

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS
EXATAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PROCESSOS E TECNOLOGIAS

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO METAL DE ADIÇÃO NO PROCESSO DE
SOLDA A ARCO ELÉTRICO SOBRE UM AÇO PATINÁVEL

Matheus Vidor

Caxias do Sul, 2018

Matheus Vidor

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO METAL DE ADIÇÃO NO PROCESSO DE
SOLDA A ARCO ELÉTRICO SOBRE UM AÇO PATINÁVEL**

Dissertação apresentada no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção de grau de mestre em Engenharia de Processos, orientado por: Dra. Eliena Jonko Birriel e coorientado por Dr. Alexandre Viecelli..

Caxias do Sul, 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

G574a Gobbi, Gabriela

Avaliação das propriedades protetivas e de blindagem eletromagnética de um sistema de pintura a base de tinta poliuretânica com nanotubos de carbono aplicados sobre a liga de alumínio AA7075 /Gabriela Gobbi. – 2018.

85 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, 2018.

Orientação: Ademir José Zattera.

Coorientação: Lílian Vanessa Beltrami.

1. Ligas de alumínio. 2. Nanotubos. 3. Resistência de materiais. 4. Inovações tecnológicas. I. Zattera, Ademir José, orient. II. Beltrami, Lílian Vanessa, coorient. III. Título.

CDU 2. ed.: 669.715

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

“Análise do efeito do metal de adição no processo de solda a arco elétrico na elétrico na fabricação de estruturas metálicas com aços patináveis”.

Matheus Vidor

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos e Tecnologias, Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos e Produtos Industriais

Caxias do Sul, 28 de setembro de 2018

Orientadores:

Profa. Dra. Eliena Jonko Birriel
Orientadora - Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Alexandre Viecelli
Coorientador - Universidade de Caxias do Sul

Banca examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Frank Patrick Missell
Universidade de Caxias do Sul

Profa. Dra. Gelsa Edith Navarro Hidalgo
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado não poderia chegar ao fim sem a colaboração e apoio de diversas pessoas.

Em primeiro lugar, agradeço aos professores, colegas, familiares e amigos pela colaboração direta ou indireta, paciência e ensinamentos ao longo deste período de aprendizagem. Especialmente a mulher da minha vida, Danielle De Brida pelo apoio incondicional em todos os momentos, principalmente nos de incerteza, que foram comuns nesta etapa, na busca por novos caminhos.

Agradeço também as empresas Randon Implementos e a Universidade de Caxias do Sul pelo suporte técnico e financeiro prestados para a execução de cada etapa realizada deste trabalho.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos.....	13
1.1.1	Objetivo geral.....	13
1.1.2	Objetivos específicos.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	PROCESSO DE SOLDAGEM NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA	14
2.1.1	Gás de proteção e vazão	17
2.2	ESPECIFICAÇÕES DO PROCESSO DE SOLDAGEM (EPS).....	18
2.3	METAL DE BASE.....	19
2.3.1	Corrosão na soldagem	23
2.4	Metalurgia da soldagem.....	23
2.4.1	Microconstituintes na zona fundida.....	23
2.4.2	Energia de soldagem.....	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	METAL DE BASE	31
3.2	METAL DE ADIÇÃO.....	32
3.3	PARÂMETROS DE PROCESSO	33
3.4	Preparação dos corpos de prova (CPs)	36
3.4.1	Sistema utilizado atualmente para qualificação do processo de soldagem	36
3.5	PLANEJAMENTO DE ENSAIOS – FLUXOGRAMA	37
3.6	ENSAIOS DE QUALIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	39
3.6.1	Ensaio de Tração.....	39
3.6.2	Dobramento.....	40
3.6.3	Radiografia e Inspeção Visual	41
3.7	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	41
3.7.1	Metalurgia	42
3.7.1.1	Micrografia	42
3.7.1.2	Microdureza.....	43
3.7.2	Ensaio de Corrosão	43
3.7.2.1	Monitoramento de potencial de circuito aberto (OCP)	43
3.7.2.2	Curva Polarização Potenciodinâmica	44

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1	RESISTÊNCIA MECÂNICA DA JUNTA SOLDADA.....	46
4.1.1	Tração	46
4.1.2	Dobramento.....	49
4.1.3	Análise Estatística dos Resultados	50
4.1.3.1	Resistência a Tração	51
4.1.3.2	Dobramento	57
4.1.4	Radiografia.....	57
4.1.5	Microdureza	57
4.1.6	Análise Microestrutural	58
4.2	RESISTÊNCIA Á CORROSÃO DA JUNTA SOLDADA.....	63
4.2.1	Monitoramento do potencial a circuito aberto	63
4.2.2	Ensaio eletroquímico - Curvas de Polarização Potenciodinâmica.....	64
5	CONCLUSÕES.....	69
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Comparação entre parâmetros de soldagem: semi-automático e robotizado.	15
Quadro 2. Composição química típica de aços com resistência a corrosão atmosférica.	19
Quadro 3. Especificações do material ASTM A 588 (Folha materiais Randon).	31
Quadro 4. Especificações químicas e mecânicas do metal de adição (ESAB, 2016).	32
Quadro 5. Matriz experimental para ajuste de parâmetros de soldagem.	33
Quadro 6. Parâmetros de processo aplicados nos corpos de provas.	34
Quadro 7. Heat input calculado para parâmetros de ensaio.	36
Quadro 8. Resultados de resistência mecânica obtidos nos ensaios de tração. Erro! Indicador não definido.	
Quadro 9. Resultados de limite de escoamento obtidos nos ensaios de tração.	48
Quadro 10. Resultados de alongamento obtidos nos ensaios de tração.	49
Quadro 11. Resultados obtidos nos ensaios de dobramento de face e raiz.	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo de soldagem GMAW (ERICA, 2015).....	16
Figura 2. Perfil e penetração de acordo com o gás de proteção (ÉRICA, 2015).....	18
Figura 3. Ciclo esquemático da produção e deterioração do aço.	20
Figura 4. Morfologias de constituintes conforme a classificação do IIW de micrografias padrão para comparação.	25
Figura 5. Interferências na morfologia do material de base geradas pelo aporte de calor proveniente do processo de solda.	28
Figura 6. Ciclo térmico de soldagem (esquemático).	29
Figura 7. Regiões de solda por fusão.....	29
Figura 8. Posição de soldagem plana (1G), conforme ASME IX - QW-461.3 (ASME IX, 1984).	33
Figura 9. Robô de soldagem a arco – Modelo TM-1400W.....	35
Figura 10. Especificação da região a ser analisada nos ensaios de caracterização,	37
Figura 11. Fluxograma do processo de preparação e análises.....	38
Figura 12. Dimensional CPs para ensaios de tração e dobramento.....	39
Figura 13. Dobramento de face e raiz do CP soldado.	40
Figura 14. Máquina de ensaio universal Panantec,	41
Figura 15. Microscópio óptico utilizado nos ensaios de micrografia e microdureza.	42
Figura 16. Ensaio de potencial de circuito aberto (OCP).....	44
Figura 17. Representação da célula eletroquímica utilizada nos ensaios, onde (a): eletrodo de referência, (b): eletrodo de trabalho e (c): eletrodo auxiliar.....	45
Figura 18. Curva obtida no ensaio de tração dos CPs.	47
Figura 19. Dispersão de dados para a resistência a tração.	51
Figura 20. Dispersão de dados para o limite de escoamento.....	52
Figura 21. Dispersão de dados para % de alongamento.	52
Figura 22. Resistência média máxima a tração para os diferentes metais de adição.	53
Figura 23. Resistência média máxima a tração para a interação velocidade de soldagem com parâmetro elétrico.	54
Figura 24. Limite de escoamento para os diferentes metais de adição.	55
Figura 25. Limite de escoamento para a interação velocidade de soldagem com parâmetros elétricos.....	56
Figura 26. Resultados das análises de microdureza para as condições soldadas.	58

Figura 27. Microestrutura do aço ASTM A588 com aumento de 500X e ataque de Nital 4% sem interferências térmicas.	59
Figura 28. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 01 (i:150 A; T:16 V e velocidade: 700 mm/min – ER70S-6), conforme Quadro 6.....	59
Figura 29. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 02 (i:180 A; T:17,5 V e velocidade: 700 mm/min – ER70S-6), conforme Quadro 6.....	60
Figura 30. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 03 (i:200 A; T:18,5 V e velocidade: 700 mm/min – ER70S-6), conforme Quadro 6.....	60
Figura 31. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 05 (i:180 A; T:17,5 V e velocidade: 1000 mm/min – ER70S-6), conforme Quadro 6.....	60
Figura 32. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 06 (i:200 A; T:18,5 V e velocidade: 1000 mm/min – ER70S-6), conforme Quadro 6.....	61
Figura 33. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 07 06 (i:150 A; T:16 V e velocidade: 700 mm/min – ER80S-G), conforme Quadro 6.....	61
Figura 34. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 09 (i:200 A; T:18,5 V e velocidade: 700 mm/min – ER80S-G), conforme Quadro 6.....	61
Figura 35. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 11 (i:180 A; T:17,5 V e velocidade: 1000 mm/min – ER80S-G), conforme Quadro 6.....	62
Figura 36. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 12 (i:200 A; T:18,5 V e velocidade: 1000 mm/min – ER80S-G), conforme Quadro 6.....	62
Figura 37. Comportamento típico de monitoramento de potencial a circuito aberto para o aço ASTM A588.	63
Figura 38. Curva de Polarização MB(A) e MB(B).	65
Figura 39. Curva de Polarização Condição 1A e 1B (i:150 A; T:16 V e velocidade: 700 mm/min – ER70S-6).	65
Figura 40. Curva de Polarização Condições 2A e 2B (i:180 A; T:17,5 V e velocidade: 700 mm/min – ER70S-6).....	66
Figura 41. Curva de Polarização Condição 9A e 9B (i:200 A; T:18,5 V e velocidade: 700 mm/min – ER80S-G).....	66
Figura 42. Curva de Polarização Condição 11A e 11B (i:180 A; T:17,5 V e velocidade: 1000 mm/min – ER80S-G).....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MB	Metal Base
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MS	Metal de Solda
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
ZTA	Zona termicamente afetada

RESUMO

O processo de soldagem está presente em cerca de 90% das indústrias, dos ramos metal mecânicas, de construção civil, óleo e gás. Dentre a variada gama de processos, distingue-se a soldagem MIG/MAG, que é a primeira opção para grande parte das necessidades de uniões de metais na indústria. A característica de alimentação automática de consumível sobre a união a ser soldada torna o processo mais ágil e competitivo no cenário comercial. A intensa demanda industrial por segurança, qualidade e produtividade faz com que as pesquisas se estendam no tema, avaliando novos materiais (metal base, metal de adição e consumíveis), otimização de processos, equipamentos, entre outros. A aplicação de materiais com maior resistência mecânica e química trazem a necessidade da utilização de consumíveis e processos que acompanhem estas tendências, e mantenham as propriedades após a soldagem, como no caso dos aços patináveis que apresentam como característica a resistência à corrosão atmosférica. Nesse trabalho foi avaliada a soldagem do aço ASTM A588 com duas alternativas de metais de adição (ER70S-6 e ER80S-G) e doze condições de parâmetros de soldagem (parâmetros elétricos baixos, médios e altos). Foram realizados ensaios de qualificação para validar os parâmetros de soldagem, radiografia, dobramento e tração. Após a qualificação da solda foram realizados ensaios de caracterização, quais sejam, microdureza, micrografia e desempenho a corrosão com a avaliação do potencial eletroquímico versus tempo e curvas de polarização potenciodinâmica na zona termicamente afetada (ZTA) e metal base (MB). Os resultados quanto a propriedades mecânicas e resistência a corrosão mostraram que os parâmetros de solda foram preponderantes em relação aos tipos de metais de adição. Concluiu-se que a seleção inadequada de parâmetros elétricos é prejudicial as propriedades mecânicas, acarretando em defeitos como de falta de fusão e preenchimento incompleto da junta. Quanto ao metal de adição, tanto o ER70S-6 quanto ER80S-G apresentaram desempenhos similares perante às análises de desempenho a corrosão.

Palavras-chave: GMAW, ASTM A588, AÇOS PATINÁVEIS, CORROSÃO.

ABSTRACT

The welding process is present in about 90% of the industries, metalworking, civil construction, oil and gas. Among the diverse range of processes, MIG / MAG welding is distinguished, which is the first option for most of the needs of metal joints in the industry. The feature of automatic supply of consumables on the joint to be welded makes the process more agile and competitive in the commercial scenario. The intense industrial demand for safety, quality and productivity makes the researches extend to the theme, working with new materials (metal base, addition metal, consumables), optimization of processes, equipment, among others. The application of materials with greater mechanical and chemical resistance bring the need for the use of consumables and processes that accompany these trends and maintain the properties after welding, as in the case of the steels that have as characteristic the resistance to atmospheric corrosion. In this work the welding of the ASTM A588 steel with two addition metal alternatives (ER70S-6 and ER80S-G) and twelve conditions of welding parameters were evaluated. Qualification tests were performed to validate welding parameters, including radiography, folding and traction. After the solder qualification, microhardness, micrograph and corrosion performance tests were carried out with the electrochemical potential versus time and potentiodynamic polarization curve in the HAZ and BM. The results on mechanical properties and corrosion resistance showed that the welding parameters were predominant in relation to the types of addition metals. It was concluded that the inadequate selection of electrical parameters is detrimental to the mechanical properties, leading to defects such as lack of fusion and incomplete filling of the joint. As for the addition metal, both ER70S-6 and ER80S-G showed similar performances to corrosion performance analyzes.

Keywords: GMAW, ASTM A588, WEATHERING STEELS, CORROSION.

1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva apresenta a contínua necessidade de aumentar a competitividade e rentabilidade. Devido a sua importância estrutural, os componentes metálicos são encontrados na maior parte desse mercado. Estes *part numbers* metálicos são ligados entre si criando diversos subconjuntos para obter-se o produto final. Essa junção de materiais metálicos é realizada através do processo de soldagem, que é a tecnologia mais utilizada para conectar dois componentes e processos GMAW (*gas metal arc welding*), TIG (*tungsten inert gas*), arco submerso e laser são os mais comumente empregados em aplicações industriais.

No Brasil o processo de soldagem está em ascensão, algumas pesquisas mostram o aumento simultâneo do consumo de aços e gás de proteção utilizados no processo. No país, as duas principais indústrias que movimentam os processos de soldagem são a automotiva e a de construção civil. Em relação às últimas décadas, a indústria automotiva cresceu cerca de 20% e a civil 30%. A soldagem apresenta, além de crescimento industrial, crescimento científico na área através de desenvolvimento de pesquisas no tema.

O tema estudado apresenta relevância quando se relaciona propriedades de resistência à corrosão e propriedades mecânicas, assim como relevância aos aspectos financeiros, quando se compara o valor dos metais de adição avaliados.

A qualidade do processo de soldagem e a performance das juntas soldadas são afetadas por diversos fatores, incluindo defeitos iniciais, geometria da solda, resistência mecânica, concentração de tensões e temperatura de processamento, estes que frequentemente determinam a vida das estruturas metálicas em serviço. Algumas estruturas ficam expostas em condições agressivas do meio ambiente, assim como construções, pontes e locomotivas ferroviárias. A exposição pode causar sérios danos de corrosão nas zonas soldadas. Diversos autores têm investigado o comportamento da corrosão e demonstram que a resistência geralmente depende da composição química do metal de base (MB), da estrutura granular, da zona termicamente afetada (ZTA) e do metal de adição, entre outros.

Existem aços específicos que são utilizados para minimizar esses efeitos corrosivos, denominados aços patináveis, com características de resistência elevada e baixa liga com a composição química a base de carbono e cerca de 2% de elementos de liga, que conferem propriedades de resistência a corrosão, tais como fósforo (P), silício (Si), níquel (Ni), cromo (Cr) e cobre (Cu). Os limites destes elementos classificam o aço como ASTM A 588 e ASTM A 242 (Albrecht, 1991).

Para maximizar o tempo de vida desses subconjuntos soldados, deve haver compatibilidade entre o metal de base e metal de adição. A seleção dos parâmetros adequados combinados com os consumíveis são essenciais para resultados satisfatórios. Neste contexto, esse trabalho tem por objetivo comparar o desempenho em relação aos aspectos metalúrgicos e corrosão dos metais de adição ER70S-6 e ER80S-G além de velocidade de processamento na soldagem GMAW do aço ASTM A588.

1.1 OBJETIVOS

Nessa cláusula são apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo avaliar os comportamentos mecânicos, metalúrgicos e quanto ao processo corrosivo de dois metais de adição no processo de soldagem GMAW (MIG/MAG) do aço ASTM A588.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atender o presente objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram determinados, considerando sempre os dois metais de adição avaliados:

- a) avaliar o efeito dos parâmetros de soldagem e metais de adição por meio de ensaios mecânicos e metalúrgicos;
- b) determinar se o aço ASTM A588 submetido a solda apresenta resistência à corrosão.
- c) determinar as melhores condições de soldagem para o aço ASTM A588.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo são apresentados os tópicos discutidos nessa dissertação. Os tópicos foram organizados de forma a favorecer o entendimento da elaboração metodológica, bem como reforçar a discussão dos resultados.

2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

A soldagem é um processo de fabricação (KIMINAM et al. 2013) de grande importância na indústria, pois a integridade das estruturas montadas depende desta etapa. O fato de influenciar custos, cronogramas, análises de risco e viabilidade de projetos são imperativos métodos e procedimentos de soldagem com maior produtividade (FARACO, 2008).

Este incremento de produtividade vem se tornando viável com a implementação de automações industriais. Linhas robóticas de solda são comuns na indústria automobilística. Durante a produção de um veículo, sua estrutura metálica precisa ser soldada em um único corpo resistente. Isso é feito por meio de centenas de soldas, com intuito de ligar duas ou mais placas metálicas.

Na indústria, vem se tornando comum a utilização de robôs manipuladores combinados com garras ou ferramentas. Garras normalmente são utilizadas com intuito de transportar peças, carregar/descarregar máquinas, arranjar componentes sobre uma embalagem. Quando combinados com ferramentas, a tecnologia é utilizada para realizar alguma espécie de trabalho sobre a peça: soldagem a arco, ponto, pintura, entre outros (DINHAM, 2013).

As linhas produtivas são incrementadas por uma série de alternativas de automatizações. Os robôs industriais são máquinas manipuladoras, programadas automaticamente podendo apresentar base fixa ou móvel.

Com o processo de soldagem como uma das principais etapas de manufatura, profissionais da área são extremamente exigidos, levando um longo período de tempo de experiência para que se tornem qualificados, além da alta demanda física e exposição aos fumos metálicos e radiações. Tais características pertinentes ao processo trazem a escassez de soldadores e a constante busca de alternativas, como por exemplo, a robotização.

Na indústria em geral, a utilização de robôs na soldagem teve início na década de 60, na, dirigindo-se inicialmente a soldagem por resistência. Por sua vez, o uso de soldagem a arco elétrico foi incrementado a partir da evolução das máquinas de solda quando estas foram dotadas de microprocessadores, que passaram a propiciar respostas rápidas às condições de

soldagem (corrente e tensão), permitir a manutenção de estabilidade de arco além de atuarem em outros aspectos importantes que afetam o controle do arco elétrico no contato da tocha na peça (Pamnani, 2015).

O Quadro 1, mostra um comparativo entre o processo de solda semi-automática e a solda robotizada, conforme descrito no trabalho de Pamnani (2015).

Quadro 1. Comparação entre parâmetros de soldagem: semi-automático e robotizado.

Soldagem semi-automática	Soldagem robotizada
Velocidade de soldagem limitada	Aumento da velocidade em aproximadamente 15%
Defeitos e refugos	Ausência de defeitos e refugos
Consumo anual elevado de arame e consumíveis	Redução de consumo em aproximadamente 40%
Peças produzidas por dia	Foi possível dobrar a quantidade de peças produzidas por dia, em alguns casos triplicar
Manutenção da tocha de soldagem frequente	A manutenção da tocha diminuiu em aproximadamente 10 vezes

Fonte: Pamnani (2015)

A grande vantagem em um processo robotizado reside em aumentos de velocidade de fabricação, isenção de refugos e desperdícios, além de manutenibilidade dos sistemas de soldagem. O processo de solda a arco elétrico (GMAW) é amplamente utilizado nos processos de fabricações atuais e continuam como principal processo de soldagem combinado à robótica.

A soldagem GMAW usa a energia do arco elétrico como fonte de calor, conduzida pelo próprio eletrodo (metal de adição), alimentado de uma maneira contínua até o metal de base. O calor gerado na reação funde a extremidade do eletrodo e se deposita em uma poça, que é gerada na superfície do metal de base (peça) para formar a solda (metal fundido). Esse processo pode ser definido como automático quando o deslocamento da tocha é executado mecanicamente por um equipamento, ou semiautomático quando o deslocamento da tocha é feito pelo operador (soldador) (PLANCKAERT, 2010).

O arco é estabelecido, tocando-se no metal de base (peça) com a ponta do arame e acionando o gatilho. Na ponta do arame pode-se ver um arredondamento derivado de sua fundição, iniciando a transferência metálica. A Figura 5 ilustra a formação da poça de fusão para o processo de soldagem GMAW.

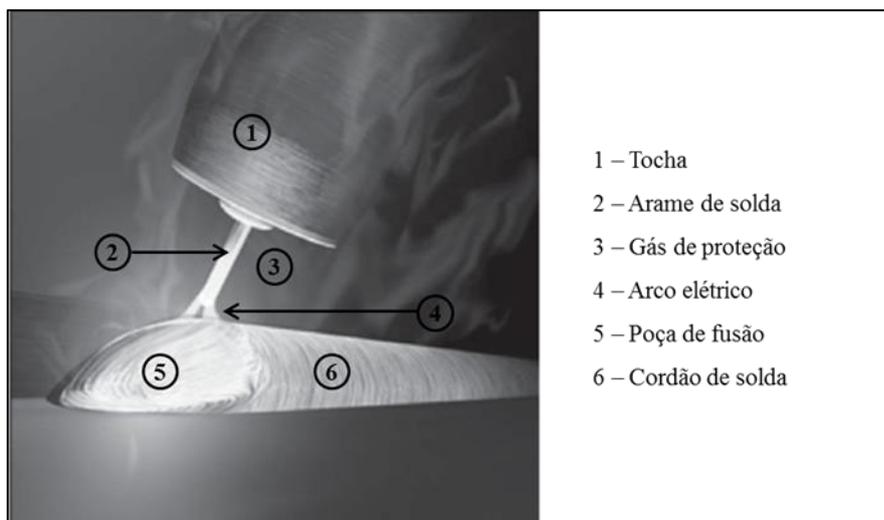


Figura 1. Processo de soldagem GMAW (ERICA, 2015).

Na Figura 1 é possível observar a deposição de um cordão de solda com todos os componentes envolvidos na formação do arco elétrico. A tocha de soldagem (1) responsável pela alimentação do metal de adição (2), o qual toca na peça formando o arco elétrico (4) e posterior poça de fusão (5) e cordão solidificado (6). O processo GMAW é um processo normalmente semiautomático, em que a alimentação de arame (eletrodo) é feita mecanicamente, através de um alimentador motorizado, e o soldador é responsável pela iniciação e interrupção da soldagem, além de mover a tocha ao longo da junta. A manutenção o arco é garantida pela alimentação contínua do arame (eletrodo), e o comprimento do arco é, em princípio, mantido aproximadamente constante pelo próprio sistema, independentemente dos movimentos do soldador, dentro de certos limites, nos sistemas mais comuns usados com este processo (MODENESI, 2014).

Na soldagem GMAW os principais parâmetros de processos (variáveis essenciais) são: metal base, arame, corrente, tensão, gás de proteção (AWS D15.1, 2001).

Tipi (2015) mostrou que algumas variáveis são fundamentais no desempenho de processo e qualidade da soldagem. Pesquisas mostram que parâmetros de soldagem, como por exemplo, o calor de entrada e gás de proteção determinam as fases estruturais e morfológicas dos materiais afetando a tenacidade de juntas soldadas. A taxa de arrefecimento e composição química afetam diretamente à resistência da junta (WENKAI, 2015).

A literatura estabelece que a seleção dos parâmetros operacionais é fundamental para um processo de qualidade e homogêneo. A variação dos parâmetros interfere diretamente nas propriedades mecânicas, químicas e morfológicas dos materiais e pode ser dividida em duas etapas de controles essenciais: geometria do cordão de solda e propriedades térmicas geradas

(HEMMATZADEH, 2007).

De acordo com os argumentos da literatura, as variáveis essenciais são as variáveis que interferem diretamente no resultado do produto soldado, entre os principais parâmetros se destacam corrente, tensão e velocidade. Estes possuem relação direta ao calor gerado durante o processo e, por consequência, interferem diretamente na resistência mecânica, estrutura, acúmulo de tensões entre outras características do produto final.

Os parâmetros de corrente e tensão são responsáveis por caracterizar o modo de transferência metálica na soldagem GMAW, a velocidade de avanço é consequência do processo, quanto maior a intensidade de tensão e corrente, maior será a velocidade de avanço. Existem três principais modos de transferências (BRANDI, 1992):

Transferência Globular – Ocorre para baixas densidades de corrente e qualquer tipo de gás de proteção, especialmente para o CO₂ e hélio. A gota que se forma na ponta do eletrodo tem diâmetro maior que ele.

Transferência por curto-circuito – Ocorre para eletrodos com diâmetros entre 0,8 a 1,2 mm, para valores mais baixos de correntes do que para a transferência globular e para qualquer tipo de gás de proteção. A gota que se forma na ponta do eletrodo toca a poça de fusão formando um curto-circuito.

Transferência por pulverização – Ocorre para elevadas densidades de corrente e quando se usa argônio ou misturas ricas em argônio como gás de proteção. A gota que se forma na ponta do eletrodo tem diâmetro menor que o próprio eletrodo e é lançada para a poça de fusão como spray.

2.1.1 Gás de proteção e vazão

Os gases de proteção utilizados no processo denominado GMAW caracterizam o processo MIG (metal inert gas), quando utilizados como gás de proteção argônio (Ar), hélio (He) ou uma mistura de ambos. E o processo MAG (metal active gas) quando utilizada a mistura de gases inertes com dióxido de carbono (CO₂), oxigênio (O₂) ou ainda CO₂ puro.

A vazão do gás no processo GMAW se refere a quantidade em litros de gás de proteção espalhada por minuto em torno da poça de fusão, em função da intensidade de corrente utilizada. Ou seja, quanto maior a intensidade de corrente maior deverá ser a vazão de gás de proteção.

A composição do gás de proteção também tem um importante papel no processo de soldagem. De acordo com a literatura, os efeitos provenientes do gás de proteção afetam diretamente: 1) propriedade de arco; 2) características de fusão do arame; 3) perfil do cordão

de solda (DING, 2016).

Diferentes perfis de penetração são observados de acordo com o gás de proteção utilizado no processo: a penetração do Argônio (Ar) puro é profunda no centro, e nas extremidades a penetração é reduzida. O dióxido de carbono (CO₂) puro tem uma maior penetração em ambos os casos com um alargamento lateral. Já para o Ar combinado com 25% de CO₂ a penetração é profunda no centro e maior nas laterais. A Figura 2 ilustra a situação.

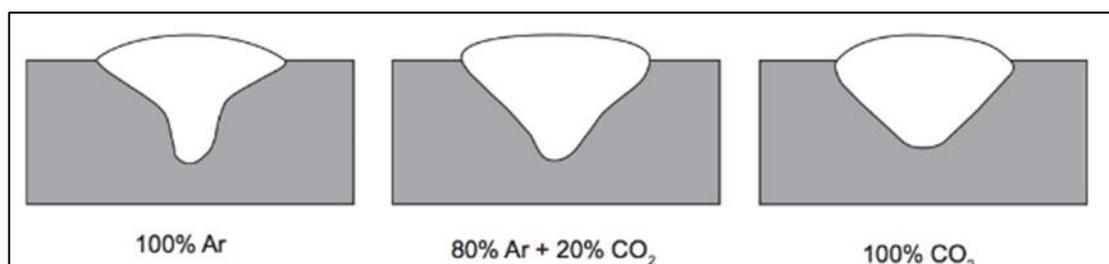


Figura 2. Perfil e penetração de acordo com o gás de proteção (ÉRICA, 2015).

As propriedades básicas dos gases que afetam os processos de soldagem são as propriedades térmicas, reatividade química com metal de base ou metal de adição e contaminantes e no modo de transferência (globular, curto circuito ou spray) as considerações apresentam interferências diretas nas propriedades mecânicas e formações metalúrgicas do metal soldado.

2.2 ESPECIFICAÇÕES DO PROCESSO DE SOLDAGEM (EPS)

As especificações e normas determinam os padrões mínimos a serem seguidos para manufatura e manutenção de equipamentos soldados. Assim, um dos objetivos primários de um código é a prevenção de acidentes, perdas materiais e contaminação do meio ambiente. Além disso, o uso bem sucedido de códigos e normas pode resultar em uma produção mais uniforme, melhor controle de qualidade, maior rastreabilidade, possibilidade de correção de falhas em produtos e em um método de produção sistemático (MODENESI, 2012).

Estes códigos e especificações podem cobrir as mais diferentes etapas de soldagem incluindo, por exemplo, a especificação de material (metal de base e consumíveis), projeto e preparação da junta, fabricação de estruturas e equipamentos, qualificações de processo e de operador, procedimentos de inspeção e avaliação de descontinuidades.

2.3 METAL DE BASE

Em regiões costeiras, a corrosão pode ser um problema considerável devido a agressividade do meio ambiente relacionada aos aspectos químicos, salinidade e umidade. Principalmente em estruturas mais antigas é possível evidenciar graus de corrosão moderados e até avançados apesar do esforço para preveni-los. Devido ao custo de manutenção e ao custo de revestimentos protetores e a crescente preocupação com impactos ambientais, há uma tendência na utilização de aços com resistência a corrosão (Melchers, 2008).

Os aços com resistência a corrosão são aços ligados com Cr, Cu, Ni, P e outros elementos. Uma propriedade básica destes materiais é a capacidade de criar uma camada superficial de pátina protetiva que retarda a taxa de corrosão. Os *weathering steels*/aços patináveis são utilizados por mais de 50 anos para construções ou equipamentos que permaneçam altos tempos expostos ao ar atmosférico sem proteção de revestimentos (Urban, 2017).

O Quadro 2 mostra a composição química típica dos materiais com propriedades de resistência a corrosão atmosférica.

Quadro 2. Composição química típica de aços com resistência a corrosão atmosférica.

Aço	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cu %	Cr %	Ni %	Mo %
Cu-bearing	0,10-0,13	0,004-0,01		0,002-0,005		0,21-0,026	0,014-0,02	0,014-0,02	
A242	0,10-0,13	0,27-0,68	0,48-0,50	0,006-0,15	0,015-0,020	0,24-0,58	0,52-1,2	0,03-0,66	
A588	0,10-0,13	0,29-0,43		0,0060,08		0,21-0,33	0,52-0,62	0,015-0,21	
Bethlehem Mayari R-50	0,13	0,68	1	0,01	0,015	0,37	0,54	0,34	
Sumitomo	0,10-0,12	0,49-0,56	0,48-0,50	0,018-0,149	0,015-0,020	0,57-0,58	0,90-1,19	0,42-0,49	
JIS-SMA490A W	0,11	0,24	0,75	0,014	0,005	0,33	0,49	0,12	
JFE-A CI#1	0,04-0,07	0,26-0,32	0,57-0,74	0,029-0,033	0,002-0,004			1,42-1,48	0,30-0,32
JFE-A CI#2	0,02	0,27-0,34	0,32-0,98	0,006-0,013	0,002-0,005	0,37-0,39		2,60-2,68	
SMA490AW-MOD	0,06	0,2	0,85	0,005	0,002	0,32	0,02	3,05	

Fonte: Urban, 2017.

O Quadro 2 mostra que o percentual de carbono (C) para os aços Cu-bearing, A242, A588, e Bethlehem Mayari R-50 apresenta uma concentração muito próxima, sendo levemente inferiores para os aços Sumitomo, JIS-SMA490A W e SMA490A W - MOD. Por outro lado, os aços denominados JFE-A CI#1 e JFE-A CI#2 possuem carbono muito baixo.

A concentração percentual do silício (Si) é muito baixa para o aço Cu-bearing se comparado aos outros aços apresentados na tabela, sendo a faixa de concentração entre 0,2 e 0,68%. Quanto ao manganês (Mn), aparece isento para os aços Cu-bearing e A588, para os demais a concentração percentual atua entre 0,32 e 0,68%.

Para estes materiais patináveis, o processo de fabricação deve apresentar severo controle, evitando que o material sofra grandes interferências quanto as suas propriedades mecânicas e microestruturais, mantendo assim as suas propriedades originais, anterior ao beneficiamento.

Por isto, a avaliação destes materiais soldados é relevante pois com o aquecimento do metal base e fusão do metal de solda podem ocorrer alterações metalúrgicas e formações devido aos elementos de liga capazes de comprometer as propriedades mecânicas e proteção a corrosão atmosférica.

Corrosão é definida como a deterioração das propriedades de um metal pela reação química ou eletroquímica com o meio que o envolve.

O processo de corrosão, é algumas vezes, identificado com processo inverso ao da metalurgia extrativa. Enquanto essa cuida da transformação do minério em ligas prontas para o uso em engenharia, a corrosão provoca a destruição dos metais e ligas metálicas transformando-as em óxidos ou hidróxidos. (Serra, 2014) A Figura 3 ilustra este conceito aplicado ao aço.

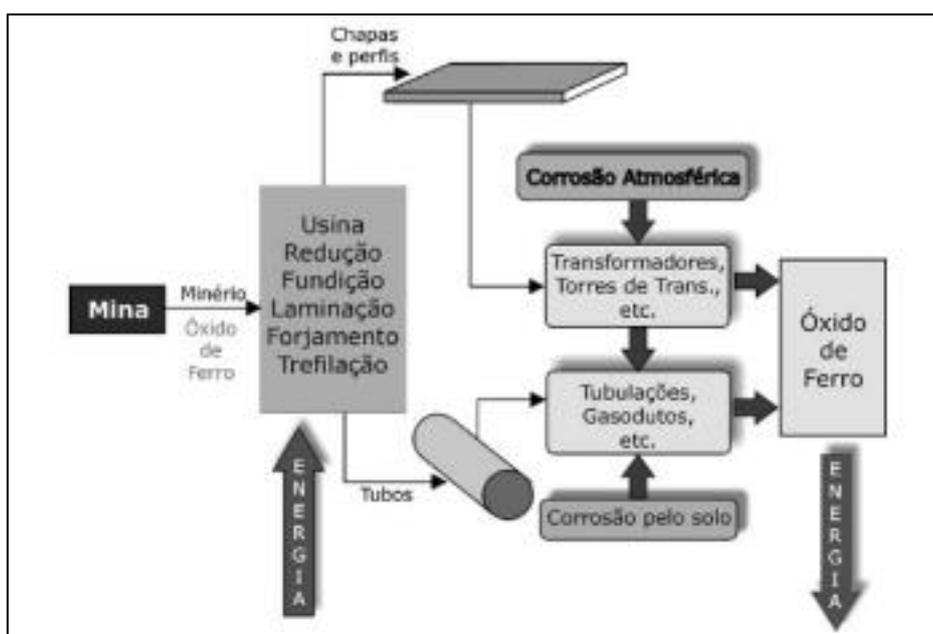


Figura 3. Ciclo esquemático da produção e deterioração do aço.

Quando as reações de corrosão ocorrem, geralmente com materiais metálicos, tem-se perda de qualidades essenciais, como resistência mecânica, elasticidade, ductilidade, além de gerar alterações indesejáveis e prejudiciais, tais como desgaste variações químicas ou modificações estruturais (YE, 2015; TELLES, 2003).

O aço carbono tem sido a liga metálica mais utilizada no segmento de bens de produção básicos da sociedade. Ao longo dos últimos anos, vem-se presenciando progressos expressivos tanto na fabricação de novas ligas ferrosas quanto no desenvolvimento de novos materiais. No entanto, devido ao seu baixo custo e as suas características mecânicas, o aço-carbono ainda é a liga metálica mais aplicada nos segmentos de bens de produção (VILLAS, 2006; INAGUMA, 2012).

Encontra-se na literatura alguns estudos recentes referentes a soldagem de aços patináveis. Shanhua (2018), estudou os efeitos quanto a corrosão e características mecânicas no processo de solda GMAW para juntas de topo no aço estrutural Q235 com o metal de adição ER50-6. Neste estudo, foram avaliados quatro graus de corrosão, com diferentes tempos de exposição a névoa salina. Com as amostras pré-definidas e já corroídas, realizou-se ensaios mecânicos para avaliar as propriedades das juntas soldadas. Observou-se nos resultados que houve redução significativa da ductilidade das juntas em função da perda de área promovida pelo efeito corrosivo.

Em outro trabalho, Ibrahim (2017) avaliou através de análises estatísticas o critério de aceitação ou rejeição de descontinuidades nas juntas soldadas nos aços ASTM A588 e ASTM A572, validando os resultados através de ensaios de Charpy. Os critérios de entrada para as análises, ou respostas utilizadas nas análises foram tamanho máximo da descontinuidade e limite máximo de alongamento. Foi desenvolvido um banco de dados com os resultados obtidos nos ensaios para diferentes materiais e diferentes temperaturas de aplicações. Através de um método estatístico definiu-se os limites máximos de descontinuidades permitidas para cada classe de material e suas aplicações.

Em 1991 foi publicado um trabalho referente a ponte Luling em Louisiana, Pense (1991), avaliou as características de falha estrutural na soldagem do aço ASTM A588. O material em estudo é comumente utilizado em construções civis, pontes, principalmente obras que se mantem expostas ao meio ambiente. No estudo, foi realizada uma inspeção visual de todos os conjuntos soldados na ponte e averiguou-se dois principais fenômenos de falhas, trinca por fadiga em função dos ciclos empregados na construção e descontinuidades nas soldas de uniões do material.

Recentemente Tewary (2016), realizou ensaios de corrosão em dois diferentes materiais com propriedades de resistência à corrosão atmosférica, um deles utilizado em trilhos de trem ASTM A36 (material antigo), outro em pontes com ASTM A588 (material moderno), comparando o comportamento quanto a corrosão através de ensaios de exposição a soluções de NaCl e HCl. Também foram realizadas análises de microestrutura com microscópio óptico e microscópio de varredura eletrônica. Os resultados mostraram maiores quantidades de perlita no material ASTM A36 além de um maior tamanho de grão. Quanto a resistência a corrosão, nos ensaios de imersão o aço ASTM A36 aumenta a taxa de corrosão enquanto o A588 reduz.

Em 2011, Feng realizou um estudo comparativo entre os aços patináveis, aços de baixo carbono e aços temperados em relação a resistência a corrosão atmosférica. Os três tipos de materiais ficaram expostos ao meio ambiente durante dois anos, em Jiangjin, na China. As taxas de corrosão decaíram cerca de 19,5% e 28,2% respectivamente para os aços temperados e aços patináveis comparando com aço de baixo carbono. A pesquisa mostrou que a adição de fosforo (P) na liga promove a formação de uma camada protetora para o aço aumentando a resistência a corrosão atmosférica.

Em 1994, Huang avaliou e caracterizou os efeitos metalúrgicos no comportamento eletroquímico do aço de baixo carbono ASTM A516 soldado. Foram realizados ensaios com curvas de polarização e impedância eletroquímica onde as amostras foram preparadas com três diferentes condições (heat input) de soldagem. Os resultados evidenciaram que o comportamento eletroquímico é dependente da morfologia metalúrgica, ou seja, variável de acordo com a quantidade de ferrita acicular, ferrita no contorno de grão ou ferrita Widmanstätten.

Hao em 2018, na China, realizou um estudo referente a trincas promovidas por corrosão sob tensão do aço E690 exposto ao ambiente marinho. Para a avaliação do material foram utilizadas técnicas eletroquímicas e caracterização da morfologia do material através de microscópio de varredura eletrônica e difração de raio X. As análises mostraram maior propensão de trincas nas estruturas com dissolução anódica e hidrogênio retido que nucleavam nos pits da camada corrosiva e se propagavam ao longo da estrutura bainítica. Ficou evidente que a vida mecânica do material apresentou influência direta com a taxa de corrosão.

Como evidenciado nessa clausula, foram e vem sendo realizados diversos estudos que buscam relação entre a resistência mecânica e a resistência a corrosão dos materiais. Sempre com intuito de entender as alterações metalúrgicas promovidas pelos processos de beneficiamento e como elas interferem na vida destes aços quando expostos ao meio ambiente.

2.3.1 Corrosão na soldagem

Os ciclos térmicos impostos nos processos de soldagem tornam estas regiões passíveis a sofrerem precipitações, intensificando processo de corrosão intergranular mesmo em condições de juntas que sofreram tratamento térmico de alívio de tensões, as tensões residuais favorecem mecanismos de corrosão localizada do tipo de corrosão sob tensão, corrosão a fadiga e fragilização por hidrogênio. (Erica, 2015)

Além de aspectos pertinentes ao calor do processo de soldagem, características químicas dos metais de adição e metais de base utilizados são fundamentais na corrosão. Em um trabalho recente Shanhua (2016), estudou os efeitos quanto a corrosão e características mecânicas no processo de solda GMAW para juntas de topo no aço estrutural Q235 com o metal de adição ER50-6.

Existem situações em que a confiabilidade e segurança dos componentes, equipamentos e instalações são primordiais na seleção do material metálico a ser empregado. Estas situações ocorrem com frequência na construção de tanques de armazenamento ou transporte de substâncias tóxicas, explosivas ou inflamáveis, na fabricação de componentes para indústria alimentícia e em todos os casos em que possam ocorrer acidentes com perda de vidas.

2.4 METALURGIA DA SOLDAGEM

A maioria dos processos de soldagem utiliza o calor como principal fonte de energia, sendo necessário supri-lo à poça de fusão em quantidade e intensidade suficientes, de modo a garantir a execução de uma junta soldada de boa qualidade. O calor é, portanto, elemento essencial a execução de uniões soldadas mas pode, por outro lado, representar fonte potencial de problemas devido a sua influência direta nas transformações metalúrgicas e fenômenos mecânicos que ocorrem na zona de solda (WAINER, 1992).

2.4.1 Microconstituintes na zona fundida

A microestrutura final da região soldada depende diretamente de dois principais fatores, taxa de resfriamento e temperabilidade.

A taxa de resfriamento é função do aporte de calor, da temperatura de pré-aquecimento, da espessura e da geometria da junta. Já a temperabilidade do aço e também a sua

dureza, são governadas pela composição química, ou seja, pela contribuição total dos elementos presentes no aço (Faria, 2010).

Independentemente do tipo de processo de soldagem, as propriedades mecânicas dos metais de solda estão diretamente relacionadas à sua microestrutura, mais precisamente com os percentuais dos diferentes tipos de microconstituintes presentes na região da junta soldada. Os principais microconstituintes de metais de solda de aços ferríticos são a ferrita acicular (AF), a ferrita primária (PF) e a ferrita com segunda fase (FS). O primeiro constituído de grãos extremamente finos, que associa uma alta resistência mecânica com razoável tenacidade e o segundo de grãos relativamente grosseiros podendo ser nucleado nos contornos de grãos da austenita ou no seu interior, caracterizando uma baixa dureza e resistência mecânica. O percentual de cada um destes microconstituintes dependerá da taxa de resfriamento da junta soldada e da composição química do metal de solda, que por sua vez, dependerão respectivamente da energia de soldagem e da composição química do metal de adição e de base (JAUREGI, 2015).

O *International Institute of Welding* (IIW, 1988) desenvolveu uma padronização na terminologia adotada para identificação dos constituintes na microestrutura dos metais de solda ferríticos.

Os principais constituintes presentes nos aços são apresentados na Figura 4: ferrita de contorno de grão (PF(G)), ferrita poligonal intragranular (FP(I)), ferrita com segunda fase (FS), ferrita com segunda fase alinhada (FS(A)), ferrita com segunda fase não alinhada (FS(NA)), ferrita acicular (AF) e ferrita com carbonetos agregados (FC).

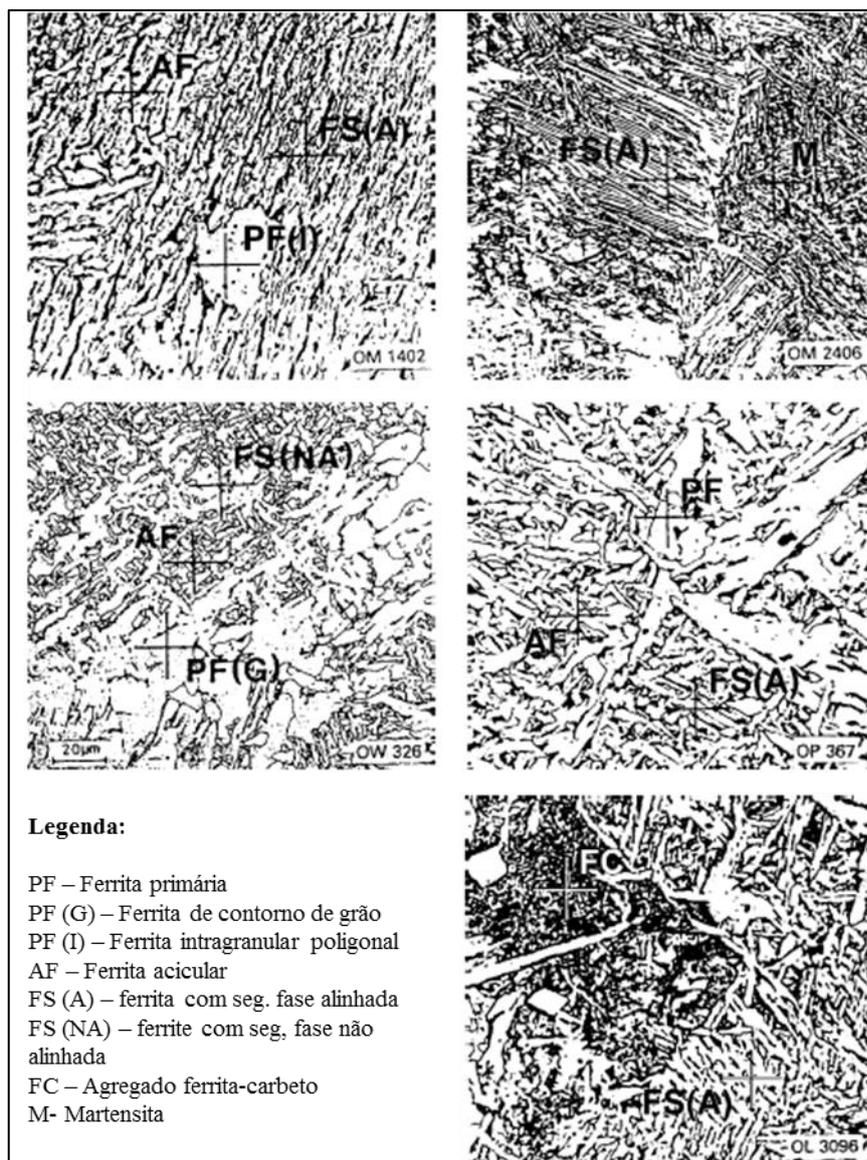


Figura 4. Morfologias de constituintes conforme a classificação do IIW de micrografias padrão para comparação.

- a) ferrita de contorno de grão (PF(G)): cristais de ferrita que nucleiam longitudinalmente os contornos de grãos austeníticos em elevadas temperaturas de transformação. Possui forma de veios de grãos poligonais ou equiaxiais relativamente grandes. Entre os seus grãos podem ser encontrados constituintes ricos em carbono, impurezas e perlita. Por essa razão, uma grande quantidade desse constituinte é indesejável em soldas as quais devem apresentar elevada resistência à fratura por clivagem;
- b) ferrita poligonal Intragranular (PF(I)): Grãos de ferrita usualmente poligonais, localizados dentro dos grãos austeníticos prévios e cerca de três vezes maiores que

os grãos ou lâminas adjacentes de ferrita. Podem crescer a partir de inclusões. Ocorre após a transformação austenítica da PF(G). Evidenciado em soldas com baixa taxa de resfriamento e baixo teor de elementos de liga;

c) ferrita com segunda fase (FS): são placas laterais de ferrita que precipitam e crescem a partir de um contorno de grão de austenita prévia e/ou da ferrita alotriomórfica nos contornos de grãos ou de inclusões. Formam-se grãos relativamente grosseiros que apresentam pequena diferença de orientação cristalina entre si. Apresenta constituintes ricos em carbonos e frágeis em seus contornos de grãos, fazendo com que seja considerada pouco desejável em soldas que devam apresentar elevada tenacidade;

d) ferrita com segunda fase alinhada (FS (A)): É formada por grãos grosseiros e paralelos de ferrita em forma de ripas. Quando a relação comprimento/largura é maior que 4:1, são classificados como FS (A);

e) ferrita com segunda fase não alinhada (FS (NA)): Ferrita envolvendo completamente (i) “microfases” aproximadamente equiaxiais, distribuídas aleatoriamente ou (ii) lâminas isoladas de AF;

f) ferrita acicular (AF): pequenos grãos de ferrita não alinhados encontrados dentro dos grãos de austenita. É gerada pelo cisalhamento da matriz austenítica e pela difusão de carbono para a austenita remanescente. Ocorre no interior do grão austenítico original sob taxas de resfriamento mais elevadas. Este microconstituente apresenta granulação fina e entrelaçada, composta por cementita entre finas ripas de ferrita. Ocorre nucleação próxima ou a partir de inclusões ou precipitados. Inclusões de compostos de titânio, principalmente TiO, parecem ser as mais efetivas para promover a nucleação da ferrita acicular (MODENESI, 2012). A ferrita acicular é a microestrutura responsável pelo aumento da tenacidade em metais de solda de aço carbono de baixa liga, sendo portanto desejável em regiões soldadas;

g) ferrita com carbonetos agregados (FC): Estruturas finas de ferrita e carboneto, incluindo ferrita com carbonetos “interfásicos” e perlita. Se o agregado é claramente identificado como perlita, ele deve ser designado como FC(P). Se o agregado for menor que as lâminas adjacentes dentro do grão austenítico prévio, ele deve ser desprezado.

A denominação de aço é genérica para ligas de ferro-carbono com teores de carbono entre 0,008 a 2,11%, contendo outros elementos residuais do processo de produção. Normalmente os elementos químicos apresentam variedades alotrópicas, ou seja, estruturas

cristalinas que passam de uma para outra em determinadas temperaturas, chamadas temperaturas de transição.

O ferro apresenta três variedades, ao se solidificar (temperatura de aproximadamente 1540 °C), o ferro apresenta estrutura cúbica de corpo centrado, chamada de ferro delta (Fe δ). Permanece nesta condição até cerca de 1390 °C e, abaixo desta, transforma-se em ferro gama (Fe γ), com estrutura cúbica de face centrada. Abaixo de 912 °C, readquire a estrutura cúbica de corpo centrado, agora chamada de ferro alfa (Fe α). Continuando o resfriamento, a 770 °C ocorre o ponto de Curie, isto é, ele passa a ter propriedades magnéticas. Entretanto, isto não se deve a um rearranjo da disposição atômica mas sim à mudança do direcionamento da rotação dos elétrons (spin). Estas variedades alotrópicas do ferro e solubilidade do carbono nele variam a sua composição formando os microconstituintes, austenita, ferrita, cementita, de acordo com o diagrama de equilíbrio do ferro-carbono (MACHADO, 2018).

2.4.2 Energia de soldagem

A energia de soldagem possui grande importância pois afeta o fluxo de calor na junta e, por consequência, modifica variáveis diretamente ligadas ao estado final de tensões residuais da mesma, como o gradiente térmico na junta. Todavia, a energia de soldagem pode ser ajustada tanto por meio do controle da potência (tensão e, principalmente, corrente de soldagem) quanto por meio da velocidade de soldagem.

Em um trabalho recente, Rettenmeir (2016) mostrou que estas diferentes formas de ajuste podem modificar características geométricas e metalúrgicas da junta soldada, tais como: diluição, balanceamento entre fases, microdureza, microestrutura, entre outros. Contudo percebe-se que há uma correlação direta entre a energia de soldagem e as propriedades de resistência mecânica e química da junta soldada.

De acordo com Marques (2005), o fluxo de calor pode ser dividido, de maneira simplificada, em duas etapas básicas: fornecimento de calor a junta e dissipação desse calor na peça.

A primeira etapa caracteriza a energia de soldagem (aporte térmico/ *heat input*) definida como a quantidade de energia fornecida à junta por unidade de comprimento da mesma. Na soldagem a arco, o arco elétrico é considerado como a única fonte de calor, e a energia de soldagem pode ser expressa por:

$$E = \frac{U \times I \times 60}{v \times 1000} \text{ (KJ/mm)} \quad (1)$$

$$Q = \eta \times E \text{ (KJ/mm)} \quad (2)$$

Em que:

E: Energia do arco (kJ/mm)

U: Tensão (V)

I: Corrente (A)

v: velocidade de soldagem (mm/min)

Q: Heat Input (kJ/mm)

η : Eficiência (Processo MAG:0,8)

A Figura 5 mostra as principais transformações morfológicas no metal de base em função do processo de soldagem.

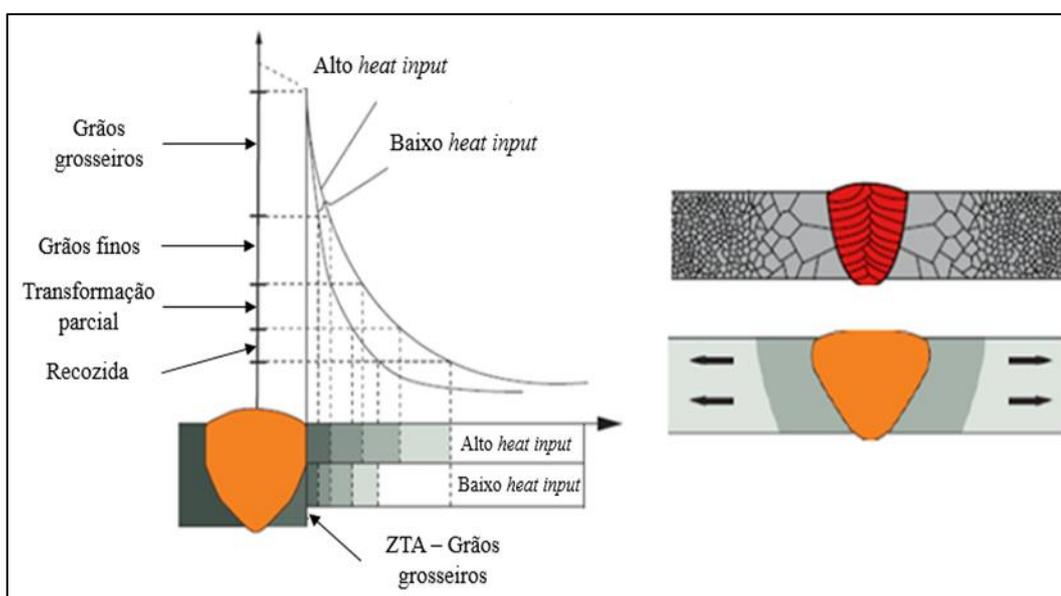


Figura 5. Interferências na morfologia do material de base geradas pelo aporte de calor proveniente do processo de solda.

A segunda etapa explica como ocorre a dissipação do calor pela peça, onde a transferência de calor acontece por meio da condução partindo do metal de solda (MS), na poça de fusão, seguindo pela ZTA e MB (metal base). Conforme a Figura 6, quanto maior o aporte térmico, maior a degradação na área do MB. Esta condução de calor pode ser explicada através da curva de ciclo térmico de soldagem que consiste, basicamente, em três fases: a etapa de aquecimento vigoroso do material no início do processo; a fase em que a temperatura máxima

do ciclo é atingida; e a etapa de resfriamento gradual, até que a temperatura retorne ao valor inicial. Onde $t = 0$ representa o exato momento em que a fonte de calor atinge o ponto em estudo no sólido. Deve ser observado que os tempos negativos representam instantes em que a fonte se aproxima do ponto estudado e os valores positivos configuram seu afastamento do mesmo ponto (WAINER, 1992).

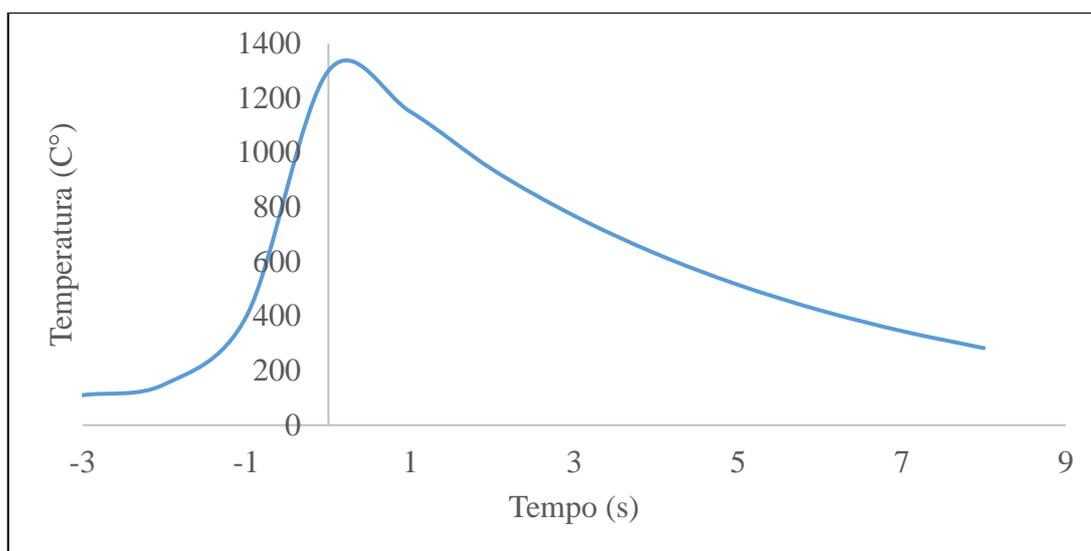


Figura 6. Ciclo térmico de soldagem (esquemático).

O ciclo térmico influencia de forma importante as reações e alterações morfológicas dos metais soldados. A curva de repartição térmica permite definir três regiões básicas (Figura 7):

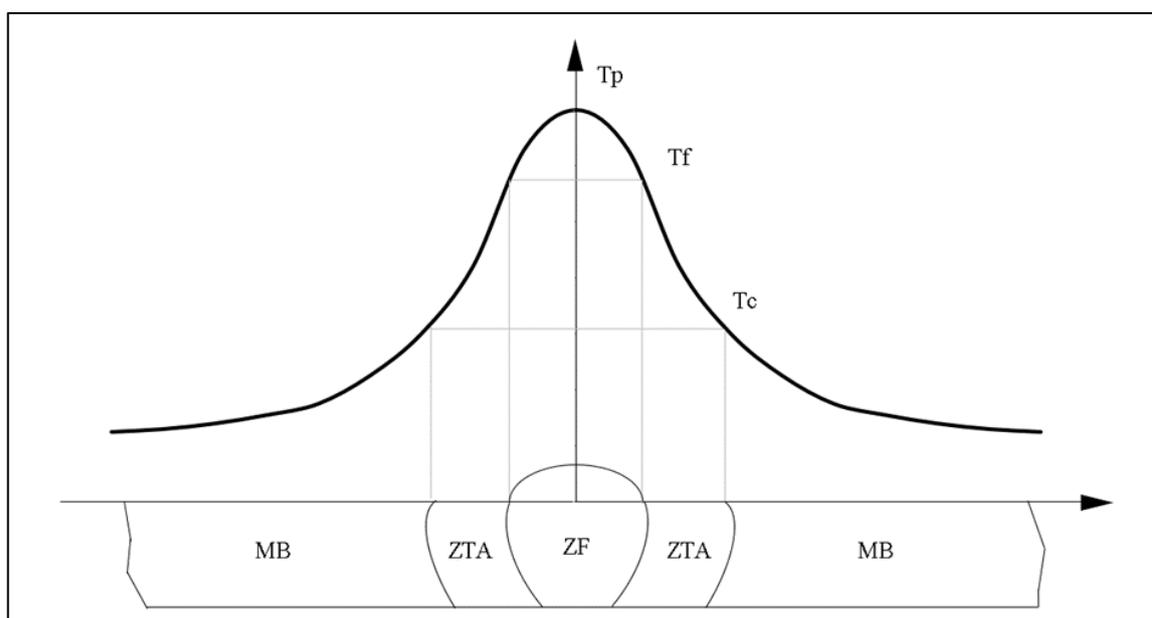


Figura 7. Regiões de solda por fusão.

- a) Zona Fundida (ZF): região onde o material fundiu-se e solidificou-se durante a operação de soldagem. As temperaturas de pico desta região são superiores a temperatura de fusão (T_f) do metal de base.
- b) Zona Termicamente Afetada (ZTA): região não fundida do metal de base que tem sua microestrutura e/ou propriedades alteradas pelo ciclo térmico de soldagem. As temperaturas de pico desta região são superiores à temperatura crítica do material em questão e inferiores a temperatura de fusão;
- c) Metal de Base (MB): região mais afastada do cordão de solda, não afetada pelo processo de soldagem. As temperaturas de pico são inferiores a temperatura crítica do material.

Considerando os principais aspectos discutidos na revisão foram realizados ensaios para verificar as interferências químicas, metalúrgicas e térmicas provenientes do processo de soldagem GMAW do aço ASMT A588 com dois diferentes metais de solda. A seguir é apresentada a metodologia aplicada para confecção dos corpos de prova (CPs), seleção de parâmetros de soldagem, execução dos testes e coleta de dados dos mesmos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo traz a descrição dos materiais e métodos aplicados a essa dissertação. Dessa forma, o conteúdo está organizado por meio de seções que demonstram a parametrização (metal de base, metal de adição, entre outros), bem como o método de trabalho para execução das análises.

Nesse sentido, a primeira seção apresenta o metal de base. O metal de base utilizado foi o aço ASTM A588, pois o objetivo é avaliar o comportamento dos metais de adição nesse material com o processo de solda. A segunda seção traz as características dos metais de adição, a fim de detalhar especificações técnicas associadas aos metais usados nessa dissertação. Constituídas essas seções na sequência, a terceira inicia explicações sobre o método de trabalho. O método de trabalho estende-se da seção 4.3 até 4.7. Basicamente há um detalhamento quanto ao processo de fabricação, preparação de corpos de prova, e ensaios de caracterização no processo de soldagem.

3.1 METAL DE BASE

O material de base utilizado para a realização do experimento foi o material denominado SAC 350, equivalente ao aço carbono ASTM A 588, com espessura de 4 mm. Este aço é aplicado em larga escala na fabricação de vagões ferroviários, estes utilizados em ferrovias sem pintura e requerem proteção superficial proveniente do próprio aço. O ASTM A588 classificado como weathering steel apresenta alta resistência à corrosão quando comparado ao aço carbono convencional. Os elementos de liga deste aço são o Cu, Cr, Ni, Si e P que proporcionam menores taxas de corrosão depois de expostos a atmosfera através da formação da camada estável de óxido protetor (Tewary, 2016).

O Quadro 3 indica as propriedades químicas e mecânicas do material de base selecionado.

Quadro 3. Especificações do material ASTM A 588 (Certificado de matéria prima).

Material	Espessura (mm)	Composição Química (% em massa)				
		C	Si	Mn	P	S
ASTM A 588	4	0,10 máx	1,1 máx	0,35 máx	0,034 máx	0,008 máx
		Propriedades Mecânicas				
		LE (MPa)	LR (MPa)		Alongamento (%)	
		400	500		25	

3.2 METAL DE ADIÇÃO

O arame-eletrodo do processo MIG/MAG é alimentado continuamente. Para que isso aconteça, ele deve ser fornecido em bobinas. De acordo com o tipo de equipamento de soldagem, o carretel poderá ser de variados tamanhos, contemplando de 5 kg até 20 kg ou barricas de 250 kg. Sua bitola também deve ser dimensionada em acordo com a quantidade de material a ser depositado e a capacidade de energia que o equipamento pode suportar conforme a espessura da peça a ser soldada. Essas dimensões são: 0,8 mm até 3,2 mm, sendo 0,8 a 1,6 mm arames sólidos e 2,4 a 3,2 mm arames tubulares.

Os metais de adição avaliados foram o arame sólido sem cobre ER 70S-6, recomendado na indústria para a soldagem de aços de baixo carbono e o arame sólido sem cobre ER 80 S-G ligado níquel-cobre destinado a soldagem de aços patináveis.

O Quadro 4 apresenta as propriedades químicas e mecânicas dos arames utilizados.

Quadro 4. Especificações químicas e mecânicas do metal de adição (ESAB, 2016).

ER 70 S-6	Composição química do arame (%)				
	C	Si	Mn	Ni	Cu
	0,08	0,9	1,5	-	-
	Propriedades mecânicas do arame				
	LE (MPa)	LR (MPa)		Alongamento (%)	
460	560		26		
ER 80 S-G	Composição química do arame (%)				
	C	Si	Mn	Ni	Cu
	0,1	0,8	1,4	0,8	0,4
	Propriedades mecânicas do arame				
	LE (MPa)	LR (MPa)		Alongamento (%)	
540	625		26		

As propriedades químicas e mecânicas dos metais de adição atendem rigorosamente à norma de consumíveis de soldagem AWS ER70S-6 e AWS ER80S-G. Percebe-se que as propriedades são próximas às especificações do metal de base a fim de manter homogeneidade, resistência química e mecânica da estrutura soldada.

3.3 PARÂMETROS DE PROCESSO

Para a validação dos parâmetros experimentais foi utilizada uma matriz experimental e análise de variância (Quadro 5), onde foram variados os valores de corrente, tensão e velocidade de soldagem. Os parâmetros foram selecionados com base nas recomendações do fabricante.

Quadro 5. Matriz experimental para ajuste de parâmetros de soldagem.

Metal de Adição	Corrente	Velocidade					
		Velocidade 1			Velocidade 2		
		Tensão 1	Tensão 2	Tensão 3	Tensão 1	Tensão 2	Tensão 3
Metal de adição 1	Corrente 1	Condição 1			Condição 4		
	Corrente 2		Condição 2			Condição 5	
	Corrente 3			Condição 3			Condição 6
Metal de adição 2	Corrente 1	Condição 7			Condição 10		
	Corrente 2		Condição 8			Condição 11	
	Corrente 3			Condição 9			Condição 12

Para a realização dos ensaios, foram utilizados como base os parâmetros de solda pré-definidos, sendo todos os CPs soldados na posição plana (1G) (ASME IX, 1984).

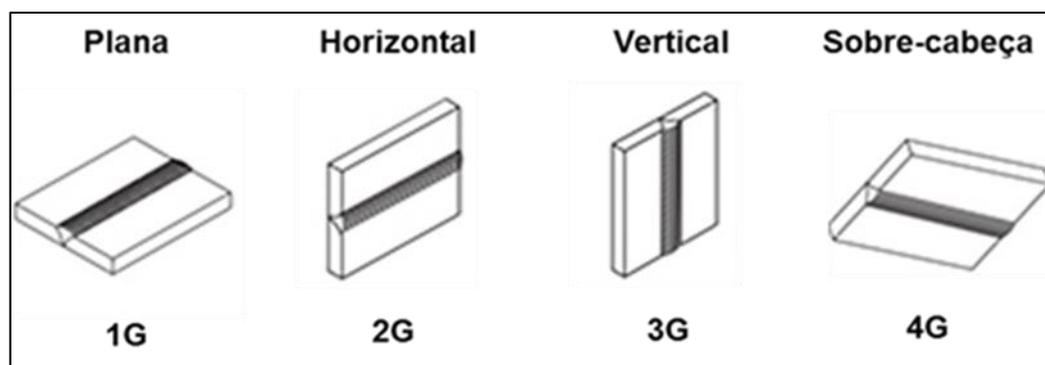


Figura 8. Posição de soldagem plana (1G), conforme ASME IX - QW-461.3 (ASME IX, 1984).

O Quadro 6 demonstra os parâmetros utilizados para as condições comentadas previamente descritas no Quadro 5.

Quadro 6. Parâmetros de processo aplicados nos corpos de provas.

Quadro 6. Parâmetros de processo aplicados nos corpos de provas.

Metal de Adição	Corrente (A)	Velocidade (mm/min)					
		700			1000		
		Tensão (V)					
		16	17,5	18,5	16	17,5	18,5
ER70S-6	150	Condição 1			Condição 4		
	180		Condição 2			Condição 5	
	200			Condição 3			Condição 6
ER80S-G	150	Condição 7			Condição 10		
	180		Condição 8			Condição 11	
	200			Condição 9			Condição 12

As doze condições que foram aplicadas foram submetidas aos ensaios de dobramento, resistência à tração e radiografia/inspeção visual, a fim de determinar a melhor combinação de parâmetros. Salienta-se que essas condições foram as escolhidas, pois são tecnicamente viáveis em sua operação.

A validação de significância das variáveis foi realizada por meio do procedimento estatístico ANOVA. Foram utilizadas três variáveis de resposta: velocidade de soldagem, parâmetros elétricos e metal de adição. Para a variável de velocidade de soldagem, foram utilizados dois níveis, para a variável parâmetros elétricos foram utilizados três níveis e para metal de adição dois níveis. Os respectivos níveis foram definidos nos limites de especificação do fabricante. De fato, utilizou-se como delimitação os parâmetros de catálogo comercial.

Para implementação da análise foi utilizado o *software* Statistical Package for Social Science (SPSS) versão 21. No *software* utilizou-se o procedimento ANOVA para múltiplos fatores incompleto, a 95% de confiança. Efetivamente esse procedimento foi utilizado pelas seguintes razões. Primeiro para ser possível avaliar a significância de cada nível. Segundo para garantir confiabilidade na comparação de todas as condições. Terceiro para viabilizar garantia estatística, dado o fato do ensaio não utilizar todas as combinações entre todos os níveis. Efetivamente, o procedimento incompleto inibe a avaliação das interações de grau 3, algo irrelevante nesse caso onde se busca a otimização dos parâmetros.

A elaboração dos gráficos de níveis e análise da significância foram realizadas com o módulo gráfico do SPSS. Efetivamente, essa análise gráfica foi conjugada a um procedimento de comparação múltiplas de médias, a fim de viabilizar a otimização das condições. Uma vez otimizado os parâmetros de qualificação, utilizou-se os resultados ótimos para os ensaios de caracterização.

Ressalta-se que estatisticamente este não é o procedimento recomendado, visto que todas as variáveis deveriam ser testadas em suas combinações. Dessa forma, entende-se ser

válido a utilização da ANOVA considerando as doze condições, pois, são as que normalmente serão aplicadas.

Na literatura, outros trabalhos apresentam métodos estatísticos para definir parâmetros ótimos, Ibrahim (2017) avaliou através de análises estatísticas o critério de aceitação ou rejeição de descontinuidades nas juntas soldadas nos aços ASTM A588 e ASTM A572, validando os resultados através de ensaios de Charpy.

Para a execução da solda foi utilizado um robô Panasonic modelo TM-1400W, conforme Figura 9.

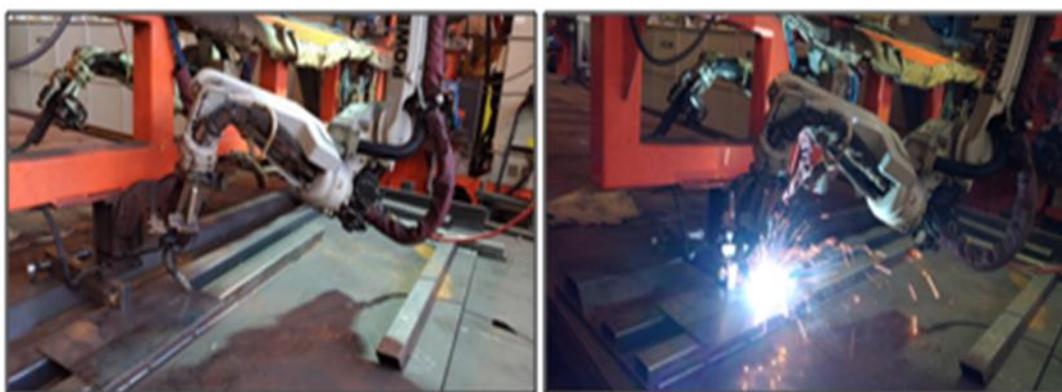


Figura 9. Robô de soldagem a arco – Modelo TM-1400W.

Com os parâmetros pré determinados serão realizados os cálculos de energia de soldagem e *heat input* avaliando as 12 condições testadas, com a finalidade de comparação posterior aos resultados de qualificação e caracterização.

$$E_1 = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot 60}{v_1 \cdot 1000} \quad (1)$$

$$Q_1 = \eta \cdot E_1 \quad (2)$$

O Quadro 7 indica os valores de *heat input* para as 12 condições propostas.

Quadro 7. Heat input calculado para parâmetros de ensaio.

Metal de Adição	Condição	Corrente	Tensão (V)	Velocidade (mm/min)	Energia do Arco (kJ/mm)	Heat Input (kJ/mm)
ER70S-6	1	150	16	700	0,206	0,165
	2	180	17,5	700	0,270	0,216
	3	200	18,5	700	0,317	0,254
	4	150	16	1000	0,144	0,115
	5	180	17,5	1000	0,189	0,151
	6	200	18,5	1000	0,222	0,178
ER80S-G	7	150	16	700	0,206	0,165
	8	180	17,5	700	0,27	0,216
	9	200	18,5	700	0,317	0,254
	10	150	16	1000	0,144	0,115
	11	180	17,5	1000	0,189	0,151
	12	200	18,5	1000	0,222	0,178

Na primeira análise de energia de soldagem, percebeu-se através dos parâmetros o maior valor de *heat input* teórico nas condições 3 e 9 e menores valores nas condições 4 e 10, ou seja, nas condições de maior heat Input, são utilizados parâmetros mais agressivos, com maior aporte térmico já para as de menores valores de heat input os parâmetros elétricos são menores, o que deve comprometer em menor intensidade a estrutura do metal base e zona térmica.

3.4 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (CPS)

3.4.1 Sistema utilizado atualmente para qualificação do processo de soldagem

A preparação dos CPs foi realizada conforme método pré-estabelecido internamente nas empresas Randon, indicado para qualificação de processos de soldagem, conforme requisitos AWS. (AWS D1.1, 2015).

A Figura 10 ilustra a região de onde foram retirados os corpos de provas.

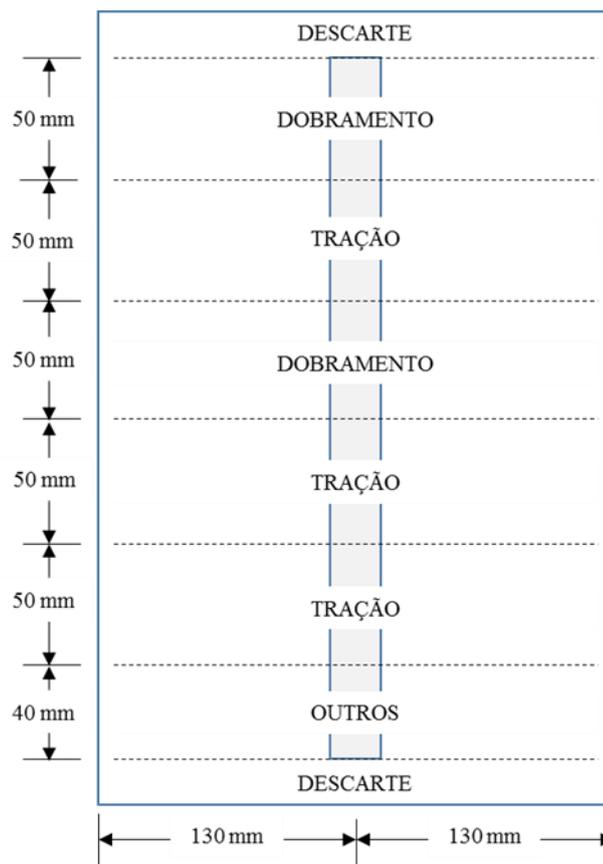


Figura 10. Especificação da região a ser analisada nos ensaios de caracterização,

3.5 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS – FLUXOGRAMA

A Figura 11 ilustra o fluxograma esquemático para a realização dos ensaios, contemplando um resumo desde a preparação dos CPs, até ensaios de qualificação e caracterização:

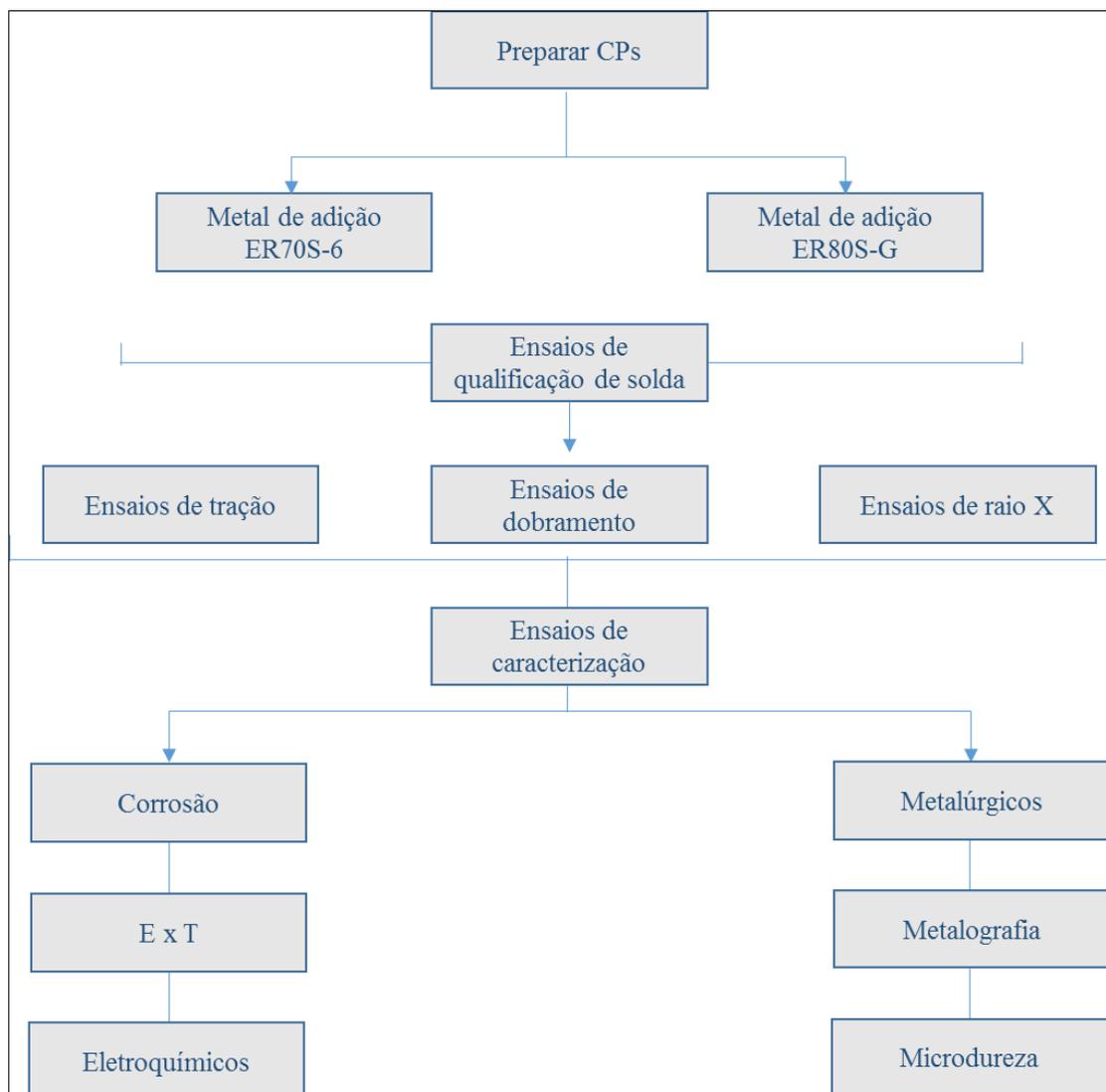


Figura 11. Fluxograma do processo de preparação e análises.

Para o metal de base (ASTM A588) foram avaliados dois metais de adição. Esses metais foram submetidos a 12 conjuntos de parâmetros a fim de determinar a melhor alternativa por meio de análises de variância e ensaios de qualificação (tração, dobramento e radiografia), conforme a norma ASME IX, para qualificação de processo de soldagem. Os CPs que apresentaram os melhores resultados foram submetidos a novos ensaios de caracterização, quanto a corrosão e avaliação metalúrgica, tendo como finalidade a avaliação dos efeitos corrosivos e metalúrgicos relacionados à parametrização do processo de soldagem e interferências dos metais de adição.

3.6 ENSAIOS DE QUALIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Os ensaios de qualificação do processo de soldagem foram conduzidos com o objetivo de garantir que o processo de soldagem realizado para todas as condições pré-determinadas estejam isentos de defeitos, entre eles citam-se o de tração, dobramento e radiografia, análises estas recomendadas para solda de topo na posição (1G) conforme ASME IX.

3.6.1 Ensaio de Tração

Para os ensaios de tração, de acordo com a Figura 16, foram preparados três CPs para cada condição de soldagem atendendo aos critérios da norma ASME IX. Estes CPs foram usinados com as dimensões atendendo aos requisitos (Figura 12 – Dimensional CPs para ensaios de tração e dobramento). A máquina utilizada para os ensaios está ilustrada na Figura 18.

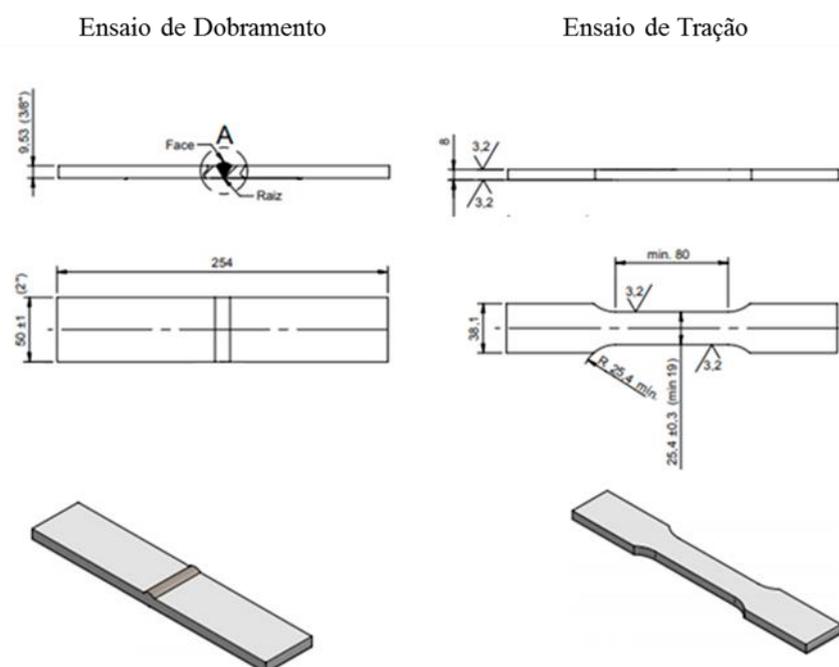


Figura 12. Dimensional CPs para ensaios de tração e dobramento.

De acordo com os requisitos da Norma ASME IX, QW-152 e 153, os corpos de prova para os ensaios de tração devem ser rompidos sob carga de tração axial. Para que o ensaio seja aprovado, é necessário que o corpo de prova tenha uma resistência à tração não menor do que:

- a) o limite mínimo especificado para o metal base;

- b) o limite mínimo de resistência a tração do menos resistente dos metais base, no caso de serem usados metais bases de diferentes resistências a tração;
- c) o limite mínimo de resistência a tração especificado pelo metal de solda, no caso em que for permitida pela Seção do código, a utilização de um metal de solda com resistência a tração inferior a do metal base, na temperatura ambiente;
- d) se o corpo de prova romper no metal base, externamente à solda ou a linha de fusão, o teste deve ser aprovado, desde que a resistência determinada tenha um valor mínimo igual ou superior a 95% da resistência a tração especificada pelo metal base (ASME IX, 1984).

3.6.2 Dobramento

Conforme requisito da Norma QW-163 nos testes de dobramento transversal, a solda e a ZTA devem estar completamente contidas na parte dobrada do corpo de prova após o teste (ASME IX, 1984). Os ensaios de dobramento foram realizados em duplicata, a primeira amostra dobrada com o cutelo da máquina na face e a segunda com cutelo na raiz da solda, conforme ilustrado na Figura 13.

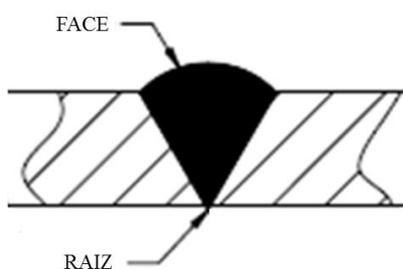


Figura 13. Dobramento de face e raiz do CP soldado.

Os CPs não devem apresentar defeitos visíveis na solda, ou na ZTA, maiores do que 3 mm, medidos em qualquer direção na superfície convexa do corpo de prova após o dobramento.

Os ensaios de tração e dobramento foram realizados no laboratório da engenharia da qualidade da empresa Randon S/A. A máquina utilizada foi do modelo Wolpert, conforme Figura 14.



Figura 14. Máquina de ensaio universal Panantec,

3.6.3 Radiografia e Inspeção Visual

Os ensaios de radiografia de solda são utilizados para medir a performance do processo de soldagem e soldadores quando se trata de solda manual. Conforme o requisito da norma ASME IX, QW 191.2, o ensaio consiste em avaliar principalmente: indicações lineares-trincas, fusão incompleta, penetração inadequada e escórias; indicações nas quais o comprimento, é no mínimo, três vezes maior do que a largura; indicações de formato arredondado - porosidades e inclusões, indicações nas quais o comprimento é, no máximo três vezes maior do que a largura. Essas indicações podem ser circulares, elípticas ou de forma irregular (ASME IX, 1984).

A Randon S/A possui uma estrutura para realização de ensaios radiográficos. A realização dos testes é através da empresa Capaz Inspeções, dedicada às inspeções radiográficas de soldagem.

Para este trabalho, as doze condições de parâmetros avaliadas foram submetidas a ensaios radiográficos preliminares. Para cada condição, foi preparado um filme de Raio X ao longo de todo comprimento longitudinal do cordão de solda.

3.7 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Com intuito de avaliar os resultados quanto ao desempenho corrosivo e metalúrgico foram realizados os seguintes ensaios de caracterização.

Para metalurgia:

- a) Micrografia;
- b) Microdureza.

Para corrosão:

- a) Monitoramento de potencial de circuito aberto (OCP);
- b) Curva de Polarização Potenciodinâmica

3.7.1 Metalurgia

3.7.1.1 Micrografia

Consiste no estudo dos produtos metalúrgicos com o auxílio do microscópio, permitindo observar a granulação do material, a natureza, forma, quantidade e distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões.

Os ensaios de micrografia e microdureza foram realizados com o microscópio óptico e microdurômetro modelo Shimadzu HMV-2, conforme Figura 15. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Metalografia (LAMET) da Universidade de Caxias do Sul.

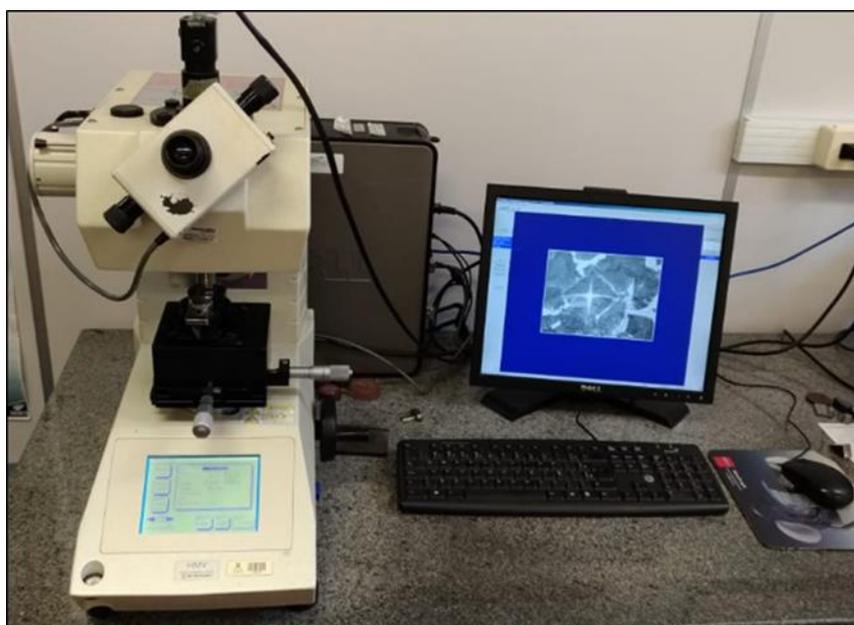


Figura 15. Microscópio óptico utilizado nos ensaios de micrografia e microdureza.

Para a realização dos ensaios uma das faces de cada seção transversal foi polida e atacada com reagente químico (nital 3%) adequado para obter-se nítida diferenciação entre o metal de base, constituintes, metal de adição e ZTA. Para cada condição foi realizada uma amostra com análise completa da superfície, entre o metal de base e ZTA.

3.7.1.2 Microdureza

A propriedade mecânica denominada dureza é largamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas e na comparação de diversos tipos de materiais. Além da aplicação da carga total sobre o penetrador, existe uma carga menor, a pré-carga, que é aplicada com o objetivo de eliminar os efeitos da deformação elástica do material. As análises de perfis de dureza se fazem importantes para compreender a interferência dos efeitos térmicos correlacionando com a temperabilidade e alteração morfológicas do material de base após o beneficiamento do mesmo.

Os ensaios de microdureza foram realizados no Laboratório de Metalografia (LAMET) da Universidade de Caxias do Sul, conforme Figura 15. Selecionou-se as amostras que apresentaram melhores desempenhos nas avaliações mecânicas de tração e dobra, condições um, dois, três, cinco, seis, sete, nove, onze e doze. As medições foram realizadas em duplicata e a análise foi realizada ao longo de toda a superfície, partindo do metal de base, ZTA e metal de adição com um distanciamento de 0.5 mm por ponto.

3.7.2 Ensaios de Corrosão

3.7.2.1 Monitoramento de potencial de circuito aberto (OCP)

Com a imersão de um substrato metálico em uma solução eletrolítica, há a formação de uma interface eletrificada entre o metal e essa solução. Porém, a distribuição de cargas não é considerada homogênea, ocasionando uma diferença de potencial entre o metal e o eletrólito, chamada de potencial de eletrodo. (GENTIL, 2011)

O monitoramento do OCP, através de uma curva do potencial em relação ao tempo, auxiliará na investigação dos processos corrosivos.

Foi realizado o monitoramento de potencial de circuito aberto dos CPs com a solução de NaCl 3,5% (m/V) à temperatura ambiente e aeração natural. Empregou-se multímetro Minipa ET-1600 e um sistema de dois eletrodos [eletrodo de trabalho (CP) e eletrodo de referência ECS (eletrodo de calomelano saturado com KCl)]. O tempo de ensaio foi de 500 horas. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Corrosão e Proteção Superficial (LCOR) na Universidade de Caxias do Sul. Na Figura 16 está representado o ensaio.

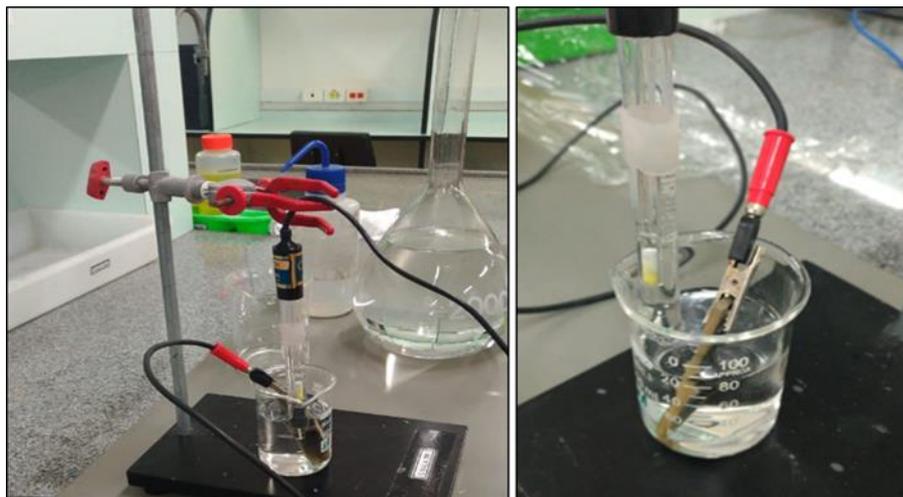


Figura 16. Ensaio de potencial de circuito aberto (OCP).

Os ensaios de OCP foram realizados com as amostras que apresentaram os melhores desempenhos nos ensaios mecânicos, ou seja, condições um, dois, nove e onze além do metal de base. Todas as condições foram realizadas em triplicata, onde denominou-se a condição e as letras de A até C (ex. 1A, 1B, 1C, etc.).

3.7.2.2 Curva Polarização Potenciodinâmica

Os ensaios de caracterização eletroquímica foram realizados para verificar o fluxo de elétrons entre as áreas anódicas e catódicas, onde a velocidade deste fluxo corresponde às velocidades das reações de oxidação e redução que acontecem nas superfícies. O acompanhamento deste fluxo de elétrons possibilitou o estudo da cinética do processo corrosivo (GENTIL, 2010).

A célula eletroquímica foi composta por um sistema de três eletrodos, como exibido na Figura 17.

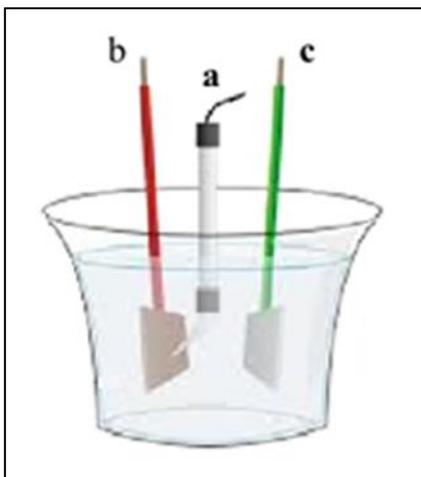


Figura 17. Representação da célula eletroquímica utilizada nos ensaios, onde (a): eletrodo de referência, (b): eletrodo de trabalho e (c): eletrodo auxiliar.

O eletrodo de trabalho refere-se ao CP de aço nas condições de metal de base, um, dois, nove e onze. O eletrodo de calomelano saturado com solução de KCl foi utilizado como eletrodo de referência. O eletrodo auxiliar corresponde ao fio de platina. O eletrólito utilizado foi uma solução de NaCl 3,5% (m/V).

Os ensaios eletroquímicos foram realizados em triplicata, ou seja, três amostras para cada um dos três corpos de prova. Foi utilizado um potenciostato da marca IviumStat, modelo Ivium Technologies e com o *software* IviumSoft para auxiliar na coleta dos dados.

A caracterização através do ensaio de polarização potencioestática, possibilitou obter curvas do potencial (V) *versus* densidade de corrente (A/cm^2), que informaram a ocorrência de corrente limite anódica, corrente limite catódica e potencial de corrosão.

As curvas de polarização potencioestática foram realizadas com intervalo de varredura de 0 mV abaixo do potencial de circuito aberto (direção catódica) e +1000 mV acima desse potencial (direção anódica), com velocidade de varredura de $20 mV \cdot s^{-1}$ e com $1 cm^2$ de área do corpo de prova exposta.

O ensaio de polarização potencioestática foi realizado no Laboratório de Corrosão e Proteção Superficial - Pesquisa (LCOR-P) da Universidade de Caxias do Sul.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados que serão apresentados estão divididos em dois principais tópicos de interesse ao processo de soldagem para aços patináveis: i) Resistência Mecânica da Junta Soldada e; ii) Resistência a Corrosão da Junta Soldada.

4.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA DA JUNTA SOLDADA

As propriedades mecânicas frequentemente avaliadas incluem as características de limite de resistência a tração, escoamento e alongamento da amostra. Para tais são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de tração e posteriores ensaios complementares de dobramento, gamagrafia, microdureza e micrografia.

4.1.1 Tração

Este tópico apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração. Os valores foram divididos em 03 variáveis: resistência a tração, limite de escoamento e alongamento.

Os valores de resistência mecânica, limite de escoamento e alongamento obtidos nos ensaios de tração são provenientes das curvas geradas para cada uma das condições testadas. A Figura 18, ilustra um gráfico padrão obtido nos ensaios de tração.

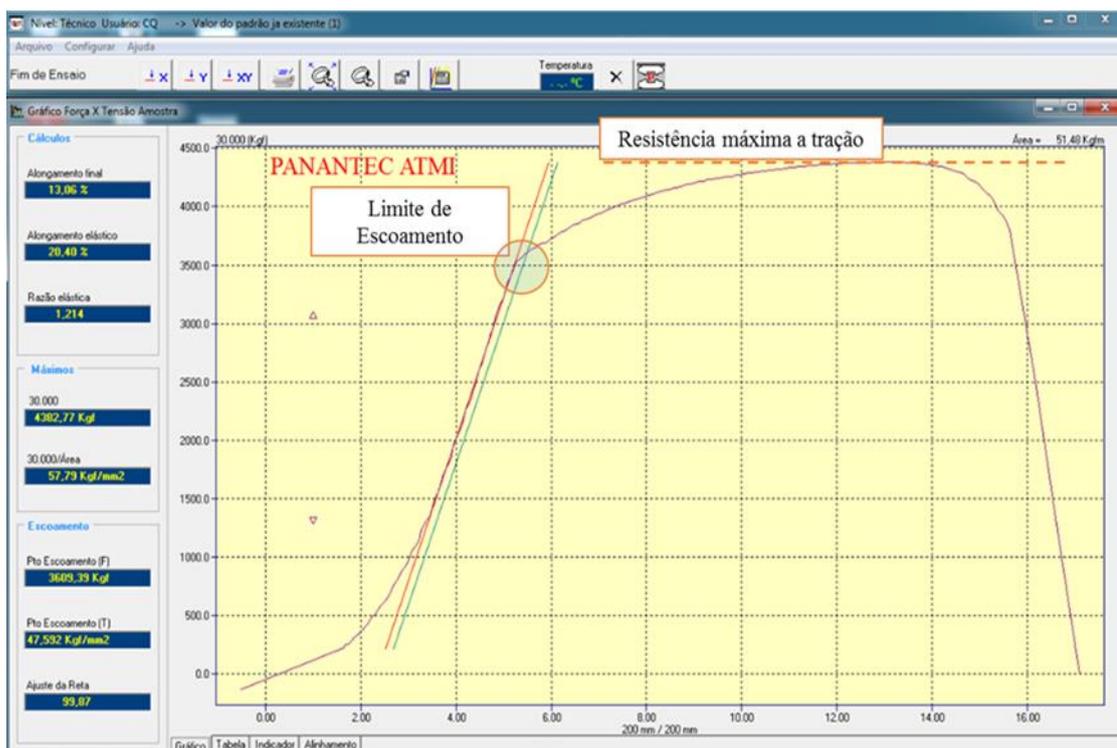


Figura 18. Curva obtida no ensaio de tração dos CPs.

Estes valores obtidos nos ensaios de tração foram transferidos para o quadro de resultados para análise geral de todas as condições. O Quadro 8 contempla os registros de resistência a tração para as doze condições avaliadas.

Quadro 8. Resultados de resistência mecânica obtidos nos ensaios de tração.

Variável Resposta (Tração) - Resistência Tração MPa							
Metal de Adição	Corrente (A)	Velocidade (mm/min)					
		700			1000		
		Tensão (V)					
		16	17,5	18,5	16	17,5	18,5
ER70S-6	150	567			501		
		559			547		
		550			533		
	180		520			531	
			531			559	
			524			546	
200			547			542	
			570			499	
			560			544	
ER80S-G	150	522			463		
		498			410		
		457			376		
	180		400			502	
			479			524	
			523			507	
	200			536			504
				530			495
				523			519

Ao avaliar os resultados obtidos para os valores de resistência a tração, considerou-se o requisito QW-152/QW-153 referente a norma ASME IX, conforme expostos na metodologia. Contudo as condições que apresentaram resistência a tração menor do que 95% da resistência do metal de base foram as condições sete, oito e dez.

As falhas apresentadas para a condição dez devem ser explicadas pela dificuldade de preenchimento da junta em função da alta velocidade de avanço de solda e baixa alimentação pelos parâmetros de corrente e tensão. A mesma constatação pode ser realizada para a condição quatro nos ensaios de raio x (com a presença do defeito de falta de fusão) e a falha no ensaio de dobramento.

O Quadro 9 ilustra os resultados para o limite de escoamento das amostras soldadas.

Quadro 9. Resultados de limite de escoamento obtidos nos ensaios de tração.

Variável Resposta (Tração) - Limite de Escoamento MPa							
Metal de Adição	Corrente (A)	Velocidade (mm/min)					
		700			1000		
		Tensão (V)					
		16	17,5	18,5	16	17,5	18,5
ER70S-6	150	467			439		
		453			461		
		454			450		
	180		402			459	
			410			443	
			405			452	
	200			443			438
				438			426
				446			448
ER80S-G	150	388			395		
		379			400		
		381			375		
	180		380			400	
			400			416	
			392			388	
	200			430			381
				414			373
				404			385

O Quadro 10 evidencia os resultados de alongamento.

Quadro 10. Resultados de alongamento obtidos nos ensaios de tração.

		Variável Resposta (Tração) - Alongamento %					
Metal de Adição	Corrente (A)	Velocidade (mm/min)					
		700			1000		
		Tensão (V)					
		16	17,5	18,5	16	17,5	18,5
ER70S-6	150	13,6			3,75		
		13,99			6,18		
		11,5			10,61		
	180		11,62			8,88	
			13,17			14,39	
			12,41			10,78	
	200			10,07			10,44
				19,55			6,72
				13,7			9,18
ER80S-G	150	14,29			2,5		
		11,32			1,7		
		6,31			2,24		
	180		5,52			8,56	
			8,38			10,85	
			11,83			11,22	
	200			14,07			12,32
				12,73			11,12
				9,66			12,9

Quando se avalia os valores de alongamento medidos para os CPs, comparando com as condições do metal de base antes da solda, percebe-se um decréscimo de no mínimo cerca de 50% na característica de alongamento, de 25% de alongamento pré determinado para o metal de base, os CPs pós solda, apresentam entre 10 a 12%. Para as piores condições (reprovadas quando a resistência mecânica), como por exemplo as condições quatro, sete, oito e dez os valores de alongamento obtidos não passam de 7%, o que realmente compromete a resistência da junta soldada.

4.1.2 Dobramento

No Quadro 11 são apresentados os resultados dos ensaios de dobramento para as doze condições avaliadas. O resultado representa o comprimento total da trinca (mm) na região de ZTA e metal de solda, tanto para dobramento de face quanto para dobramento de raiz.

Quadro 11. Resultados obtidos nos ensaios de dobramento de face e raiz.

Variável Resposta (Dobramento) - Comprimento da trinca							
Metal de Adição	Corrente (A)	Velocidade (mm/min)					
		700			1000		
		Tensão (V)					
		16	17,5	18,5	16	17,5	18,5
ER70S-6	150	0			50		
		0			50		
	180		0			6,97	
				0			
	200			12			0
					0		
ER80S-G	150	0			12,8		
		0			50		
	180		0			0	
				50			0
	200			0			0
					0		

Considerando os critérios de inspeção para a avaliação dos resultados, percebe-se que as alternativas 3, 4, 5, 8 e 10 foram reprovadas nos ensaios, onde uma das amostras apresenta trincas maiores do que 3 mm.

Aparentemente as condições 4 e 10 apresentaram os piores resultados, independente do metal de adição. Tal resultado pode ser explicada pelos baixos parâmetros de soldagem (corrente e tensão) combinados com a alta velocidade de avanço da tocha. Estes aspectos devem ter ocasionado um preenchimento insuficiente da junta, fragilizando a mesma no ensaio de dobramento. De acordo com estudos prévios, Noh (2008) explica que a falta de preenchimento ou preenchimento parcial da solda apresenta influência direta na resistência a flexão e início de formação de trincas.

As condições um, dois, seis, sete, nove, onze e doze não apresentaram nenhuma irregularidade na região da solda. Evidenciando que estas condições apresentam boas características de ductilidade e solidez além de isenção de trincas, indo de encontro com os resultados de gamagrafia (Arulmurugan, 2017).

4.1.3 Análise Estatística dos Resultados

Foram realizadas análises estatísticas dos resultados obtidos para os ensaios de tração e dobramento.

4.1.3.1 Resistência a Tração

Para os ensaios de tração foram avaliadas as características de resistência a tração, limite de escoamento e alongamento. Para o atributo de resistência à tração, considera-se a relação de entrada para variável de resposta como: quanto maior o valor, melhor o resultado. Estatisticamente como significativo obteve-se as variáveis metal de adição e a interação da velocidade de soldagem com o parâmetro elétrico.

Pode-se observar a significância da resistência à tração pelo Gráfico de dispersão, que vem apresentado na Figura 19. Já a dispersão da variável de limite de escoamento está posta na Figura 20 e, na Figura 21, está apresentado a dispersão do percentual de alongamento. Está detalhada na curva a média para cada condição, desvio padrão normal e dispersão.

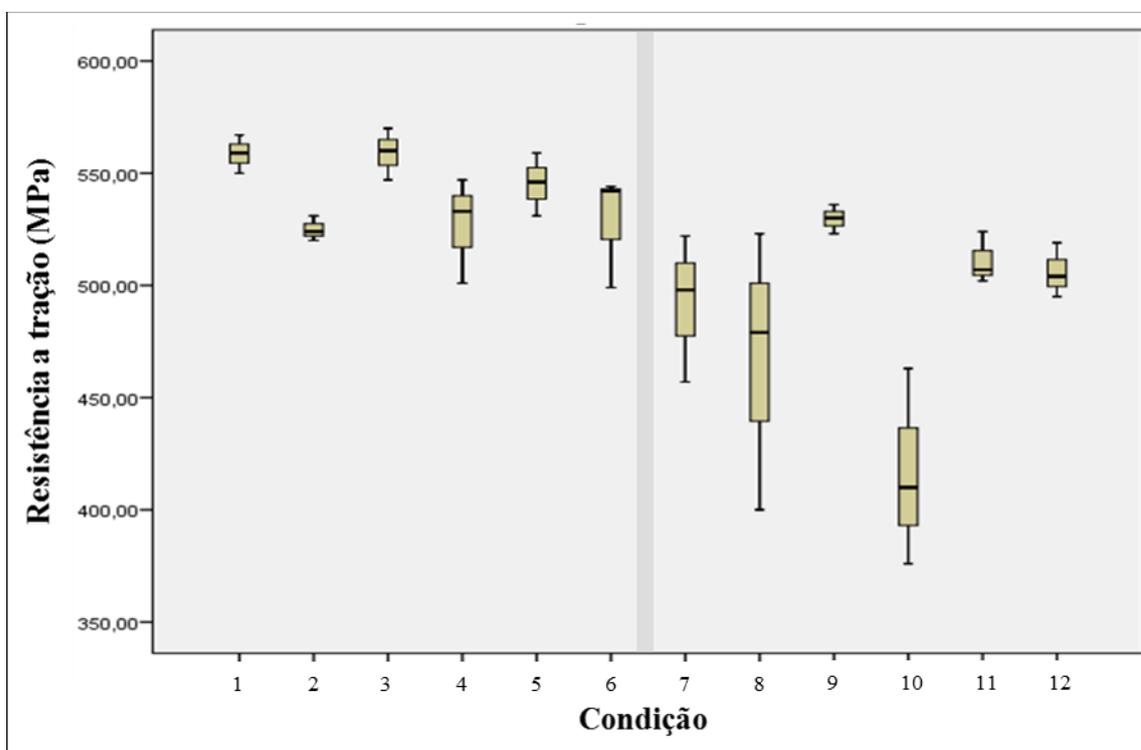


Figura 19. Dispersão de dados para a resistência a tração.

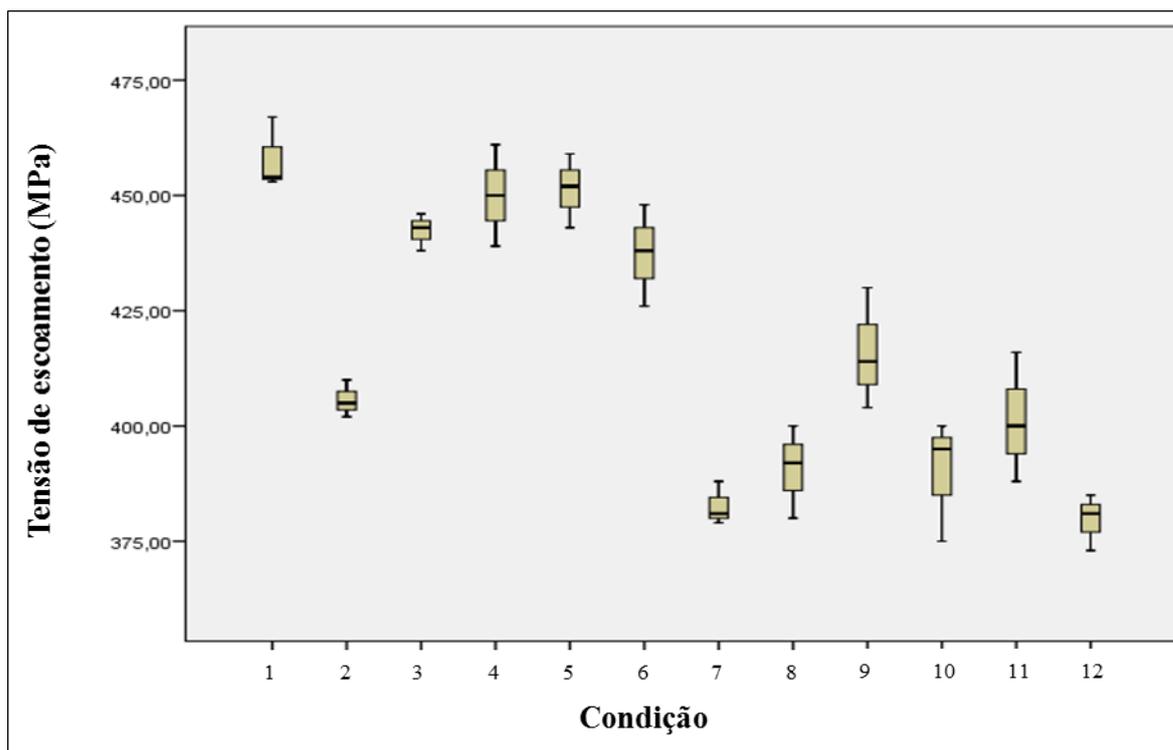


Figura 20. Dispersão de dados para o limite de escoamento.

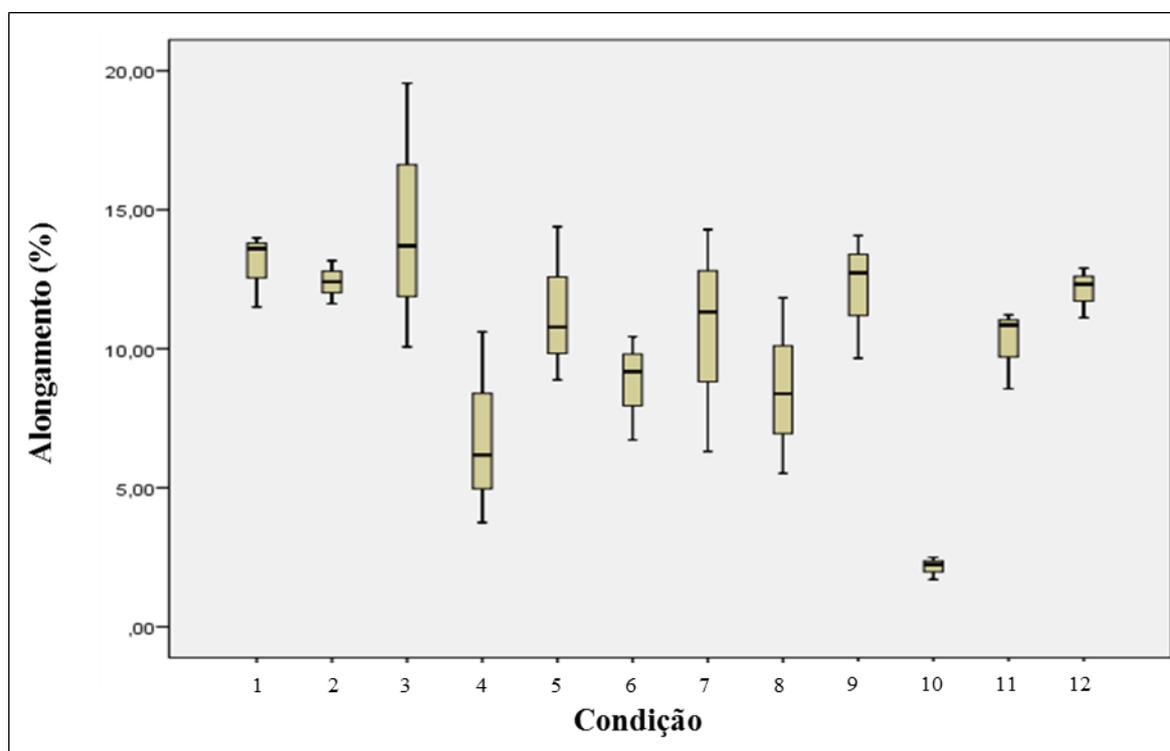


Figura 21. Dispersão de dados para % de alongamento.

Quanto ao metal de adição, obteve-se resultados superiores para o arame ER70S-6,

com uma média de resistência a tração de 540 MPa enquanto o arame ER80S-G apresentou uma média de 490 MPa. A Figura 22, mostra os resultados de comparação múltipla de médias, decorrentes do teste ANOVA para resistência a tração comparando os diferentes metais de adição (no caso usados a dois níveis na ANOVA). Em vermelho é evidenciado o ponto médio, em azul, os valores de amplitude mínimos e máximos.

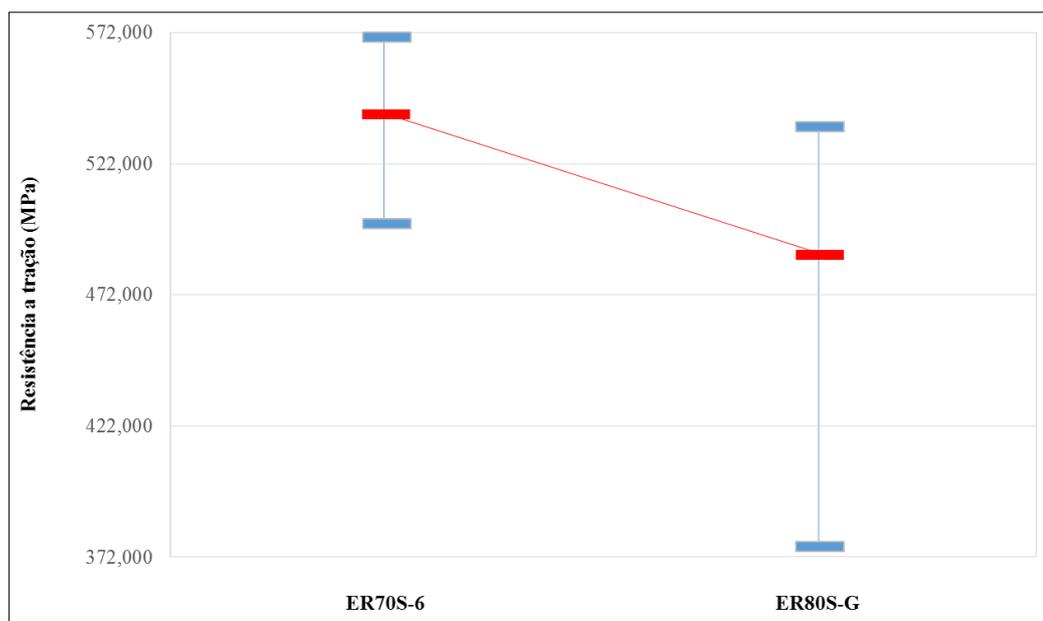


Figura 22. Resistência média máxima a tração para os diferentes metais de adição.

Avaliando a interação velocidade de soldagem com parâmetro elétrico, obteve-se os melhores resultados para as condições três e cinco, apresentando uma média de resistência a tração de 545 MPa. Para a velocidade de 1000 mm/min as condições cinco e onze apresentaram uma média de resistência de 530 MPa. A Figura 23 ilustra a análise onde evidencia-se pela comparação múltipla de médias, provenientes do teste ANOVA, a diferença significativa entre as três variáveis testadas.

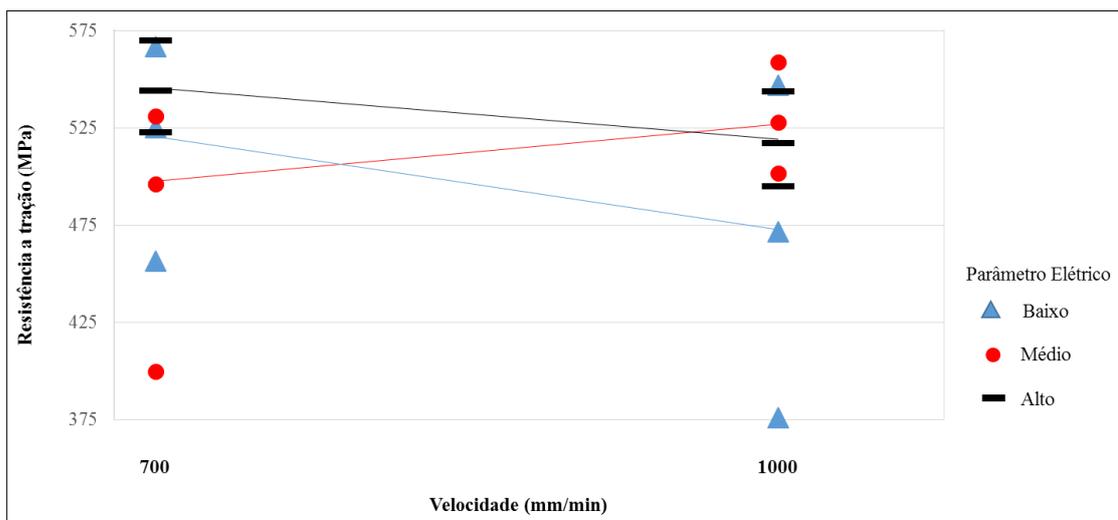


Figura 23. Resistência média máxima a tração para a interação velocidade de soldagem com parâmetro elétrico.

Analisando os resultados de limite de escoamento obteve-se como significativas as variáveis metal de adição e as interações metal de adição com parâmetro elétrico, velocidade com parâmetro elétrico e metal de adição com velocidade e parâmetro elétrico. Novamente foi realizada a comparação múltipla de médias, uma vez que o teste ANOVA mostrou a diferença significativa entre as variáveis. Na Figura 23, são apresentadas todas as medidas de replicatas ensaiadas, em azul os parâmetros baixos (16V e 150A), em vermelho os parâmetros médios (17,5V e 180A) e em preto os parâmetros altos (18,5V e 200A).

Sobre o metal de adição sem interações obteve-se resultados superiores de limite de escoamento quando comparados o arame ER70S-6 ao ER80SG, considerando como variável de resposta maior melhor, a média de limite de escoamento foi de 440 MPa e 390 Mpa respectivamente. A Figura 24 ilustra os limites de escoamento alcançados para os metais de adição.

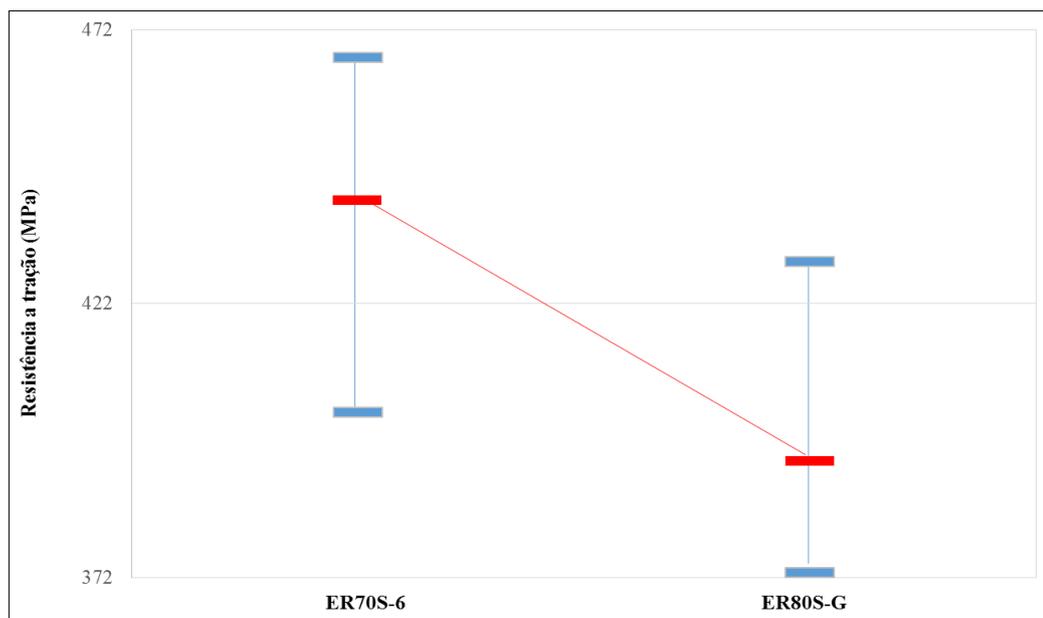


Figura 24. Limite de escoamento para os diferentes metais de adição.

Avaliando as interações, inicialmente metal de adição com parâmetro elétrico, o arame ER70S-6 apresentou os melhores resultados nas condições um e quatro, com média de limite de escoamento de 455 MPa tendo o arame ER80S-G média de 400 MPa nas condições nove e doze.

Na interação velocidade de soldagem com parâmetro elétrico obteve-se resultados similares para a velocidade de 700 mm/min com as condições três e nove (média de limite de escoamento de 429 MPa), e para a velocidade de 1000 mm/min com as condições cinco e onze (média de limite de escoamento de 425 MPa). A Figura 25 ilustra os gráficos das análises de tensão de escoamento.

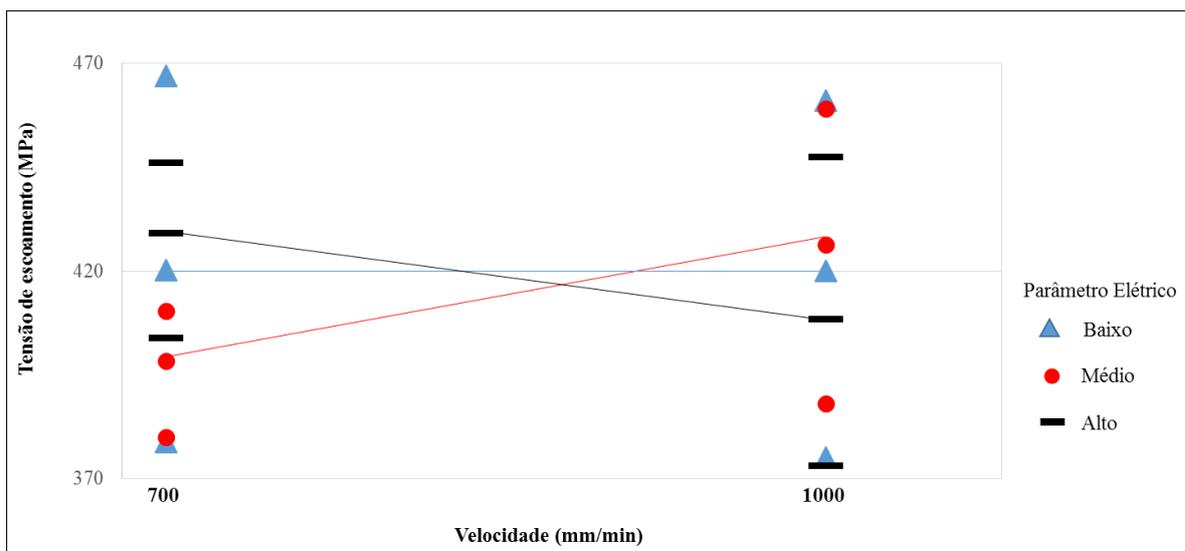


Figura 25. Limite de escoamento para a interação velocidade de soldagem com parâmetros elétricos.

Com a interação de parâmetro elétrico com metal de adição obteve-se resultados superiores nas condições um e quatro com o arame ER70S-6 com uma média de 455 MPa e para o metal de adição ER80S-G a média de 400 MPa nas condições nove e doze.

Avaliando-se a interação, parâmetro elétrico com velocidade de soldagem e metal de adição, obteve-se os melhores resultados para as seguintes combinações:

- configurando os parâmetros elétricos das condições um, quatro, sete e dez com as velocidades de 700 mm/min ou 1000 mm/min e o metal de adição ER70S-6 obteve-se uma média de limite de escoamento de 455 MPa;
- com o metal de adição ER70S-6 combinados com a velocidade de soldagem de 1000 mm/min com as condições dois, oito, cinco e onze apresentaram uma média de limite de escoamento de 450 MPa. Já com a velocidade de 700 mm/min a média caiu para 410 MPa;
- considerando as condições de parâmetros elétricos três, seis, nove e doze combinadas com o arame ER70S-6 e as velocidades de soldagem de 700 ou 1000 mm/min obteve-se a média de 440 MPa para o limite de escoamento.

Dessa forma, para que os resultados sejam relevantes quanto ao limite de escoamento deve-se configurar parâmetro elétrico com velocidade de soldagem e metal de adição. Para a característica de alongamento, as análises mostraram como significativo a velocidade de soldagem, o parâmetro elétrico e a interação velocidade de soldagem com parâmetro elétrico.

Analisando os resultados para a característica de velocidade, observa-se que com

velocidade de 700 mm/min obteve-se uma média de alongamento de 12%. Na avaliação dos parâmetros elétricos, as condições três, seis, nove e doze apresentaram a média de 12% de alongamento.

Referente a interação de parâmetro elétrico com velocidade de soldagem, obteve-se os melhores resultados na velocidade de 700 mm/min para as condições três e nove com a média de alongamento de 13%. Na velocidade de 1000 mm/min obteve-se os melhores resultados na condição cinco e onze, com uma média de 10% no alongamento.

Portanto, a otimização do processo caracteriza-se pela condição 2, onde se tem uma corrente de 180 A, uma tensão de 17,5 V, uma velocidade de 700 mm/min e metal de adição ER70S-6.

4.1.3.2 Dobramento

Para as análises nos ensaios de dobramento, avaliou-se como variável resposta a presença e formação de trinca, na condição menor melhor. Para esse caso, foi significativa a interação velocidade com parâmetro elétrico. Na velocidade de 700 mm/min as condições um, quatro, sete e dez apresentaram os melhores resultados. Para a velocidade de 1000 mm/min as condições três, seis, nove e doze apresentaram os preferíveis registros, ou seja, não apresentaram trincas.

4.1.4 Radiografia

As doze condições ensaiadas foram submetidas a ensaios de gamagrafia para avaliar a região soldada. Duas das condições foram reprovadas, a condição quatro apresentou falta de fusão e a condição sete apresentou excesso de porosidade. Ambas circunstâncias apresentaram resultados insatisfatórios quanto as propriedades mecânicas. A condição quatro rompeu nos ensaios de dobramento, além de apresentar um percentual baixo de alongamento, cerca de 7%, a condição sete apresentou baixos valores de resistência.

4.1.5 Microdureza

Por meio de ensaios de microdureza foi possível realizar uma varredura ao longo das juntas soldadas para as diversas condições em teste, foram avaliadas as regiões do metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de solda (MS). A Figura 30 ilustra as medições

de microdureza relacionando-as com suas respectivas regiões.

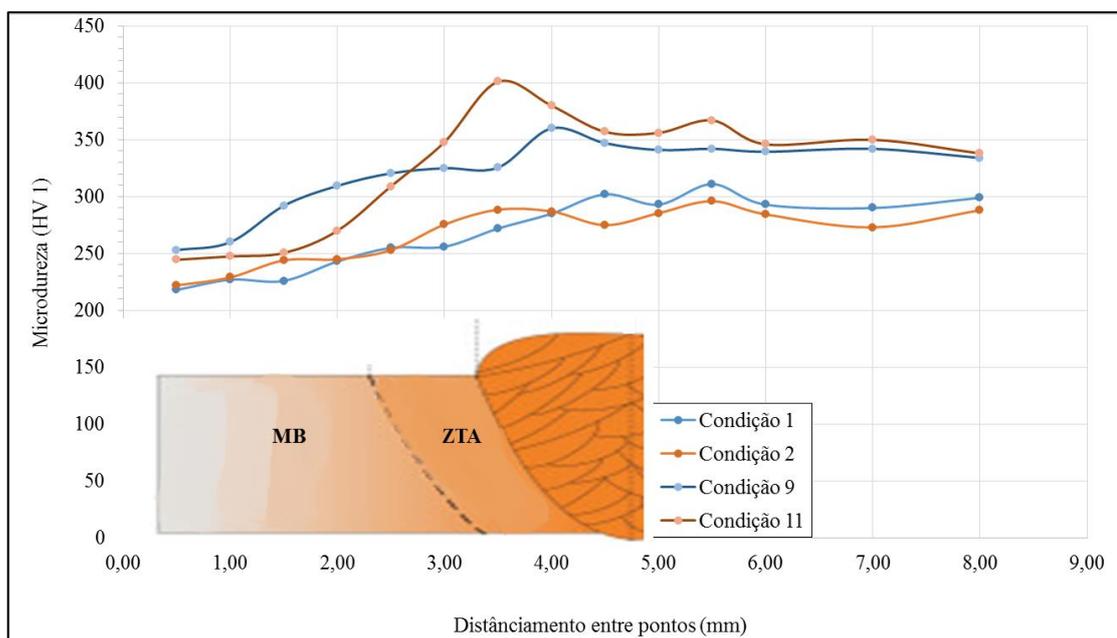


Figura 26. Resultados das análises de microdureza para as condições soldadas.

Analisando os dados dos ensaios de microdureza, percebe-se que as amostras sete e onze apresentaram os maiores picos de dureza na região da ZTA, de encontro com os baixos valores nos resultados de alongamento. Este acontecimento não está relacionado a energia de soldagem, tendo em vista que os valores e *heat input* teóricos para estas condições era relativamente baixo quando comparado com os demais.

Analisando a dureza ao longo da região da junta soldada (MB, ZTA e MS), percebe-se um aumento gradativo de seu valor na ZTA, principalmente para o arame ER80S-G. Comparando-se as mesmas condições de soldagem (sete, nove e onze) entre os arames ER80S-G e ER70S-6 (condições um, três e cinco), nota-se picos de dureza para o arame ER80S-G enquanto o arame ER70S-6 apresenta um comportamento estável. Tal constatação deve estar relacionada as diferentes ligas dos metais de adição. O arame ER80S-G apresenta os elementos Ni e Cu, o que deve aumentar a dureza do metal após a fusão.

4.1.6 Análise Microestrutural

As microestruturas encontradas ao longo da região soldada, metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA), metal de solda (MS) estão apresentadas nas Figuras 27 a 36.

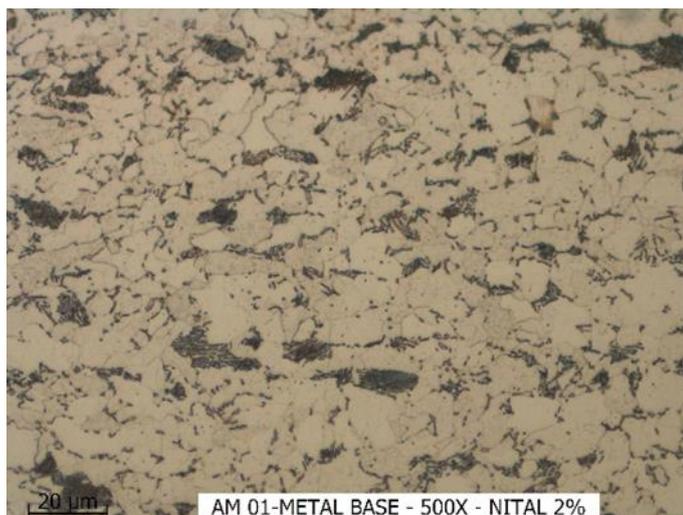


Figura 27. Microestrutura do aço ASTM A588 com aumento de 500X e ataque de Nital 4% sem interferências térmicas.

Através da análise microestrutural do MB do aço percebe-se a divisão da composição entre aproximadamente 70% ferrita e 30% perlita.

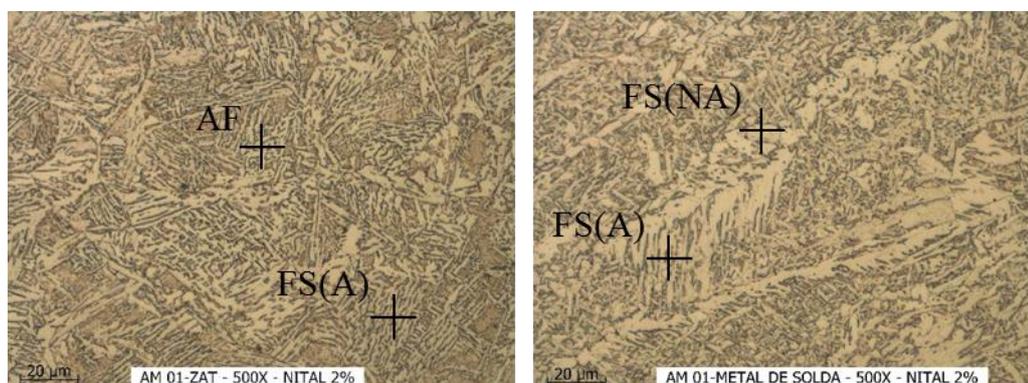


Figura 28. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 01 (i:150 A; T:16 V e velocidade: 700 mm/min – ER70S-6), conforme Quadro 6.

Na condição de soldagem 01, a microestrutura predominante formada é bainítica, sem a presença de martensita, tal constatação deve estar relacionada a utilização de parâmetros elétricos mais baixos (150 A e 16 V). Já para a condição 2, ilustrada na Figura 14, nota-se além de bainita o início de formação de uma fase martensítica.

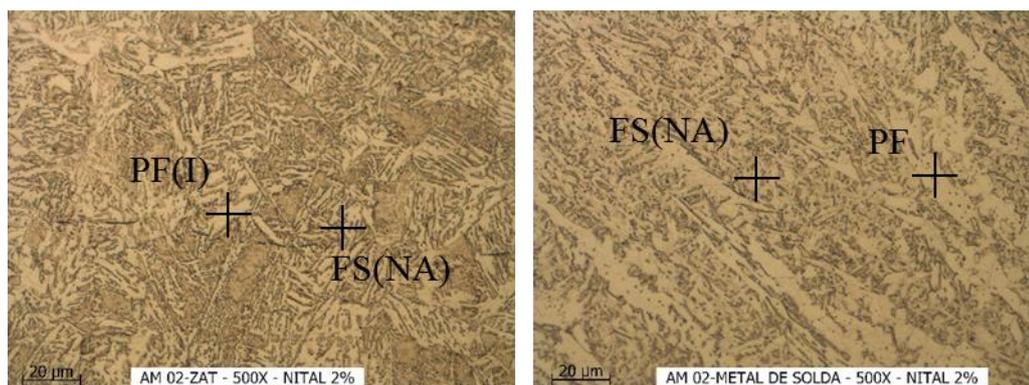


Figura 29. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 02 (i:180 A; T:17,5 V e velocidade: 700 mm/min – ER70S-6), conforme Quadro 6.

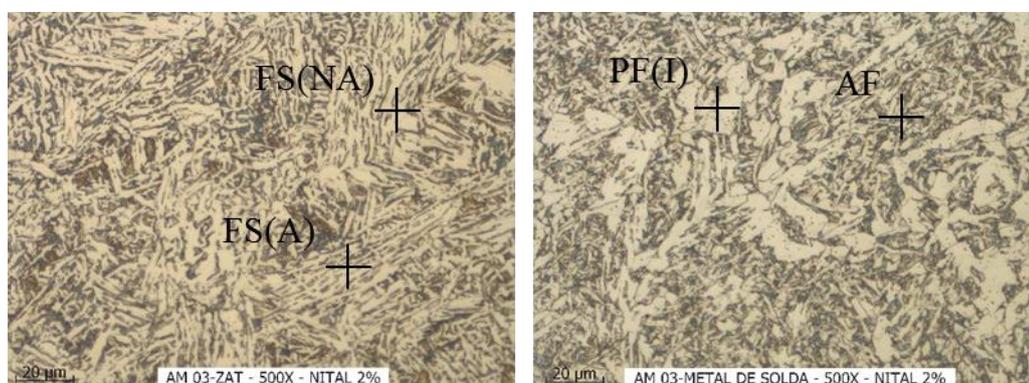


Figura 30. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 03 (i:200 A; T:18,5 V e velocidade: 700 mm/min – ER70S-6), conforme Quadro 6.

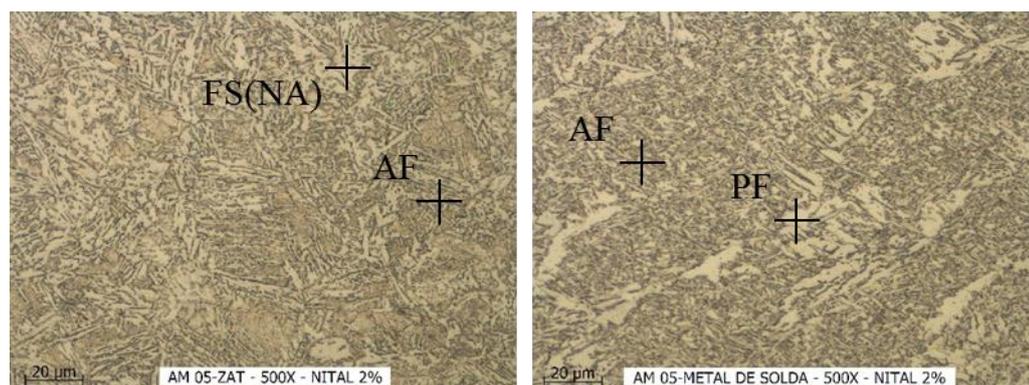


Figura 31. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 05 (i:180 A; T:17,5 V e velocidade: 1000 mm/min – ER70S-6), conforme Quadro 6.

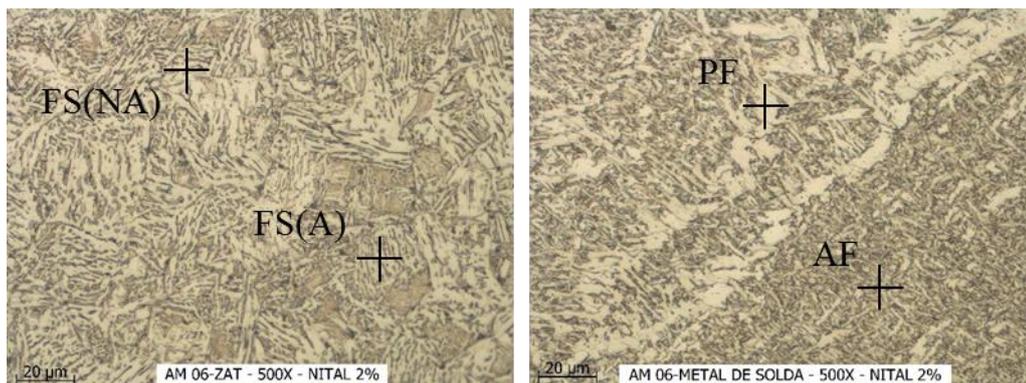


Figura 32. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 06 (i:200 A; T:18,5 V e velocidade: 1000 mm/min – ER70S-6), conforme Quadro 6

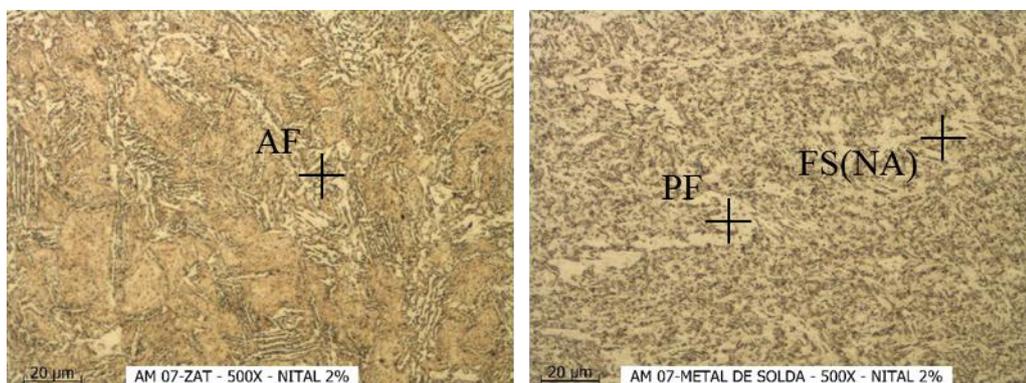


Figura 33. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 07 06 (i:150 A; T:16 V e velocidade: 700 mm/min – ER80S-G), conforme Quadro 6.

Para as condições de soldagem 07, 11 e 12, a fase predominante é a fase martensítica, formada na ZTA, onde se comprava com os ensaios de microdureza, onde foram detectados pontos com cerca de 350 HV.

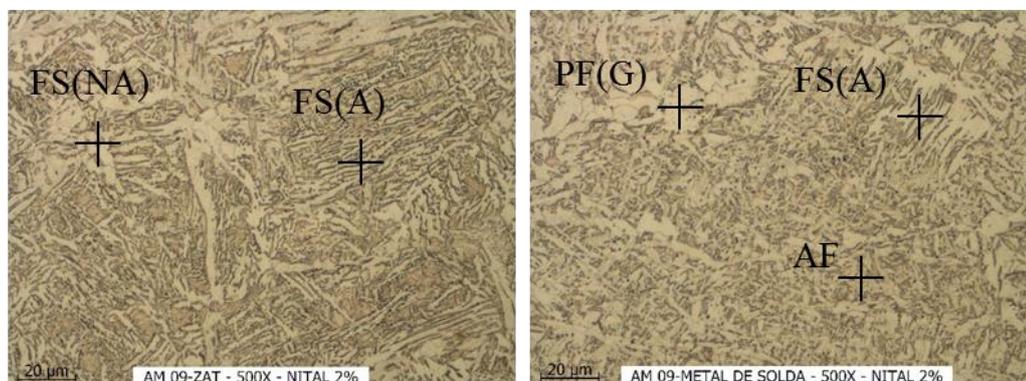


Figura 34. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 09 (i:200 A; T:18,5 V e velocidade: 700 mm/min – ER80S-G), conforme Quadro 6.

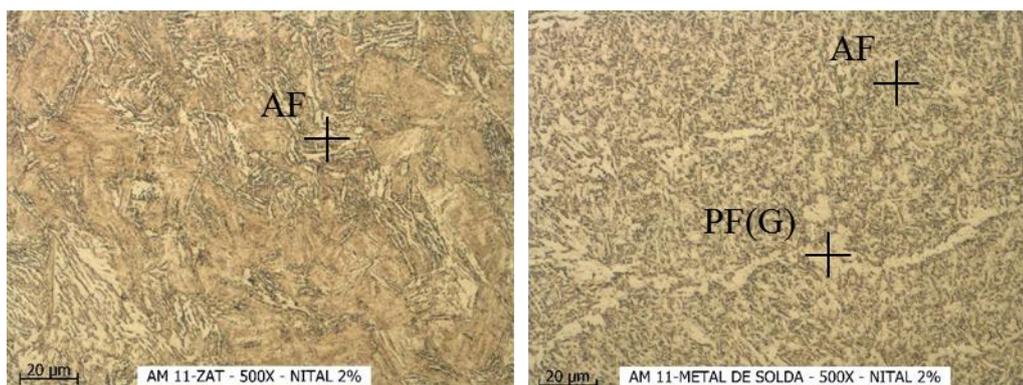


Figura 35. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 11 (i:180 A; T:17,5 V e velocidade: 1000 mm/min – ER80S-G), conforme Quadro 6.

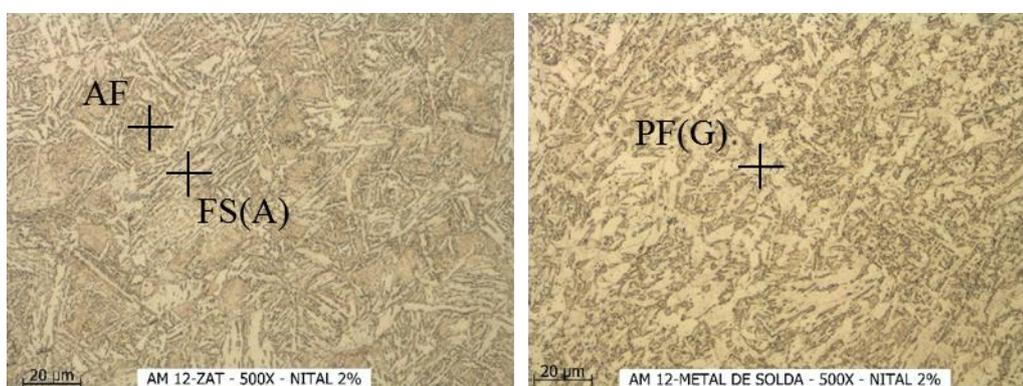


Figura 36. Microestrutura apresentada para a ZTA e MS na condição de solda 12 (i:200 A; T:18,5 V e velocidade: 1000 mm/min – ER80S-G), conforme Quadro 6.

Na análise microestrutural (Figura 27 a 36), foram avaliadas as regiões ZTA e MS para todas as condições. Percebe-se a presença frequente dos componentes de ferrita acicular (AF), ferrita primária (PF), ferrita secundária alinhada (FS(A)) e ferrita secundária não alinhada (FS(NA)). Tais formações são provenientes dos elementos de liga do aço, o aço carbono é o mais importante em termos de influência na microestrutura da solda. Teores elevados deste elemento não são usualmente empregados para evitar a formação de martensita maclada. Em geral, o seu teor fica entre 0,05 e 0,15%. Nesta faixa, o carbono controla principalmente a quantidade de carbonetos formados, mas também favorece a formação de ferrita acicular ao invés de ferrita primária de contorno de grão. (Modenesi, 2012)

Os microconstituintes presentes em todas as condições partem de ferrita acicular, microestruturas bainíticas e formação de martensita em alguns casos. Com o aporte térmico decorrente do processo do processo de soldagem, o alto aquecimento no metal de base impossibilita a verificação de ferrita equiaxial na microestrutura.

4.2 RESISTÊNCIA À CORROSÃO DA JUNTA SOLDADA

4.2.1 Monitoramento do potencial a circuito aberto

No apêndice de I até IV estão apresentados os resultados do monitoramento do potencial ($E_{mV_{ECS}}$) a circuito aberto durante 500 h, nas condições 1, 3, 9, 11 e MB. A Figura 37 ilustra o comportamento típico das curvas de monitoramento de potencial a circuito aberto para o material ASTM A588.

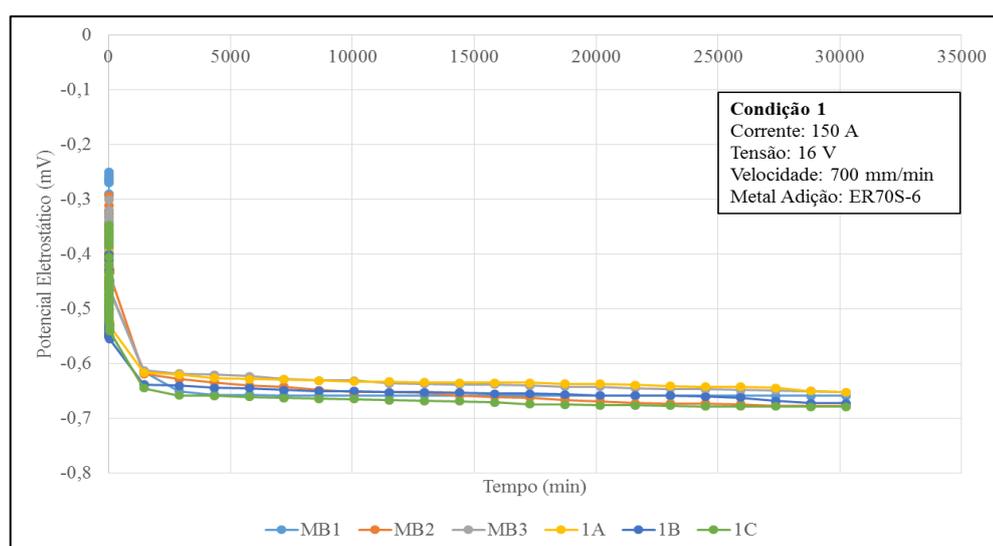


Figura 37. Comportamento típico de monitoramento de potencial a circuito aberto para o aço ASTM A588.

Quanto aos resultados dos ensaios de potencial a circuito aberto, observou-se um comportamento similar para todas as condições testadas, que foi o abaixamento do E (mV_{ECS}) nos primeiros minutos após a imersão dos CPs nas soluções salinas. Os valores alcançaram o potencial entre -700 e -600 $mV_{(ECS)}$.

Nota-se que o aço A588 apresenta baixa resistência quando imerso em solução de NaCl 3,5% pois o potencial de corrosão se desloca para valores abaixo do potencial padrão do Fe, isto é, valores menores que $-0,440$ $V_{(ENH)}$. O efeito do NaCl nos processos corrosivos deve-se ao fato deste sal ser um eletrólito forte elevando portanto, a condutividade da solução eletrolítica. Desta forma, os produtos de corrosão formados resultam em um depósito poroso e pouco efetivo como barreira protetora (GENTIL, 2013).

As reações que podem ocorrer, são segundo Wint et al (2018):



Desta forma, formando um filme superficial não protetor de hidróxido de ferro.

Casaletto et al (2018) que avaliou aços Cor-ten em relação a proteção oferecida por inibidores de corrosão em solução salina, também realizou ensaios de monitoramento de potencial em função do tempo, e obteve valores semelhantes ao encontrado neste estudo para o aço sem proteção dos inibidores. Isto é, observou um decréscimo do potencial, fato que relacionou a dissolução anódica do ferro e um filme superficial que não é protetor, apresentando corrosão vermelha. Desta forma, não há efeito de passivação devido a presença de um filme superficial, que provém dos elementos de liga presentes na composição química dos aços.

Um fator que chama a atenção nos resultados, é que, em algumas situações, por exemplo, nas condições 2, 9 e 11 o resultado do MB apresenta um potencial maior em relação ao metal após o processo de solda. Este resultado pode estar relacionado às estruturas formadas na ZTA, que fragilizam esta região tornando-a mais suscetível à corrosão.

Wint et al (2018) realizou caracterização eletroquímica em aços grau UHSS, que apresentam na composição química os elementos Si, Mn, P, S, Al, Cr, Ti e B. Estes autores atribuíram a ZTA, as mudanças microestruturas e principalmente da energia residual do sistema, a corrosão observada nos aços soldados e o abaixamento do E em soluções salinas.

Portanto, estes autores corroboram os resultados encontrados e a corrosão vermelha observada após a realização dos ensaios deste estudo.

4.2.2 Ensaios eletroquímicos - Curvas de Polarização Potenciodinâmica

As curvas de polarização anódicas e catódicas obtidas nos ensaios foram representadas em gráficos. As curvas anódicas mostraram que no MB ocorreu uma zona de passivação, na Condição 9 não foi observado este fenômeno e, portanto, ocorreu a dissolução ativa do metal.

Os resultados estão relacionando o potencial aplicado versus a densidade de corrente, no MB e na ZTA.

Na Figura 38 estão apresentados os resultados obtidos para a curva de polarização do metal base (MB).

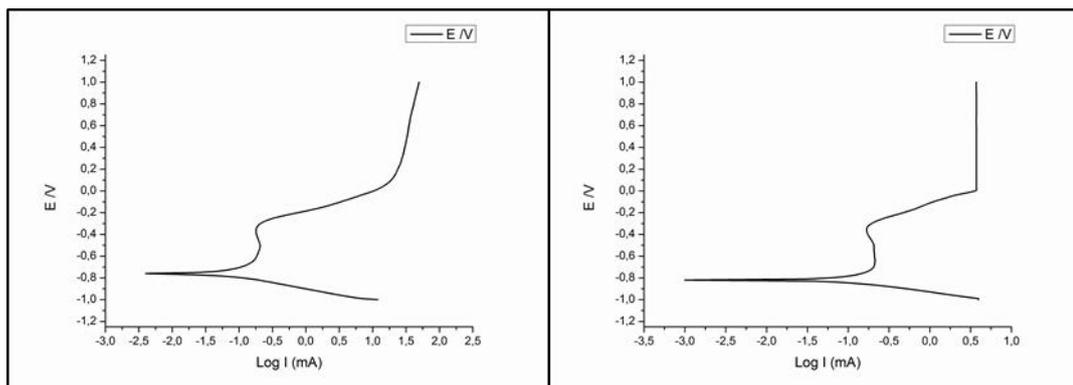


Figura 38. Curva de Polarização MB(A) e MB(B).

Como pode-se observar, o efeito mais pronunciado ocorre na região anódica, onde observa-se uma zona de passivação entre o potencial de $-0,7$ até $-0,3$ mV_(ECS). Após, em torno do potencial de $-0,20$ mV, ocorre a quebra de passividade deste filme e aumento da corrente.

Na Figura 39 estão apresentados os resultados da Condição 1.

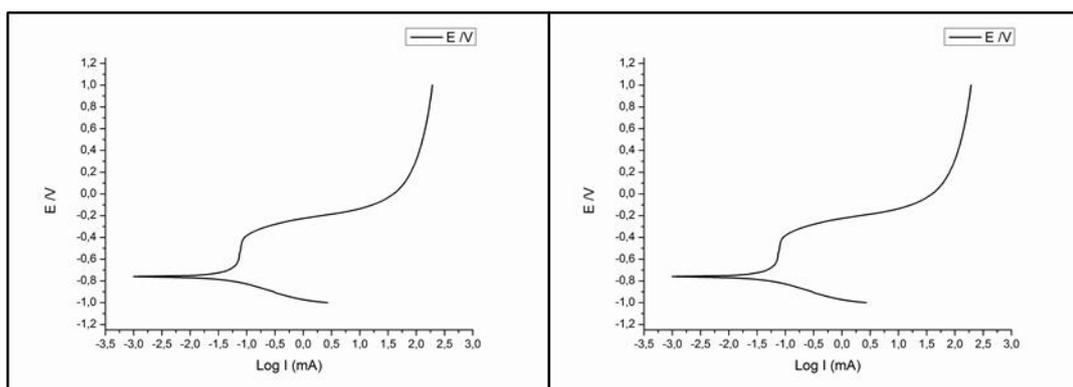


Figura 39. Curva de Polarização Condição 1A e 1B ($i:150$ A; $T:16$ V e velocidade: 700 mm/min – ER70S-6).

Nesta condição 1 observa-se o comportamento eletroquímico semelhante ao MB, na qual há a presença de uma região de passividade em potenciais semelhantes aos descritos anteriormente.

Na Figura 40 estão apresentados os resultados da Condição 2.

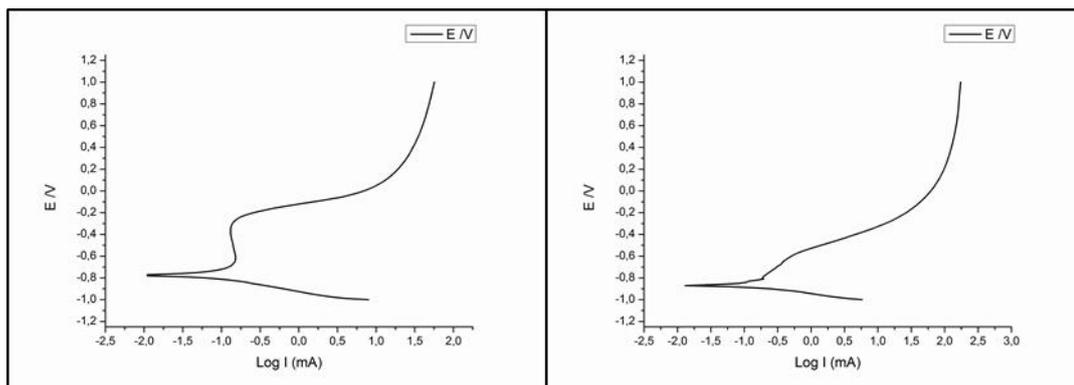


Figura 40. Curva de Polarização Condições 2A e 2B (i :180 A; T :17,5 V e velocidade: 700 mm/min – ER70S-6).

Nota-se que no gráfico (a) a zona de passivação permanece, porém no gráfico (b) esta condição não é observada e, desta forma, há a dissolução ativa do metal.

Na Figura 41 estão apresentados os resultados da Condição 9.

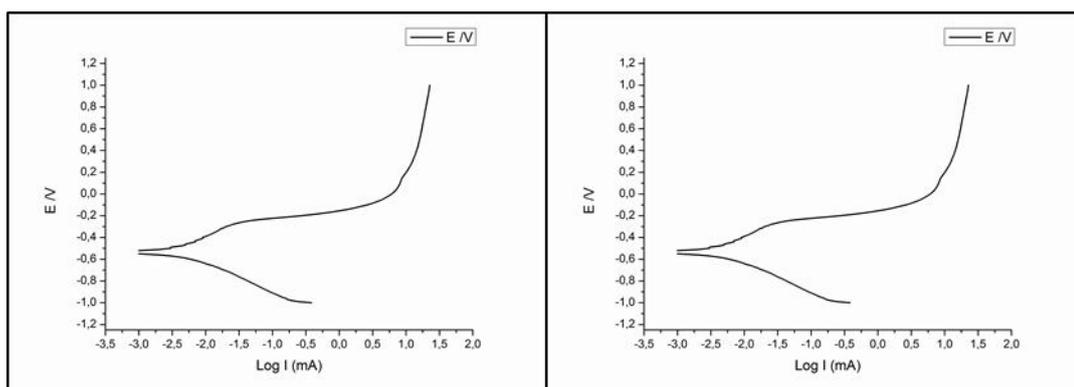


Figura 41. Curva de Polarização Condição 9A e 9B (i :200 A; T :18,5 V e velocidade: 700 mm/min – ER80S-G).

Os resultados desta condição 9 não apresentam a zona de passivação, somente a dissolução ativa do metal.

Na Figura 42 estão apresentados os resultados da Condição 11.

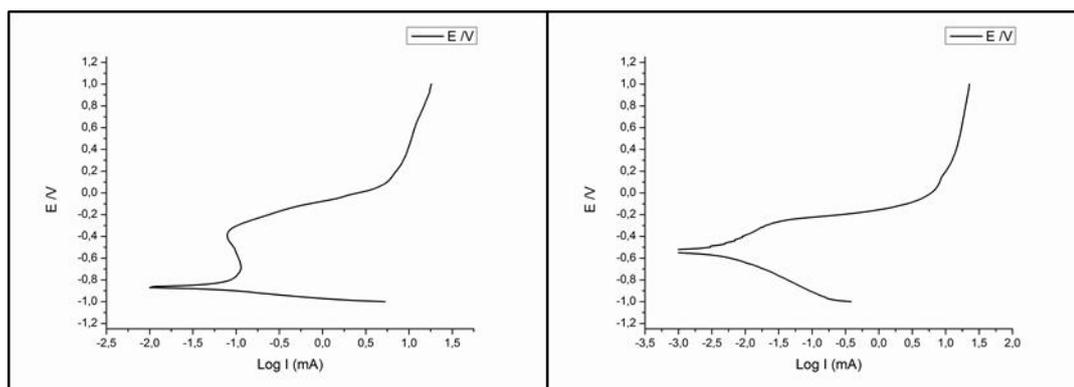


Figura 42. Curva de Polarização Condição 11A e 11B (i:180 A; T:17,5 V e velocidade: 1000 mm/min – ER80S-G).

Da mesma forma que na condição 3, a condição 9 apresentou um gráfico com a zona de passivação e outro não.

De acordo com os ensaios realizados pode-se observar que há diferenças significativas no comportamento eletroquímico no MB e na ZTA. Estes resultados corroboram as avaliações das microestruturas obtidas nestas regiões. As variações do comportamento eletroquímico referente a zona de passivação vistas nas Condições 2 e 9 sugere que, dependendo da região do metal que o ensaio foi realizado, pode-se ter mais proximidade com a ZTA, o que interfere na detecção da região de passivação. Quanto mais longe desta zona, maior a resistência do metal, expressa pela passivação observada e, que pode ser relacionada com a microestrutura do metal (MB).

Outros autores também observaram estes efeitos, entre eles Huang, Tsai e Lee (1994) que realizaram um estudo com o aço ASTM-A516 para caracterizar este metal sob o foco metalúrgico e do comportamento eletroquímico, sob diferentes condições de soldagem em solução salina. Os autores observaram que o comportamento eletroquímico é dependente das microestruturas obtidas na ZTA, e também interfere nas propriedades mecânicas do metal. Uma possível razão para a baixa resistência à corrosão, foi a formação da ferrita acicular, que altera a morfologia da estrutura metalúrgica. Da mesma forma, no presente estudo, foi evidenciado nas micrografias da ZTA a presença deste constituinte. Neste caso, esta estrutura está associada à baixa resistência a corrosão e a ausência da zona passiva.

Oyyaravelu, Kuppan e Arivazhagan (2017) que realizaram estudo para determinar a influência da solda no aço ASTM A516 e relacionar com a microestrutura, também observaram que na ZTA o metal apresentou maior fragilidade.

Para sumarizar os resultados o Quadro 12 mostra o desempenho dos CPs para as doze condições testadas.

Quadro 12. Resumo dos resultados obtidos para as condições avaliadas (AUTOR, 2018).

Resumo Resultados								
Condição	Parâmetro			Metal de Adição	Ensaio			
	Corrente	Tensão	Velocidade		Resistência Tração	Limite Escoamento	Dobramento	Radiografia
1	150	16	700	ER70S-6	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
2	180	17,5			Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
3	200	18,5			Aprovado	Aprovado	Reprovado	Aprovado
4	150	16			Aprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado
5	180	17,5	1000		Aprovado	Aprovado	Reprovado	Aprovado
6	200	18,5			Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
7	150	16	700	ER80S-G	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Reprovado
8	180	17,5			Reprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado
9	200	18,5			Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
10	150	16			Reprovado	Reprovado	Reprovado	Aprovado
11	180	17,5	1000		Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
12	200	18,5			Aprovado	Reprovado	Aprovado	Aprovado

As doze condições foram submetidas aos ensaios de qualificação, as condições aprovadas foram para etapa de ensaios de caracterização, as condições que reprovaram em qualquer um dos ensaios de qualificação foram rejeitadas. Para a caracterização foram avaliadas as condições um, dois, nove e onze, conforme Quadro 13.

Quadro 13. Resultados consolidados para os ensaios de caracterização (AUTOR, 2018).

Resultados consolidados para ensaios de caracterização			
Condição	Eletroquímicos	Metalúrgicos	Observações
1	Aprovado	Aprovado	Por se tratar de parâmetros elétricos baixos, não é recomendada a soldagem com esta condição.
2	Aprovado	Aprovado	Recomenda-se esta condição para a soldagem do material ASTM A588.
9	Reprovado	Aprovado	Não apresentou zona de passivação nos ensaios eletroquímicos.
11	Aprovado	Reprovado	Apresentou picos de dureza na ZTA, pode-se comprometer as propriedades mecânicas.

5 CONCLUSÕES

Através dos ensaios realizados neste estudo pode-se concluir que:

Quanto a validação dos parâmetros de soldagem destaca-se que algumas condições foram descartadas (condições 3, 4, 5, 7, 8 e 12), em sua maioria àquelas com parâmetros mais baixos ou altas velocidades de soldagem, onde, primeiramente não se obteve preenchimento suficiente das juntas comprometendo a resistência das mesmas.

Para caracterizar as amostras através de ensaios mecânicos e metalúrgicos foram realizados com as condições pré aprovadas nos ensaios de qualificação (condições 1, 2, 9 e 11). Destaca-se os pontos de microdureza elevada obtidos na condição 11, eliminando desta forma sua utilização.

Para avaliar as propriedades de resistência a corrosão das amostras após o processo de soldagem, considerou-se também apenas as amostras aprovadas nos ensaios de qualificação (condição 1, 2, 9 e 11). Nestes ensaios percebeu-se que a condição 9 não apresentou zona de passivação, comprometendo a resistência a corrosão atmosférica da condição, sendo descartada.

Por fim, duas condições foram as que permaneceram com os melhores resultados em todos os ensaios realizados (mecânicos, metalúrgicos e de corrosão), sendo as condições 1 e 2. Com parâmetros elétricos baixos na condição 1, recomenda-se a soldagem do aço ASTM A588 com a condição 2 (parâmetros elétricos médios).

Além disso, observa-se como principais achados dessa dissertação:

- a) quanto aos ensaios de tração, utilizando os parâmetros elétricos iniciais (tensão de 16V e corrente de 150A), não foi obtido resistência mecânica mínima para os CPs serem aprovados com o metal de adição ER80S-G;
- b) Observou-se a redução de 10% no limite de escoamento do metal de adição ER80S-G quando comparado ao ER70S-6 fixando os parâmetros elétricos de soldagem. Nos ensaios de dobramento, os parâmetros baixos (tensão de 16V e corrente de 150A) foram reprovados com os dois metais de adição em função do preenchimento insuficiente da junta;
- c) Os ensaios de raio X revelaram defeitos de solda nos CPs de parâmetros iniciais (corrente de 150 A e tensão 16 V) – principalmente falta de fusão;
- d) A micrografia mostrou o início da formação da fase martensítica nas condições 7, 11 e 12 na ZTA, o que corrobora os resultados de microdureza para estas condições, pois há uma relação direta com a fase martensítica e o aumento da microdureza;

e) Os ensaios de monitoramento do potencial de corrosão mostraram que o potencial dos CPs deslocou-se para valores negativos em torno de -700 mV(ECS), o que caracteriza a corrosão do aço (Fe), porém em alguns ensaios o MB apresentou valores mais positivos que as juntas soldadas;

f) Nas curvas de polarização potenciodinâmicas, o MB apresentou zona de passivação que na condição 9 não foi verificada. Nas outras condições a zona de passivação foi parcialmente identificada.

Com quatro condições aprovadas nos ensaios de qualificação e que foram avaliados posteriormente os ensaios de caracterização, observou-se que a condição 1 foi soldada que apresenta os parâmetros elétricos mais baixos, não é recomendada, tendo em vista que foram reprovados nos demais ensaios. A condição 9 não apresentou zona de passivação nos ensaios potenciodinâmicos o que, provavelmente compromete a resistência a corrosão do aço. Na condição 11 foram apresentados os maiores picos de dureza, tal constatação pode influenciar a resistência mecânica do material. Portanto a melhor condição de soldagem observada foi a condição 2, aprovada em todos os ensaios e na qual foram empregados parâmetros elétricos médios.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Contudo, através das conclusões obtidas neste estudo, são sugeridos como pesquisas futuras: i) a avaliação das propriedades mecânicas e de corrosão utilizando como metal de adição a tecnologia metalcored (utilizando altas velocidades de soldagem); ii) determinar a região/morfologia específica na junta soldada onde se inicia a formação da zona de passivação e possíveis interferências; iii) avaliar vantagens econômicas com a substituição do metal de adição ER80S-G pelo metal ER70S-6; iiiii) avaliar a interferência direta entre aumento de velocidade de solda e parâmetro elétrico (considerar Figura 23)

REFERÊNCIAS

ARULMURUGAN, B. MANIKANDAN, M. Development of welding technology for improving the metallurgical and mechanical properties of 21st century nickel based superalloy 686. v.691, p. 126 – 140, 2017.

ASME IX. Boiler and Pressure Vessel Code. Instituto Brasileiro de Petróleo. 1984

AWS D15.1, Railroad Welding specification cars and locomotives. 2001.

CERTIFICADO QUALIDADE ARAME ESAB.

DINHAM, M., GU, F., Autonomous weld seam identification and localisation using eye-in-hand stereo vision for robotic arc welding. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. v.29, p. 288-301, 2013.

ERICA., Processos de Soldagem - Conceitos, Equipamentos e Normas de Segurança. 2015. [Minha Biblioteca].

FARACO, M. Tópicos de soldagem. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

FENG, M., XIANG, W., ZHI, L. Industrial Atmospheric Corrosion Resistance of P-RE, Weathering Steel. Journal of Iron Steel Research, International. v.18, p.67-73, 2011.

FORTES, C., Apostila de solda MIG/MAG ESAB. 2005.

GENTIL, Vicente. Corrosão. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. xv, 360 p.

HAO, W., LIU, Z. WU, W., Electrochemical characterization and stress corrosion cracking of E690 high strength steel in wet-dry cyclic marine environments. Materials Science and Engineering A. v.710, p. 318 – 328, 2018.

HEMMATZADEH, M., MOSHAYEDI, H. Influence of heat input and radius to pipe thickness ratio on the residual stresses in circumferential arc welded pipes of API X46 steels. International Journal of pressure Vessels and Piping. v. 150, 2007.

HUANG, H., TSAI, T. The influence of microstructure and composition on the electrochemical behavior of A516 steel weldment. v.36, p.1027 – 1038, 1994.

IBRAHIM, O., LIGNUS, D., A probabilistic approach for assessing discontinuities in structural steel components based on Charpy-V-notch tests. *Engineering Structures*. v.147, p.1-11, 2017.

INAGUMA, T., SAKAMOTO, H. Microstructure dependence of Barkhausen voltage pulse width in steel. American Institute of Physics, 2012.

JAUREGI, A., ESNAOLA, J. Fatigue analysis of multipass welded joints considering residual stresses. *International Journal of Fatigue*. v. 79, p. 75 - 85, 2015.

MACHADO, J., P., SANTOS, M., B., Estudo comparativo de temperabilidade e dureza dos aços SAE 4140 e 4340 temperados ao maçarico. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, 2018.

MODENESI, P., MARQUES, P., Introdução a metalurgia da Soldagem. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

NBR 6656. Chapas e bobinas de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade. 1992.

PENSE, A., Analysis of preservice cracking in a large bridge structure. v.26, p. 225-234, 1991.

PAMNANI, R; SHARMA, G., Residual stress studies on arc welding joints of naval steel (DMR-294A). *Journal of Manufacturing Processes*. v20, p.104 -111, 2015.

PLANCKAERT, J., DJERMOUNE, E., Modeling of MIG/MAG welding with experimental validation using an active contour algorithm applied on high speed movies. v.34, p. 1004 - 1020, 2010.

SERRA, E., T. Corrosão e proteção anticorrosiva dos metais no solo. Interciência, 2014. 206 p.

SHANHUA, X., WANG, H. Experimental and numerical investigation on seismic performance of corroded welded steel connections. *Engineering Structures*. v. 174, p.10-25, 2018.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. Materiais para equipamentos de processo. 6.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 275 p.

TIPI, A., SANI, S., Frequency control of the drop detachment in the automatic GMAW process. *Journal of Materials Processing Technology*. v.216, p. 248 - 259, 2015.

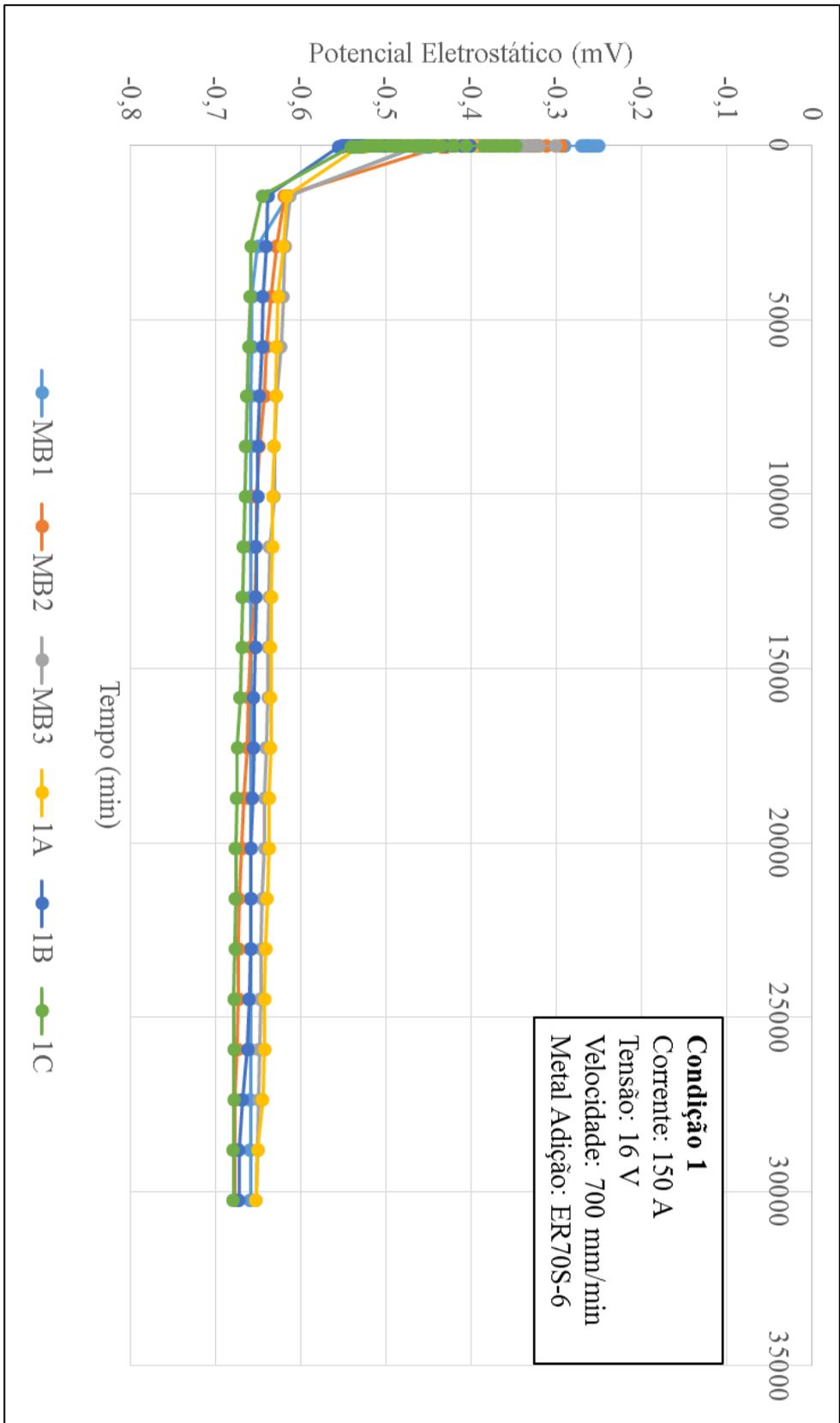
VILLAS, M. R. A. Processo de Deposição de Tintas Catódicas por Eletroforese e suas Correlações com a Qualidade. 2006. 103 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão). Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, 2006.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de (Coord.). Soldagem: processos e metalurgia. São Paulo: E. Blücher, 1992. 494 p.

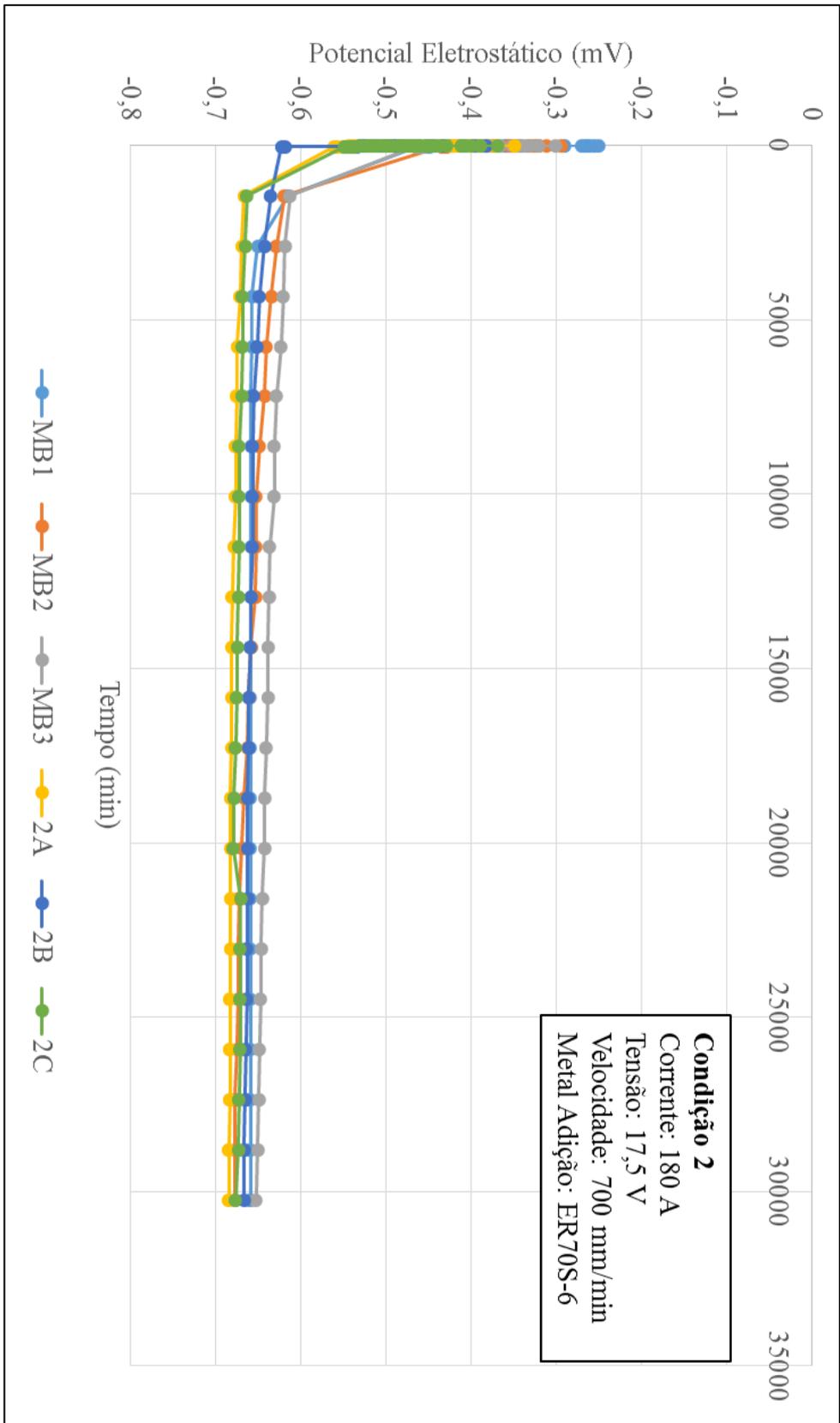
WENKAI, X., FUJU, Z., Effect of heat input on cryogenic toughness of 316LN austenitic stainless steel NG-MAG welding joints with large thickness. *Materials and Design*. v. 86, p. 160 - 167, 2015.

YE, X., LIN, Z.; ZHANG, H.; ZHU, H.; ZHONG, M., Protecting carbon steel from corrosion by laser in situ grown graphene films. *Carbon*. v.94, p.326–334, 2015.

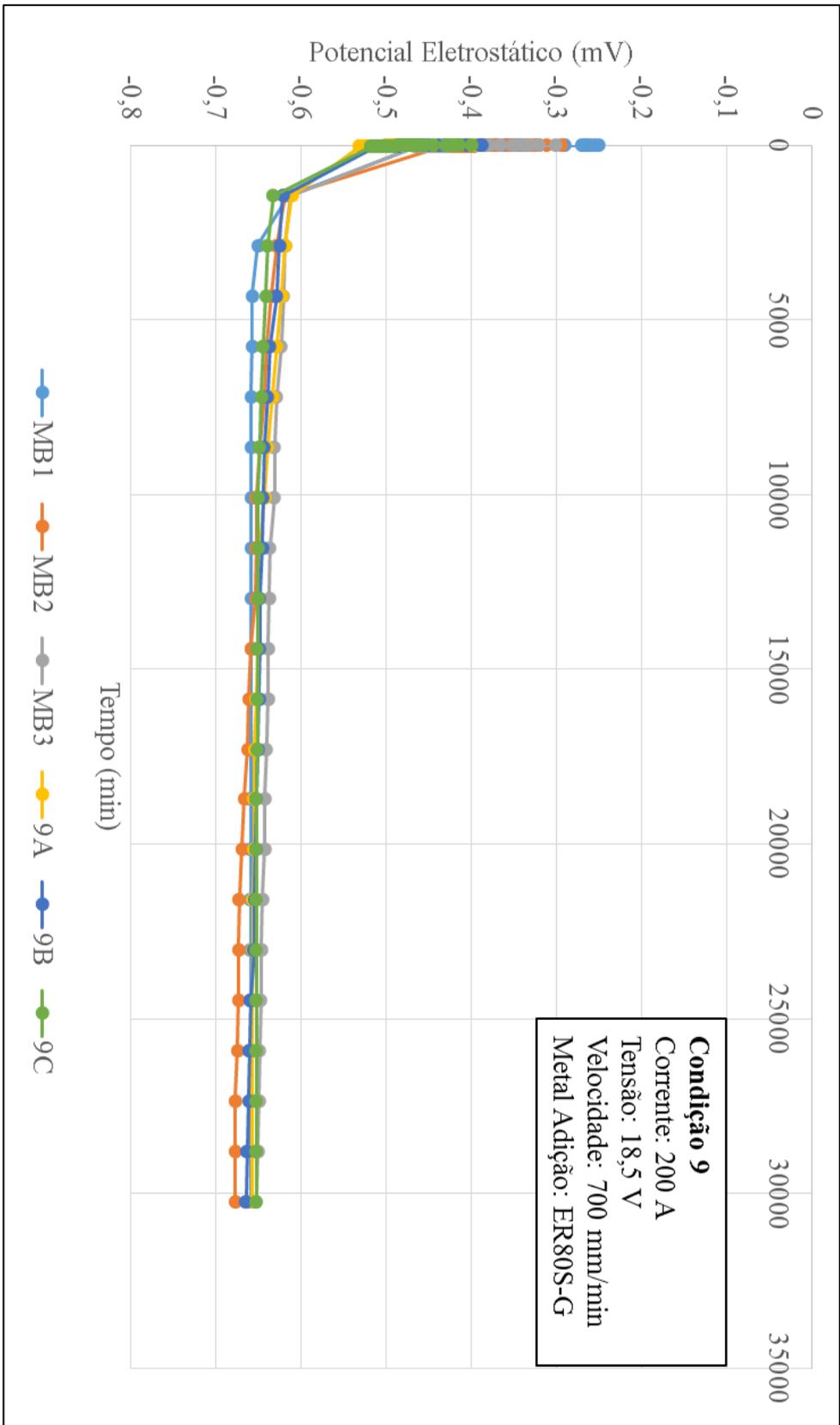
APÊNDICE I



APÊNDICE II



APÊNDICE III



APÊNDICE IV

