na região da zona fundida (cordão de solda) indicada pelo círculo amarelo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 13 mostra novamente a ZAC, mas no lado oposto ao cordão de solda.

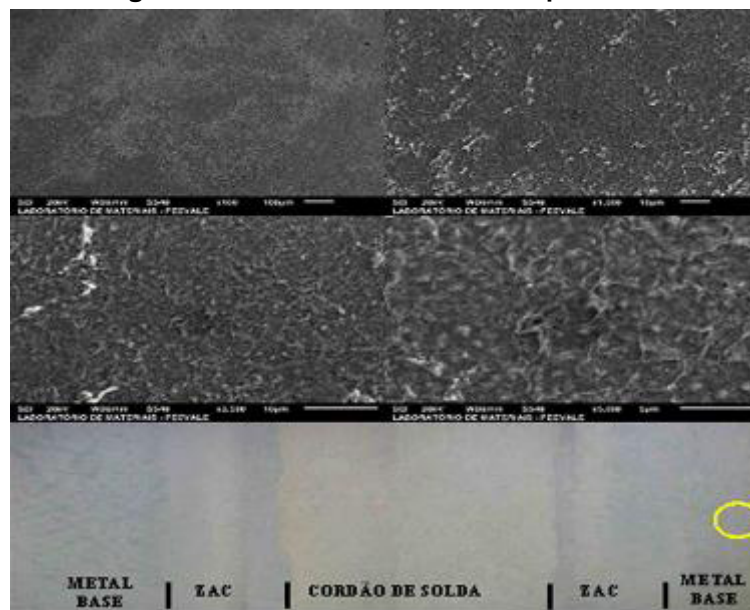
Figura 13 - CP 1, ataque com Nital 5% por 1 minuto. Aumentos de 100x, 1000x, 2500x e 5000x na região do cordão de solda indicada pelo círculo amarelo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Novamente observam-se grãos com contornos pouco definidos. A Figura 14 mostra a micrografia da amostra localizada na zona do metal de base, porém perto da ZAC. Observa-se que os grãos começam novamente a ter o seu tamanho normal e os contornos bem definidos em comparação a mesma amostra anterior. A variação de calor ao longo da peça não foi homogênea, o que levaria à formação de grãos de tamanhos variados ao longo da ZAC, porém com tamanhos maiores que o metal de base e menores que a área da solda.

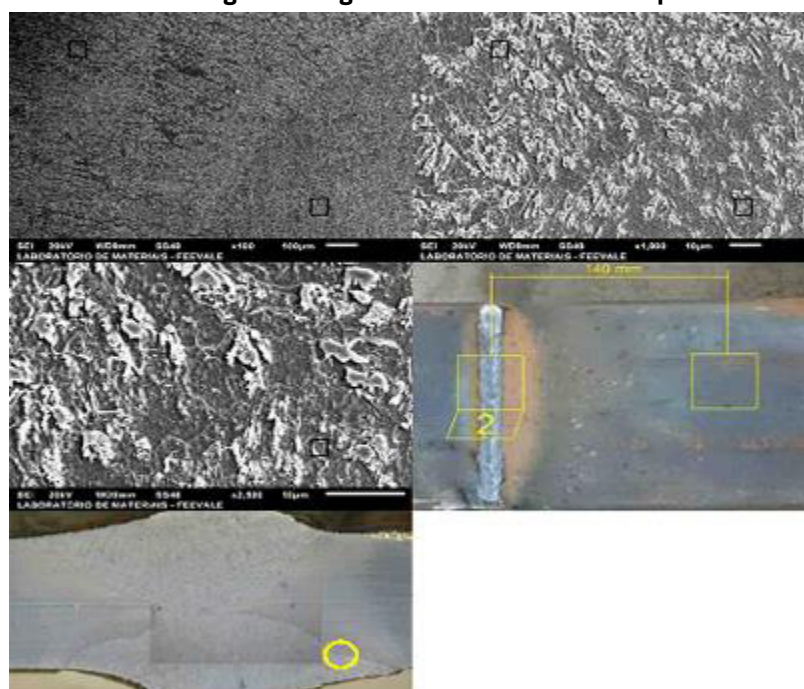
Figura 14 - CP 1, ataque com Nital 5% por aproximadamente 1 minuto. Aumentos de 100x, 1000x, 2500x e 5000x na região no final do metal base indicada pelo círculo amarelo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 15 mostra a interface entre o metal de adição na zona fundida (ZF) e a ZAC do segundo cordão de solda.

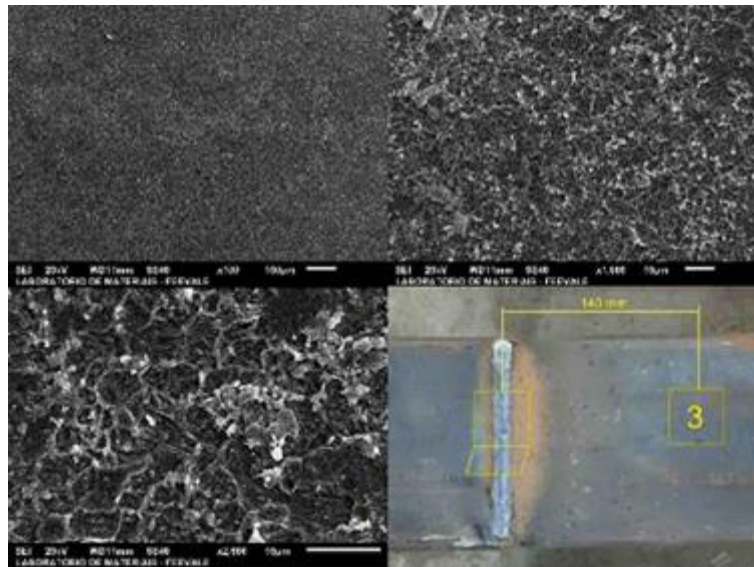
Figura 15 - CP 2, seção transversal do cordão de solda, interface entre material depositado (ZF) e ZAC. Aumentos de 1000x e 2500x na região do segundo cordão de solda. Ataque com Nital 5% por 1 minuto.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 15, é possível distinguir nitidamente a interface entre a ZF e a ZAC. Também se observam grãos bem definidos nas duas zonas, com grãos aparentemente maiores na ZF em comparação a ZAC. A Figura 16 mostra o CP 3, que está localizado a uma distância de 140 mm da zona da junta soldada.

**Figura 16 - CP 3, metal de base afastado 140 mm da junta soldada, ataque com Nital 5% por 1 minuto.
Aumentos de 100x, 1000x e 2500x.**



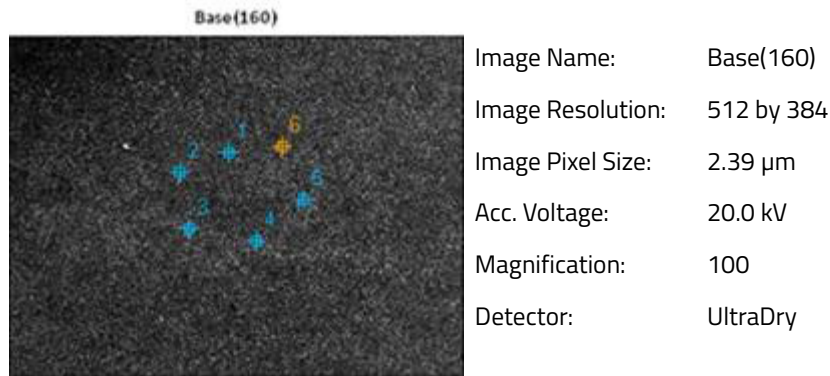
Fonte: Elaborado pelos autores.

Nesta imagem, os grãos apresentam-se uniformemente distribuídos. Conforme a análise termográfica, o material não sofreu interferência do calor gerado durante o processo de soldagem, confirmado pelo tamanho do grão, aproximadamente 5 µm.

4.4 ANÁLISE DE EDS

As imagens a seguir são análises de EDS. Serão indicados os elementos químicos encontrados em pontos específicos apontados nos corpos de prova. No CP 3, como mostra a Figura 17, observa-se que os valores de carbono variam entre 0,68 e 2,01% e os valores de silício entre 1,89 e 2,46%. Não foram encontrados valores para fósforo e enxofre. Como a análise de EDS é semi-quantitativa, a falta de fósforo e enxofre não é um indicativo de que esses elementos não fazem parte da composição química da amostra. Além disso, cabe salientar que os valores de 0,04% P e 0,05% S, Tabela 2, tratam-se de valores residuais de fabricação (SOUZA, 1989). A quantidade de manganês varia entre 1,66 e 2,50% e de ferro entre 92,6 e 95,38%.

Figura 17 - Análise de EDS do metal de base 140 mm afastado da junta soldada.



Fonte: Elaborado pelos autores.

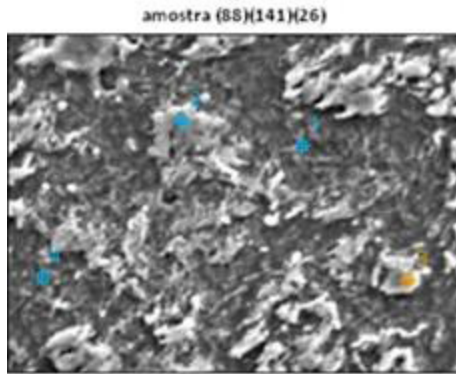
Tabela 2 – Composição química analisada por EDS para os pontos mostrados na micrografia da figura 16.

	Atom %					
	C-K	Si-K	P-K	S-K	Mn-K	Fe-K
Base(160)_pt1	1,62	1,89	0,00	0,00	2,22	94,27
Base(160)_pt2	0,68	1,98	0,00	0,00	1,97	95,38
Base(160)_pt3	0,92	2,13	0,00	0,00	2,50	92,60
Base(160)_pt4	2,01	2,46	0,00	0,00	1,66	93,87
Base(160)_pt5	1,74	1,99	0,00	0,00	2,03	94,24
Base(160)_pt6	1,91	2,08	0,00	0,00	1,77	94,24

Fonte: Elaborado pelos autores.

Análise realizada no CP 2 não indicou diferença significativa entre as partes brancas e escuras, Figura 18. Os valores mais altos foram obtidos para o carbono, seguido de oxigênio e ferro. Por tratar-se de aço, não era esperado um valor de ferro baixo e de carbono alto como o que foi registrado na análise de EDS (Tabela 3). Isto poderia ser um indicativo da presença de carbonetos e óxidos resultantes da escória gerada durante o processo. No entanto, como as duas regiões apresentaram resultados semelhantes, seria necessário mais estudo para confirmar esta hipótese.

Figura 18 - Análise de EDS do metal de adição (zona fundida).



amostra (88)(141)(26)
Image Name: amostra (88)(141)(26)
Image Resolution: 512 by 384
Image Pixel Size: 0.10 µm
Acc. Voltage: 20.0 kV
Magnification: 2500
Detector: UltraDry

Fonte: Elaborado pelos autores.

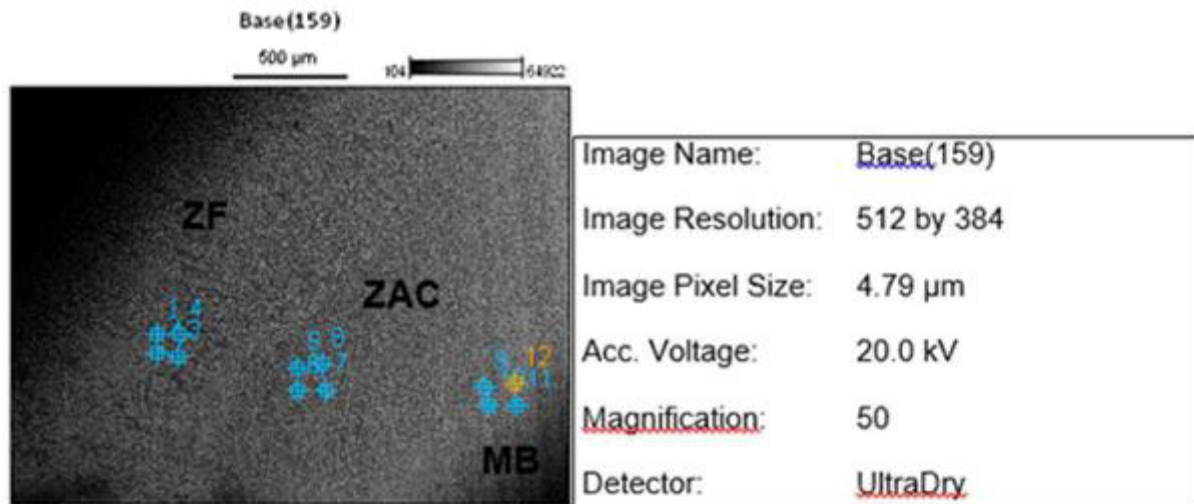
Tabela 3 – Composição química analisada por EDS para os pontos mostrados na micrografia da figura 17.

	Atom %						
	C-K	O-K	Si-K	P-K	S-K	Mn-K	Fe-K
amostra (88)(141)(26)_pt1	80.30	11.40	0.47	0.00	0.00	0.22	7.60
amostra (88)(141)(26)_pt2	82.02	10.53	0.30	0.00	0.00	0.11	7.02
amostra (88)(141)(26)_pt3	80.31	11.61	0.28	0.00	0.00	0.06	7.74
amostra (88)(141)(26)_pt4	81.81	10.68	0.14	0.00	0.00	0.26	7.12

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 19 mostra a análise de EDS do CP 2 e nela é possível fazer a distinção entre o metal de adição (ZF), ZAC e metal de base (MB). Foram analisados 4 pontos em cada zona da junta soldada (tabela 4).

Figura 19 - Análise EDS da junta soldada, metal de adição, zona afetada pelo calor e metal de base.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 4 – Composição química analisada por EDS para os pontos mostrados na micrografia da figura 18.

	Atom %						
	C-K	Si-K	P-K	S-K	Cr-K	Mn-K	Fe-K
Base(159)_pt1	2.45	0.00	0.00	0.00		2.07	95.48
Base(159)_pt2	2.09	0.00	0.00	0.00		1.41	92.39
Base(159)_pt3	1.33	0.80	0.00	0.00		1.88	96.00
Base(159)_pt4	2.66	0.00	0.00	0.00		1.46	92.04
Base(159)_pt5	22.20	6.90	0.00	0.00		2.44	68.46
Base(159)_pt6	19.98	4.52	0.00	0.00		2.08	73.42
Base(159)_pt7	20.44	6.74	0.00	0.00		4.18	68.65
Base(159)_pt8	24.75	4.95	0.00	0.00	9.21	0.98	60.11
Base(159)_pt9	18.72	0.00	0.00	0.00		6.39	74.89
Base(159)_pt10	23.58	2.83	0.00	0.00		0.61	72.98
Base(159)_pt11	7.92	1.95	0.00	0.00	10.61	0.00	79.51
Base(159)_pt12	15.34	6.39	0.00	0.00		0.00	78.27

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na zona do metal de adição (ZF) observa-se que os valores de carbono são baixos, entre 1,33 e 2,66%, quando comparados aos valores encontrados na ZAC, entre 19,98 e 24,75%, e no metal de base, entre 7,92 e 23,58%. Observa-se um aumento do percentual de carbono na ZAC em comparação às demais zonas. Sabe-se que o carbono, para valores acima do limite de solubilidade da ferrita, é de 0,25%, Tabela 2, apresenta cementita em sua composição, que é uma fase metaestável. Isto quer dizer que em condições adequadas, de tempo e temperatura, pode haver difusão de carbono e ferro a partir da cementita (SILVA, 2010; SILVA, 2014).

Com relação ao silício, percebe-se que ocorre uma variação entre as três zonas avaliadas, enquanto no metal de adição os valores variam entre 0 e 0,8%, na ZAC variou entre 4,52% e 6,90% e no metal de base entre 0 e 6,39%. Novamente, assim como o carbono, o valor do percentual de silício foi maior na ZAC. O silício apresenta a propriedade de grafitizar, fazendo baixar a solubilidade do carbono no ferro, ficando rejeitado como grafita. Dessa maneira, aços ao silício (com teor mais alto de silício, aproximadamente 2%) devem conter um teor baixo de carbono (abaixo de 0,1% C). No caso das amostras analisadas, o percentual de silício é inferior ao citado e o percentual de carbono é superior. Portanto, a presença de silício pode ser um indicativo do aumento da concentração de carbono na ZAC. Além disso, o silício promove o crescimento do grão, nos aços baixo carbono, em altas temperaturas (SOUZA, 1989).

Não foram encontrados valores significativos de fósforo e enxofre em nenhuma das três zonas analisadas. Os valores de manganês encontrados no metal de adição variam entre 1,41 e 2,07%, já na ZAC os valores encontrados estão entre 0,98% e 4,18% e no metal de base foram encontrados valores entre 0 e 6,33%. Observa-se que não existe variação considerável de manganês nas três áreas analisadas. O manganês atua como elemento de liga dissolvido na ferrita, o que proporciona propriedades de dureza, resistência mecânica e ductilidade. Por fim, as concentrações de ferro variaram 92,04 e 96% na zona do metal de adição, na ZAC a variação foi entre 60,11 e 73,42% e no metal de base foram encontrados valores entre 72,98 e 79,51%, o que já era esperado, uma vez que se pode supor que houve difusão de carbono e silício na ZAC (SOUZA, 1989).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises termográficas mostraram que existe variação de temperatura ao longo da estrutura soldada. A área afetada pelo calor mostrou valor máximo de temperatura de 357 °C, o qual ficou limitado pela faixa de temperatura da câmara termográfica. No entanto, esta análise permitiu visualizar a área afetada pelo calor, que compreendeu uma área de 30 mm para cada lado do cordão de solda. Com isso, foi possível a retirada dos corpos de prova para análise de microscopia ótica.

Por meio das análises de microscopia ótica foi possível identificar as zonas de metal de base, ZAC e o cordão de solda. Nestas imagens identificam-se nitidamente os dois cordões, bem como as respectivas dimensões, que foram de 12,6 e 10,5 mm. Estas análises possibilitaram uma identificação mais precisa da região a ser analisada pelo MEV. A análise do MEV confirmou o crescimento do grão do material conforme a sua localização na região da junta soldada, com tamanhos que variaram entre, aproximadamente, 5 μ m, no CP da região que não foi afetada pelo calor, até, aproximadamente, 10 μ m, na região do cordão de solda.

Por meio das análises de EDS foi possível evidenciar que existe uma diferença de composição química para cada zona da região soldada, entre elas a ZF, a ZAC e o metal de base, com variações mais significativas dos elementos carbono, silício e oxigênio. Análises do CP 2, em vista de topo no cordão de solda, mostraram valores elevados de carbono e oxigênio, o que foi atribuído provavelmente à presença de óxidos e carbonetos oriundos da escória gerada no processo, já na seção transversal, observa-se um aumento do percentual de carbono na ZAC em comparação às demais zonas, o que foi atribuído provavelmente à difusão de carbono oriundo da cementita. Somado a isso, com relação ao silício, percebe-se que ocorreu uma variação entre as três zonas avaliadas, novamente com maior percentual na ZAC. Esse comportamento pode ser um indicativo da propriedade grafitizante que o silício apresenta, fazendo baixar a solubilidade do carbono no ferro, ficando rejeitado como grafita, o que poderia explicar também o aumento de percentual de carbono observado nesta região.

REFERÊNCIAS

COSTA, Thonson Ferreira et al. Avaliação de processos MIG/MAG curto-circuito convencional e controlado para a soldagem de dutos de aço carbono em passe único. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, n. 4, p. 356-368, dez. 2012.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 477, 1996.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, p. 362, 2013.

MOURÃO, Marcelo Breda; YOKOJI, Akira; MALYNOWSKYJ, Antonio. **Introdução à Siderurgia**. 2. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2011, 428 p.

NOGUEIRA, Romário Mauricio Urbanetto et al. Comparação da Estabilidade do Arco e da Variabilidade da Geometria de Soldas obtidas pelos Processos MIG/MAG e Arame Tubular. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 2, p.191-204, 2015.

PANNONI, Fabio Domingos. **Manual de Construção em Aço**: Ligações em Estruturas Metálicas. 4. ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil / Centro Brasileiro da Construção em Aço, p. 84, 2011.

PARDAL, Juan Manuel et al. Caracterização e avaliação da resistência à corrosão na soldagem de tubulação de aço inoxidável duplex UNS S31803 pelo processo a arco submerso. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 4, p. 310-321, 2011.

PEREIRA, Aldo S. et al. Avaliação da perfuração na soldagem em operação pelo processo MIG/MAG de dutos de alta resistência e baixa espessura. **Soldagem & Inspeção**, v. 18, n. 3, p. 235-244, 2013.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço**: Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, p. 357, 2014.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, p. 646, 2010.

SILVA, Marcos V. F. et al. Carbon steel corrosion: an everyday approach for chemistry teaching. **Química Nova**, v. 38, n. 2, p. 293-296, dez. 2014. GN1 Genesis Network.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição química dos aços**. São Paulo: Edgard Blücher, p. 134, 1989.

TATAGIBA, Luiz Claudio Soares et al. Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, n. 3, p. 218-228, 2012.

VEIGA, Emílio. **Processo de Soldagem MIG/MAG**. São Paulo: Globus, p. 155, 2011.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem**: Processos e Metalurgia. São Paulo: Blucher, 1992. 494 p.