UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

FABIO PASSOS DE TASSIS

AVALIAÇÃO DE CORROSÃO LOCALIZADA EM REVESTIMENTO DEPOSITADO POR SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S39209

Vitória
2016

FABIO PASSOS DE TASSIS

AVALIAÇÃO DE CORROSÃO LOCALIZADA EM REVESTIMENTO DEPOSITADO POR SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S39209

Projeto de graduação apresentada ao corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.
Orientador: Professor Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo.

Vitória
2016

TASSIS, Fabio Passos de

Avaliação De Corrosão Localizada Em Revestimento Depositado Por Soldagem De Aço Inoxidável Duplex Uns S39209/ TASSIS, Fabio Passos de – 2016. 77f.

Orientador: Marcelo Camargo Severo de Macêdo

Projeto de Graduação – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Soldagem de revestimentos. 2. Aço inoxidável duplex. 3. Ensaio DL-EPR. 4. Sensitização. 5. Corrosão intergranular. I. TASSIS, Fabio Passos de. II. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica. III Avaliação De Corrosão Intergranular Em Revestimento Soldado De Aço Inoxidável Duplex.

FABIO PASSOS DE TASSIS

AVALIAÇÃO DE CORROSÃO LOCALIZADA EM REVESTIMENTO DEPOSITADO POR SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S39209

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em ___ de _____ de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA

Professor Doutor Marcelo Camargo Severo de Macêdo
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Professor Mestre Felipe Palácio
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador

Engenheiro Mecânico Rodrigo Soares dos Santos
Examinador

Engenheiro Mecânico André Canal
Examinador

Aos meus pais e irmão, em quem sempre me espelhei e que foram fonte de carinho, apoio e dedicação, servindo de inspiração a mim todos os dias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades que me proporcionou e por ter me dado força e saúde para enfrentar e superar as dificuldades.

À Universidade Federal do Espírito Santo, os professores, funcionários, direção e administração por me concederem instruções e conhecimentos necessários para conclusão deste trabalho bem como pela oportunidade e confiança a mim concedidas.

Ao laboratório TRICORRMAT e ao Laboratório de Soldagem pela estrutura e possibilidade de realização dos procedimentos requeridos, bem como aos funcionários, monitores e demais alunos que me auxiliaram com tudo o que foi necessário.

Ao orientador Professor Dr. Marcelo Camargo Severo de Macedo e ao Professor Dr. Temístocles de Souza Luz pelo suporte, correções e orientações no pouco tempo que lhes coube.

Agradeço aos amigos do PET - Engenharia Mecânica e demais amigos da UFES pelo auxílio ao longo do curso, por me acompanharem nesta caminhada e principalmente pelas palavras amigas e apoio nos momentos difíceis.

Aos meus pais e irmão pelo carinho, amor, dedicação e incentivo por toda a vida.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

“Não vos aconselho o trabalho, mas a luta. Não vos aconselho a paz, mas a vitória. Seja o vosso trabalho uma luta. Seja a vossa paz uma vitória.”

Friedrich Nietzsche

RESUMO

Aços inoxidáveis duplex apresentam excelente resistência à corrosão por pites combinada com ótima resistência mecânica devido à sua microestrutura austeno-ferrítica. Porém, o custo do material e a dificuldade de obtenção de componentes totalmente feitos desse material, devido a complicações metalúrgicas em seu processamento, muitas vezes inviabiliza seu uso. Uma alternativa de utilização seria a combinação da resistência mecânica do aço carbono com a resistência à corrosão por pites do aço inoxidável duplex, na forma de revestimento. O presente trabalho visa estudar a resistência à corrosão localizada de revestimento soldado de aço inoxidável duplex em um substrato de aço baixo carbono, onde o depósito foi feito por processo de soldagem GTAW (TIG) com alimentação automática. O processo de soldagem pode, dependendo dos parâmetros utilizados, gerar um aporte térmico elevado e, assim, conduzir a uma alta taxa de diluição e possível sensitização, condição ideal para a ocorrência de corrosão localizada, principalmente corrosão intergranular. Por meio da técnica de reatição potenciocinética de duplo ciclo (DL-EPR) foi avaliado o grau de sensitização das amostras soldadas e a susceptibilidade à ocorrência da corrosão localizada, de acordo com os parâmetros de soldagem e a taxa de diluição encontrada. Com os resultados obtidos, pôde-se concluir, principalmente, que o aumento da taxa de diluição do revestimento gera aumento do grau de sensitização e, consequentemente, aumento da susceptibilidade à corrosão localizada.

Palavras-chave: Aço inoxidável duplex; Soldagem de revestimento; Corrosão localizada; Sensitização; Diluição; DL-EPR.

ABSTRACT

Duplex stainless steels have excellent resistance to pitting corrosion combined with great mechanical strength due to its austenitic ferritic microestructure. However, the material cost and the difficulty of obtaining components completely made of this material, due to metallurgical complications in processing, often precludes their use. An alternative use would be to combine the mechanical strength of the carbon steel with the pitting corrosion resistance of duplex stainless steel, as a coating. This work aims to study the localized corrosion resistance of welded duplex stainless steel coating on a substrate of low carbon steel, where the deposit was made by TIG (GTAW) welding process with automatic alimentation. The welding process may, depending on the used parameters, generating a high heat input and thus lead to a high rate of dilution and possible sensitization, ideal condition for the occurrence of localized corrosion, particularly intergranular corrosion. By means of the electrochemical potenciokenetic reactivation with double loop technique (DL-EPR) it was evaluated the degree of sensitization of the welded samples and the susceptibility to the occurrence of localized corrosion in accordance with the welding parameters and dilution rate found. With the results obtained it was concluded primarily that increased coating dilution rate causes an increase of the degree of sensitization and consequently increased susceptibility to localized corrosion.

Keywords: Duplex stainless steel; Welded coating; Localized corrosion; Sensitization; Dilution; DL-EPR.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Equipamentos e montagem de soldagem TIG (Adaptado de MODENESI, 2011) 20
Figura 2 - Geometria desejada para a deposição de três cordões de revestimento com uma sobreposição de 40% (Adaptado de KANNAN E MURUGAN, 2006) 23
Figura 3 - Perfil geométrico desejado do cordão de solda a) união da junta soldada (aplicações convencionais); b) soldagem de revestimento (Adaptado de KANNAN E MURUGAN, 2006) 24
Figura 4 - Curvas esquemátics do ensaio de reativação potenciocinética de ciclo simples (SL-EPR) para o aço inxodável do tipo AISI 304 sensitizado e não sensitizado (ASTM G 108, 1994) 27
Figura 5 - Diagrama esquemático de reativação potenciodinâmica de duplo loop. Avaliação de Ir/Ia. Fonte: Morais, L.C. (2012). 28
Figura 6 - Amostra D4.8, antes chamada de 5.1, após as preparações, pronta para ser ensaiada. 34
Figura 7 - Foto do ensaio DL-EPR. À esquerda, esquema de montagem do ensaio, mostrando, inclusive, os eletrodos conectados; À direita, detalhe da fixação da célula de teste na amostra. 35
Figura 8 – Micrografias das amostras feitas em microscópio óptico com aumento de 200x; a) Amostra D4.8; b) Amostra D14.14; c) Amostra D23.66. 37
Figura 9 - Resultado das curvas de ativação e reativação do ensaio DL-EPR feito na amostra D4.8 no ponto 1 40
Figura 10 - Resultado das curvas de ativação e reativação do ensaio DL-EPR feito na amostra D14.14 no ponto 1 42
Figura 11 - Resultado das curvas de ativação e reativação do ensaio DL-EPR feito na amostra D23.66 no ponto 1 45
Figura 12 - Microestrutura do ponto 1 da amostra D4.8 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita. 48
Figura 13 - Microestrutura do ponto 2 da amostra D4.8 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita. 48
Figura 14 - Microestrutura do ponto 3 da amostra D4.8 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita. 49

Figura 15 - Microestrutura do ponto 1 da amostra D14.14 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita. 50
Figura 16 - Microestrutura do ponto 2 da amostra D14.14 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita. 50
Figura 17 - Microestrutura do ponto 3 da amostra D14.14 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita. 51
Figura 18 - Microestrutura do ponto 1 da amostra D23.66 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita, porém, o ataque foi diferente das demais microestruturas da mesma amostra. 52
Figura 19 - Microestrutura do ponto 2 da amostra D23.66 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita. 52
Figura 20 - Microestrutura do ponto 3 da amostra D23.66 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita. 53
Figura 21 - Gráfico de comparação da taxa de diluição com o grau de sensitização para cada amostra.....54
Figura 22 - Gráfico de comparação da corrente de soldagem com o grau de sensitização para cada amostra. 56
Figura 23- Gráfico de comparação da velocidade de alimentação do arame na soldagem com o grau de sensitização para cada amostra. 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do arame de adição segundo o fabricante. 30
Tabela 2 - Resultados de Diluição obtidos nas amostras soldadas.....32
Tabela 3 - Resultados de Ir, Ia e Ir/Ia obtidos nos ensaios na amostra D4.8. 41
Tabela 4 - Média e desvios padrão das relações Ir/Ia nos pontos da amostra D4.8. 41
Tabela 5 - Resultados de Ir, Ia e Ir/Ia obtidos nos ensaios na amostra D14.14. 43
Tabela 6 - Média e desvios padrão das relações Ir/Ia nos pontos da amostra D14.14. ..43
Tabela 7 - Resultados de Ir, Ia e Ir/Ia obtidos nos ensaios na amostra D23.66. 45
Tabela 8 - Média e desvios padrão das relações Ir/Ia nos pontos da amostra D23.66. ..46

LISTA DE SÍGLAS

TIG	Tunsgsten Inert Gas
GTAW	Gas Tunsgten Arc Welding
EPR	Electrochemical Potentiokinetic Reativation
DL-EPR	Double Loop Electrochemical Potentiokinetic Reativation
SL-EPR	Single Loop Electrochemical Potentiokinetic Reativation
AID	Aço inoxidável duplex
PRE	Pitting Resistance Equivalent
DOS	Degree of Sensitization
Eca	Potencial de Circuito Aberto
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
Ir	Densidade de Corrente de Reativação
Ia	Densidade de Corrente de Ativação
Qr	Densidade de Carga de Reativação
Qa	Densidade de Carga de Ativação

Sumário

1 INTRODUÇÃO 16

2 OBJETIVO 18

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 19

3.1 Aços Inoxidáveis Duplex 19

3.2 Soldagem TIG 20

3.3 Aporte Térmico 21

3.4 Diluição 22

3.5 Revestimento por Soldagem 23

3.6 Corrosão Localizada 25

3.7 Ensaio DL-EPR 26

4 MATERIAIS E MÉTODOS 30

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 37

5.1 Caracterização Microestrutural 37

5.2 Ensaios DL-EPR 39

5.2.1 Amostra D4.8 40

5.2.2 Amostra D14.14 42

5.2.3 Amostra D23.66 44

5.3 Análise das microestruturas observadas no MEV 47

5.3.1 Amostra D4.8 47

5.3.2 Amostra D14.14 49

5.3.3 Amostra D23.66 51

5.4 Análise da Sensitização 53

5.5 Resposta à Diluição 54

5.6 Resposta aos parâmetros de soldagem 55

6 CONCLUSÃO 59

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 60

8 ANEXOS 65

ANEXO A – Avaliação de diluição nos cordões de solda 65
ANEXO B – Medição do diâmetro da área real do teste 68
ANEXO C – Resultados os ensaios DL-EPR na amostra D4.8 69
ANEXO D – Resultados os ensaios DL-EPR na amostra D14.14 72
ANEXO E – Resultados os ensaios DL-EPR na amostra D23.66 75

1 INTRODUÇÃO

A corrosão de estruturas e equipamentos mecânicos é um meio de degradação que afeta fortemente as propriedades dos materiais e, consequentemente, reduz o tempo de vida útil do equipamento. Sua ação varia de acordo com o próprio material, com o tipo de construção do equipamento e com as características do ambiente em que opera. Portanto, é de suma importância que equipamentos mecânicos tenham boas propriedades de resistência à corrosão para que a vida desses equipamentos seja prolongada. Assim, os engenheiros responsáveis por equipamentos e plantas de processos devem levar em conta maneiras de se reduzir a ação desse fenômeno, seja desde o momento do desenvolvimento de novos equipamentos, por meio da escolha correta dos materiais e design do equipamento, seja em equipamentos já existentes e que estejam sob a ação de processos de corrosão, utilizando-se métodos de proteção contra a corrosão.

Equipamentos da indústria do petróleo e gás, indústria de papel e celulose e outros, muitas vezes devem operar em ambientes com temperaturas e pressões elevadas ou mesmo em ambientes com elevada presença de elementos que aceleram o processo de corrosão. Devido a isso, métodos simples de proteção à corrosão, como uso de inibidores em aços carbono e/ou utilização de proteções anódicas, não são suficientes para garantir boa performance, segurança e longa vida dos equipamentos. Logo, passa a ser necessária a utilização de aços inoxidáveis e ligas com alto teor de cromo e níquel, seja como material base ou como revestimentos. Devido ao alto custo desses materiais, que pode chegar a mais de dez vezes o custo de um aço carbono comum, faz-se necessário o estudo de utilização de aços inoxidáveis ferríticos/martensíticos (família 400), aços inoxidáveis austeníticos (família 300), aços inoxidáveis duplex e superduplex ou ligas com alto teor de cromo e níquel na forma de revestimentos, reduzindo assim o custo de construção dos equipamentos e garantindo as propriedades estruturais, mecânicas e de resistência à corrosão.

Um problema encontrado na aplicação de revestimento é a complexidade e o custo do processo de fabricação, o que, dependendo do processo escolhido, pode dificultar ou até impossibilitar tal aplicação. Visto que é possível fazer revestimentos por soldagem tendo boa aderência do revestimento, flexibilidade de processo –

devido ao desenvolvimento de vários métodos de soldagem e equipamentos para realizá-los – e boa viabilidade econômica, a soldagem mostra-se extremamente atrativa para a realização do revestimento.

Então, tendo-se escolhido um processo de soldagem e traçados todos os parâmetros necessários para a melhor aplicação possível do revestimento, é necessário avaliar a eficácia desse revestimento quanto à proteção do substrato à corrosão.

Esse trabalho então tem por objetivo de avaliar as propriedades do revestimento contra corrosão com base em um estudo prévio realizado por alunos da Universidade Federal do Espírito Santo que buscou traçar os melhores parâmetros de soldagem para aplicação de revestimento de aço inoxidável duplex em um substrato de aço baixo carbono, pelo processo de soldagem GTAW (TIG) com alimentação automática.

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem por finalidade avaliar as propriedades de resistência à corrosão e o impacto desse fenômeno no revestimento de aço inoxidável duplex depositado sobre um substrato de aço baixo carbono. Foram realizados ensaios de corrosão DL-EPR (*Double Loop Electrochemical Potentiokinetic Reactivation*) que buscaram avaliar, principalmente, a existência de corrosão localizada nas amostras, traçando um perfil de como a variação dos parâmetros de soldagem influenciaram na resistência à corrosão. As amostras avaliadas foram feitas utilizando-se arame de revestimento de aço inoxidável duplex UNS S39209 depositado em um substrato de aço baixo carbono pelo processo de soldagem GTAW (TIG) alimentado com deposição continua.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Aços Inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis duplex e superduplex são materiais que aliam alta resistência mecânica e elevada resistência à corrosão por pites. São ligas Fe-Cr-Ni-Mo, contendo até 0,30% em peso de nitrogênio na forma atômica, que apresentam microestruturas bifásicas compostas por uma matriz ferrítica e pela fase austenítica precipitada com morfologia arredondada e alongada. (CASTELETTI, 2012). Essa microestrutura composta por proporções quase iguais de ferrita e austenita, faz com esses aços combinem as características de aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, apresentando alta resistência à tração e resistência à fadiga, boa tenacidade, mesmo em baixas temperaturas, e soldabilidade, além de uma excelente resistência à corrosão sob tensão e à corrosão geral. (MUTHUPANDI, 2003).

A diferença principal entre aços inoxidáveis duplex e superduplex está na concentração dos elementos Cromo (Cr), Níquel (Ni), Molibdênio (Mo) e Nitrogênio (N). A concentração maior ou menor desses elementos é o principal fator a alterar as propriedades finais do material, principalmente sua resistência à corrosão por pites.

Essa propriedade pode ser quantificada pelo índice equivalente de resistência ao pite (*PRE*), que pode ser calculado, segundo a norma ASTM A890/A890M, pela *Equação 1*:

$$PRE = \%Cr + 3{,}3 \cdot \%Mo + 16 \cdot \%N \qquad (1)$$

Valores de *PRE* entre 35 e 40 são característicos de aços inoxidáveis duplex, enquanto valores maiores que 40 são característicos de aços inoxidáveis superduplex.

Devido às inovações recentes que contemplam a adição de tungstênio (W) além dos já mencionados elementos na composição desses aços, o valor de *PRE* para alguns aços pode ser calculado por:

$$PRE = \%Cr + 3{,}3 \cdot (\%Mo + 0{,}5 \cdot \%W) + 16 \cdot \%N \qquad (2)$$

3.2 Soldagem TIG

O processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas), também conhecido como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), é considerado um dos processos de soldagem a arco de melhor qualidade. O processo é versátil e pode ser usado na forma manual ou mecanizada e é mais utilizada para aços ligados, aços inoxidáveis e ligas não ferrosas (MODENESI, 2011).

O processo de soldagem TIG apresenta alta intensidade da fonte de calor, pois a maior parte do calor fica concentrada na região da poça de soldagem. Com isso, consegue-se excelente controle do aporte térmico. Devido à esses fatores, o processo TIG apresenta uma solda limpa, com poucos respingos, quando bem parametrizada. Também por isso, é um processo de soldagem que pode ser feito com metal de adição ou como solda autógena.

No processo de soldagem TIG, o calor necessário para efetuar a solda tem origem em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo permanente de tungstênio e a própria peça a ser soldada. O arco voltaico se forma em meio a um gás inerte, que tem a função adicional de proteger da oxidação, tanto o eletrodo de tungstênio, quanto o metal fundido, além de facilitar a criação de um caminho ideal para a passagem da corrente de soldagem (STREET, 1990).

Os equipamentos básicos usados na soldagem TIG (*Figura 1*) consistem de uma fonte de energia elétrica, uma tocha de soldagem apropriada, uma fonte de gás protetor, um dispositivo para a abertura do arco, cabos e mangueiras (MODENESI, 2011).

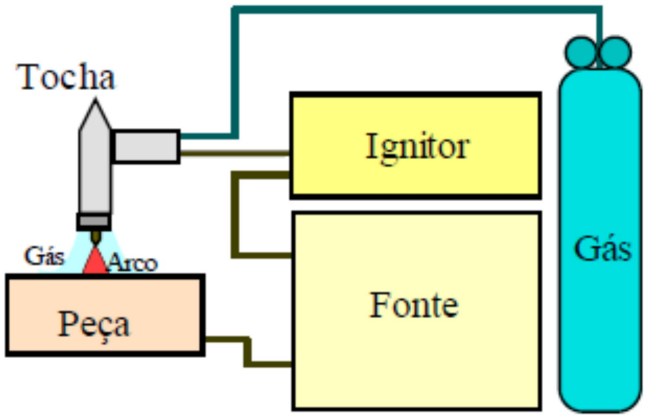


Figura 1 - Equipamentos e montagem de soldagem TIG (Adaptado de MODENESI, 2011)

Em um processo de soldagem automática, tanto a alimentação do arame quanto a tocha podem ser automatizadas para se ter um processo mais controlado. Muitas vezes até a abertura do arco de soldagem é automatizada para que se tenha a menor influência possível de erros humanos.

Em determinados processos de soldagem, muitas vezes é necessário que se tenha um grande controle de parâmetros e condições operacionais como a velocidade de alimentação do arame de solda, a velocidade de soldagem, bem como frequência, amplitude e o tipo de tecimento desejado, o que é proporcionado com resultados muito superiores quando feitos de forma automatizada.

3.3 Aporte Térmico

O aporte térmico ou energia cedida à peça durante a soldagem está diretamente ligado à diluição. Isso ocorre devido ao fato de que os parâmetros de soldagem que compõe o aporte térmico possuírem forte influência no fenômeno de diluição, principalmente a corrente, a voltagem e a velocidade de soldagem. O aumento do aporte térmico, de forma geral, proporciona maiores valores de diluição, quando comparado com solda de revestimento com menores valores de aporte térmico. A velocidade de soldagem apresenta uma influência inversamente proporcional ao aporte térmico, ao contrário da corrente de soldagem onde essa relação é diretamente proporcional. Com o aumento da velocidade de soldagem, menor será a quantidade de material de base fundido, visto que a tocha de soldagem percorrera o material de base mais rapidamente, dessa maneira haverá um decréscimo do aporte térmico e por consequência uma diminuição na diluição obtida (GUNARAJ E MURUGAN, 2000).

O aporte térmico é obtido pela razão entre a potência do arco e a velocidade de soldagem, sendo que a potência do arco é obtida pela multiplicação da corrente de soldagem pela voltagem (AWS, 1991).

Sendo assim, o aporte térmico pode ser calculado de acordo com a *Equação 3*:

$$Aporte\ Térmico = \frac{I \cdot V}{v} \cdot \eta \quad (3)$$

Onde I é a corrente de soldagem, V é a voltagem da soldagem e v é a velocidade de soldagem e η é o rendimento do processo de soldagem.

3.4 Diluição

Chama-se diluição da solda à quantidade do metal de base que se funde e participa da formação do metal de solda. A participação do metal de base na composição química do metal de solda ocorre sempre nos processos de soldagem por fusão, pois esta é a única forma de assegurar que haja a continuidade no conjunto soldado (NADEZHDIN e DAVISON, 2004).

O efeito da diluição nas transformações que podem ocorrer durante a soldagem é maior quando se solda materiais dissimilares (SILVA et al., 2009). A mistura das composições entre o metal de adição e o metal de base pode favorecer uma composição intermediária e propriedades totalmente diferentes daquelas que se esperaria para a solda (CALLISTER, 2006).

A principal diferença entre uma solda por deposição de revestimento e uma solda comum está na diluição. Soldas de revestimento exigem pequena diluição para que se mantenham as propriedades do metal de adição. Porém, é importante ressaltar que existe um grau mínimo de diluição que é necessário para que haja união metalúrgica. Quando a diluição é pequena a composição final de revestimento se aproxima da composição do metal de adição e suas características de resistência à corrosão são mantidas (KANNAN e MURUGAN; 2006).

Sendo assim, podemos definir a diluição, de forma sucinta, como sendo um grau de mistura da composição química entre o metal de adição e o metal de base. A diluição pode ser determinada por uma relação entre áreas: a área fundida do metal de base e a área total do cordão de solda. A *Equação* 4 apresenta a fórmula de cálculo, onde as áreas estão definidas na *Figura 2*.

$$\%\ Diluição = \left(\frac{B}{A+B}\right) \cdot 100 \quad (4)$$

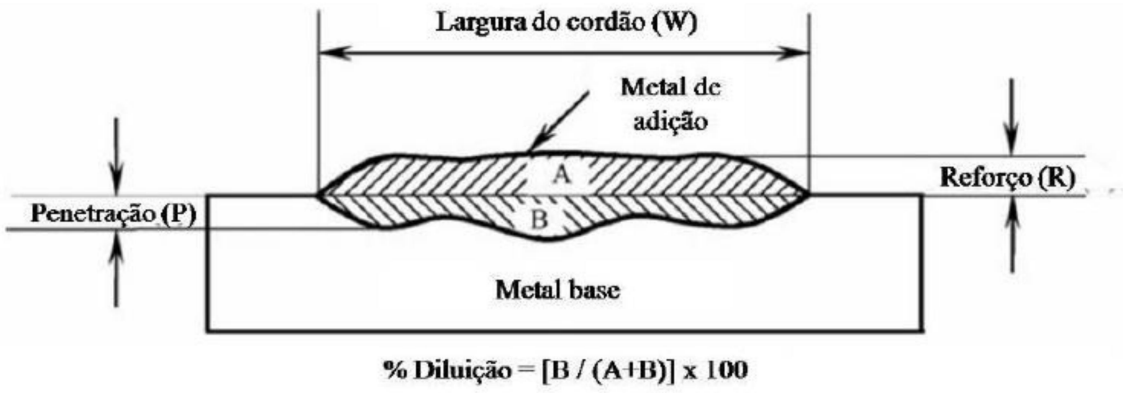


Figura 2 - Geometria desejada para a deposição de três cordões de revestimento com uma sobreposição de 40% (Adaptado de KANNAN E MURUGAN, 2006)

3.5 Revestimento por Soldagem

A sobreposição de material por soldagem é definida como a deposição de um metal de adição em um metal base (substrato) para conferir à superfície propriedades requeridas e que não são intrínsecas do metal de base. Existem diversos tipos de sobreposição por soldagem: revestimento por soldagem, material de endurecimento, ligas de enchimento e ligas de amanteigamento (DAVIS, 1994).

O revestimento por soldagem é entendido como a aplicação de uma camada relativamente fina (≥3 mm, ou 1/8 de polegada) de um material soldado com o propósito de promover uma superfície resistente à corrosão (DAVIS, 1994). Para isso, vários processos de soldagem podem ser utilizados, cada um com suas características particulares e resultados específicos, sendo que a escolha do processo ideal depende, principalmente, do material de adição e das propriedades que se deseja obter.

Um revestimento soldado deve ter espessura menor do que a espessura máxima que o processo escolhido para soldagem seja capaz de conferir, para que se tenha um revestimento de qualidade.

O principal parâmetro de controle em um revestimento é a diluição. Um revestimento com baixo grau de diluição pode acarretar na má aderência do material de adição ao material de base. Por outro lado, valores muito altos de diluição podem causar muito

mistura estre os dois materiais e, consequentemente, reduzir as propriedades do revestimento.

A principal diferença da soldagem de revestimento em relação às aplicações convencionais de soldagem, soldagem de união, diz respeito à geometria do cordão de solda. Na soldagem de união, o parâmetro mais desejável é uma boa penetração (P) para garantir a resistência da junta soldada. Já na soldagem de revestimento o perfil geométrico desejado se resume a grandes larguras do cordão (W), altos reforços (R), baixas penetrações (P) e baixos percentuais de diluição (D) (KANNAN e MURUGAN; 2006). A obtenção deste perfil geométrico característico é importante para que o processo de revestimento permita recobrir a maior área possível com o menor número de passes, resultando em economias significativas de materiais e tempo.

A *Figura 3* apresenta um esquema do cordão de solda e das dimensões anteriormente citadas para uma junta soldada e para um revestimento por soldagem, respectivamente.

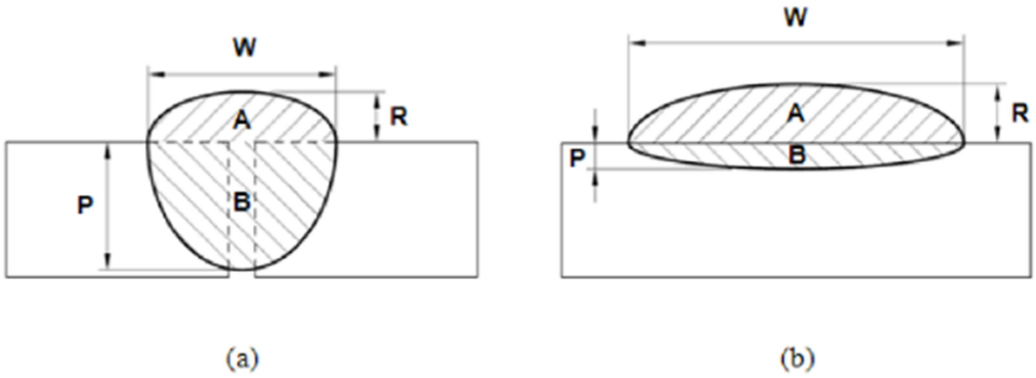


Figura 3 - Perfil geométrico desejado do cordão de solda a) união da junta soldada (aplicações convencionais); b) soldagem de revestimento (Adaptado de KANNAN E MURUGAN, 2006)

3.6 Corrosão Localizada

A corrosão localizada é um mecanismo de corrosão extremamente perigoso devido ao seu difícil monitoramento. Normalmente não dá sinal de sua ocorrência, só sendo percebida quando há falha do material. Os aços inoxidáveis duplex tem boa resistência a um tipo de corrosão localizada, que é a corrosão por pites. Porém, esses são susceptíveis à corrosão intergranular que, como o próprio nome já diz, é um mecanismo de corrosão que ocorre na região de contorno dos grãos do material.

De uma maneira geral, somente ligas metálicas estão sujeitas a esse tipo de corrosão, uma vez que a explicação mais aceita para sua ocorrência está atribuída à precipitação de componente da liga preferencialmente no contorno de grão.

Aços inoxidáveis são extremamente susceptíveis a esse tipo de corrosão devido à sua composição. A corrosão intergranular nos aços inoxidáveis é geralmente resultado da sensitização, termo usualmente empregado para descrever tratamentos térmicos que tornam, ou podem tornar uma liga susceptível à corrosão intergranular (MAGRI e ALONSO, 1995).

A sensitização dos aços inoxidáveis se dá devido à precipitação de carbonetos ricos em cromo nos contornos de grão. O crescimento destes carbonetos faz surgir nas suas adjacências uma zona empobrecida em cromo. Quando estes permanecem por um determinado tempo na faixa de 550ºC a 850ºC ficam susceptíveis ao ataque preferencial num meio corrosivo (oxidante). (SHREIR, 1996). Os principais tipos de carbonetos que podem precipitar nos aços inoxidáveis austeníticos são: M23C6, MC, M7C3 e M2C (TEODORO e WOLYNEC, 1995).

Quando submetidos a uma temperatura crítica, ocorre precipitação de carbonetos na região de contorno de grão, gerando uma deficiência em cromo nessas regiões, devido à diferença nas velocidades de difusão do cromo e do carbono na austenita. Como o cromo é o elemento chave para a formação da película protetora nesses aços, a deficiência desse elemento na região de contorno de grãos leva à quebra do filme passivo, tornando esses aços mais susceptíveis à corrosão intergranular e à corrosão sob tensão (SEDRIKS, 1996).

Para que o aço não fique sujeito à corrosão intergranular a região adjacente ao contorno de grão não deverá apresentar teor de cromo inferior a 12%. Além disso, a

sensitização é mais intensa em aços com maiores teores de carbono e aumenta com o aumento do tempo de exposição do material à temperatura crítica.

Como os aços inoxidáveis duplex contém quantidades semelhantes de ferrita e austenita em sua composição, esses aços estão sujeitos a esse tipo de corrosão, principalmente quando aquecidos para trabalho a quente ou quando submetidos à soldagem, tratamentos térmicos ou quando trabalham em certa faixa de temperatura.

3.7 Ensaio DL-EPR

A técnica eletroquímica de reativação potenciocinética (*eletrochemical potentiokinectic reactivation – EPR*) é uma técnica de análise que permite determinar, por meio da polarização potenciocinética, a suscetibilidade de um aço inoxidável à corrosão localizada.

Essa técnica pode ser dividida, basicamente, em duas formas: o ensaio de ciclo simples (*SL-EPR*) e o ensaio de ciclo duplo (*DL-EPR*). Inicialmente estes ensaios foram desenvolvidos por Majidi e Streicher e normalizados para aços inoxidáveis austeníticos 304 e 304L, e, mais recentemente, têm sido utilizados para a investigação do comportamento eletroquímico dos aços inoxidáveis dúplex. A norma que rege os padrões de ensaio para os aços inoxidáveis austeníticos é a ASTM G 108 (1994).

O ensaio EPR de ciclo simples consiste, na sua essência, em proceder ao levantamento numa solução ácida de uma curva de polarização do aço, por meio da técnica potenciocinética, a partir da região passiva até o potencial de corrosão, conforme representado na *Figura 4*. Antes de ser atingido o potencial de corrosão, o aço passa pela região ativa, na qual a densidade de corrente aumenta, atinge um máximo e depois decresce até valor nulo de potencial de corrosão. Tem-se assim uma reativação da superfície metálica, o que justifica o nome atribuído à técnica. (WOLYNEC, 2003).

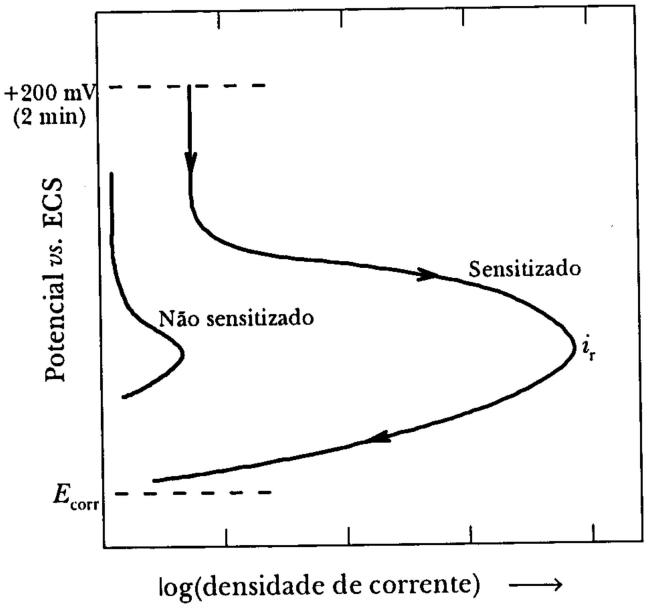


Figura 4 - Curvas esquemátics do ensaio de reativação potenciocinética de ciclo simples (SL-EPR) para o aço inxodável do tipo AISI 304 sensitizado e não sensitizado (ASTM G 108, 1994)

O ensaio de ciclo duplo difere do de ciclo simples na preparação da amostra e também no ciclo de varrimento potencioestático. Ao invés de a amostra ser polarizada a partir da passivação, a varredura é feita a partir do potencial de corrosão até um potencial em que o material fique passivado. Em seguida a direção de varredura é invertida e a amostra é polarizada de volta ao potencial de corrosão. Ou seja, a varredura de reativação é precedida por uma polarização anódica a partir do potencial de circuito aberto (E_{ca}) até potencial determinado na região passiva, seguido de reversão na direção de varredura de volta ao E_{ca}. (MORAIS, 2012).

Com isso, obtêm-se duas curvas: a curva de ativação e a de reativação. A partir dessas curvas são retirados o valor máximo da densidade de corrente de ativação (I_a) e o valor máximo da densidade de corrente de reativação (I_r), como representado pela *Figura 5*. O grau de sensitização do aço (*DOS – Degree of Sensitization*) é calculado pela razão entre I_r e I_a, como mostra a *Equação 5*:

$$DOS = \frac{I_r}{I_a} \qquad (5)$$

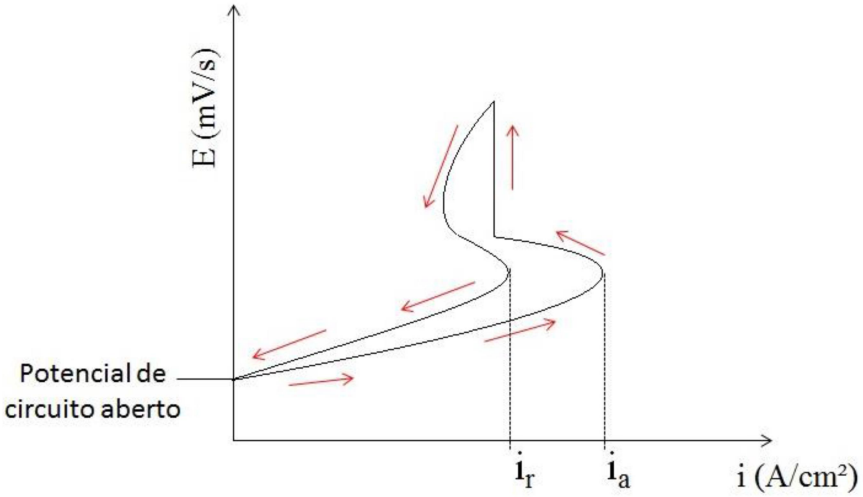


Figura 5 - Diagrama esquemático de reativação potenciodinâmica de duplo loop. Avaliação de Ir/Ia. Fonte: Morais, L.C. (2012).

A preparação da amostra para os dois testes se difere, pois, o emprego da polarização anódica no ensaio DL-EPR dispensa um polimento mais acurado da amostra, sendo suficiente o polimento com lixa até a grana 100, enquanto no ensaio de ciclo simples o polimento requerido é até a pasta de diamante de 1μm. A polarização anódica se encarrega de completar o polimento da amostra e, além disso, ela dissolve as inclusões não metálicas que podem induzir a corrosão por pite. (WOLYNEC, 2003).

Para os aços inoxidáveis dúplex dois máximos de densidade de corrente são observados na ativação, e em alguns casos também na reativação. Este comportamento ocorre devido à dissolução seletiva das fases ferrita e austenita presentes na ativação e das fases secundárias formadas em decorrência da formação de fases intermetálicas como sigma e chi na reativação. (CHAVEZ, R.; WOLYNEC, S., 2003).

De acordo com estudos de MORAIS, L. C., a fim de se determinar a solução mais adequada para a realização de ensaios DL-EPR no aço inoxidável dúplex UNS S31803, observou-se que a solução 2M H_2SO_4 + 0,5M NaCl + 0,01M KSCN a 30°C, considerada a mais indicada dentre as estudadas para o estudo do grau de sensitização do aço UNS S31803. Com esta solução foram observados nas curvas de polarização 2 máximos de densidade de corrente na ativação e 2 na reativação, o

que possibilita a determinação dos valores dos graus de sensitização para cada fase do material. Esta solução apresentou menor desvio padrão entre as medidas dos graus de sensitização das amostras, e consequentemente maior reprodutibilidade de ensaio.

Outra solução que pode ser utilizada ao invés da mencionada anteriormente é composta por 33% de H_2SO_4 e 0,3% de HCl, ambos em volume. A escolha do HCl como elemento depassivador parece levar à uma melhor eficiência do teste (Ir/Ia>>1%). Além disso, o uso do HCl também garante alta sensibilidade no que diz respeito às pequenas zonas de depleção de cromo (AMADOU, BRAHAM e SIDHOM, 2004).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação da susceptibilidade à corrosão intergranular do revestimento de aço inoxidável duplex as amostras foram preparadas aplicando-se um revestimento de aço inoxidável duplex da classe, UNS S31209 ou ER 2209 ou AWS A-5.9/A5.9M de diâmetro de 1,20 mm em um substrato de aço baixo carbono comum ABNT 1020. A aplicação do revestimento foi feita pelo processo TIG (GTAW) alimentado e variando-se alguns dos parâmetros de soldagem, visando chegar à melhor qualidade de revestimento. A *Tabela 1* mostra a composição química detalhada do material de adição segundo o fabricante Weld-Inox.

Tabela 1 - Composição química do arame de adição segundo o fabricante.

Elemento	Porcentagem em Massa
Carbono	0,03%, Máximo.
Cromo	21,5% – 23,5%
Níquel	7,5% – 9,5%
Enxofre	0,03%, Máximo.
Fósforo	0,03%, Máximo.
Silício	0,90%, Máximo.
Molibdênio	2,5% - 3,5%
Cobre	0,75%, Máximo.
Nitrogênio	0,08% - 0,20%
Manganês	0,5 – 2,0

As soldas foram realizadas no Laboratório de Soldagem da UFES à temperatura ambiente (aproximadamente 27°C) e sem controle de temperatura durante o processo ou durante o resfriamento. Os equipamentos utilizados foram a fonte de soldagem DigiPlus A7 – IMC Soldagem, sistema de tecimento automático Tartílope V2 – IMC Soldagem e um sistema tracionador de arame STA-20D, também da IMC Soldagem. Dessa forma, os parâmetros de perfil e frequência de tecimento, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação e corrente de soldagem puderam ser controlados. Além disso, o gás de proteção utilizado foi o gás Argônio

99,5% e a tocha de soldagem é modelo padronizado de cerâmica com 11mm, tamanho 7. A posição utilizada na soldagem foi a posição 1G, ou horizontal, mantendo a tocha a uma distância de 5 mm de distância da poça de fusão.

Para a aplicação do revestimento, foram separadas placas de aço baixo carbono com dimensões de 200 mm de comprimento, 63 mm de largura e 9,5 mm de espessura, onde foram feitos dois cordões de solda em cada placa, variando-se parâmetros de soldagem. Inicialmente foram feito alguns pré-testes de forma a obter um range inicial dos parâmetros a serem avaliados. O perfil de tecimento escolhido foi o triangular e durante esses testes, foram os parâmetros de tecimento que mostraram melhores resultados foram amplitude de 17 mm, frequência de 0,4Hz e tempo de parada de 0,2 segundos. Com esses parâmetros fixos programados no Tartílope, os parâmetros de velocidade de soldagem, corrente e velocidade de alimentação do arame foram variados de acordo com um planejamento fatorial feito pelos executantes do trabalho para avaliação da influência de cada um desses parâmetros na qualidade final da solda. Informações adicionais sobre os processos podem ser encontradas no trabalho de Lima e Corteletti, descrito nas referências.

Conforme dito anteriormente, a diluição é um fator que interfere muito na composição final do revestimento soldado e, consequentemente, em suas propriedades finais. Sendo assim, é de grande influência para a resistência à corrosão. A *Tabela 2* abaixo mostra os parâmetros de soldagem utilizados em cada cordão, bem como os resultados da análise da porcentagem de diluição das amostras obtidos no trabalho de Lima e Corteletti.

Tabela 2 - Resultados de diluição obtida nas amostras soldadas (Lima e Corteletti, 2015).

Placa	Experimento	Veloc. Soldagem (cm/min)	Amplitude (mm)	Veloc. Alimentação (m/min)	Corrente (A)	Área Fundida (mm²)	Área Total (mm²)	Diluição (%)
3	**3.1**	10	17	3	280	4,160	38,181	10,90
	3.2	10	17	2	280	5,791	33,182	17,45
4	**4.1**	10	17	2	300	6,247	33,932	18,41
	4.2	10	17	3	300	5,176	48,363	10,70
5	**5.1**	8	17	3	280	2,694	56,126	4,80
	5.2	8	17	2	280	6,070	42,922	14,14
6	**6.1**	8	17	2	300	10,484	44,306	23,66
	6.2	8	17	3	300	6,455	55,339	11,66

Para a realização dos ensaios DL-EPR foram selecionadas três amostras dentre as apresentadas na tabela acima. O critério de seleção das amostras foi o grau de diluição, visando escolher amostras que mostrem um resultado significativo.

Com base nisso, para que o resultado esperado seja abrangente dentro das faixas de diluição encontradas, buscou-se escolher uma amostra com baixo grau de diluição e uma amostra com alto grau de diluição, representado, assim, os extremos encontrados, e uma amostra com grau de diluição que esteja na média. O Anexo A mostra as figuras das análises de diluição de cada amostra, feitas medindo-se a área com um estereoscópio. Sendo assim, as amostras escolhidas para se fazer os ensaios DL-EPR são a 5.1, 5.2 e 6.1.

Para facilitar a identificação das amostras, a nomenclatura foi alterada para associar de forma mais direta a amostra ao seu grau de diluição. Sendo assim, a nova nomenclatura adotada segue o padrão Dxxxx, sendo a letra “D” o indicativo para diluição e sendo o número o grau de diluição de cada amostra. Portanto, chamaremos agora como segue:

- Amostra 5.1: D4.8
- Amostra 5.2: D14.14
- Amostra 6.1: D23.66

Antes da realização dos ensaios as amostras precisaram passar por uma preparação. Como as amostras já haviam sido cortadas na metade do cordão para avaliação da qualidade da solda e da diluição, essa metade foi cortada novamente, deixando o comprimento final da amostra a ser ensaiada com aproximadamente 20 mm. Esse corte foi feito no laboratório TRICORRMAT na UFES utilizando-se a mesa de corte Discotom-100/-10, onde o corte é feito com resfriamento. Após o corte, foi necessário deixar os cordões de solda com a face plana para acomodar a célula de ensaio. Para isso, as amostras foram levadas ao Laboratório de Usinagem da UFES para que fossem fresadas. O processo de fresamento foi feito retirando-se material de forma que o cordão de solda ficasse com uma área plana suficiente em sua parte superior e de forma que todas as amostras permanecessem com, no mínimo, 1,3 a 1,5 mm de reforço no cordão de solda, os quais foram medidos com paquímetro para garantir esse valor mínimo. Esse valor foi estipulado apenas de forma a tentar garantir que superfície a ser testada encontra-se apenas na zona de material depositado, e não na zona fundida entre o metal depositado e o metal de base. O fresamento foi feito sem uso de fluido de corte ou qualquer resfriamento.

Para completar a preparação das amostras, foi feito um processo de lixamento em que cada uma delas foi lixada com lixas de grana 220, 320, 400 e 600, respectivamente, sendo feita rotação no sentido de lixamento de 90° entre uma lixa e a posterior. Apesar de o ensaio DL-EPR não requisitar lixamento tão acurado já que a polarização anódica se encarrega do polimento da área de teste, o mesmo foi realizado no intuito de melhorar a qualidade da superfície devido à pequena área de testes da célula utilizada.

Por último, para que não houvesse mal contato no fio de ligação com a amostra e para facilitar a ligação no equipamento, foi feito um pequeno corte no metal de base, fora da área de testes, em cada amostra para fixar um fio para ligação com o potenciostato.

Por fim, de forma a melhorar a identificação da amostra e os pontos de ensaio, foram coladas fitas que mostram o centro do cordão de solda, bem como uma fita com o número da amostra e as numerações 1, 2 e 3. Essas numerações indicam os pontos da amostra a serem feitos os ensaios e foram marcados no mesmo sentido do passe de solda. Sendo assim, o ponto 1 representa a região inicial, o ponto 2 a

região intermediária e o ponto 3 representa a região final do cordão de solda. A *Figura 6* mostra o resultado final da preparação das amostras.

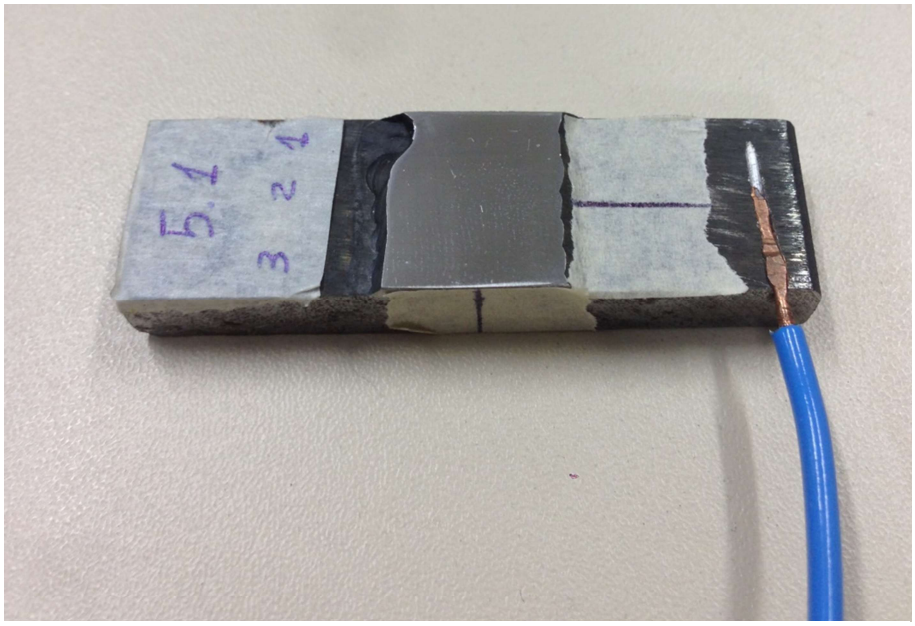


Figura 6 - Amostra D4.8, antes chamada de 5.1, após as preparações, pronta para ser ensaiada.

Com todas as amostras preparadas, os ensaios puderam ser iniciados. Foi utilizado um potenciostato Metrohm Autolab PGSTAT302N do laboratório TRICORRMAT na UFES. A célula utilizada foi feita no próprio laboratório pelo estudante André Canal e a área efetiva de ensaio possui área circular de aproximadamente 11,95 mm², medida por meio de um estereoscópio. No Anexo B é possível ver as figuras das medidas feitas na amostra D14.14 para avaliação da área de ensaio. A *Figura 7* apresenta detalhes de construção da célula e fixação na amostra.

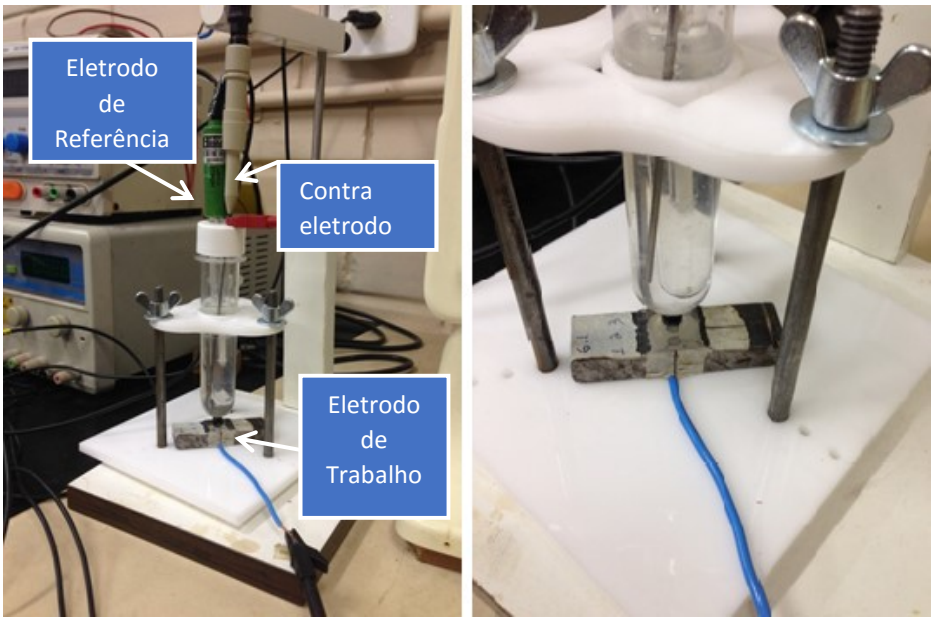


Figura 7 - Foto do ensaio DL-EPR. À esquerda, esquema de montagem do ensaio, mostrando, inclusive, os eletrodos conectados; À direita, detalhe da fixação da célula de teste na amostra.

Para o aço inoxidável duplex UNS S31803, cuja composição química é bastante semelhante ao UNS S39209 aqui utilizado, foi observado por MORAIS, L.C. que a solução 2M H_2SO_4 + 0,5M NaCl + 0,01M KSCN a 30°C é a mais indicada já que apresentou menor desvio padrão entre as medidas dos graus de sensitização das amostras, e consequentemente maior reprodutibilidade de ensaio. Por isso, essa foi a solução escolhida para se fazer os ensaios. Porém, nos ensaios realizados não houve controle de temperatura, sendo feitos sempre na temperatura ambiente. Posteriormente, essa solução foi substituída por outra, composta por 33% de H_2SO_4 e 0,3% de HCl. A razão da substituição do eletrólito será explicada posteriormente.

O eletrodo de referência e o contra eletrodo utilizado nos experimentos foram o Calomelano Saturado e o de Platina, respectivamente.

Visando conhecer se houve sensitização ao longo do cordão de solda, as medições foram feitas em três pontos, já citados anteriormente. Ainda, para garantir boa amostragem dos resultados, foram feitas duas medições em cada ponto de cada amostra, com uma terceira repetição do ponto que apresentou maior desvio no valor da relação Ir/Ia, totalizando sete ensaios por amostra. Assim, pode-se dar um resultado mais apurado do valor do grau de sensitização obtido.

Além do DL-EPR, as amostras também foram analisadas no microscópio óptico, onde foram feitas micrografias com o intuito de se fazer caracterização microestrutural da região de ataque. Além disso, também foram levadas para análise no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da UFES. Essa análise foi feita para avaliar se durante a soldagem houve mudança na microestrutura no cordão. As análises no MEV foram feitas após o primeiro ensaio e nas três regiões ensaiadas de cada amostra, sob o mesmo aumento, podendo assim ser comparadas umas com as outras.

Ao fim dos ensaios DL-EPR, visto que seria interessante fazer análise microestrutural de cada amostra, as mesmas foram levadas para análise no microscópio óptico para a realização das micrografias, que foram feitas com aumento de 200 vezes em uma das áreas de ensaio de cada amostra. As micrografias foram feitas no ponto 2 das amostras D4.8 e D14.14 e no ponto 1 da amostra D23.66 devido a ser o único ponto dessa amostra que havia um ensaio realizado naquele momento, não sendo necessário fazer outro ensaio. Nenhum ataque químico foi feito para revelar a microestrutura além do ataque do próprio ensaio DL-ERP, onde se consegue ver a diferença entre ferrita, que sofreu ataque acentuado, e a austenita.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização Microestrutural

A análise da microestrutura de cada amostra é o ponto inicial a ser feito para conhecer as características de cada uma delas e poder relacioná-las com os parâmetros de soldagem e a diluição. A *Figura 8* mostra as micrografias feitas nas amostras D4.8, D14.14 e D23.66.

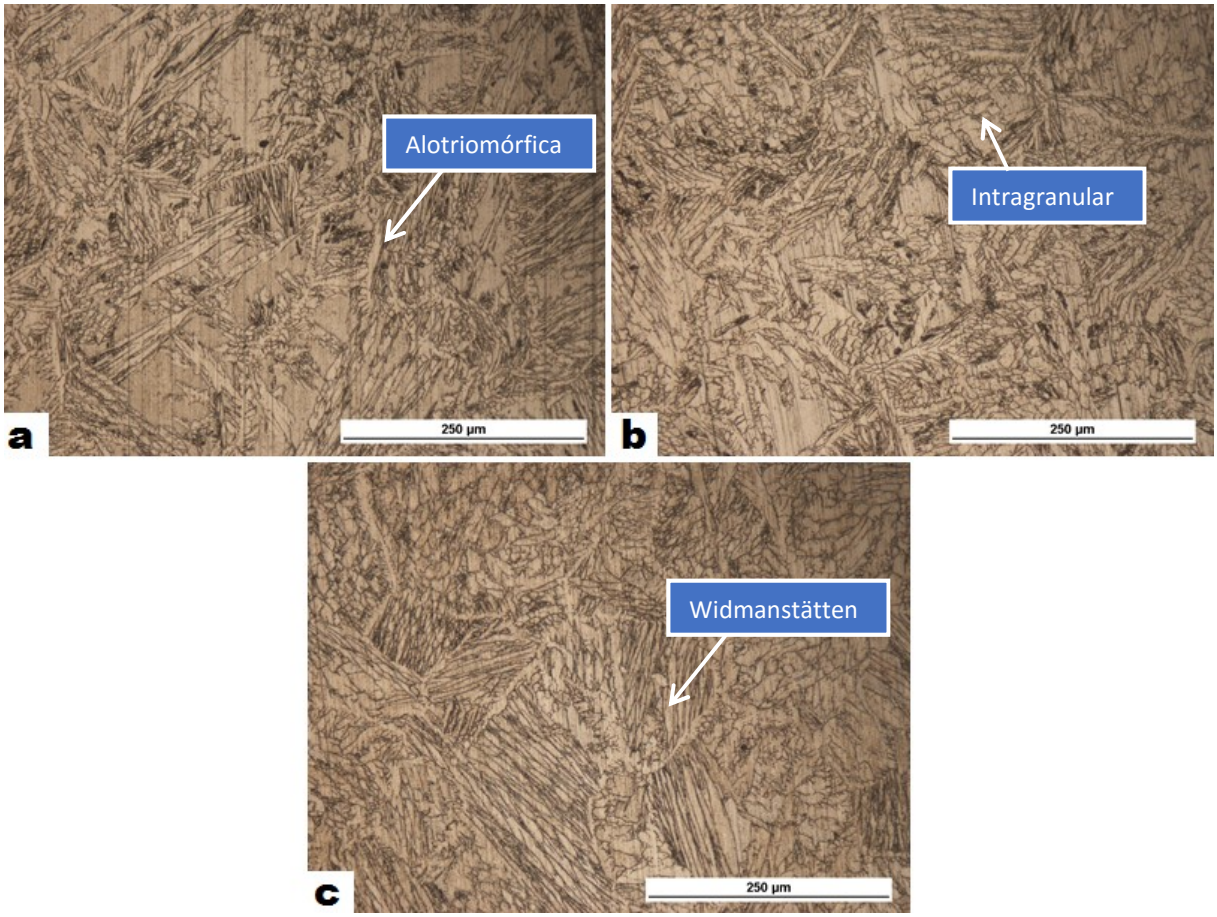


Figura 8 – Micrografias das amostras feitas em microscópio óptico com aumento de 200x; a) Amostra D4.8; b) Amostra D14.14; c) Amostra D23.66.

É notável na *Figura 7* que há diferenças de microestrutura de uma amostra para outra. Como os parâmetros de soldagem foram diferentes para cada processo, a energia de soldagem também foi diferente. Como consequência, as taxas de

transferência de calor são diferentes para cada amostra, a taxa de resfriamento também.

O resfriamento não foi controlado, portanto não se sabe ao certo qual foi a taxa de resfriamento para cada amostra e nem o tempo que cada uma levou para ser totalmente resfriada.

Na análise das três micrografias, observam-se microestruturas com a presença de austenita com morfologias dos tipos alotriomórfica, Widmanstätten (lamelar) e intragranular (com morfologia mais arredondada), mas em quantidades diferentes em cada amostra.

A austenita alotriomórfica, que é formada a altas temperaturas, nucleia heterogeneamente nos contornos de grão da ferrita durante o resfriamento, sendo formada possivelmente por um mecanismo de transformação difusional. Depois da austenita alotriomórfica formada, a morfologia Widmanstätten nucleia nos contornos de grão da ferrita ou da austenita alotrimórfica pré-existente e cresce ao longo de planos específicos da matriz como placas paralelas (UREÑA, OTERO, UTRILLA e MÚNEZ, 2007). Por último, há a nucleação da austenita intragranular nos grãos de ferrita. Estas são precipitadas a temperaturas mais baixas devido à supersaturação da matriz ferrítica, como foi verificado no trabalho de Atamert e King, 1991.

Com base nessas informações, é possível ver que todas as amostras apresentam a formação de austenita alotriomórficas nos contornos de grão da ferrita. Porém na amostra D23.66, que foi a que teve maior energia de soldagem e maior diluição, devido à alta corrente combinada à baixa velocidade de alimentação, existe grande quantidade de austenita de Widmanstätten, possivelmente devido à essa maior energia, o que permitiu sua nucleação a partir, principalmente, da austenita alotriomórfica.

Na amostra D4.8, que foi a amostra com menor energia de soldagem (devido à combinação de alta velocidade de alimentação com mais baixa corrente) e, consequentemente, a menor diluição, observa-se a presença em maior quantidade de austenita intragranular do que nas demais amostras. A menor energia de soldagem pode ser responsável por menores temperaturas e favorecimento da formação dessa morfologia. Porém, ainda assim nota-se a presença da austenita alotriomórfica e também da Widmanstätten.

Por fim, a amostra D14.14, estando numa faixa de aporte térmico intermediário comparando-se com as amostras supracitadas, também apresentou microestrutura com características intermediárias quando se compara com as demais amostras. As três morfologias da austenita são observadas, mas a de Widmanstätten aparece em menor quantidade do que na amostra D23.66 e a intergranular é menos frequente que o visto na amostra D4.8.

Isso mostra que a diferença na quantidade de energia de soldagem em cada amostra levou a comportamentos diferentes em cada cordão e diferenças consideráveis nas microestruturas.

5.2 Ensaios DL-EPR

Inicialmente os ensaios foram realizados com o eletrólito composto por 2M H_2SO_4 + 0,5M NaCl + 0,01M KSCN, com taxa de varredura de 1,67 mV/s. Esse eletrólito, apesar de ser indicado para o material em questão, apresentou pico de reativação muito pequeno para todas as amostras, o que levaria a concluir que nenhuma amostra havia sensitizado e, consequentemente, não seria possível tirar conclusões consideráveis sobre a susceptibilidade à corrosão localizada comparando com as diferentes taxas de diluição de cada amostra.

De forma a tentar resolver o problema, uma nova solução foi testada, agora composta por 33% de H_2SO_4 e 0,3% de HCl, e utilizando-se taxa de varredura de 2,5 mV/s. A nova solução apresentou resultados mais sensíveis, mostrando de melhor forma as diferenças no grau de sensitização de cada amostra.

O trabalho de AMADOU, BRAHAM e SIDHOM (2004) mostrou que a concentração de HCl em 0,3% em volume é o valor limite para que haja estabilização dos valores de Ir/Ia. Além disso, para essa solução, a varredura foi variada de 0,5 a 5 mV/s, sendo encontrado valores ótimos de resposta com a taxa em 2,5 mV/s. Sendo assim, esses foram os valores aqui utilizados.

Não é o intuito do presente trabalho apresentar comparações entre os resultados obtidos utilizando-se os dois tipos diferentes de eletrólitos e nem variações de parâmetros de ensaio, como, por exemplo, a taxa de varredura e a temperatura do

eletrólito. Porém, ficam como sugestão para trabalhos posteriores essas comparações.

Os resultados obtidos nos ensaios serão mostrados e discutidos a seguir, separadamente para cada amostra.

5.2.1 Amostra D4.8

A amostra D4.8 foi, dentre todas as soldas feitas, a que apresentou menor taxa de diluição, sendo esse valor igual a 4,80%. De forma geral, todos os ensaios mostraram curvas com perfil semelhante, apresentando apenas pequenas variações na densidade de corrente na ativação e na reativação. Este resultado já era desejado para que pudessem ser comparados os valores do grau de sensitização (Ir/Ia) nos diferentes pontos das amostras, sem que outros fatores pudessem intervir nessa comparação. A seguir está mostrado na *Figura 9*, o resultado da primeira medição do ponto 1 da amostra D4.8. Os demais gráficos dos outros ensaios podem ser vistos no Anexo C.

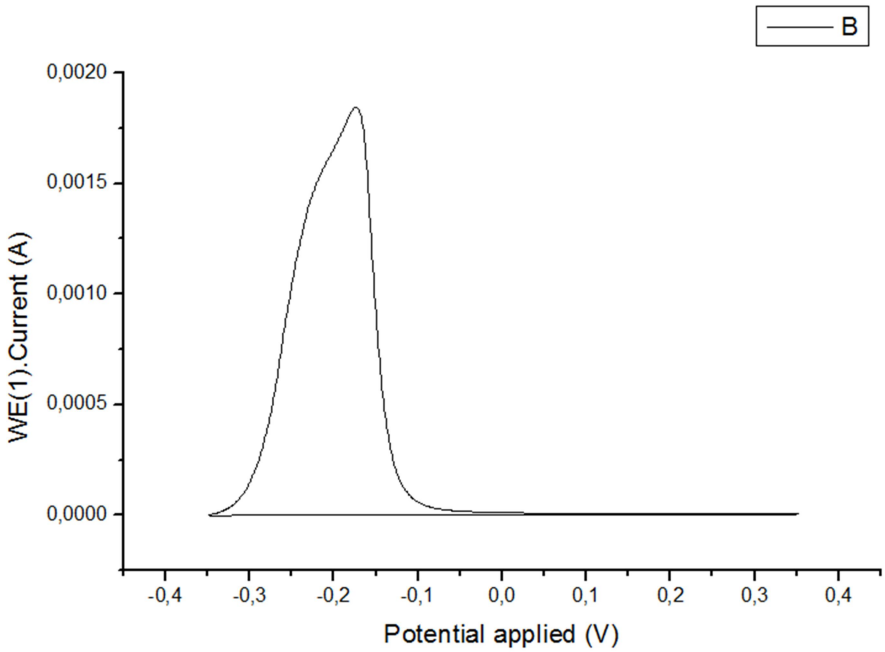


Figura 9 - Resultado das curvas de ativação e reativação do ensaio DL-EPR feito na amostra D4.8 no ponto 1 .

Os resultados de Ir e Ia, bem como o cálculo da relação Ir/Ia obtidos em cada ensaio dessa amostra podem ser vistos na *Tabela 3* a seguir.

Tabela 3 - Resultados de Ir, Ia e Ir/Ia obtidos nos ensaios na amostra D4.8.

Amostra D4.8				
Medição	**Ponto**	**Ia**	**Ir**	**Ir/Ia**
1ª Medição	Ponto 1	0,00185	4,31E-06	0,00233
	Ponto 2	0,00180	1,13E-05	0,00628
	Ponto 3	0,00167	6,29E-06	0,00377
2ª Medição	Ponto 1	0,00171	4,52E-06	0,00264
	Ponto 2	0,00152	8,09E-06	0,00532
	Ponto 3	0,00196	4,82E-06	0,00246
3ª Medição	Ponto 2	0,00175	1,19E-05	0,00680

Buscando visualizar a homogeneidade dos valores obtidos na medição de cada ponto da amostra, a *Tabela 4* apresenta os resultados dos cálculos dos valores médios do grau de sensitização em cada ponto da amostra com seus respectivos desvios padrão. Além disso, foi calculada também a média de Ir/Ia em toda amostra e o desvio padrão total da mesma.

Tabela 4 - Média e desvios padrão das relações Ir/Ia nos pontos da amostra D4.8.

Amostra D4.8 – Análise de Resultados		
	Média de Ir/Ia	**Desvio Padrão**
Ponto 1	0,00249	0,00022
Ponto 2	0,00613	0,00075
Ponto 3	0,00311	0,00092
Total da Amostra	0,00423	0,00189

A análise dos valores da *Tabela 4* nos mostra que o ponto 2, por ter sido o ponto onde foi realizada uma terceira medição, apresentou desvio padrão relativamente baixo. O ponto 1 apresentou a menor divergência entre os valores medidos, enquanto o ponto 3 apresentou desvio considerável. Apesar disso, pode-se dizer

que os valores medidos apresentaram boa homogeneidade uma vez que apenas o ponto 2 teve, em todas as suas medições, valores mais altos que os demais. Isso pode ser explicado devido ao próprio processo de soldagem TIG levar a uma convecção relativamente acentuada do metal fundido, o que causa grande mistura na poça e, consequentemente, pode levar a certas diferenças de propriedades em pontos localizados.

5.2.2 Amostra D14.14

A amostra D14.14 foi a que apresentou o valor da taxa de diluição mais próximo da média geral entre todos os cordões soldados, apresentando taxa de diluição de 14,14%. De certa forma, essa amostra pode ser vista como controle, uma vez que ela não apresenta as condições extremas das outras amostras avaliadas, diluição muito baixa ou muito alta.

Assim como visto na amostra anterior, o perfil das curvas de ativação e reativação em todos os ensaios se manteve bem semelhante. Sendo assim, está representado na *Figura 10* o resultado do primeiro ensaio realizado no ponto 1 dessa amostra. Os demais gráficos dos ensaios podem ser vistos no Anexo D.

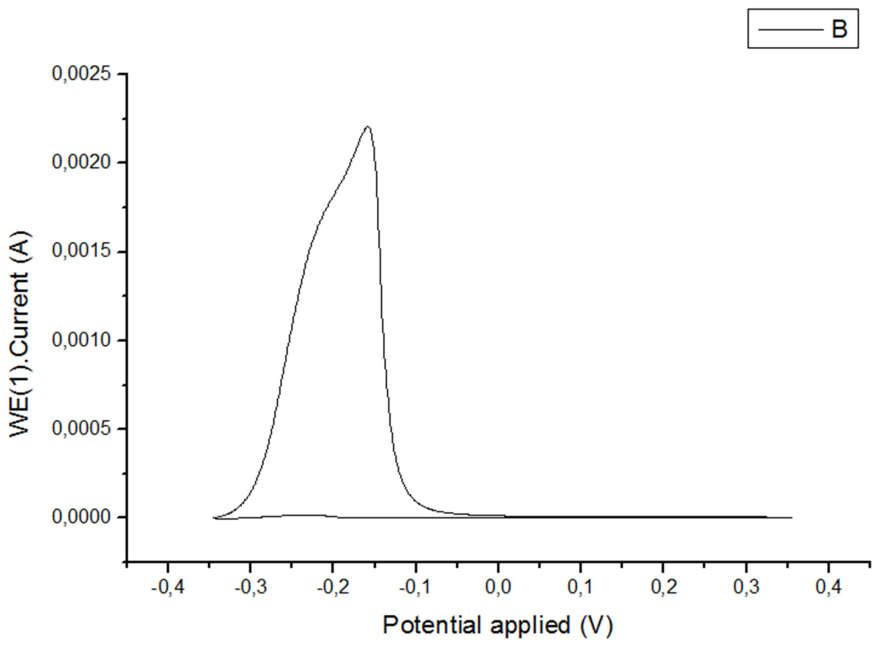


Figura 10 - Resultado das curvas de ativação e reativação do ensaio DL-EPR feito na amostra D14.14 no ponto 1 .

A *Tabela 5* apresenta os valores encontrados nos ensaios da amostra D14.14.

Tabela 5 - Resultados de Ir, Ia e Ir/Ia obtidos nos ensaios na amostra D14.14.

Amostra D14.14				
Medição	**Ponto**	**Ia**	**Ir**	**Ir/Ia**
1ª Medição	Ponto 1	0,00221	1,86E-05	0,00842
	Ponto 2	0,00218	1,77E-05	0,00812
	Ponto 3	0,00221	1,18E-05	0,00534
2ª Medição	Ponto 1	0,00199	1,46E-05	0,00734
	Ponto 2	0,00201	2,01E-05	0,01000
	Ponto 3	0,00190	1,58E-05	0,00832
3ª Medição	Ponto 3	0,00186	7,39E-06	0,00397

A *Tabela 6* apresenta as médias das relações Ir/Ia em cada ponto e também na amostra toda, bem como os respectivos desvios padrão para facilitar a análise.

Tabela 6 - Média e desvios padrão das relações Ir/Ia nos pontos da amostra D14.14.

Amostra D14.14 – Análise de Resultados		
	Média de Ir/Ia	**Desvio Padrão**
Ponto 1	0,00788	0,00076
Ponto 2	0,00906	0,00133
Ponto 3	0,00588	0,00222
Total da Amostra	0,00736	0,00205

A análise dos valores da tabela acima nos mostra que o ponto 1 apresentou pequena variação entre as medidas. O ponto 2, apesar de ter mostrado desvio padrão considerável, pode-se dizer que ainda há certa homogeneidade nos valores medidos. O ponto 3, onde foi feita a terceira medição, apresentou grande diferença entre medidas. Observando separadamente cada um dos valores de Ir/Ia para esse ponto nas diferentes medições, apresentado na *Tabela 5*, observa-se que a variação desses valores se deu de forma aleatória.

Essa grande variação nas medidas do ponto 3, somada ao fato de os valores médios em cada um dos pontos também apresentar um desvio considerável, compromete a análise de homogeneidade dos valores obtidos, sendo então, arriscado comparar o grau de sensitização em cada ponto. Apesar disso, como os pontos estão dispostos bem próximos uns aos outros, o valor do grau de sensitização para a amostra como um todo ainda pode (e será) ser utilizado na análise da susceptibilidade dessa amostra à corrosão.

5.2.3 Amostra D23.66

A amostra D23.66 foi a que apresentou maior grau de diluição dentre todas as soldas realizadas, de 23,66%. A *Figura 11* a seguir mostra como foi o comportamento das curvas obtidas nos ensaios DL-EPR. Assim como ocorreu nas outras amostras, todos os ensaios mostraram curvas com perfil semelhante, tanto na ativação quanto na reativação. No primeiro ponto dessa amostra, o pico de reativação foi maior que nos demais ensaios realizados. Porém, mesmo assim o comportamento geral se manteve. Os demais gráficos dos outros ensaios podem ser vistos no Anexo E.

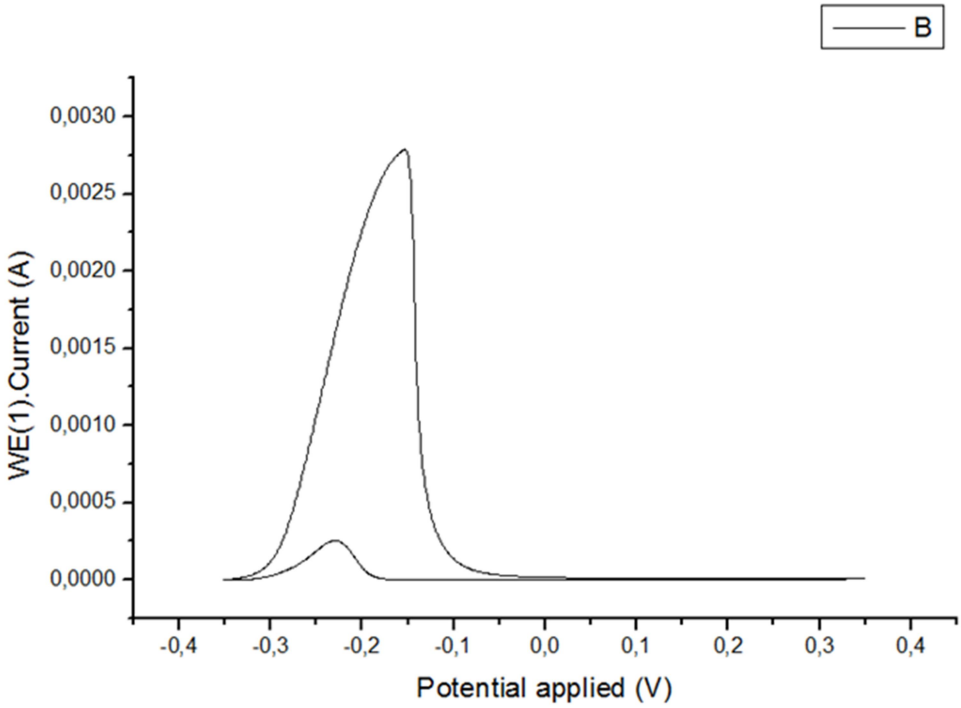


Figura 11 - Resultado das curvas de ativação e reativação do ensaio DL-EPR feito na amostra D23.66 no ponto 1 .

Os resultados obtidos nos ensaios da amostra D23.66 estão apresentados na *Tabela 7*.

Tabela 7 - Resultados de Ir, Ia e Ir/Ia obtidos nos ensaios na amostra D23.66.

Amostra 6.1				
Medição	**Ponto**	**Ia**	**Ir**	**Ir/Ia**
1ª Medição	Ponto 1	0,00279	2,55E-04	0,09125
	Ponto 2	0,00241	6,23E-05	0,02585
	Ponto 3	0,00247	6,20E-05	0,02510
2ª Medição	Ponto 1	0,0026	4,46E-05	0,01715
	Ponto 2	0,00228	4,08E-05	0,01789
	Ponto 3	0,00296	5,91E-05	0,01997
3ª Medição	Ponto 1	0,00287	5,41E-05	0,01885

Seguindo o mesmo padrão que foi feito para a análise das outras amostras, a *Tabela 8* apresenta as médias e desvios padrão dos valores de Ir/Ia para cada ponto da amostra e para a amostra como um todo.

Tabela 8 - Média e desvios padrão das relações Ir/Ia nos pontos da amostra D23.66.

Amostra D23.66 – Análise de Resultados		
	Média de Ir/Ia	**Desvio Padrão**
Ponto 1	0,04242	0,04230
Ponto 2	0,02187	0,00563
Ponto 3	0,02253	0,00363
Total da Amostra	0,03087	0,02684

A análise dos resultados obtidos para essa amostra nos permite perceber que, para os pontos 2 e 3, as medidas não apresentaram grandes variações. O desvio padrão nesses dois pontos foi maior do que havia aparecido nas amostras anteriores, porém a média dos valores de Ir/Ia nesses casos também se mostrou muito maior do que nas demais amostras.

O ponto 1, por outro lado, apresentou desvio padrão extremamente alto. Isso se deve ao fato de a primeira medição nesse ponto ter apresentado Ir/Ia muito maior do que nas outras medições. A razão para esse valor ter sido tão divergente dos demais não pôde ser explicada, podendo, inclusive, ser devido a erros aleatórios ocorridos durante o ensaio, visto que o comportamento não se manteve nas demais medições.

Também devido a esse elevado valor, a média de Ir/Ia total para amostra e seu desvio padrão também foi comprometido. Sendo assim, para que se tenham dados menos susceptíveis a erros e, visto que o ponto 1 foi medido três vezes, esse valor será eliminado do cálculo da média do grau de sensitização dessa amostra. Calculando-se então a média total da amostra com os seis valores restantes, obtém-se o valore de Ir/Ia igual a 0,02080 com desvio padrão de 0,003748, o que representa boa homogeneidade dos valores obtidos.

5.3 Análise das microestruturas observadas no MEV

Após a primeira bateria de medições, cada uma das amostras foi levada para análise microestrutural no MEV. Diferente das micrografias realizadas no microscópio óptico e que foram utilizadas para caracterização microestrutural, o objetivo da análise no MEV foi de comparar as microestruturas nas três regiões atacadas nos ensaios entre si, na mesma amostra. A análise não se estendeu a comparar e diferenciar as microestruturas entre as amostras devido à caracterização microestrutural já ter sido feita com esse intuito.

5.3.1 Amostra D4.8

Como visto anteriormente, os resultados dos diferentes pontos da amostra D4.8 apresentaram boa homogeneidade entre si, sem grande divergências. Após as áreas de teste terem sido submetidas à análise no MEV, esse fato se confirma já que não se pode ver grandes diferenças na microestrutura ao serem comparadas. As micrografias mostram como ocorreu o ataque, sendo notável a diferença de nível entre a ferrrita e a austenita da matriz, porém os três ataques, nas três áreas parecem ter ocorrido de forma semelhante.

As figuras *12*, *13* e *14* mostram as micrografias feitas nos pontos 1, 2 e 3, respectivamente, com aumento de 2500 vezes e utilizando-se contraste para melhor visualização.

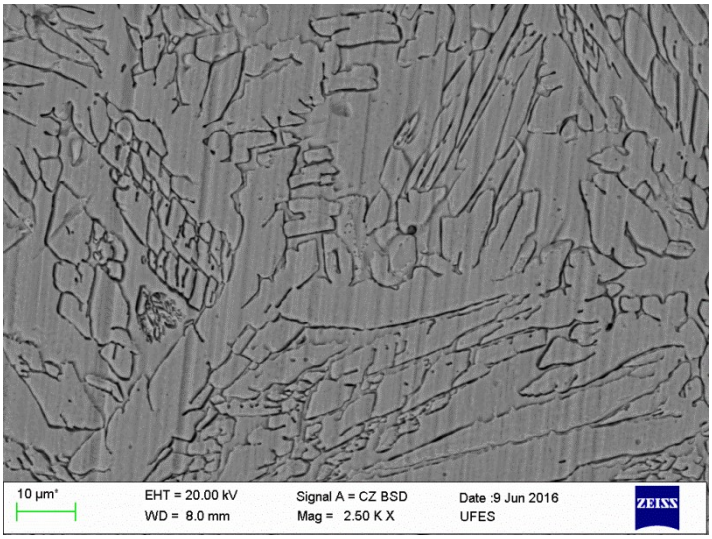


Figura 12 - Microestrutura do ponto 1 da amostra D4.8 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita.

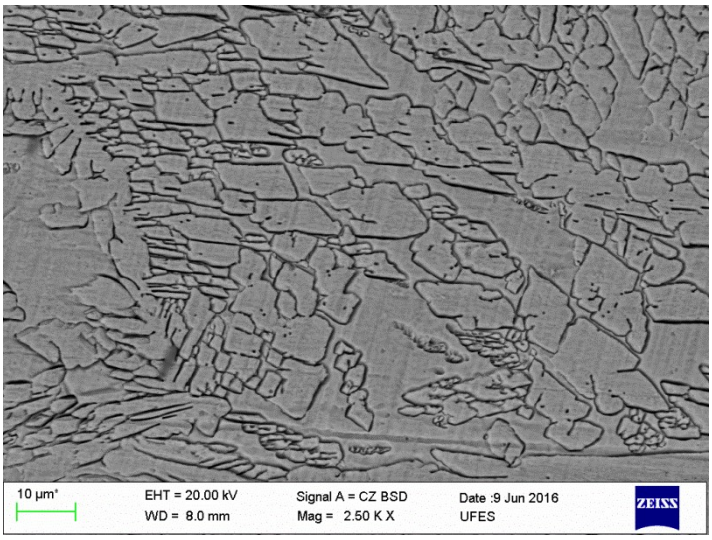


Figura 13 - Microestrutura do ponto 2 da amostra D4.8 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita.

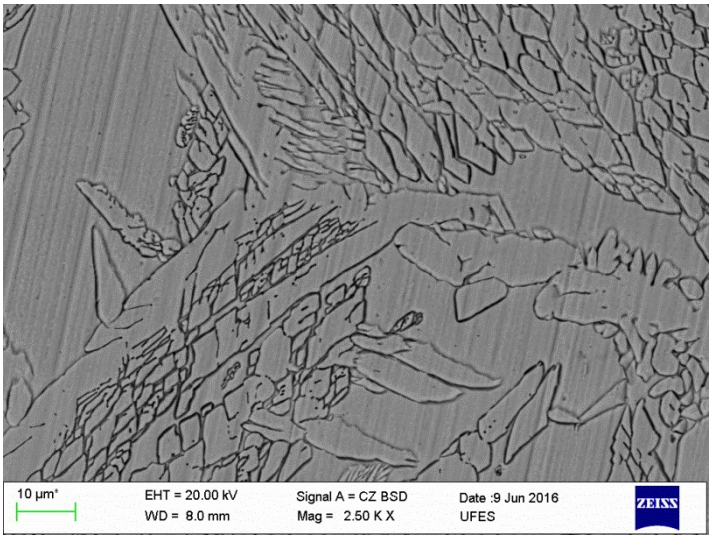


Figura 14 - Microestrutura do ponto 3 da amostra D4.8 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita.

5.3.2 Amostra D14.14

Apesar da pouca homogeneidade dos valores da amostra D14.14 entre as medições de cada ponto, os valores da relação Ir/Ia na primeira medição para os três pontos não apresentou grande diferença. Conforme dito anteriormente, as análises no MEV foram feitas somente após a primeira medição.

Pode-se notar que as microestruturas nos três pontos dessa amostra aparentemente se mantiveram sem grandes variações. Assim como na amostra anterior, é perceptível a dife (menos atacada), mas não nota-se variação acentuada nos ataques entre um ponto e outro. Isso também pode ser explicado pelo fato de os valores de Ir/Ia terem sido baixos, representando que o ataque não foi muito forte, por isso não houve reativação.

As figuras *15*, *16* e *17* a seguir mostram os resultados da análise feita no MEV nos ponto 1, 2 e 3, respectivamente, com aumento de 2500 vezes e utilizando-se contraste para melhor visualização.

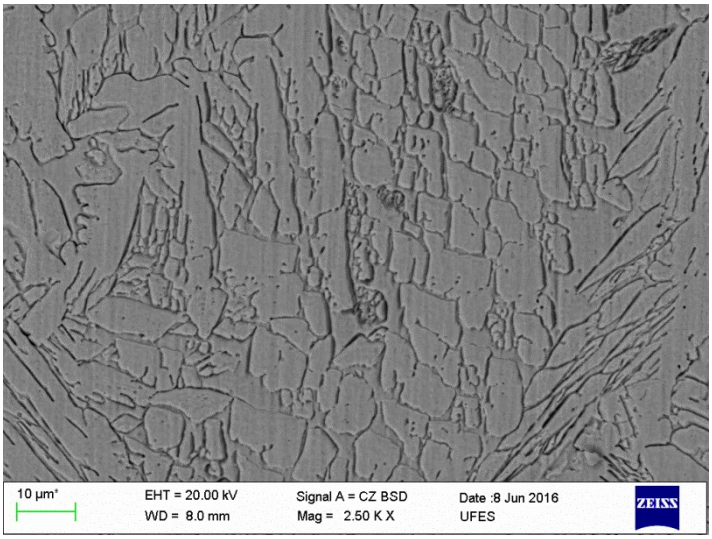


Figura 15 - Microestrutura do ponto 1 da amostra D14.14 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita.

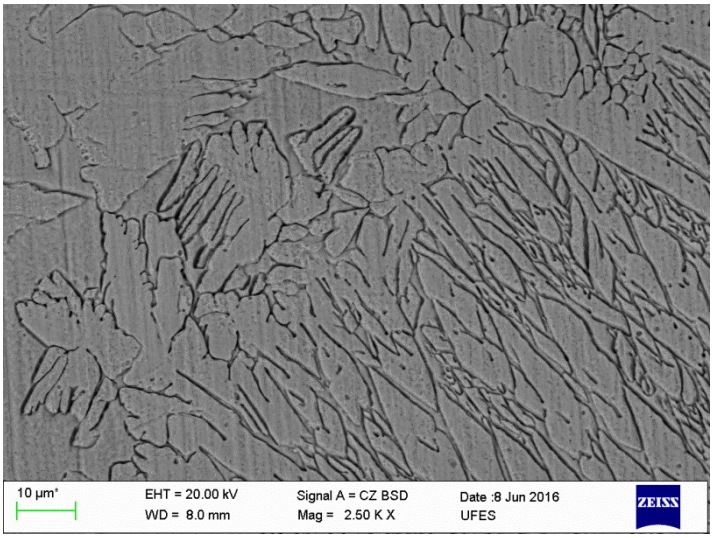


Figura 16 - Microestrutura do ponto 2 da amostra D14.14 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita.

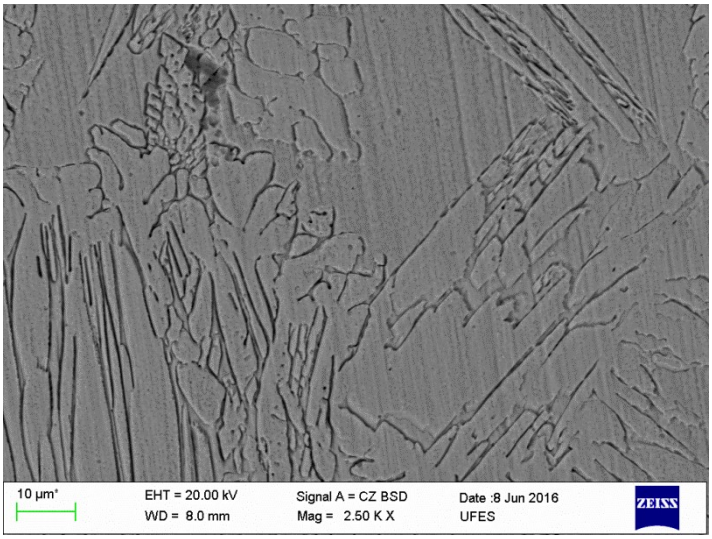


Figura 17 - Microestrutura do ponto 3 da amostra D14.14 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita.

5.3.3 Amostra D23.66

Com a comparação da microestrutura nos três pontos, não se viu diferenças notáveis de microestrutura entre o pontos 2 e 3. Porém, é perceptível uma pequena variação no ponto 1. Conforme o que foi falado anteriormente, o primeiro ensaio do ponto 1 apresentou um pico de reativação muito acentuado, o que é consequência de um ataque muito forte. A diferença na microestrutura pode estar relacionada a esse ataque que se deu de forma tão diferente dos outros vistos na mesma amostra.

As figuras *18*, *19* e *20* são os resultados das análises feitas no MEV em cada ponto da amostra. As micrografias foram feitas com aumento de 2500 vezes e utilizando contraste para melhor visualização.

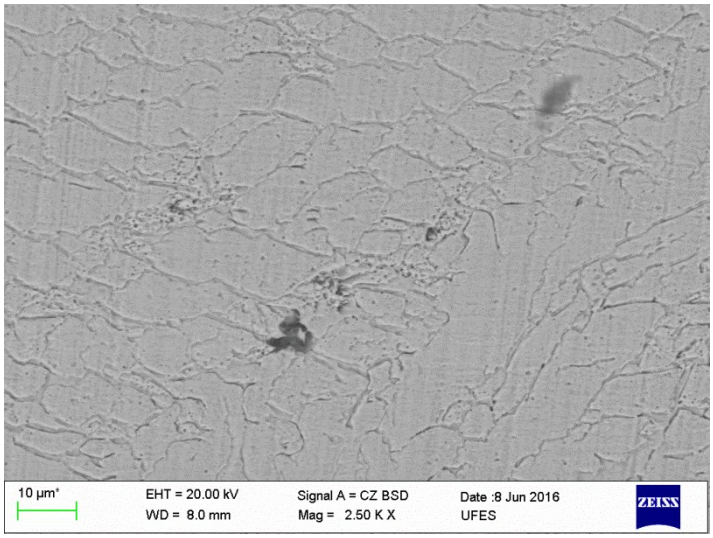


Figura 18 - Microestrutura do ponto 1 da amostra D23.66 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita, porém, o ataque foi diferente das demais microestruturas da mesma amostra.

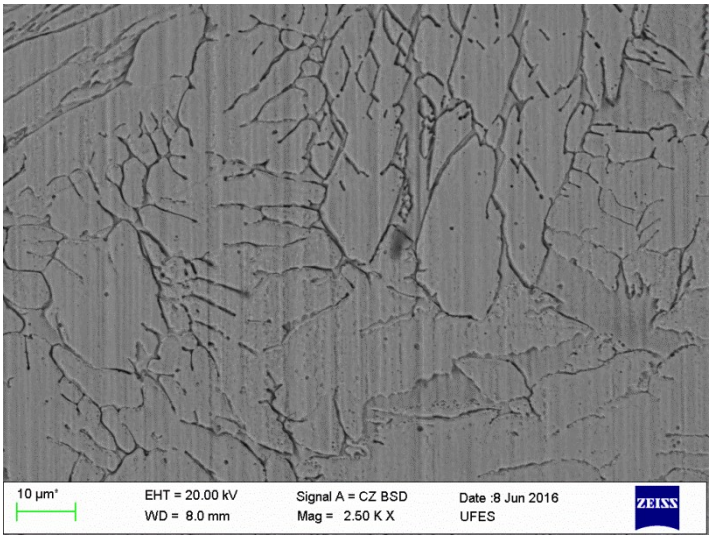


Figura 19 - Microestrutura do ponto 2 da amostra D23.66 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita.

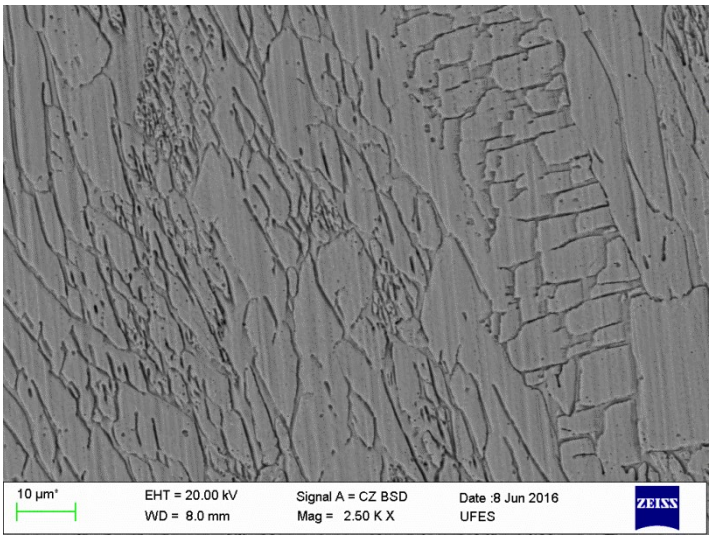


Figura 20 - Microestrutura do ponto 3 da amostra D23.66 feita por MEV com aumento de 2500x. Nota-se a diferença entre a ferrita, mais atacada, e a austenita.

5.4 Análise da Sensitização

Ainda de acordo com os estudos de AMADOU, BRAHAM e SIDHOM (2004), a eficiência do ensaio DL-EPR é medida por meio de um teste de resposta, que deve ser caracterizado por pequenos valores da razão de densidade de correntes (Ir/Ia<1%) e razão densidade de carga (Qr/Qa<1%) para materiais não sensitizados e valores relativamente altos (Ir/Ia≥1% e Qr/Qa≥1%) para materiais sensitizados.

Sendo assim, pode-se avaliar a condição de sensitização das amostras como um todo por meio dos valores da média da relação Ir/Ia de cada amostra. Não seria representativo ponderar a condição de sensitização de cada ponto, simplesmente por não poder ser tirada nenhuma conclusão relevante a respeito de cada ponto isoladamente. Por isso será feita essa análise sobre cada amostra.

A amostra D4.8 apresentou média da relação Ir/Ia de 0,00423, ou seja, Ir/Ia=0,423%. Isso mostra que não houve sensitização nessa amostra. Da mesma forma, a amostra D14.14 apresentou Ir/Ia igual a 0,00736 ou 0,736%, o que também representa que não houve sensitização, condição bem parecida com a da amostra D4.8.

A amostra D23.66 apresentou a maior relação Ir/Ia média, sendo esse valor igual a 0,02080 ou 2,08%, utilizando-se o valor calculado desconsiderando-se a primeira medição do ponto 1, pelos motivos supracitados. Isso mostra que houve sensitização para essa condição de soldagem.

5.5 Resposta à Diluição

Buscando relacionar a condição de diluição de cada amostra, obtida devido aos diferentes parâmetros de soldagem, com os graus de sensitização encontrados nos ensaios DL-EPR, foi traçado o gráfico mostrado na *Figura 21*.

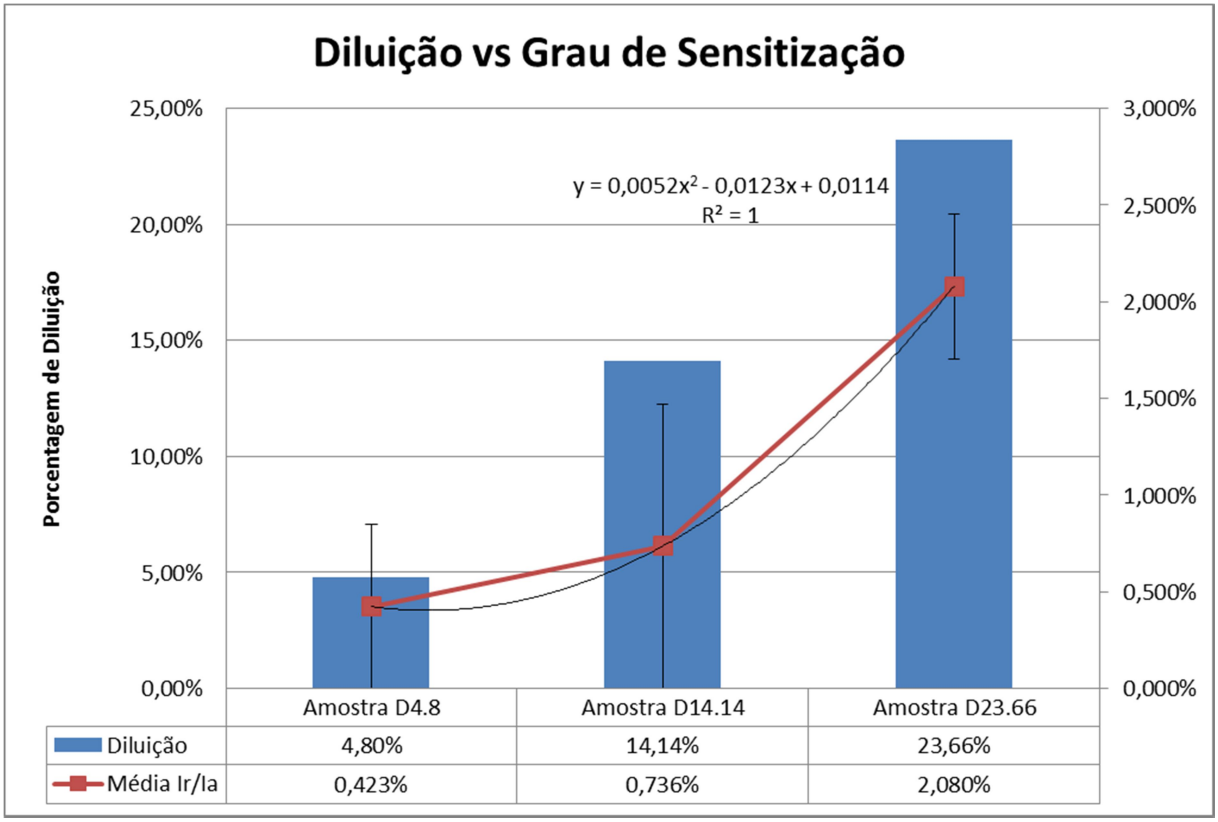


Figura 21 - Gráfico de comparação da taxa de diluição com o grau de sensitização para cada amostra.

Analisando o gráfico podemos observar que ao grau de sensitização tem comportamento diretamente proporcional à diluição. A amostra que apresentou menor diluição, amostra D4.8, também foi a que apresentou menor grau de sensitização.

Quando se aumenta a taxa diluição consideravelmente, atingindo o nível encontrado na amostra D14.14, de 14,14%, a relação Ir/Ia aumenta, porém não na mesma proporção.

A amostra D23.66 foi a que apresentou maior taxa de diluição dentre todas as amostras soldadas e também apresentou maior grau de sensitização dentre as amostras avaliadas pela técnica DL-EPR.

É importante notar que o aumento da taxa de diluição da amostra D14.14 para a D23.66 foi de quase o dobro, enquanto a relação Ir/Ia aumentou em torno de quatro vezes. Isso mostra que o grau de sensitização não aumenta de forma linear. Usando-se a linha de tendência do Microsoft Excel 2010 encontrou-se uma equação que descreve esse crescimento, porém como essa equação foi traçada de acordo com os três pontos analisados, ela é somente representativa para esse caso. Um número de amostragem maior levaria à uma função mais aproximada do real.

5.6 Resposta aos parâmetros de soldagem

Verificando a diferença no grau de diluição de cada amostra fica claro que ele é função dos parâmetros utilizados nos processos de soldagem. A variação de cada um desses parâmetros altera a diluição no revestimento, por isso é importante que o grau de sensitização seja relacionado também com esses parâmetros individualmente.

De acordo com a Tabela 2, é nítido que, dentre os três parâmetros que foram variados na confecção das soldas, apenas dois tem influência para serem aqui avaliados: velocidade de alimentação do arame e corrente de soldagem. A velocidade de soldagem não é importante para ser analisada aqui, pois, dentre as amostras ensaiadas, não foi variada, estando sempre em 8 cm/min. Sendo assim, os dois gráficos a seguir foram traçados visando relacionar os parâmetros de interesse

com o grau de susceptibilidade à corrosão localizada, Ir/Ia. As figuras *22* e *23* apresentam os gráficos com as comparações do grau de diluição com a corrente e com a velocidade de alimentação, respectivamente.

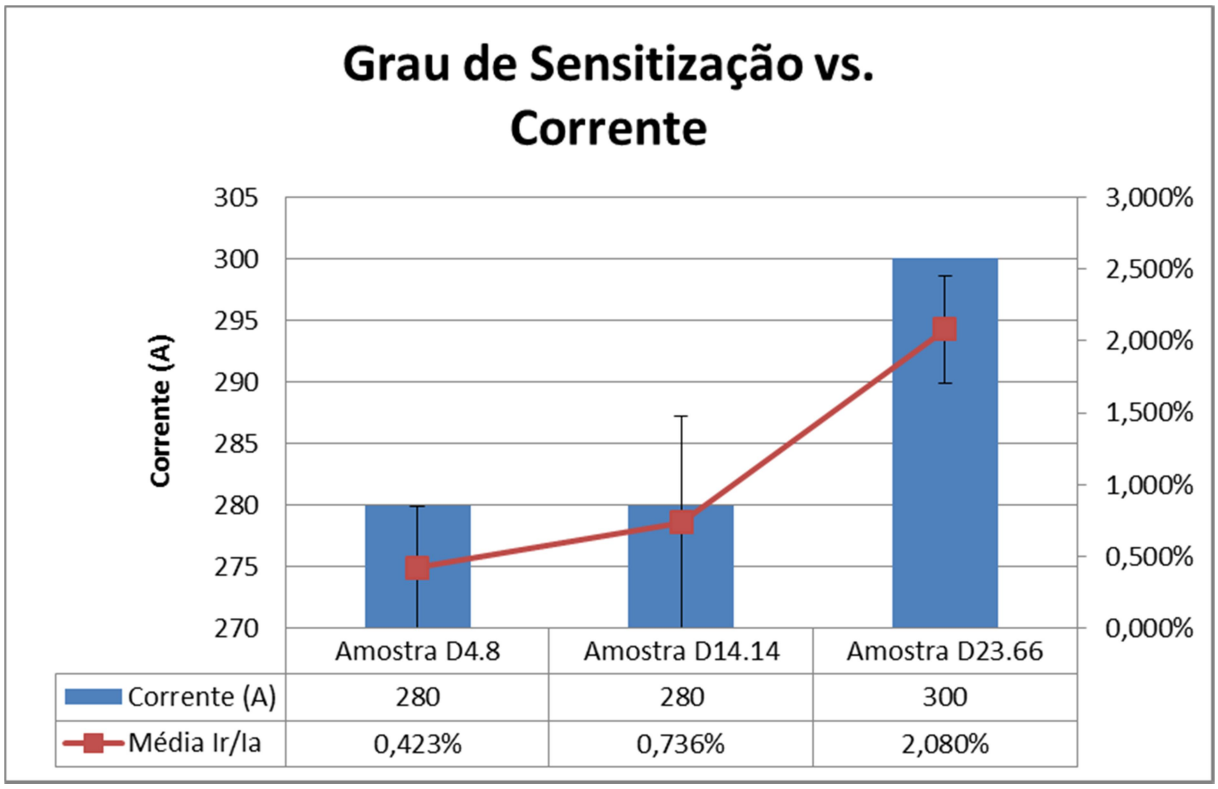


Figura 22 - Gráfico de comparação da corrente de soldagem com o grau de sensitização para cada amostra.

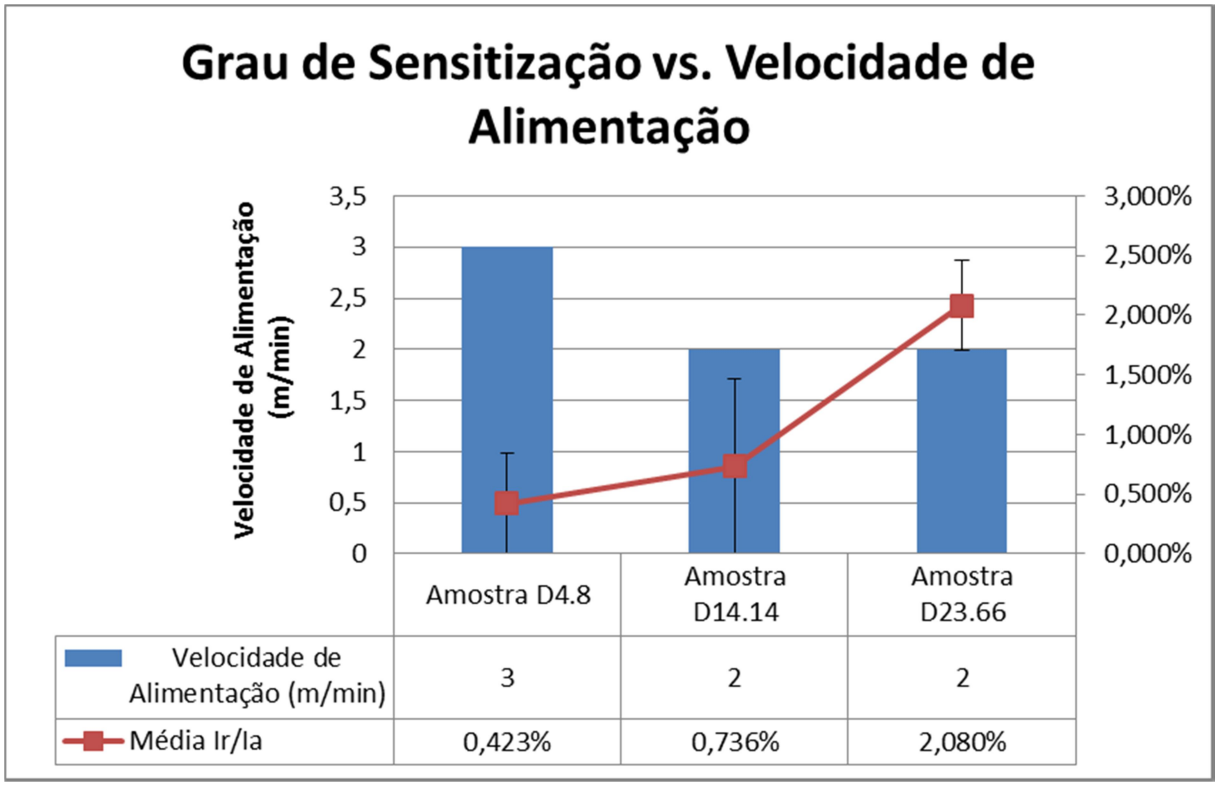


Figura 23- Gráfico de comparação da velocidade de alimentação do arame na soldagem com o grau de sensitização para cada amostra.

Com a análise do gráfico da *Figura 22* percebe-se que a variação da corrente de soldagem é diretamente proporcional à variação do grau de sensitização, ou seja, correntes maiores levam à maiores relações Ir/Ia. De forma contrária, o gráfico da *Figura 23* mostra que o grau de sensitização aumenta à medida que se tem menores velocidades de alimentação do arame de adição.

Esses dois fenômenos podem ser explicados devido ao aporte térmico ou energia de soldagem. Correntes maiores aumentam a potência do arco elétrico, que, consequentemente, irá transferir mais energia para a poça de soldagem. O aporte térmico também aumenta quando a velocidade de alimentação do arame de adição é menor devido ao fato de que, com maiores velocidade de alimentação, uma parte maior da energia de soldagem é transferida para a fusão do arame de adição. Menores velocidades permitem que o arame seja fundido numa taxa mais elevada e consequentemente, maior energia é transferido para a poça.

Como pode ser visto na Tabela 2, a amostra D23.66 é a que apresenta menor velocidade de alimentação combinada com maior corrente, ou seja, maior aporte

térmico e, consequentemente, maior taxa de diluição. A amostra D4.8, pelo contrário combina as condições de menor aporte térmico, ou seja, menor corrente com maior velocidade de alimentação do arame, e é a amostra com menor taxa de diluição.

O aumento do aporte térmico faz aumentar a taxa de diluição e, como já foi visto, aumenta o grau de sensitização e susceptibilidade à corrosão intergranular.

6 CONCLUSÃO

Tendo como objetivo do presente trabalho a avaliação das propriedades do revestimento quanto a corrosão localizada, relacionando-as com os parâmetros de diluição das amostras soldadas, pode-se, com a análise dos resultados apresentados, concluir que:

- A diluição obtida nos processos de revestimento por soldagem tem grande influência na corrosão localizada, sendo que, quanto maior a taxa de diluição observada, maior o grau de sensitização do aço e, consequentemente, mais susceptível esse aço está a esse tipo de corrosão;
- Além das variações na diluição, as diferenças nas microestruturas de cada amostra, resultado dos vários níveis de energia de soldagem à que cada amostra foi submetida, alteram o comportamento do aço quanto a resistência à corrosão localizada já que cada morfologia da ferrita e da austenita reagem de maneira diferente ao ataque do ensaio;
- As diferenças de medição em cada ponto da mesma amostra são atribuídas ao próprio processo de soldagem TIG, que gera convecção do metal líquido na poça e, consequentemente, varia minimamente as propriedades de um ponto para outro. A proximidade dos pontos também dificulta a avaliação do grau de sensitização ao longo do cordão devido à essa interferência causada pela alta energia inerente ao processo de soldagem;
- A diferença de resultados entre uma medição e outra no mesmo ponto da mesma amostra é devido à impossibilidade de se fazer o ensaio exatamente no mesmo ponto em todas as repetições. Como a célula utilizada possui pequena área útil, o ensaio fica bastante susceptível à variação do posicionamento na amostra. Além disso, fatores como temperatura da solução durante o ensaio também pode levar à variação nos resultados;
- O eletrólito utilizado no ensaio DL-EPR tem grande influência nos resultados obtidos, tornando esses resultados mais ou menos sensíveis com a variação da solução. Devido a isso, a escolha da solução adequada para o tipo de aço é de suma importância para a obtenção dos melhores resultados possíveis, levando à melhor ou pior perceptibilidade dos resultados por parte de quem os analisa;

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADOU, T., BRAHAM, C., SIDHOM, H.; **Double Loop Electrochemical Potentiokinetic Reactivation Test Optimization in Checking of Duplex Stainless Steel Intergranular Corrosion Susceptibility**. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, VOLUME 35A, p. 3499-3513, November 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. G46-94. **Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion**. Philadelphia: ASTM, 1999. p. 1-7.

ASTM G108 – 94. "**Standard Test Method for Electrochemical Reactivation (EPR) for Detecting Sensitization of AISI Type 304 and 304L Stainless Steels**". In: 1997 Annual Book of ASTM Standards. Section 3; *Metals Tests Methods and analytical Procedures*. Volume 03.02; *Wear and Erosion*; *Metal Corrosion*. West Conshohocken, ASTM, 1997, pp. 450-457.

ASSELLI, A. A. C., ARAÚJO, M. R. V. de., TOKIMATSU, R. C., YAMAKAMI, W. J., VENTRELLA, V. A., GALLEGO, J.; **Morfologia dos Grãos de Austenita Formados no Cordão de Solda Feito Pelo Processo de Arco Submerso**. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, p. 5306-5317, Novembro, 2006.

ATAMERT, S.; KING, J.E. **Intragranular nucleation of austenite**. Z. Metallkde. v. 82, n. 3, p. 230- 239, 1991.

BARRETO, A., ANDRADE, T., SILVA, C., MIRANDA, H.; **Utilização do Equipamento de Ensaio EPR-DL de Campo na Detecção de Fase Sigma**. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 11, n. 2, p. 146-154, abr/jun. 2014.

CALLISTER, W.; **Materials Science and Engineering: An Introduction, John Wiley and Sons**, 2006.

DAVIS, J.R. & ASSOCIATES; **Stainless Steel Cladding and Wel Overlays**. ASM Specialty Handbook: Stainless Steels, 06398GJ, 1994.

DuPONT, J. N.; MARDER, A, R.; **Dilution in Single Pass Arc Welds. Metallurgical and Materials Transactions B**, Volume 27B, p. 481-489, Junho, 1996.

EGHLIMI, A., SHAMANIAN, M., RAEISSI, K.; **Effect of current type onmicrostructure and corrosion resistance of superduplex stainless steel claddings produced by the gas tungsten arcwelding process**. Surface & Coatings Technology, 244, p. 45–51, 2014.

KANNAN, T. e MURUGAN, N. **Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality. Journal of Materials Processing Technology**, v. 176, n. 1-3, p. 230-239, 2006.

LIMA, G., CORTELETTI, R.; **Parametrização de Soldagem de Aço Duplex para Revestimento com TIG Alimentado**. Projeto de Graduação, Dezembro, 2015.

MAGRI, M., ALONSO, N. **Métodos Eletroquímicos para a Avaliação da Sensitização em Aços Inoxidáveis Martensíticos**. In: 50ºCONGRESSO ABM-Corrosão e tratamento de superfície. São Paulo, 1995.

MARTINS, M., CASTELETTI, L. C.; **Aços Inoxidáveis Duplex e Super Duplex – Obtenção e Caracterização**. 2012.

Menezes, J. W. Abtibol, Abreu, H., Kundu, S., Bhadeshia, H. K. D. H., Kelly, P. M.; **Crystallography of Widmanstätten Austenite in Duplex Stainless Steel Weld Metal**. Science and Technology of Welding and Joining, vol. 14, no 12009, p. 4-10, 2009.

MODENESI, P. J. MARQUES, P. V. BRACARENSE, A. Q.; **Soldagem – Fundamentos e tecnologia**, 3ª edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, p.363, 2011.

MORAIS, L.C. **Estudo exploratório do grau de sensitização do aço UNS S311803 envelhecido a 800°C por ensaios de reativação potenciodinâmica de duplo loop (DL-EPR)**. 2012. (Iniciação Científica). Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 110p.

MUTHUPANDI, V.; P. BALA SRINIVASAN; **Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds**. Material Science Engineering, A358, p. 9 -16, 2003.

NADEZHDIN, A.D. & Davison, T., **Effects of Weld Dilution on Digester Weld Overlay**. 11th International Symposium on Corrosion in the Pulp and Paper Industry, 2004.

NUNES, E.B., BATISTA, H.J., BARRETO, A.S., MARQUES, J.S., MOTTA, M.F.; **Influência da Energia de Soldagem na Microestrutura e na Microdureza de Revestimentos de Aço Inoxidável Duplex**. Soldag. Insp. São Paulo, Vol.17, Nº. 2, p.114-122, Abr/Jun 2012.

PALANI, P. K. e MURUGAN, N.; **Development of mathematical models for prediction of weld bead geometry in cladding by flux cored arc welding**.

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 30, n. 7-8, p. 669-676, 2006a.

PARDAL, J. M., TAVARES, S. S. M., PONZIO, E. A., SCHMITT, V. M.; **Uma Revisão da Resistência à Corrosão em Aços Inoxidáveis Duplex e Superduplex**. Rev. Virtual Quim., Vol 5, No. 4, p. 658-677, Agosto, 2013.

PROHASKA, M., WERNIG, T., PEREK, J., MORI, G., TISCHLER, G., GRILL, R.; **Application of the DL-EPR – method for detecting sensitization to intergranular corrosion in thermomechanically rolled corrosion-resistant alloys 316L, 825L and 926L**.

SEDRIKS, A J. **Corrosion of stainless steels**. John Wiley & Sons Inc. New York, 1996.

Shamanian, M., Eghlimi, A., Eskandarian, M., Szpunar, J. A.; **Interface microstructure across cladding of super duplex stainless steel with austenitic stainless steel buffer layer**. Surface & Coatings Technology, 259, p. 532–542, 2014.

SHREIR,L.L. **Corrosion**. Vol 1. Seção 3.3 Stainless Steels. Third edition.Butterworth,Oxford, 1995.

SILVA, C.C., ALBUQUERQUE, V.H.C., MOURA, C.R., AGUIAR, W.M., Farias, J.P.; **Evaluation of AISI 4140 Steel Repair without Post-Weld Heat Treatment.** Journal of Materials Engineering and Performance 18(3):324-331, 2009

STREET J. A., “**Pulsed Arc Welding**”, 1 edição, Cambridge – England, Abington Publishing, 1990,p.6-19

UREÑA, A.; OTERO, E.; UTRILLA, M. V.; MÚNEZ, C. J. **Weldability of a 2205 duplex stainless steel using plasma arc welding**. Journal of Materials Processing Technology 182 p. 624–631, 2007.

WAINER, E. BRANDI, S, D. MELLO, F, D, H.; **Soldagem Processos e Metalurgia**. 4ª reimpressão. São Paulo: Edgar Blucher. p.494. 1992.

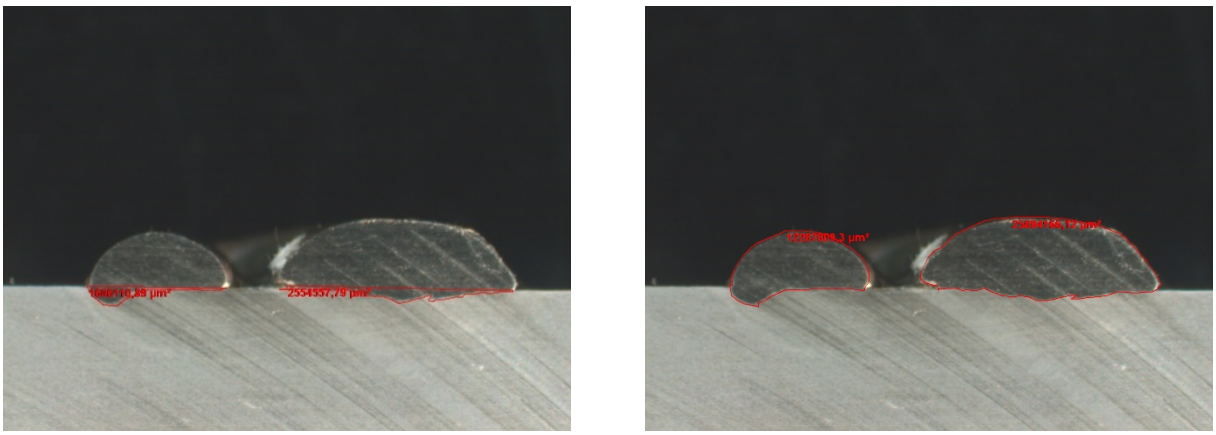
WOLYNEC, Stephan. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: EDUSP, 2003. 166 p. (Acadêmica ; 49) ISBN 8531407494 (broch)

ZANETIC, S., ALONSO-FALLEIROS, N.; **Determinação do Grau de Sensitização de Aços Inoxidáveis Austeníticos pelo Método DL-EPR**.

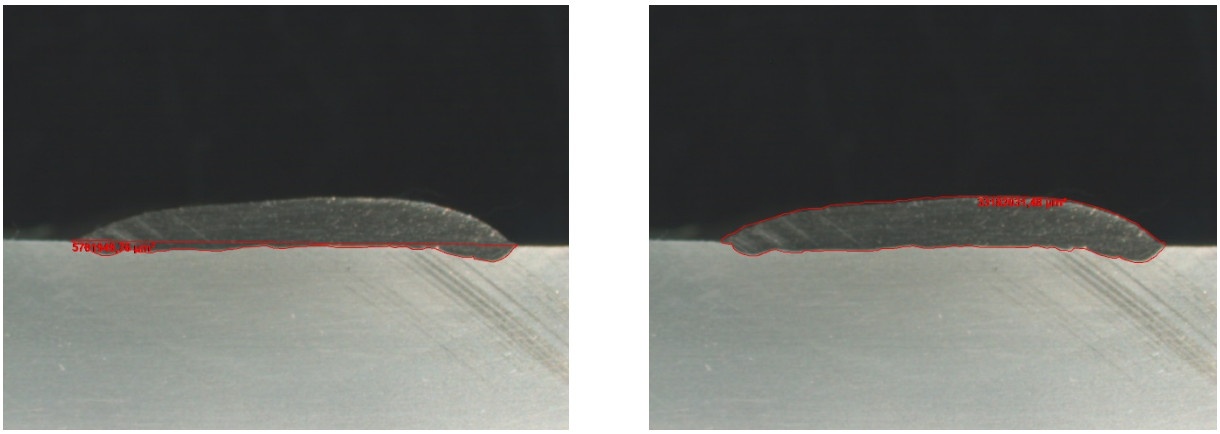
ZEEMANN, A.; Diluição, Infosolda, Seção artigos, 2003. Disponível em: http://www.infosolda.com.br/var/www/html/infosolda.com.br/web/images/Downloads/Artigos/metal/diluio.pdf. Acesso em: 12 de abril de 2016.

8 ANEXOS

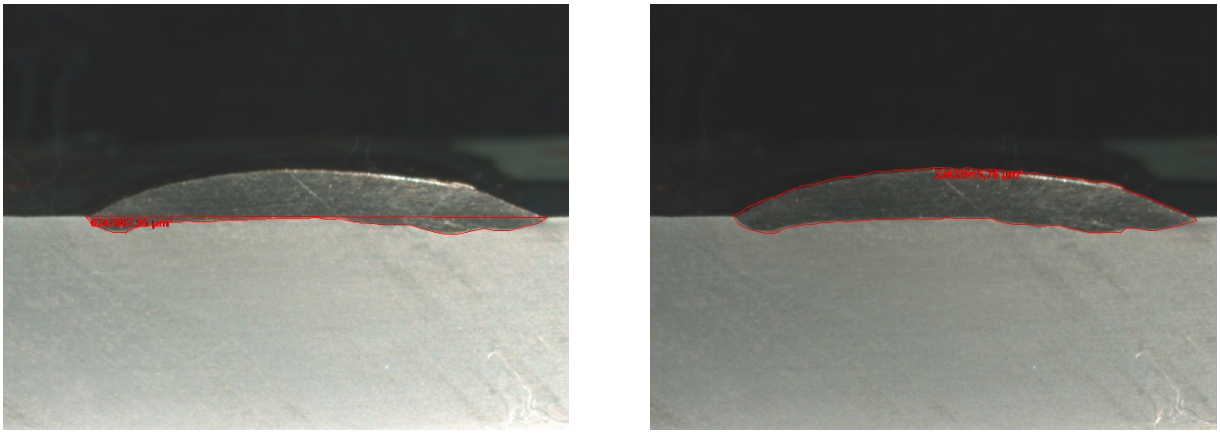
ANEXO A – Avaliação de diluição nos cordões de solda



Corte transversal 3 - Experimento 3.1 (Lima e Corteletti, 2015)

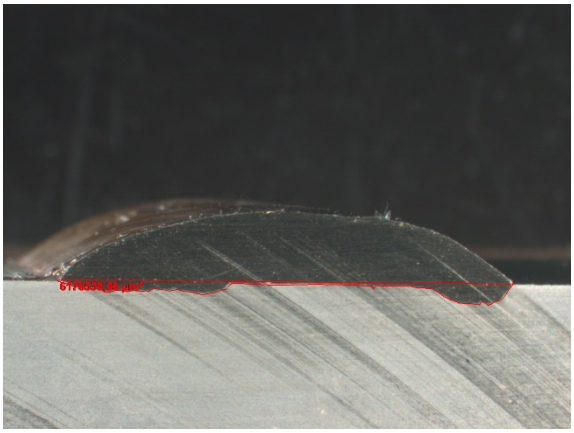


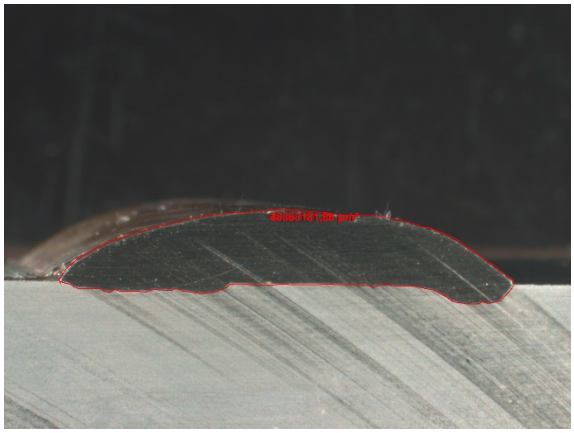
Corte transversal 1 - Experimento 3.2 (Lima e Corteletti, 2015)



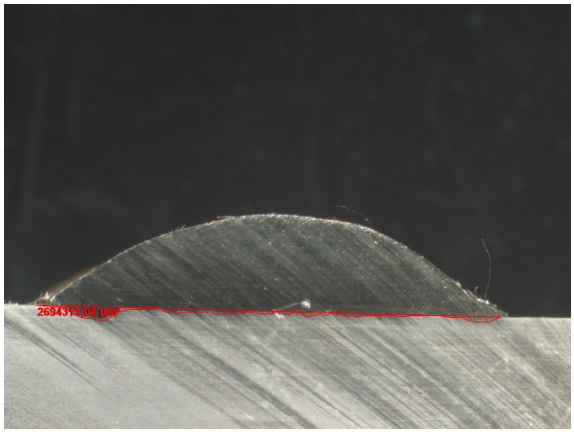
Corte transversal 2 - Experimento 4.1 (Lima e Corteletti, 2015)

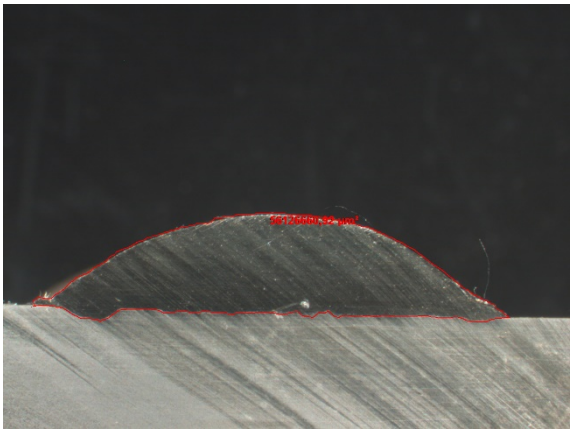
ANEXO A – Avaliação de diluição nos cordões de solda (Continuação)



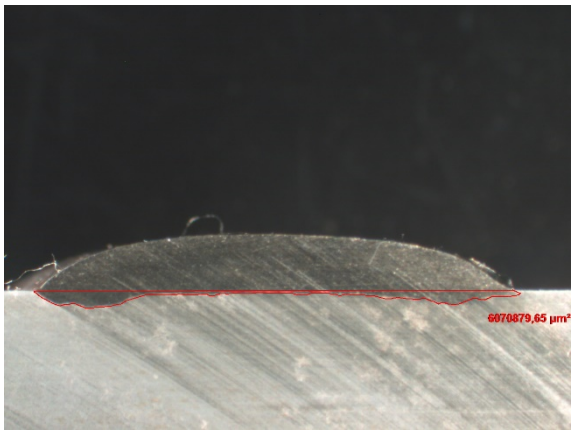


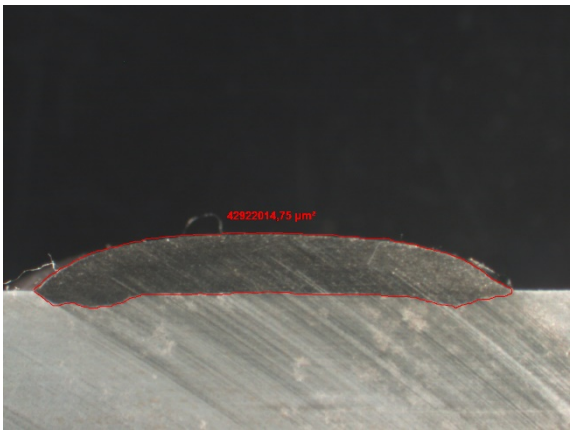
Corte transversal 4 - Experimento 4.2 (Lima e Corteletti, 2015)





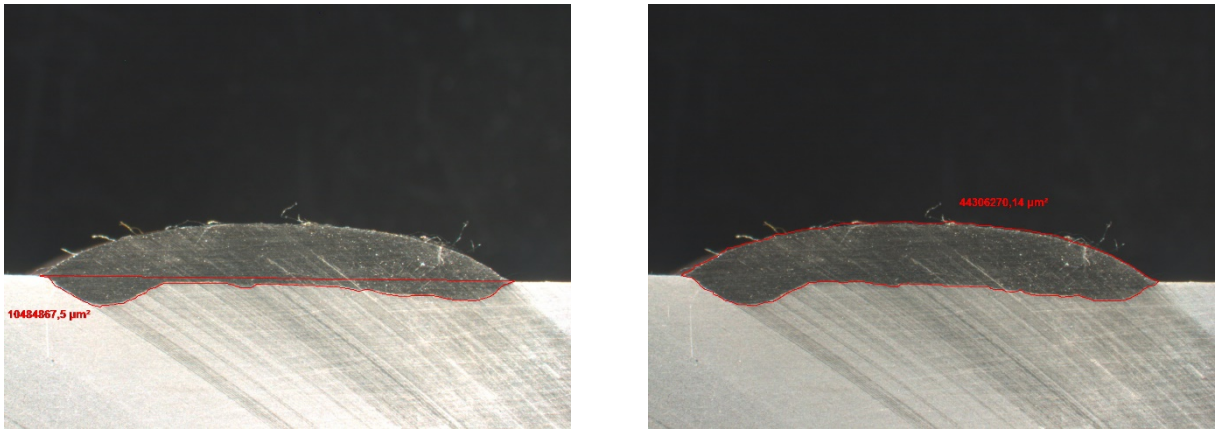
Corte transversal 5 - Experimento 5.1 (Lima e Corteletti, 2015)



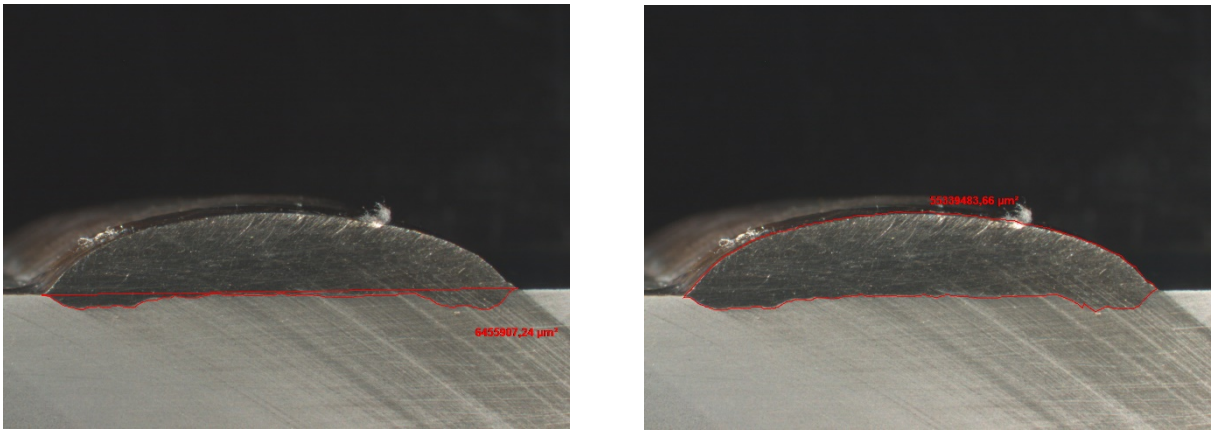


Corte transversal 6 - Experimento 5.2 (Lima e Corteletti, 2015)

ANEXO A – Avaliação de diluição nos cordões de solda (Continuação)



Corte transversal 7 - Experimento 6.1 (Lima e Corteletti, 2015)



Corte transversal 7 - Experimento 6.2 (Lima e Corteletti, 2015)

ANEXO B – Medição do diâmetro da área real do teste

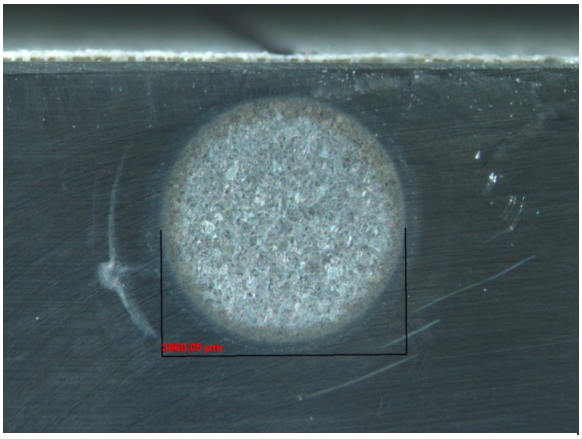


Imagem da medição do diâmetro da área de teste feita no ponto 1 da amostra D14.14 utilizando estereoscópio óptico. Diâmetro medido igual a 3960,05 µm.

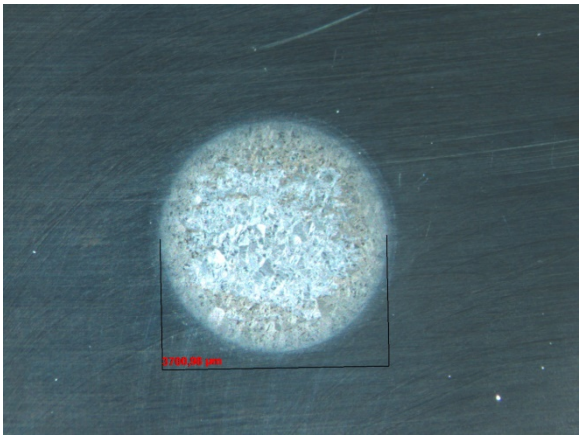


Imagem da medição do diâmetro da área de teste feita no ponto 2 da amostra D14.14 utilizando estereoscópio óptico. Diâmetro medido igual a 3700,98 µm.

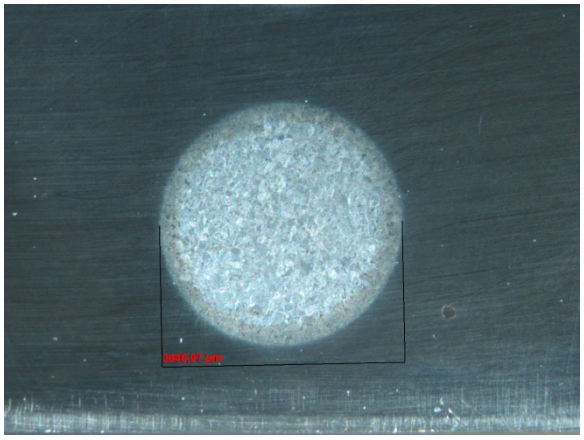
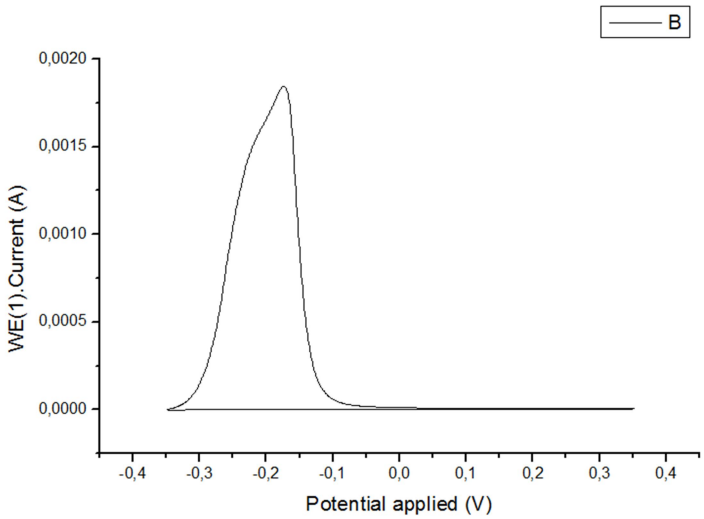
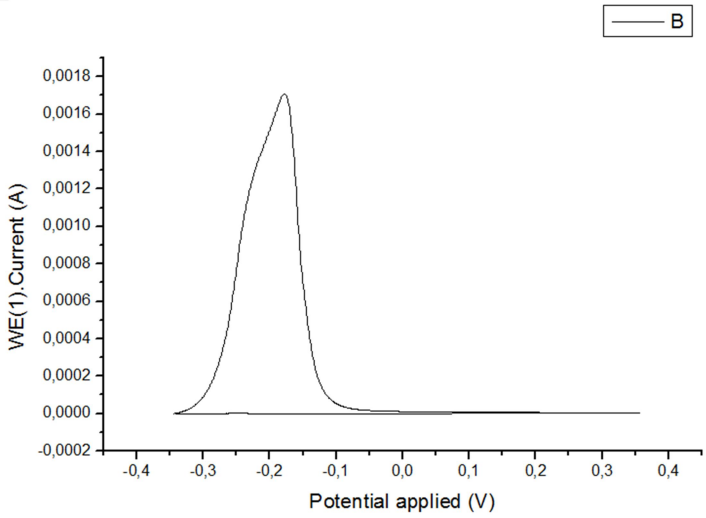


Imagem da medição do diâmetro da área de teste feita no ponto 3 da amostra D14.14 utilizando estereoscópio óptico. Diâmetro medido igual a 3946,97 µm.

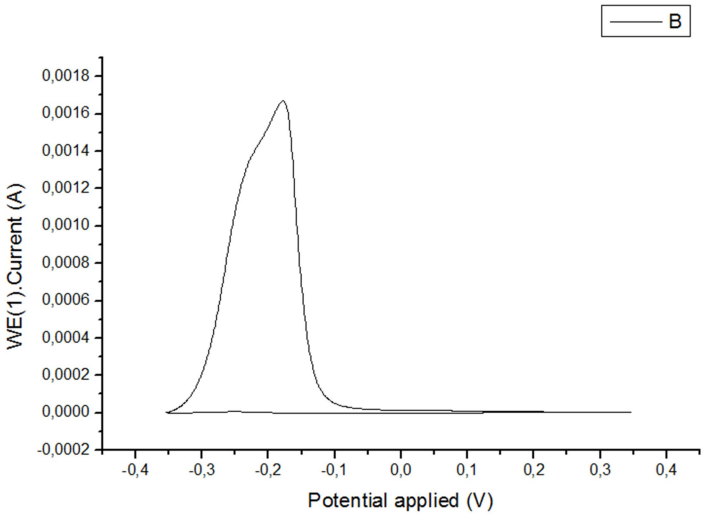
ANEXO C – Resultados os ensaios DL-EPR na amostra D4.8



1ª medição no ponto 1

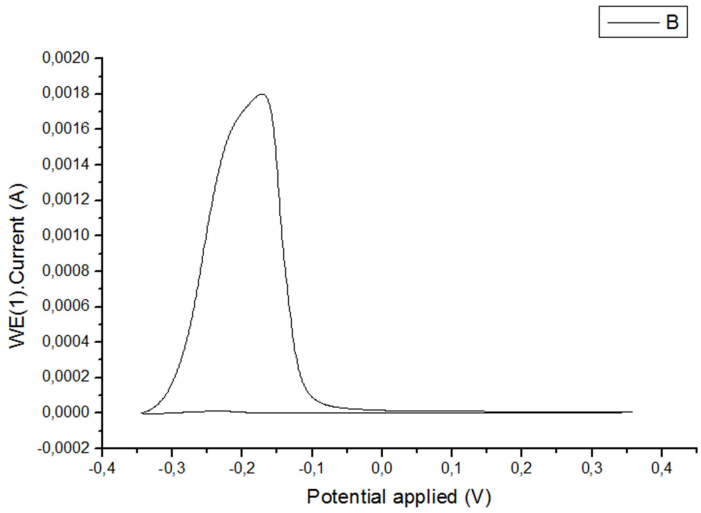


1ª medição no ponto 2

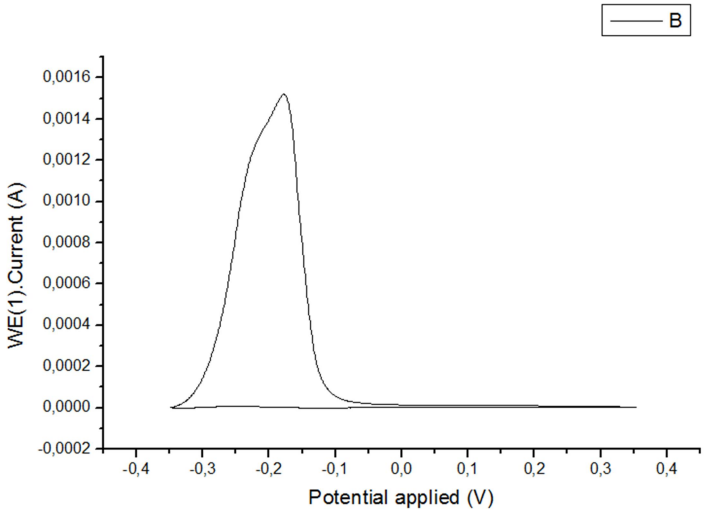


1ª medição no ponto 3

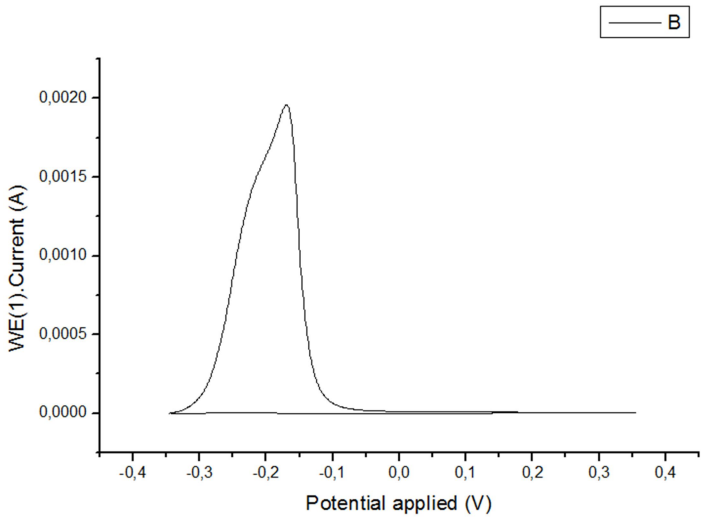
ANEXO C – Resultados os ensaios DL-EPR na amostra D4.8 (Continuação)



2ª medição no ponto 1

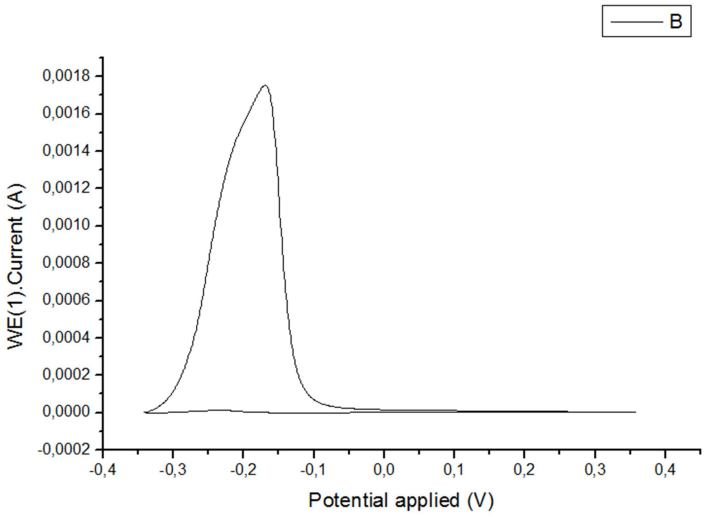


2ª medição no ponto 2



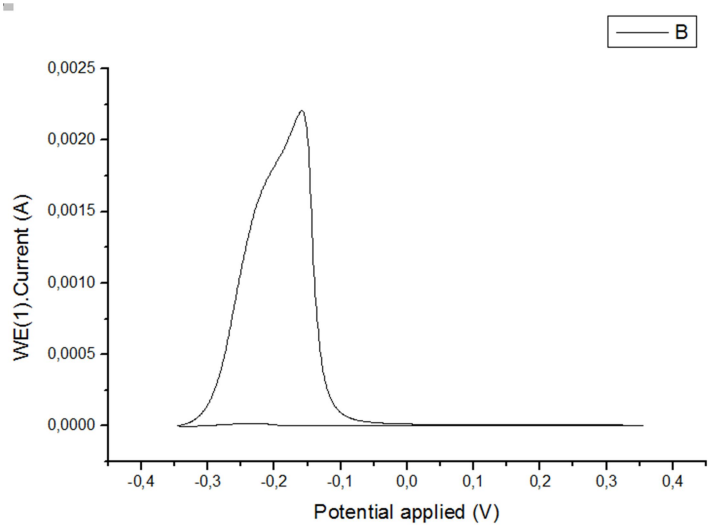
2ª medição no ponto 3

ANEXO C – Resultados os ensaios DL-EPR na amostra D4.8 (Continuação)

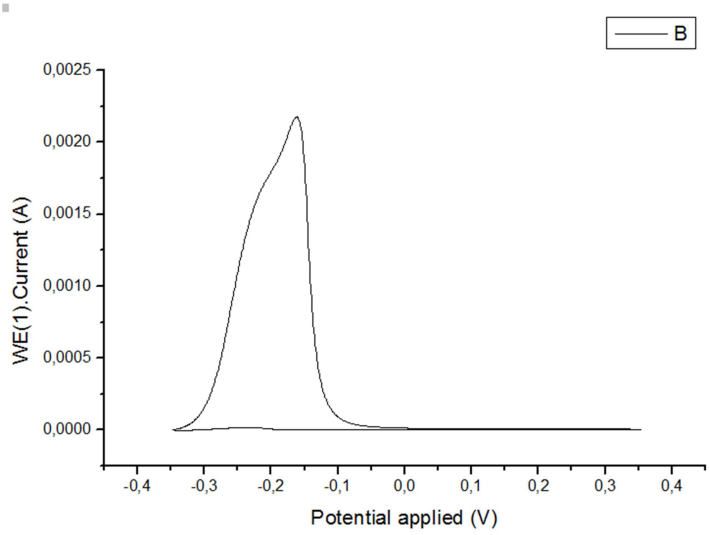


2ª medição no ponto 2

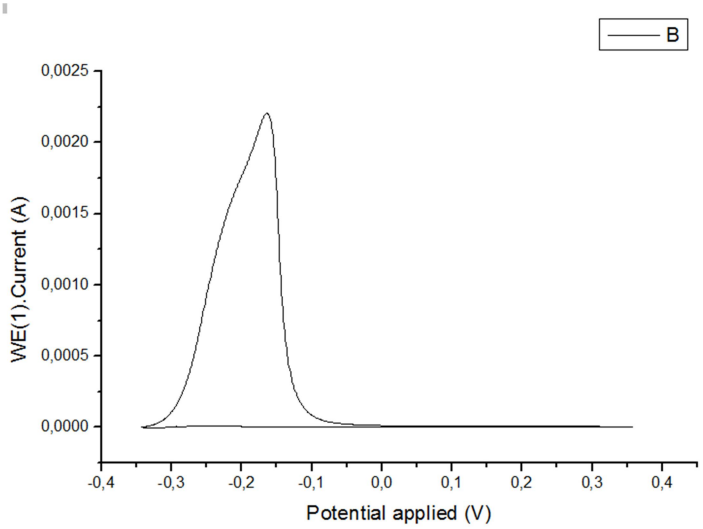
ANEXO D – Resultados os ensaios DL-EPR na amostra D14.14



1ª medição no ponto 1

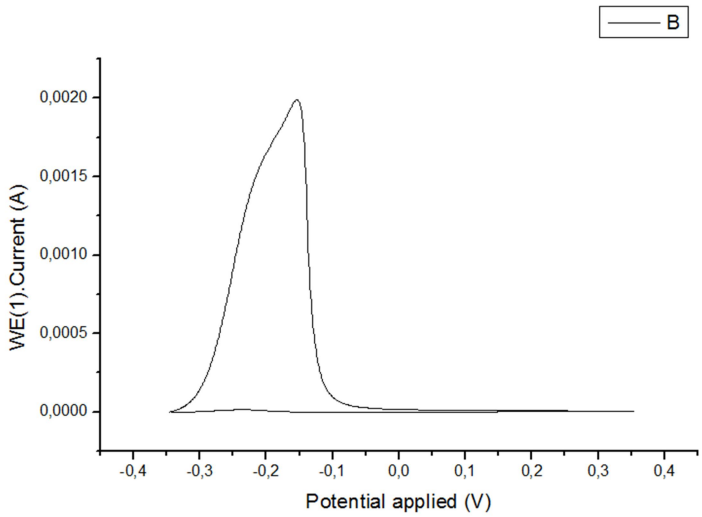


1ª medição no ponto 2

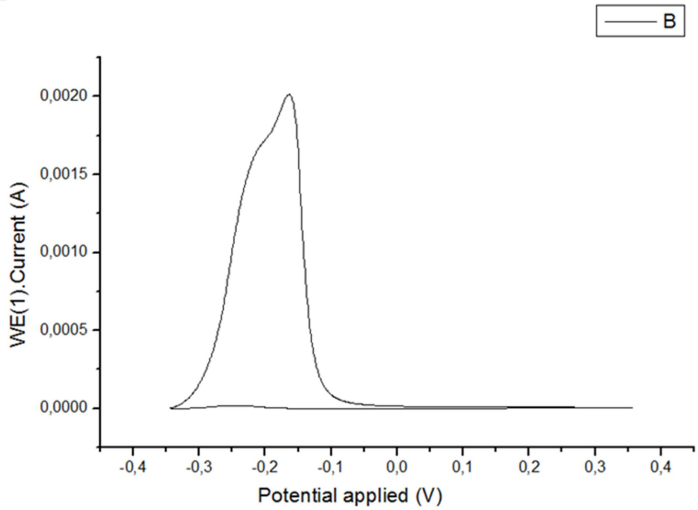


1ª medição no ponto 3

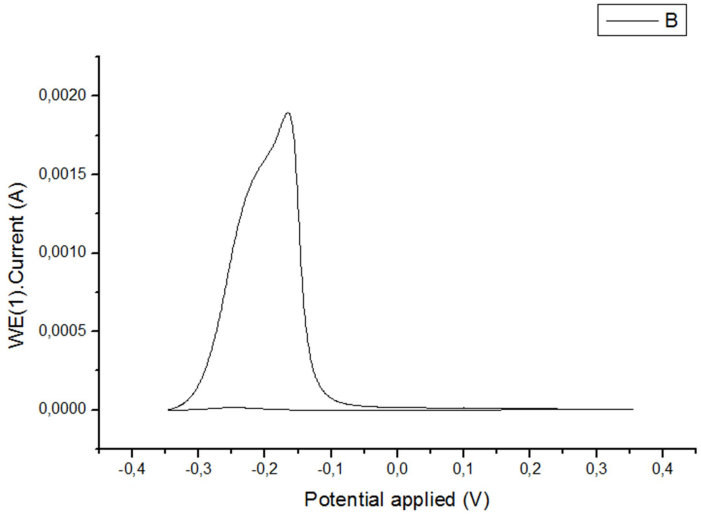
ANEXO D – Resultados os ensaios DL-EPR na amostra D14.14 (Continução)



2ª medição no ponto 1

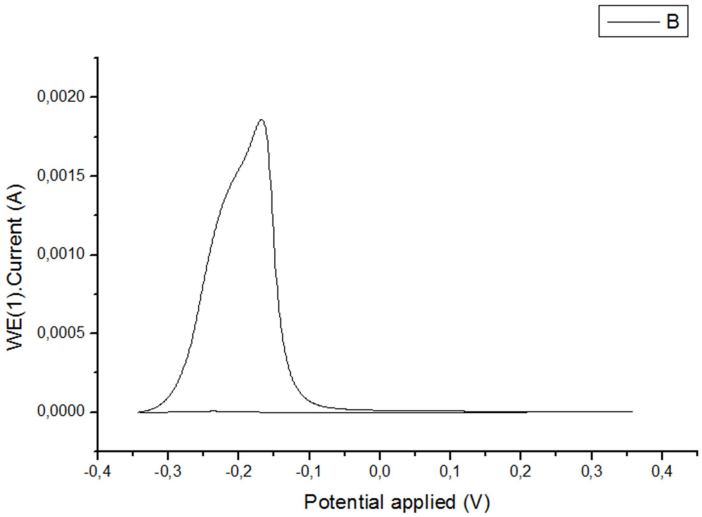


2ª medição no ponto 2



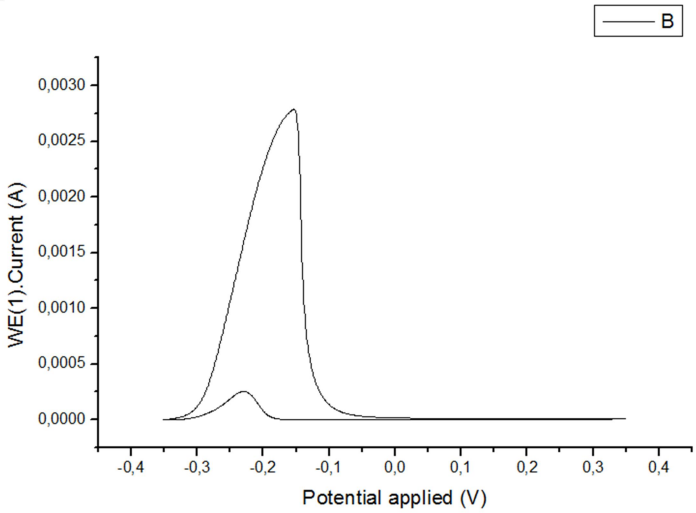
2ª medição no ponto 3

ANEXO D – Resultados os ensaios DL-EPR na amostra D14.14 (Continução)

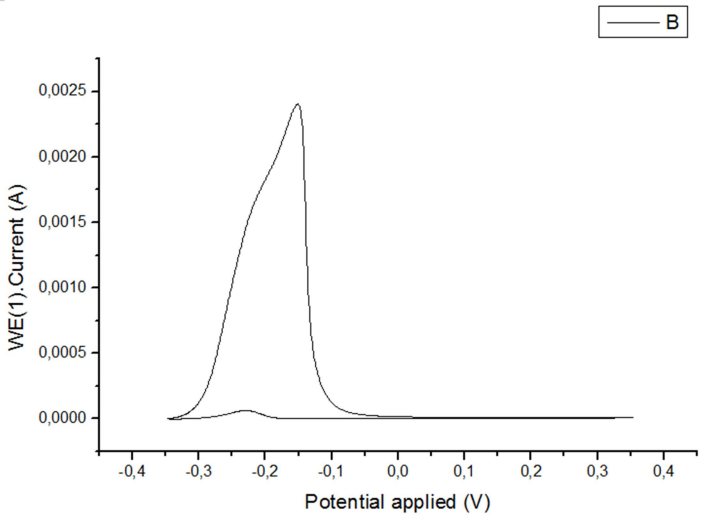


3ª medição no ponto 3

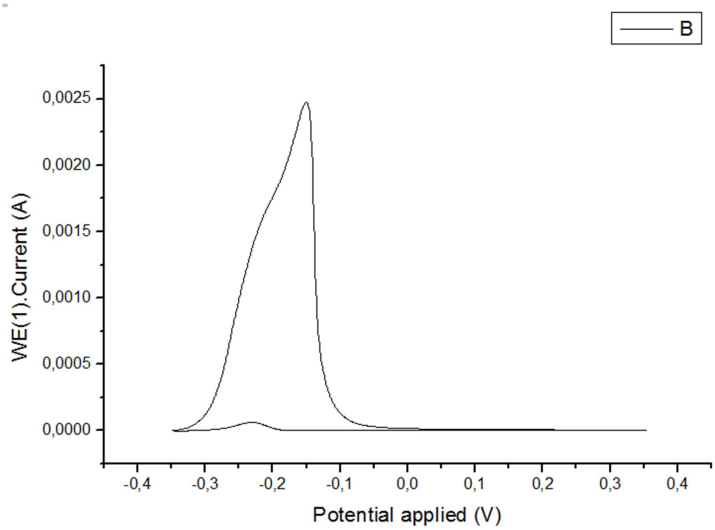
ANEXO E – Resultados os ensaios DL-EPR na amostra D23.66



1ª medição no ponto 1

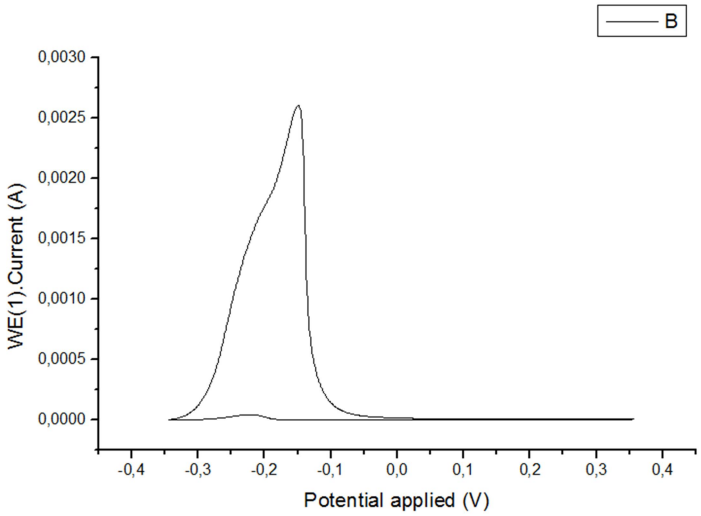


1ª medição no ponto 2

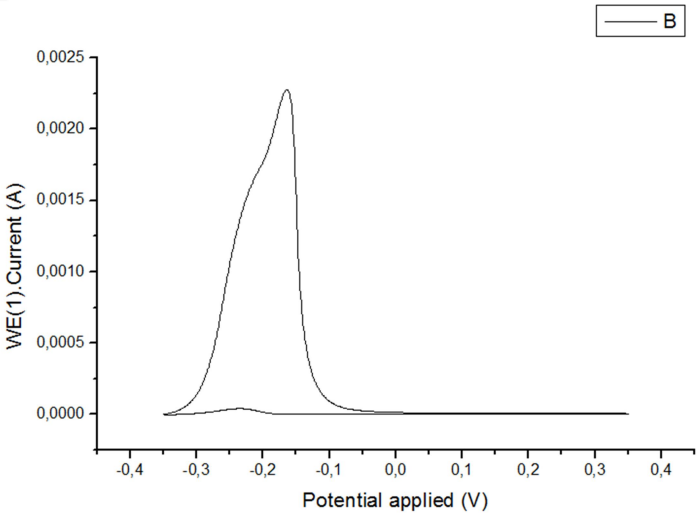


1ª medição no ponto 3

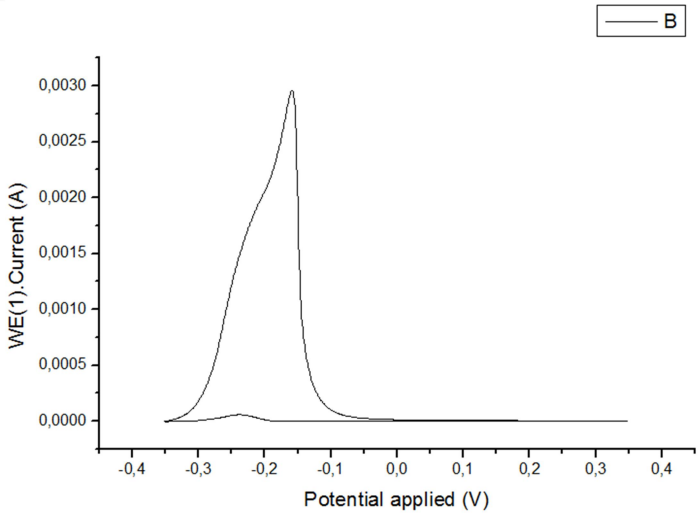
ANEXO E – Resultados os ensaios DL-EPR na amostra D23.66 (Contiuação)



2ª medição no ponto 1

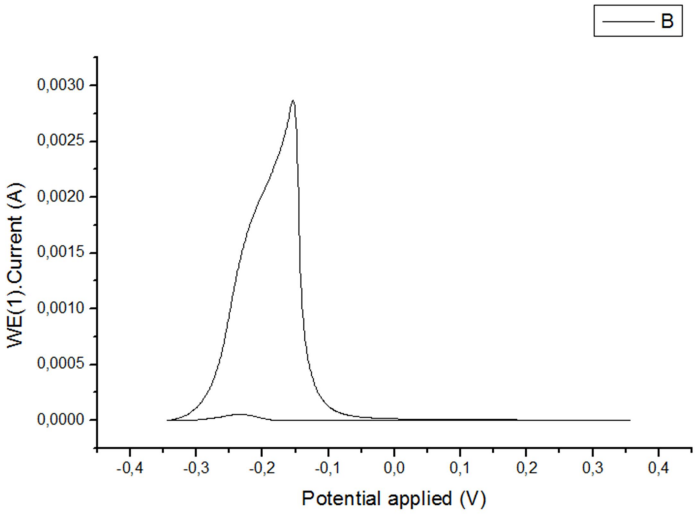


2ª medição no ponto 2



2ª medição no ponto 3

ANEXO E – Resultados os ensaios DL-EPR na amostra D23.66 (Contiuação)



3ª medição no ponto 1