

AValiação DA SOLDAGEM DE TUBOS API X 65 COM PASSE DE RAIZ COM ELETRODOS DE CLASSIFICAÇÃO E 6010

Data de aceite: 02/06/2023

Luciano dos Santos Belo

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGEM) – IFBA e TPT de Obras na Companhia de Gás da Bahia – BAHIAGAS.

Ivan Costa da Silva

Professor Doutor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGEM) - IFBA

Carlos Augusto de Souza

Gerente de Terminais de Dutos Bahia na TRANSPETRO – Petrobras Transporte S.A. e professor Adjunto do SENAI CIMATEC

ABSTRACT: Pipeline infrastructure is fundamental in the distribution of natural gas, playing a vital role in the energy and industrial sectors. The selection of welding procedures receives meticulous attention, being crucial for the safety and integrity of the structures. Professionals face the challenge of technical standardization, often due to the absence of clear national guidelines, necessitating recourse to the American API 1104 code. This work, which is part of

an ongoing master's research, investigates the feasibility of using E 6010 electrodes for the root pass in API X65 pipes, utilizing the procedure qualification methodology of the API 1104 standard. The tests conducted so far, including tensile tests, face and root bending, and nick-break tests, confirm the hypotheses raised, pointing to the technique as an economical alternative to E 8010-P1, a result that will need to be validated after the completion of the master's research, with the execution of final tests, including Charpy-V, Vickers hardness, macrographic analyses, and studies on other material thickness ranges, in addition to an extensive review of American, Brazilian, and international standards. This effort seeks to validate the use of the E 6010 electrode, meeting all applicable technical and regulatory requirements. The preliminary results already demonstrate efficiency, safety, and potential cost reduction for the oil and gas sector, especially in the context of the Bahiagás Southwest Gas project, which aims for operational efficiency and sustainability.

KEYWORDS: Gas Pipelines, API X65 Welding, Coated Electrode, Standardization.

1. INTRODUÇÃO

A descoberta de fontes de combustíveis gasosos aliada ao crescimento da demanda energética no país requerem uma melhoria na infraestrutura da rede de fornecimento dos gases. O crescente emprego do gás natural em vários setores, do residencial ao industrial nas cidades brasileiras, vem consolidando-o como uma das principais matrizes energéticas do país (Imaniche, Belderrain e Senne, 2021). A construção de gasodutos requer rigoroso controle técnico, especialmente na escolha dos procedimentos de soldagem, fundamentais para garantir a segurança e a integridade das estruturas. Neste contexto, surge um desafio significativo relacionado à normatização técnica para decisões de soldagem. A falta de uma norma nacional que forneça diretrizes claras para essas operações leva à adoção do código americano API 1104. Este código estabelece que os consumíveis de soldagem devem ser compatíveis com o metal base, introduzindo a questão: o que define a compatibilidade?

O estudo de Sant'anna (2006) identificou zonas frágeis na região intercrítica da região afetada pelo calor (ZAC) dos aços C-Mn e ARBL (de baixa liga e alta resistência), geradas durante o processo de soldagem de passe único e de passes múltiplos. O autor verificou as propriedades mecânicas e a microestrutura do aço API 5L X65 depois de submetido a tratamentos térmicos na região intercrítica.

Analizou-se a influência destas condições de tratamento intercrítico nas propriedades mecânicas do aço API 5L-X65, porque a região intercrítica da zona afetada pelo calor (IC-ZAC) é susceptível a falhas em serviço. Foi dada especial atenção à identificação e quantificação do constituinte M-A. Pretende-se, assim, fornecer subsídios para possibilitar o controle das variáveis de processo que acarretem na adequada execução do processo de soldagem do aço API 5L X65, reduzindo ou eliminando a possibilidade de baixa resistência à tração e tenacidade à fratura promovida por uma microestrutura inadequada (Sant'anna, 2006. p.3).

Diante do aumento da demanda de gás natural e a importância de aumentar a viabilidade e segurança da sua rede de infraestrutura, este trabalho investiga a viabilidade de usar eletrodos revestidos E 6010 no passe de raiz em tubos API X65, uma opção menos onerosa que o tradicional E 8010-P1. A análise é motivada por um cenário prático envolvendo a Companhia de Gás da Bahia e seu projeto Gás Sudoeste, destacando a complexidade e a relevância da escolha adequada de materiais e técnicas de soldagem. A pesquisa é ainda impulsionada pela necessidade de superar as limitações impostas por normativas anteriores e a busca por eficiência e redução de custos sem comprometer a qualidade e a segurança das soldas.

Ao abordar a discussão sobre as normas técnicas e a força de lei que podem ou não determinar, o estudo também propõe uma articulação entre legislação, regulamentos técnicos e normas que estabelecem um sistema complexo e abrangente para a engenharia e construção de dutos no Brasil. A Lei Nº 4.150 de 1962 exige a utilização de normas técnicas da ABNT em projetos de obras e serviços públicos, ressaltando a necessidade de padrões rigorosos para segurança e qualidade.

O Regulamento Técnico De Dutos Terrestres Para Movimentação De Petróleo, Derivados e Gás Natural (RTDT) da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) complementa essa exigência, especificando critérios para a operação segura de dutos, e alinha-se com normas específicas da ABNT, como a NBR 12712 para projeto e a NBR 15280-2 para construção, além da norma internacional ASME B31.8 para sistemas de transmissão. Essa estrutura normativa promove a adoção de práticas seguras e eficientes, fundamentais para a integridade estrutural e a proteção ambiental no contexto da indústria de petróleo e gás, tanto nacional quanto internacionalmente.

1.1 Tubo API X65 PSL 2

O tubo API X65 desempenha um papel fundamental na infraestrutura de gasodutos, sendo projetado para atender a requisitos rigorosos de tensão e resistência mecânica, essenciais para garantir a segurança e eficácia no transporte de gás natural. Segundo a norma API 5L, este tubo é definido com um limite mínimo de escoamento de 450 MPa (65,300 psi) e um limite de resistência de 535 MPa (77,600 psi), estabelecendo assim os padrões necessários para sua aplicação em condições desafiadoras.

No entanto, nota-se que os resultados dos testes de fabricação do tubo API X65 utilizado em nosso estudo excederam esses requisitos mínimos, apresentando um limite de escoamento real de 467 MPa e um limite de resistência de 606 MPa. Esses valores superiores, verificados no certificado de fabricação do tubo¹ reforçam a qualidade e a confiabilidade do material, proporcionando uma margem adicional de segurança e desempenho. Esta característica é especialmente relevante em projetos de gasodutos, onde a integridade estrutural e a resistência à pressão são críticas. O desempenho superior do tubo API X65, evidenciado pelos resultados de fabricação, destaca sua adequação para aplicações que exigem altos padrões de resistência e durabilidade, alinhando-se às exigências rigorosas da indústria de petróleo e gás.

1.2 Eletrodos Revestidos E 6010 e E 8010 P1

Os eletrodos E 6010 e E 8010 P1 ocupam papéis distintos e complementares na soldagem de tubos API X65, adaptando-se às necessidades normativas e práticas da construção de gasodutos. De acordo com a ASME BPVC Parte II-C e a norma AWS 5.1, o eletrodo E 6010 é caracterizado por um limite mínimo de escoamento de 330 MPa (48,000 psi) e um limite de resistência de 430 MPa (60,000 psi). Essas especificações tornam o E 6010 uma opção viável para o passe de raiz, oferecendo facilidade de manuseio e aplicação que requerem menos habilidade técnica dos soldadores, o que pode levar a uma diminuição significativa na ocorrência de reparos e, conseqüentemente, a uma redução nos custos de construção.

1. Tenaris. Certificação de qualidade conforme ISO 10474 3.1. A Tenaris é uma empresa fabricante de tubos e serviços voltados para a indústria de energia, líder no mercado global.

Em contraste, o eletrodo E 8010 P1, conforme especificado pela ASME BPVC Parte II-C e a norma AWS 5.5, apresenta um perfil de desempenho superior com um limite mínimo de escoamento de 460 MPa e um limite de resistência de 550 MPa. Essas propriedades o qualificam para passes de soldagem subsequentes ao passe de raiz, onde a diluição resultante contribui para o aumento da resistência mecânica global da junta soldada. A escolha do E 8010 P1 para essas aplicações ressalta a busca pela otimização da integridade e durabilidade da solda, aspectos críticos para a segurança e longevidade das infraestruturas de gasodutos.

Os resultados dos testes realizados com os eletrodos fornecidos pelo fabricante ESAB² revelaram valores que excedem as especificações mínimas normativas: o E 6010 demonstrou um limite de escoamento de 380 MPa e uma resistência de 480 MPa, enquanto o E 8010 P1 alcançou um limite de escoamento de 560 MPa e uma resistência de 630 MPa. Esses resultados não apenas confirmam a adequação desses consumíveis às suas respectivas funções na soldagem de tubos API X65, mas também evidenciam um potencial de desempenho superior, que pode proporcionar margens adicionais de segurança.

Portanto, a integração dos eletrodos E 6010 e E 8010 P1 em estratégias de soldagem, levando em consideração suas propriedades normativas e os resultados obtidos em testes práticos, demonstra ser uma abordagem eficaz na construção de gasodutos.

2 . OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é verificar, por meio de ensaios complementares, se o consumível E 6010 utilizado no passe atende para avaliação de projeto para um tubo especificado como API X65, e possibilitar uma confiança técnica a clientes no momento da avaliação e aprovação de Especificações de Procedimentos de Soldagem (EPS's), além de atender uma solicitação do mercado de prestadores de serviço de construção e montagem.

Dessa forma, pretende-se analisar se, com um passe de raiz, e com um passe reforço ao passe de raiz utilizando o eletrodo E 6010 (segundo passe), a soldagem atenderia aos requisitos de qualificação da API 1104.

2.1 Metodologia

A metodologia consiste em testes laboratoriais por meio da realização de ensaios mecânicos de tração, dobramento de face e raiz e nick-break, atendendo requisitos da norma API 1104 de soldagem.

A soldagem foi realizada em dois corpos de prova de tubo API X65 PSL 2, com um diâmetro de 16" e uma espessura de 0,281" (7,11 mm). A fim de reduzir possíveis deformações na contração e descontinuidades como embicamento, dois soldadores foram empregados durante o processo de soldagem a arco elétrico por eletrodo revestido (SMAW).

2. A ESAB Corporation é uma empresa líder mundial em tecnologia de controle de gases especiais e de fabricação. Ela fornece equipamentos avançados, automação, consumíveis, robótica e soluções digitais.

Os tubos foram inclinados a um ângulo de 30° para garantir a soldagem em todas as posições (horizontal, vertical e sobrecabeça). A soldagem foi dividida em cinco passes, cada um completando uma camada de solda.

A geometria da junta foi configurada com uma abertura de raiz de 3,5 mm, uma face de raiz de 1,0 mm e um ângulo de bisel de 60°. Para o corpo de prova 01, apenas para o primeiro passe, foi utilizado eletrodo E 6010 com 3,2 mm de espessura. A amperagem variou entre 97 a 115 A e a tensão entre 26 a 37 V. Para os demais passes (2° ao 5°), foi empregado o eletrodo E 8010 P1, ambos do fabricante ESAB.

Para o corpo de prova 02, nos dois primeiros passes, foram utilizados eletrodo E 6010 com 3,2 mm de espessura. A amperagem variou entre 97 a 115 A e a tensão entre 26 a 37 V. No caso dos demais passes (3°, 4° e 5°), foi empregado o eletrodo E 8010 P1, ambos do fabricante ESAB.

2.2 Ensaios mecânicos

Para um corpo de prova de 16" de diâmetro e 7,11 mm de espessura, os ensaios que devem ser realizados são determinados pelas especificações fornecidas na tabela a seguir.

Tabela 01 – Especificações para ensaios mecânicos

Diâmetro externo do tubo	16" (maior que 12,750")
Espessura da parede	7.11 mm (menor que 12,7 mm)

Fonte: elaboração do próprio autor

Para essa espessura de parede, devemos realizar os seguintes ensaios: 4 amostras para teste de tração; 4 amostras para teste de dobramento de face; 4 amostras para teste de dobramento de raiz. Como essa quantidade e amostras de teste serão realizadas para 2 Corpos de Provas, um com 1 passe de E 6010 e outro com 2 passes, o que totaliza 32 amostras para a pesquisa.

O ensaio de tração e dobramentos de face e raiz e nick break foram realizados com Máquina Universal de Ensaios, tipo hidráulica, marca EMIC, calibrada pela ABNT NBR ISO/IEC 17025³.

3. Obteram certificados de calibração, nº1246961 e 1246962, emitidos pelo Laboratório Isaac Newton do Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC - Acreditado pela RBC-CAL-0045.

Figura 01 – Máquina Universal de Ensaio, tipo hidráulica, marca EMIC



Fonte: produzido pelo próprio autor

No ensaio de tração para avaliação de soldas, a resistência à tração da solda deve ser no mínimo igual à resistência mínima à tração do material do tubo. Não é exigido que a resistência da solda supere a resistência real do material. Se a ruptura da amostra ocorrer fora da área da solda e a resistência à tração alcançar no mínimo 95% da resistência mínima à tração do material do tubo, considera-se que a solda atende aos padrões necessários.

Caso a ruptura aconteça na solda e a resistência observada seja maior ou igual à resistência mínima do material do tubo, e a solda satisfaça as exigências de integridade, a solda também é considerada adequada. Se houver ruptura na solda com resistência abaixo do mínimo exigido para o material do tubo, a solda deve ser refeita. Quando a soldagem envolver materiais de diferentes graus, a resistência mínima do material de menor grau deve ser o parâmetro para aceitação. Amostras que falhem por causa de preparo ou execução de teste inadequados podem ser substituídas e submetidas a novo teste, e o dobro de amostras deve ser retestada.

No ensaio de dobramento, o resultado é considerado aceitável se não houver fissuras ou outras imperfeições maiores que 3 mm ou metade da espessura especificada da parede do tubo, prevalecendo o menor, presentes na solda ou na zona de fusão após a dobragem. Fissuras que se originem no raio externo da dobra ao longo das bordas da amostra e menores que 6 mm, não devem ser consideradas, a menos que imperfeições óbvias sejam observadas.

Os critérios de aceitação para o ensaio de nick-break incluem requisitos claros de penetração e fusão da solda. As amostras analisadas devem exibir ausência de falhas, com uma tolerância máxima para pequenas bolhas de gás que não devem ser maiores do que 1,6 mm em sua maior dimensão e cuja área total não pode ultrapassar 2% da superfície exposta da amostra. Quanto às inclusões de escória, estas não devem ser mais profundas do que 0,8 mm e o comprimento não deve exceder 3 mm ou a metade da espessura da parede do tubo. Além disso, é necessário um espaçamento mínimo de 13 mm entre inclusões de escória adjacentes.

3 . RESULTADOS

3.1 Ensaio de Tração

Na investigação das propriedades mecânicas de juntas soldadas, foi realizada uma série de testes de tração, meticulosamente documentados na tabela a seguir. As amostras de 1 a 4, correspondentes ao Código de Procedimento (CP) 01, representam a soldagem executada somente com o primeiro passe utilizando o consumível E 6010. Observou-se que, em todas estas amostras, as rupturas ocorreram fora da região soldada, indicando que a soldagem foi capaz de atingir a resistência necessária do material fora da zona de influência térmica da solda.

Tabela 02 – Resultados dos testes de tração

Item	CP	Dimensões (mm)	Área Seção (mm ²)	Carga (Kgf)	Resist. (MPa)	Observações
1	1	24,33 x 7,11	172,99	10.678	605,5	Ruptura Ocorreu Fora da Solda
2	1	25,26 x 7,09	179,09	10.808	592,0	Ruptura Ocorreu Fora da Solda
3	1	27,09 x 7,14	193,42	12.203	618,9	Ruptura Ocorreu Fora da Solda
4	1	27,60 x 7,11	196,24	12.314	615,6	Ruptura Ocorreu Fora da Solda
5	2	25,59 x 7,14	182,71	11.561	620,7	Ruptura Ocorreu Fora da Solda
6	2	24,63 x 7,21	177,58	10.716	592,0	Ruptura Ocorreu Fora da Solda
7	2	25,87 x 7,13	184,45	11.618	617,9	Ruptura Ocorreu Fora da Solda
8	2	25,26 x 7,15	180,61	10.823	587,9	Ruptura Ocorreu Fora da Solda

Fonte: produzido pelo próprio autor⁴

As amostras de 5 a 8 pertencem ao CP 02 e caracterizam-se pela aplicação do primeiro passe seguido de um segundo passe de reforço. Semelhante ao CP 01, todas as rupturas ocorreram longe da área da solda, corroborando a adequação do processo de soldagem em termos de resistência mecânica. Esses resultados não apenas refletem a eficácia da técnica de soldagem empregada, mas também reforçam a integridade estrutural das juntas, que se mostraram resistentes acima do patamar exigido.

A consistência na ocorrência das rupturas, distante das soldas em ambos os códigos de procedimento, valida a soldagem como aprovada nesse critério específico, demonstrando a capacidade da junta de manter a integridade sob tensão aplicada, uma variável crítica para a segurança e desempenho em aplicações práticas. A seguir, a tabela detalha as dimensões, áreas de seção, cargas e resistências obtidas, juntamente com as observações pertinentes a cada amostra.

4. A tabela foi elaborada pelo próprio autor a partir de resultados obtidos a partir de ensaios laboratoriais realizados pela Universidade de Itaúna, financiados pela Empresa Construtora Elevação e disponibilizados para este trabalho.

Figura 02 – Corpos de prova de tração fraturados



Fonte: produzido pelo próprio autor

3.2 Ensaio de Dobramento

Neste segmento do estudo, analisamos a ductilidade e a resistência da solda através de testes de dobramento, um indicador crítico da capacidade do material de suportar deformações sem apresentar trincas. Os testes foram organizados e categorizados em dois conjuntos distintos, identificados como CP 01 e CP 02. Cada conjunto foi submetido a oito dobramentos - quatro na face e quatro na raiz - para avaliar a integridade da solda sob esforços de flexão.

No CP 01, representando as amostras soldadas apenas com o primeiro passe no E 6010, os resultados foram uniformemente bem-sucedidos, com ausência total de trincas após o dobramento tanto na face quanto na raiz. Isso indica uma excelente ductilidade e resistência à fratura do material soldado sob essa condição específica de soldagem.

Por sua vez, o CP 02, que consistiu em soldas com um primeiro passe e um segundo passe de reforço no E 6010, falhou no teste de dobramento da face, da amostra 9, o que levou à decisão de realizar dois retestes adicionais para validação do processo. Estes retestes, que também fazem parte do CP 02, não apresentaram trincas, corroborando a confiabilidade e a qualidade da soldagem realizada com os dois passes.

Tabela 03 – Resultados dos testes de Dobramento de face e raiz.

Item	CP	Dimensões (mm)	Diâmetro do Cutelo (mm)	Ângulo de Dobramento	Dobramento	Observações
1	1	25,40 x 7,1	28	180°	Face	Não houve trincas
2	1	25,40 x 7,1	28	180°	Raiz	Não houve trincas
3	1	25,40 x 7,1	28	180°	Face	Não houve trincas
4	1	25,40 x 7,1	28	180°	Raiz	Não houve trincas
5	1	25,40 x 7,1	28	180°	Face	Não houve trincas
6	1	25,40 x 7,1	28	180°	Raiz	Não houve trincas
7	1	25,40 x 7,1	28	180°	Face	Não houve trincas
8	1	25,40 x 7,1	28	180°	Raiz	Não houve trincas

9	2	25,40 x 7,1	28	180°	Face	Rompeu
10	2	25,40 x 7,1	28	180°	Raiz	Não houve trincas
11	2	25,40 x 7,1	28	180°	Face	Não houve trincas
12	2	25,40 x 7,1	28	180°	Raiz	Não houve trincas
13	2	25,40 x 7,1	28	180°	Face	Não houve trincas
14	2	25,40 x 7,1	28	180°	Raiz	Não houve trincas
15	2	25,40 x 7,1	28	180°	Face	Não houve trincas
16	2	25,40 x 7,1	28	180°	Raiz	Não houve trincas
17	2	25,40 x 7,1	28	180°	Face	Não houve trincas (reteste)
18	2	25,40 x 7,1	28	180°	Face	Não houve trincas (reteste)

Fonte: produzido pelo próprio autor⁵

Figura 03 – Corpos de prova de dobramento



Fonte: Autor próprio

3.3 Ensaio de Nick-Break

A Tabela 04 destaca os resultados obtidos a partir dos testes de Nick-Break, cruciais para avaliar a presença de porosidade e a qualidade da fusão na solda, seguindo critérios de aceitação que priorizam a integridade da união soldada. Conforme estabelecido, o teste de Nick-Break avalia a penetração e a fusão da solda, exigindo uma completa ausência de falhas significativas. A presença de pequenas bolhas de gás é permitida, desde que não ultrapasse 1,6 mm em qualquer dimensão e a área total delas não exceda 2% da superfície da amostra exposta. O critério garante que tais imperfeições mínimas não comprometam a integridade geral da solda.

Inclusões de escória devem ser limitadas a uma profundidade máxima de 0,8 mm e um comprimento que não supere 3 mm ou metade da espessura da parede do tubo, considerando-se o menor entre esses dois valores. A norma também especifica um espaçamento mínimo de 13 mm entre inclusões de escória adjacentes.

5. A tabela foi elaborada pelo próprio autor a partir de resultados obtidos a partir de ensaios laboratoriais realizados pela Universidade de Itaúna, financiados pela Empresa Construtora Elevação e disponibilizados para este trabalho.

Tabela 04 – Resultados dos testes de Nick-Break.

Item	C.P	Ângulo de Dobramento	Processo	Observações
1	1	180°	Tração	Não houve poros nem descontinuidades
2	1	180°	Tração	Não houve poros nem descontinuidades
3	1	180°	Tração	Não houve poros nem descontinuidades
4	1	180°	Tração	Não houve poros nem descontinuidades
5	2	180°	Tração	Poros com dimensões de 0,2 x 0,2 mm, sem descontinuidade
6	2	180°	Tração	Poros com dimensões de 0,1 x 0,2 mm, sem descontinuidade
7	2	180°	Tração	Sem poros nem descontinuidades
8	2	180°	Tração	Poros com dimensões de 0,3 x 0,2 mm, sem descontinuidade

Fonte: produzido pelo próprio autor⁶

No CP 01, todas as amostras satisfizeram plenamente esses critérios, demonstrando ausência de poros ou descontinuidades, um indicativo de alta qualidade na soldagem. O CP 02, por sua vez, mostrou pequenos poros nas dimensões especificadas em algumas amostras, porém dentro dos limites de tolerância, sem descontinuidades que afetassem a aceitação das soldas a partir dos critérios estabelecidos. Esses resultados sublinham a eficácia dos procedimentos de soldagem utilizados, confirmando que tanto a técnica quanto o material empregado são adequados para assegurar a qualidade necessária da solda, alinhados aos rigorosos padrões de integridade e segurança exigidos para suas aplicações específicas.

Figura 04 – Corpos de prova de Nick-Break após fratura



Fonte: produzido pelo próprio autor

4 . CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em suma, os estudos conduzidos até o momento sobre a utilização do eletrodo E 6010 para soldagem em tubos API X65 revelam um potencial promissor, mesmo diante das diferenças notáveis nas propriedades mecânicas entre o consumível de soldagem e o

6. A tabela foi elaborada pelo próprio autor a partir de resultados obtidos a partir de ensaios laboratoriais realizados pela Universidade de Itaúna, financiados pela Empresa Construtora Elevação e disponibilizados para este trabalho.

material do tubo. Os resultados preliminares não só confirmam as hipóteses iniciais sobre a eficácia deste eletrodo mas também destacam as vantagens econômicas e operacionais que podem beneficiar significativamente o setor de construção de gasodutos. Além disso, esta abordagem de soldagem atende aos rigorosos padrões de qualificação, garantindo a integridade estrutural necessária para aplicações críticas.

Entretanto, é importante enfatizar que este trabalho constitui uma fase de uma pesquisa de mestrado mais abrangente e ainda em progresso. As descobertas atuais, embora encorajadoras, são consideradas preliminares. Uma avaliação mais completa e definitiva da viabilidade do eletrodo E 6010 exigirá uma série de ensaios adicionais, incluindo Charpy-V, dureza Vickers, análises macrográficas e investigações sobre a soldagem em diferentes faixas de espessura de material. Adicionalmente, uma extensa revisão das normativas técnicas e regulatórias — abrangendo perspectivas americana, brasileira e internacional — é indispensável para assegurar a total conformidade e adequação do uso do eletrodo E 6010 às exigências do setor.

Assim, o prosseguimento desta pesquisa implica não apenas na continuação dos testes práticos mas também na profundidade da análise normativa, cujos resultados finais serão cruciais para a conclusão do estudo de mestrado. A confirmação dos resultados dos ensaios finais definirá a viabilidade técnica e econômica do eletrodo E 6010, marcando um significativo avanço tecnológico para a indústria de petróleo e gás e, especialmente, contribuindo para projetos focados em eficiência operacional e sustentabilidade, como é o caso do projeto Gás Sudoeste da Bahiagás.

Esta conclusão reitera o compromisso com a pesquisa contínua e o desenvolvimento tecnológico no campo da soldagem, refletindo a dedicação em superar os desafios técnicos e normativos para inovar no setor de gasodutos. O trabalho em andamento promete não apenas avançar no conhecimento científico e na prática de engenharia, mas também em demonstrar, de forma concreta, como inovações técnicas podem aliar-se à sustentabilidade e eficácia operacional no contexto da infraestrutura crítica de energia.

5 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR MECHANICAL ENGINEER. **Boiler And Pressure Vessel Code**, Section IX – Welding, Brazing and Fusing Qualifications, New York , EUA, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR MECHANICAL ENGINEER. **Boiler And Pressure Vessel Code**, Section II, Part C – Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals, New York , EUA, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR MECHANICAL ENGINEER. B 31.8, **Gas Transmission and Distribution Piping Systems**, New York , EUA, 2022.

API 1104. **Welding of pipelines and Related Facilities**. 22^a Ed, American Petroleum Institute, Washington, DC, 2021.

API 5L. **Specification for Line Pipe**. 46ª Ed, American Petroleum Institute, Washington, DC, 2020.

Norma N 464, Petrobras, Rer K, 2ª ementa, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15280-2**: Construção e montagem de gasodutos, 2015.

CALLISTER, W.D.; RETHWISH, D.G. **Materials Science and Engineering** – An Introduction. 9th edition, John Wiley & Sons, New York, NY, 2021.

IMANICHE, Carlos César; BELDERRAIN, Mischel Carmen Neyra; SENNE, Edson França. Implementação de uma rede de distribuição de gás (gasodutos) conectando as principais cidades do estado brasileiro de Minas Gerais. In: XXXIV ENDIO – XXXII EPIO. Argentina, 2021. **Anais...** Facultad de Ciencias Económicas Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Regulamento técnico de dutos terrestres para movimentação de petróleo, derivados e gás natural (RTDT)**. Brasil, 2011. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/arq/res_anp_6_2011_anexoi.pdf.

SANT'ANNA, Pedro Carneiro. **Influência de tratamentos térmicos intercríticos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço API 5L X65**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2006. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=471422>. <https://abnt.org.br/normalizacao/sobre-a-normalizacao/>

6 . AGRADECIMENTOS

Agradeço o apoio e financiamento dos ensaios laboratoriais à Construtora Elevação, de Curitiba/ PR, particularmente a Carlos Estefano Cerveira e Sergio Bruno Alongi, pelo apoio institucional, ao Cassio Silva, Raphael Lazarini e Átalos Pacheco Savino, inspetor de soldagem nível 2 da FBTS, e Filó, pelas valiosas colaborações, viabilizando as soldagens e ensaios laboratoriais, cuja atenção na perícia garantiram excelência técnica ao trabalho. Da mesma forma, sou especialmente grato à Bahiagás, onde tenho a honra de atuar há 13 anos, e ao apoio indispensável de Lucas Lopes da Silva Santana, Cristiano Stefanelli Silva, Marcus Virgílio Oliveira e da diretora técnica e comercial, Larisse Karina Stelitano Gonsalves de Oliveira. Minha sincera gratidão a todos.