CAPÍTULO 1

ANÁLISE METALOGRÁFICA DE JUNTAS SOLDADAS COM ELETRODOS E6013 E E7018 EM AÇO DE BAIXO CARBONO

Data de submissão: 06/01/2025 *Data de aceite: 05/03/2025*

Rafael Leal Tarloto
Departamento de Engenharia Mecânica – Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

Bruno Oliveira
Departamento de Engenharia Mecânica – Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

Kamira Miksza Fragoso
Departamento de Engenharia Mecânica – Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

Gustavo José Correa Gonçalves
Departamento de Engenharia Mecânica – Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

Fernando Sabino Fonteque Ribeiro
Departamento de Engenharia Mecânica – Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

RESUMO: A evolução das tecnologias de soldagem e a escolha criteriosa dos consumíveis desempenham papéis fundamentais na obtenção de qualidade e eficiência nos processos industriais. Este estudo realizou uma análise comparativa de aspectos macro e micrográficos de juntas topo em "V" soldadas com três passes, utilizando o processo de soldagem com eletrodo revestido. Foram empregados os eletrodos E6013 e E7018, ambos com diâmetro de 2,5 mm, utilizando parâmetros elétricos pré-definidos, em corpos de prova de aço A36 com espessura de 6,35 mm. As análises revelaram diferenças no tamanho dos grãos e na formação da microestrutura das regiões analisadas. Em ambos os corpos de prova, foi identificada a presença de falta de penetração no passe raiz, bem como desalinhamento nas peças soldadas, em especial na junta soldada com eletrodo E7018. Em ambas as juntas soldadas foi possível observar a presença das zonas termicamente afetadas, com maior nitidez na junta soldada com o eletrodo E6013. Os resultados ressaltam a importância do controle rigoroso dos parâmetros de soldagem e da preparação meticulosa das peças, demonstrando que erros no preparo das peças a serem soldadas podem comprometer a aplicação segura do componente soldado. O estudo reforça a necessidade do aprimoramento contínuo dos profissionais de soldagem, visando atender às demandas tecnológicas e garantir a qualidade dos componentes soldados.

PALAVRAS-CHAVE: Zona Termicamente Afetada; Eletrodos E6013 e E7018; Metalografia.

METALLOGRAPHIC ANALYSIS OF WELDED JOINTS USING E6013 AND E7018 ELECTRODES IN LOW CARBON STEEL

ABSTRACT: The evolution of welding technologies and the careful selection of consumables play crucial roles in achieving quality and efficiency in industrial processes. This study presents a comparative analysis of the macro and microstructural aspects of “V” butt joints welded with three passes, using the shielded metal arc welding process. The electrodes E6013 and E7018, both with a 2.5 mm diameter, were used, and predefined electrical parameters were applied to A36 steel test specimens with a thickness of 6.35 mm.The analyses revealed differences in grain size and microstructure formation in the analyzed regions. Both specimens showed the presence of lack of penetration in the root pass, as well as misalignment in the welded pieces, especially in the joint welded with the E7018 electrode. Thermally affected zones were observed in both welded joints, with greater clarity in the joint welded with the E6013 electrode.The results highlight the importance of strict control of welding parameters and meticulous preparation of the workpieces, demonstrating that errors in the preparation of the pieces to be welded can compromise the safe application of the welded component. The study emphasizes the need for continuous improvement of welding professionals to meet technological demands and ensure the quality of welded components.
KEYWORDS: Thermally Affected Zone; E6013 and E7018 Electrodes; Metallograph

1 | INTRODUÇÃO

A soldagem com eletrodos teve início no princípio do século XX, com a utilização de arames nus para cercas, ligadas a rede elétrica. Observou-se que arames oxidados, ou cobertos com cal, proporcionavam melhor estabilidade de arco, tendo-se adotado o eletrodo ácido ainda no começo da primeira década (Wainer et al., 2004)

O eletrodo revestido consiste em um arame metálico (alma), que conduz a corrente elétrica e fornece metal de adição para o preenchimento da junta, recoberta por um revestimento. Esse revestimento é uma mistura de diferentes materiais fusíveis, que tem por função iniciar e estabilizar o arco elétrico, proteger a poça de fusão e o metal de solda da atmosfera, ajustar a composição química do cordão e eliminar as impurezas do metal de solda pela formação de escória, garantindo as propriedades mecânicas e metalúrgicas da junta soldada. O processo é de baixo custo, versátil e de fácil aprendizagem, entretanto apresenta baixa produtividade pela necessidade de constante troca de consumível.

De acordo com Wainer et al. (2004), a corrente de soldagem é o parâmetro determinante na taxa de deposição para dadas condições fixas de soldagem, existe uma relação direta e proporcional entre as duas variáveis, sendo que está uma consideração de extrema importância no que diz respeito à produtividade.

O único material consumível desse processo de soldagem é o eletrodo revestido. Conforme aponta Marques (2005), o eletrodo é constituído por uma vareta metálica, a

alma, com diâmetro entre 1,5 e 8 mm e comprimento entre 23 e 45 cm, recoberta por uma camada de fluxo, o revestimento. Os consumíveis aplicados no Brasil devem ser certificados por Organismo Certificador de Produtos (O.C.P.), conforme N-1859 (Cunha, 2016). Esse órgão no Brasil é a Fundação Brasileira de Tecnologia de Soldagem (F.B.T.S.), segundo as normas de qualificação AWS (Silva et al., 2019). Este sistema, normalizado pela *American Welding Society*, é na atualidade, o mais difundindo mundialmente, sendo este também utilizado no nosso país. A classificação consiste no prefixo E, designando eletrodo revestido, seguida por um conjunto de dígitos indicativos.

Já os revestimentos consistem em misturas de compostos minerais ou orgânicos, aos quais são adicionados outros elementos, como aglomerantes com finalidades específicas como (Kobayashi, 1987):

- Estabilização do arco;
- Formação de gases protetores da poça;
- Formação de escória e atuação como agentes fluxantes (desoxidantes);
- Adição de componentes e ligas metálicas ao depósito;
- Melhorar as propriedades do revestimento.

Dentre as combinações de designações mais comuns para eletrodos revestidos, Wainer et al. (2004) sintetiza as principais características de aplicação na Tabela 1:

Classificação	Posições (1)	Corrente	Propriedades Mecânicas (2)			Revestimentos/Características
			LR (3)	LE (4)	λ (5)	
E-6010	P, V, S, H	CC+	430	340	22	Altamente celulósico, com silicato de sódio. Alta penetração. Aspecto superficial pobre. Uso geral em tanques, tubulações, navios, etc.
E-6011	P, V, S, H	CC+, CA	430	340	22	Altamente celulósico, com silicato de potássio. Características semelhantes ao E-6010, com penetração inferior.
E-6012	P, V, S, H	CC-, CA	460	380	17	Rutílico com silicato de sódio. Média penetração, densa escória, bom aspecto superficial. Uso geral.
E-6013	P, V, S, H	CC+, CC-, CA	460	380	17	Rutílico com silicato de potássio. Semelhante ao E-6012, com penetração tendendo a ser inferior. Em pequenos diâmetros é especificamente recomendado para chapas finas.
E-6020	HF	CC-, CA	430	340	22	À base de óxido de ferro, com compostos de manganês e silício. Penetração média/alta. Aspecto superficial razoável. Uso em vasos de pressão, bases de máquinas e estruturas.

E-6022	P	CC-, CC+, CA	460	NE	NE	Semelhante ao E-6020, indicado para soldas monopasse, com aspecto superficial inferior.
E-6027	P, HF	CC-, CA	430	340	22	Semelhante ao E-6020, com adição de pó de ferro, média penetração, bom aspecto superficial, qualidade radiográfica levemente inferior. Uso em secções espessas.
E-7014	P, V, S, H	CC-, CC+, CA	500	420	17	Semelhante ao E-6012 e E-6013, com adição de pó de ferro.
E-7015	P, V, S, H	CC+	500	420	22	Básico com silicato de sódio. Moderada penetração, aspecto razoável para pobre, dependendo da qualidade do metal base. Requer maior habilidade. Uso onde propriedades mecânicas e qualidade do depósito são essenciais.
E-7016	P, V, S, H	CC+, CA	500	420	22	Semelhante ao E-7015, com silicato de potássio e pó de ferro
E-7018	P, V, S, H	CC+, CA	500	420	22	Semelhante do E-7016, com alta adição de pó de ferro.
E-7024	P, HF	CC-, CC+, CA	500	420	17	Semelhante ao E-6012 e E-6013, com grande adição de pó de ferro. Alta taxa de deposição; uso geralmente em soldas de filete.
E-7027	P, HF	CC-, CA	500	420	22	Semelhante ao E-6027. Uso onde propriedades mecânicas superiores são necessárias.
E-7028	P, HF	CC+, CA	500	420	22	Semelhante ao E-7018, com maior adição de pó de ferro.
E-7048	P, V, S, H, VD	CC+, CA	500	420	22	Semelhante ao E-7018. Uso especificamente para soldagem na posição vertical descendente.

Tabela 1 – Descrição dos consumíveis para aço carbono segundo AWS.

Fonte: Wainer et al. (2004)

Notas:

(1) P= Plana, V= Vertical, S= Sobrecabeça, H= Horizontal, HF= Horizontal (filetes), VD= Vertical descendente.

(2) NE= Não especificado;

(3) Limite de resistência, MPa;

(4) Limite de elasticidade, MPa;

(5) Alongamento %.

O campo de aplicação dos eletrodos revestidos é na atualidade o mais vasto entre todos os processos de soldagem pela sua simplicidade, facilidade de acesso e baixo custo, a variedade de procedimentos aplicáveis é também ampla, indo desde os mais simples serviços de ponteamento até o mais rígido controle na fabricação de vasos de pressão. Os corretos manuseio e manutenção dos consumíveis podem ser fundamentais para a sanidade da junta. Destaca-se, que apesar de correta aplicação do procedimento de

soldagem qualificado ser um fator primordial para uma boa qualidade da junta, grande parte das descontinuidades observadas é devido à manutenção inadequada dos consumíveis (Machado, 1996).

O eletrodo E6013 é amplamente utilizado devido à sua versatilidade e facilidade de manuseio, contém um grande percentual de dióxido de titânio (rutilo -TiO_2) em seu revestimento, são projetados para ter um arco de baixa penetração, permitindo que os metais de pequena espessura sejam soldados sem furar a peça. Já o eletrodo E7018, é a versão mais moderna do eletrodo de baixo hidrogênio. A adição de quantidades consideráveis de pó de ferro ao revestimento resulta num arco mais suave e com menos respingos, esse moderno balanço de ingredientes do revestimento resulta numa grande melhoria na estabilidade do arco, na direção do arco e na facilidade de manuseio em todas as posições (Marques, 2005).

Ainda segundo Wainer et al. (2004), a maioria dos processos de soldagem utiliza o calor como principal fonte de energia, sendo necessário supri-lo à poça de fusão em quantidade e intensidade suficientes, de modo a garantir a execução de uma junta soldada de boa qualidade. O calor é, portanto, elemento essencial à execução de uniões soldadas, mas pode, por outro lado, representar fonte potencial de problemas devido à sua influência direta nas transformações metalúrgicas e nos fenômenos mecânicos que ocorrem na zona de solda.

A zona termicamente afetada (Z.T.A.), é a região compreendida entre a zona fundida e o metal base não afetado termicamente. Ela representa a região da solda que não se fundiu durante a soldagem, porém devido as altas temperaturas sofre modificações em suas propriedades mecânicas e metalúrgicas. Essas modificações resultam em diferenças no valor da dureza, tamanho do grão e resistência mecânica, presentes nesta região.

O artigo complementa o estudo “Macrografia de juntas soldadas com eletrodos E6013 e E7018 em aços de baixo carbono”, apresentado no Congresso de Iniciação Científica do Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos, que analisa experimentalmente a influência dos eletrodos E6013 e E7018 na formação da Zona Termicamente Afetada (ZTA) em aços A36. A inspeção macroscópica das seções transversais dos corpos de prova, associada ao uso de microscopia, permite identificar tanto a morfologia dos passes de solda quanto eventuais defeitos que podem comprometer a resistência mecânica da junta. Isto posto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar as juntas soldadas de aço A36 por meio da macrografia e micrografia. O procedimento de soldagem por eletrodo revestido foi aplicado com eletrodos E6013 e E7018.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho, foi realizada uma comparação da zona termicamente afetada (ZTA), utilizando eletrodos E6013 e E7018, ambos do mesmo fabricante. Para a soldagem,

foram utilizados corpos de prova em aço carbono A 36, de aplicação comum na indústria. O estudo busca analisar as diferenças no comportamento da ZTA com o uso desses dois eletrodos, considerando sua influência nas propriedades mecânicas e microestruturais das juntas soldadas.

Os eletrodos revestidos E6013 e E7018 desempenham um papel crucial na indústria. A utilização desses dois tipos de eletrodo permite atender às diferentes demandas de soldagem, garantindo durabilidade, resistência e confiabilidade nas operações industriais.

A primeira etapa do estudo foi a preparação dos corpos de prova. Para tal, foi utilizado uma esmerilhadeira de 4 polegadas para cortar as peças e preparar a junta de topo com chanfro em "V" de 60º, com afastamento de 1mm. Inicialmente, as amostras foram fixadas com esquadros magnéticos para que fosse realizado o ponteamento em suas extremidades. Os corpos de prova possuíam 150 mm de comprimento, 100 mm de largura e 6,35 mm de espessura, conforme a Figura 1:

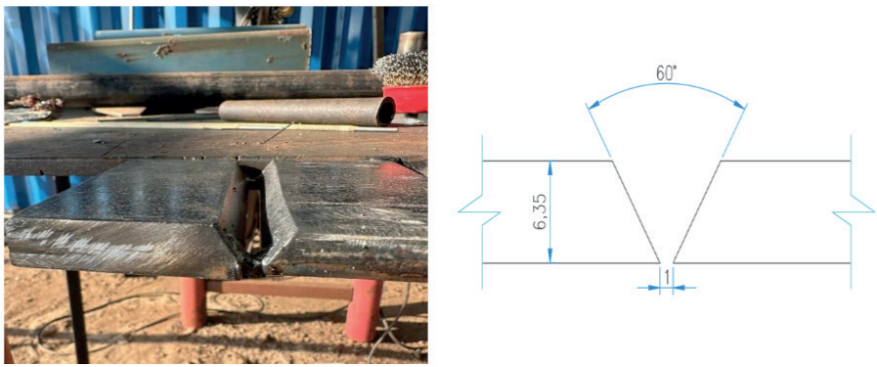


Figura 1: Exemplo de junta de corpo de prova

Fonte: Autor

Em seguida foi aplicado um passe de raiz em cada corpo de prova, utilizando uma corrente média de 100 ampères, utilizando a técnica de soldagem - puxando, seguido por um passe intermediário e um passe de acabamento.

Após corte em uma cortadora metalográfica, os corpos de provas foram embutidos, utilizando baquelite em pó na embutidora, como apresentado na Figura 2. Em sequência foram lixados até a obtenção da qualidade desejada. Esse processo de lixamento contou com sete lixas d'água, na sequência #180, #220, #320, #400, #600, #800 até a lixa #1200. Em sequência, o polimento foi realizado em politriz rotativa, utilizando um pano de polimento metalográfico e alumina em suspensão (1 μm).

Figura 2: Corpos de provas embutidos

Fonte: Autores

Dessa maneira, foi possível avançar para a próxima etapa do processo, o ataque químico, o qual foi realizado individualmente em cada amostra, utilizando-se solução de Nital a 4%, por meio de imersão por 10 segundos. Esse procedimento permitiu a corrosão seletiva das diferentes fases metálicas, possibilitando uma visualização da zona termicamente afetada (ZTA).

Ressalta-se que para melhor evidência das regiões estudadas fez-se necessário a utilização da lupa com ampliações de 10x, da marca OPTON, e do microscópio modelo IM100I da marca Fortel com capacidade de ampliação de até 500x presente no Laboratório de Metalografia do Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos. A utilização desses equipamentos desempenha um papel fundamental na análise metalográfica, tornando-se uma ferramenta essencial para engenheiros e técnico mecânicos. Este dispositivo, conhecido por sua capacidade de ampliação, oferece vantagens significativas na inspeção detalhada das regiões soldadas, podendo identificar e avaliar com precisão diferentes tipos de defeitos de soldagem, como trincas, descontinuidades, porosidade, entre outros.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise detalhada das regiões soldadas é essencial para avaliar a qualidade e integridade das juntas, especialmente em processos que utilizam eletrodos revestidos como o E6013 e o E7018. Na soldagem realizada com o eletrodo E6013, apresentada na Figura 3, foi possível identificar claramente o contorno do passe intermediário e do passe de acabamento, gerando um cordão de aproximadamente 9 mm de largura. A junta soldada apresentou um leve desnivelamento vertical, indicando uma falha operacional, podendo ter sido causado por um alinhamento incorreto durante o posicionamento das amostras para soldagem. Ademais, é possível observar a presença de uma região inferior

com falta de fusão. Na região analisada, o passe de raiz apresentou falta de fusão, como indicado na Figura 3. Apesar da soldagem em topo com junta em V ter sido aplicada, defeitos operacionais podem ter sido decisivos para a falta de fusão no passe raiz. O passe de acabamento resultou em uma área convexa na superfície. De acordo com a Federação Brasileira de Tecnologia de Soldagem (FBTS), a medição da altura deve ser realizada junto a padrões pré-estabelecidos. Apesar desta constatação, não foram realizadas avaliações quantitativas da geometria do cordão em vistas a gerar maior foco na metalurgia da soldagem e nos possíveis defeitos operacionais observados.

Em relação à zona termicamente afetada (ZTA), observou-se uma estreita faixa correspondente a essa região, indicando que o gradiente de temperatura não foi suficientemente elevado para causar alterações microestruturais significativas no material base. Isso sugere que os parâmetros de soldagem, como corrente e velocidade de avanço, foram adequadamente controlados, minimizando os efeitos térmicos na peça.

Contudo, a principal preocupação em termos de integridade estrutural reside na falta de fusão localizada na região inferior, a qual pode comprometer a resistência da junta soldada a longo prazo, especialmente em condições de carregamento cíclico ou fadiga. Esses resultados ressaltam a importância de se realizar uma avaliação rigorosa da qualidade da soldagem, principalmente no que se refere ao alinhamento das peças e à detecção precoce de defeitos como trincas, que podem comprometer a durabilidade da estrutura.

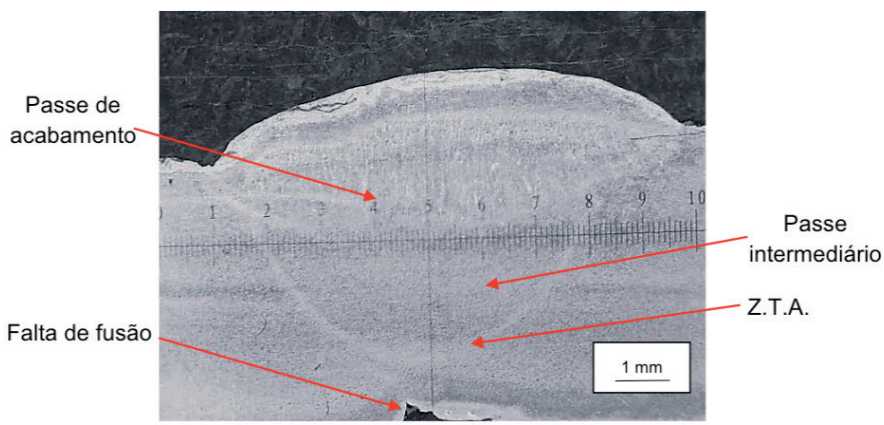


Figura 3: Macrografia soldagem E6013

Fonte: Autor

No corpo de prova soldado com o eletrodo E7018, conforme ilustrado na Figura 4, foram observados desnivelamentos verticais no cordão de solda e no alinhamento da junta soldada. Tais defeitos podem estar associadas à baixa corrente de soldagem, a técnica de deposição (puxando) além de falhas operacionais durante o ponteamento e execução da soldagem. A análise macrográfica revelou a zona termicamente afetada (ZTA) do passe

raiz, passe intermediário e do passe de acabamento, sendo ainda observado um passe de acabamento com largura média de 1,2 mm.

A ausência de defeitos como inclusões, porosidades e mordeduras sugere que os parâmetros de soldagem foram bem determinados, resultado em uma microestrutura adequada para a soldagem com ambos os eletrodos. No entanto, a presença de falta de fusão exacerbada pela falta de técnica na preparação da junta aponta para uma potencial fragilidade mecânica que pode comprometer a integridade estrutural do componente sob condições de serviço. Isso destaca a necessidade de uma preparação meticulosa e um alinhamento preciso das peças para minimizar o risco de falhas prematuras. Os resultados obtidos reforçam a importância de um controle rigoroso dos parâmetros de soldagem e da precisão na montagem das peças, visando garantir a qualidade da junta soldada e assegurar a durabilidade do componente em aplicações reais. A análise dos resultados evidencia a necessidade de ajustes na técnicas de preparação da junta para evitar comprometimentos estruturais e promover a integridade das soldagens.

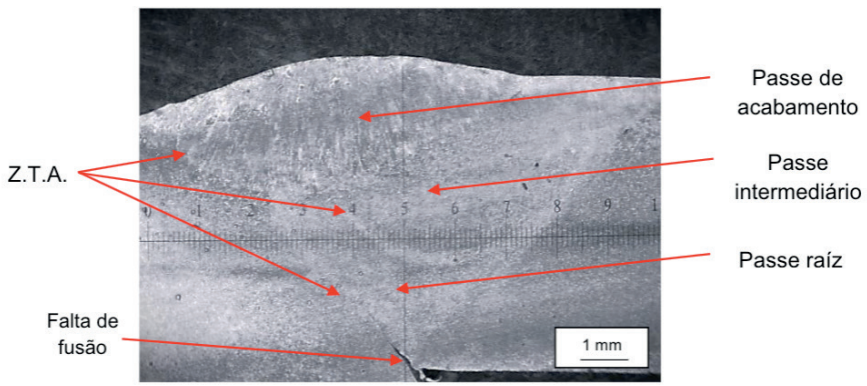
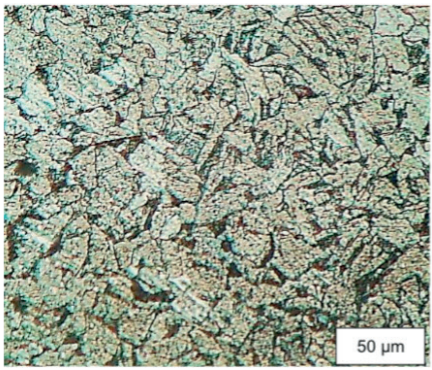


Figura 4: Macrografia soldagem E7018

Fonte: Autor

A análise micrográfica apresentada na Figura 5 foi realizada na zona fundida das juntas soldadas, onde se observaram variações significativas no tamanho dos grãos, decorrentes do gradiente térmico imposto durante o processo de soldagem. Essa diferença no tamanho de grão está diretamente relacionada ao tempo de permanência e à temperatura máxima atingida na zona fundida, resultando em uma microestrutura heterogênea. Além disso, foi observada uma maior concentração de impurezas intersticiais na Figura 5A, associada a maior presença de perlita ($\alpha+Fe_3C$) na fase hipoeutetóide.



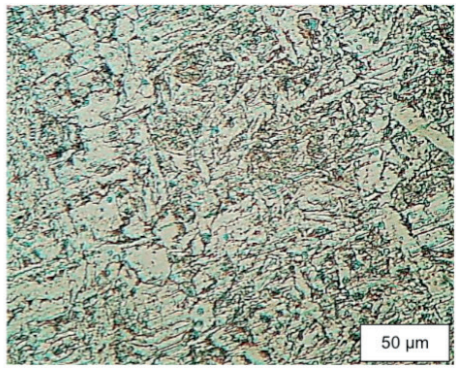


Figura 5 (A): Junta E6013

Figura 5 (B): Junta E7018

Fonte: Autor

Na Figura 5B, que apresenta a microestrutura da junta soldada utilizando o eletrodo E7018, observa-se maior presença de ferrita. Esse aumento na fração de ferrita é atribuído à composição do eletrodo, que contém aproximadamente 30% de pó de ferro. A adição de pó de ferro no eletrodo E7018, apesar de reduzir a resistência mecânica ao impacto da junta soldada, melhora as características operacionais do eletrodo, reduzindo salpicos e melhorando a abertura do arco (Farias e Scotti, 1986). Ademais, Farias e Scotti (1986) mostraram experimentalmente a melhor a estabilização do arco elétrico durante o processo de soldagem na presença de eletrodos básicos com maior percentual de pós de ferro, como o E7018, sendo essa característica relacionada com seu baixo potencial de ionização.

4 | CONCLUSÃO

A comparação entre os eletrodos E6013 e E7018, aplicados em corpos de prova proporcionou uma análise detalhada das zonas termicamente afetada (ZTA) e das características das juntas soldadas . Os resultados demonstram que ambos os eletrodos apresentam vantagens e desafios específicos em termos de aplicação industrial.

A junta soldada com eletrodo E6013 exibiu de maneira mais clara a ZTA dos passes intermediários e raiz. Em complemento a micrografia da zona fundida desta região evidenciou a maior presença de perlita e grãos maiores. A observação da junta soldada com eletrodo E7018 permitiu a identificação da ZTA, com menor nitidez a junta anterior. A microestrutura desta junta é predominantemente ferrítica. Para ambos os casos, foram observados defeitos de soldagem como desalinhamento e falta de penetração do passe raiz.

Essas observações reforçam a importância da seleção criteriosa de eletrodos e dos parâmetros de soldagem, bem como atenção adequada aos procedimentos de preparo e alinhamento da junta a ser soldada.

Portanto, o estudo destaca a necessidade de aprimoramento contínuo dos profissionais de soldagem, visando a aplicação de técnicas e tecnologias adequadas ao procedimento, a fim de atender às exigências crescentes de qualidade e eficiência na fabricação de competentes mecânicos. A adoção de rigorosos controles operacionais e de inspeção, especialmente no que tange à preparação e à precisão da soldagem, é essencial para assegurar que os processos industriais mantenham a confiabilidade e a segurança exigidas pelos padrões técnicos atuais.

REFERÊNCIAS

CUNHA, Henrique Miguel. Caracterização de juntas soldadas de Aços Carbono e Aços Inoxidáveis utilizando arame AWS E309L T1-1. 2016.

FARIAS, Jesualdo Pereira; SCOTTI, Américo. Influência da composição do revestimento na estabilidade de eletrodos básicos. **Revista Tecnologia**, v. 7, n. 1, 1986.

KOBAYASHI, Yukio et al. Influência da composição do revestimento de eletrodos básicos sobre as características econômicas e operacionais. 1987.

MACHADO, Ivan Guerra. Soldagem & técnicas conexas: processos. 1996.

MARQUES, Paulo Villani. Soldagem-fundamentos e tecnologia. Editora UFMG, 2005.

RODRIGUES, Clóvis; CERSOSIMO, Arno Giuseppe. Soldagem na Indústria do Petróleo. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2022.

SILVA, Ana Carla S. et al. Aplicação da metodologia para qualificação de procedimentos de soldagem de tubulações industriais conforme parâmetros dos códigos ASME B31. 3 e ASME SECTION IX. Soldagem & Inspeção, v. 24, p. e2423, 2019.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; DE MELLO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia, livro, Ed. Edgar Blucher ltda., 4ª reimpressão, p. 1, 2004.