

APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DE AÇO E317L ATRAVÉS DO PROCESSO GTAW COM ADIÇÃO DE ARAME FRIO: TÉCNICAS OPERACIONAIS

João Pedro Inácio Varela ¹
Rafael Barbosa Carneiro dos Santos ²
Mathews Lima dos Santos ³
Marcos Mesquita da Silva ⁴
Renato Alexandre Costa de Santana ⁵

RESUMO

O presente trabalho objetiva apresentar algumas técnicas operacionais, bem como os resultados obtidos, na aplicação de revestimentos em substrato de aço de carbono, a fim de obter melhorias no processo de soldagem GTAW mecanizada com adição de arame frio. As soldagens foram realizadas com o metal de adição AISI 317L, com diâmetro de 1,2mm e um aço de baixo carbono como substrato. Ademais, algumas técnicas e parâmetros de soldagem provenientes de um trabalho anterior, com os melhores resultados, foram empregados. As análises se basearam em exame visual, geometria dos revestimentos e ensaios eletroquímicos de corrosão. Verificou-se que os revestimentos feitos com os parâmetros da técnica 3 não prosseguiram para as análises seguintes à inspeção visual pela forte presença de falha de preenchimento entre os cordões. Já na análise geométrica, alguns revestimentos com e sem pré-aquecimento apresentaram resultados satisfatórios, mas alguns que não receberam pré-aquecimento também mostraram falhas de preenchimento e não foram estudados nos ensaios eletroquímicos de corrosão. Baseado em todas essas análises, viu-se que o pré-aquecimento diminuiu a incidência de defeitos, que a sinergia entre a velocidade de alimentação e a corrente foi fundamental para a obtenção de altura e largura satisfatória, bem como uma boa diluição e que o revestimento 3 apresentou bons resultados nos ensaios de corrosão, mas a necessidade de realizar correção de geometria nos cordões tornou sua aplicação inviável e assim, o revestimento 2 com pré-aquecimento mostrou-se o mais apropriado pelas falhas mínimas, parâmetros geométricos aceitáveis e resultados de impedância e resistência à polarização satisfatórios.

Palavras-chave: Soldagem GTAW, Arame frio, Revestimento, Corrosão.

INTRODUÇÃO

Atualmente, o petróleo e o gás são responsáveis por 56% da matriz energética mundial, suprimindo mais de 96% da necessidade energética do setor de transporte. Atendem a 64% da

¹ Graduando do Curso de Eng. Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande - PB, jpivufcg@gmail.com;

² Mestrando da Pós-Graduação em Eng. Mecânica da UFCG-PB, rafaelbarbosacs@gmail.com;

³ Doutorando da Pós-Graduação em Eng. Mecânica da UFPE-PE, mathewslimads@gmail.com;

⁴ Doutor, Curso Técnico em Petróleo e Gás do IFPB -PB, marcos.silva@ifpb.edu.br;

⁵ Professor orientador: Dr, UFCG - PB, renatoacs@ufcg.edu.br.

necessidade energética do setor industrial e respondem por 25% da geração elétrica mundial. Além disso, a maioria dos produtos manufaturados do mundo contemporâneo decorre dos derivados de petróleo e petroquímicos (MENDES, 2017).

Arelado a isso, a preocupação com o transporte desses produtos também se faz necessário. Para garantir a confiabilidade dos dutos de transporte, permitindo que eles operem com total segurança ao longo do tempo, torna-se necessário protegê-los contra a corrosão proveniente da agressividade desses fluidos transportados. Por esse motivo, torna-se necessário uma série de cuidados para evitar que problemas de corrosão interfiram nessas operações de transporte (MENEZES, 2016).

Uma solução para esse problema seria o uso de materiais resistentes à corrosão na fabricação dessas tubulações para transporte de petróleo e gás. Todavia, devido a questões econômicas (alto custo), torna-se inviável a produção de dutos 100% constituídos de metais nobres. Logo, são realizadas deposições desses metais nobres (aços inoxidáveis, ligas de níquel, etc.) na forma de camadas protetoras (revestimentos), atendendo assim a necessidade de proteção, a um custo mais baixo.

Dentre as alternativas para deposição desses revestimentos anticorrosivos, normalmente se faz uso de processos de soldagem. Um desses processos que vem sendo empregado com sucesso é o TIG (*Tungsten Inert Gas*), pela qualidade e aplicabilidade que esse proporciona. Essa técnica de soldagem pode ser realizada tanto de forma manual quanto de maneira mecanizada. O problema de ser manual, além da baixa produtividade, é a sujeição do processo a erros humanos (falta de constância durante a realização) e riscos ao operador. Já o processo mecanizado utilizando o arame frio como metal depositante (GTAW-MAF), segundo Miranda *et al.* (2011, apud HOBOLD, 2018), apresenta uma melhor estabilidade do arco, maior produtividade e qualidade na soldagem.

Ademais, o processo GTAW-MAF possibilita o controle dos parâmetros envolvidos e assim, é possível obter revestimentos no mínimo aceitáveis para serem aplicados nas tubulações de oleodutos e gasodutos. Dessa forma, o objetivo desse trabalho é apresentar algumas técnicas operacionais usadas, bem como os resultados obtidos, na aplicação de revestimentos de aço inoxidável E317L em substrato de aço de baixo carbono.

METODOLOGIA

No estudo em questão, foi utilizado como substrato um aço de baixo carbono. Com relação ao revestimento, foi utilizado o aço inoxidável E317L como metal de adição. As Figuras 1 e 2 mostram suas composições químicas, respectivamente. Ademais, utilizou-se o Argônio com 25% de CO₂ como gás de proteção (com vazão de 15L/min), um eletrodo de tungstênio com diâmetro de 3,2mm e uma bobina de arame do metal de adição com diâmetro de 1,2mm.

Figura 1: Composição química do aço carbono (substrato).

C	Fe	Mn	Si	S	P	As	B	Bi	Ca	Ce	Co	Pb
0,166	99,100	0,550	0,027	0,005	0,019	0,009	0,000	<0,002	0,001	<0,003	0,007	<0,003
Cr	Cu	Zr	La	Mo	Nb	Ni	Al	Sn	Ti	V	W	Zn
0,012	0,008	<0,001	0,001	<0,002	<0,003	0,027	0,044	0,005	<0,001	<0,001	0,016	0,003

FONTE: autoria própria.

Figura 2: Composição química do metal de adição E 317L.

Metal de adição	Composição (% em peso)														
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Co	Ti	P	Cu	Al	S	N	B	Fe
E317L	0,018	18,84	13,66	3,56	1,34	0,42	0,18	0,003	0,021	0,11	0,003	0,013	0,058	0,0012	Bal.

Fonte: Sandvik (2010).

Para a realização dos revestimentos, algumas técnicas foram empregadas:

- *Limpeza mecânica*: limpeza da chapa com escova de aço, essa ação auxilia no preenchimento dos revestimentos e ajuda a diminuir a falta de fusão entre os cordões;
- *Afiação do eletrodo*: mantém a regularidade do arco elétrico;
- *Pré-aquecimento do substrato*: muito importante para diminuir as falhas de preenchimento (facilita a fusão). Foi realizado com valor de 150°C;
- *Sentido de soldagem “empurrando” nas técnicas 2 e 3*: realizar soldagens no sentido “empurrando” teoricamente promove menores penetrações e diluições o que seria apropriado para soldagens de revestimentos.
- *Sentido de soldagem “puxando” na técnica 3*: realizar a soldagem no sentido contrário ao convencional, pois aumenta a penetração (diluição) e pode promover redução de discontinuidades.

Arelado ao uso dessas técnicas, fez-se três revestimentos para cada uma delas, com os parâmetros dos três ensaios que apresentaram os melhores resultados. Esses ensaios são provenientes de um trabalho anterior, no qual foi desenvolvido todo um planejamento experimental para estabelecimento e avaliação de parâmetros de soldagem (SANTOS *et al.*, 2020). A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados nos revestimentos e a Tabela 2 as características de cada técnica utilizada.

Logo, a fim de estabelecer um padrão para as nomenclaturas dadas a cada revestimento, essas ficaram na forma apresentada na Figura 3.

Tabela 1: Parâmetros utilizados nos revestimentos.

Parâmetros do ensaio 1 (R1)	Parâmetros do ensaio 2 (R2)	Parâmetros do ensaio 3 (R3)
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Corrente (I) = 200A; ➤ Distância do eletrodo à peça (DEP) = 10mm; ➤ Velocidade de alimentação (Va) = 3m/min. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Corrente (I) = 240A; ➤ Distância do eletrodo à peça (DEP) = 10mm; ➤ Velocidade de alimentação (Va) = 5m/min. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Corrente (I) = 220A; ➤ Distância do eletrodo à peça (DEP) = 12,5mm; ➤ Velocidade de alimentação (Va) = 4m/min.

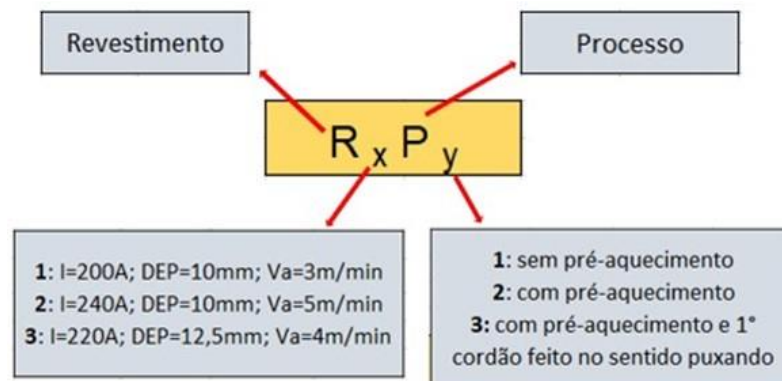
FONTE: autoria própria.

Tabela 2: Técnicas utilizadas nos revestimentos.

Primeira técnica (P1)	Segunda técnica (P2)	Terceira técnica (P3)
Todos os cordões foram realizados no sentido “empurrando”, com limpeza mecânica e sem a realização de um pré-aquecimento do substrato.	Foi feito um procedimento semelhante ao primeiro. A diferença foi a inclusão do pré-aquecimento de 150°C no substrato.	Apenas o primeiro cordão foi feito no sentido “empurrando” (os demais foram no sentido convencional), com realização tanto da limpeza mecânica quanto do pré-aquecimento.

FONTE: autoria própria.

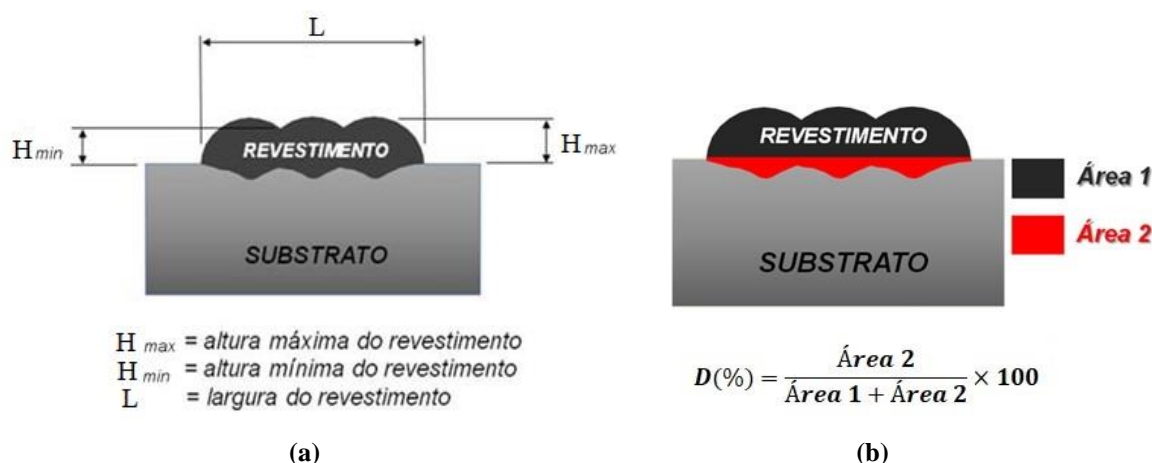
Figura 3: nomenclatura dada aos revestimentos.



FONTE: autoria própria.

Para as análises dos revestimentos, primeiramente foi realizada uma análise visual, tanto na região superficial como interna (seção transversal), a fim de identificar falhas grosseiras como falta de preenchimento/fusão entre os cordões. A segunda análise foi baseada na geometria dos revestimentos, de onde se tirou medidas importantes ao estudo, como altura máxima, altura mínima (importante que se tenha um valor minimamente aceitável para garantir a proteção do substrato), largura (diretamente ligada ao nível de espalhamento e assim, a questões como economia de material e tempo) e diluição (porcentagem do substrato que participa do revestimento). Todas essas medições foram realizadas através de um programa computacional CAD (*Computer Aided Design*). As Figuras 5a e 5b apresentam a metodologia para realizar as medições desses parâmetros.

Figura 5: (a) método de medição da altura máxima, altura mínima e largura. (b) método de medição e cálculo da diluição.



FONTE: adaptado de SILVA (2013).

E por fim, foram feitos dois ensaios eletroquímicos de corrosão. Um foi a Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) que baseia-se na imposição de pequenas perturbações de corrente alternada numa faixa de frequências determinadas, sendo então efetuada a medição da corrente de resposta do sistema como função da frequência e calculando a frequência da impedância (DOS SANTOS, 2016 apud MÁRQUEZ, 2016). Uma das principais vantagens da técnica de impedância é a baixa intensidade de excitação do sinal, permitindo assim, melhores aquisições nas medições, além de também ser considerada como uma técnica não destrutiva (FERNANDÉZ, 2014 apud MÁRQUEZ, 2016). O outro ensaio foi a Polarização Potenciodinâmica Linear (PPL), através da qual aplica-se um potencial faz com que o eletrodo de trabalho tenha seu potencial alterado em relação ao seu potencial inicial (potencial de corrosão). Ele gera curvas que correspondem a um registro do potencial aplicado e da corrente resultante e quantifica a resistência








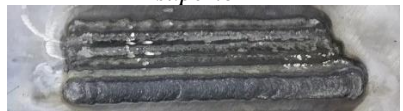

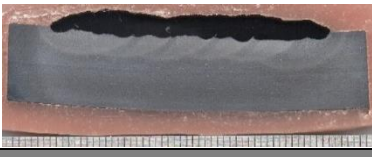




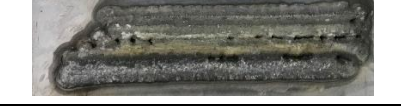
de polarização de um material, sendo capaz de fornecer informações de dados cinéticos relativos às reações de oxidação que ocorrem na superfície metálica (ALMEIDA, 2019).

A partir dessas análises, foi possível selecionar o revestimento que apresentou os melhores resultados no estudo em questão, para aplicação em uma situação real, além de outras conclusões acerca dos processos realizados durante a pesquisa e questões relacionadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 apresenta os revestimentos, feitos de acordo com os parâmetros de soldagem e técnicas escolhidas.

Figura 6: revestimentos aplicados.

R1P1 <i>superior</i>	R2P1 <i>superior</i>	R3P1 <i>superior</i>
		
<i>transversal</i>	<i>transversal</i>	<i>transversal</i>
		
R1P2 <i>superior</i>	R2P2 <i>superior</i>	R3P2 <i>superior</i>
		
<i>transversal</i>	<i>transversal</i>	<i>transversal</i>
		
R1P3 <i>superior</i>	R2P3 <i>superior</i>	R3P3 <i>superior</i>
		
Não houve corte transversal devido a presença de muitos defeitos superficiais		

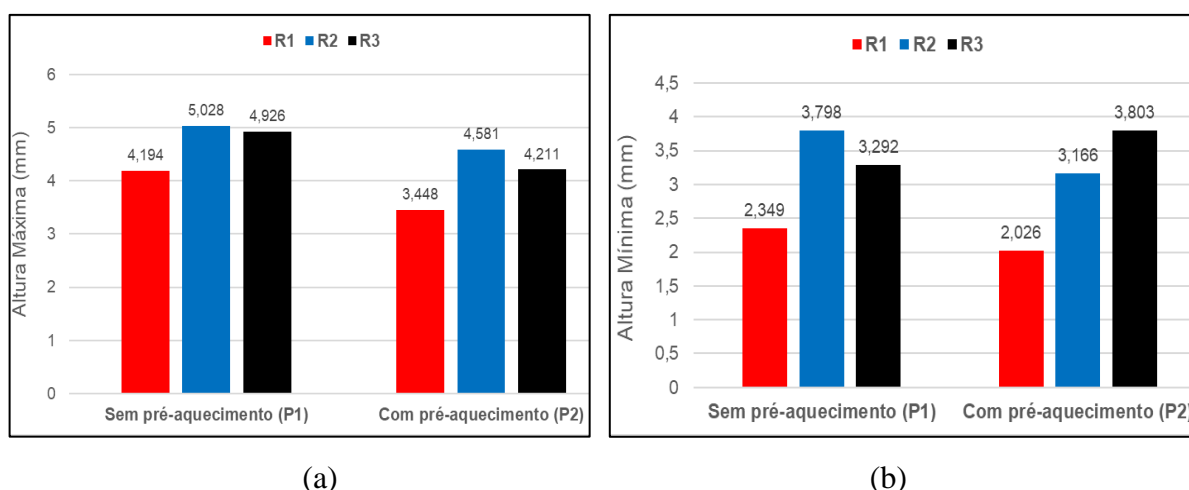
FONTE: autoria própria.

Analisando as imagens de cada revestimento, percebe-se uma forte presença de falha de preenchimento entre os cordões, a partir da vista superior, nos revestimentos R2P3 e R3P3. Não se sabe ao certo até onde essas falhas se estendem, mas a sua presença já acarreta em riscos

como o contato direto entre o produto que seria transportado no duto e o substrato utilizado para a fabricação dele, algo que essencialmente se deseja evitar. Devido a isso, os revestimentos feitos com os parâmetros da técnica 3 não prosseguiram para as análises seguintes do estudo.

Partindo para a análise da geometria dos revestimentos, os que seguiram no estudo tiveram suas imagens da seção transversal investigados a partir de um software CAD. Se tratando da análise da altura máxima (Figura 7a), percebe-se que os revestimentos com os parâmetros do ensaio R1 apresentaram menores alturas (devido ao fato da corrente e da velocidade de alimentação utilizadas serem menores do que os parâmetros dos ensaios R2 e R3) e ainda, que o uso do pré-aquecimento fez com que os valores das alturas máximas caíssem.

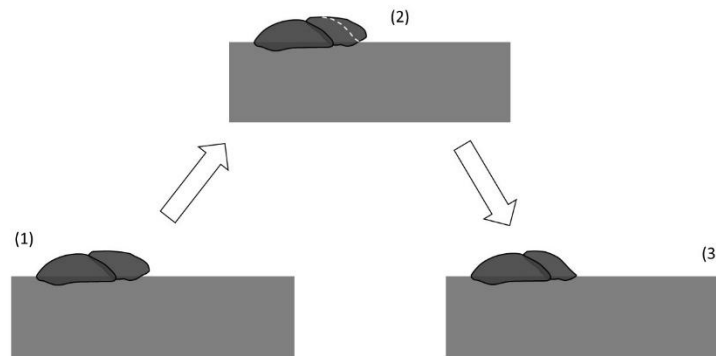
Figura 7: (a) análise das alturas máximas e das (b) alturas mínimas dos revestimentos..



FONTE: autoria própria.

Com relação a altura mínima (Figura 7b), vê-se que ocorreram comportamentos semelhantes aos da análise anterior, exceto no revestimento R3P2. Isso aconteceu porque sempre houve problema na molhabilidade (ângulo formado entre a extremidade do cordão e o substrato) dos cordões que se sobrepunham ao cordão anterior, como pode ser visto na Figura 8. Em (1) há uma falta de contato entre a borda do 2º cordão e o substrato e para resolver isso, foram feitas usinagens nessas bordas que apresentaram esse problema. A linha tracejada em (2) mostra o método utilizado para amenizar esse problema. E por fim, em (3) observa-se a nova molhabilidade após a correção com a usinagem. Logo, a realização desse procedimento de ajuste implicou em influências nos resultados geométricos de altura mínima no revestimento R3P2.

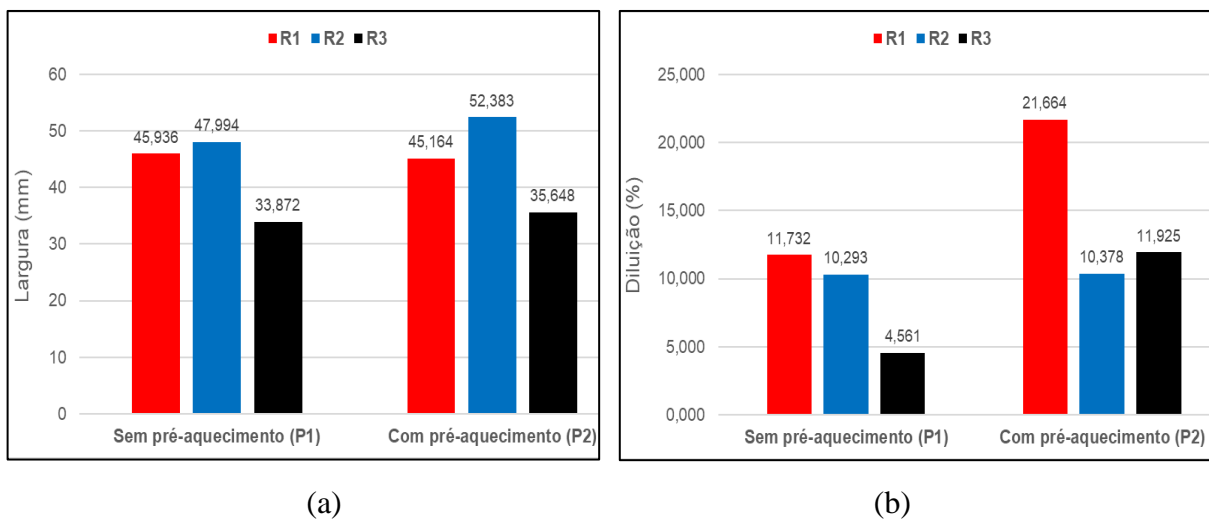
Figura 8: procedimento realizado para correção da molhabilidade dos cordões.



FONTE: autoria própria.

Quanto a largura (Figura 9a), nota-se que os revestimentos feitos com os parâmetros do ensaio 2 apresentaram maiores larguras em relação aos feitos com os do ensaio 1 devido ao aumento da corrente utilizada e que o revestimento R2P2 tem a maior largura pois o pré-aquecimento também influencia no aumento desse parâmetro geométrico. Se tratando dos revestimentos feitos com os parâmetros do ensaio 3, percebe-se um valor bem inferior em relação aos demais devido aos procedimentos de correção da molhabilidade citados anteriormente.

Figura 9: (a) análise das larguras e das (b) diluições dos revestimentos.



FONTE: autoria própria.

E por fim, analisando os resultados de diluição obtidos (Figura 9b), verifica-se um aumento um pouco maior nos revestimentos R1P2 e R3P2 devido ao pré-aquecimento (e uma menor velocidade de alimentação no caso de R1P2). Ademais, os revestimentos feitos com os parâmetros do ensaio 2 mostraram bons resultados de diluição e não apresentou aumento considerável.

Baseado nas medições obtidas, constata-se que alguns revestimentos com e sem pré-aquecimento apresentaram resultados satisfatórios para uma aplicação real em tubulações. Todavia, investigando novamente as imagens da parte superior e dos cortes transversais dos revestimentos, é possível enxergar que as seções dos que não receberam pré-aquecimento mostram falhas de preenchimento (sendo ela extremamente prejudicial para um material utilizado como proteção anticorrosiva), atributo este não presente nos que tiveram pré-aquecimento. Logo, escolheu-se para a aplicação dos ensaios eletroquímicos de corrosão o grupo de revestimentos que foi feito com a segunda técnica estabelecida nesse estudo.

A partir de um software utilizado para essas análises de corrosão, obteve-se resultados importantes para essa parte da pesquisa (Tabela 3). Um deles é o potencial de corrosão (E_{corr}), que é o potencial onde a velocidade das reações catódicas é igual ao das reações anódicas (ou seja, que as de redução são iguais às de oxidação). Outro é a corrente de corrosão (I_{corr}), que está diretamente relacionada com a taxa de corrosão do eletrodo. E por fim, a resistência à polarização (R_p), que é inversamente proporcional a corrente de corrosão, sendo o valor da resistência que um material oferece quando exposto a um determinado meio oxidante.

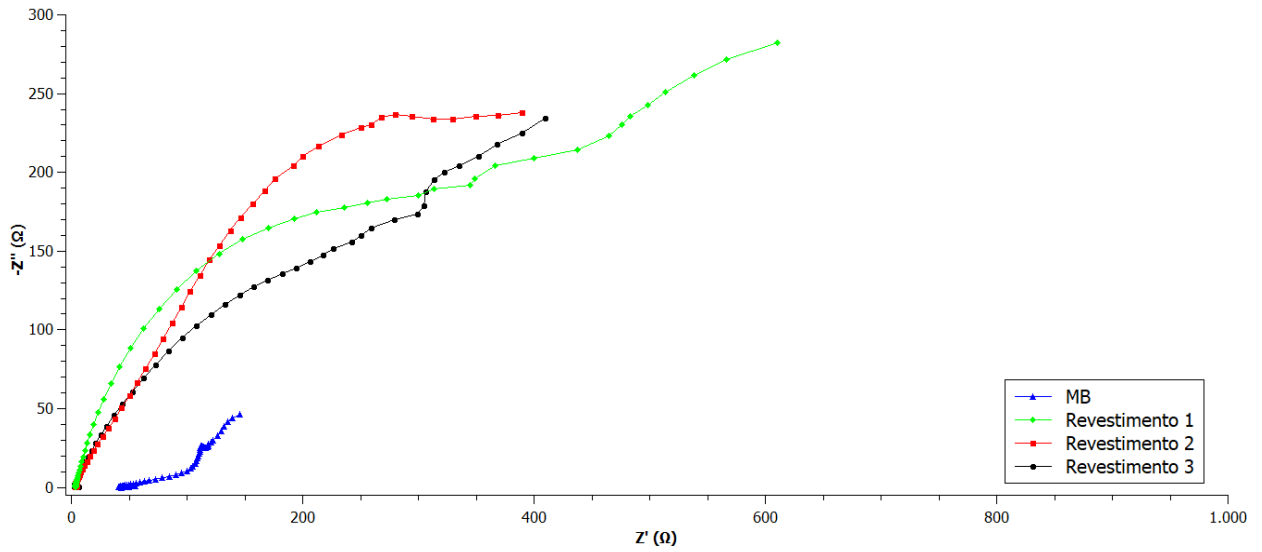
Tabela 3: resultados obtidos a partir dos ensaios eletroquímicos de corrosão.

Material	E_{corr} (V)	I_{corr} (A)	R_p (Ohm)
Metal de base	-0,741	$1,07 \times 10^{-4}$	439,67
Revestimento 1	-0,475	$3,43 \times 10^{-5}$	1281,00
Revestimento 2	-0,450	$9,85 \times 10^{-5}$	1144,40
Revestimento 3	-0,444	$2,18 \times 10^{-4}$	1028,70

FONTE: autoria própria.

O ensaio de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (Figura 10) mostrou uma tendência real de as resistências à polarização dos revestimentos ultrapassarem 1000 ohms (ressaltando que os valores ficaram bem próximos), enquanto a do metal de base se apresentou bem baixa em relação à deles, como era esperado. O revestimento 3 foi o que apresentou o maior valor de R_p .

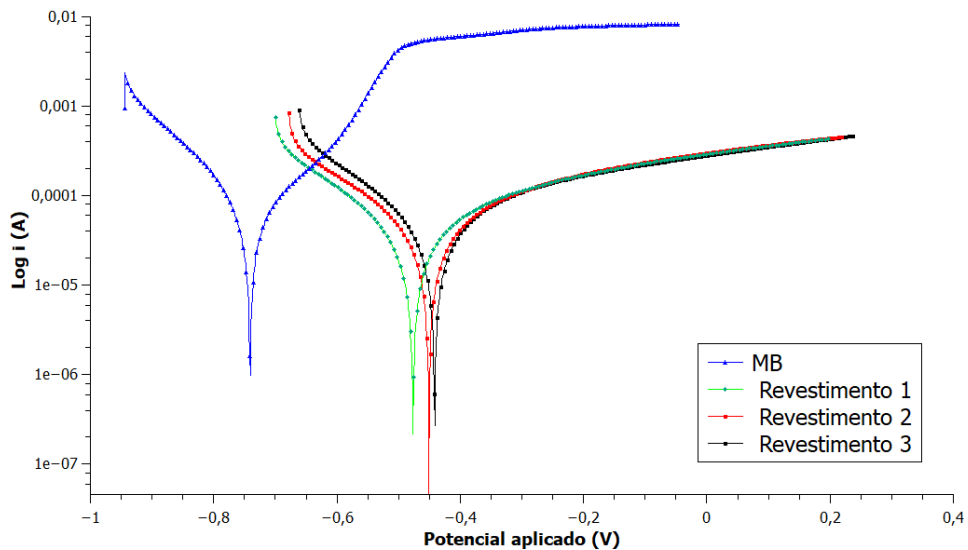
Figura 10: diagrama de Nyquist obtido no ensaio de EIE.



FONTE: autoria própria.

Com relação ao ensaio de Polarização Potenciodinâmica Linear (Figura 11), observou-se que tanto os potenciais de corrosão como as correntes de corrosão dos revestimentos também se mantiveram bem próximas, enquanto os do metal de base apresentou mais rapidamente o início do processo corrosivo. Nesse ensaio, entre os revestimentos, o número 3 apresentou o menor E_{corr} , mas o menor I_{corr} foi visto no número 2.

Figura 11: curvas de polarização obtidas no ensaio PPL.



FONTE: autoria própria.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desse trabalho foi apresentar algumas técnicas operacionais usadas, bem como os resultados obtidos, na aplicação de revestimentos de aço inox E317L em substrato de aço de baixo carbono, a fim de obter melhorias no processo de soldagem mecanizada. Sendo assim, viu-se que o pré-aquecimento diminuiu a incidência de defeitos, principalmente no revestimento 1, bem como reduziu as discontinuidades no revestimento 2 e ainda, que a sinergia entre a velocidade de alimentação e a corrente foi fundamental para a obtenção de altura e largura satisfatória, bem como uma boa diluição. Ademais, o revestimento 3 apresentou bons resultados nos ensaios de corrosão, mas a necessidade de realizar correção de geometria nos cordões (provavelmente devido ao aumento da DEP, que gerou um arco instável) tornou sua aplicação inviável e devido a isso, o revestimento 2 com pré-aquecimento mostrou-se o mais “completo” em termos de falhas mínimas, parâmetros geométricos aceitáveis e resultados de impedância e resistência à polarização satisfatórios. E por fim, concluiu-se que o planejamento experimental aplicado nesse estudo mostrou ter sido determinante para dispor e propiciar a seleção dos parâmetros mais eficientes para a realização dos revestimentos e que a segunda técnica estabelecida proporcionou revestimentos aplicáveis a situações reais na área de proteção de dutos de transporte de óleo, gás e demais derivados do petróleo.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Campus Campina Grande, pela disponibilização de recursos através de edital Interconecta Edital 01/2019, e ao grupo PET e à Pós-Graduação do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande pelo apoio a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Arthur Filgueira de. **O estudo da eletrodeposição de ligas de Ni-Mo utilizando gluconato de sódio como complexante**. 2019. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

HOBOLD, Eduardo. **Desenvolvimento de uma concepção mecânica de um manipulador linear para soldagem de revestimentos TIG alimentado**. 2018. 62 f. Monografia

(Especialização) - Curso de Tecnólogo em Fabricação Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, 2018.

MÁRQUEZ, Marcy Viviana Chiquillo. **Avaliação da resistência à corrosão do aço carbono ASTM 572 GR50 exposto a óleo cru, água do mar e misturas de óleo/água do mar em condições estáticas e dinâmicas**. 2016. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

MENDES, André Pompeo do Amaral *et al.* **Panoramas setoriais 2030: petróleo e gás**. 2017. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14243/2/Panoramas%20Setoriais%202030%20-%20Petr%C3%B3leo%20e%20G%C3%A1s_P.pdf. Acesso em: 26 abr. 2021.

MENEZES, Vanessa Guimarães Soares de. **Estudo comparativo entre técnicas de alimentação de arame no processo TIG**. 2016. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

SANDVIK. **Certificado de qualidade - ER 317L**. Mogi Guaçu: Sandvik, 2010. Metal de adição para soldagem: composição química.

SANTOS, Rafael Carneiro dos *et al.* **Emprego de planejamento experimental no processo de soldagem GTAW mecanizado com adição de arame frio**. Anais do I Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Diamantina (MG), Online, 2020. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/icobicet2020/269115-EMPREGO-DE-PLANEJAMENTO-EXPERIMENTAL-NO-PROCESSO-DE-SOLDAGEM-GTAW-MECANIZADO-COM-ADICAO-DE-ARAME-FRIO>>. Acesso em: 07/05/2021 18:33.

SILVA, Marcos Mesquita da. **Avaliação da compatibilidade metalúrgica e da resistência à corrosão de revestimentos da liga AWS ER NiCrMo-4 aplicados por soldagem SAW sobre o aço API 5L Gr B**. 2013. 202 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

SOUSA, Mikarla Baía de. **Estudo da caracterização da liga Cu-Zn-Ni obtida pelo processo da eletrodeposição**. 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.