



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**“ESTUDO SOBRE O CORRELACIONAMENTO DO
FENÔMENO DAS BOLHAS, SINAIS ELÉTRICOS E METAL
DE SOLDA NA SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA
COM ELETRODOS REVESTIDOS”**

FREDERICO DE ROSA OLIVEIRA

Belo Horizonte, agosto de 2012

Frederico de Rosa Oliveira

**“ESTUDO SOBRE O CORRELACIONAMENTO DO
FENÔMENO DAS BOLHAS, SINAIS ELÉTRICOS E METAL
DE SOLDA NA SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA
COM ELETODOS REVESTIDOS”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Alexandre Queiroz Bracarense (UFMG)

Co-orientador: Ezequiel Caires Pereira Pessoa (UFMG)

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2012



Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG
Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783
www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**“ESTUDO SOBRE O CORRELACIONAMENTO DO
FENÔMENO DAS BOLHAS, SINAIS ELÉTRICOS E METAL
DE SOLDA NA SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA
COM ELETODOS REVESTIDOS”**

FREDERICO DE ROSA OLIVEIRA

Dissertação defendida e aprovada em agosto de 2012, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de Concentração de “Processos de Fabricação”.

Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense - UFMG – Orientador

Prof. Dr. Ezequiel Caires Pereira Pessoa - UFMG –Co-orientador

Prof. Dr. Paulo José Modenesi - UFMG –Examinador

Prof. Eduardo José Lima II - UFMG –Examinador

À minha querida e amada família,
Eustáquio, Beth e Fá pelo apoio incondicional,
incentivo diário e extrema paciência.

AGRADECIMENTOS

À minha família por nunca me deixar desistir dos meus sonhos e objetivos. Pai e mãe, exemplo de persistência, dedicação e empenho em tudo que se faça. Irmã querida pelo eterno apoio, conselhos e carinho incondicional.

Ao professor Alexandre Bracarense por mais essa oportunidade, pelo enorme aprendizado, paciência, boa vontade e disposição para ensinar.

Ao William Soares pela enorme ajuda, boa vontade e dedicação.

Ao Ezequiel Pessoa pela extrema boa vontade em ajudar e contribuir.

Ao LRSS pela oportunidade de realização do trabalho e infraestrutura necessária para realização do mesmo.

Aos vários colegas de curso e de trabalho que de uma forma ou de outra me ajudaram e incentivaram na realização do mesmo.

À Logos pelo apoio e incentivo durante todo este tempo de curso.

Ao professor Antônio Ferreira Ávila pelo incentivo inicial para realização deste curso.

Meus sinceros agradecimentos.

"Nós somos aquilo que fazemos repetidamente. Excelência, portanto, não é um modo de agir, mas um hábito."

Aristóteles

"Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim."

Chico Xavier *in* Somos o que atraímos

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	13
LISTA DE EQUAÇÕES	15
RESUMO	16
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivo.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Soldagem subaquática	18
<u>2.1.1 Soldagem subaquática seca</u>	<u>19</u>
<u>2.1.2 Soldagem subaquática molhada</u>	<u>20</u>
2.2 Influência da água e os problemas na soldagem subaquática molhada	25
<u>2.2.1 Perda de elementos de liga e formação de inclusões</u>	<u>26</u>
<u>2.2.2 Porosidade</u>	<u>27</u>
<u>2.2.3 Trincas por hidrogênio (trinca a frio)</u>	<u>29</u>
<u>2.2.4 Processo de solidificação e trincas a quente</u>	<u>31</u>
2.3 Dinâmica das bolhas na soldagem subaquática	34
2.4 O arco elétrico na soldagem subaquática molhada	38
3 METODOLOGIA	44
3.1 Materiais.....	44
<u>3.1.1 Corpo de prova</u>	<u>44</u>
<u>3.1.2 Consumível</u>	<u>45</u>
<u>3.1.3 Tipo de água utilizada</u>	<u>45</u>
3.2 Equipamentos	46
<u>3.2.1 Aquário de soldagem</u>	<u>46</u>
<u>3.2.2 Dispositivo de Soldagem por gravidade</u>	<u>47</u>
<u>3.2.3 Fonte de soldagem</u>	<u>48</u>

3.2.4	<u>Sistema de aquisição de dados</u>	48
3.2.5	<u>Câmera de alta velocidade</u>	49
3.3	Procedimento Experimental.....	50
3.3.1	<u>Análise dos sinais de tensão e corrente</u>	55
3.3.2	<u>Análise das imagens</u>	56
3.3.3	<u>Metalografia e análise macroscópica dos corpos de prova</u>	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	Análises iniciais.....	57
4.2	Análise dos sinais de tensão e corrente.....	60
4.2.1	<u>Estabilidade do arco</u>	62
4.2.2	<u>Tensão e corrente médias</u>	63
4.2.3	<u>Desvios percentuais em relação à tensão e corrente médias</u>	64
4.3	Análise das filmagens em alta velocidade.....	71
4.3.1	<u>Análise da formação e destacamento das bolhas</u>	71
4.3.2	<u>Determinação da velocidade de soldagem e contagem das bolhas</u>	73
4.4	Correlacionamento dos sinais elétricos e destacamento das bolhas.....	75
4.5	Solidificação do metal de solda.....	83
5	CONCLUSÕES	89
	ABSTRACT	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	APÊNDICE A – SINAIS ELÉTRICOS	94
	APÊNDICE B - MACROGRAFIAS	102
	APÊNDICE C – MACROGRAFIA VS SINAIS ELÉTRICOS	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Soldagem subaquática molhada	21
Figura 2.2 - Esquemático da soldagem SMAW	23
Figura 2.3 - Formação de bolhas de gás no interior da gota metálica	29
Figura 2.4 - Micrografia de uma trinca a frio em uma estrutura de bainita na ZTA (magnificação 200 x)	30
Figura 2.5 - Curvas de resfriamento	31
Figura 2.6 - Desenho esquemático mostrando a transmissão de calor na soldagem sob condição atmosférica (a) e na condição subaquática (b).	32
Figura 2.7 – Crescimento de grão de acordo com os gradientes de temperatura da poça de fusão.....	33
Figura 2.8 - Crescimento idealizado da bolha	35
Figura 2.9 - Altura da bolha.....	36
Figura 3.1 - Corpo de prova (dimensões em mm)	45
Figura 3.2 – Aquário de soldagem.....	46
Figura 3.3 - Dispositivo de soldagem por gravidade na posição plana	47
Figura 3.4 - Esquema do dispositivo de soldagem	48
Figura 3.5 - Esquema do sistema de aquisição utilizado	49
Figura 3.6 - Câmera Olympus ENCORE MAC-8000S	50
Figura 3.7 - Foto da montagem do experimento.....	52
Figura 3.8 - Foto da montagem dentro do tanque de soldagem.....	53
Figura 3.9 - Esquema usado para obter referência do cordão de solda nos vídeos.....	53
Figura 3.10 - Corte do corpo de prova.....	55
Figura 4.1-Cordões obtidos com eletrodo E6013	58
Figura 4.2 - Cordões obtidos com eletrodo E7024	59
Figura 4.3 -Cordões obtidos com eletrodo E7018	59
Figura 4.4 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 1A	61
Figura 4.5 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 1B	61

Figura 4.6 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 1C	61
Figura 4.7 – Valores para estabilidade do arco.....	62
Figura 4.8 - Valores de tensão e corrente	63
Figura 4.9 - Gráfico da distribuição de eventos/s em relação a desvios percentuais da V_m – eletrodo E6013.....	64
Figura 4.10 - Gráfico da distribuição de eventos/s em relação a desvios percentuais da V_m – eletrodo E7024.....	65
Figura 4.11 - Gráfico da distribuição de eventos/s em relação a desvios percentuais da V_m – eletrodo E7018.....	65
Figura 4.12 - Gráfico da distribuição de eventos/s em relação a desvios percentuais da A_m – eletrodo E6013.....	66
Figura 4.13 - Gráfico da distribuição de eventos/s em relação a desvios percentuais da A_m – eletrodo E7024.....	67
Figura 4.14 - Gráfico da distribuição de eventos/s em relação a desvios percentuais da A_m – eletrodo E7018.....	67
Figura 4.15 - Imagem de 1 quadro da filmagem.....	71
Figura 4.16 - Formação e destacamento das bolhas	73
Figura 4.17 – Comparação Eventos/s 5% menores que A_m e a média bolhas/s registrados com a filmagem – Eletrodo E6013	76
Figura 4.18 - Comparação Eventos/s 5% menores que A_m e a média bolhas/s registrados com a filmagem – Eletrodo E7024	77
Figura 4.19 - Comparação Eventos/s 5% menores que A_m e a média bolhas/s registrados com a filmagem – Eletrodo E7018	77
Figura 4.20 - Macrografia corpo de prova 5A.....	83
Figura 4.21 - Macrografia corpo de prova 6B	84
Figura 4.22- Macrografia corpo de prova 2C	84
Figura 4.23 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 1A	85
Figura 4.24 - - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 3B.....	86

Figura 4.25 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 2C.....87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação dos modos de transferência Metálica de acordo com o IIW	43
Tabela 3.1 - Composição química do aço ASTM A-36	44
Tabela 3.2 - Corpos de Prova.....	55
Tabela 4.1 - Total de eventos por segundo maiores que Vm por corpo de prova	68
Tabela 4.2 - Total de eventos por segundo menores que Vm por corpo de prova	69
Tabela 4.3 - Total de eventos por segundo maiores que Am por corpo de prova	69
Tabela 4.4 - Total de eventos por segundo menores que Am por corpo de prova	70
Tabela 4.5 - Velocidade de soldagem.....	74
Tabela 4.6 – Número de bolhas destacadas para o eletrodo E6013.....	74
Tabela 4.7 - Número de bolhas destacadas para o eletrodo E7024	75
Tabela 4.8 - Número de bolhas destacadas para o eletrodo E7018	75
Tabela 4.9 - Total de eventos por segundo A	78
Tabela 4.10 - Total de eventos por segundo Am-4,0% x Total de Bolhas em cada segundo	79
Tabela 4.11 - Queda de corrente eletrodo E6013	80
Tabela 4.12 - Queda de corrente eletrodo E7024	80
Tabela 4.13 - Quedas de corrente eletrodo E7018.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SMAW	Shielded metal arc welding
ZTA	Zona Termicamente Afetada
TIG	Tungsten Inert Gas
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
IIW	Instituto Internacional de Soldagem
$\Delta T_{8.5}$	Tempo decorrido para a temperatura reduzir de 800°C para 500°C
H_{dif}	Hidrogênio difusível
∇	Volume de uma bolha
G	Taxa do volume
m_v	Massa de vapor de uma bolha
t	Tempo
P	Pressão
T	Temperatura
R_g	Constante do gás
h	altura da bolha
R	Raio da bolha
R_0	Raio do orifício que lhe deu origem à bolha
h_{max}	Altura máxima da bolha
r_{max}	raio máximo
Q	Fluxo de calor absorvido
h_{lf}	Calor latente da água.
R_{cont}	Máximo raio de contato
I_{rms}	Raiz quadrada da média aritmética dos quadrados da corrente instantânea de soldagem.

U_{rms}	Raiz quadrada da média aritmética dos quadrados da tensão instantânea do arco elétrico.
I_{Im}	Corrente média de reignição do arco.
U_{Um}	Tensão média de reignição do arco.
S	Estabilidade do arco
I_{max}	Valor máximo da corrente
I_{min}	Valor mínimo
S_m	Estabilidade do arco média
V_m	Tensão média
A_m	Corrente média

LISTA DE EQUAÇÕES

$R = v \times \cos\theta$	Equação 2.132
$\nabla = G \cdot t = \frac{mv \cdot R_g \cdot T}{P}$	Equação 2.236
$h = \frac{4}{11} \cdot g \cdot t^2$	Equação 2.337
$R = \left(\frac{3}{4} \cdot G \cdot t\right)^{\frac{1}{3}}$	Equação 2.437
$h_{\max} = R_{\max} + R_0$	Equação 2.537
$G = \frac{Q \cdot R \cdot T}{h_{lg} \cdot P}$	Equação 2.637
$R_{cont} = (R^2 - h^2)^{\frac{1}{2}}$	Equação 2.738
$S = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}$	Equação 2.841

RESUMO

O fenômeno de formação de bolhas no processo de soldagem subaquática molhada influencia diretamente na qualidade final das soldas. O bom entendimento da formação e destacamento das bolhas juntamente com o conhecimento do comportamento dos parâmetros de soldagem no decorrer do processo podem proporcionar melhorias nas práticas utilizadas na soldagem subaquática e, conseqüentemente, melhorias na qualidade final da solda. Para entender e tentar correlacionar o fenômeno de crescimento, destacamento e frequência das bolhas com os sinais elétricos ao longo do processo de soldagem, este trabalho foi desenvolvido. Foram feitos cordões sobre chapa a 0,50 m de profundidade com três tipos de eletrodos revestidos comerciais, E6013, E7018 e E7024. Para visualização da formação, destacamento e contagem das bolhas foi realizada a filmagem em alta velocidade do processo, juntamente com a aquisição dos sinais elétricos do mesmo. Pôde-se então tentar correlacionar a frequência das bolhas com variações dos sinais elétricos observados durante o processo e estes com a macrografia dos corpos de prova. Observou-se nos dados de corrente que o número médio de variações abaixo de 5% da corrente média assemelha-se com a taxa média de destacamento das bolhas. Assim concluiu-se haver uma possível relação entre o destacamento das bolhas com determinada variação na corrente.

Palavras Chaves: soldagem subaquática molhada, filmagem em alta velocidade, eletrodo revestido, frequência das bolhas e sinais elétricos.

1 INTRODUÇÃO

A soldagem subaquática com eletrodo revestido tem sua aplicação principal voltada para o reparo e manutenção de estruturas submersas sendo bastante utilizado na indústria naval e de exploração de petróleo e gás. Esta técnica tem se mostrado bastante versátil além de apresentar baixo custo e produzir soldas com bons níveis de confiabilidade. No entanto deve-se estar atento a procedimentos especiais de soldagem e na utilização de eletrodos especialmente desenvolvidos para este fim. Mesmo produzindo soldas com níveis de confiabilidade aceitáveis e a um custo razoável, alguns fenômenos que influenciam diretamente no resultado da solda subaquática são pouco entendidos.

Um dos principais problemas inerentes ao processo de soldagem subaquática é o seu rápido resfriamento determinado pela água circundante. A elevada velocidade de resfriamento resultante da ação refrigerante da água durante a soldagem impõe algumas características microestruturais ao metal de solda e à zona termicamente afetada (ZTA). São geradas na ZTA microestruturas de elevada dureza que apresentam baixa tenacidade e estabelecem variações abruptas de dureza entre metal de solda e ZTA, diminuindo a ductilidade e, conseqüentemente, a capacidade de deformação da solda.

Durante a soldagem subaquática com eletrodo revestido, a queima do revestimento do eletrodo em conjunto com a dissociação da água promovida pela alta energia do arco elétrico formam bolhas que crescem e se colapsam continuamente durante todo o processo. A formação, o crescimento, o destacamento e a frequência de destacamento destas bolhas são fenômenos que precisam ser melhor estudados, entendidos e relacionados com as características finais da solda.

O fenômeno das bolhas no processo de soldagem subaquática está intimamente relacionado com a forma de resfriamento inerente ao processo. Desta forma o bom entendimento deste fenômeno pode vir a propiciar soldas de melhor qualidade.

INTRODUÇÃO

Presume-se também que este fenômeno pode de alguma forma influenciar os sinais elétricos ao longo do processo. Podem haver variações de corrente e tensão que são influenciados, ou influenciam, o contínuo destacamento das bolhas.

Assim, a formação, o crescimento, o destacamento e a frequência do destacamento das bolhas em conjunto com os sinais elétricos ao longo do processo podem ter influencia no tipo e forma de solidificação do metal de solda.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem o intuito de tentar correlacionar o fenômeno das bolhas com os sinais elétricos e estes às formas de solidificação do metal de solda através da análise macroscópica dos cordões de solda. Para isto foi realizada a filmagem em alta velocidade e a aquisição dos sinais de corrente e tensão durante a soldagem com três tipos diferentes de eletrodos revestidos comerciais, E6013, E7024 e E7018.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem subaquática

Com a exploração de recursos energéticos se voltando para os oceanos, estruturas para extração, produção, processamento e transporte de petróleo e gás estão se tornando muito comuns nos mares ao redor do mundo. O drástico aumento no preço do barril de petróleo ocorrido em 1973 fez com que a extração de petróleo, que se concentrava quase que totalmente em terra, se expandisse rapidamente para a costa marítima. Até o surgimento da atividade de extração de petróleo no mar, a soldagem subaquática era somente usada em reparos de caráter emergencial em cascos de navios e estruturas portuárias submersas.

Devido ao grande potencial de exploração de óleo em locais “offshore”, a manutenção e o aumento da capacidade de exploração comercial das atuais reservas de petróleo, além da viabilização da exploração das jazidas futuras, passa pela capacidade de executar reparos das instalações produtivas (plataformas, oleodutos, cais de atracação, embarcações), tanto em ambientes de pequena lâmina d’água (profundidades em torno de 35 metros) que permite intervenções através do mergulho raso, quanto em águas profundas e ultra profundas, que demandam por sistemas automatizados de soldagem. Para atender a esta demanda esforços tem sido concentrados no desenvolvimento de tecnologias de soldagem para ambiente subaquático capazes de atender às exigências mecânicas requeridas das juntas.

A soldagem subaquática tem sua aplicação voltada para o reparo de estruturas imersas na indústria naval, no setor de gás, nas usinas hidrelétricas e, principalmente, no setor de extração de petróleo. A indústria petrolífera tem aumentado cada vez mais seu interesse neste processo para a construção e reparo de equipamentos para exploração, perfuração e recuperação de óleo e gás natural no oceano. Recentemente, companhias energéticas

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

também mostraram interesse para sua utilização na manutenção de hidroelétricas (PESSOA, 2007).

Pode-se dividir a soldagem subaquática em dois tipos: soldagem subaquática seca e soldagem subaquática molhada.

2.1.1 Soldagem subaquática seca

A soldagem subaquática seca é mais conhecida como soldagem hiperbárica e é geralmente feita com o auxílio de câmaras em que a água é removida, ou seja, não há o contato direto com a água, necessitando um ambiente pressurizado contendo uma atmosfera controlada, Tsai e Masubuchi (1977). O metal de solda não está em contato direto com a água, assim este processo pode produzir boas soldas, porém, a um custo elevado. Esta pode ser dividida em quatro tipos: soldagem seca localizada, soldagem em caixa seca, soldagem em câmara e soldagem em habitat ou câmara hiperbárica (VILLANI et al, 2007).

Na soldagem seca localizada o volume contendo o arco e a região a ser soldada é separada da água por meio de um pequeno envoltório cheio de gás a pressão ambiente com aberturas para permitir o acesso ao local de execução da solda.

Já a soldagem em caixa seca é realizada em uma câmara preenchida com um gás. Esta é grande o bastante para acomodar a área de trabalho e a parte superior do corpo do soldador/mergulhador, vestido em um traje de mergulho completo. A água é removida por uma mistura de gases pressurizados, porém o hidrogênio não é completamente removido por causa da excessiva umidade nestas câmaras. A alta temperatura e alta umidade presente na câmara fazem com que as condições de trabalho sejam péssimas, porém os problemas de visibilidade e estabilidade posicional são resolvidos (VILLANI et al, 2007).

A soldagem em câmara é realizada em uma câmara a pressão de 1atm montada ao redor do local onde deverão ser realizados os trabalhos. Nestas condições a soldagem praticamente

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

não é afetada pelas propriedades da água ou pelos efeitos da profundidade. Processos de soldagem realizados em câmaras são capazes de produzir soldas de alta qualidade, porém são caros devido ao alto custo de se desenvolver projetos especiais para as câmaras (MASUBUCHI, 1981).

Na soldagem em habitat (ou câmara hiperbárica) a água é deslocada de uma grande câmara por meio da injeção de um gás em seu interior. A área de solda é completamente isolada da água, mas se encontra na pressão do local correspondente a altura da coluna de água a que está submetida. Os soldadores não utilizam trajes de mergulho nesta câmara e existe espaço suficiente para a realização dos preparativos para soldagem e posicionamento de equipamentos.

Quando comparada com a soldagem subaquática molhada, as principais vantagens da soldagem subaquática seca são: diminuição da presença do hidrogênio no meio, melhor estabilidade do processo de soldagem, menor taxa de resfriamento do metal de solda e de base, características da solda comparáveis com as realizadas ao ar livre.

2.1.2 Soldagem subaquática molhada

O termo “molhada” é usado para indicar que a soldagem é realizada completamente exposta ao ambiente aquático. A principal vantagem da soldagem subaquática molhada é sua simplicidade e facilidade de uso em diversas posições diferentes para produzir juntas incomuns e complexas, Figura 2.1.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



Figura 2.1 - Soldagem subaquática molhada

O processo de soldagem subaquática molhada geralmente é realizado em ambientes perigosos com visibilidade e mobilidade limitadas. Pode ser realizada em diferentes ambientes aquáticos constituídos basicamente por água salgada (navios ou estruturas offshore), água doce com ou sem poluição (represas, coletores, etc) e água desmineralizada (trocadores de calor em estações elétricas, componentes internos do vaso de pressão do reator em usinas nucleares, etc) (PESSOA, 2007).

Diversos processos de soldagem podem ser usados na soldagem subaquática molhada: arame tubular, TIG, MIG/MAG, soldagem por fricção e eletrodo revestido, sendo este último o mais utilizado devido sua facilidade de operação e menor custo. Os primeiros ainda dependem de solução para alguns problemas que surgem na adaptação dos equipamentos ao ambiente aquático (TEICHMANN, 2000).

Uma menor velocidade de soldagem é recomendada para soldagem subaquática. Maiores aportes térmicos devem ser requeridos com aumento da profundidade. Em geral uma corrente 25% maior é requerida para soldagem subaquática se comparada ao ar livre (TSAI, 1978).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo molhado é mais simples e mais barato se comparado aos processos de soldagem subaquática secos, porém produzem soldas de menor qualidade e sua aplicação está mais voltada a reparos (MASUBUCHI, 1981). As soldas subaquáticas molhadas são atormentadas pelo rápido resfriamento gerado pela água circundante e sua susceptibilidade a fragilização por hidrogênio, além de tenderem a ter uma menor ductilidade se comparadas com soldas similares feitas ao ar livre. Além disso, a resistência a tração e ductilidade são significativamente menores quando comparada a soldagem ao ar livre, Tsai e Masubuchi (1977).

O completo entendimento do processo de soldagem subaquática molhada é relativamente limitado devido ao conjunto de previsões sobre a dinâmica das bolhas, os mecanismos de transferência de calor e as variações das condições de soldagem.

2.1.2.1 Soldagem subaquática molhada com eletrodo revestido

O processo de soldagem com eletrodos revestidos domina as pesquisas e desenvolvimentos na busca de procedimentos aplicáveis à soldagem molhada. A justificativa para tal predominância se encontra principalmente nas características operacionais demonstradas na soldagem com eletrodos revestidos na superfície: produção de soldas de boa qualidade em todas as posições de soldagem, fácil operação em campo devido a não necessidade de equipamentos sofisticados ou complexos (além de permitir a soldagem em lugares de difícil acesso) e ser um processo de soldagem aplicável mesmo em condições climáticas extremas, como baixa temperatura ou sob a ação de ventos.

A combinação destes fatores levou a uma ampla aceitação dos eletrodos revestidos para aplicação na construção de estruturas soldadas. Em função desta grande aceitação surgiu no mercado uma grande diversidade de tipos de eletrodos, abrangendo uma ampla gama de materiais de base e atendendo requisitos mecânicos e metalúrgicos para as mais variadas aplicações. Por ser o processo de soldagem que acumula o maior volume em aplicação,

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

refletindo a confiabilidade que nele se deposita, é natural que este processo desperte um grande interesse para a aplicação na soldagem submarina.

A soldagem com eletrodo revestido (SMAW) é simples e bastante versátil, Figura 2.2. O arco elétrico estabelecido entre a ponta do eletrodo revestido e o metal de base produz calor suficiente para promover a fusão do consumível e de parte da junta soldada. As partes metálica e não metálica do eletrodo são transferidos no estado líquido na forma de gotas para o metal de base onde formam a poça de fusão. As interações que determinarão a composição química final do metal de solda ocorrem durante a formação e transferência das gotas da ponta do eletrodo para a poça de fusão e também durante o resfriamento e solidificação da mesma. O processo é controlado por meio da seleção dos parâmetros de soldagem (corrente, tensão, velocidade de soldagem e ângulo do eletrodo), da composição química do revestimento, da alma e do metal de base e da temperatura da peça antes, durante e após a soldagem (PESSOA, 2007).

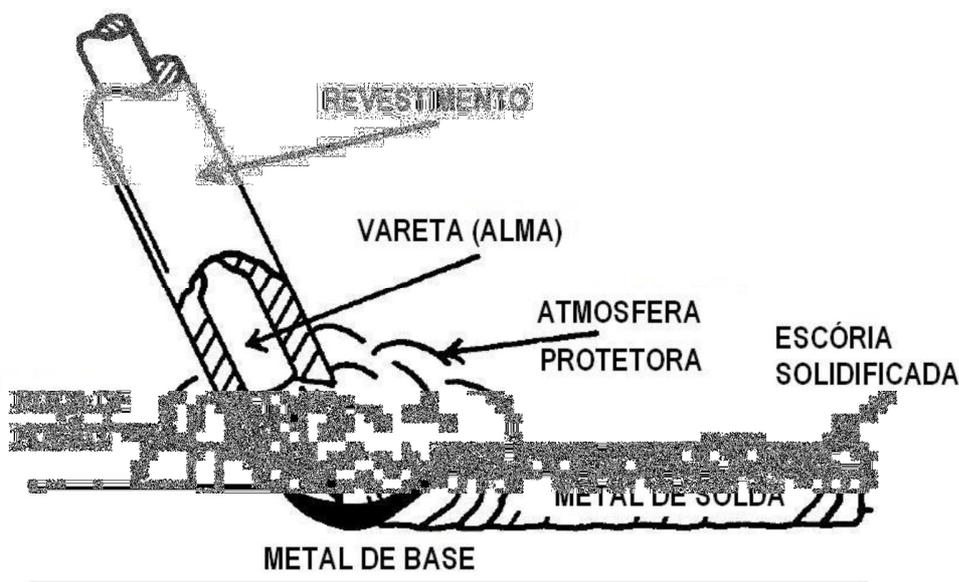


Figura 2.2 - Esquemático da soldagem SMAW

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na soldagem subaquática com eletrodos revestidos, estes devem ser a prova d'água. Todas as conexões devem ser completamente isoladas para que a água não entre em contato com as partes de metal. Caso o isolamento não seja bem feito a água fará contato com o metal condutor e parte da corrente será perdida e não será disponível para o arco elétrico. Adicionalmente, haverá uma rápida deterioração dos cabos de cobre no ponto de isolamento deficitário (JOSHI, 2011).

Durante a 1ª guerra mundial, eletrodos recobertos apenas com verniz a prova d'água foram usados na soldagem subaquática. Nos anos 1940 eletrodos revestidos à prova d'água foram desenvolvidos, melhorando a estabilidade do arco e a qualidade da solda. (MASUBUCHI, 1981). Para soldagem subaquática com eletrodos revestidos um revestimento à prova d'água juntamente com uma menor velocidade de soldagem são requeridos (TSAI e MASUBUCHI, 1977).

Atualmente, tem se investido na adição de elementos especiais ao revestimento dos eletrodos com o objetivo de melhorar as características do metal de soldas subaquáticas. Os diversos fabricantes de eletrodo formulam seu próprio revestimento de eletrodo e guardam cuidadosamente sua fórmula específica, de maneira que não se encontra na literatura uma formulação de um fluxo para o revestimento dos eletrodos a serem utilizados na soldagem subaquática molhada.

Apesar de numerosos esforços de pesquisa e desenvolvimento para melhorar as propriedades de soldas molhadas, a soldagem com eletrodos revestidos em contato direto com a água ainda apresenta problemas não resolvidos que implicam em sérias dificuldades na obtenção de juntas soldadas com qualidade estrutural plena ou semelhante à qualidade atingida em juntas soldadas nas condições atmosféricas (BRACARENSE et al, 2010).

2.2 Influência da água e os problemas na soldagem subaquática molhada

Quando comparada a outros óxidos e ingredientes presentes no revestimento do eletrodo, a água é termodinamicamente instável e se decompõe facilmente em contato com o arco elétrico produzindo hidrogênio e oxigênio (MEDEIROS, 1997 apud PESSOA, 2007). Estes átomos em conjunto com os produtos da queima do revestimento do eletrodo formam bolhas ao redor do arco elétrico, protegendo-o. Estas crescem até atingir um volume crítico, depois do qual o equilíbrio de forças hidrodinâmicas é quebrado. Quando as forças de empuxo dominam, as bolhas se destacam da região do arco elétrico movendo-se em direção à superfície onde colapsam. No momento em que a bolha se destaca do arco elétrico, uma nova bolha começa a ser formada dando continuidade ao ciclo.

Segundo Pope et al (1995), o processo de resfriamento da soldagem molhada pode ser dividido em dois regimes: resfriamento lento em altas temperaturas (enquanto está sob a proteção da bolha de gás) e resfriamento rápido em temperaturas mais baixas (após o destacamento desta bolha do arco elétrico). O tempo em que acontece o resfriamento lento é muito curto, uma vez que, ao atingir o volume crítico, a bolha se destaca e se move em direção à superfície levando a maior parte do calor e expondo imediatamente o metal parcialmente resfriado à água. A dinâmica das bolhas e a exposição do metal de solda à água são responsáveis pelas altas taxas de resfriamento observadas na soldagem molhada (TSAI e MASUBUCHI, 1977).

Para caracterização da taxa de resfriamento utiliza-se a notação ΔT_{8-5} que indica o tempo decorrido para que a temperatura caia de 800°C para 500°C. Nessa faixa de temperatura ocorre transformação de fase da austenita dos aços transformáveis que influencia diretamente na microestrutura do aço e, portanto é um indicativo da fase a ser formada, pois, dependendo desse tempo, pode se formar ferrita ou martensita (basicamente) e carbonetos. Na soldagem ao ar com eletrodo revestido, o valor de ΔT_{8-5} varia tipicamente

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

de 8 a 16 segundos, enquanto que em soldagem molhada esse valor é de 1 a 6 segundos (GRUBBS et al, 1996 apud PESSOA, 2007).

Os principais problemas apresentados na soldagem subaquática molhada têm sua origem ligada à presença da água durante o processo. A presença dos átomos de oxigênio e hidrogênio, resultantes da dissociação da água, e a alta taxa de resfriamento são as principais causas destes problemas. Em relação ao metal de solda, os seguintes problemas podem ser listados:

- Perda de elementos de liga e formação de inclusões,
- Porosidade,
- Trincas por hidrogênio (trinca a frio),
- Trincas por solidificação (trinca a quente).

Já para o metal de base, o principal problema está relacionado à formação de trincas na zona termicamente afetada (ZTA).

2.2.1 Perda de elementos de liga e formação de inclusões

A presença do ambiente aquático afeta profundamente a composição química do metal de solda. Com a decomposição da água em hidrogênio e oxigênio, elementos de liga que formam óxidos termodinamicamente estáveis irão facilmente oxidar e se transferir para a escória. A perda de desoxidantes, como magnésio e silício, aumenta com o aumento da profundidade (e conseqüentemente da pressão). O oxigênio no metal de base, entretanto, se comporta de uma maneira um pouco diferente. O aumento inicial da concentração de oxigênio com a pressão é seguido por uma perda desta influência em altas pressões (LIU et al, 1994).

A presença do carbono pode diminuir ou permanecer constante, ou aumentar para um valor constante. O aumento da presença de carbono com a pressão é atribuída à reação do

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

monóxido de carbono devido à presença de carbonato de cálcio no fluxo (SANCHEZ OSIO et al, 1993 apud LIU et al, 1994).

Não é esperado que níquel, cobre e outros metais estáveis sejam significativamente afetados. A perda de elementos de liga e ferro por oxidação (quando todos os desoxidantes são consumidos) também leva a formação excessiva de escória que frequentemente resulta em inclusão de escória e prejudica a capacidade de soldagem fora de posição (LIU et al, 1994).

2.2.2 Porosidade

A porosidade é, provavelmente, um dos principais defeitos em soldagem subaquática molhada, juntamente com a perda de elementos de liga e inclusões não-metálicas, que provoca redução dos limites de escoamento e de ruptura, da ductilidade e da tenacidade da junta soldada. Segundo Pessoa (2007), a porosidade além de variar com a profundidade, também varia segundo o tipo de revestimento usado. A natureza e quantidade de poros no metal de solda dependem de processos relacionados ao tempo que são: nucleação, crescimento, transporte e coalescência (colapso) dos poros (TREVISAN et al, 1990 apud PESSOA, 2007).

Segundo Liu et al (1994), a influência da porosidade no metal de solda é semelhante à que acontece em aços sinterizados onde a porosidade acaba provocando a redução dos limites de escoamento e de ruptura, de ductilidade e de tenacidade. Os autores afirmaram também que os principais fatores que afetam a porosidade no metal de solda são: profundidade (pressão); tipo de revestimento do eletrodo e estabilidade do arco. A porosidade é resultado do aprisionamento mecânico, supersaturação de gases dissolvidos, ou gases produzidos por reações químicas.

O resultado da porosidade final no metal de solda depende basicamente de fatores como: transferência de gases para a poça de fusão, geração de gases por reações químicas na poça

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

de fusão e quantidade de gases que escapam da poça de fusão que está ligada a variações na taxa de resfriamento do metal de solda e de propriedades da escória (ANDRADE et al, 2010).

Semelhante ao que ocorre na fundição, a formação dos poros é controlada pela solubilidade de vários gases (principalmente o hidrogênio e o oxigênio) na poça de fusão e no metal fundido, Tsai e Masubuchi (1977). Com o resfriamento, a solubilidade dos gases no metal líquido é reduzida, formando assim bolhas de gases. O resfriamento e a solidificação em soldagem subaquática são rápidos o suficiente para impedir que as bolhas escapem do metal de solda pela ação da força de empuxo. Desta forma, estas bolhas ficam retidas no metal solidificado formando os poros.

Nas gotas de metal de adição, gases, principalmente monóxido de carbono, resultante da reação do carbono com oxigênio, são absorvidos e transferidos para a poça de fusão. Conforme o metal líquido se resfria e se solidifica, estes gases são aprisionados no metal de solda, formando poros (ANDRADE et al, 2010). Pessoa (2007) relata que em soldagem subaquática molhada a formação de monóxido de carbono (CO) é mais influente na nucleação do poro, enquanto a difusão de hidrogênio é mais efetiva em promover o crescimento do poro. Assim, os gases transportados para a poça de fusão dentro das gotas metálicas podem ter uma contribuição muito importante para a porosidade final do metal de solda. O modelo que descreve a formação do poro nas gotas de metal, proposto por Pessoa (2007), é ilustrado na Figura 2.3.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

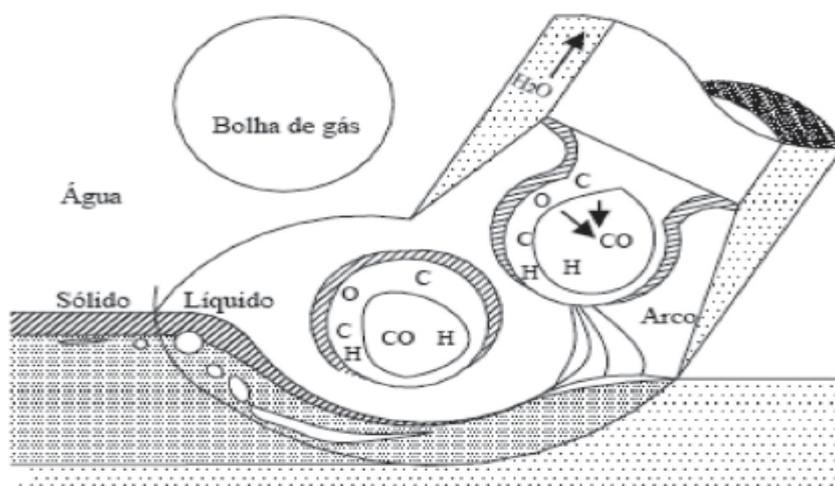


Figura 2.3 - Formação de bolhas de gás no interior da gota metálica

Fonte: Pessoa (2007)

A porosidade pode resultar pela instabilidade do arco. Com o aumento da profundidade (pressão) o arco de soldagem se torna mais constricto e instável. Este fenômeno está relacionado com a mobilidade da carga transportada pelo plasma. O aumento da tensão também leva a uma grande flutuação na tensão do arco. Como resultado, pode-se levar a porosidade e a inclusão de escória na poça de fusão.

2.2.3 Trincas por hidrogênio (trinca a frio)

A susceptibilidade para a formação de trincas a frio é o principal problema na soldagem subaquática molhada de ligas metálicas de alta resistência, Figura 2.4. O hidrogênio não irá induzir trincas a menos que a região seja dura e possua tensão residual. Alta dureza e rápido resfriamento irão dar ao metal de solda alta susceptibilidade a trincas por hidrogênio (TSAI e MASUBUCHI, 1977).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

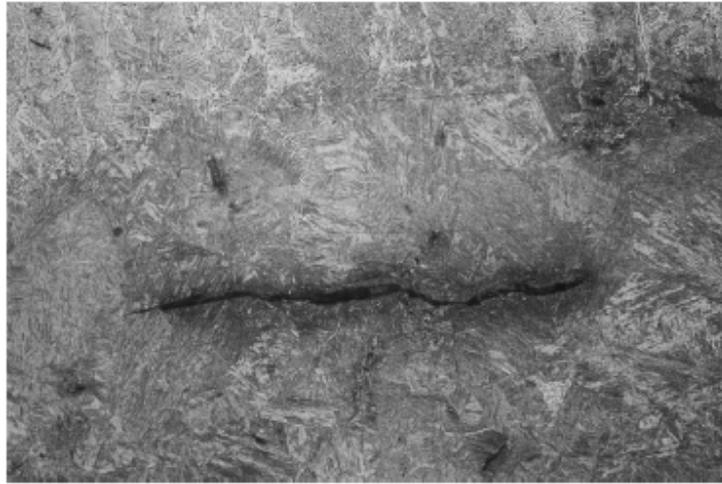


Figura 2.4 - Micrografia de uma trinca a frio em uma estrutura de bainita na ZTA (magnificação 200 x)
Fonte: Labanowski (2008)

Para se eliminar esta tendência à formação de trincas a frio, três fatores devem ser minimizados: quantidade de hidrogênio difusível, dureza da microestrutura na ZTA e o nível de tensão residual. A redução da quantidade de hidrogênio pode ser feita com o uso de consumíveis que gerem baixas quantidades de hidrogênio durante a soldagem ou pela seleção parâmetros de soldagem que minimizem a captação de hidrogênio na poça de fusão. Transformações estruturais indesejáveis na ZTA podem ser evitadas pelo controle da taxa de resfriamento da solda através do uso de isolamento sobre a superfície da placa soldada e aplicação de calor. (LABNOWSKI, 2008).

A elevada velocidade de resfriamento resultante da ação refrigerante da água durante a soldagem impõe algumas características microestruturais à ZTA do metal de base. Estas características se constituem em importantes barreiras à obtenção de soldas de ótima qualidade. São geradas na ZTA microestruturas de elevada dureza que apresentam baixa tenacidade e estabelecem variações abruptas de dureza entre metal de solda e ZTA, diminuindo sua ductilidade. A conjunção dos fatores mencionados, notadamente a elevada dureza na ZTA e a elevada quantidade de hidrogênio difusível (H_{dif}) no metal de solda, pode levar à formação de trincas por hidrogênio (BRACARENSE et al, 2010).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2.4 Processo de solidificação e trincas a quente

O modelo de transferência de calor na soldagem subaquática molhada é diferente da soldagem ao ar. A dinâmica das bolhas durante a soldagem subaquática molhada induz um fluxo de água ao redor do arco de soldagem. Esse fluxo de água, junto com a agitação das bolhas transporta rapidamente o calor do material de base e causam um rápido resfriamento. Fukuoka (1993) comparou o resfriamento entre soldas realizadas no ambiente aquático com soldas realizadas ao ar livre encontrando os resultados mostrados na Figura 2.5.

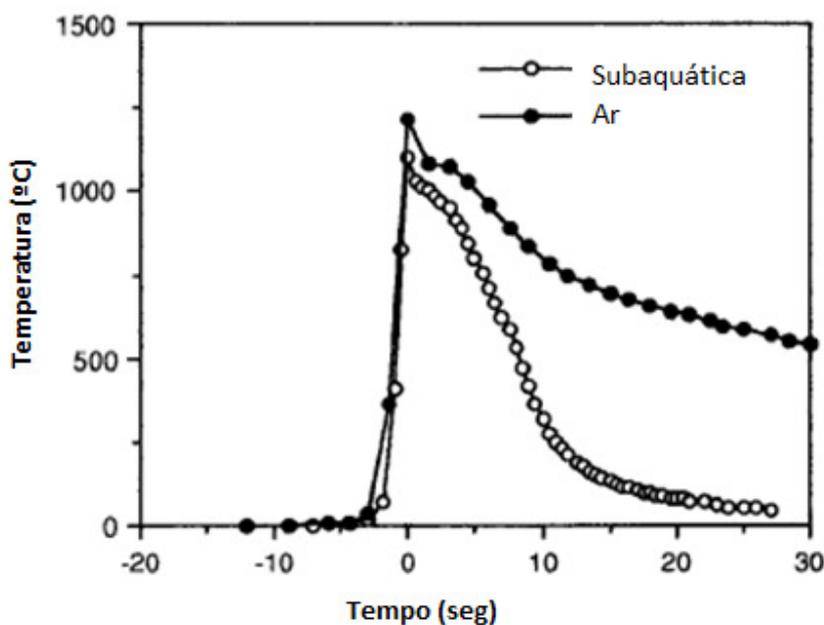


Figura 2.5 - Curvas de resfriamento

Fonte: Fukuoka (1993)

Na soldagem atmosférica, grande parte do calor dissipado ocorre por condução através do metal sólido, sendo somente uma pequena porção de calor perdida por convecção. As condições de transmissão de calor no caso da soldagem molhada são significativamente diferentes, como pode ser observado na Figura 2.6. Devido a temperatura de vaporização da

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

água ser significativamente menor do que a temperatura de solidificação do metal, o arco e a poça de fusão estão sempre dentro da bolha de vapor d'água (POPE et al, 1995).

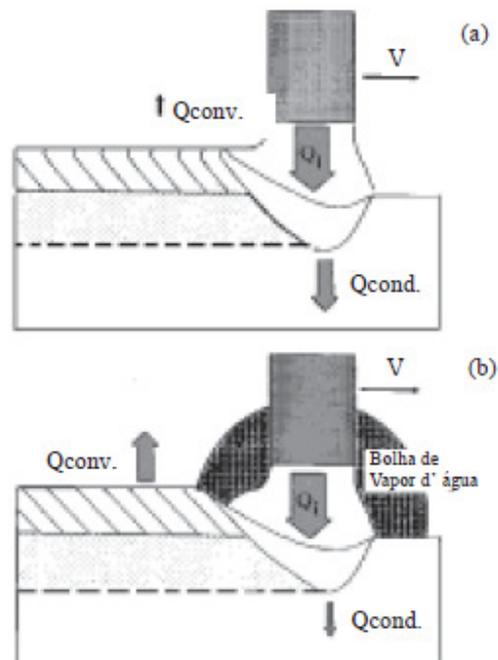


Figura 2.6 - Desenho esquemático mostrando a transmissão de calor na soldagem sob condição atmosférica (a) e na condição subaquática (b).

Fonte: Pope et al (1995)

O evento mais importante durante a solidificação é o início do crescimento dos grãos no metal de base e sabe-se que este metal de solda irá se solidificar epitaxialmente. No crescimento epitaxial, a solidificação começa no metal de base enquanto a temperatura diminui. Cada grão se forma como a continuação do grão do metal de base localizado na interface sólido/líquido e cresce perpendicularmente às isotermas. Para manter a continuidade do crescimento com o movimento da fonte de calor, os grãos de solidificação necessitam mudar de direção de acordo com a Equação 2.1:

$$R = v \times \cos\theta \quad (2.1)$$

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

onde R representa a taxa de solidificação de grão, v velocidade de soldagem e θ o ângulo entre a tangente da interface sólido/líquido e direção de soldagem. Os grãos continuam a crescer de maneira colunar até começarem a competir uns com os outros. Esta competição ocorre porque o gradiente térmico da poça de fusão se afasta dos grãos de solidificação e eles devem mudar sua direção de solidificação para se manter perpendiculares às isotermais (BRACARENSE, 1997), Figura 2.7.

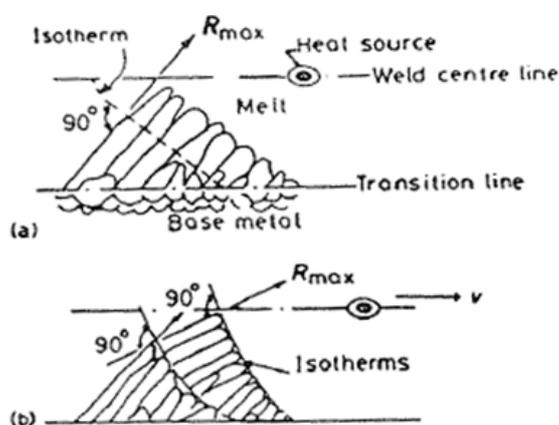


Figura 2.7 – Crescimento de grão de acordo com os gradientes de temperatura da poça de fusão
Fonte: Easterling (1991) apud Bracarense (1997)

A presença da bolha de vapor na soldagem subaquática molhada modifica as condições do fluxo de calor resultando em uma menor contribuição da condução de calor no metal de base e uma menor velocidade de solidificação. Com o destacamento da bolha de vapor atrás do arco elétrico, o metal de solda (em solidificação ou já solidificado) é exposto a uma rápida têmpera no meio aquoso.

Enquanto o metal depositado encontra-se dentro da bolha de vapor de água gerada pelo arco elétrico, a perda de calor ocorre de forma semelhante àquela na soldagem atmosférica. No entanto, à medida que o arco avança, o metal de solda passa a ficar em contato direto com o meio aquoso, fazendo com que a perda de calor passe a ser predominantemente por convecção. A elevada quantidade de calor, que passa a ser dissipada por convecção, altera o formato da poça de fusão, fazendo com que esta adquira a forma de gota alongada,

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

aumentando, portanto, a sua susceptibilidade à fissuração a quente. As tensões residuais originadas no ciclo térmico de soldagem são função do grau de restrição oferecido pela junta soldada, sendo a magnitude dessas tensões crescente com o aumento do resfriamento da junta soldada (FILHO et al, 2004).

Para solidificação de poças de fusão em formato de gota, o crescimento de grãos ocorre em uma orientação preferencial. Neste caso apenas alguns grãos, aqueles favoravelmente orientados, serão capazes de crescer. Consequentemente uma estrutura grosseira é produzida. (POPE, 1995).

É sabido que grãos colunares grosseiros são mais susceptíveis a trincas de solidificação, assim, cuidados especiais no controle de impurezas dos consumíveis para soldagem subaquática devem ser tomados (POPE et al, 1995).

Trincas devido ao rápido resfriamento gerado na soldagem subaquática podem ser reduzidas de várias maneiras. O desenvolvimento de um eletrodo revestido melhorado que atenda os requisitos da soldagem subaquática molhada e a eliminação das condições úmidas ao redor do arco elétrico através de alguma proteção, são exemplos de como esta pode ser feita.

2.3 Dinâmica das bolhas na soldagem subaquática

A formação e destacamento das bolhas é um processo contínuo e intermitente na soldagem subaquática molhada. A energia do arco é intensa e a água circundante ao arco se vaporiza imediatamente formando uma bolha relativamente estável. A queima contínua do revestimento do eletrodo, a decomposição da água em hidrogênio e oxigênio pelo arco elétrico e a vaporização da água circundante, levam ao crescimento da bolha. A bolha cresce continuamente até seu raio tornar tangente ao seu ponto inicial de formação, no qual a bolha se descola e uma nova começa a se formar. O arco elétrico, assim, é sempre protegido pela bolha durante a soldagem subaquática (TSAI e MASUBUHI, 1979).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tamanho da bolha gerada pelo arco é diretamente influenciado pelo calor gerado por ele durante o processo de soldagem subaquática. Maior aporte térmico é usualmente requerido para gerar bolhas maiores e em menor frequência para proteger o arco do meio aquoso, assim a taxa de resfriamento é reduzida (TSAI e MASUBUCHI, 1979).

O descolamento das bolhas carrega consigo muito calor da superfície do metal, causando o efeito de rápido resfriamento durante o processo de soldagem subaquática molhada, Tsai e Masubuchi (1977).

Para prever o fenômeno das bolhas matematicamente, Tsai e Masubuchi (1977), propuseram um modelo idealizado para o crescimento e formação das bolhas em um orifício em uma placa, que segundo observado era bastante semelhante ao ocorrido na soldagem. Estes autores assumiram que o crescimento começa em um ponto inicial logo acima da placa e que o gás se comporta idealmente, além de considerar somente o balanço das forças de empuxo e forças inerciais para o modelo. Segundo os mesmos, o elevado fluxo tornou possível negligenciar a tensão superficial. A Figura 2.8 mostra o modelo idealizado de crescimento da bolha. Este modelo será descrito a seguir.

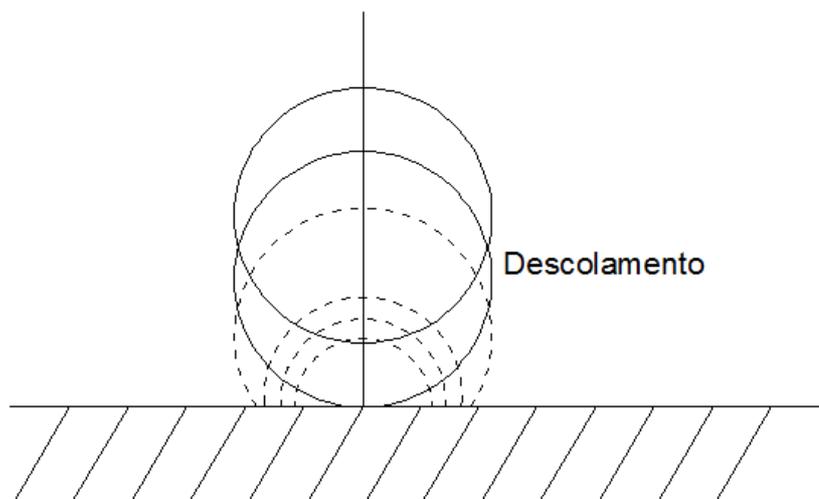


Figura 2.8 - Crescimento idealizado da bolha

Fonte: Tsai e Masubuchi (1977)

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O volume de uma única bolha em um dado momento pode ser escrito em termos da massa ou taxa de volume:

$$\nabla = G \cdot t = \frac{mv \cdot R_g \cdot T}{P} \quad (2.2)$$

onde:

∇ = volume de uma bolha

G = taxa de volume

mv = massa de vapor de uma bolha

t = tempo

P = pressão

R_g = Constante do gás

T = Temperatura

Usando um modelo para a equação da massa aparente de uma esfera se movendo perpendicular a uma parede e equacionando as forças inercias e de empuxo, Tsai e Masubuchi (1977) chegaram a um valor para a altura da bolha h , Figura 2.9, conforme equação 2.3.

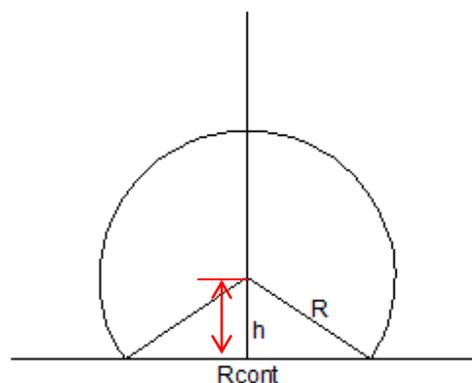


Figura 2.9 - Altura da bolha

Fonte: Tsai e Masubuchi (1977)

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

$$h = \frac{4}{11} \cdot g \cdot t^2 \quad (2.3)$$

onde g é a aceleração da gravidade.

Segundo Tsai e Masubuchi (1977), o descolamento das bolhas ocorre quando a bolha torna-se tangente ao ponto inicial de sua formação ou quando sua altura é igual ao seu raio mais o raio do orifício que lhe deu origem (R_0). A altura crítica (h_{\max}), raio máximo (r_{\max}) e tempo para partida pode ser determinado graficamente plotando a altura da bolha pelo raio da bolha mais o raio do orifício e determinando o ponto onde estas se interceptam. O raio da bolha pode ser escrito em termos da taxa do volume:

$$R = \left(\frac{3}{4} \cdot G \cdot t \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.4)$$

e

$$h_{\max} = R_{\max} + R_0 \quad (2.5)$$

Em geral, a taxa do volume de vapor é diretamente proporcional ao calor absorvido pelo arco e as condições do meio:

$$G = \frac{Q \cdot R \cdot T}{h_{lg} \cdot P} \quad (2.6)$$

onde Q é o fluxo de calor absorvido e h_{lg} é o calor latente da água.

Pode ser assumido que a taxa de volume varia com a pressão e as outras variáveis da equação 2.6 permanecem constantes no processo de soldagem subaquática molhada. O tamanho das bolhas em várias profundidades pode ser determinado. Pode também ser assumido que o máximo raio de contato (R_{cont} - Figura 2.9) determina a região onde há a formação das bolhas e cobre toda esta área.

$$R_{cont} = (R^2 - h^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

Com o desenvolvimento das equações acima, Tsai e Masubuchi (1977) encontraram valores para o raio de contato da bolha pelo tempo, raio máximo da bolha e frequência de descolamento das bolhas para os eletrodos E6013 e E7014. Para os valores de frequência de destacamento das bolhas chegaram a uma taxa de 15 bolhas/segundo para o eletrodo E6013 e 14 bolhas/segundo para o eletrodo E7014. Neste mesmo trabalho os autores também fizeram a análise da formação das bolhas através da filmagem em alta velocidade da soldagem, chegando a uma taxa de destacamento de 13 bolhas/segundo para ambos os eletrodos, valores bem próximos aos calculados pelo modelo matemático.

2.4 O arco elétrico na soldagem subaquática molhada

Segundo Villani et al (2007), a coluna de plasma compreende praticamente todo o volume do arco elétrico, sendo constituída por partículas neutras (moléculas e átomos), íons e elétrons livres. Para a formação do plasma, o gás do arco deve ser aquecido a temperaturas elevadas para como resultado da agitação térmica, ocorrerem choques entre os seus constituintes e a sua ionização. À medida que a temperatura de um gás é elevada, a energia de suas moléculas aumenta, estando este aumento ligado principalmente com o movimento de vibração das moléculas. Em temperaturas elevadas, a energia vibracional de moléculas poliatômicas torna-se suficiente para causar a sua ruptura ou dissociação em átomos. Em temperaturas ainda maiores, mais elétrons podem ser expulsos, tendo-se a ionização múltipla.

Na soldagem molhada, o arco elétrico se forma em meio a bolhas de vapor, compostas por átomos de hidrogênio e oxigênio dissociados e gases provenientes da vaporização do metal e queima do revestimento do eletrodo. Por se formar neste ambiente, a estabilidade do arco e o processo de transferência passam a ser diretamente influenciadas pela dinâmica de formação e destacamento destas bolhas. Se durante a soldagem as bolhas se mantiverem envolvendo o arco, o processo de transferência tende a se manter estável. Entretanto, se

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ocorrer o desprendimento das bolhas, o arco extingue e cria uma situação de instabilidade no processo de transferência. A ocorrência do desprendimento das bolhas pode se dar, tanto durante o período de arco, quanto em períodos de extinção do arco, como por exemplo, durante um curto circuito (TEICHMANN, 2000). Considerando a natureza das extinções, Pokhonya (1989 apud TEICHMANN, 2000), identificou dois tipos de curtos-circuitos na soldagem molhada com eletrodos tubulares. O primeiro denominado de curto-circuito normal, ocorre pelo contato da gota, ainda presa no eletrodo, na poça de fusão. O segundo tipo de curto-circuito, classificado como anormal, se dá a partir do desprendimento das bolhas de vapor em meio a um período de arco.

A ocorrência destes curtos-circuitos classificados como anormais sugere que as instabilidades na transferência não estão relacionadas somente com o ajuste das variáveis do processo, mas também com o aparecimento de uma perturbação de caráter, a princípio, aleatório. Assim, um regime de transferência regular pode ser levado a uma situação de instabilidade devido ao destacamento das bolhas que se formam em torno do arco elétrico. Estudos anteriores formularam um modelo matemático idealizado para prever o processo de destacamento das bolhas, Tsai e Masubuchi (1977), porém ainda pouco se conhece sobre o exato mecanismo de formação, destacamento e colapso das bolhas. Desta forma, adicionando-se a existência de um elemento ativo como o arco voltaico, pode-se assumir que o processo de destacamento possui um caráter aleatório, ou, pelo menos, não controlável.

Em geral, a tensão necessária para abrir o arco é maior que a tensão necessária para mantê-lo. A corrente aumenta com a diminuição da tensão, após o arco ser estabelecido. O diâmetro do arco aumenta levemente com a corrente e diminui com o aumento da profundidade. Segundo Alivov (1959 apud TSAI e MASUBUCHI, 1977), a tensão é usualmente maior na soldagem subaquática devido aos seguintes fatores:

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1) Com o aumento da profundidade, o diâmetro do arco diminui e, desde que menos corrente está disponível, a tensão aumenta para manter o mesmo aporte térmico durante o processo;

2) Devido ao rápido resfriamento, mais calor é dissipado para a água circundante e maior aporte é necessário. Assim maior tensão é necessária;

3) A presença de hidrogênio na região do arco aumenta a resistência elétrica, necessitando assim maior tensão.

Na soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos é importante estabelecer formas e parâmetros empíricos para se verificar e estabelecer técnicas adequadas para realização da solda no decorrer de sua operação. Na soldagem subaquática molhada, em função da baixa visibilidade, a sensibilidade ao tato e audição assume grande importância para que o soldador/mergulhador saiba se o cordão está sendo depositado como desejado (MAZZAFERRO, 1998 apud PESSOA, 2007).

Quando realizado com dispositivos mecanizados, a estabilidade do arco na soldagem pode ser avaliada por meio da análise dos oscilogramas de tensão e corrente. Estes expressam os valores desses parâmetros de soldagem em função do tempo, permitindo a análise do comportamento dos mesmos. Sabe-se que a variação da tensão durante a soldagem depende do comprimento do arco, diminuindo com a redução do comprimento do arco e aumentando com o aumento do comprimento de arco.

Em soldas molhadas, foi relatado que a estabilidade depende do diâmetro do eletrodo, sendo que os eletrodos com menor diâmetro são mais estáveis que os de maior diâmetro. Isso ocorre devido à menor densidade de corrente para os eletrodos com menor diâmetro que promove uma melhor “rigidez” (diferença entre as taxas de fusão da alma e do revestimento do eletrodo) do arco elétrico (LIU et al, 1994).

Vários critérios para caracterização da estabilidade do arco em corrente constante têm sido propostos. Esses critérios estabelecem índices de aferição da estabilidade baseados na

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

avaliação dos valores instantâneos dos parâmetros de soldagem, (MAZZAFERRO, 1998 apud PESSOA, 2007):

- I_{rms} → Raiz quadrada da média aritmética dos quadrados da corrente instantânea de soldagem.
- U_{rms} → Raiz quadrada da média aritmética dos quadrados da tensão instantânea do arco elétrico.
- I_{1m} → Corrente média de reignição do arco.
- U_{1m} → Tensão média de reignição do arco.

Um critério simples foi definido por (MADATOV, 1962 apud BRACARENSE et al, 2010). A estabilidade do arco pode ser definida como o valor máximo da corrente dividido pelo seu valor mínimo, conforme Equação 2.8:

$$S = \frac{I_{max}}{I_{min}} \quad (2.8)$$

Onde S é a estabilidade do arco, I_{max} é o valor máximo da corrente e I_{min} é o valor mínimo da corrente. Para uma boa estabilidade de arco os valores de S devem ser o mais próximo possível de 1,0. Valores de S muito maiores que 1,0 indicam arco instável.

Durante a soldagem, pequenas gotas são liberadas continuamente da ponta do eletrodo e são transferidas para a poça de fusão. Como as gotas crescem ligadas à ponta do eletrodo, o comprimento do arco e, conseqüentemente a tensão, diminuem. Quando ocorre um curto-circuito, a tensão assume um valor mínimo e a corrente um valor máximo. A avaliação dos valores instantâneos dos parâmetros de soldagem (tensão e corrente) permite definir e controlar os modos de transferência metálica e a estabilidade do arco. Esses fatores estão diretamente relacionados com a qualidade do metal depositado. Quanto mais estável um arco, mais facilmente e uniformemente se dá a transferência metálica do eletrodo para a peça (PESSOA, 2007).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na soldagem com eletrodo revestido, a ponta deste se funde sob a ação do arco e se transfere para a poça de fusão. Esta transferência é de suma importância, pois a maneira como esta ocorre influencia várias características do processo de soldagem tais como estabilidade do arco, quantidade de respingos, regularidade e qualidade do cordão de solda, e velocidade de soldagem.

O instituto internacional de soldagem (IIW) classificou os modos de transferência metálica em três grupos: transferência por “vôo livre”, por contato e guiado pela escória. Essa classificação relacionada com alguns processos pode ser vista na Tabela 2.1. Os modos de transferência mais comumente observados na soldagem por eletrodo revestido são globular/explosão, curto-circuito e protegido pela escória (BRANDI et al, 1991 apud PESSOA, 2007)

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 2.1 - Classificação dos modos de transferência Metálica de acordo com o IIW

Designação do modo de transferência metálica.		Exemplo de processo de soldagem.	
Transferência em voo livre	Transferência Globular	Transferência por gotas	MIG/MAG com densidade de corrente baixa
		Transferência por repulsão	MAG com 100%CO ₂
	Transferência por pulverização	Transferência por projeção	MIG com Ar e MAG com Ar e até 15% CO ₂ ou 5% de O ₂
		Transferência por pulverização axial.	MIG/MAG com densidade de corrente maior
		Transferência por pulverização rotacional	MIG/MAG com densidade de corrente elevada, MIG plasma
	Transferência por explosão		Eletrodo revestido, MAG com CO
Transferência por contato	Transferência por curto-circuito		MAG com arco curto
	Transferência por contato ininterrupto		Soldagem com adição de metal (TIG)
Transferência guiada pela escória	Transferência guiada pela parede		Soldagem com arco submerso
	Outros modos		Eletrodo revestido, eletrodo tubular.

Fonte: (IIW, 1977 apud PESSOA, 2007)

Diferentes técnicas têm sido usadas para determinar o modo de transferência metálica no metal de solda. As variações dos valores de corrente e tensão podem ser gravadas por meio de um sistema de aquisição de dados que, depois de processados através de técnicas como a transformada rápida de Fourier, desvio padrão da tensão ou corrente no tempo e taxas de picos (ASM HANDBOOK, 1993 apud PESSOA, 2007) podem ser relacionados ao tamanho das gotas na transferência metálica.

3 METODOLOGIA

Com o objetivo de melhor entender e tentar correlacionar o fenômeno de crescimento, destacamento, colapso e frequência das bolhas, os sinais elétricos ao longo do processo de soldagem e as formas de solidificação do metal de solda este trabalho foi desenvolvido. Foram feitos cordões sobre chapa em ambiente subaquático com eletrodos revestidos de diferentes tipos e feita a aquisição dos sinais elétricos e filmagem em alta velocidade do processo de soldagem.

3.1 Materiais

3.1.1 Corpo de prova

Foram utilizadas chapas de aço ASTM A-36 cuja composição química pode ser vista na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composição química do aço ASTM A-36

Elemento (%)	ASTM A-36
C	0,180
Si	0,208
Mn	0,810
P	0,014
S	0,0083
Al	0,026
Cu	0,007
Ni	0,007
Cr	0,017
Mo	0,001
V	0,0009
Nb	0,0009
N	0,0028
Sn	0,001
Ti	0,001
B	0,0003

Fonte – Certificado de Qualidade Arcelor Mittal Tubarão

METODOLOGIA

Os corpos de prova para deposição dos cordões sobre chapa possuíam 8,0 mm de espessura 40 mm de largura e 150 mm de comprimento, conforme mostra Figura 3.1.

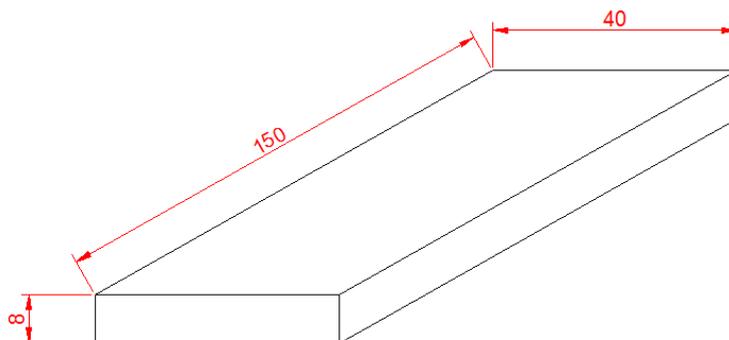


Figura 3.1 - Corpo de prova (dimensões em mm)

3.1.2 Consumível

Como consumível foram utilizados eletrodos revestidos comerciais E6013 (rutílico), E7024 (rutílico com pó de ferro) e E7018 (básico), todos com 3,25 mm de diâmetro de alma. Os eletrodos E6013 e E7018 possuíam 350 mm de comprimento enquanto o eletrodo E7024 possuía 450 mm de comprimento.

Os eletrodos foram submetidos a um processo de proteção para evitar sua decomposição durante a soldagem molhada, sendo recobertos com verniz vinílico cuja composição básica é resina vinílica e solventes.

3.1.3 Tipo de água utilizada

Todas as soldas foram realizadas em água doce à temperatura ambiente que era substituída após a realização de duas ou três soldas.

METODOLOGIA

3.2 Equipamentos**3.2.1 Aquário de soldagem**

Para realização do processo de soldagem subaquática foi utilizado o aquário mostrado na Figura 3.2.

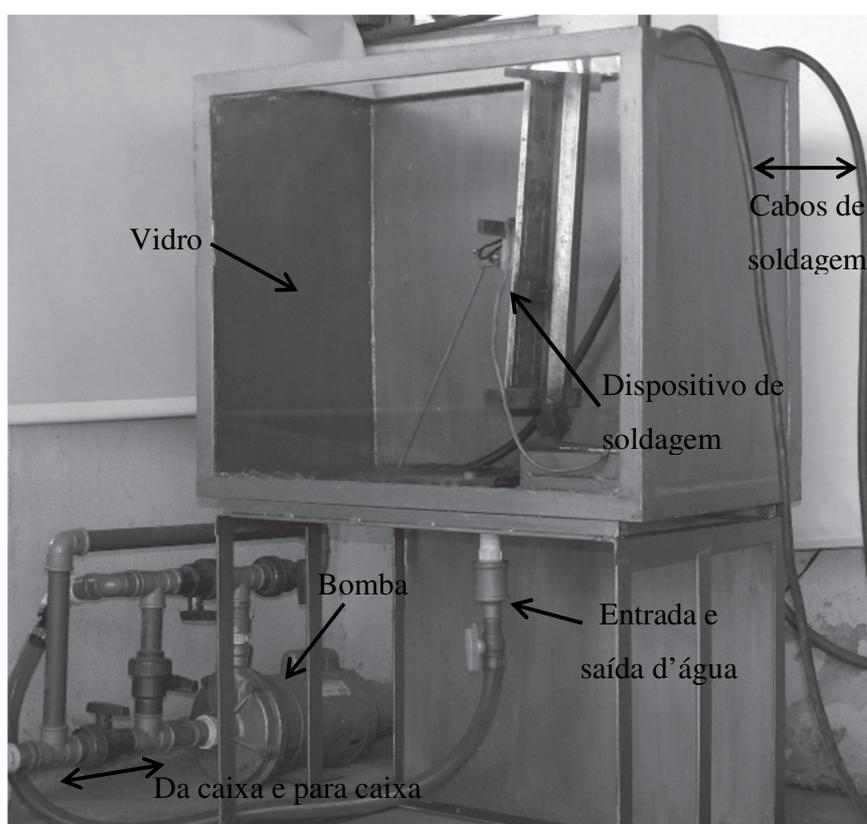


Figura 3.2 – Aquário de soldagem

Este tanque possui as dimensões de 76,5 cm de comprimento, 40,0 cm de largura e 60,0 cm de altura.

METODOLOGIA

3.2.2 Dispositivo de Soldagem por gravidade

As soldas foram realizadas com o auxílio de um dispositivo mecanizado por gravidade para soldagem com eletrodos revestidos, Figura 3.3.

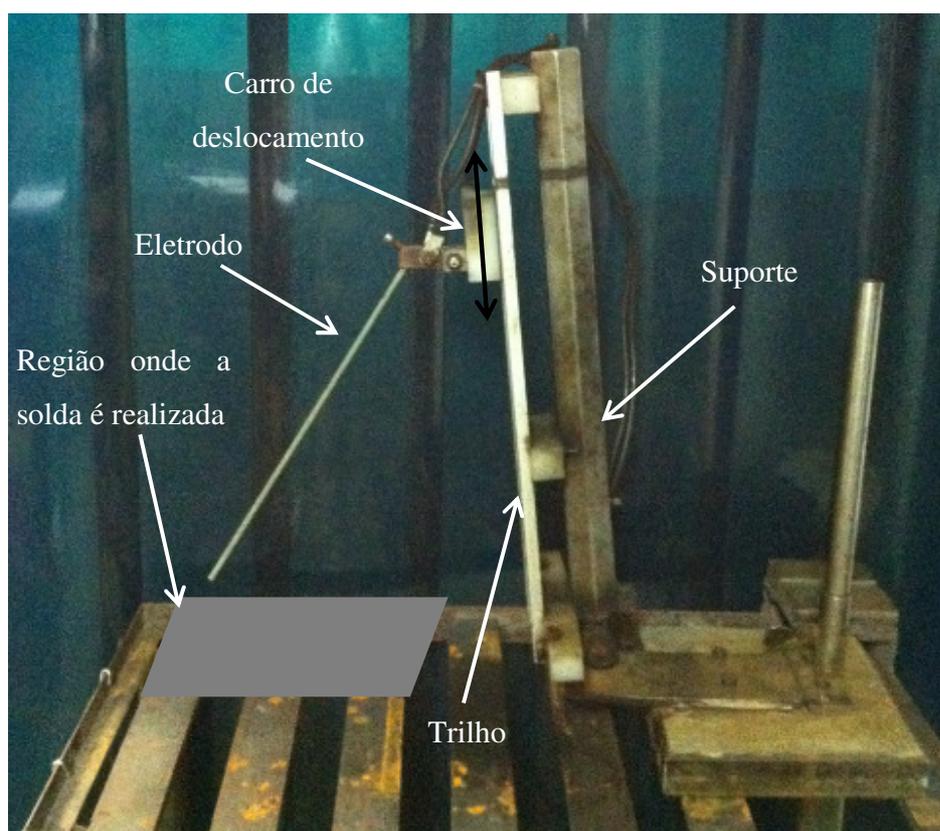


Figura 3.3 - Dispositivo de soldagem por gravidade na posição plana

Este dispositivo permite o uso de eletrodos com diâmetro de 2,5 a 6,0 mm e comprimento de até 450 mm. A velocidade de soldagem é variável em função da taxa de fusão do eletrodo e da abertura do ângulo de ataque do eletrodo (θ), conforme visto na Figura 3.4. Este ângulo e a taxa de fusão do eletrodo determinam a velocidade de descida do eletrodo. A regulagem de θ foi feita com o auxílio de um transferidor.

METODOLOGIA

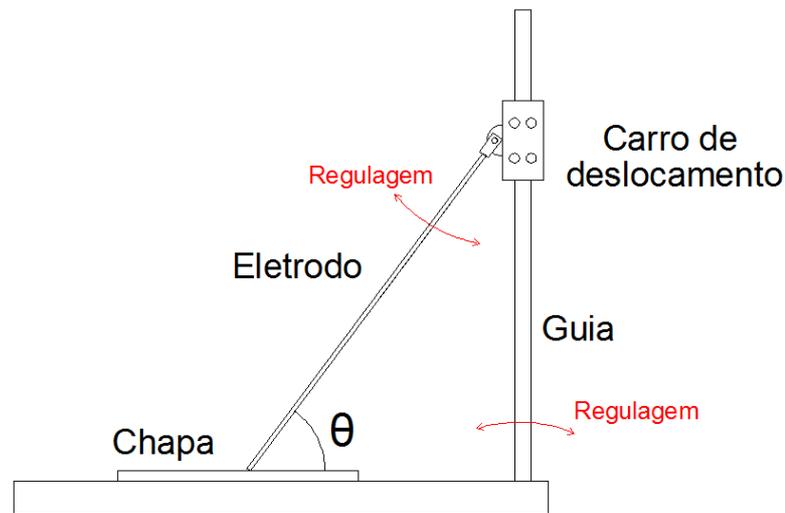


Figura 3.4 - Esquema do dispositivo de soldagem

Como este é um dispositivo que utiliza a gravidade para seu funcionamento ele apresenta boa repetibilidade. Mantidos fixos o ângulo θ e a taxa de fusão (corrente e tensão fixos), é possível fazer cordões de solda com grande semelhança. Para cada configuração de ângulo θ existem valores ótimos de taxa de fusão que permitem o equilíbrio entre as velocidades de soldagem e de mergulho do eletrodo de modo que se tenha um comprimento de arco praticamente constante.

3.2.3 Fonte de soldagem

Foi utilizada uma fonte de soldagem eletrônica – LINCON ELECTRIC, modelo POWER WAVE 450. Esta fonte tem como tensão de circuito aberto de 75 V e faixa de corrente para eletrodos revestidos de 30 a 450 A.

3.2.4 Sistema de aquisição de dados

Para o sistema de aquisição foi utilizada um módulo de 16 canais da marca Data Translator modelo DT-9816 devidamente calibrada, que se comunica com o computador através de uma porta USB. A monitoração foi realizada com uma taxa de aquisição de 1.000 leituras

METODOLOGIA

por segundo. A Figura 3.5 mostra um esquema do sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho.

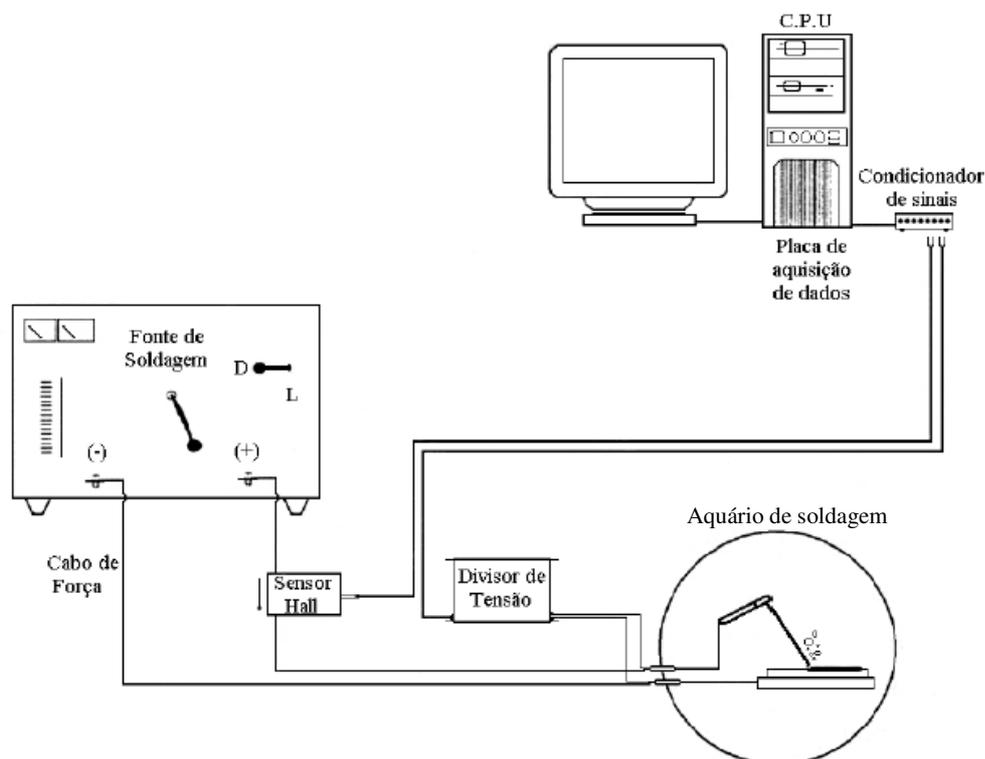


Figura 3.5 - Esquema do sistema de aquisição utilizado

Para a monitoração da corrente de soldagem e da tensão do arco foi utilizado um condicionador de sinais. Este equipamento foi projetado para minimizar ruídos e dividir por 10 os sinais da corrente e da tensão, medidos, respectivamente, por um sensor Hall com capacidade de 500 A e sinal de saída de 5 V, e pela diferença de potencial dos pólos positivo e negativo da máquina de solda.

3.2.5 Câmera de alta velocidade

Para filmagem em alta velocidade do processo de soldagem foi utilizada uma câmera OLYMPUS modelo ENCORE MAC-8000S, Figura 3.6. Esta câmera pode armazenar uma

METODOLOGIA

sequência de imagens de vídeo de um evento a uma taxa de 60 a 8.000 quadros por segundo. O sistema armazena essas imagens em uma memória interna da unidade de controle. Essas imagens podem ser visualizadas no sentido normal ou reverso nas taxas de 1 a 8.000 quadros por segundo. O sistema ENCORE MAC transmite e recebe vídeo NTSC e PAL permitindo que as imagens sejam gravadas em uma fita de vídeo ou no computador.

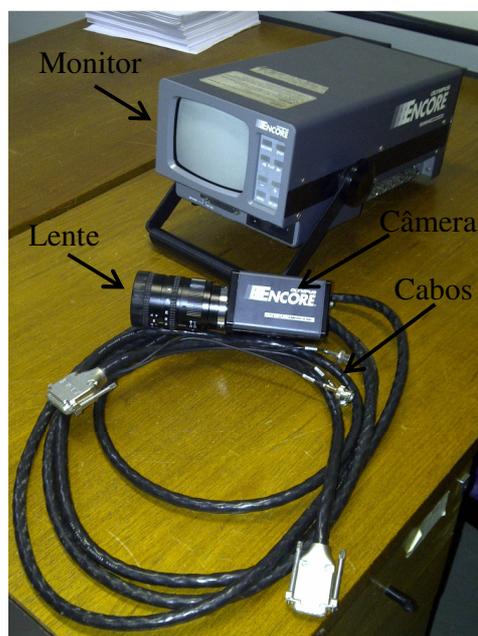


Figura 3.6 - Câmera Olympus ENCORE MAC-8000S

3.3 Procedimento Experimental

Foi realizada a filmagem em alta velocidade da soldagem subaquática de cordões sobre chapa e feita a aquisição dos sinais elétricos para três tipos de eletrodos. Com os vídeos de alta velocidade pode-se verificar a dinâmica das bolhas e fazer a contagem do número de bolhas formadas por segundo de cada teste. Com os sinais elétricos de tensão e corrente pode-se verificar o comportamento dos mesmos no decorrer do processo. Através da análise metalográfica dos corpos de prova tentou-se verificar a existência de algum padrão em relação a solidificação do metal de solda.

METODOLOGIA

Os valores de corrente e o ângulo de ataque foram selecionados baseados em trabalhos e experimentos prévios a este. Estabeleceu-se, portanto, uma corrente e ângulo de ataque (θ) fixos para os três tipos de eletrodos utilizados. Definiu-se uma corrente de 160 A e um ângulo de ataque de 60°. Como foi utilizado um equipamento de corrente constante obteve-se uma tensão variável em torno de 30 V. Todas as soldas foram feitas a uma profundidade de 0,5 m com a água em temperatura ambiente e em polaridade direta (DCEN), pólo negativo no eletrodo.

Segundo Tsai e Masubuchi (1977), o destacamento das bolhas acontece a uma taxa de 13 bolhas/segundo, ou uma bolha a cada 0,077 segundos. Assim, definiu-se para a filmagem uma taxa de 250 quadros/segundo (frames/sec), taxa que pode ser considerada superior à necessária para se filmar o crescimento, destacamento e colapso das bolhas. De acordo com as especificações da câmera, com uma taxa de 250 quadros/segundo pode-se realizar a filmagem de até 8,2 segundos.

A câmera foi posicionada a 2,0 m de distância do tanque de soldagem, ideal para se obter o melhor foco de acordo com sua lente. Na Figura 3.7 é vista uma foto da montagem do experimento.

METODOLOGIA

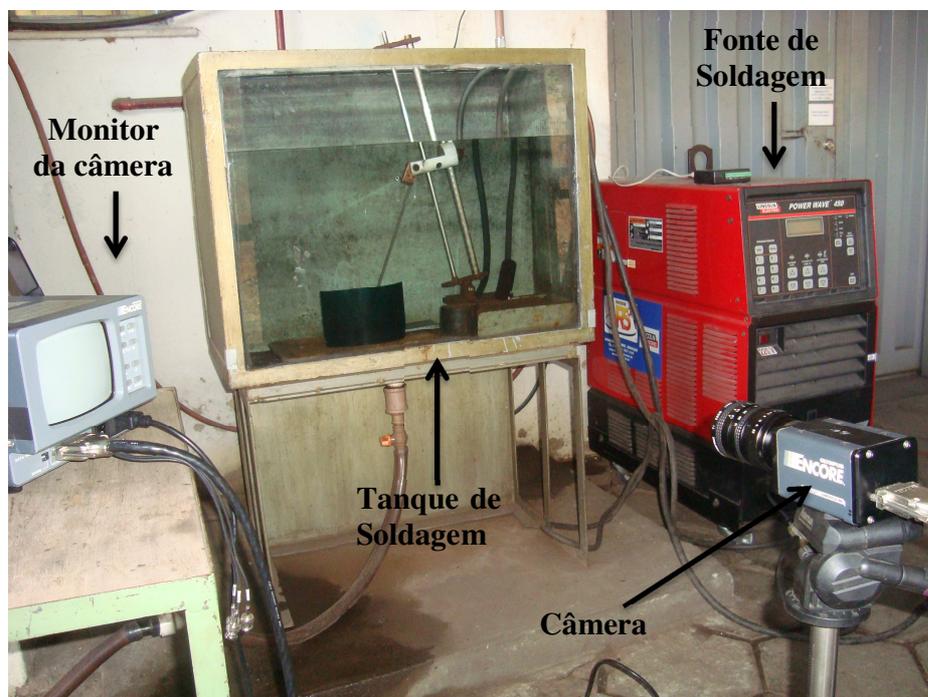


Figura 3.7 - Foto da montagem do experimento

Como o processo de soldagem emite muita luminosidade foram realizados vários testes preliminares para se obter a melhor qualidade das imagens gravadas. Variou-se alguns dos parâmetros mais influentes à qualidade da imagem gravada: shutter speed e trigger point (relativos a câmera), abertura do obturador e a utilização ou não (e quais tipos), de lentes de soldagem.

A Figura 3.8 mostra uma foto da montagem do aparato para realização do processo de soldagem dentro do tanque. Para se obter uma referência fixa ao longo do cordão de solda que poderia ser visualizada nos vídeos, em cada chapa de aço foi feita uma marcação do ponto exato onde se faria a abertura do arco elétrico. Posicionou-se então uma régua com sua origem neste ponto, longitudinalmente ao cordão de solda que seria realizado, Figura 3.9. Desta forma conseguiu-se obter nos vídeos uma escala no corpo de prova e localizar nos vídeos o início e o fim das gravações, além da região aproximada onde ocorreram os destacamentos das bolhas ao longo do cordão.

METODOLOGIA

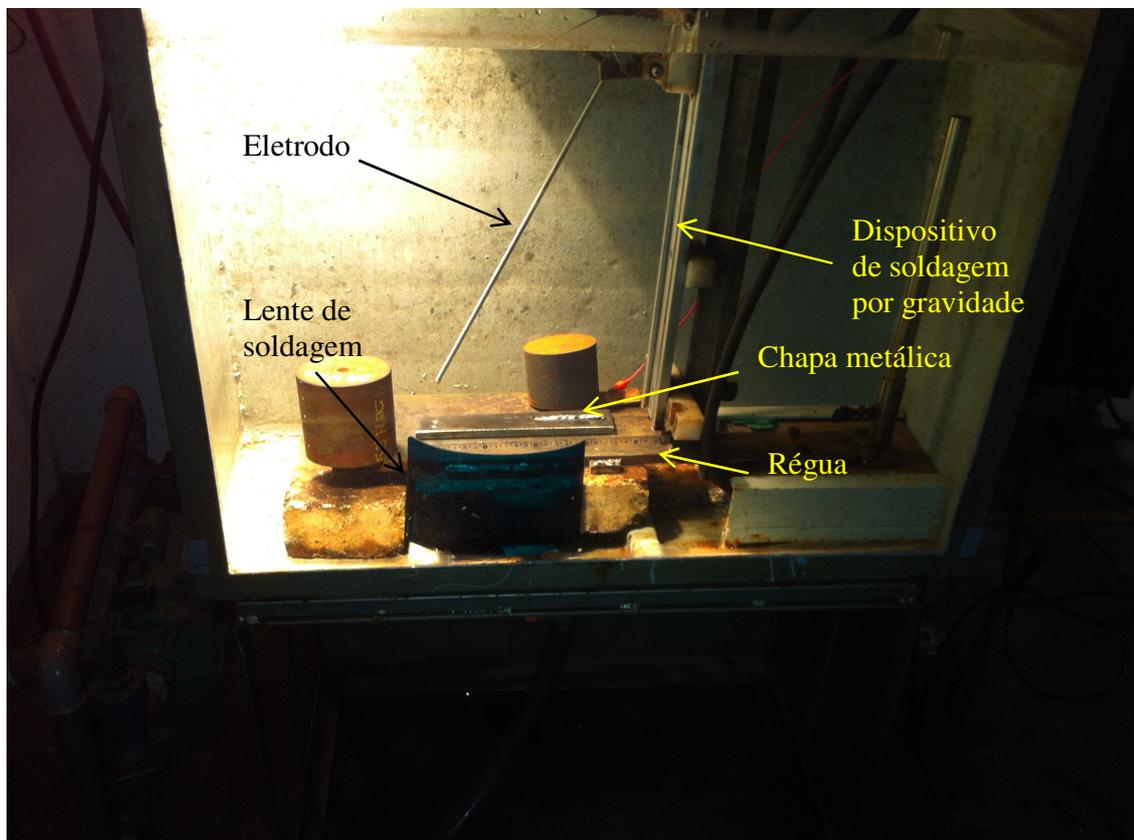


Figura 3.8 - Foto da montagem dentro do tanque de soldagem

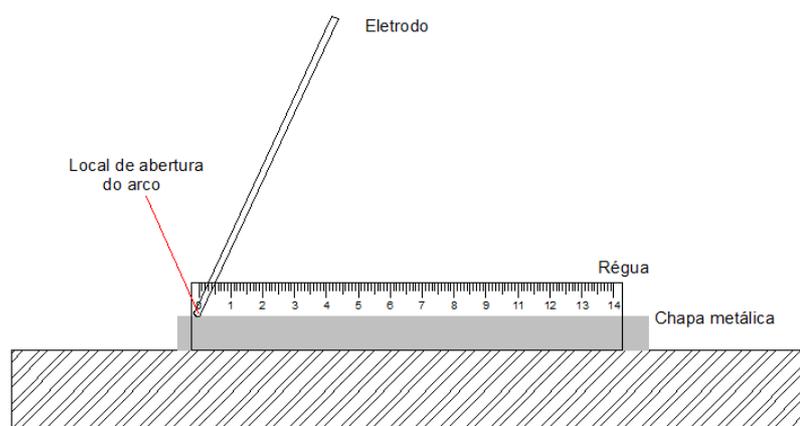


Figura 3.9 - Esquema usado para obter referência do cordão de solda nos vídeos

METODOLOGIA

Como citado anteriormente, a câmera possui uma limitação de tempo para realização da filmagem de acordo com a taxa de quadros/segundo selecionada para gravação. Esta limitação de tempo em conjunto com a distância ideal para se obter o melhor foco e uma imagem nítida nos vídeos restringiu a área de filmagem da câmera, impossibilitando realizar a gravação de todo o cordão de solda.

Para excluir das análises os efeitos de abertura e extinção do arco elétrico, que não são o foco principal deste trabalho, a câmera foi posicionada de forma a capturar as imagens distantes de 2 a 3 cm ao longo de onde seria feita a abertura do arco elétrico. Desta forma, o arco elétrico era aberto, e só após entrar no campo de visão da câmera se iniciava a gravação. O arco elétrico só era extinto após sair do campo de visão da câmera.

Diferentemente da filmagem, a aquisição de dados se iniciou com a abertura do arco elétrico. Desta forma a imagem gravada não estava sincronizada com os sinais elétricos. Para sincronizar estes, a associação das imagens gravadas com os sinais adquiridos pelo sistema foi feita em três etapas: inicialmente definiu-se a velocidade média de soldagem, na sequência determinou-se a distância do início da filmagem à origem da abertura do arco (através da régua posicionada a frente da chapa de metal) e por fim, através destas determinou-se o tempo do início de abertura do arco até o início da filmagem. Apesar deste método não ser muito preciso devido as variáveis do processo estarem na escala de milésimos de segundo e décimos de milímetro (tanto para a filmagem quanto para a aquisição de dados), ele se fez necessário devido a limitação de tempo para as filmagens segundo as especificações da câmera.

Apesar da capacidade da câmera realizar filmagens de até 8,2 segundos determinou-se a análise para apenas 8,0 segundos de todos os parâmetros, dos dados de aquisição, dos vídeos e das áreas dos cordões de solda.

Foram feitos seis cordões sobre chapa para os eletrodos E6013 e E7024 e cinco cordões para o eletrodo E7018. No entanto um corpo de prova do eletrodo E6013 e um do eletrodo

METODOLOGIA

E7024 foram excluídos das análises, pois durante a realização dos mesmos houve um problema no sistema de aquisição dos sinais elétricos. Os corpos de prova do eletrodo E6013 foram classificados com a letra A, do E7024 com a letra B e o E7018 com a letra C. Na Tabela 3.2 são apresentados os corpos de prova obtidos.

Tabela 3.2 - Corpos de Prova

Corpos de Prova Eletrodo E6013						Corpos de Prova Eletrodo E7024						Corpos de Prova Eletrodo E7018				
1A	2A	3A	4A	5A	6A*	1B	2B*	3B	4B	5B	6B	1C	2C	3C	4C	5C

*os corpos de prova 6A e 2B foram excluídos das análises

Após a soldagem, cada chapa foi cortada em quatro partes. Foram cortados o início e fim dos cordões para se excluir o efeito de abertura e extinção do arco elétrico da análise e após isto o cordão foi seccionado longitudinalmente para iniciar o procedimento de metalografia, Figura 3.10.

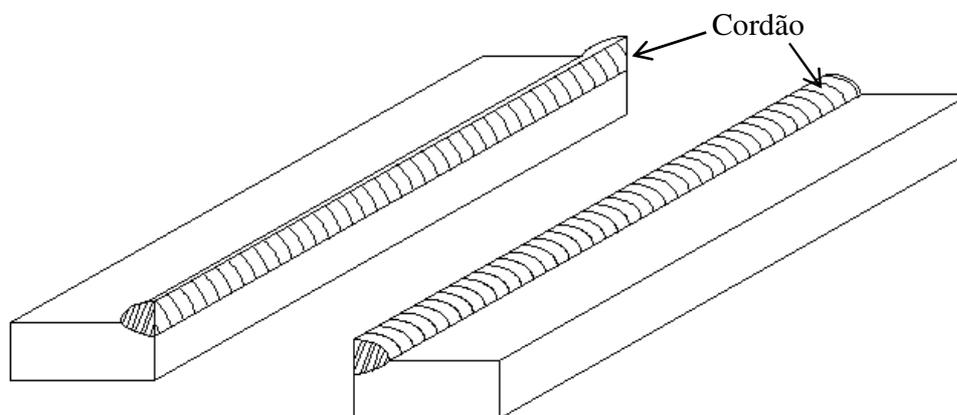


Figura 3.10 - Corte do corpo de prova

3.3.1 Análise dos sinais de tensão e corrente

Os sinais elétricos foram importados do sistema de aquisição e trabalhados com o auxílio de uma planilha eletrônica. Conforme citado anteriormente a taxa de aquisição foi definida

METODOLOGIA

em 1.000 Hz, assim para a análise de 8,0 segundos obteve-se 8.000 pontos para corrente e para tensão.

Para calcular o valor da estabilidade do arco, S, para cada cordão de solda utilizou-se a equação 2.8.

3.3.2 Análise das imagens

Para análise e reprodução dos vídeos gravados pela câmera de alta velocidade foram utilizados os programas Windows Live Movie Maker e Virtual Dub. Com o auxílio de um dispositivo USB e do programa EASYCAP as imagens inicialmente armazenadas pelo dispositivo Encore Mac da câmera foram transferidas para o computador após a realização de cada procedimento de soldagem.

3.3.3 Metalografia e análise macroscópica dos corpos de prova

Inicialmente as superfícies foram lixadas manualmente com lixas d'água e depois polidas com alumina. Após o polimento fez-se o ataque químico nas amostras utilizando-se reagente Nital 5% para então se iniciar as análises macroscópicas de cada corpo de prova.

A análise do metal de solda dos corpos de prova foi feita com o auxílio de um microscópio modelo Olympus SZ-CTV. As imagens foram ampliadas e fotografadas com o auxílio de uma câmera acoplada ao microscópio. Devido à restrição do equipamento em fotografar todo o corpo de prova, foi necessário fazer várias fotografias ao longo do cordão e com auxílio do programa Microsoft Ice as mesmas foram unidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análises iniciais

Devido a limitações experimentais, não foi possível correlacionar com exatidão os fenômenos observados nos vídeos, os sinais de aquisição do processo e os corpos de prova de cada cordão. No entanto procurou-se coincidir ao máximo estes três parâmetros.

Preliminarmente foram feitas análises baseadas na inspeção visual para descrever as principais diferenças e características observadas durante a soldagem, quantidades de gases gerados, características dos cordões, respingos, etc, para os três tipos de eletrodos.

A geração de gases no processo de soldagem subaquática pode ser observada na superfície da água. Os testes realizados com o eletrodo E7018 geraram mais gases e em uma coloração mais escura se comparados aos eletrodos E6013 e E7024. O eletrodo E7024 apresentou a menor geração de gases e em uma coloração mais clara.

Em relação à luminosidade do arco elétrico, o E7018 apresentou a maior emissão de luminosidade, não sendo observada diferença significativa entre os eletrodos E6013 e E7024.

Os cordões realizados com eletrodo E6013 apresentaram uma escória dura e rígida que só foi retirada após seu escovamento. Os cordões obtidos com o eletrodo E7024 apresentaram uma escória frágil e quebradiça sendo praticamente desnecessário o escovamento para sua retirada. Já os cordões realizados com o E7018 apresentaram uma escória com comportamento intermediário em relação às obtidas com os eletrodos anteriores, sendo frágil, porém com a necessidade de escovamento para sua retirada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como trabalhou-se em um ambiente confinado em que a troca de água era realizada somente após determinado número de soldas, foi possível notar a qualidade da água após realização de cada solda com os diferentes tipos de eletrodos. O eletrodo E7024 foi o que apresentou a água mais turva, com mais impurezas e particulados em suspensão após a soldagem. Este fato pode estar relacionado a uma maior diluição dos gases gerados pela queima do seu revestimento na água e pela difusão de parte da sua escória quebradiça e frágil para o meio aquoso. O eletrodo E6013 apresentou uma água turva, porém sem particulados em suspensão e menos impurezas se comparado ao eletrodo E7024. Já o eletrodo E7018 resultou em uma água pouco turva, praticamente sem impurezas e particulados, fato este que pode estar relacionado à maior geração de gases e em coloração mais escura, ou seja, a queima do revestimento básico gerou gases que não se dissolveram na água.

Nas Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3 são mostradas as fotos dos cordões obtidos com os eletrodos E6013, E7024 e E7018, respectivamente.

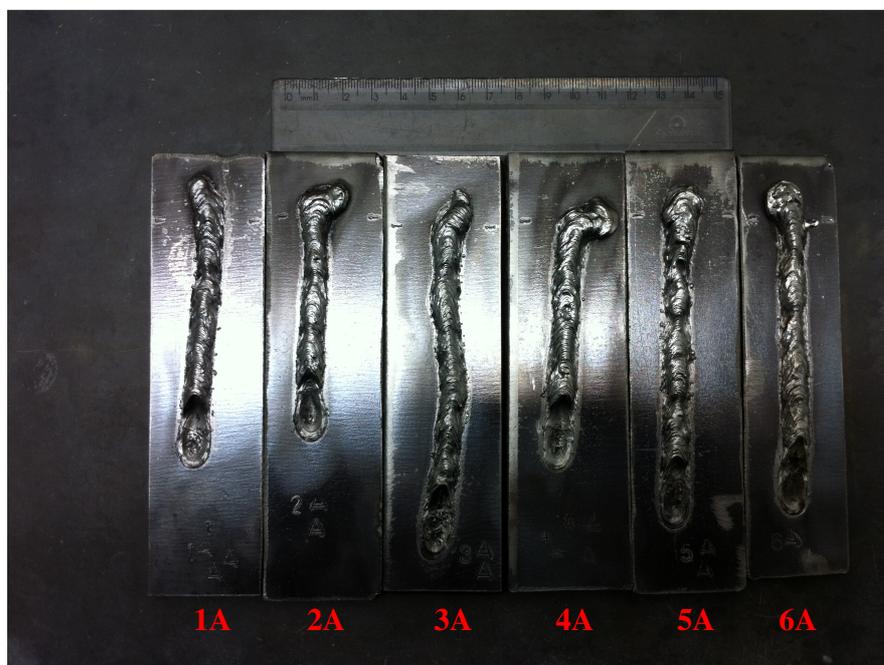


Figura 4.1-Cordões obtidos com eletrodo E6013

RESULTADOS E DISCUSSÃO

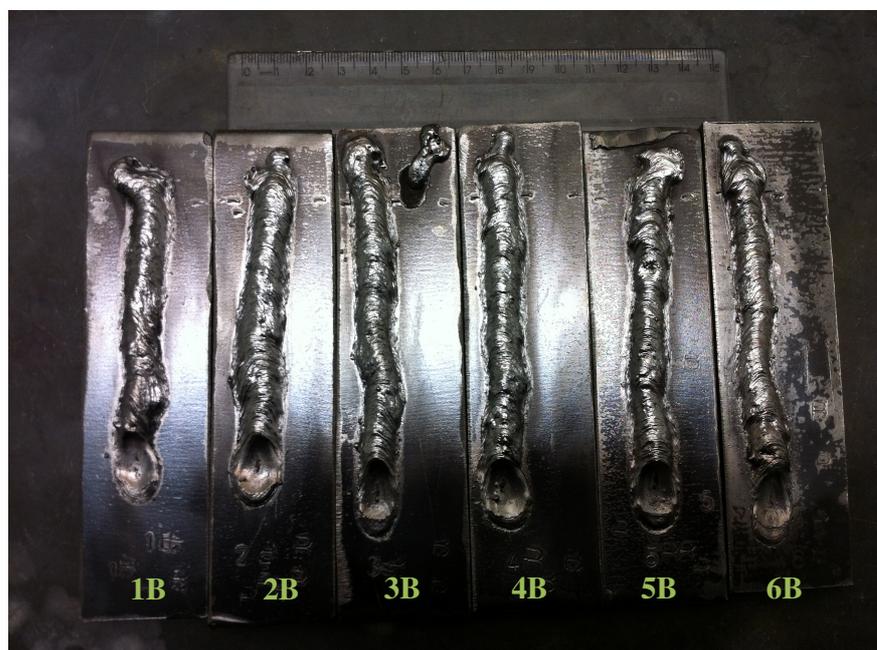


Figura 4.2 - Cordões obtidos com eletrodo E7024



Figura 4.3 - Cordões obtidos com eletrodo E7018

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cordões obtidos com eletrodo E7024 apresentaram reforços mais espessos do que os obtidos com o eletrodo E7018 e estes mais espessos que os obtidos com o eletrodo E6013. Este maior reforço pode estar relacionado a presença de pó de ferro no revestimento dos eletrodos E7024 e E7018. Segundo Villani et al (2007), o pó de ferro torna o revestimento mais resistente ao calor, permitindo a utilização de maiores correntes de soldagem para um dado diâmetro de eletrodo, conseqüentemente tem-se um aumento significativo na taxa de deposição de eletrodos com pó de ferro em seu revestimento.

As soldas realizadas com o eletrodo E6013 não apresentaram respingos enquanto que nas realizadas com o eletrodo E7024 notou-se um número significativo de respingos que foram facilmente removidos através de escovamento. As soldas feitas com eletrodo E7018, entretanto, apresentaram elevado número de respingos que permaneceram incrustados nas chapas de solda mesmo após escovamento. Tal fato pode estar relacionado ao número de curtos-circuitos de cada processo, já que foi neste eletrodo observado um significativo aumento dos mesmos.

4.2 Análise dos sinais de tensão e corrente

Notou-se um padrão de comportamento dos sinais elétricos ao longo do tempo para cada tipo de eletrodo. No eletrodo E6013 as variações de tensão se deram em torno do valor de 35 V, enquanto para o eletrodo E7024 estas variações se deram em torno de 32 V e para o E7018 em 26 V.

As variações de corrente se mostraram menos acentuadas se comparadas às variações de tensão, fato este já esperado pela utilização de uma fonte de corrente constante nos processos de soldagem. Para todos os eletrodos as variações de corrente se deram em torno de 160 A.

Nas Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6 são vistos os gráficos de tensão e corrente no tempo para os corpos de prova 1A, 1B e 1C respectivamente. Os mesmos gráficos podem ser

RESULTADOS E DISCUSSÃO

melhor visualizados no Apêndice A, juntamente com os gráficos dos demais corpos de prova.

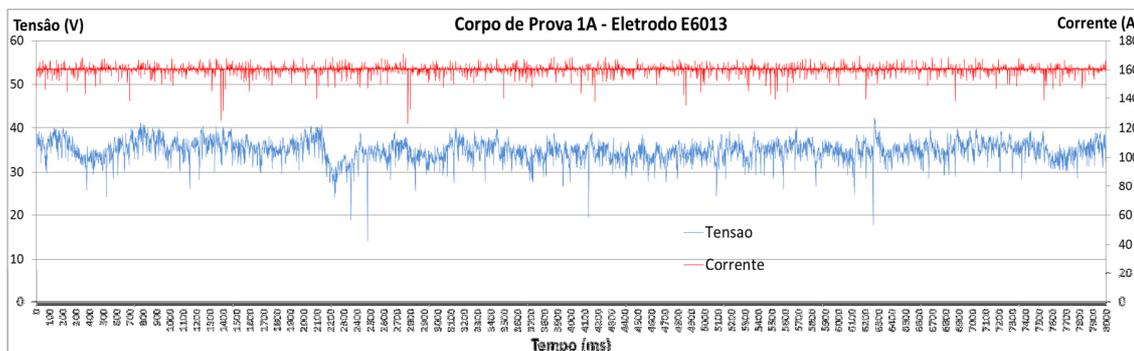


Figura 4.4 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 1A

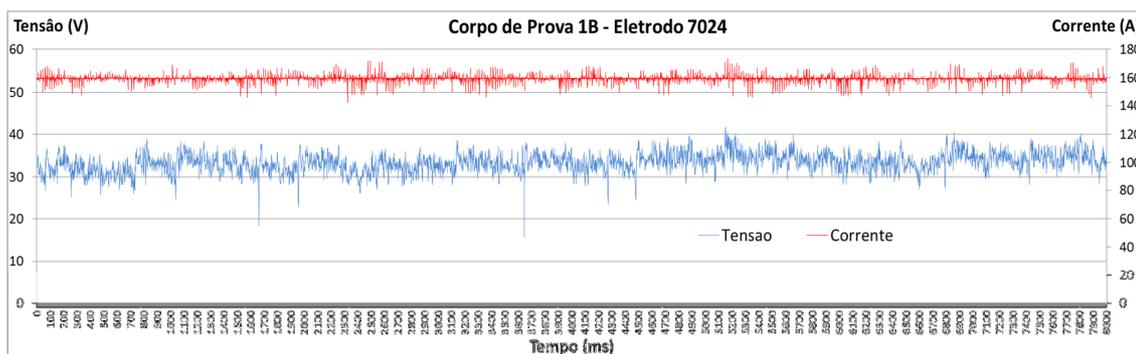


Figura 4.5 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 1B

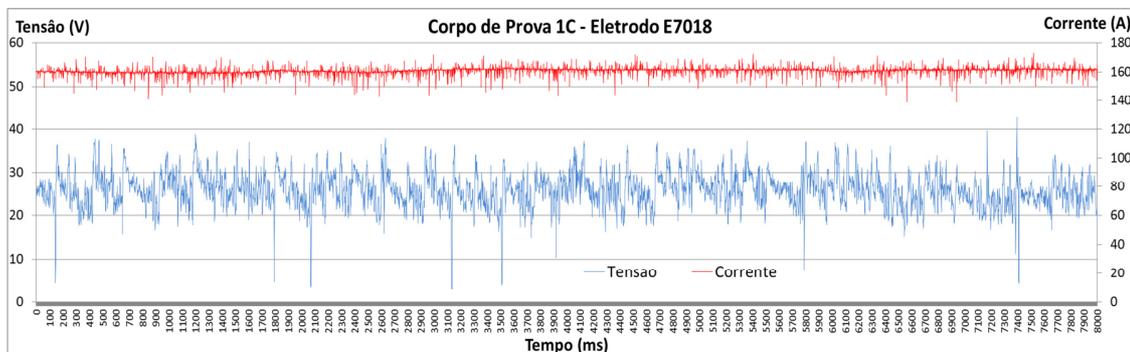


Figura 4.6 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 1C

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No gráfico da Figura 4.6 percebem-se maiores variações da tensão, fato que reforça a observação citada anteriormente sobre a maior presença de curtos-circuitos no processo de soldagem utilizando o eletrodo E7018.

4.2.1 Estabilidade do arco

Para o cálculo dos valores de S utilizou-se a Equação 2.8. Inicialmente utilizou-se esta equação para cada 10 pontos (0,01 segundo) de corrente captados, obtendo-se assim 800 valores de S para cada cordão. Apurados estes valores calculou-se então o valor médio de S (S_m) para cada cordão. Estes valores podem ser visualizados Figura 4.7.

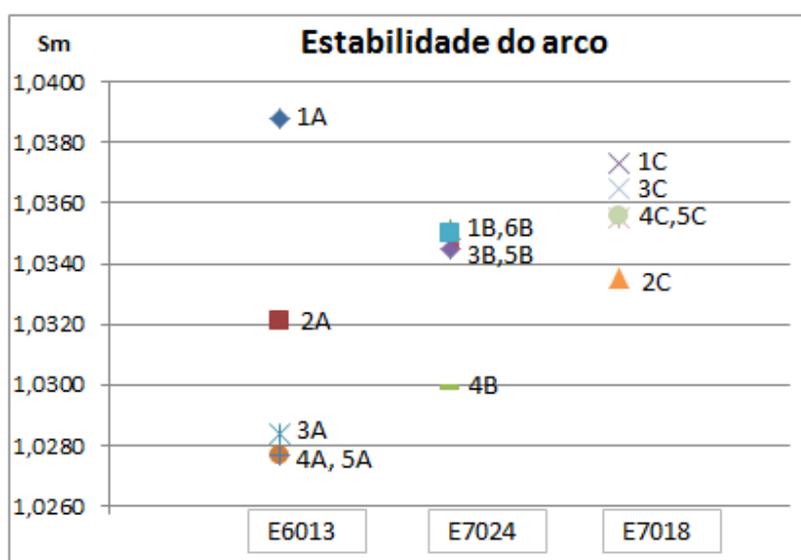


Figura 4.7 – Valores para estabilidade do arco

Em uma análise geral pode-se ver que não há variações muito grandes nos valores de S_m para todos os eletrodos. No entanto, na média dos valores, os cordões feitos com eletrodo E6013 geraram arcos mais estáveis (valores mais próximos de 1) se comparados aos realizados com eletrodo E7024, e estes mais estáveis que os realizados com o eletrodo E7018, salvo exceção para os corpos de prova 1A, 4B e 2C cujos valores de S_m desviaram

RESULTADOS E DISCUSSÃO

significativamente dos valores dos demais corpos de prova soldados com o mesmo tipo de eletrodo.

4.2.2 Tensão e corrente médias

Para cada cordão foi calculada a tensão média (V_m) e corrente média (A_m). Na Figura 4.8 são apresentados os gráficos das distribuições destes valores médios, juntamente com os valores de máximo e mínimos da tensão e corrente para cada corpos de prova dos três tipos de eletrodos.

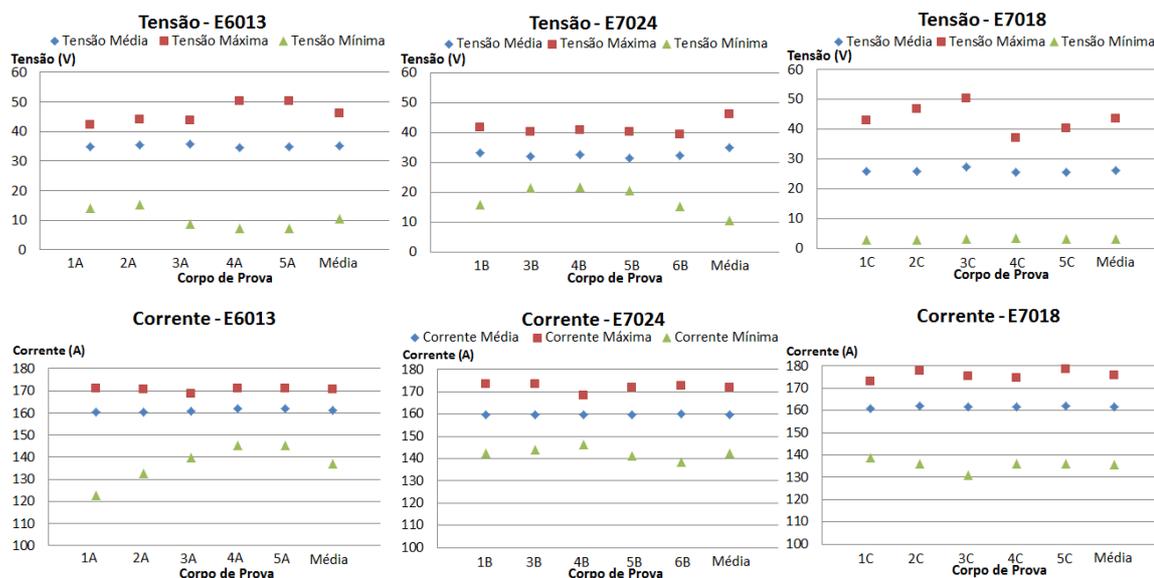


Figura 4.8 - Valores de tensão e corrente

Nota-se que o eletrodo E6013 apresentou os maiores valores de tensão média, seguido pelo eletrodo E7024, sendo o eletrodo E7018 aquele que apresentou a menor tensão média. Para este último eletrodo nota-se também os menores valores de tensão, abaixo de 5 V. Já para os valores de corrente média obteve-se valores sem grandes variações, fato explicado devido a utilização de uma fonte de corrente constante. No entanto, notam-se também variações acentuadas de corrente mínima e máxima, principalmente nos testes realizados com o eletrodo E7018.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.2.3 Desvios percentuais em relação à tensão e corrente médias

A partir dos valores de tensão média (V_m) e corrente média (A_m) foram desenvolvidos gráficos e tabelas para verificar o comportamento da tensão e corrente. Para isto, contabilizou-se o número de eventos por segundo em que a tensão e corrente variavam em relação aos seus valores médios, segundo percentuais pré-determinados. Estes percentuais tomaram por base os maiores desvios encontrados no processo para cada variável.

Foram computados o número de eventos para cada segundo dos sinais aqusitados e ao final calculou-se uma média destes para cada corpo de prova, obtendo-se um valor médio de eventos por segundo. Inicialmente serão apresentados os resultados em termos percentuais em relação ao total de eventos por segundo, no caso, 1001 eventos. As Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11 apresentam os desvios percentuais dos eventos por segundo em relação à V_m para cada corpo de prova de cada eletrodo.

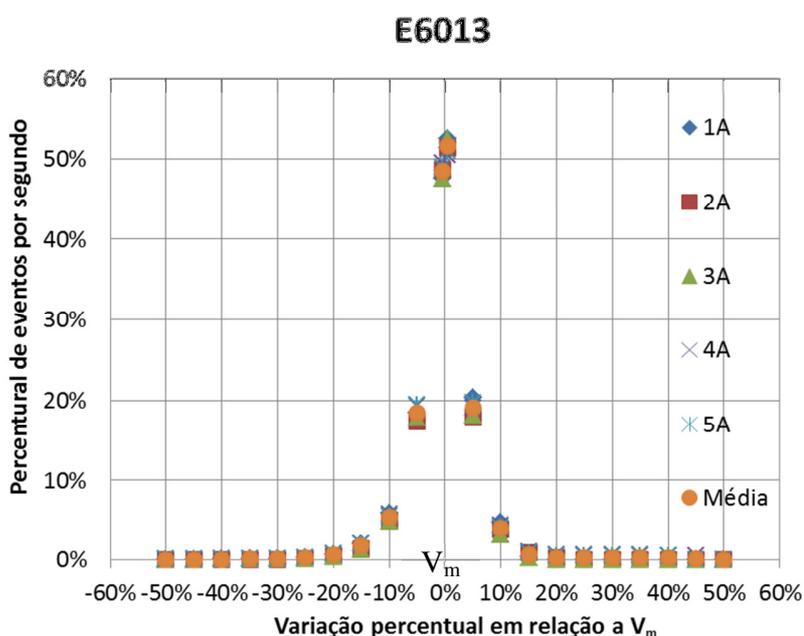


Figura 4.9 - Gráfico da distribuição de eventos/s em relação a desvios percentuais da V_m – eletrodo E6013

RESULTADOS E DISCUSSÃO

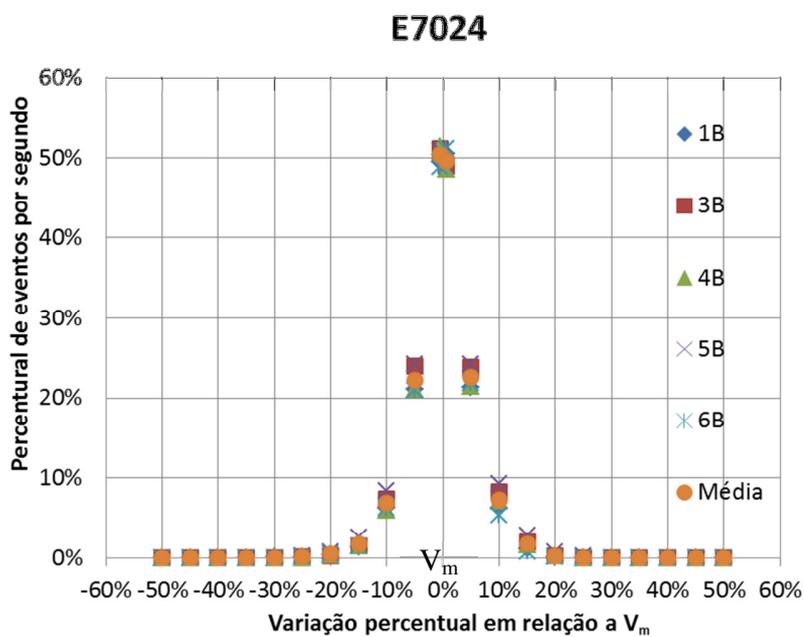


Figura 4.10 - Gráfico da distribuição de eventos/s em relação a desvios percentuais da V_m – eletrodo E7024

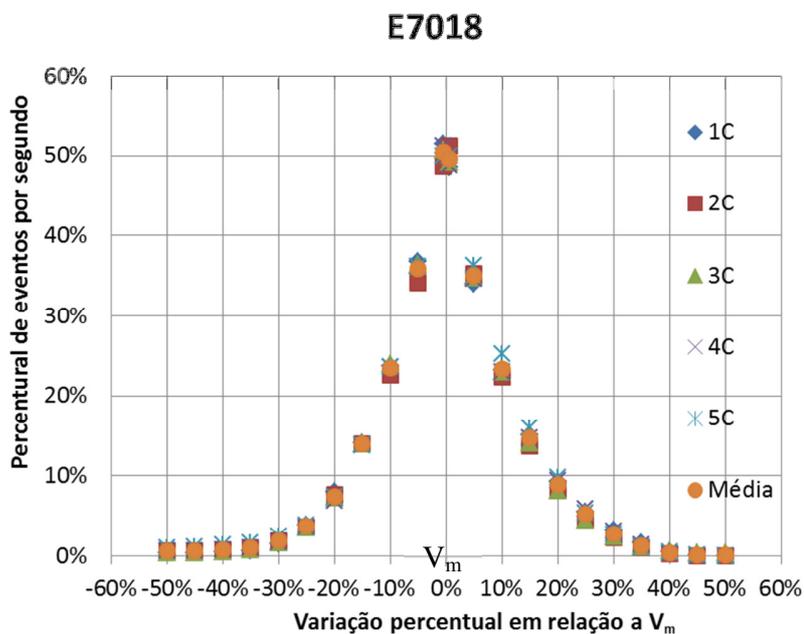


Figura 4.11 - Gráfico da distribuição de eventos/s em relação a desvios percentuais da V_m – eletrodo E7018

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando a média dos percentuais nota-se que o comportamento dos eletrodos E6013 e E7024 são semelhantes. Estes apresentam reduções bruscas iniciais no percentual de eventos conforme se distanciam da V_m , por exemplo, de percentuais em torno de 50% para próximos a 20% e depois abaixo de 10%, para valores tanto maiores como menores que a V_m . O eletrodo E7018, porém, apresenta uma redução menos acentuada destes percentuais, em torno de 50%, 35%, 23% e 15% conforme se afastam de V_m . No entanto, para todos os eletrodos observa-se uma distribuição semelhante para o mesmo percentual de desvio acima e abaixo da V_m , por exemplo, no eletrodo E7018 com um desvio de 10% acima da V_m tem-se aproximadamente 23% dos eventos e para 10% abaixo de V_m tem-se também valores próximos a 23% dos eventos.

As Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14 apresentam os desvios percentuais dos eventos por segundo em relação a corrente média para cada corpo de prova de cada eletrodo.

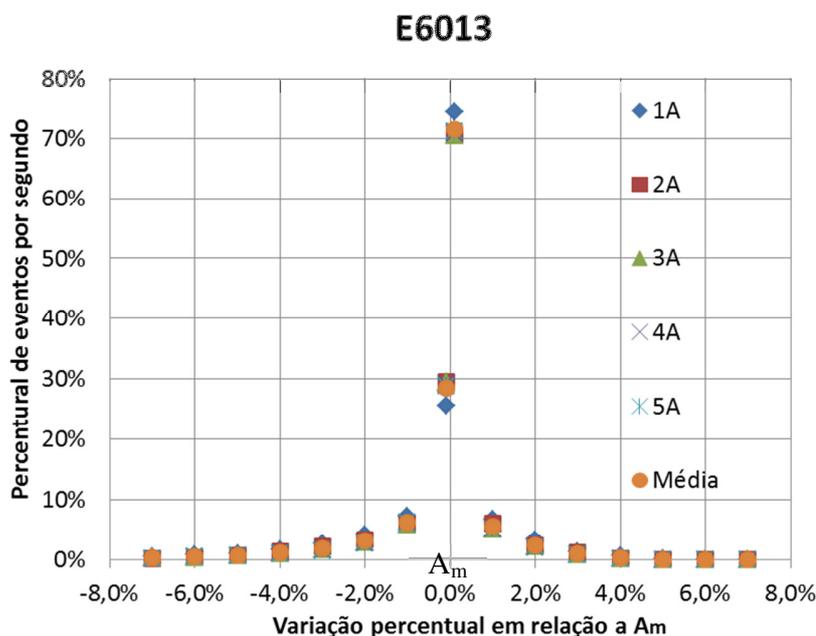


Figura 4.12 - Gráfico da distribuição de eventos/s em relação a desvios percentuais da A_m – eletrodo E6013

RESULTADOS E DISCUSSÃO

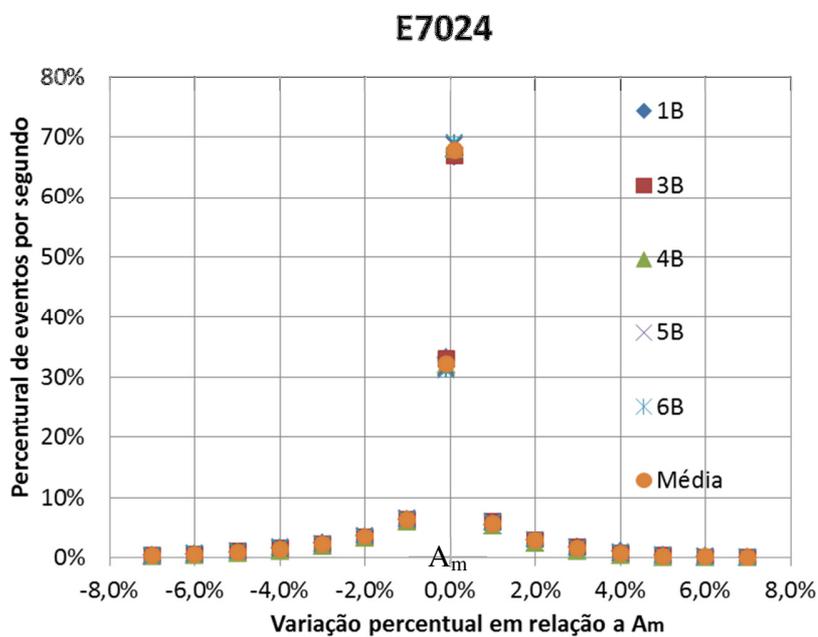


Figura 4.13 - Gráfico da distribuição de eventos/s em relação a desvios percentuais da A_m – eletrodo E7024

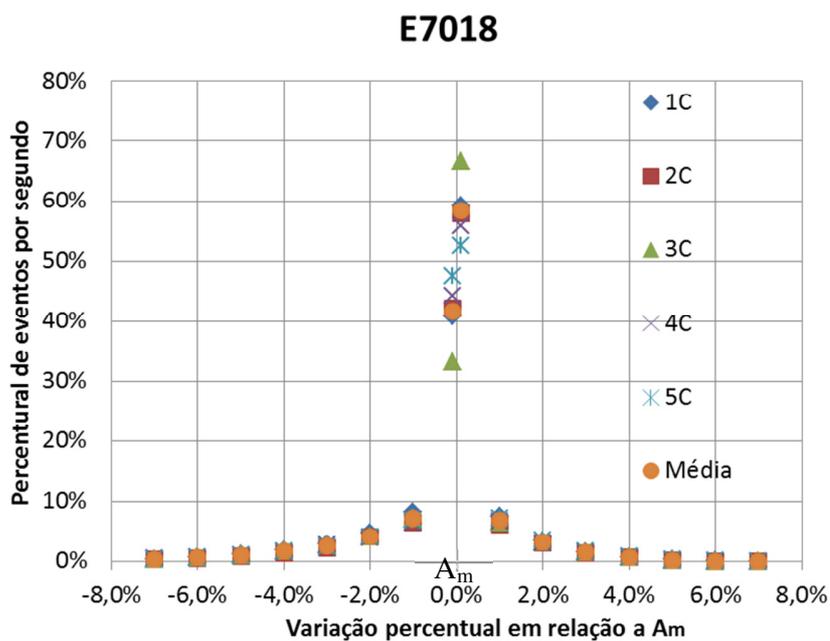


Figura 4.14 - Gráfico da distribuição de eventos/s em relação a desvios percentuais da A_m – eletrodo E7018

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os desvios em relação à corrente média acontecem em percentuais muito menores se comparadas aos desvios da tensão média. Fato esperado devido à utilização de uma fonte de corrente constante. Para tensão, observam-se variações da ordem de 10, 20, 30, 40 e 50% da V_m , enquanto na corrente tem-se variações na ordem de 1, 2, 3, 4 e 5% da A_m .

Percebe-se também que há uma maior concentração de eventos acima da A_m , próximos a 70% nos eletrodos E6013 e E7024 e próximos a 60% para o eletrodo E7018. Para todos os eletrodos nota-se também um comportamento semelhante na redução do percentual de eventos conforme se distancia de A_m : uma queda brusca inicial seguidas de reduções mais brandas. Por exemplo, na Figura 4.13, para o eletrodo E7024 tem-se uma queda de 32% aproximadamente para valores próximos a 6%, seguidas de quedas menos expressivas conforme se afasta da A_m .

Nas Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3 e Tabela 4.4 são apresentados os dados que deram origem aos gráficos da distribuição de eventos/s em relação a desvios percentuais anteriormente descritos. Nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2, são apresentados o número total de eventos por segundo que desviaram da V_m enquanto nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4 são apresentados o total dos desvios em relação a A_m .

Tabela 4.1 - Total de eventos por segundo maiores que V_m por corpo de prova

Variação Tensão	E6013					E7024					E7018				
	Média	1A	2A	3A	4A	5A	1B	3B	4B	5B	6B	1C	2C	3C	4C
→ > V_m	525	514	525	506	511	506	490	487	492	512	486	513	493	489	501
V $_m$ +5%	204	179	182	191	198	213	239	215	243	219	340	353	349	347	363
V $_m$ +10%	48	38	31	44	42	63	83	71	93	54	233	223	231	230	253
V $_m$ +15%	4	8	3	10	9	11	20	17	30	8	151	138	141	147	160
V $_m$ +20%	0	2	0	7	5	1	3	3	7	1	92	83	82	94	98
V $_m$ +25%	0	0	0	6	5	0	0	0	2	0	55	47	46	59	55
V $_m$ +30%	0	0	0	6	5	0	0	0	0	0	32	23	24	32	28
V $_m$ +35%	0	0	0	6	5	0	0	0	0	0	17	10	12	13	12
V $_m$ +40%	0	0	0	5	5	0	0	0	0	0	5	3	7	2	5
V $_m$ +45%	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	1	0	4	0	1
V $_m$ +50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	4	0	1

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 4.4 - Total de eventos por segundo menores que A_m por corpo de prova

Variação Corrente Média	E6013					E7024					E7018				
	1A	2A	3A	4A	5A	1B	3B	4B	5B	6B	1C	2C	3C	4C	5C
→ < A_m	256	295	295	292	289	334	331	321	315	312	409	422	333	442	476
Am-1%	73	61	59	62	62	65	65	61	67	65	83	66	73	66	69
Am-2%	42	34	29	28	29	36	35	33	38	36	48	41	41	40	41
Am-3%	27	21	16	15	15	24	23	19	22	23	30	23	27	27	25
Am-4%	18	13	10	10	10	15	16	10	15	17	18	14	17	16	17
Am-5%	11	7	6	7	7	9	11	7	10	10	12	9	11	11	10
Am-6%	8	4	4	4	4	6	5	3	5	6	7	5	7	7	7
Am-7%	5	2	3	2	2	3	3	2	2	4	4	3	4	5	4
Am-8%	4	2	2	2	2	1	1	0	1	1	3	2	2	3	2
Am-9%	3	2	2	1	1	0	1	0	0	0	2	1	1	2	1
Am-10%	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1

Na Tabela 4.3, conforme marcações, nota-se um o número de eventos por segundo bastante reduzido para percentuais maiores que 4% da A_m em todos os eletrodos. Observam-se também reduções bruscas entre o número de eventos maiores que A_m para os eventos 1% maiores que a A_m , caindo de 500-700 eventos para menos de 80 eventos por segundo.

Na Tabela 4.4 também destaca-se um número reduzido de eventos por segundo para percentuais abaixo de 7% de A_m para todos os eletrodos. Também se notam reduções bruscas entre o número dos eventos menores que A_m para os eventos menores que 1% de A_m , com reduções da ordem de 300-400 eventos para menos de 90 eventos por segundo.

Voltando nas tabelas anteriores, com foco na primeira linha das Tabela 4.1 e Tabela 4.2 observa-se uma distribuição próxima da média do total de eventos maiores e menores que V_m , entre 400 e 500 eventos. Diferentemente desta, na primeira linha das Tabela 4.3 e Tabela 4.4 nota-se que há uma concentração maior para o número de eventos por segundo maiores que A_m .

Segundo Tsai e Masubuchi (1977), uma causa das flutuações na tensão e corrente ocorrendo a cada 0,3 segundos ou menos pode ser atribuída ao colapso do revestimento do eletrodo durante a soldagem a arco elétrico. Este fato pode estar relacionado às variações citadas anteriormente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3 Análise das filmagens em alta velocidade

A análise das filmagens em alta velocidade foi dividida em duas partes. No primeiro momento foi analisado o processo de formação da bolha, em seguida contou-se o número de bolhas em cada segundo de gravação para cada teste realizado.

4.3.1 Análise da formação e destacamento das bolhas

Conforme citado no item 3.3.2 as imagens foram analisadas no programa Windows Live Movie Maker após serem transmitidos do sistema Encore da câmera para o computador. Para se obter os quadros das filmagens foi utilizado o programa Virtual Dub. Com a análise de cada quadro separadamente pode-se observar a formação e o destacamento das bolhas. Na Figura 4.15 é visto um frame. À direita da imagem pode-se ver informações pertinentes à gravação: número do frame, tempo do frame, número do evento, frames/segundo, shutter speed e trigger point.

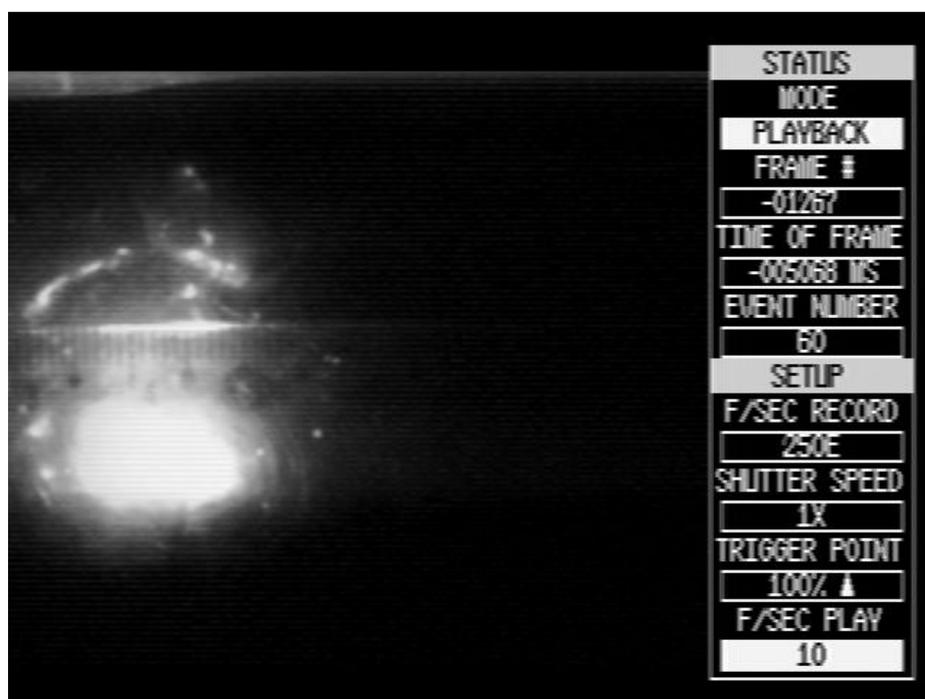


Figura 4.15 - Imagem de 1 quadro da filmagem

RESULTADOS E DISCUSSÃO

É importante salientar que mesmo conseguindo obter cada quadro da filmagem não foi possível determinar o local exato ao longo do cordão onde ocorreram os destacamentos das bolhas. A frequência deste evento é alta (em média 10 bolhas/segundo, como será visto mais adiante), e com as velocidades de soldagem observadas no processo entre 0,25 e 0,44 cm/s tem-se estes destacamentos acontecendo na escala de décimos de milímetros. Além disso, a luminosidade do arco elétrico, mesmo quando esta diminui significativamente, também impossibilita determinar com precisão o local destes destacamentos.

Segundo Pope et al (1995), o arco elétrico e a poça de fusão estão sempre dentro da bolha de vapor d'água devido a temperatura de vaporização da água ser significativamente menor do que a temperatura de solidificação da solda. Assim, após a abertura do arco elétrico tem-se um processo contínuo de formação e destacamento de bolhas. Este destacamento, no entanto, acontece de forma aleatória e não são conhecidos com exatidão seus fatores determinantes.

Tsai e Masubuchi (1979) citam que a energia do arco é intensa e a água circundante é imediatamente vaporizada e forma uma bolha relativamente estável. Gases gerados da decomposição do revestimento ou vaporizados da água circundante levam ao crescimento da bolha. A bolha cresce continuamente até seu raio tornar-se tangente ao vazio inicial que lhe originou. Neste momento a bolha se colapsa e uma nova bolha começa a crescer. O arco elétrico está sempre protegido pela bolha durante a soldagem subaquática.

Visualmente, o mecanismo de formação e destacamento das bolhas pode ser descrito conforme a seguir. Após o destacamento de uma bolha há o início do crescimento de outra bolha ao redor do arco elétrico. Em determinado momento há uma diminuição significativa da intensidade luminosa do arco elétrico. Neste momento é visto a bolha se desprendendo da região do arco. Em seguida a luminosidade do arco aumenta e inicia-se novamente a formação de uma nova bolha. Na Figura 4.16 é visto frame por frame este processo de formação e destacamento da bolha. O tempo entre cada quadro é de 4ms.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

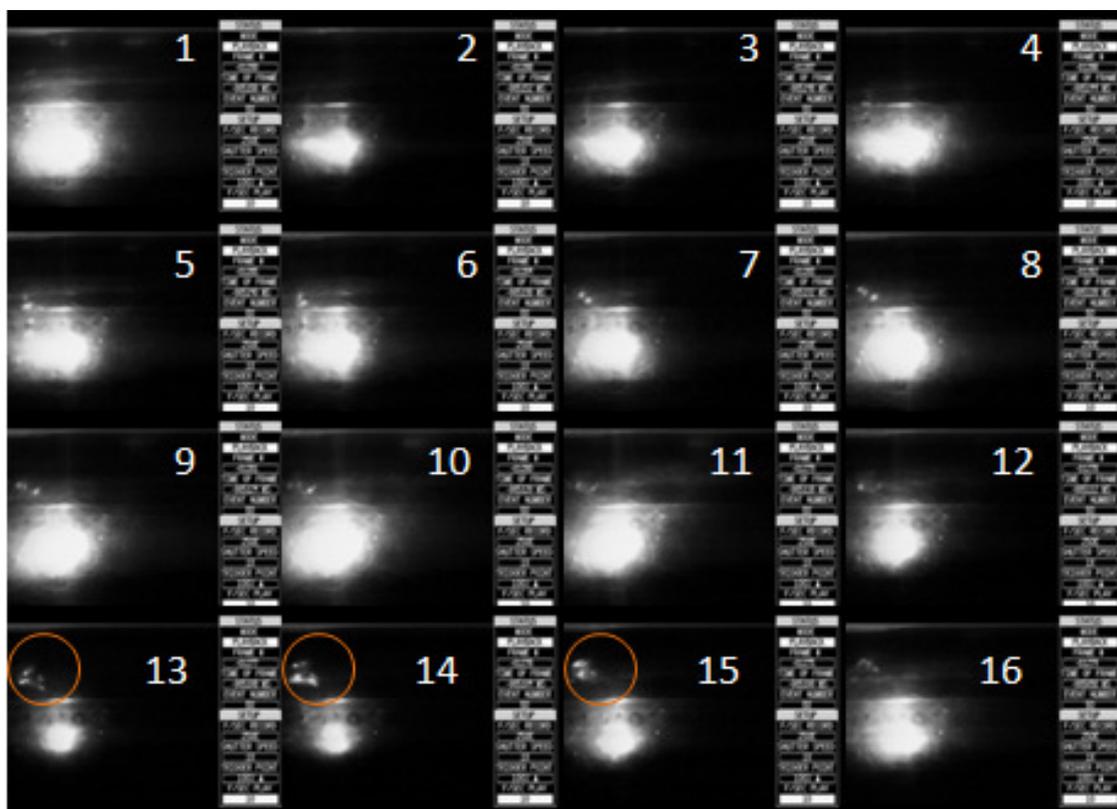


Figura 4.16 - Formação e destacamento das bolhas

Nos frames 1 a 11 é visto o arco elétrico com sua luminosidade normal, enquanto a bolha está crescendo. No frame 12 já nota-se uma diminuição desta luminosidade. Nos frames 13, 14 e 15 acontece o destacamento da bolha, que aparece circundada. Após o destacamento a luminosidade volta a aumentar e inicia-se o crescimento de outra bolha.

4.3.2 Determinação da velocidade de soldagem e contagem das bolhas

Como foi descrito no item 3.3, posicionou-se uma régua com a origem no ponto onde seria feita a abertura do arco elétrico no corpo de prova. Desta forma, através das filmagens e tendo como base o arco elétrico, pode-se determinar a localização do início e fim da gravação de cada cordão de solda. Assim, com o tempo de filmagem visto nas imagens dos vídeos pode-se calcular a velocidade de soldagem para cada cordão. As velocidades de soldagem de cada corpo de prova são mostradas na Tabela 4.5.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 4.5 - Velocidade de soldagem

Eletrodo	Corpo de Prova	Velocidade
E6013	1A	0,41 cm/s
	2A	0,44 cm/s
	3A	0,44 cm/s
	4A	0,38 cm/s
	5A	0,38 cm/s
E7024	1B	0,31 cm/s
	3B	0,29 cm/s
	4B	0,31 cm/s
	5B	0,28 cm/s
	6B	0,25cm/s
E7018	1C	0,25 cm/s
	2C	0,25 cm/s
	3C	0,25 cm/s
	4C	0,25 cm/s
	5C	0,25 cm/s

Conforme já citado anteriormente foram analisados 8,0 segundos do processo de soldagem, com um total de 2.000 frames. A contagem de bolhas foi dividida para cada segundo e realizada para todos os corpos de prova. Os resultados podem ser vistos nas Tabela 4.6, Tabela 4.7 e Tabela 4.8. As células realçadas em amarelo identificam um regime turbulento das bolhas nos quais não se conseguiu determinar com precisão o total de bolhas.

Tabela 4.6 – Número de bolhas destacadas para o eletrodo E6013

Corpo de Prova	Número de bolhas								Média
	0 a 1 seg	1 a 2 seg	2 a 3 seg	3 a 4 seg	4 a 5 seg	5 a 6 seg	6 a 7 seg	7 a 8 seg	
1A	8	7	12	11	11	11	9	11	10
2A	10	8	11	8	8	9	9	11	9
3A	9	9	10	10	10	9	12	10	10
4A	10	9	8	11	9	9	9	8	9
5A	9	11	11	10	10	11	11	8	10
Média Total									10

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 4.7 - Número de bolhas destacadas para o eletrodo E7024

Corpo de Prova	Número de bolhas								Média
	0 a 1 seg	1 a 2 seg	2 a 3 seg	3 a 4 seg	4 a 5 seg	5 a 6 seg	6 a 7 seg	7 a 8 seg	
1B	7	8	7	7	7	7	8	8	7
3B	8	10	9	11	10	10	10	10	10
4B	5	8	9	8	9	8	6	9	8
5B	9	8	9	11	7	8	8	9	9
6B	11	8	8	9	7	9	8	7	8
Média Total									8

Tabela 4.8 - Número de bolhas destacadas para o eletrodo E7018

Corpo de Prova	Número de bolhas								Média
	0 a 1 seg	1 a 2 seg	2 a 3 seg	3 a 4 seg	4 a 5 seg	5 a 6 seg	6 a 7 seg	7 a 8 seg	
1C	11	12	11	11	11	9	11	11	11
2C	11	11	11	11	10	10	11	11	11
3C	12	10	10	9	10	9	11	10	10
4C	9	10	10	11	12	11	12	11	11
5C	10	11	11	10	11	9	11	11	11
Média Total									11

Não observou-se um padrão muito claro de destacamento das bolhas. Mesmo para corpos de prova do mesmo eletrodo notam-se valores médios diferentes entre eles.

Observa-se também que nenhum valor médio encontrado nestes testes assemelha-se aos resultados encontrados por Tsai e Masubuchi (1977) que descreveu uma taxa de 13 bolhas/segundo.

4.4 Correlacionamento dos sinais elétricos e destacamento das bolhas

Conforme já citado anteriormente, devido a limitações experimentais não foi possível correlacionar o momento exato dos fenômenos observados nos vídeos com os sinais elétricos aquisitados no processo. Um exemplo disto são os destacamentos das bolhas, não é possível relacionar os momentos destes destacamentos com o seu exato sinal de corrente e tensão. No entanto pode-se relacionar fatos observadas em ambos os casos, por exemplo, variações nas tensão e corrente e quantidades de bolhas formadas e destacadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao observar as Tabela 4.4, Tabela 4.6, Tabela 4.7 e Tabela 4.8 pode-se notar uma semelhança entre a média do número de eventos por segundo menores que 5% de A_m e a média da contagem de bolhas por segundo feitas para cada eletrodo, conforme linha em destaque da Tabela 4.4 . Esta comparação pode ser visto para cada eletrodo nas Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19.

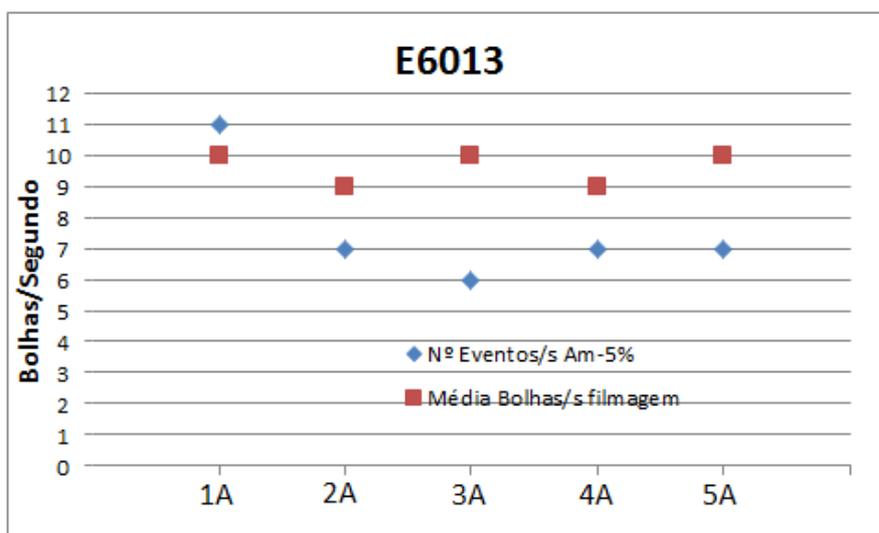


Figura 4.17 – Comparação Eventos/s 5% menores que A_m e a média bolhas/s registrados com a filmagem – Eletrodo E6013

RESULTADOS E DISCUSSÃO

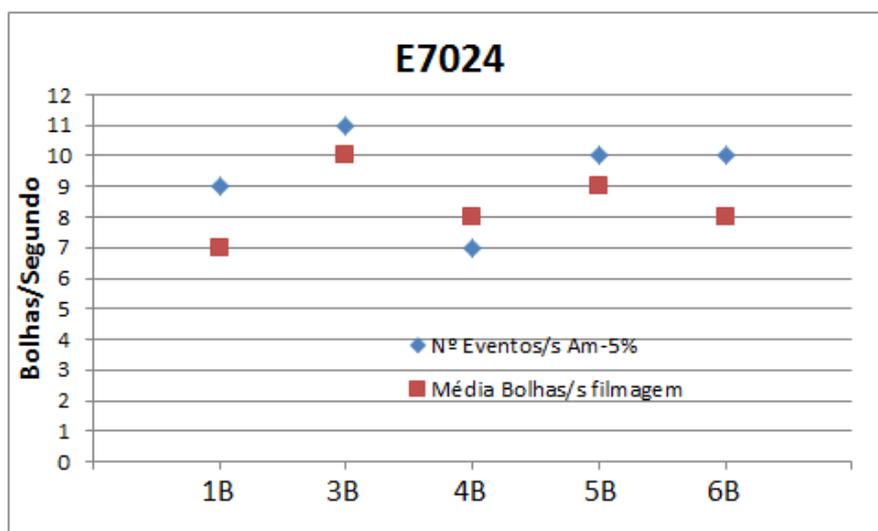


Figura 4.18 - Comparação Eventos/s 5% menores que A_m e a média bolhas/s registrados com a filmagem – Eletrodo E7024

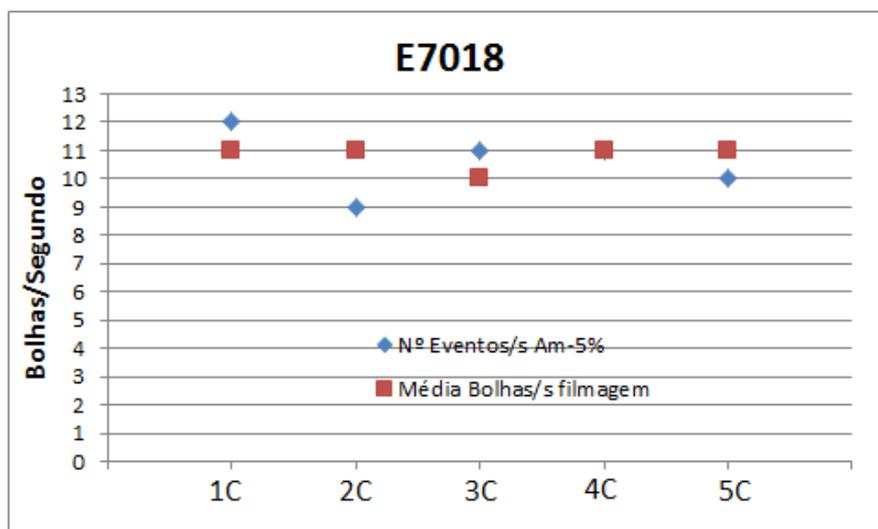


Figura 4.19 - Comparação Eventos/s 5% menores que A_m e a média bolhas/s registrados com a filmagem – Eletrodo E7018

Com exceção dos corpos de prova 3A e 5A do eletrodo E6013, nota-se uma grande semelhança entre estes eventos, apresentando diferenças menores que dois eventos em todos os corpos de prova. Tal fato pode sugerir a possibilidade de haver uma relação entre uma diminuição brusca da corrente e o destacamento das bolhas. Na Tabela 4.9 é mostrada

RESULTADOS E DISCUSSÃO

a comparação do número de eventos e dos destacamentos das bolhas em cada segundo do processo de soldagem que foi analisado. Nesta tabela também estão mostrados os valores de estabilidade do arco, S_m , de cada corpo de prova.

Tabela 4.9 - Total de eventos por segundo A

		0 a 1 seg	1 a 2 seg	2 a 3 seg	3 a 4 seg	4 a 5 seg	5 a 6 seg	6 a 7 seg	7 a 8 seg	Média	S_m		
E6013	1A	Nº de bolhas	8	7	12	11	11	11	9	11	10	1,0388	
		Eventos Am-5%	11	11	15	10	12	10	5	12	11		
	2A	Nº de bolhas	10	8	11	8	8	9	9	11	9	1,0321	
		Eventos Am-5%	7	4	9	6	12	9	8	2	7		
	3A	Nº de bolhas	9	9	10	10	10	9	12	10	10	1,0284	
		Eventos Am-5%	6	5	9	8	6	5	6	6	6		
	4A	Nº de bolhas	10	9	8	11	9	9	9	8	9	1,0277	
		Eventos Am-5%	5	8	11	7	6	5	7	5	7		
	5A	Nº de bolhas	9	11	11	10	10	11	11	8	10	1,0277	
		Eventos Am-5%	8	11	6	6	5	6	4	9	7		
E7024	1B	Nº de bolhas	7	8	7	7	7	7	8	8	7	1,0351	
		Eventos Am-5%	5	5	12	13	4	12	15	8	9		
	3B	Nº de bolhas	8	10	9	11	10	10	10	10	10	1,0346	
		Eventos Am-5%	15	15	12	6	8	7	9	12	11		
	4B	Nº de bolhas	5	8	9	8	9	8	6	9	8	1,0299	
		Eventos Am-5%	9	8	4	4	2	12	7	6	7		
	5B	Nº de bolhas	9	8	9	11	7	8	8	9	9	1,0345	
		Eventos Am-5%	6	12	8	12	11	5	14	9	10		
	6B	Nº de bolhas	11	8	8	9	7	9	8	7	8	1,0350	
		Eventos Am-5%	9	10	9	10	16	10	7	10	10		
	E7018	1C	Nº de bolhas	11	12	11	11	11	9	11	11	11	1,0373
			Eventos Am-5%	16	15	16	12	6	8	11	10	12	
2C		Nº de bolhas	11	11	11	11	10	10	11	11	11	1,0335	
		Eventos Am-5%	8	8	10	10	12	7	4	10	9		
3C		Nº de bolhas	12	10	10	9	10	9	11	10	10	1,0365	
		Eventos Am-5%	10	7	14	12	13	9	13	6	11		
4C		Nº de bolhas	9	10	10	11	12	11	12	11	11	1,0355	
		Eventos Am-5%	9	10	11	15	9	11	12	9	11		
5C		Nº de bolhas	10	11	11	10	11	9	11	11	11	1,0356	
		Eventos Am-5%	15	11	8	10	8	5	14	9	10		

m-5% x Total de Bolhas em cada segundo

Novamente é notada uma semelhança bastante razoável entre os eventos. Observando os valores de S_m para os corpos de prova que apresentaram as maiores divergências na comparação entre os eventos, 3A e 5A, nota-se que estes, juntamente com o corpo de prova

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4A, apresentaram arcos mais estáveis, com S_m menor que 1,0290. Ou seja, estes corpos de prova apresentaram menores variações de corrente. Visto isso, diminuindo os desvios para valores 4% menores que A_m , obtém-se a Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Total de eventos por segundo Am-4,0% x Total de Bolhas em cada segundo

		0 a 1 seg	1 a 2 seg	2 a 3 seg	3 a 4 seg	4 a 5 seg	5 a 6 seg	6 a 7 seg	7 a 8 seg	Média
3A	Nº de bolhas	9	9	10	10	10	9	12	10	10
	Eventos Am-4%	9	11	13	11	7	7	10	9	10
4A	Nº de bolhas	10	9	8	11	9	9	9	8	9
	Eventos Am-4%	11	11	15	8	11	7	10	10	10
5A	Nº de bolhas	9	11	11	10	10	11	11	8	10
	Eventos Am-4%	13	13	10	8	9	9	8	10	10

Nota-se que as divergências anteriormente observadas diminuíram razoavelmente. Esta análise pode vir a sugerir que, além de quedas bruscas e destacamentos das bolhas poderem estar relacionados, pode-se haver também uma relação entre o percentual dessa queda de corrente e a estabilidade do arco elétrico.

Outra observação feita através da análise dos sinais de corrente são que as quedas bruscas de corrente acontecem repentinamente. Não se tem uma diminuição contínua da corrente até esta atingir os valores mínimos, mas sim quedas momentâneas seguidas da retomada dos valores próximos aos anteriormente registrados. Nas Tabela 4.11, 4.12 e 4.13 são apresentados alguns exemplos destas constatações em momentos aleatórios para corpos de provas distintos dos três tipos eletrodos. Estas diminuições bruscas estão destacadas em vermelho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 4.11 - Queda de corrente eletrodo E6013

Tensão (V)	Corrente (A)	Tempo (ms)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tempo (ms)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tempo (ms)
34,936	160,607	6860	37,732	161,343	6680	32,897	161,840	7140
34,967	160,588	6861	34,910	160,055	6681	33,615	157,994	7141
35,483	160,552	6862	33,529	157,166	6682	34,749	162,060	7142
35,231	161,030	6863	36,345	161,030	6683	34,400	162,318	7143
35,852	160,073	6864	34,575	160,993	6684	35,047	162,502	7144
33,795	160,736	6865	34,414	161,030	6685	32,092	162,005	7145
36,142	161,416	6866	35,171	160,993	6686	34,130	162,171	7146
37,456	160,680	6867	32,569	161,030	6687	35,051	162,208	7147
37,529	160,791	6868	31,297	149,474	6688	34,465	149,621	7148
37,453	160,791	6869	34,884	158,987	6689	35,173	160,588	7149
33,467	160,680	6870	35,443	160,699	6690	32,420	161,987	7150
29,047	138,139	6871	37,672	160,938	6691	32,120	162,428	7151
31,794	163,109	6872	36,072	161,177	6692	33,587	162,244	7152
30,298	160,736	6873	35,243	161,048	6693	33,965	162,244	7153
33,501	160,883	6874	35,374	161,398	6694	33,478	162,520	7154
35,480	160,680	6875	35,697	160,920	6695	34,389	162,226	7155
36,840	160,662	6876	36,503	161,508	6696	33,487	162,171	7156
36,824	160,662	6877	36,969	160,883	6697	32,071	163,441	7157
36,758	160,147	6878	37,388	160,331	6698	32,341	163,091	7158
37,467	160,809	6879	37,824	162,060	6699	31,515	162,097	7159

Tabela 4.12 - Queda de corrente eletrodo E7024

Tensão (V)	Corrente (A)	Tempo (ms)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tempo (ms)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tempo (ms)
31,447	159,999	230	32,000	160,110	440	32,553	159,926	7230
30,882	162,134	231	29,633	160,036	441	31,255	160,018	7231
30,923	156,926	232	29,439	160,239	442	29,928	160,055	7232
31,335	159,006	233	31,032	159,889	443	30,081	160,091	7233
30,656	159,963	234	31,702	159,834	444	30,029	157,129	7234
29,356	159,944	235	32,836	160,294	445	31,080	161,729	7235
30,224	159,963	236	32,387	161,140	446	31,094	159,944	7236
29,889	159,245	237	31,831	159,907	447	31,459	159,963	7237
27,405	159,871	238	31,651	159,981	448	31,698	159,944	7238
28,305	150,504	239	31,254	159,926	449	32,077	159,944	7239
31,294	159,521	240	31,479	159,815	450	31,590	159,999	7240
31,439	159,944	241	30,521	159,907	451	31,200	159,963	7241
31,516	159,963	242	30,464	160,018	452	31,264	158,564	7242
31,484	159,815	243	30,008	149,695	453	31,644	151,277	7243
30,742	159,871	244	31,065	159,999	454	33,587	160,386	7244
31,249	159,834	245	30,644	159,742	455	33,262	159,779	7245
31,224	159,889	246	30,318	160,073	456	33,722	160,073	7246
31,069	160,018	247	30,131	160,607	457	33,435	159,650	7247
31,736	160,257	248	30,681	159,889	458	33,079	160,073	7248
32,303	160,312	249	30,671	160,147	459	32,865	159,871	7249

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 4.13 - Quedas de corrente eletrodo E7018

Tensão (V)	Corrente (A)	Tempo (ms)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tempo (ms)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tempo (ms)
28,092	160,975	100	28,986	162,447	3200	28,218	162,686	6240
29,269	161,913	101	28,149	162,999	3201	28,375	163,312	6241
28,596	161,858	102	28,090	162,741	3202	28,995	163,422	6242
27,935	161,895	103	28,342	161,950	3203	29,338	162,539	6243
26,611	161,950	104	28,565	162,741	3204	30,527	163,974	6244
24,793	153,136	105	28,726	162,778	3205	30,676	162,796	6245
26,509	163,017	106	29,619	162,944	3206	30,874	162,576	6246
26,551	161,895	107	28,676	145,076	3207	30,591	162,704	6247
26,791	163,698	108	29,388	161,876	3208	30,657	162,888	6248
27,149	161,876	109	28,863	162,612	3209	30,831	162,760	6249
27,878	161,821	110	28,499	162,833	3210	30,756	162,944	6250
26,789	161,876	111	28,984	162,704	3211	30,186	152,584	6251
25,489	161,895	112	29,866	162,815	3212	31,148	162,704	6252
24,861	161,932	113	29,528	162,594	3213	31,048	162,300	6253
22,636	161,012	114	28,711	160,496	3214	31,101	162,796	6254
21,490	161,821	115	29,169	162,116	3215	31,407	162,539	6255
24,282	159,135	116	29,634	162,833	3216	31,415	162,539	6256
27,161	160,662	117	30,083	162,907	3217	30,945	162,741	6257
27,880	162,171	118	29,647	162,723	3218	30,628	162,981	6258
27,078	161,803	119	28,471	162,079	3219	30,275	166,918	6259

Observa-se também que embora os valores de corrente apresentem estas quedas bruscas repentinas, redução significativa em um ponto e retomada a valores próximos dos anteriores na sequência, não se consegue estabelecer um mesmo padrão no comportamento da tensão durante estes eventos. Em alguns casos a tensão aumenta durante a queda de corrente e em outros casos a tensão diminui. Além disto, as variações de tensão observadas nestes momentos não são significativas quando se toma por base as variações observadas ao longo de todo o processo, notando-se variações maiores que 6 V.

A queda brusca de corrente pode estar relacionada à utilização de uma fonte chaveada na soldagem, devido à possibilidade desta gerar ruídos nos sinais de corrente. No entanto, pode também ser mais um indicativo da presença das bolhas: estas geraram uma significativa variação de corrente consequentemente afetando o “nível de corrente” da fonte.

Uma hipótese para explicar e justificar os eventos descritos acima pode estar relacionada à proteção gasosa do arco e a ionização dos gases presentes na bolha.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Tsai e Masubuchi (1979) e Pope et al (1995), o arco elétrico está sempre protegido pela bolha durante a soldagem subaquática devido a sua intensidade provocar a vaporização imediata da água circundante.

Villani et al (2007) fala que a coluna de plasma compreende praticamente todo o volume do arco, sendo constituída por partículas neutras (moléculas e átomos), íons e elétrons livres. Para a formação do plasma, o gás do arco deve ser aquecido a temperaturas elevadas, para como resultado da agitação térmica ocorrerem choques entre os seus constituintes e a sua ionização.

Desta forma, a manutenção contínua do arco elétrico fica condicionada a existência da bolha e da ionização dos gases nela presentes. Então, após o destacamento de uma bolha, mesmo com o crescimento imediato de uma nova bolha, poderia haver uma extinção momentânea do arco elétrico que levaria a essa queda brusca e puntual da corrente.

Em outra abordagem, não necessariamente haveria uma extinção do arco elétrico, mas um aumento significativo da resistência elétrica devido à necessidade de haver uma nova ionização dos gases e dissociação da água, o que também levaria a uma queda brusca da corrente.

Segundo Alivov (1959) apud Tsai e Masubuchi (1977), a presença de hidrogênio na região do arco aumenta a resistência elétrica. Desta forma, uma outra hipótese para a correlação das quedas abruptas de corrente com destacamento das bolhas estaria relacionado a este fato. Com o contínuo aumento da concentração de hidrogênio na bolha, aumenta-se gradualmente também a resistência elétrica na região do arco elétrico. Esta concentração pode chegar a um limite tal que causa uma diminuição significativa da corrente do arco, causando uma perturbação no mesmo e conseqüentemente levando a um destacamento da bolha.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para complementar a análise dos sinais elétricos, principalmente relacionado às variações de corrente, tentou-se aplicar a transformada de Fourier nos dados dos sinais elétricos. No entanto, devido ao caráter aleatório do tempo entre as bolhas, não se obteve nenhum resultado consistente.

4.5 Solidificação do metal de solda

Em uma última análise tentou-se relacionar os eventos e fenômenos descritos anteriormente com o metal de solda ao longo do cordão. Para isso foi feita a análise macroscópica dos cordões de solda.

Inicialmente analisou-se toda a extensão dos cordões de solda em suas características gerais. Nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 são mostradas as fotos de um corpo de prova para cada tipo de eletrodo. As demais fotos estão contidas no Apêndice B. Na parte superior das fotos está presente a escala em milímetros da distância daquele ponto à origem de abertura do arco.

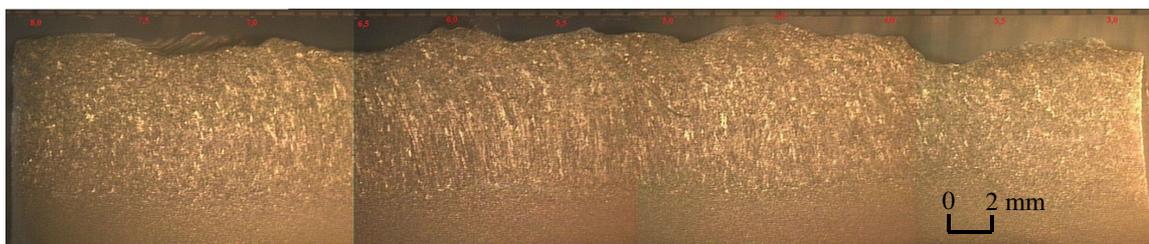


Figura 4.20 - Macrografia corpo de prova 5A

RESULTADOS E DISCUSSÃO



Figura 4.21 - Macrografia corpo de prova 6B

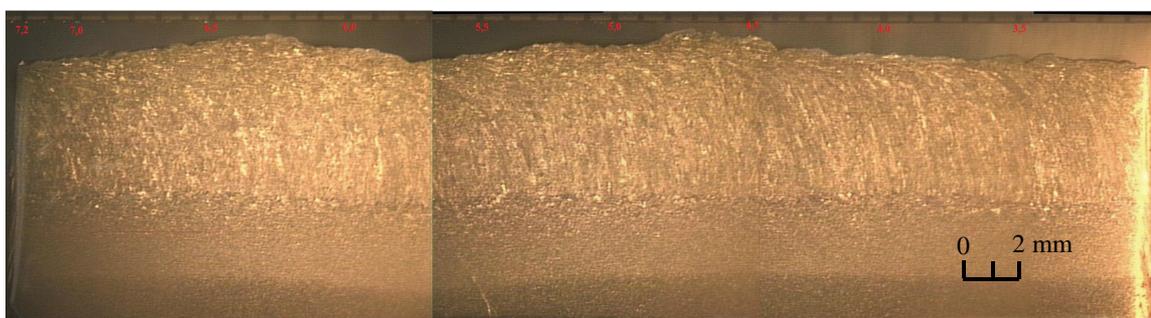


Figura 4.22- Macrografia corpo de prova 2C

Em uma análise geral do aspecto dos cordões de solda com o mesmo tipo de eletrodo não se conseguiu estabelecer um padrão para os mesmos, conforme esperado. Para todos os cordões houve diferenças significativas em sua apresentação. Por exemplo, o formato do topo dos cordões variou significativamente em eletrodos do mesmo tipo. Em alguns cordões este apresentou uma forma mais contínua, enquanto que em outros se apresentava de forma bastante irregular, por exemplo, a Figura 4.20 que mostra o corpo de prova 5A e a Figura A16 do anexo B que mostra o corpo de prova 1A.

Mesmo para a forma de solidificação dos corpos de prova realizados com o mesmo tipo de eletrodo, em que se esperava uma formação semelhante devido à utilização das mesmas condições de soldagem, não se observou uma uniformidade. Em alguns casos percebem-se claramente as linhas de solidificação perpendiculares ao metal de base em certo ponto do cordão e em outro ponto do mesmo cordão não se consegue perceber isto, por exemplo, Figura 4.22.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a análise inicial dos aspectos gerais dos cordões, foi realizada outra análise com o intuito de tentar relacionar as observações dos sinais elétricos destacadas anteriormente neste trabalho com possíveis aspectos macrográficos apresentados nos corpos de prova. Com base nas referências à origem da abertura do arco de cada foto, estas foram sincronizadas com os seus respectivos sinais de corrente e tensão em um gráfico junto a ela. Ressalta-se que, conforme citado no capítulo 3, esta sincronização foi baseada na velocidade média de soldagem para cada cordão e apesar deste método não ser muito preciso, foi necessário devido a limitações experimentais. As Figura 4.23, Figura 4.24 e Figura 4.25 mostram as fotografias com seus gráficos dos corpos de prova 1A, 3B e 2C. No Anexo C são apresentados as fotografias com os gráficos para os demais corpos de prova.

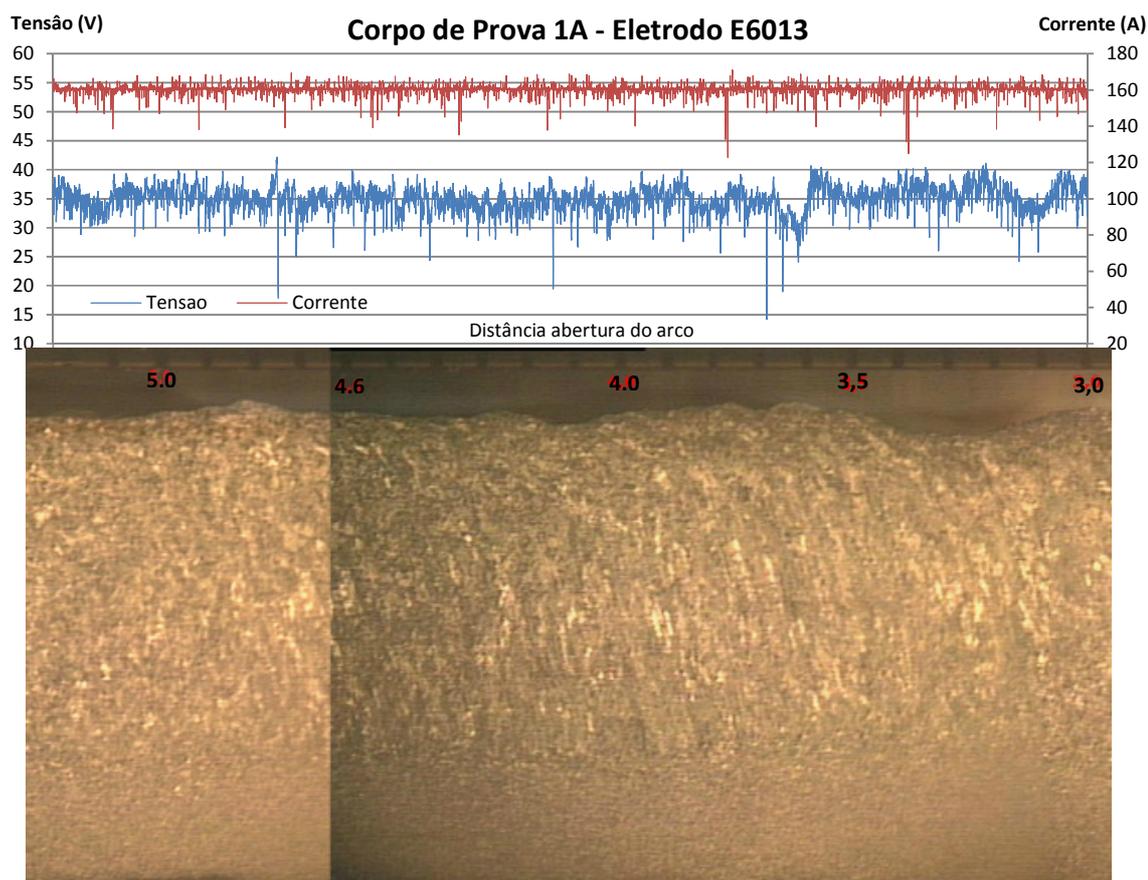


Figura 4.23 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 1A

RESULTADOS E DISCUSSÃO

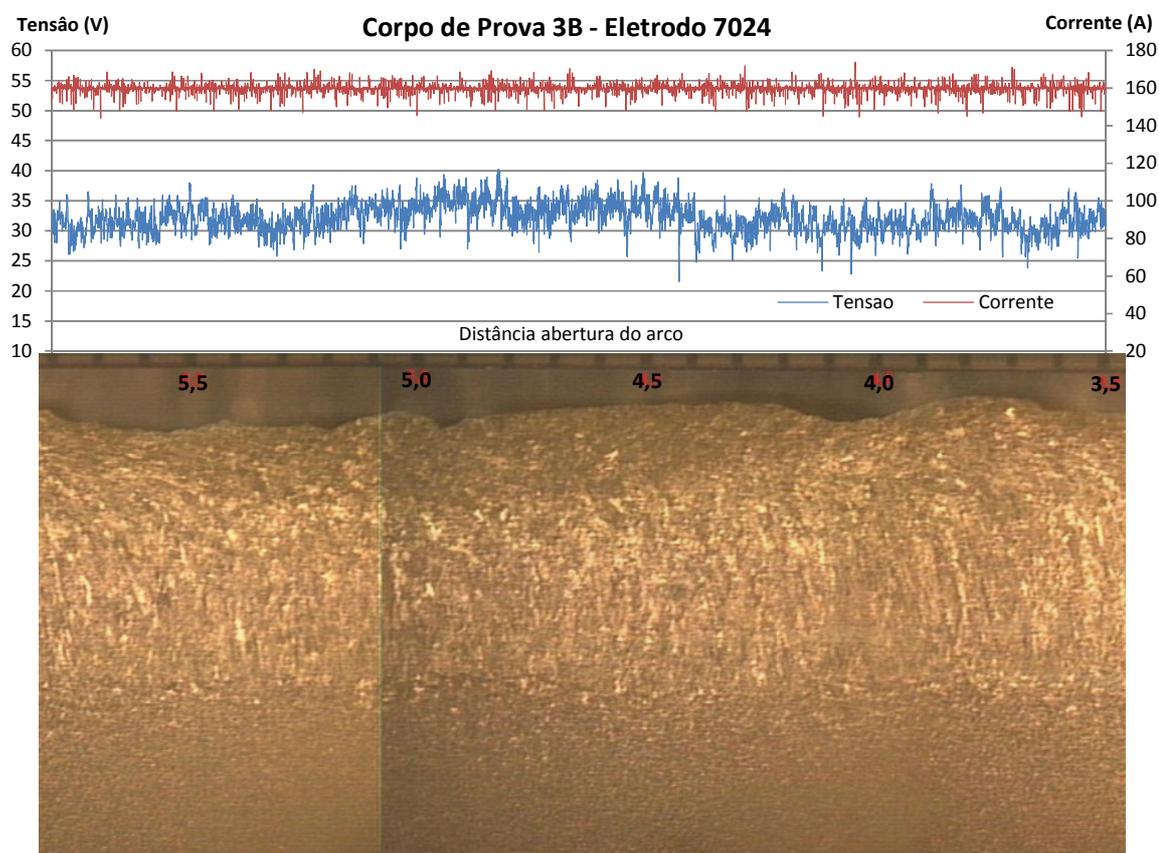


Figura 4.24 - - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 3B

RESULTADOS E DISCUSSÃO

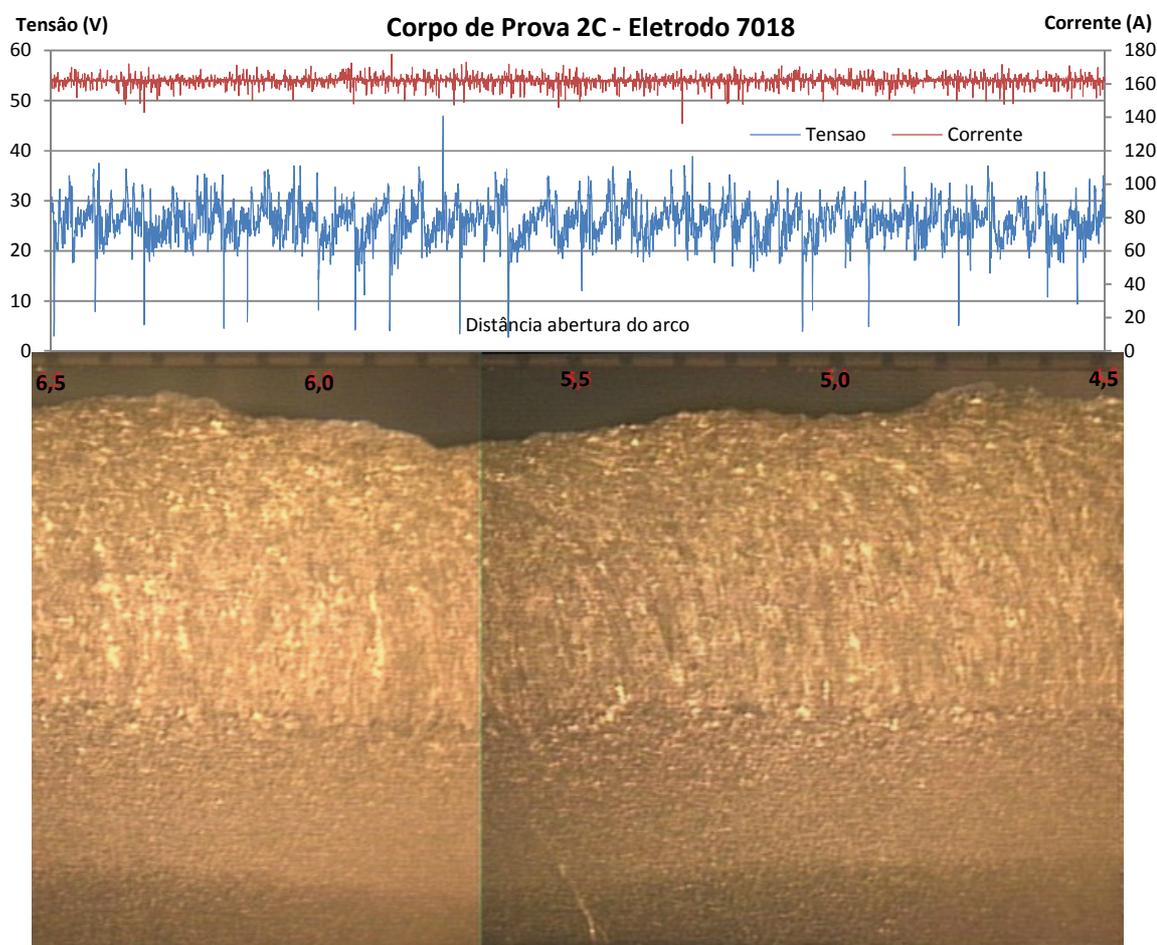


Figura 4.25 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 2C

Não foi possível estabelecer uma correlação entre os sinais de corrente e os aspectos macrográficos que podem ser observados nas fotos dos corpos de prova. Visto que foi utilizada neste trabalho uma fonte de corrente constante, variações significativas de corrente acontecem pontualmente, aparentemente não influenciando o comportamento e forma do topo das soldas e a forma da estrutura de solidificação do metal de solda nas macrografias. Assim, para se correlacionar sinais de corrente com possíveis variações no metal de solda se faz necessário uma análise micrográfica do mesmo, não é possível relacioná-los em nível macroscópico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação aos sinais de tensão, também não se conseguiu estabelecer uma relação entre estes e os aspectos macrográficos das fotos dos corpos de solda. Apesar da tensão se comportar de forma diferente da corrente, podendo-se notar momentos em que há uma tendência de aumento e diminuição das mesmas, não conseguiu-se determinar nenhum padrão de comportamento de variações destes sinais com o comportamento de aspectos macrográficos do metal de solda.

Além dos sinais elétricos, não foi possível estabelecer relações entre os fenômenos das bolhas observadas na filmagem em alta velocidade com os aspectos macrográficos dos cordões de solda. Como citado anteriormente, a frequência destes fenômenos de destacamento das bolhas gira em torno de 7 a 12 bolhas por segundo. Com as velocidades médias de soldagem para os eletrodos variando entre 0,25 cm/s e 0,41 cm/s, teria-se a ocorrência deste destacamento de bolhas a cada 0,02 cm e 0,05 cm. Desta forma seriam necessárias análises nas escalas de décimos de milímetros, o que não é possível com os vídeos de alta velocidade e as macrografias obtidas neste trabalho. Além disto, para este exato correlacionamento, formas mais precisas de sincronização entre o local de destacamento das bolhas com o metal de solda devem ser observados.

5 CONCLUSÕES

Através do estudo do fenômeno de formação, destacamento e colapso das bolhas, dos sinais elétricos e da análise macrográfica na soldagem de cordões sobre chapa em ambiente subaquático pôde-se tentar correlacionar estes três elementos.

Observou-se que o fenômeno de destacamento das bolhas acontece de forma aleatória, com variações nas taxas por segundo em que ocorrem. Notou-se também que estes fenômenos de destacamento podem estar relacionados com o tipo de eletrodo utilizado, pois se encontrou valores diferentes nas taxas de destacamento de bolhas para cada um dos três tipos de eletrodo utilizado.

Ao se comparar os resultados das taxas de destacamento do modelo matemático desenvolvido por Tsai e Masubuchi (1977) com as encontradas neste trabalho observou-se uma diferença entre os mesmos. Enquanto estes autores calcularam uma taxa de 15 bolhas/segundo para o eletrodo E6013, foi verificada neste trabalho uma taxa média de 10 bolhas/segundo para o mesmo eletrodo, através da contagem das bolhas formadas na filmagem em alta velocidade. Também divergentes foram as taxas de destacamento encontradas através da análise da filmagem em alta velocidade no estudo daqueles autores com os encontrados neste trabalho. Enquanto neste trabalho obteve-se uma taxa média de 10 bolhas/segundo para o eletrodo E6013, 8 bolhas/segundo para o E7024 e 11 bolhas/segundo para o E7018, Tsai e Masubuchi (1977) encontraram uma taxa de 13 bolhas/segundo para os eletrodos E6013 e E7014.

Em relação aos sinais elétricos foram observadas que as variações da tensão ao longo do processo em relação à tensão média são muito maiores que as variações da corrente ao longo do processo em relação a uma corrente média. Enquanto a tensão varia em torno de 10% a 40 % de uma tensão média, a corrente varia em torno de 1% a 5% de sua corrente

CONCLUSÃO

média. Este fato esperado pela utilização de uma fonte de corrente constante no processo de soldagem.

Através da observação do comportamento dos sinais de corrente com a frequência de destacamento de bolhas pôde-se notar uma grande semelhança entre a taxa destas e o número de eventos em que a corrente atingiu valores abaixo de 5% da corrente média em cada cordão. Desta forma, o destacamento das bolhas pode estar diretamente relacionado com variações bruscas de corrente durante o processo de soldagem subaquática. Uma hipótese que justifica esta observação é o aumento repentino da resistência elétrica na região do arco após o destacamento de uma bolha. Após o destacamento da bolha deve haver uma nova ionização dos gases circundantes ao arco elétrico. Com o aumento instantâneo dessa resistência há também uma repentina queda no valor da corrente.

Em relação a análise macroscópica realizada, não se conseguiu observar nenhum padrão no metal de solda para os três tipos de eletrodo. Além disso, o correlacionamento da macrografia dos cordões com os sinais elétricos e o fenômeno de destacamento das bolhas não foi possível devido a necessidade destas serem realizadas em uma escala de aumento maior do que a utilizada neste trabalho.

ABSTRACT

The bubble phenomenon in the underwater wet welding is very important in the weld's final quality. A good understanding of the formation and collapse of the bubbles with the knowledge of the welding parameters behavior along the process can improve the practices used in the underwater welding and, consequently, improve the final weld quality. To understand and try to correlate the phenomenon of growth, detachment and frequency of the bubbles with the electrical signals along the welding process this work was done. Three commercial covered electrodes, E6013, E7024 e E7018 were used to made beds on plate in a depth of 0,50 m. To visualize the formation, detachment and counting of the bubbles a high speed camera was used to record the process, together with electrical signals acquisition. So it was possible try to correlate the bubble frequency with the electrical signals observed along the process and those with specimen macrographs. That was observed in the currents data that the average number of variations under 5% of the average current is similar with the average rate of bubbles detachment. Therefore was concluded the possible relationship of the bubble detachment with a determined variation in the current.

Key-words: Underwater wet welding, high speed camera, covered electrodes, bubble frequency, electrical signals.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for Underwater Welding**. NSI/AWS D3.6M:1999.

ANDRADE, G. D., DIAS, W.C. RIBEIRO, L.F., BRACARENSE, A.Q., PESSOA, E.C.P., LIU,S. **Efeito do teor de carbono do metal de base e da alma do eletrodo revestido sobre a porosidade em soldas molhadas**. Soldagem & Inspeção, vol.15, no2, São Paulo, 2010.

BRACARENSE, A. Q., PESSOA, E. C., SANTOS, V.R. DOS, MONTEIRO, M. J, RIZZO, F. C., PACIONIK, S., REPPOLD, R., DOMINGUES, J.R., VIEIRA, L. A. **Estudo comparativo de eletrodos comerciais para soldagem subaquática molhada**. Soldagem & Inspeção, vol.15, no 4, São Paulo, 2010.

BRACARENSE, A. Q. **The crater at the end of weld bead**. International Conference on the Joining of Materials, JOM-8 v.1. Helsingor-DNK, p. 513-526 1997.

FILHO, J.C.P., MELLO, R.T., MEDEIROS, R.C., PARANHOS, R. Histórico recente da soldagem subaquática. Infosolda. Disponível em: <www.infosolda.com.br/new_site/getFile.php?t=d&i=96>. Acesso em 8 set. 2011, 16:20:13.

FUKUOKA, T., FUKUI, S. **Analysis for cooling process os underwater – Comparison with welding in air**. Bulletin of the M.E.S.J., vol.22, no 2, Kobe-JPN, 1993.

JOSHI, A.M. **Underwater Welding**. Metal Web News. Disponível em: <<http://www.metalwebnews.com/howto/underwater-welding/underwater-welding>>. Acesso em 27 jul. 2012, 22:26:13.

LABANOWSKI, J., FYDRYCH, G., ROGALSKI, G. **Underwater Welding – A review**. Advances in materials science, Vol 8, no3(17), Gdansk-POL, 2008.

LIU, S. POPE, A.M. DAEMEN, R. **Welding consumables and weldability**. International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures. New Orleans, LA – USA. 1994.

MASUBUCHI, K. **Review of underwater welding technology**. Oceans 81. Boston – Ma – USA. p.649-651, 1981

PESSOA, E. C. P., **Estudo da variação da porosidade ao longo do cordão em soldas subaquáticas molhadas**. Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil, Tese, 2007.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

POPE, A.M., MEDEIROS, R. C. de, LIU, S. **Solidification of Underwater wet Welds.** OMAE, Materials Engineering, pp 517-521, 1995.

TEICHMANN, E. W. **Contribuição ao desenvolvimento da soldagem molhada com arames tubulares.** Universidade Federal de Santa Catarina. Brasil, Tese, 2000.

TSAI, C. L. MASUBUCHI, K. **Interpretive Report on Underwater Weldng.** Welding Research Council Bulletin, 224, February, 37pg, 1977.

TSAI, C. L. MASUBUCHI, K. **Mechanisms of rapid cooling and their design considerations in underwater welding.** Offshore Technology Conference. Houston- TX – USA. 1979.

VILLANI, P.M., MODENESI,P.J., BRACARENSE, A.Q. **Soldagem, fundamentos e tecnologia.** 2ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG 2007. 362p.

APÊNDICE A – SINAIS ELÉTRICOS

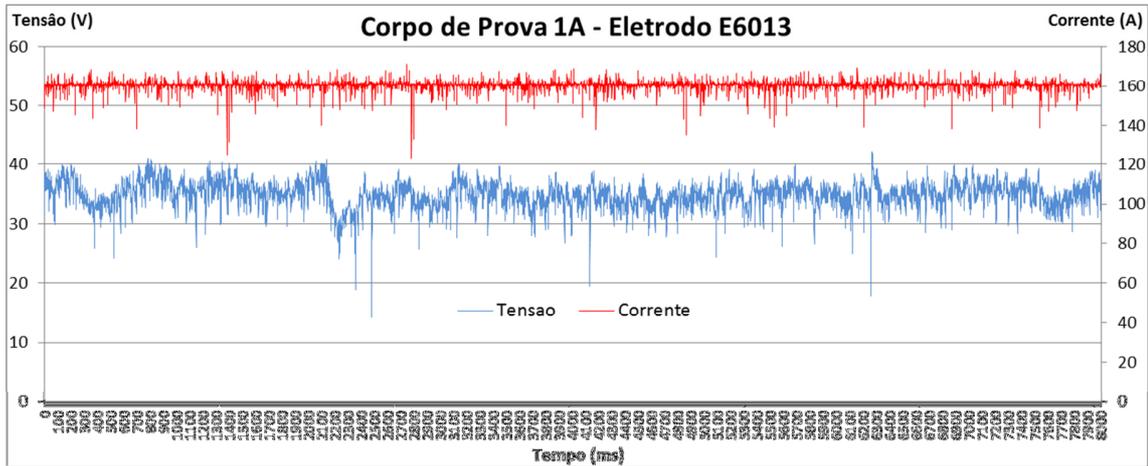


Figura A 1 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 1A

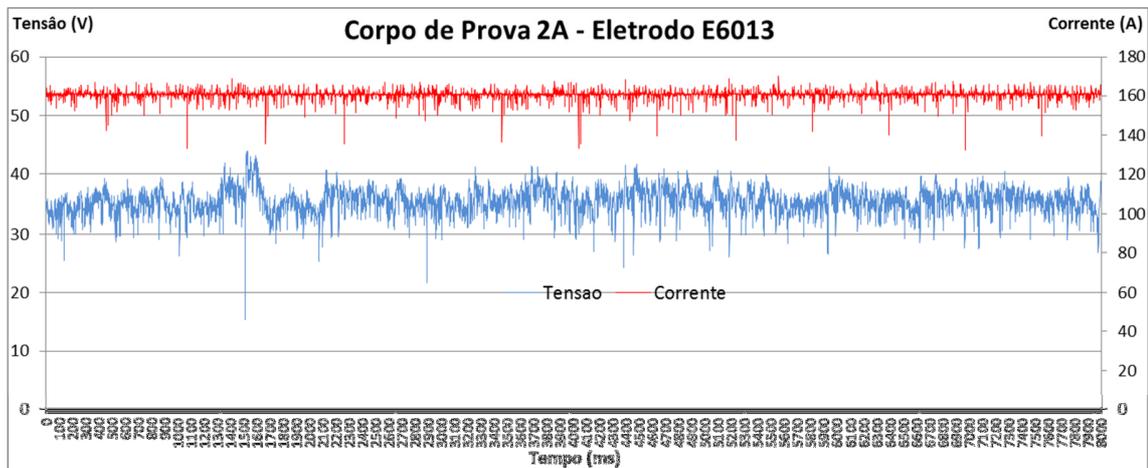


Figura A 2 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 2A

APÊNDICE A – SINAIS ELÉTRICOS

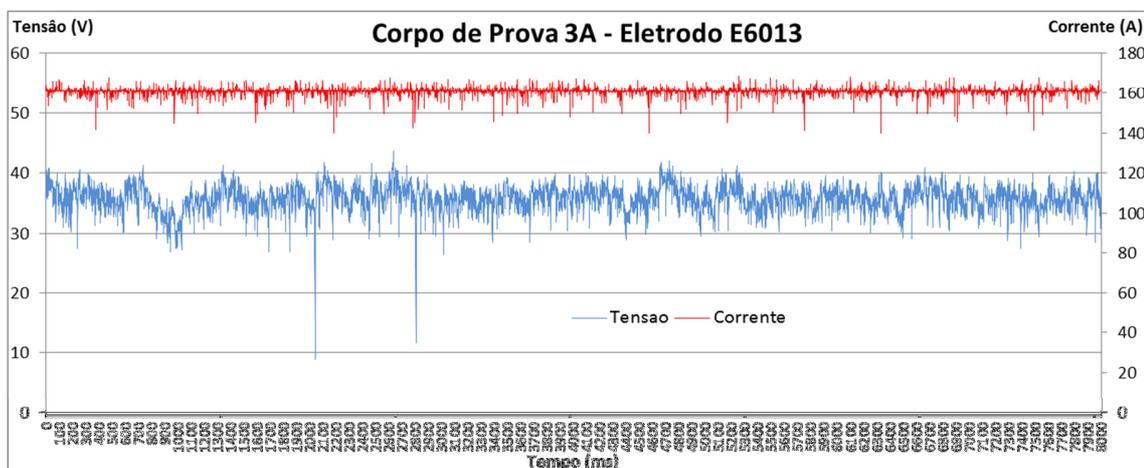


Figura A 3 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 3A

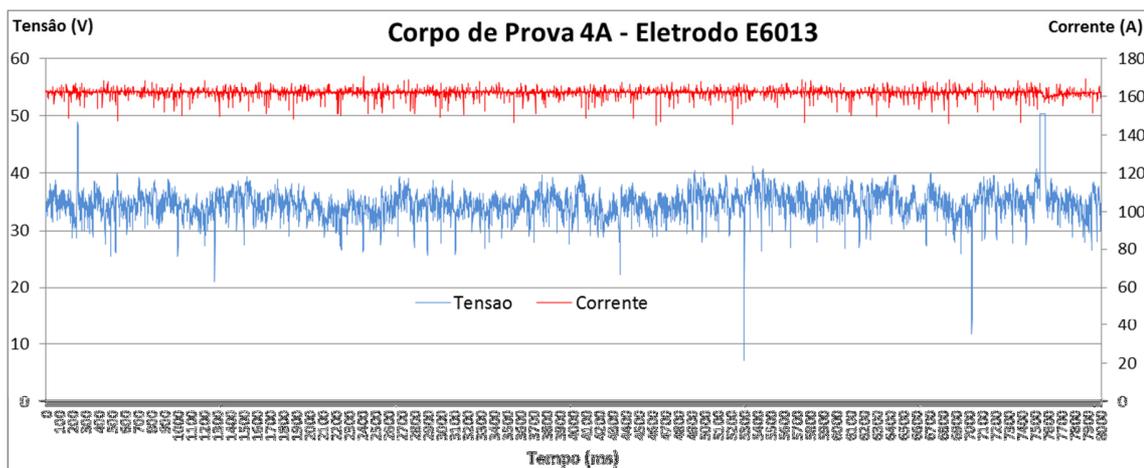


Figura A 3 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 4A

APÊNDICE A – SINAIS ELÉTRICOS

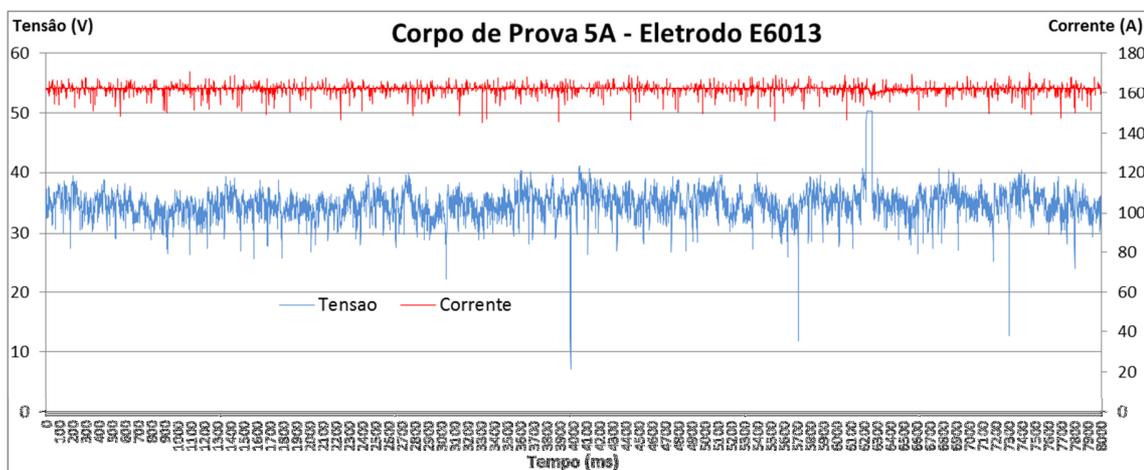


Figura A 4- Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 5A

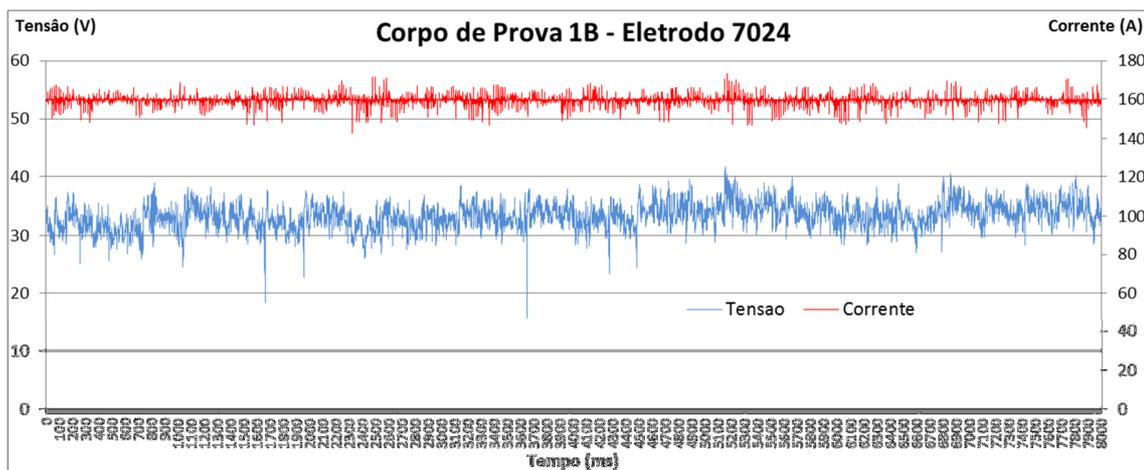


Figura A 5 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 1B

APÊNDICE A – SINAIS ELÉTRICOS

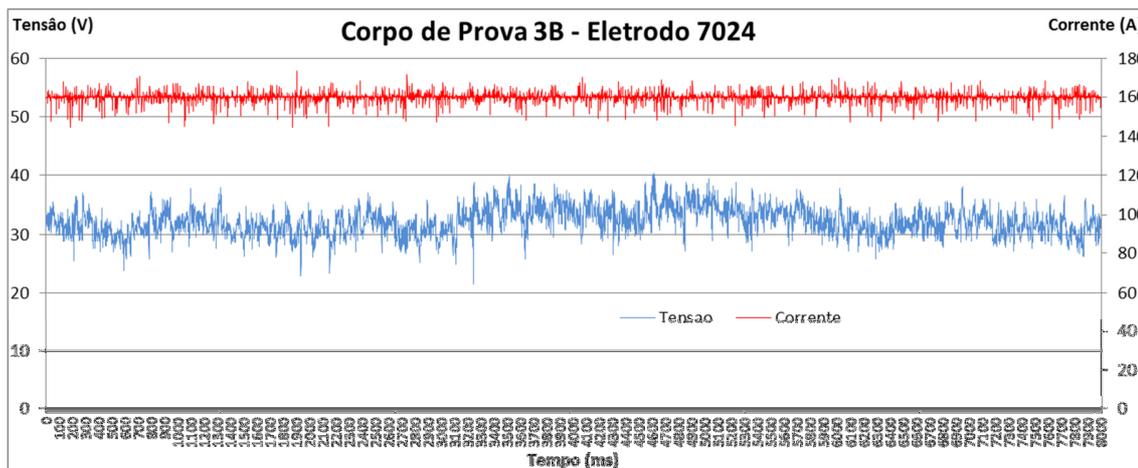


Figura A 6 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 3B

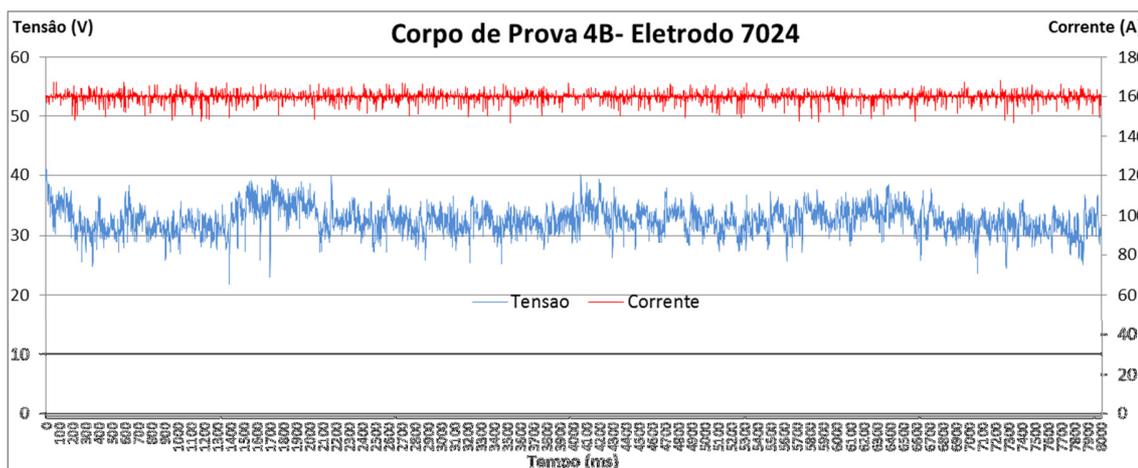


Figura A 7 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 4B

APÊNDICE A – SINAIS ELÉTRICOS

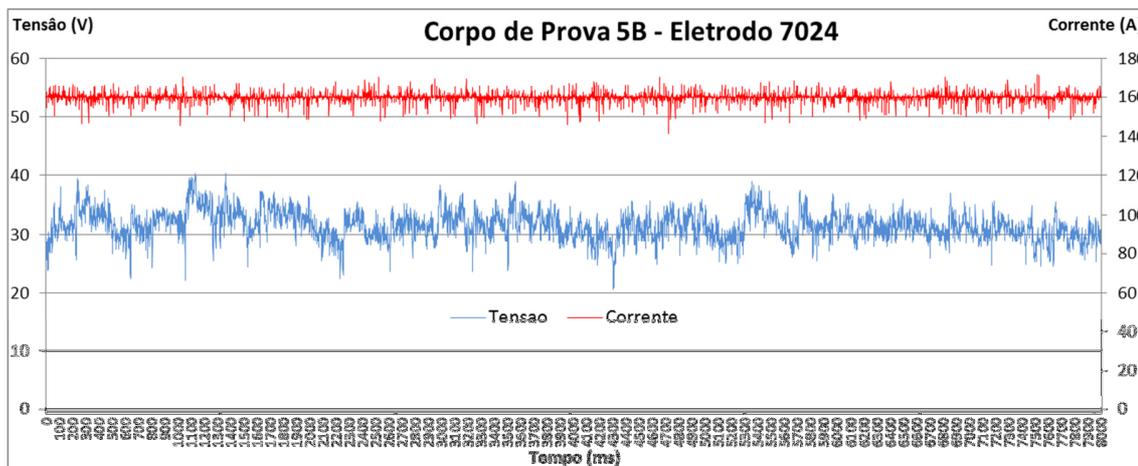


Figura A 8 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 5B

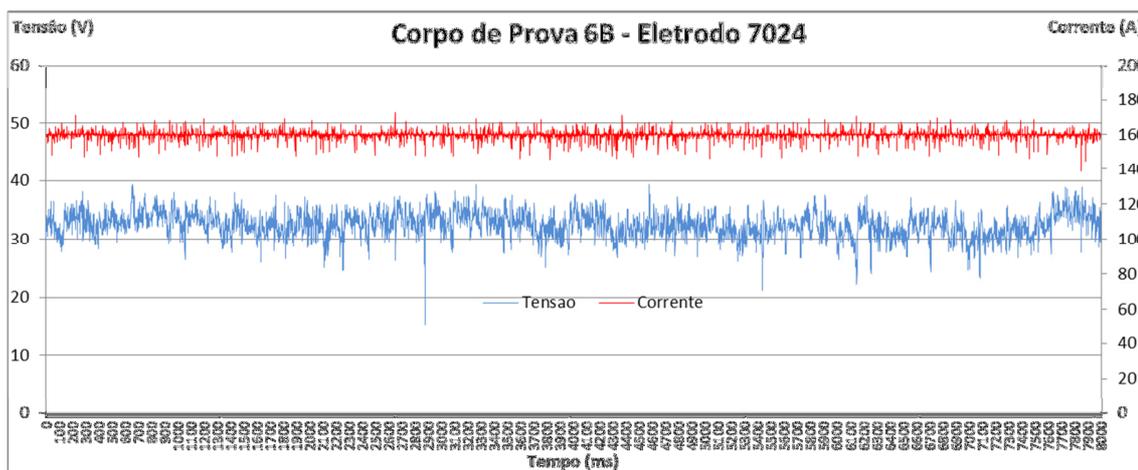


Figura A 9 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 6B

APÊNDICE A – SINAIS ELÉTRICOS

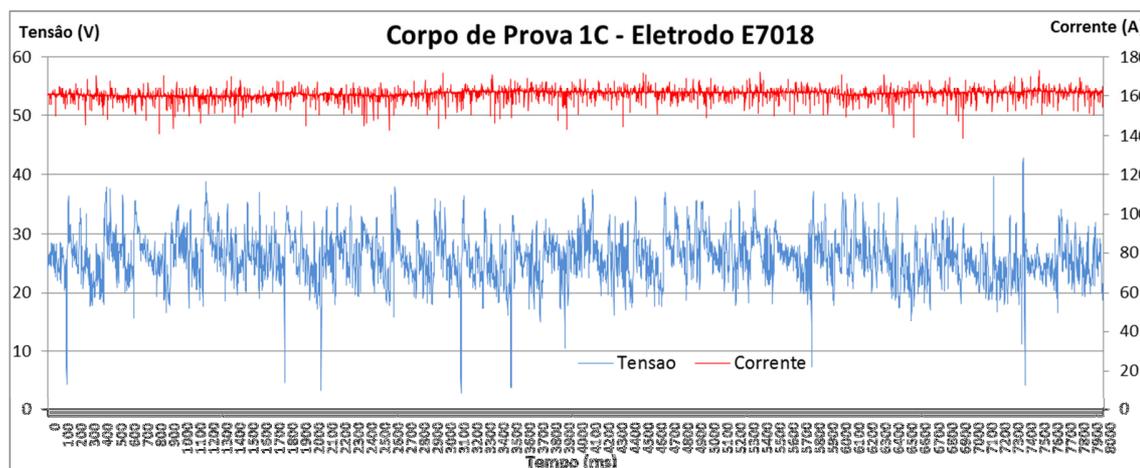


Figura A 10 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 1C

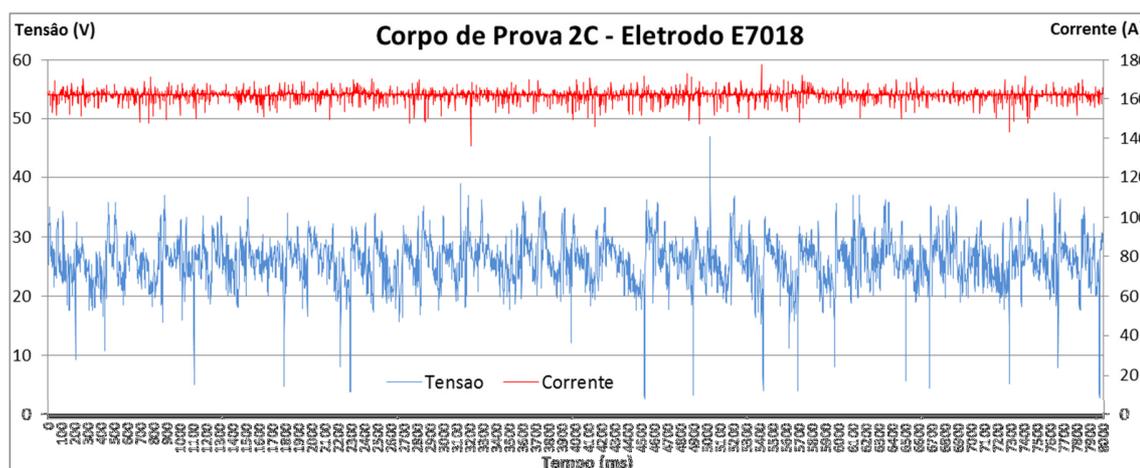


Figura A 11 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 2C

APÊNDICE A – SINAIS ELÉTRICOS

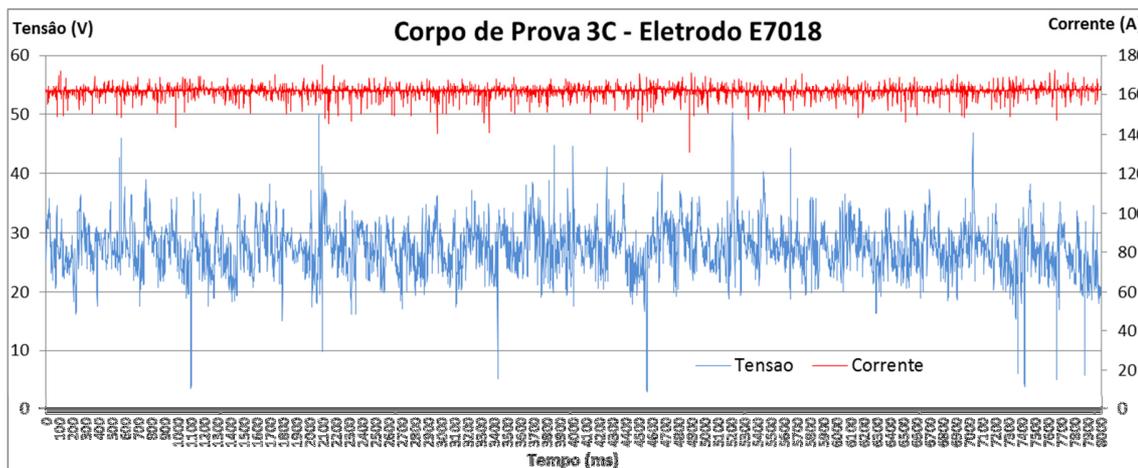


Figura A 12 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 3C

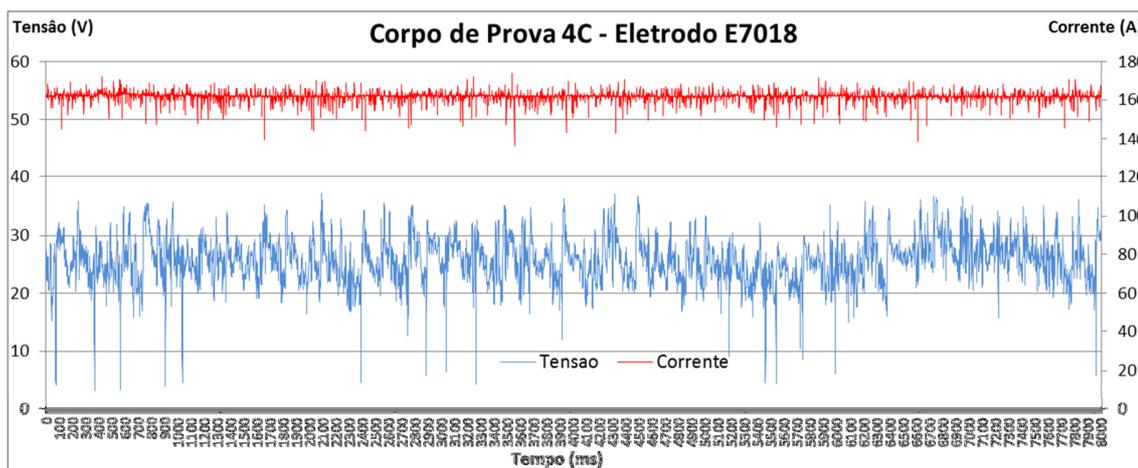


Figura A 13 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 4C

APÊNDICE A – SINAIS ELÉTRICOS

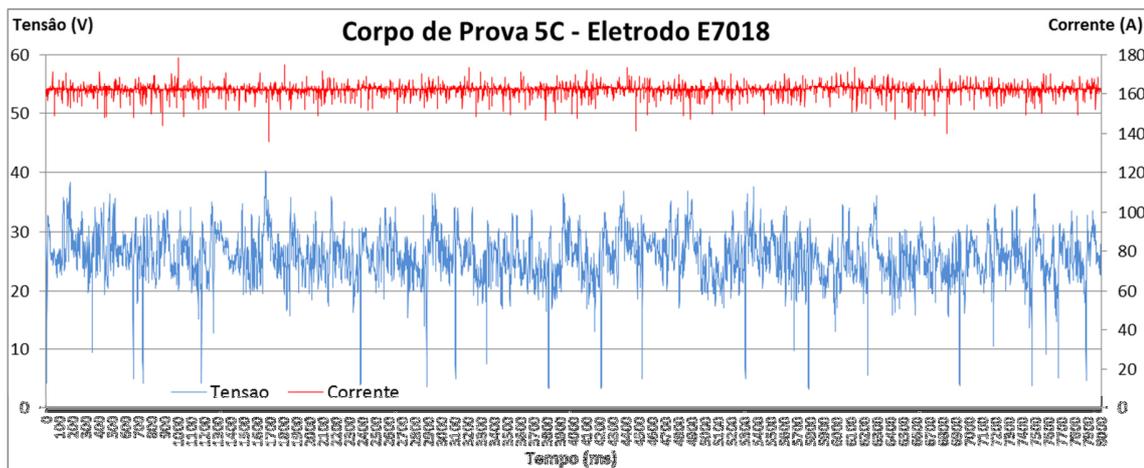


Figura A 14 - Corrente e Tensão ao longo do tempo - Corpo de Prova 5C

APÊNDICE B - MACROGRAFIAS

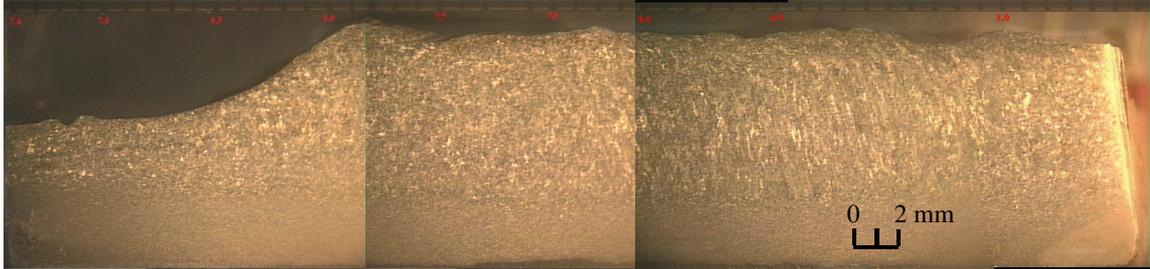


Figura A 15 - Macrografia corpo de prova 1A

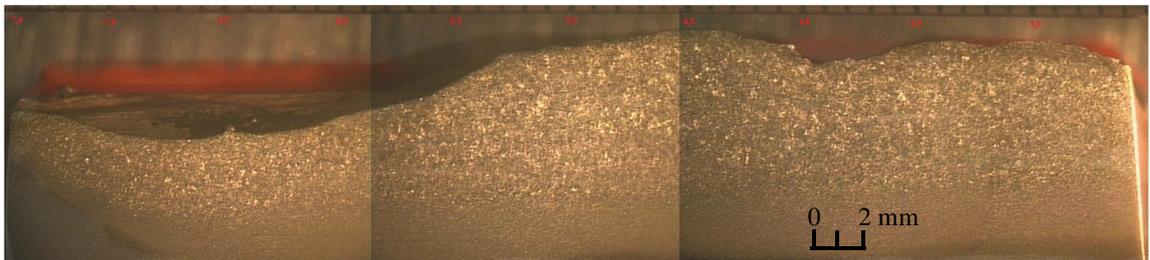


Figura A 16 - Macrografia corpo de prova 2A

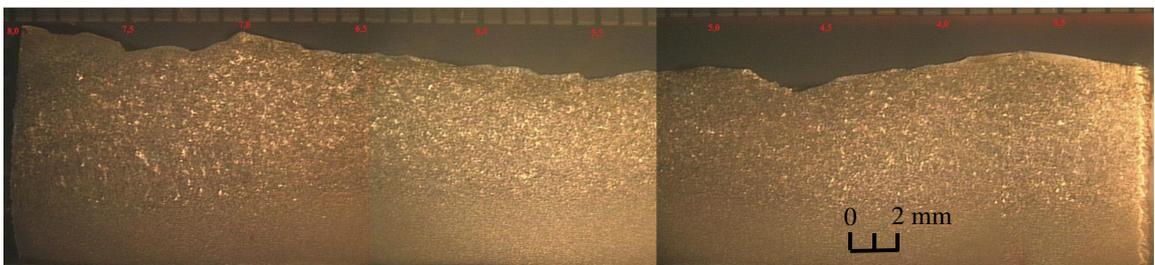


Figura A 17 - Macrografia corpo de prova 3A

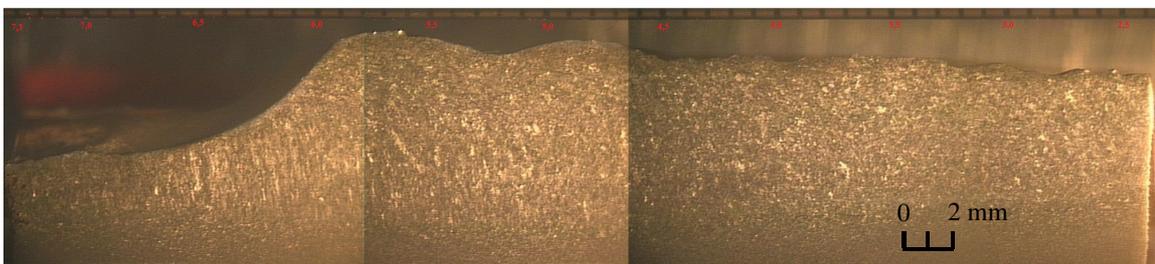


Figura A 18 - Macrografia corpo de prova 4A

APÊNDICE B - MACROGRAFIAS

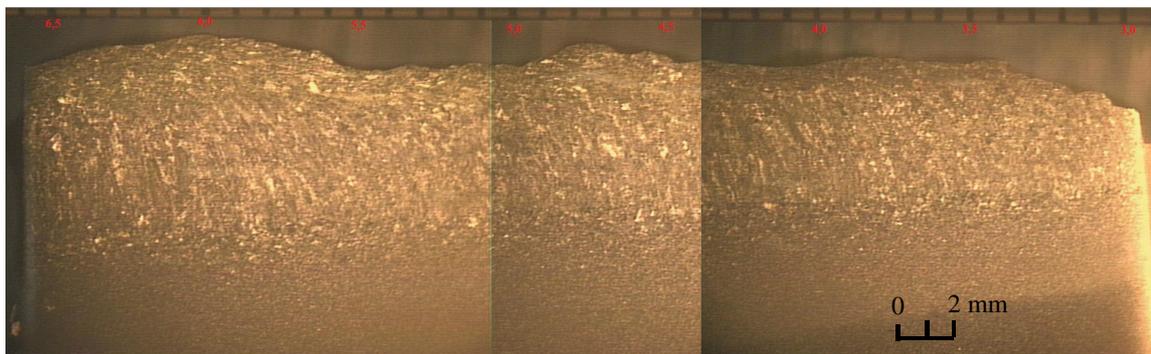


Figura A 19 - Macrografia corpo de prova 1B

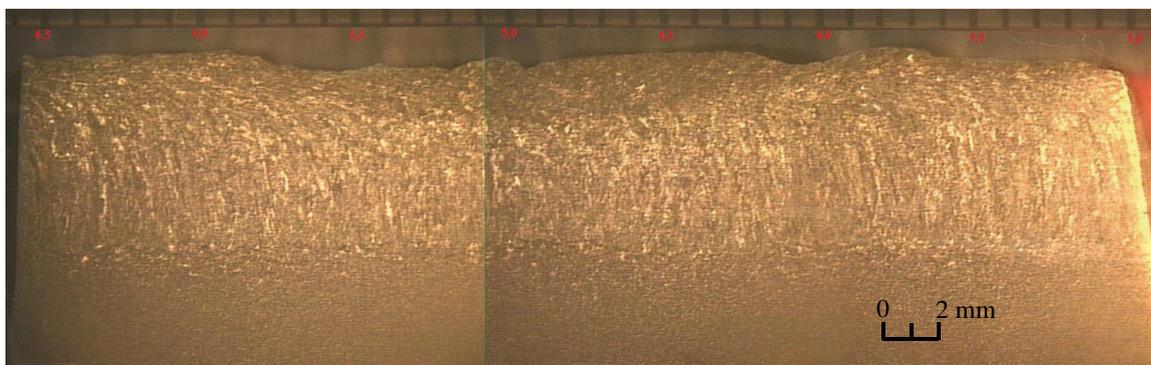


Figura A 20 - Macrografia corpo de prova 3B

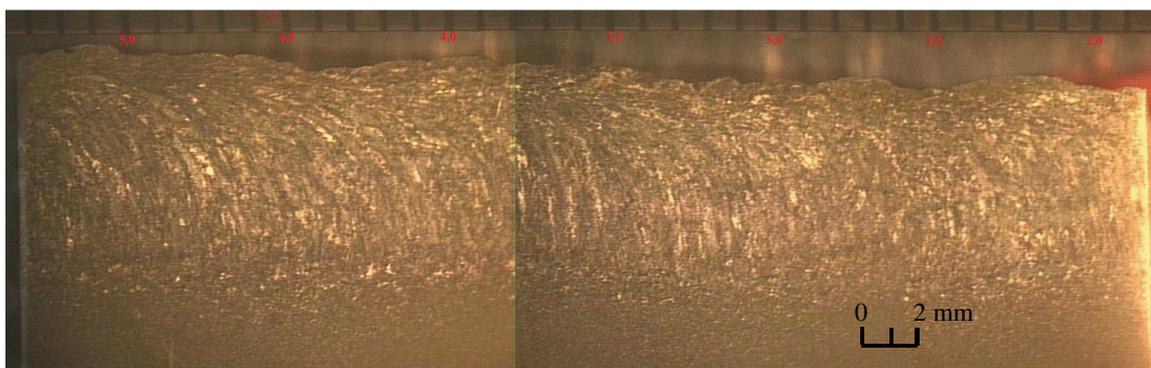


Figura A 21 - Macrografia corpo de prova 4B

APÊNDICE B - MACROGRAFIAS

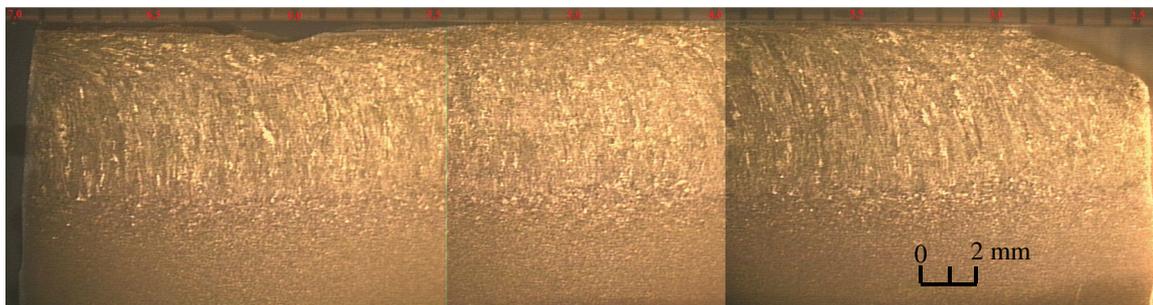


Figura A 22 - Macrografia corpo de prova 5B

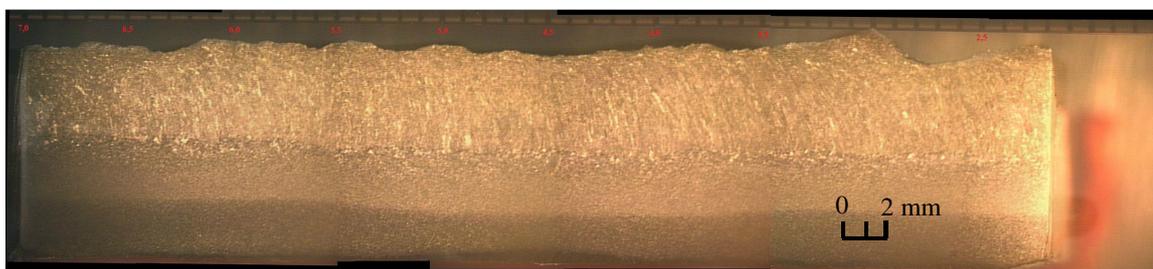


Figura A 23 - Macrografia corpo de prova 1C

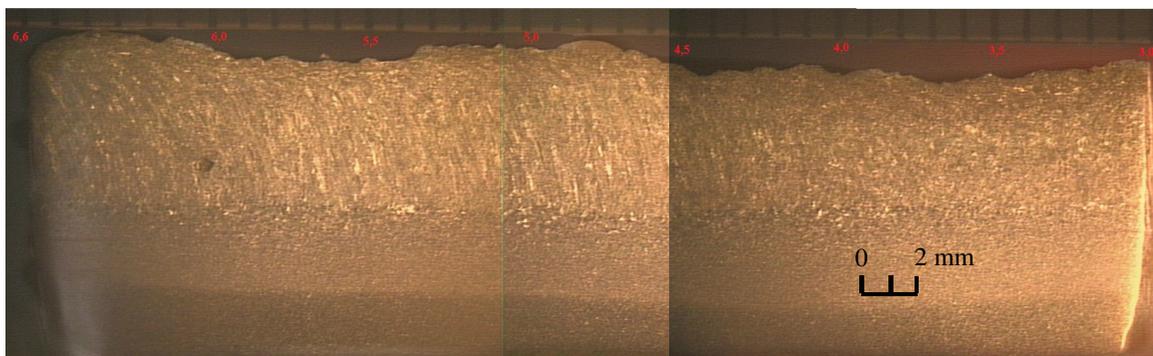


Figura A 24 - Macrografia corpo de prova 3C

APÊNDICE B - MACROGRAFIAS

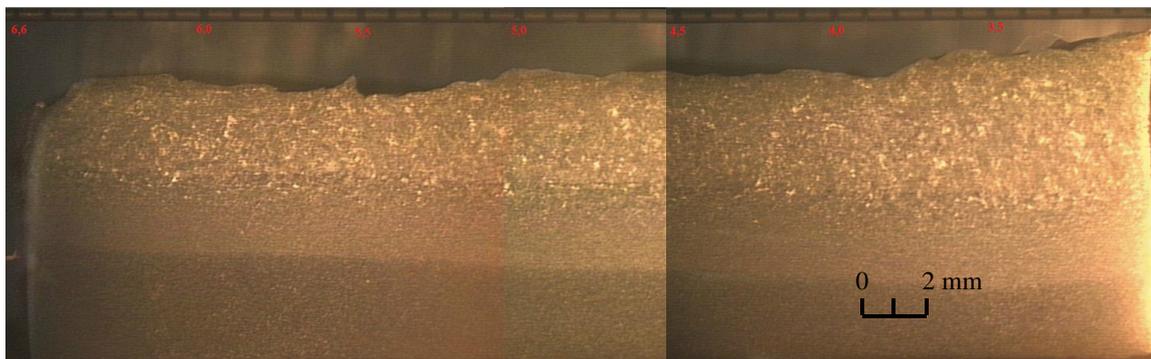


Figura A 25 - Macrografia corpo de prova 4C

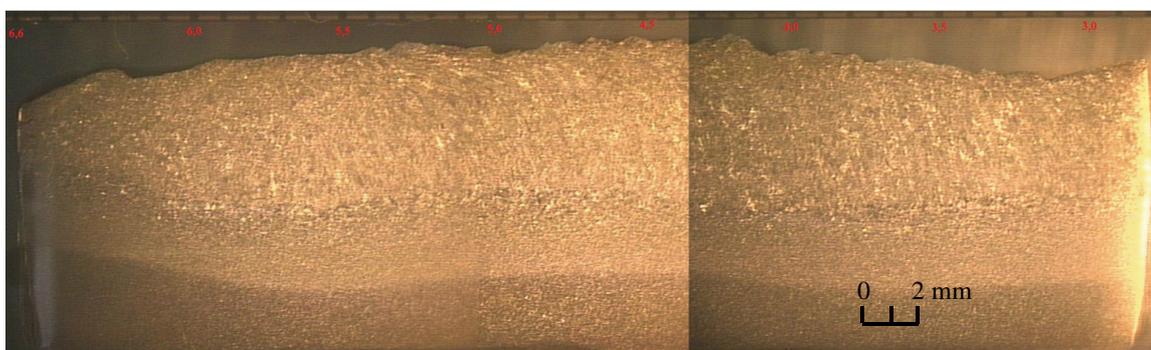


Figura A 26 - Macrografia corpo de prova 5C

APÊNDICE C – MACROGRAFIA VS SINAIS ELÉTRICOS

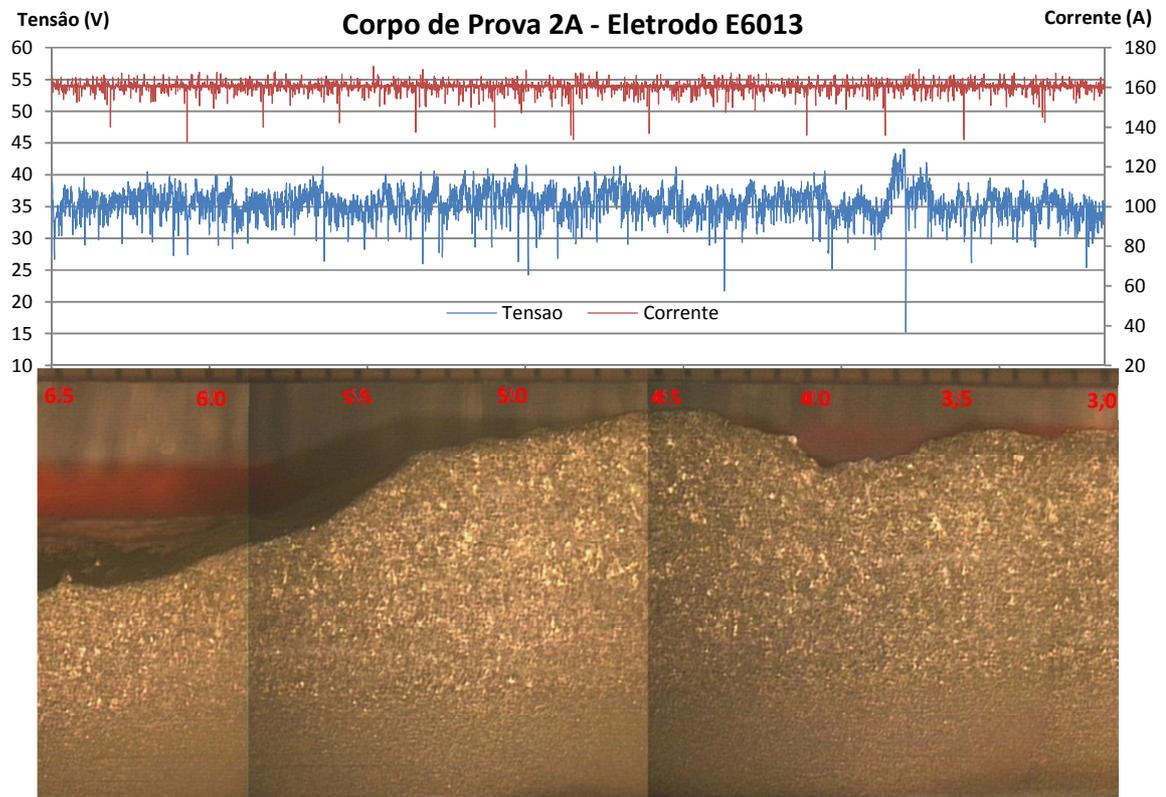


Figura A 27 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 2A

APÊNDICE C – MACROGRAFIAS VS SINAIS ELÉTRICOS

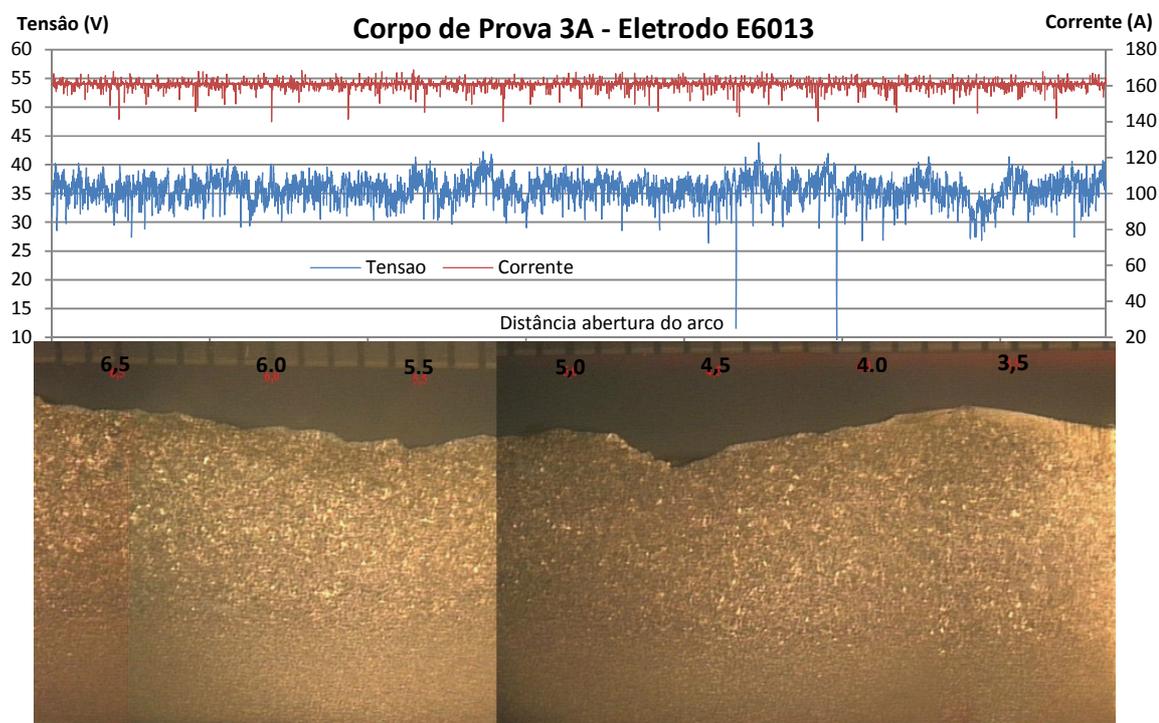


Figura A 28 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 3A

APÊNDICE C – MACROGRAFIAS VS SINAIS ELÉTRICOS

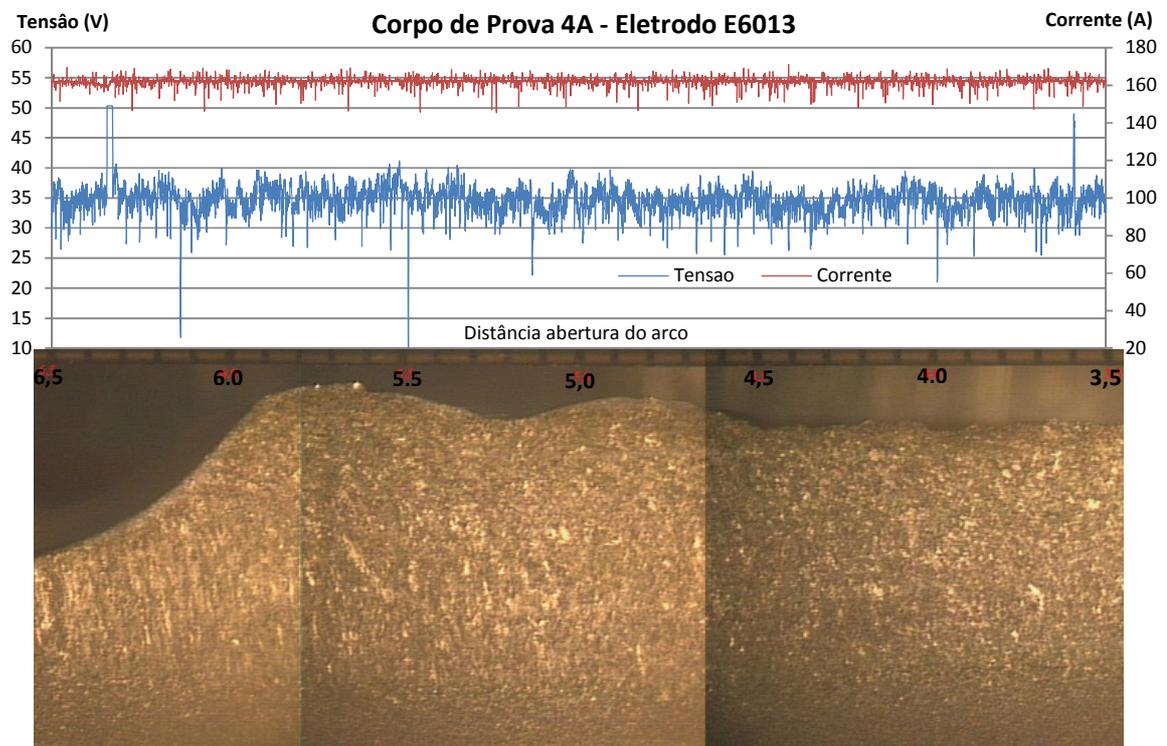


Figura A 29 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 4A

APÊNDICE C – MACROGRAFIAS VS SINAIS ELÉTRICOS

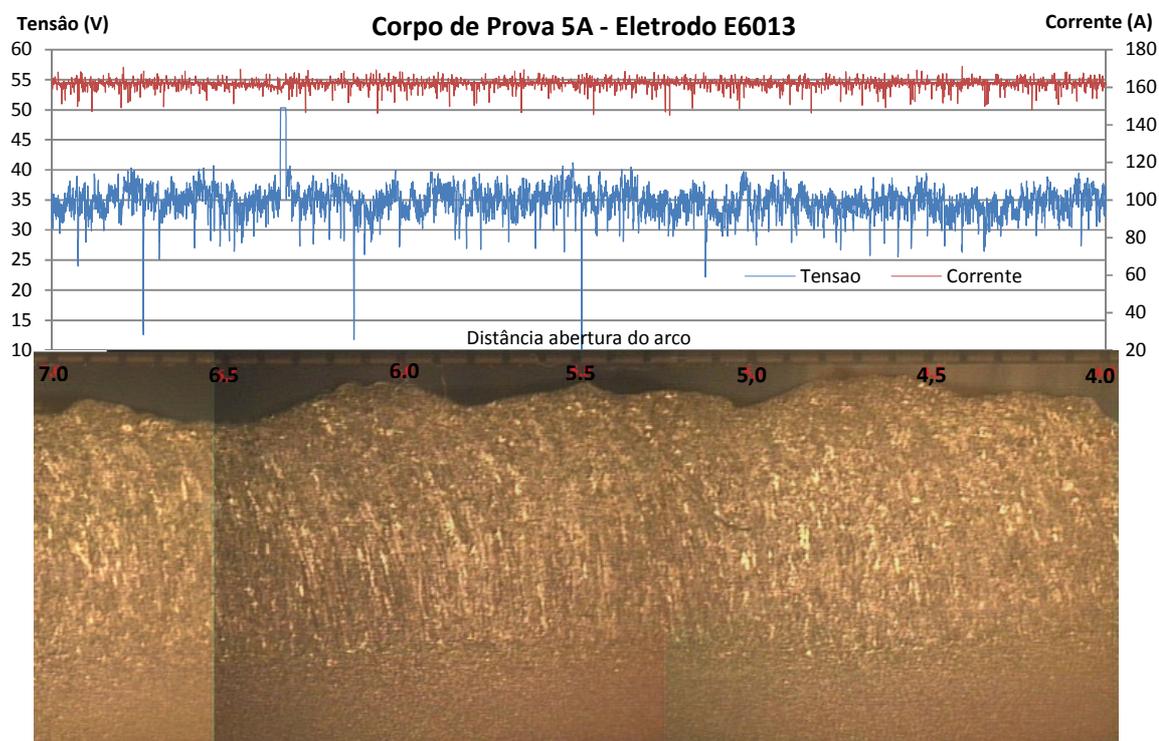


Figura A 30 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 5A

APÊNDICE C – MACROGRAFIAS VS SINAIS ELÉTRICOS

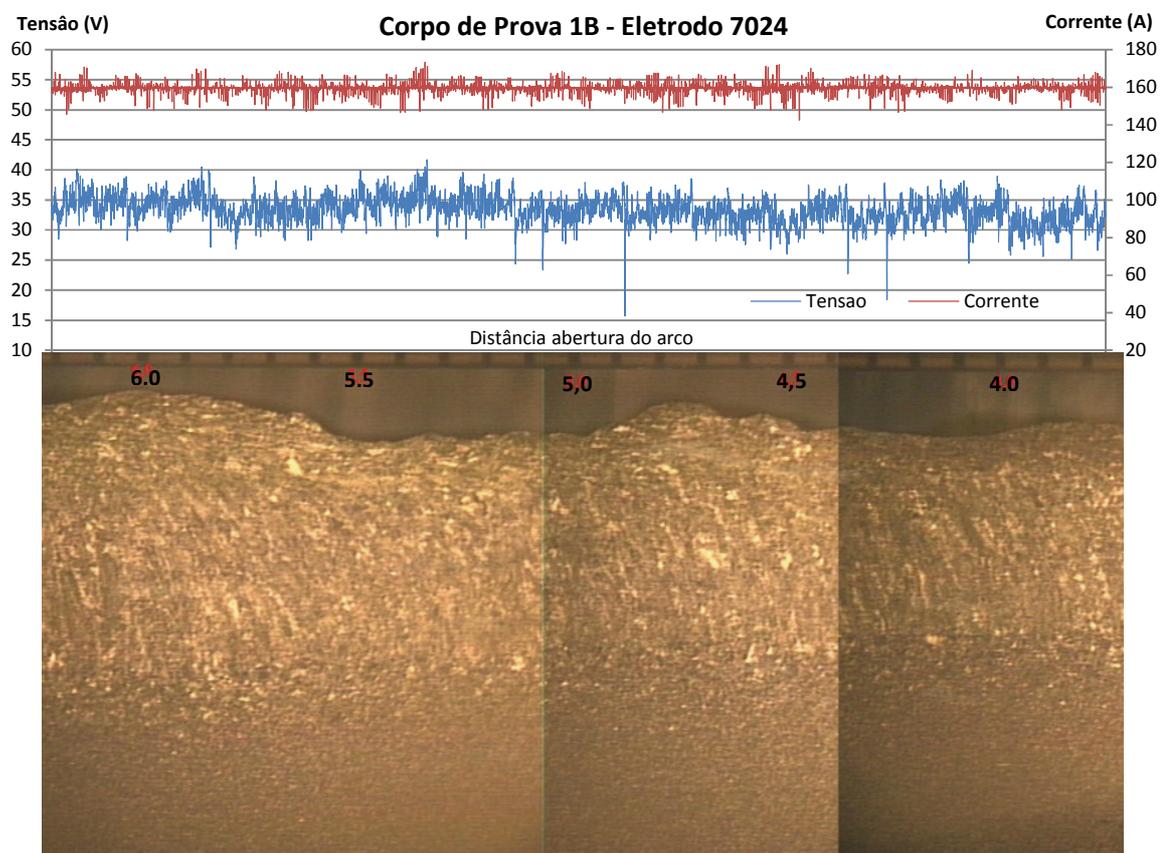


Figura A 31 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 1B

APÊNDICE C – MACROGRAFIAS VS SINAIS ELÉTRICOS

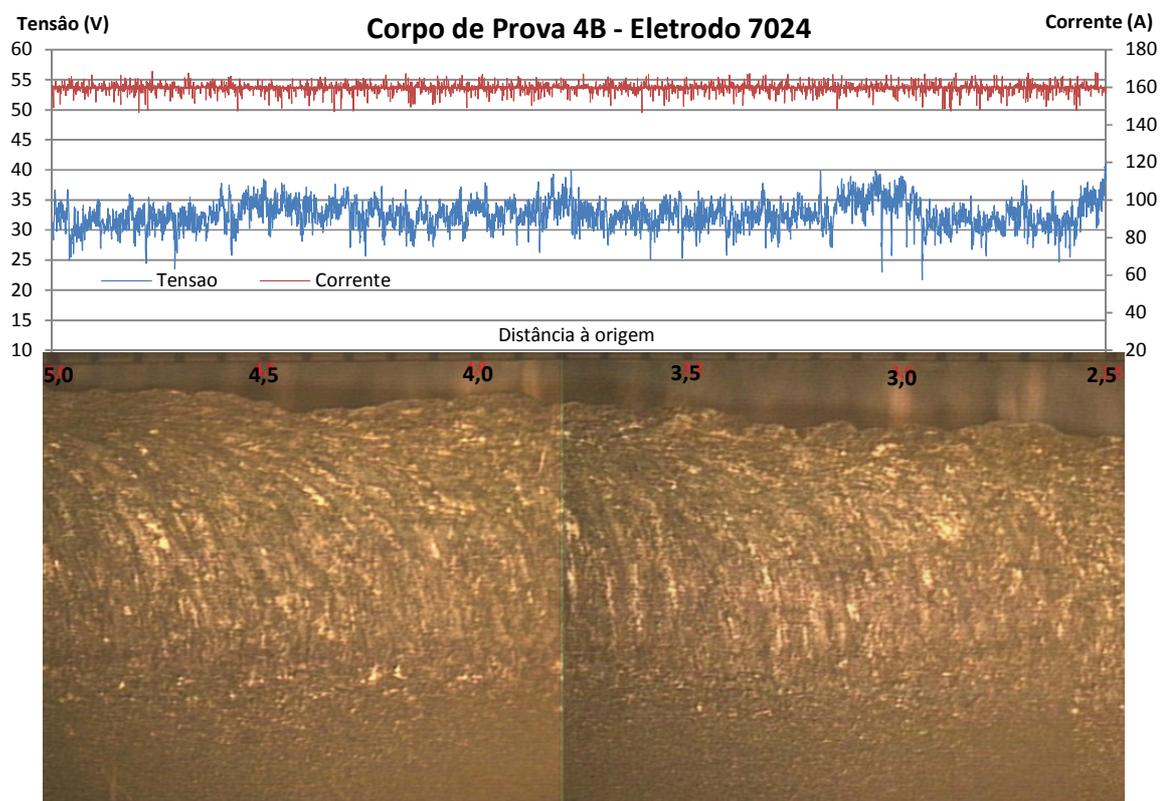


Figura A 32 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 4B

APÊNDICE C – MACROGRAFIAS VS SINAIS ELÉTRICOS

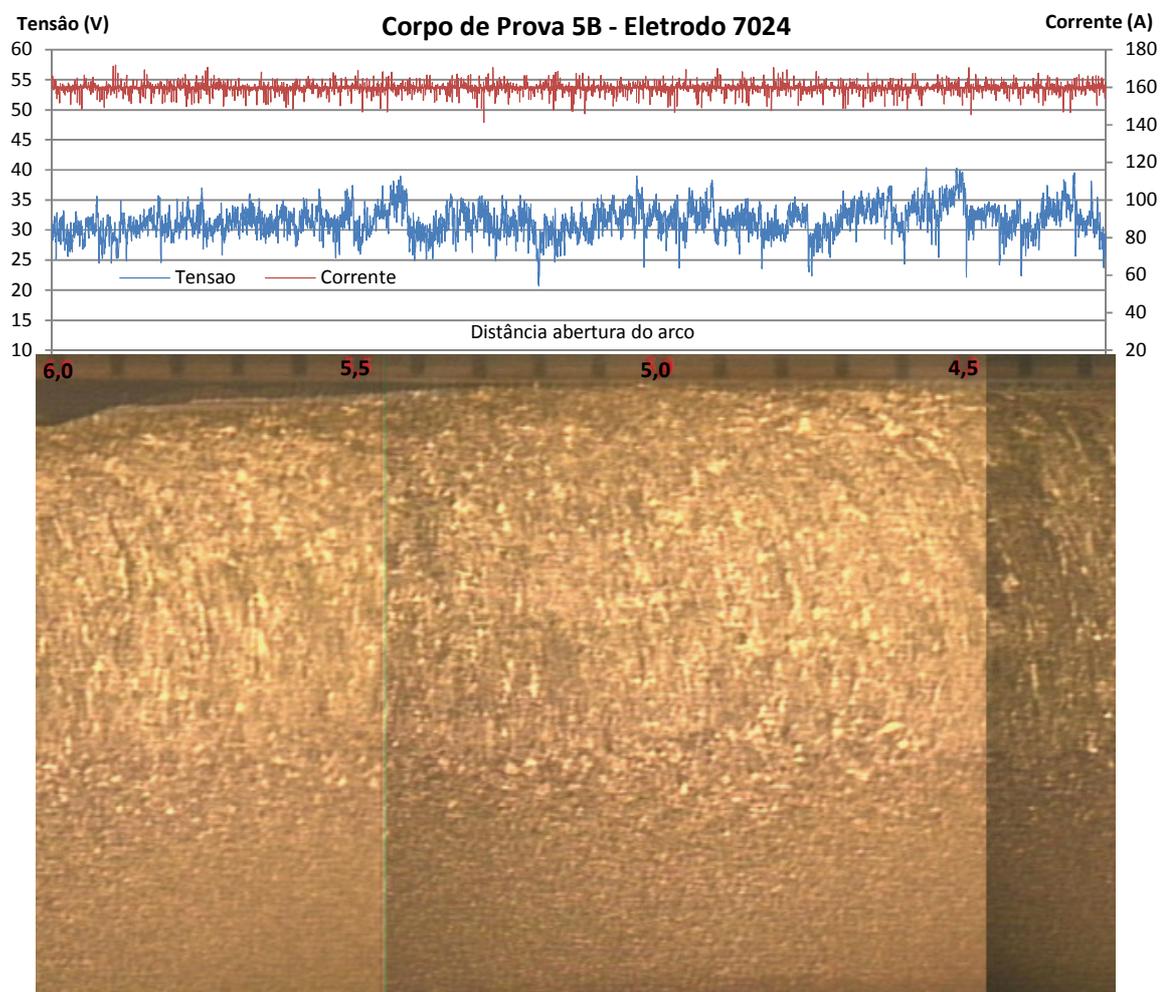


Figura A 33 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 5B

APÊNDICE C – MACROGRAFIAS VS SINAIS ELÉTRICOS

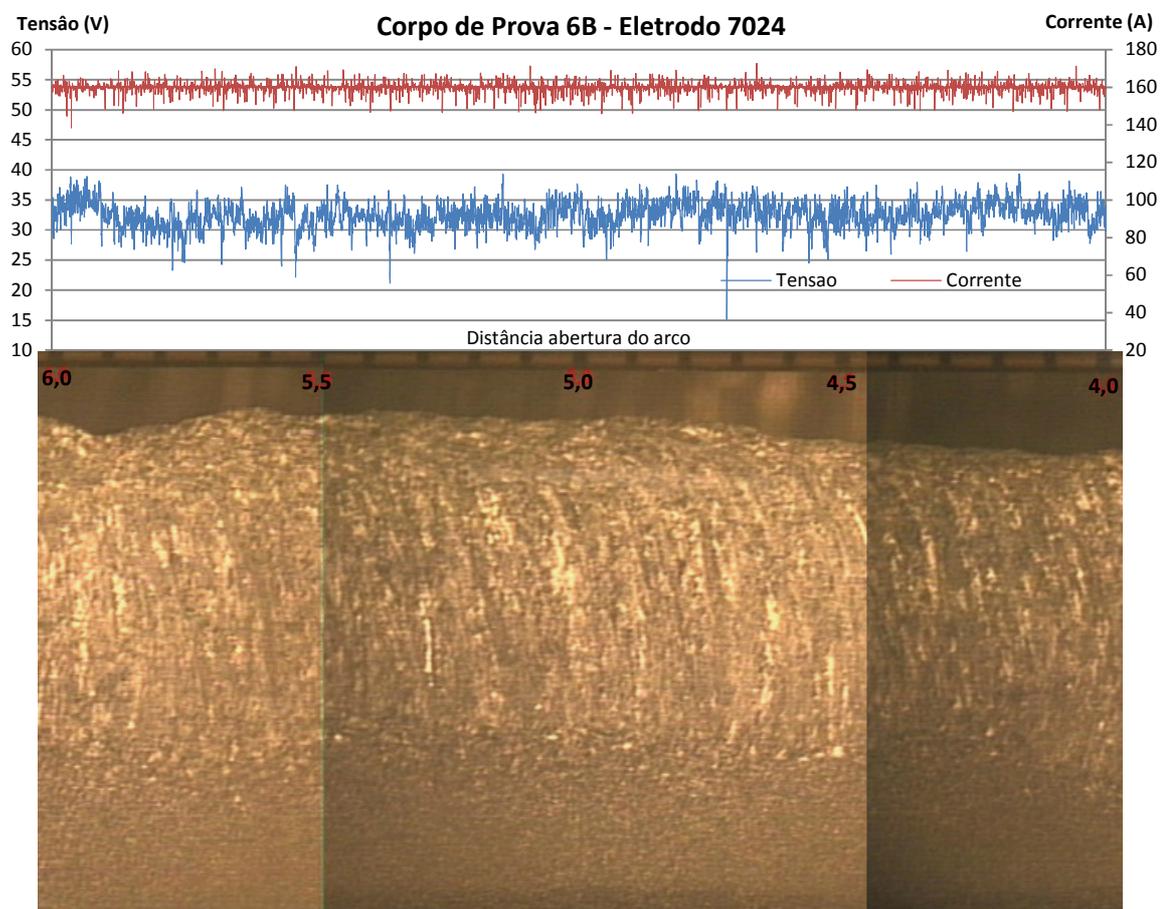


Figura A 34 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 6B

APÊNDICE C – MACROGRAFIAS VS SINAIS ELÉTRICOS

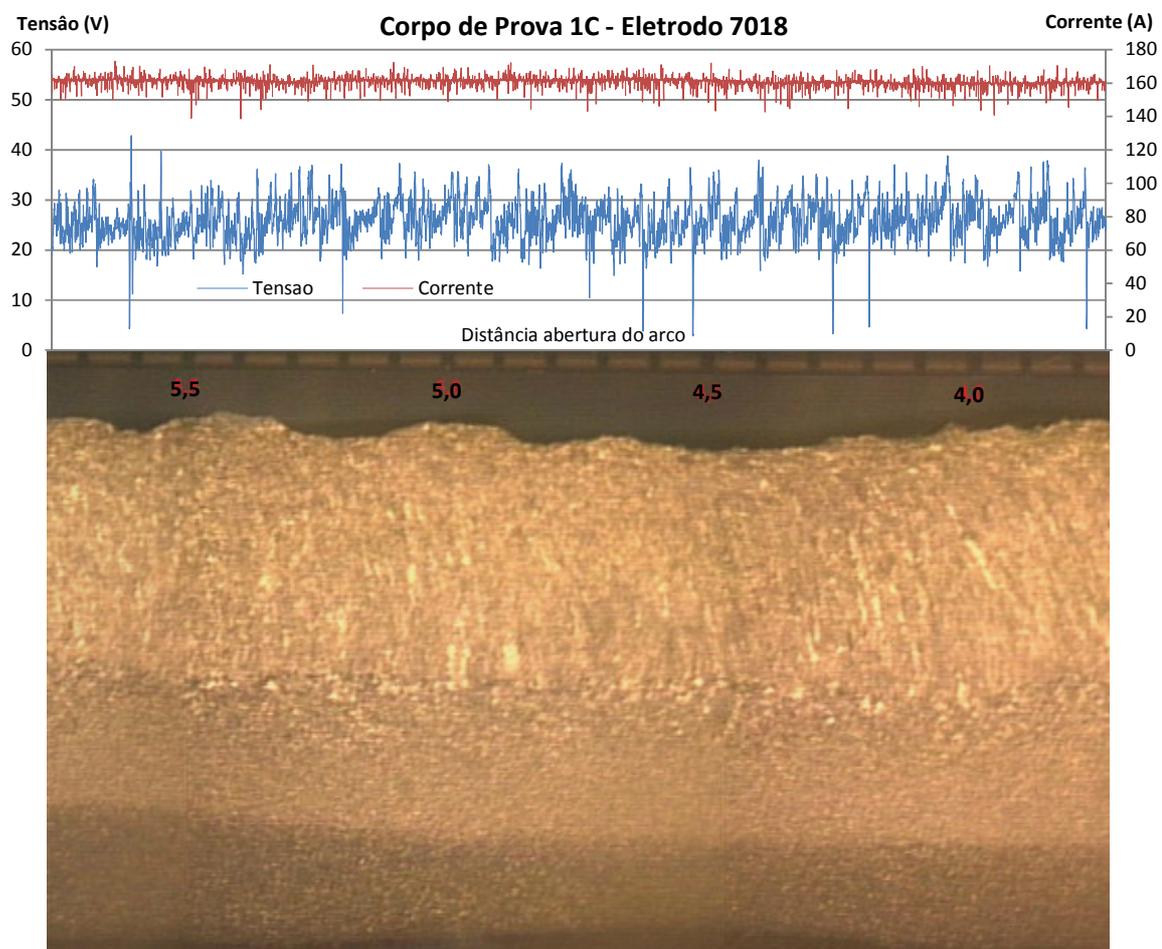


Figura A 35 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 1C

APÊNDICE C – MACROGRAFIAS VS SINAIS ELÉTRICOS

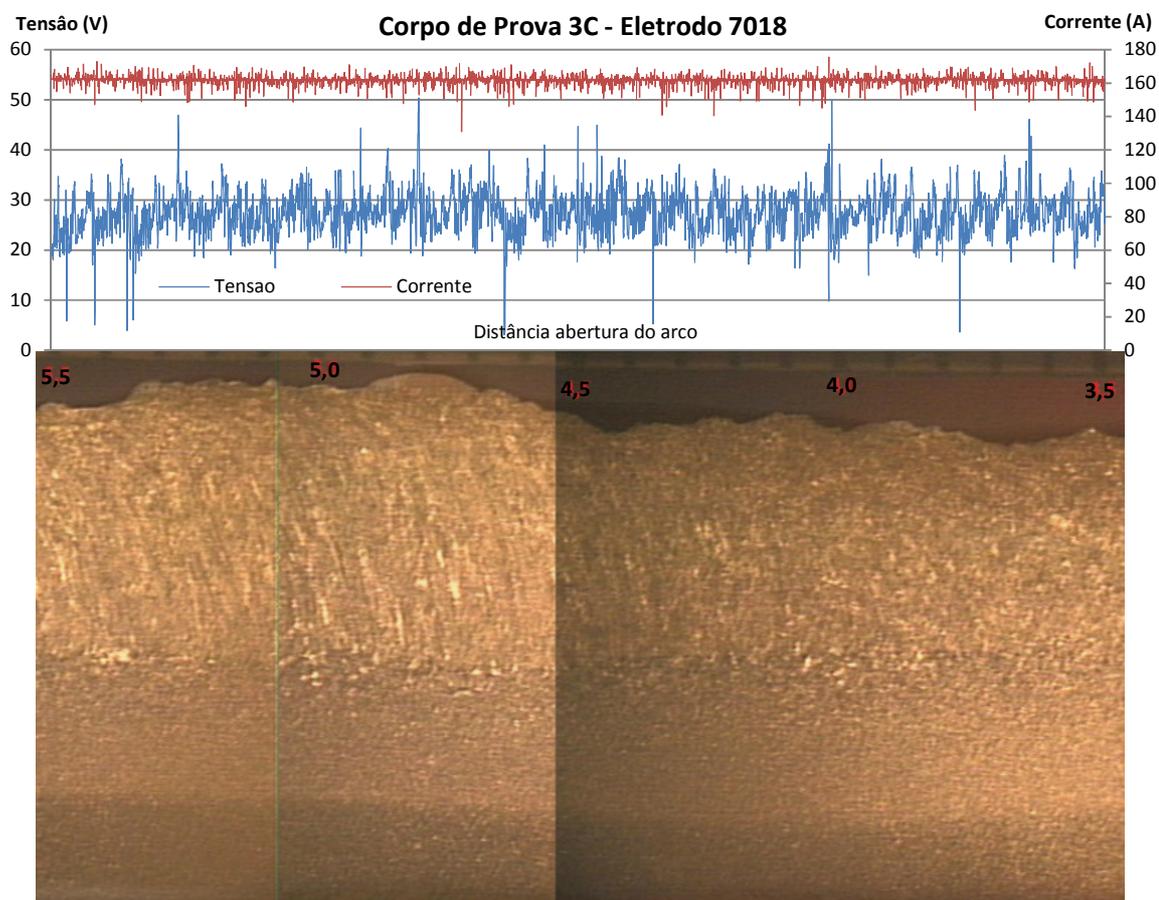


Figura A 36 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 3C

APÊNDICE C – MACROGRAFIAS VS SINAIS ELÉTRICOS

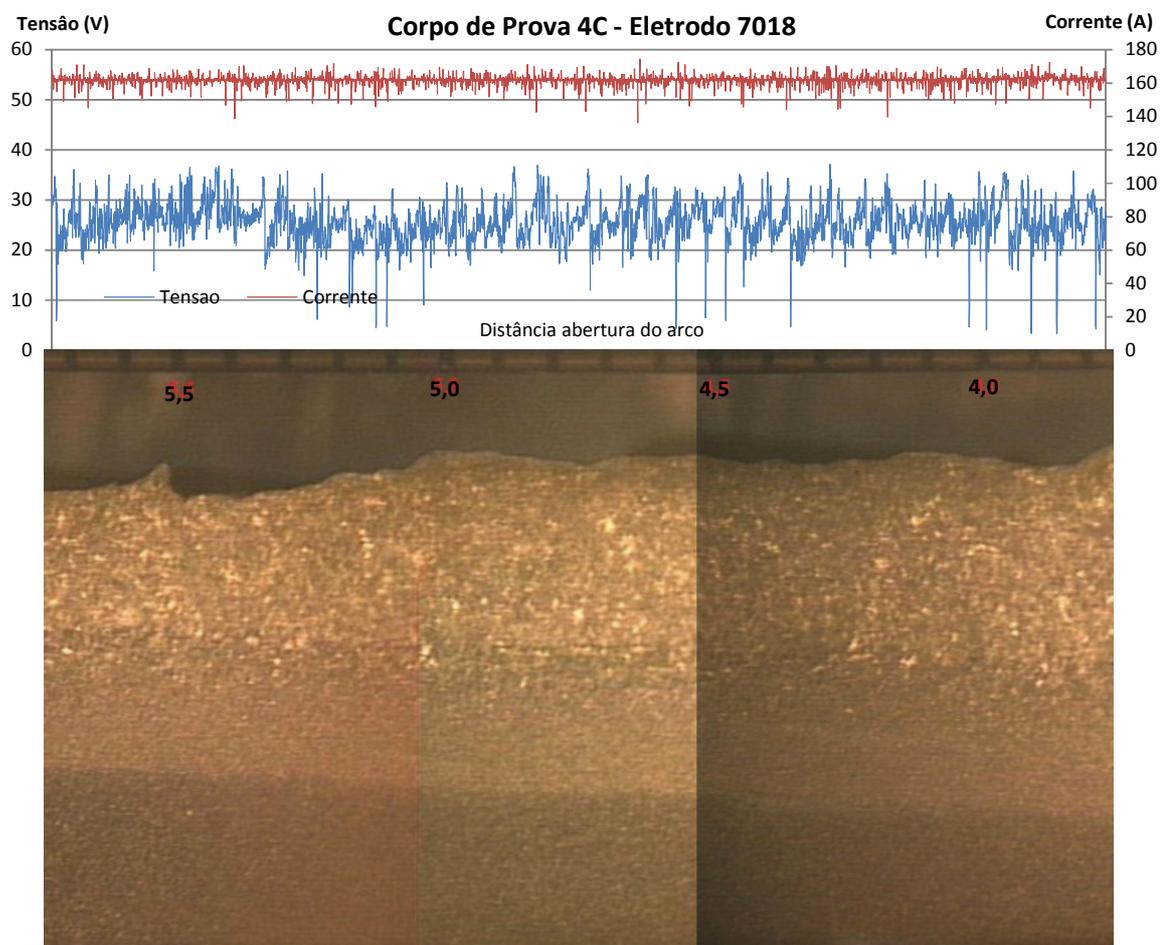


Figura A 37 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 4C

APÊNDICE C – MACROGRAFIAS VS SINAIS ELÉTRICOS

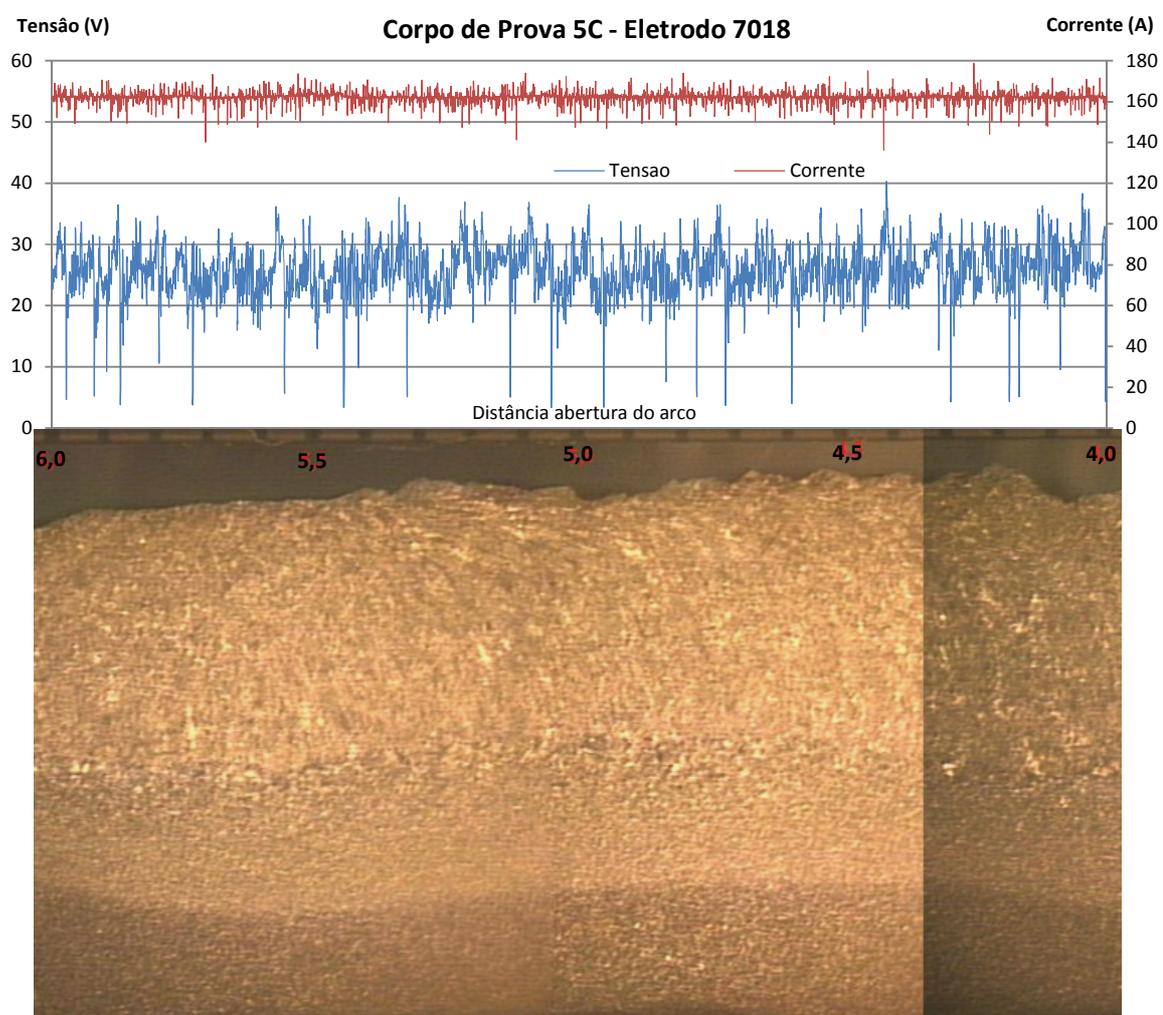


Figura A 38 - Foto do metal de solda com o gráfico dos sinais elétricos para o corpo de prova 5C