



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

**EFEITO DA POLARIDADE SOBRE A  
MORFOLOGIA E ESTABILIDADE DE SOLDAS  
SUBAQUÁTICAS MOLHADAS COM  
ELETRODOS E6013 E WW70**

**ANDRÉS MAURICIO MORENO URIBE**

**Belo Horizonte, 9 de fevereiro de 2018**

Andrés Mauricio Moreno Uribe

**EFEITO DA POLARIDADE SOBRE A  
MORFOLOGIA E ESTABILIDADE DE SOLDAS  
SUBAQUÁTICAS MOLHADAS COM  
ELETRODOS E6013 E WW70**

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: PhD Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais.

Coorientador: PhD Ezequiel Caires Pereira Pessoa

Instituto Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2018

M843e

Moreno Uribe, Andrés Maurício.

Efeito da polaridade sobre a morfologia e estabilidade de soldas subaquáticas molhadas com eletrodos E6013 e WW70 [manuscrito] / Andrés Maurício Moreno Uribe. – 2018.  
140 f., enc.: il.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

Coorientador: Ezequiel Caires Pereira Pessoa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui anexos e apêndices.

Bibliografia: f. 133-138.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem subaquática - Teses. 3. Eletrodos - Teses. 4. Estabilidade - Teses. I. Bracarense, Alexandre Queiroz, 1959-. II. Pessoa, Ezequiel Caires Pereira. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621(043)



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

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG  
Tel.: +55 31 3409.5145  
E-mail: [cpgmec@demec.ufmg.br](mailto:cpgmec@demec.ufmg.br)

**"EFEITO DA POLARIDADE SOBRE A MORFOLOGIA E  
ESTABILIDADE DE SOLDAS SUBAQUÁTICAS MOLHADAS COM  
ELETRODOS E6013 E WW70"**

**ANDRÉS MAURICIO MORENO URIBE**

Dissertação submetida à 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 "**Engenharia de Manufatura e Materiais**".


Dissertação aprovada no dia 09 de fevereiro de 2018.

Por:

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Alexandre Queiroz Bracarense**  
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Ezequiel Caires Pereira Pessoa**  
Coorientador - Instituto Federal de Minas Gerais

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Cláudio Turani Vaz**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Ariel Rodriguez Arias**  
Universidade Federal de Itajubá

Para todos aqueles que o destino e a vida  
os fez encher uma mala com sonhos  
e sair em busca de novos caminhos.

## AGRADECIMENTOS

Para o Deus da minha avó, aquele que sempre me leva da mão e me lembra de casa e os meus. Obrigado pela persistência nos momentos em que mais precisei dela. Obrigado por cuidar de todos lá.

Aos meus pais, motivo das minhas conquistas e lutas, obrigado por sempre estar aqui. Isto é pra vocês: Dora e Humberto.

Ao meu Irmão, cuja presença foi a mais importante na época em que mais precisava dela. Obrigado por estar do meu lado sem importar as circunstâncias.

Aos meus familiares, obrigado pela força e as orações.

Á Rafa, pelo apoio e o sorriso.

Ao meu orientador, o Professor Alexandre Bracarense, porque sem me conhecer ou ter a mais mínima ideia de quem eu era, me aceitou no laboratório e me deu a oportunidade e a confiança de trabalhar com ele. Obrigado por tudo o que aprendi.

Ao meu Co – orientador, o Professor Ezequiel Pessoa, pela paciência infinita nestes dois anos e por todas as dicas que tão oportunamente enriqueceram o trabalho.

Ao Professor Paulo Modenesi, pela disposição para sempre discutir inúmeros assuntos e também, por tudo o ensinado.

Ao Gabriel, Nilo e Pedro, pela amizade e o trabalho sempre na procura do que está além.

Aos colegas do LRSS, em especial os professores Ariel, Claudio, Luciano, Marcelo, Bruno, Frank, Gedael, Mateusão, Diego, Diogo, Daisy, Marlom e também os do bandejão e zuera: Caroline Gonçalves, Fernando, Café, Henrique, Luana, Carolina Abreu, Sheron, Renata, Mila, Danielle, Joãuro, Matheus Pires, Fagner, Douglas, Luis, Luiz, Leandro Carvalho, Moara.

Aos Laboratoristas Samuel Lima de Difração de raios X e o senhor Armando de tratamentos minérios, por toda a ajuda.

Á galera da Colômbia, Juancho, Arturo, Camilo, Diego Tami, Diego Andrés, Victória, Brayan, Juan José, Carlos, Óscar, David, Luigy, Alejo, Cristhian, Olger, Marcela, Marthica, David Marcucci. E claro, Miguelito.

Aos meus amigos: Gonzalo, Raymond, Leo Jácome e Iván.

Agradecimento à UFMG, em especial ao Programa de Pós-Graduação e em particular à Senhora Marina pela ajuda e Rayanne.

À CAPES e FUMP pelo financiamento.

A todos, ¡Gracias Totales!

“Out of the night that covers me,  
Black as the pit from pole to pole,  
I thank whatever gods may be  
For my unconquerable soul.

In the fell clutch of circumstance  
I have not winced nor cried aloud.  
Under the bludgeonings of chance  
My head is bloody, but unbowed.

Beyond this place of wrath and tears  
Looms but the horror of the shade,  
And yet the menace of the years  
Finds and shall find me unafraid.

It matters not how strait the gate,  
How charged with punishments the scroll,  
I am the master of my fate:  
I am the captain of my soul.”

W. E. H.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xiii
NOMECLATURA .....	xiv
RESUMO .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
1. INTRODUÇÃO .....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
2.1 A soldagem subaquática e sua tecnologia.....	18
2.2 Soldagem subaquática molhada com eletrodos revestidos.....	19
2.3 Estabilidade e transferência metálica no processo de soldagem.....	35
2.4 Parâmetros que influenciam a morfologia do cordão de solda.....	40
2.4.1 Modelo térmico da penetração e taxa de fusão em eletrodos consumíveis.....	41
2.4.2 Modelo de TSAI e MASUBUCHI.....	44
2.4.3 Definição da geometria do cordão pelo fluxo de metal na poça de fusão.....	47
2.4.3.1 O oxigênio como elemento tenso ativo.....	49
2.4.3.2 Defeitos no cordão de solda com consequência do fluxo de metal líquido na poça de fusão.....	50
2.5 Considerações especiais.....	51
3. METODOLOGIA .....	58
3.1 Equipamento utilizado .....	58
3.1.1 Câmara para soldagem hiperbárica.....	58
3.1.2 Sistema de soldagem por gravidade.....	59
3.1.3 Fonte de soldagem.....	60
3.1.4 Sistema de aquisição de dados.....	60
3.2 Materiais .....	61
3.2.1 Corpo de prova.....	61
3.2.2 Consumíveis.....	62
3.2 Procedimento experimental.....	64
3.3.1 Inspeção visual.....	66
3.3.2 Análises das sinais obtidas com o sistema de aquisição.....	66
3.3.3 Avaliação da morfologia do cordão de solda.....	66
3.3.4 Análises química.....	67
3.4.3.1 Determinação do teor de oxigênio no metal de solda.....	67
3.4.3.2 Determinação do hidrogênio difusível no metal de solda.....	68
3.4.3.3 Taxa de fusão, velocidade de soldagem e energia de Soldagem.....	69
3.4.3.4 Determinação de fases por difração de raios X.....	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	71
4.1 Características morfológicas do cordão e parâmetros gerais do processo de soldagem para o uso do consumível e6013.....	71
4.2 Características morfológicas do cordão e parâmetros gerais do processo de soldagem para o uso do consumível WW70.....	78
4.3 Avaliação da estabilidade do processo de soldagem SMAW convencional (No Ar) e UWW .....	85
4.3.1 Índices de estabilidade quantitativos.....	88



4.3.2 Índices de estabilidade qualitativos.....	97
4.4 Inspeção visual dos cordões de solda .....	104
4.5 Análises química.....	108
4.5.1 Determinação do teor de oxigênio no metal de solda.....	108
4.5.2 Determinação do teor de hidrogênio difusível no metal de solda.....	115
4.5.3 Determinação de fases por difração de raios X.....	118
5. CONCLUSÕES.....	121
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	124
APÊNDICE I.....	125
APÊNDICE II.....	127
APÊNDICE III .....	131
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	133
ANEXO 1 .....	139
ANEXO 2 .....	140

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Desenho esquemático do processo de soldagem subaquática molhada por eletrodo revestido.....	22
Figura 2.2 - Condições de transferência de calor para soldas feitas em ar e Debaixo da água.....	23
Figura 2.3 - Faixa tensão-corrente para diferentes profundidades.....	24
Figura 2.4 - Efeito do meio aquoso sobre as propriedades mecânicas de juntas obtidas por soldagem subaquática molhada.....	26
Figura 2.5 - Oxigênio no metal de uma solda subaquática molhada como função da profundidade.....	27
Figura 2.6 - Produto entre os teores de carbono e oxigênio do metal em função da profundidade da soldagem subaquática.....	27
Figura 2.7 - Diagrama de equilíbrio Fe – O.....	28
Figura 2.8 - Solda molhada subaquática com teor de manganês e silício como uma função da profundidade.....	29
Figura 2.9 - Comparação das fotografias do cordão de solda para análises visual por radiografia e de um corte transversal do cordão.....	30
Figura 2.10 - Efeito da pressão da água sob a porosidade.....	31
Figura 2.11 - Efeito da pressão da água sob o formato do poro no metal de solda.....	32
Figura 2.12 - Coeficiente de difusão do hidrogênio em função da temperatura para matérias ferríticas e austeníticas.....	33
Figura 2.13 - Teor de hidrogênio na atmosfera do arco elétrico em um eletrodo exposto ao ambiente úmido.....	34
Figura 2.14 - Relação entre a pressão da água e o teor de hidrogênio difusível no metal depositado.....	34
Figura 2.15 - Variação da tensão média de soldagem com a profundidade.....	35
Figura 2.16 - Absorção de hidrogênio e porosidade como uma função da corrente na soldagem.....	36
Figura 2.17 - Teor de hidrogênio no metal de solda em função do comprimento do arco....	37
Figura 2.18 - Modelo da expansão da bolha de gás no interior de uma gota metálica durante o seu crescimento e transferência no arco elétrico.....	38
Figura 2.19 - Seção longitudinal da ponta de um eletrodo E6013 que apresenta a formação de uma gota.....	39
Figura 2.20 - Representação simplificada das direções dominantes do fluxo de calor nas diferentes regiões do arco.....	43
Figura 2.21 - Relação entre a tensão do arco e a largura.....	45
Figura 2.22 - Efeito da corrente, comprimento de arco e velocidade de deslocamento na junta.....	46
Figura 2.23 - Efeito da polaridade na forma do cordão de solda.....	47
Figura 2.24 - Estrutura básica do arco elétrico e sua distribuição de calor.....	48
Figura 2.25 - Fluxo de fluido em poça de fusão resultante da convecção de Marangoni.....	50
Figura 2.26 - Efeito da adição de Oxigênio ao gás de proteção (Argônio) sob o formato da zona fundida em soldas GTAW de aço inox.....	51
Figura 2.27 - Rugosidade relativa da superfície da solda como uma função do critério de aspecto d/W ou P/L.....	52
Figura 2.28 - Esquema mostrando o fluxo de fluido desde uma vista superior.....	53
Figura 2.29 - Perfil de superfície previsto.....	54
Figura 2.30 - Teores médios de oxigênio do arame de soldagem, as pontas do eletrodo e as gotas destacadas para polaridades DCEN e DCEP.....	54

Figura 2.31 - Temperatura da superfície da gota em função da polaridade.....	55
Figura 2.32 - Macrográfias de gotas retidas nas malhas #6, #8 y #10.....	56
Figura 2.33 - Esquema do processo de eletro escória.....	57
Figura 2.34 - Desenho esquemático mostrando o mecanismo de transferência.....	
de hidrogênio para o metal de solda para as duas polaridades em corrente contínua.....	58
Figura 2.35 - Teor de Hidrogênio difusível no metal de solda em função.....	
do teor de oxigênio em soldas subaquáticas molhadas.....	59
Figura 3.1 - Vaso de pressão para Soldagem subaquática.....	60
Figura 3.2 - Detalhe do sistema de soldagem por Gravidade.....	61
Figura 3.3 - Equipamento HipER1 para operações em ambientes marítimos.....	62
Figura 3.4 - Diagrama geral para aquisição de dados.....	63
Figura 3.5 - Corpo de prova para deposição de cordão sobre chapa, cotas em mm.....	64
Figura 3.6 - Nomenclatura utilizada no estudo.....	67
Figura 3.7 - Metodologia para a retirada de amostras nos testes.....	68
Figura 3.8 - Morfologia do Cordão de solda, R= Reforço; L= Largura, P= Penetração.....	69
Figura 3.9 - Corpos de prova para medição do Hidrogênio Difusível.....	70
Figura 3.10 - Cápsulas conectadas ao cromatógrafo durante a calibração.....	71
Figura 4.1 - Penetração vs profundidade para E6013.....	75
Figura 4.2 - Largura vs Profundidade para E6013.....	76
Figura 4.3 - Reforço vs Profundidade para E6013.....	77
Figura 4.4 - Taxa de fusão vs Profundidade para E6013.....	78
Figura 4.5 - Velocidade de Soldagem vs Profundidade para E6013.....	78
Figura 4.6 - Energia de soldagem vs Profundidade para E6013.....	79
Figura 4.7 - Macrográfias de soldas feitas com E6013 em relação.....	
com a Polaridade, Profundidade, a mudança nas características morfológicas.....	
e a Taxa de Fusão.....	80
Figura 4.8 - Penetração vs Profundidade para WW70.....	81
Figura 4.9 - Largura vs Profundidade para WW70.....	82
Figura 4.10 - Reforço vs Profundidade WW70.....	83
Figura 4.11 - Taxa de fusão vs Profundidade para WW70.....	83
Figura 4.12 - Velocidade de Soldagem vs Profundidade para WW70.....	84
Figura 4.13 - Energia de soldagem vs Profundidade para WW70.....	84
Figura 4.14 - Macrográfias de soldas feitas com WW70 em relação.....	
com a Polaridade, Profundidade, a mudança nas características morfológicas.....	
e a Taxa de Fusão.....	85
Figura 4.15 - Tensão média vs profundidade para E6013.....	86
Figura 4.16 - Tensão média vs profundidade para WW70.....	87
Figura 4.17 - Oscilograma de Tensão para WW70.....	89
Figura 4.18 - Sinal resultante do uso de filtro Digital no oscilograma da Figura 4.17.....	90
Figura 4.19 - Transferência por Curto-Circuito.....	90
Figura 4.20 - Transferência Globular.....	91
Figura 4.21 - Coeficiente de Variação em função da Profundidade e Polaridade.....	
para E6013.....	92
Figura 4.22 - Coeficiente de Variação em função da Profundidade e Polaridade.....	
para WW70.....	93
Figura 4.23 - NCC em função da Profundidade e Polaridade para E6013.....	95
Figura 4.24 - NCC em função da Profundidade e Polaridade para WW70.....	95
Figura 4.25 - Índice de Madatov em função da polaridade e profundidade para E6013.....	96
Figura 4.26 - Índice de Madatov em função da polaridade e profundidade para WW70.....	97
Figura 4.27 - Histograma de Tensão para solda feita no Ar com E6013.....	9

Figura 4.28 - Ciclograma de Tensão vs Corrente para solda feita no Ar com E6013.....	98
Figura 4.29 - Histograma de Tensão para solda feita em 5 m com E6013.....	99
Figura 4.30 - Ciclograma de Tensão vs Corrente para solda feita em 5 m com E6013.....	99
Figura 4.31 - Histograma de Tensão para solda feita em 10 m com E6013.....	100
Figura 4.32 - Ciclograma de Tensão vs Corrente para solda feita em 10 m com E6013....	100
Figura 4.33 - Histograma de Tensão para solda feita no Ar com Ww70.....	101
Figura 4.34 - Ciclograma de Tensão vs Corrente para solda feita no Ar com WW70.....	102
Figura 4.35 - Histograma de Tensão para solda feita em 5 m com WW70.....	102
Figura 4.36 - Ciclograma de Tensão vs Corrente para solda feita em 5 m com WW70.....	103
Figura 4.37 - Histograma de Tensão para solda feita em 10 m com WW70.....	103
Figura 4.38 - Ciclograma de Tensão vs Corrente para solda feita em 10 m com WW70....	104
Figura 4.39 - Cordões de solda feitos com eletrodo E6013, Ar, DCEP/DCEN.....	105
Figura 4.40 - Cordões de solda feitos com eletrodo E6013, 5m, DCEP/DCEN.....	105
Figura 4.41 - Cordões de solda feitos com eletrodo E6013, 10m, DCEP/DCEN.....	105
Figura 4.42 - Cordões de solda feitos com eletrodo WW70, Ar, DCEP/DCEN.....	106
Figura 4.43 - Cordões de solda feitos com eletrodo WW70, 5m, DCEP/DCEN.....	106
Figura 4.44 - Cordões de solda feitos com eletrodo WW70, 10m, DCEP/DCEN.....	107
Figura 4.45 - Teor de Oxigênio no metal de solda em função da Polaridade..... e profundidade para WW70.....	108
Figura 4.46 - Modelo que ilustra a absorção de Oxigênio por reações..... eletroquímicas e termoquímicas para DCEP.....	109
Figura 4.47 - Razão P/L (Penetração/Largura) para soldas feitas com WW70.....	112
Figura 4.48 - Teor de Oxigênio no metal de solda em função da Polaridade..... e profundidade para E6013.....	114
Figura 4.49 - Teor de Hidrogênio Difusível no metal de solda em função da..... Polaridade e o tipo de consumível. Soldas feitas em Lamina d'água (0,27 m).....	115
Figura 4.50 - Mecanismos que explicam o Hidrogênio difusível.....	116
Figura 4.51 - Difratoograma de Raios X da escória resultante de E6013 DCEP à 10 m.....	118
Figura 4.52 - Difratoograma de Raios X da escória resultante de WW70 DCEP à 10 m.....	118
Figura 4.53 - Difratoograma de Raios X da escória resultante de WW70 DCEN à 10 m.....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Composição do poro relatado na literatura.....	29
Tabela 2.2 -	Classificação da transferência metálica por IIW.....	38
Tabela 2.3 -	Regiões do arco de soldagem.....	52
Tabela 3.1 -	Ângulo $\alpha$ e $\beta$ utilizados na execução das soldas.....	59
Tabela 3.2 -	Composição química do corpo de prova.....	62
Tabela 3.3 -	Análises químico do metal depositado com E6013.....	63
Tabela 3.4 -	Composição do revestimento de um consumível OK Serralheiro.....	63
Tabela 3.5 -	Formulação do revestimento para o consumível experimental WW70.....	64
Tabela 3.6 -	Condições experimentais.....	64
Tabela 3.7 -	Valores de Corrente em função do revestimento e a profundidade.	

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASM	American Society of Materials
AWS	American Welding Society
CC	Corrente Contínua
CC-	Corrente Contínua Eletrodo negativo
CC+	Corrente Contínua Eletrodo Positivo
DCEN	Direct Current Electrode Negative
DCEP	Direct Current Electrode Positive
ESW	Electro Slag Welding
FCAW	Flux Cored Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
IIW	International Institute of Welding
LRSS	Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação
Q <sub>ánodo</sub>	Energía gerada no ánodo
Q <sub>cátodo</sub>	Energía gerada no cátodo
Q <sub>joule</sub>	Energía Gerada pelo Efeito Joule
Q <sub>RQ</sub>	Energía gerada na Região Catódica
SAW	Submerged Arc Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
Σ <sub>q</sub> eletrodo	Energía total gerada no eletrodo
U <sub>WW</sub>	Underwater Wet Welding
Wt. Pct.	Weight Percent
ZTA	Zona Termicamente Afetada
Vol. Pct	Volume Percent
Ppm	Partes por Million
C <sub>eq</sub>	Carbono Equivalente
H <sub>DIF</sub>	Hidrogênio Difusível
TF	Taxa de Fusão
K <sub>v</sub>	Coefficiente De Variação
U <sub>média</sub>	Tensão média
NCC	Número de Curtos-Circuitos
S	Índice de Madatov

## NOMENCLATURA

$\sigma$	Desvio Padrão
$\bar{X}$	Média aritmética
$I_{\max}$	Corrente máxima [A]
$I_{\min}$	Corrente mínima [A]
$k$	Constante de Boltzmann [ $1,38065 \times 10^{-23}$ J/K]
$T$	Temperatura no arco elétrico [Kelvin]
$e$	Carga do elétron [ $1,60218 \times 10^{-19}$ C]
$\phi$	Função-trabalho [eV]
U	Tensão [V]
A	Área específica [mm <sup>2</sup> ]
P	Penetração
L	Largura
R	Reforço

## RESUMO

A soldagem subaquática molhada (Underwater Wet Welding – UWW) apresenta-se como uma solução de reparo em estruturas semissubmersíveis e estaleiros. Especificamente, a aplicação desta tecnologia com eletrodos revestidos garante menores custos e reduz os tempos de manutenção se comparado com outros processos de soldagem utilizados na área offshore. Assim, é de grande importância tecnológica o conhecimento dos fenômenos envolvidos em este processo.

Por um lado, as soldas feitas ao ar apresentam maior penetração na configuração de polaridade inversa. Por esta razão, nesta pesquisa procurou-se por indícios dos efeitos das condições e parâmetros do processo sobre a penetração.

No desenvolvimento deste projeto, foram feitas soldas nas profundidades simuladas de 5 m e 10 m e assim, comparadas com soldas feitas na pressão atmosférica. Além disso, com o uso da avaliação de macrografias e índices de estabilidade, foi relatado o comportamento do cordão sob a influência da água e os problemas inerentes deste ambiente: a instabilidade típica do processo em baixas profundidades, a dissociação da moléculas de água e o seu efeito sob a composição final do metal de solda, etc. Neste último ponto em específico, análises químicas foram realizadas com o objetivo de estruturar melhor o conhecimento que tem-se sob o comportamento dos consumíveis.

Um dos eletrodos, o WW70, é um consumível desenvolvido numa parceria entre a indústria Brasileira e a Academia. Este eletrodo fornece características muito superiores em comparação com outros consumíveis comerciais e ainda encontra-se na fase de estudos e desenvolvimento, pelo fato de ser um eletrodo feito para soldagem subaquática molhada especificamente. Igualmente, o eletrodo E6013 foi utilizado como ponto de referência para confrontar o desempenho do consumível experimental.

Como resultado principal, com o uso do eletrodo E6013, as soldas em ambiente aquático apresentam maior penetração e menor taxa de fusão na polaridade direta; porém, as soldas feitas com o eletrodo oxi-rutílico (WW70), exibem os maiores valores de penetração para a configuração do eletrodo no polo positivo. Também, a pressão hidrostática afeta a transferência metálica e a estabilidade do processo de soldagem subaquática molhada.



## ABSTRACT

Underwater Wet Welding (UWW) is a repair solution for semi-submersible structures and shipyards. Specifically, the application of this technology with coated electrodes ensures lower costs and reduces maintenance times compared to other welding processes used in the offshore area. Thus, it is of great technological importance the knowledge of the phenomena involved in this process.

On the one hand, the welds made in the air show greater penetration in the configuration of reverse polarity. For this reason, in this research we looked for indications of the effects of the conditions and parameters of the process under the penetration.

In the development of this project, welds were made at the simulated depths of 5 m and 10 m and thus, compared to welds made at atmospheric pressure. In addition, with the use of macrographs and stability indexes, the behavior of the cord under the influence of water and the inherent problems of this environment were reported: typical instability of the process at low depths, dissociation of water molecules and its effect under the final composition of the weld metal, etc. In this last specific point, chemical analyzes were carried out with the aim of better structuring the knowledge that has been under the behavior of the consumables.

One of the electrodes, the WW70 is a consumable developed in a partnership between the Brazilian industry and the academy. This electrode provides much superior characteristics compared to other commercial consumables and is still in the study and development stage, because it is an electrode made specifically for underwater wet welding. Also, the electrode E6013 was used as reference point to compare the performance of the experimental consumable.

As a main result, with the use of electrode E6013, welds in aquatic environment present higher penetration and lower melting rate in direct polarity; however, welds made with the oxy-rutilic electrode (WW70), exhibit the highest penetration values for the electrode configuration at the positive pole. Also, the hydrostatic pressure affects the metal transfer and the stability of the wet underwater welding process.

## 1. INTRODUÇÃO

A técnica de Soldagem com eletrodo revestido aplicada ao ambiente aquático tem sido utilizada neste último século como uma solução de reparo e manutenção de baixo custo e alta praticidade; as principais indústrias onde é aplicada são Petróleo e Gás, sendo o reparo de estruturas *offshore* e a instalação de tubulações os principais projetos desenvolvidos. Porém, com a crescente tendência de exploração do mar como uma política em procura da preservação da vida na terra, este processo se projeta dentro dos principais métodos de fabricação de estruturas.

No Brasil e em parte da América Latina, o processo de *UWW* torna-se uma prática comum no litoral e para uso em baixas profundidades, pelo fato de ser adaptável em áreas de difícil acesso e precisar de menor preparação em relação as câmaras de soldagem hiperbáricas.

Assim, o domínio da técnica e o conhecimento das principais limitações desta, tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores. Contudo, as características próprias do ambiente debaixo d'água geram os defeitos que afetam a qualidade das deposições resultantes e deste modo, a resistência mecânica das estruturas.

Especificamente no Brasil, tem-se trabalhado por décadas no desenvolvimento de consumíveis que forneçam uma menor quantidade de defeitos, mediante o controle do hidrogênio difusível e a porosidade. Em particular, a evolução num eletrodo que reúne os principais atributos dos consumíveis rutilicos e oxidantes é a principal aposta de indústrias petrolíferas, de soldagem e universidades.

Portanto, o eletrodo *Wet Weld 70* (WW70) se figura como uma solução no controle das propriedades finais do metal de solda e na meta de obter juntas de qualidade tipo A segundo a classificação D3.6M da AWS.

Este estudo tem como objetivo a avaliação de consumíveis em relação com a estabilidade do processo e as características resultantes na solda, principalmente, a penetração. Neste último ponto, tenta-se comparar as deposições de um consumível oxirútilico com um eletrodo amplamente utilizado: E6013

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A Soldagem Subaquática e Sua Tecnologia

A solda subaquática é realizada tanto em um ambiente seco dentro de um habitat de proteção ou em um ambiente úmido e com contato direto da água (HOLDSWORTH, 1986).

A primeira classificação abrange uma câmara extremamente complexa, envolvendo sistemas e processos dispendiosos, que têm aplicações práticas limitadas com a forma da câmara. PESSOA (2003) descreve o método como o acoplamento de uma câmara com a peça para ser soldada, seguido, pela expulsão da água através da injeção de um gás especial, sendo que, as soldas são obtidas com propriedades mecânicas semelhantes às realizadas à pressão atmosférica. Por sua parte, o termo “soldagem molhada” indica que a junta está diretamente exposta a um ambiente úmido, onde o processo é afetado por um efeito de resfriamento rápido devido a água circundante e uma susceptibilidade marcada à fragilização por hidrogênio (TSAI e MASUBUCHI, 1977). Em seguida, pode-se dizer que a maior diferença entre a soldagem molhada e a hiperbárica é a introdução de variáveis rigorosas de aceitabilidade para as propriedades da ZTA como resultado do rápido arrefecimento causado pelo ambiente aquático (IBARRA et al, 1994).

ROWE E LIU (2001) expõem a soldagem molhada como uma técnica de manutenção aceitável, em que a soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido é o processo mais comum. WERNICKE e POHL (1998) estipulam maior credibilidade ao processo de UWW, afirmando que a reparação deverá restabelecer a resistência da união, mas deixando claro o fato de que a soldagem molhada é uma das técnicas mais complexas dos processos de soldagem. Juntamente, GRUBBS e SETH, (1976) argumentam que o uso generalizado e popular foi validado em relação a crescente liberdade de movimento no ambiente, além de ser o método de soldagem debaixo da água mais econômico e eficiente

Outros processos, tais como FCAW e GMAW foram também pesquisados para uso neste tipo de soldagem, (GRUBBS et al, 1996) principalmente nos Estados Unidos e no Mar do Norte, onde pesquisadores relataram porosidade excessiva, falhas dos padrões de aceitação das provas visuais e problemas com os dispositivos de alimentação de arame submarinos.

Em particular TECHMANN (2000) conclui que o processo de soldagem com eletrodo revestido domina as investigações e projetos de desenvolvimento em relação aos procedimentos aplicáveis na soldagem molhada e em comparação com o processo de arame tubular.

De novo ROWE e LIU (2001), contam os esforços que foram feitos para o desenvolvimento e a implementação dos processos FCAW e Friction Welding. As tentativas para utilizar a primeira técnica baseiam-se no aumento da velocidade de deposição quando comparada com SMAW; além disso, são projetados consumíveis com adição de rutilo. A soldagem por fricção no entanto, encontra sua principal limitação na geometria restrita da junta. De forma significativa, aplicações potenciais para esta técnica incluem o reparo de estruturas offshore, pipeline na profundidade do mar e indústria marítima geral.

## 2.2 Soldagem subaquática molhada com eletrodos revestidos

As vantagens do processo de soldagem molhada com SMAW, incluem o uso de um equipamento facilmente disponível, simples, portátil, que é adaptável à áreas de acesso limitado com profundidades de até 100 metros, com eletrodos revestidos que na fusão geram gases envolvidos na estabilização do arco elétrico e a proteção da transferência metálica. (PETT, 1998). O esquema da Figura 2.1 apresenta as principais características do processo.

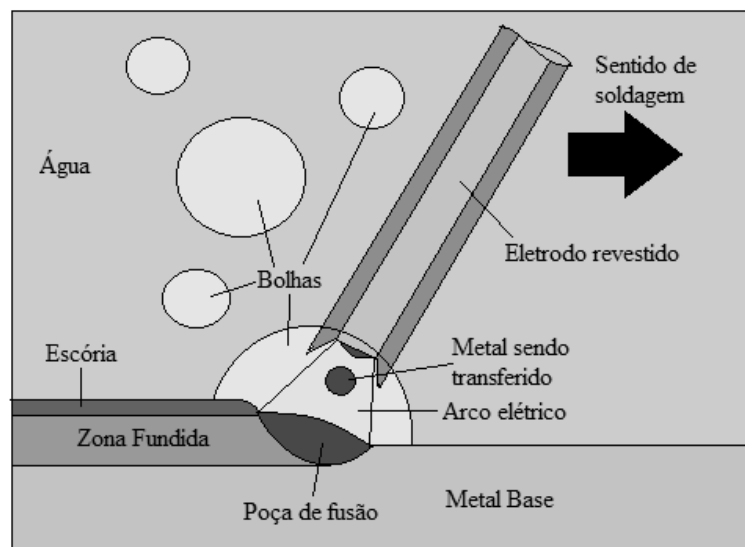


FIGURA 2.1 - Desenho esquemático do processo de soldagem subaquática molhada por eletrodo revestido.

FONTE – MENESES, 2017, p.4.

Como observado na Figura 2.1, segundo DIAS (2012), as bolhas de gases que se deslocam do arco de soldagem e poça de fusão como consequência do processo de solda, são outra importante variável, e de certo modo, podem ser benéficas em relação com a microestrutura do metal de solda e a ZTA pelo efeito de “colchão térmico”, o qual diminui a

taxa de resfriamento. PESSOA (2003) relatou o fenômeno da formação de bolhas, onde estas atingem volumes críticos e quebram o equilíbrio de forças e em seguida, passam até a superfície onde entram em colapso. Então, uma nova bolha é formada após sua antecessora tornar-se instável, dando continuidade ao ciclo. O fenômeno de ebulição causado pela geração de bolhas neste processo de soldagem é o principal efeito do resfriamento rápido (TSAI e MASUBUCHI, 1977). Em complementação POPE et al (1995) afirmaram que, com o colapso das bolhas, o metal de solda é exposto à ação de um resfriamento rápido por causa do meio aquoso.

Também POPE et al (1995) efetua um estudo sobre as condições de transferência térmica na soldagem subaquática. Durante o processo ao ar, o calor é principalmente dissipado por condução através do metal de base e a perda de calor ocorre por radiação e convecção natural em pequenas proporções. Debaxo da água, o arco elétrico e a poça de fusão estão dentro da bolha de vapor porque a temperatura de vaporização da água é muito mais baixa que a temperatura de solidificação da solda (Figura 2.2). WATSON et al (1994) concluem que a dissipação do calor da poça de metal fundido e a superfície do metal de base é levada a cabo em primeiro lugar por convecção de calor a partir da superfície do metal base para o meio aquoso circundante.

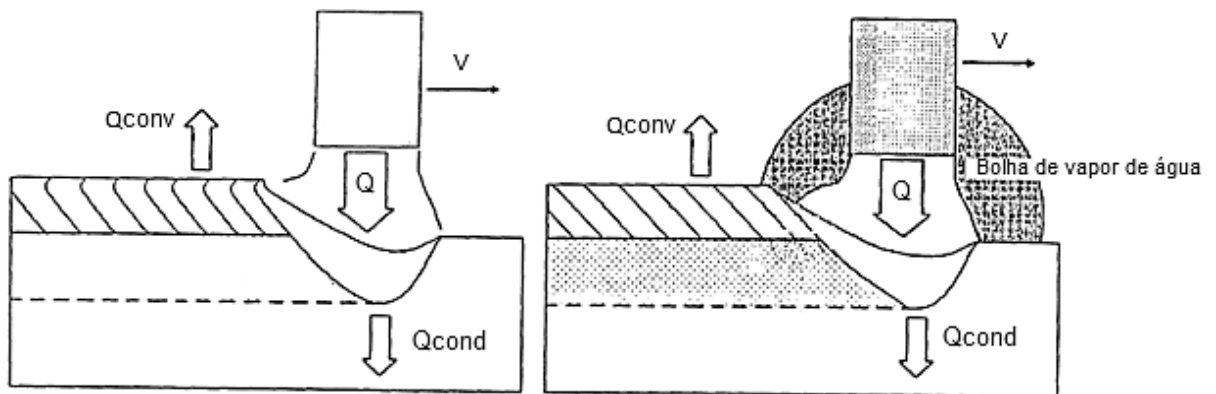


FIGURA 2.2 - Condições de transferência de calor para soldas feitas em ar (esquerda) e debaixo da água (direita).

FONTE – POPE et al. 1995.

Em relação as características do processo, ROWE e LIU (2001) afirmam que são necessárias fontes de energia mais poderosas para a abertura e manutenção do arco elétrico com o aumento da pressão. DIAS (2012) complementa afirmando que a manutenção do arco é dificultada pelo alto potencial de ionização do hidrogênio, e como um exemplo expõe um eletrodo rutilico aos dois tipos de ambiente (ar e água), onde um valor de energia mais alto é

necessário no meio com profundidade por razões de aumento da pressão hidrostática. LIU (1998) apresenta a soldagem com arco elétrico no ambiente debaixo da água como um grande desafio pela alta pressão hidrostática e a alta pressão parcial do hidrogênio, onde para cada 10 m de profundidade, a pressão hidrostática aumenta por uma unidade de pressão atmosférica. Por conseguinte, conclui-se que a faixa de parâmetros de operação na soldagem subaquática diminui com a profundidade. (ASM HandBook, Underwater welding, 2001). IBARRA et al (1994) validam o descrito acima na Figura 2.3, que mostra a faixa de parâmetros aceitáveis para soldar no processo UWW.

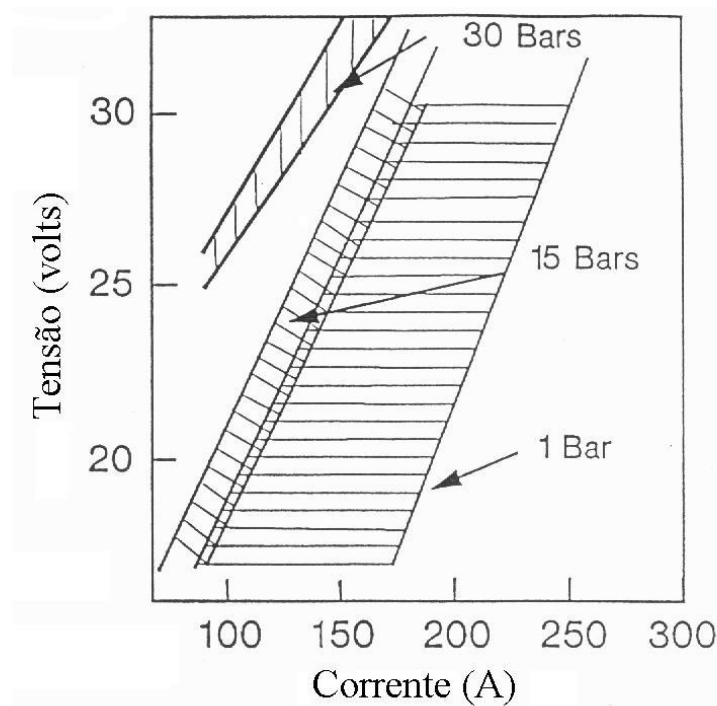


FIGURA 2.3 - Faixa tensão-corrente para diferentes profundidades.  
FONTE – PESSOA, 2007 apud IBARRA et al, 1994

Por recomendação do Welding HandBook (1996), ao processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) em aplicação na soldagem subaquática, tem-se que considerar a adição de variáveis essenciais, as quais adversamente influem na solda molhada:

- A pressão hiperbárica intensifica a instabilidade do arco elétrico pela constrição do arco do plasma e aumento da densidade de energia

- Acrescenta a possibilidade de sopro magnético.
- O aumento da pressão causa perda de manganês e silício e aumenta o teor de carbono e oxigênio do metal de solda.
- A dissociação da água que promove a absorção de hidrogênio pela solda.
- A infinita dissipação de calor da água envolvente que produz uma taxa de resfriamento sem precedentes.

Do mesmo modo, LIU et al (1994) definem uma série de problemas associados com as juntas de soldagem subaquática como uma consequência direta do processo à arco elétrico ser imerso num meio aquoso. A decomposição da água durante o processo gera presença de átomos de oxigênio e de hidrogênio que, em conjunto com as altas taxas de resfriamento fornecem propriedades mecânicas inferiores em comparação com juntas obtidas em condições atmosféricas. Na Figura 2.4 está detalhada uma caracterização dos efeitos do meio aquoso sobre as propriedades mecânicas das juntas obtidas por soldagem subaquática molhada.

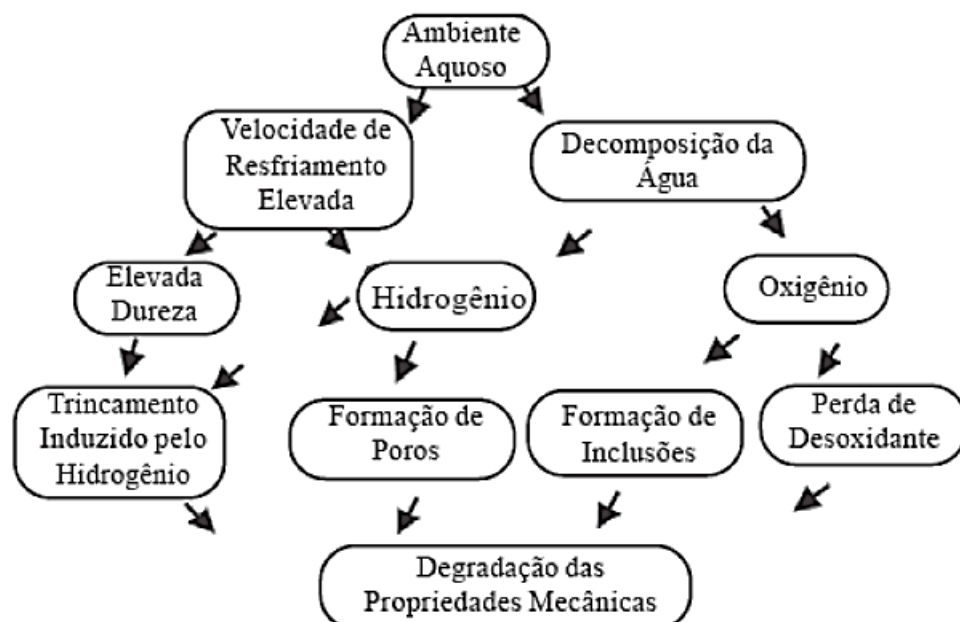


FIGURA 2.4 - Efeito do meio aquoso sobre as propriedades mecânicas de juntas obtidas por soldagem subaquática molhada..

FONTE – DIAS,2012 apud POPE (1995).

Os problemas na Figura 2.4, derivados da soldagem subaquática molhada, já tem sido avaliados por pesquisadores Brasileiros como PESSOA (2007) no seu “Estudo da variação da porosidade ao longo do cordão em soldas subaquáticas molhadas” e também, DIAS (2012) na pesquisa feita sobre o “Efeito da profundidade de soldagem sobre o hidrogênio difusível das soldas molhadas”.

Em particular, é conhecido que a hidrólise da água no processo de soldagem molhada transfere à escoria elementos de desoxidação como o Manganês e o Silício por causa da liberação de oxigênio e hidrogênio, e o aumento da profundidade do processo (relação de dependência entre a composição química das soldas molhadas e a pressão hidrostática no sitio). Esta diminuição do teor de Manganês no metal de solda está diretamente relacionada com o aumento do teor de Oxigênio com a profundidade (ASM HandBook, Underwater welding, 1993) (LIU et al, 1994), como é apresentado na Figura 2.5, onde pra 40 Pés (12 m) o teor de oxigênio atinge um patamar máximo para depois, pelo fato da saturação do oxigênio no aço líquido, permanecer constante para um teor de 0,15% de oxigênio, aproximadamente.

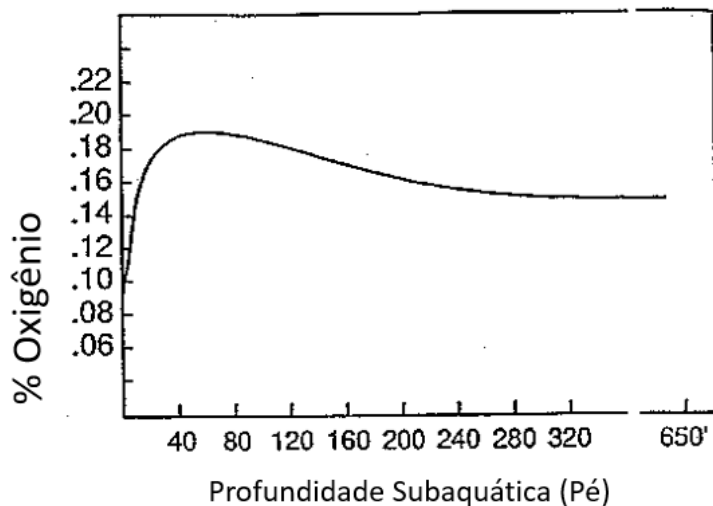


FIGURA 2.5 - Oxigênio no metal de uma solda subaquática molhada como função da profundidade

FONTE – Adaptado IBARRA et al, 1994

A Figura 2.6 apresenta o comportamento do oxigênio e do carbono como um produto das soldas molhadas. É possível ver uma relação de linearidade (GAO et al, 2015) destes dois elementos (Carbono e oxigênio) até uma profundidade inferior à 50 metros, podendo-se inferir que o monóxido de carbono ( $CO \rightarrow C + O$ ) é um mecanismo de controle do teor de oxigênio e



este por sua vez, é um produto da decomposição do Cálcio e o Carbonato de magnésio a partir do revestimento dos eletrodos. O teor de Oxigênio no metal de solda pode ser diminuído com adições de ferro – silício no revestimento (GRUBBS et al, 1996).

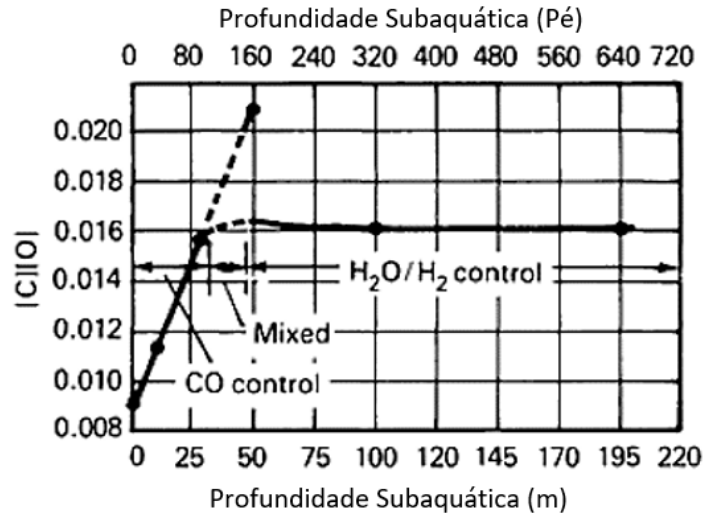


FIGURA 2.6 - Produto entre os teores de carbono e oxigênio do metal em função da profundidade da soldagem subaquática.

FONTE – IBARRA et al, 1989.

De acordo com a Figura 2.6, IBARRA et al (1994) explicam o patamar de CO. Os autores relatam que conforme o caráter oxidante do eletrodo é aumentado pela adição de Hematita, esta é descomposta no processo de solda e reage com a água formando Wustita e magnetita e, como consequência obtendo uma liberação de oxigênio. Este último elemento atinge o nível de saturação e é determinado pela temperatura na poça de fusão e pelo limite de solubilidade do oxigênio no ferro líquido (0,2 wt. Pct.) (Figura 2.7). Assim, para um teor de oxigênio acima do limite de solubilidade, FeO líquido é formado como uma fase imiscível como ferro líquido.

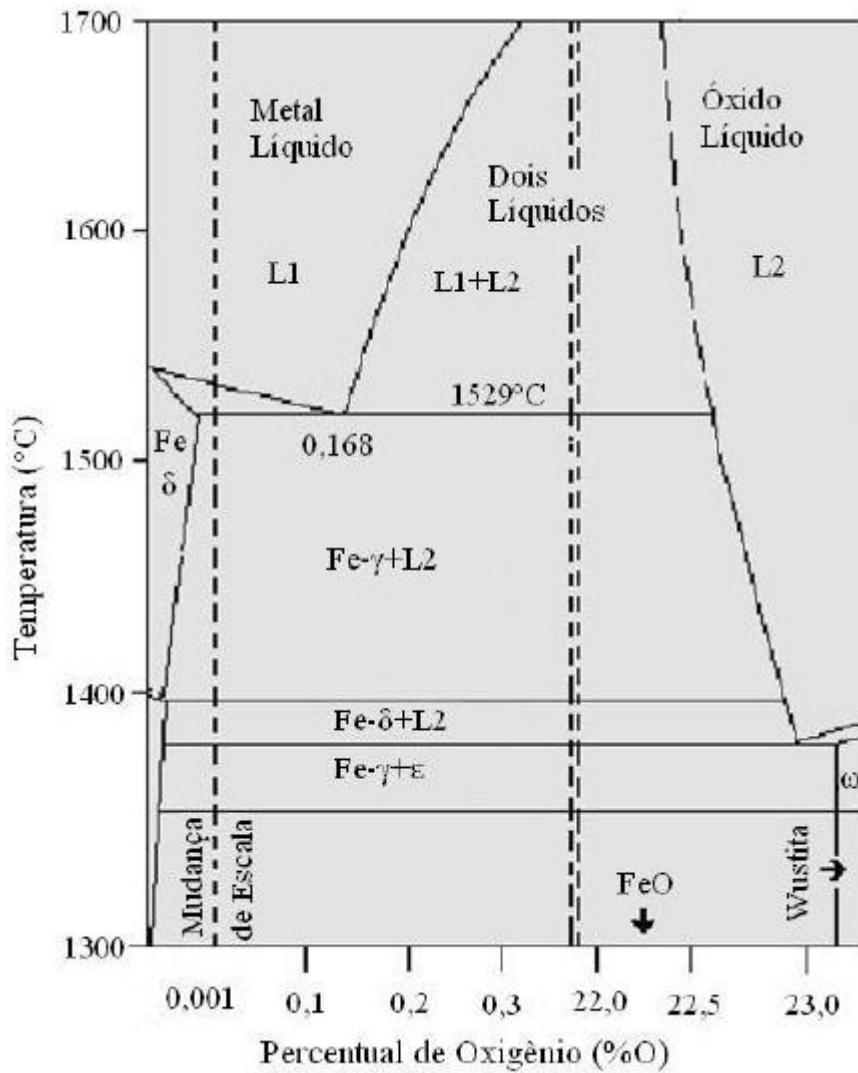


FIGURA 2.7 - Diagrama de equilíbrio Fe - O.

FONTE - PESSOA, 2007 apud VAN VLACK, 1977.

IBARRA et al, (1989) concluem uma dependência dos elementos no metal de solda com a profundidade, onde o oxigênio controla a oxidação e o conteúdo de manganês e silício. Além disso, é interessante demonstrar que estes três elementos (C, O, e Mn) são estabilizados a uma profundidade de 50 m, e espera-se que outros elementos de formação de óxidos tenham o mesmo comportamento (Figura 2.8).

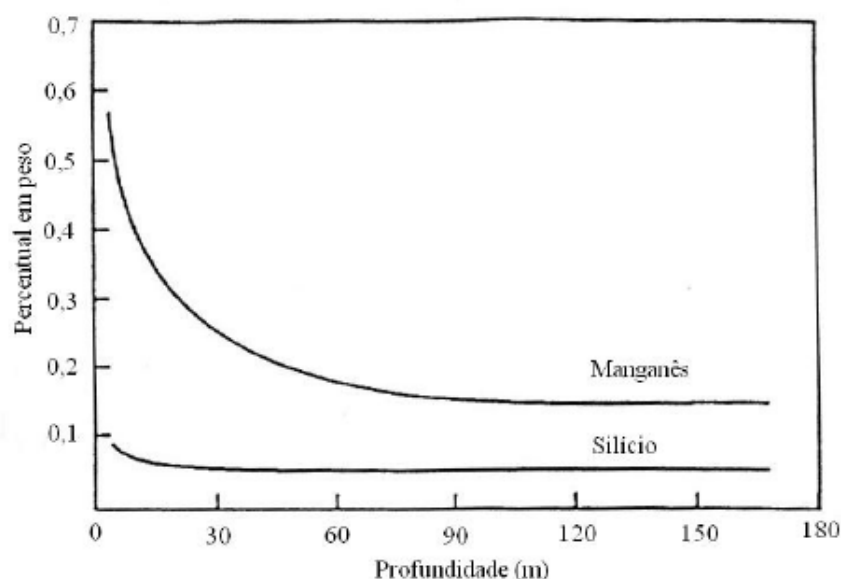


FIGURA 2.8 - Solda molhada subaquática com teor de manganês e silício como uma função da profundidade

FONTE – PESSOA, 2007 apud IBARRA et al, 1989.

Contudo e como continuação do relato sob as características das soldas em UWW, a principal diferença entre a soldagem molhada e a seca é a quantidade de poros. LIU et al (1994) definem a porosidade como o resultado do controle de fatores como a profundidade, o revestimento do eletrodo e a estabilidade do arco. A norma AWS D3.6 define quatro tipos de solda em concordância com os requerimentos de qualidade e além disso, esta norma apresenta especificações em função das propriedades mecânicas, a aceitação da porosidade e a aplicação requerida pelo projetista (ASM HandBook, Underwater welding, 1993).

O primeiro tipo, as soldas tipo A, são obtidas usualmente em um ambiente seco dentro de um habitat de proteção (*hyperbaric dry welds*) e produzem uma solda subaquática semelhante de uma solda no ar em relação com os requerimentos de aceitação e qualidade. A solda tipo B, tem uma reduzida ductilidade e um acréscimo da porosidade, mas, estes defeitos são aceitos e sua aplicação principal é em trabalhos menos críticos como a técnica de luva de escravo e em estruturas offshore. A tipo O, atende os requisitos de outro código ou especificação designado (AWS D3.6M:2010).

Esta mesma norma, relata que para soldas de classe B (as mais comuns em UWW), poros abaixo dos 1,5 mm de diâmetro não serão limitados em quantidade, mas, os poros não podem exceder os 5 mm de diâmetro. Além disso, um número máximo de 7 poros (na faixa de 1,5 mm até 5 mm de diâmetro) são aceitos para um comprimento de 25 mm de cordão de solda

e 25 mm de espessura do metal base. A especificação define um critério de aceitação para testes com macrografia com esta classe de solda, onde a escória e porosidade não pode exceder o 5% da área de superfície da solda e a maior dimensão de uma descontinuidade não pode atingir os 2 mm.

A porosidade, como uma imperfeição, exerce uma influência crítica sobre a degradação da resistência à tração, resistência ao cisalhamento e ductilidade. Vários autores relatam como a porosidade afeta as propriedades mecânicas dos elementos soldados em alumínio e as suas ligas, ligas de titânio, etc. Soldas molhadas tem 80% da resistência à tração e 50% da ductilidade das soldas realizadas ao ar (TSAI e MASUBUCHI, 1977).

Em outra abordagem, PESSOA et al (2006) estudaram a influência da porosidade nas propriedades mecânicas da soldagem subaquática. Os autores avaliaram eletrodos revestidos comerciais (E6013 e E7018) em três diferentes metais bases e em duas profundidades (50 m e 100 m) mediante ensaios mecânicos para soldas feitas com o enchimento de um chanfro em V numa média de 10 passes. Nos resultados, é apresentada uma variação da porosidade ao longo do comprimento da solda, onde a figura 2.9 mostra uma comparação das fotografias de análises visual de radiografia e um corte transversal do cordão de solda: é claro que a porosidade diminui ao longo do cordão.

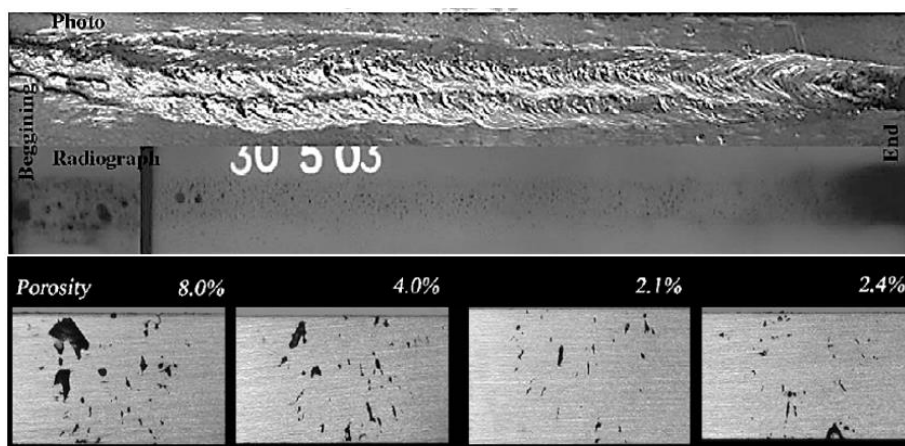


FIGURA 2.9 - Comparação das fotografias do cordão de solda para análises visual por radiografia (cima) e de um corte transversal do cordão (baixo). Os cordões foram feitos com eletrodo E6013 em aço A-36 para 100 m de profundidade

FONTE – PESSOA et al, 2006.

Por sua parte, SUGA e HASUI (1986) descreveram o efeito da pressão da água sobre a porosidade no cordão de solda com três tipos de eletrodos, observando soldas sem poros até 0,5 kgf/cm<sup>2</sup>. Com o aumento da pressão, um aumento acentuado na quantidade de poros (Figura

2.10) foi demonstrado, para o qual os autores classificaram o fenômeno dependendo da profundidade do ambiente, o mecanismo de formação de poros e morfologia deste (Figura 2.11). Poros tipo A, são gerados desde os 0,5 kgf/cm<sup>2</sup> até os 3 kgf/cm<sup>2</sup> e aumentam em número, em uma relação direta com a pressão da água. Também os poros tipo B, que são obtidos num intervalo de 3 kgf/cm<sup>2</sup> e 6 kgf/cm.

Para o primeiro tipo, é definido que a pressão dos poros é maior do que a pressão da atmosfera do processo: Isto gera as condições de formação de porosidade no metal de solda. Com base nos resultados experimentais assumiu-se que o poro é inteiramente de hidrogênio (97,5% de H<sub>2</sub> na composição química do gás) por conseguinte, concluiu-se que este tipo de formação é devido à concentração de hidrogênio na frente de solidificação. Em complementação dos resultados de SUGA e HASUI (1986) neste primeiro ponto, SANCHEZ-OSIO et al (1993) apresentam a tabela (Tabela 2.1), que expõe a composição dos poros desde a perspectiva de alguns autores.

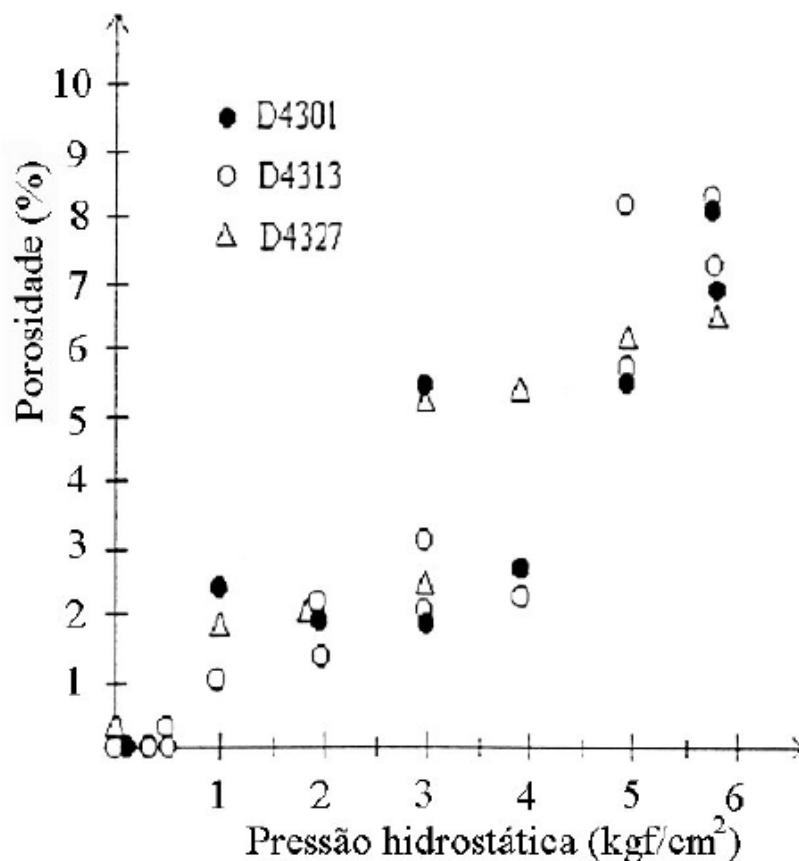


FIGURA 2.10 - Efeito da pressão da água sob a porosidade.

FONTE – DIAZ, 2012 apud SUGA e HASUI, 1986.

No segundo tipo chamado “tipo bolha”, o poro é causado por uma bolha formada no metal de solda que fica presa pela frente de solidificação.

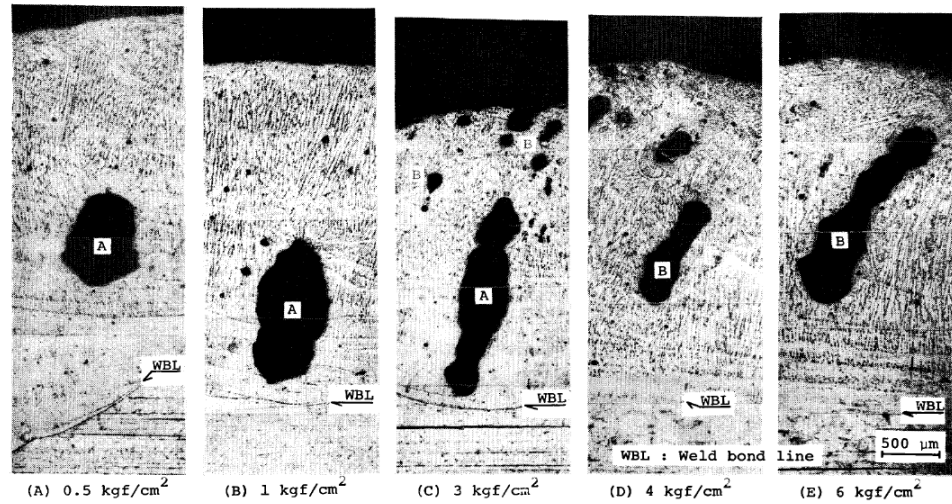


FIGURA 2.11 - Efeito da pressão da água sob o formato do poro no metal de solda.

FONTE – SUGA e HASUI, 1986.

TABELA 2.1- Composição do poro relatado na literatura.

Fonte	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	Outro
Suga e Hasui (1986)	96	0.4	0.06	-
Silva et al (1971)	62 - 82	11.24	4-6	-
Ibarra et al (1992)	45	43	8	4

FONTE - SANCHEZ-OSIO et al, 1993.

Tomando como referência as conclusões acima expostas por SUGA e HASUI (1986), em que a formação de poros é causada devido à concentração de hidrogênio, ROWE et al (2001) constituíram uma hipótese em que a porosidade é um efeito direto do teor de hidrogênio e inferiram que qualquer técnica para reduzir o teor de hidrogênio do metal de solda deve ser eficaz para reduzir a porosidade.

Com isto, o hidrogênio, apresenta toda uma linha de pesquisa em UWW. As propriedades mecânicas das juntas feitas pelo processo UWW dependem das características dos elementos constituintes dos consumíveis e da ZTA no metal de solda. Nesta última, são gerados um endurecimento e uma alta sensibilidade ao trincamento por hidrogênio como consequência do rápido resfriamento gerado pelo meio aquoso (GRUBBS et al, 1996). De este modo, quatro condições coexistentes devem apresentar-se ao trincamento por hidrogênio: uma microestrutura sensível (martensita), uma fonte de hidrogênio, relativa baixa temperatura ( -100 até 200 °C) e

tensão de tração WATSON et al (1994) (ASM HandBook, Underwater welding, 1993) (YURIOKA e SUZUKI, 1990).

Segundo KOU (2003), elevadas tensões (tensões residuais) são induzidas durante o resfriamento pela contração da solidificação e, são desenvolvidas em maior grau pela contração térmica sob as restrições das dimensões da solda, a geometria da junta e as propriedades mecânicas do metal de base. Também, a temperatura é uma variável de controle do hidrogênio resultante no metal de solda e na ZTA: o coeficiente de difusão do hidrogênio depende da temperatura e é maior em materiais ferríticos em comparação com materiais austeníticos como pode ser visto na Figura 2.12. O menor coeficiente de difusão do hidrogênio na austenita dificulta a difusão do hidrogênio da ZTA para o metal de base antes da transformação da austenita em martensita. O autor relata que a combinação de hidrogênio e martensita na ZTA promove o trincamento por hidrogênio. Além disso, é interessante notar, a grande diminuição do coeficiente de difusão desde temperaturas abaixo dos 150 °C.

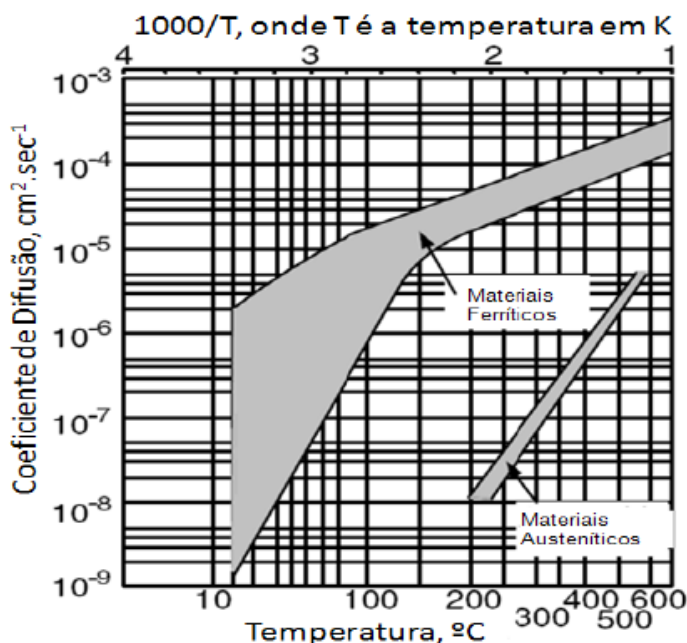


FIGURA 2.12 - Coeficiente de difusão do hidrogênio em função da temperatura para matérias ferríticos e austeníticos.

FONTE – DIAZ, 2012 apud KOU, 2003.

O arco elétrico (como relatado anteriormente) é envolvido pelo meio aquoso, pelo qual, a disponibilidade de hidrogênio é alta pelo efeito da dissociação da água (hidrogênio e oxigênio). Uma das formas de transmissão do hidrogênio à poça de fusão é descrita por NIXON e BILLINGHAM (1987). Na figura 2.13, os autores relacionam o teor de hidrogênio na

atmosfera do arco elétrico, com o intervalo de tempo em que os eletrodos são expostos no ambiente molhado, e como resultado, a humidade é absorvida pelo revestimento. É interessante notar que o teor de hidrogênio é estabilizado depois de duas horas de exposição do consumível; além disso, o hidrogênio aumenta com o acréscimo da profundidade do processo.



FIGURA 2.13 - Teor de hidrogênio na atmosfera do arco elétrico em um eletrodo exposto ao ambiente úmido.

FONTE – NIXON e BILLINGHAM, 1987.

Por sua parte, ANDO e ASAHINA (1983) apresentaram uma relação entre a profundidade, o teor de hidrogênio difusível no metal de solda e os elementos no revestimento para seis tipos de eletrodos (D4327-eletrodo com óxido de ferro e pó de ferro, D4324-rutílico, D4340-ilmenítico, D4326-eletrodo de baixo de hidrogênio, D308-austenítico e D310-austenítico). Na figura 2.14, é interessante ver um dado máximo de hidrogênio difusível para todos os eletrodos testados numa pressão hidrostática de 0,03 kgf/cm<sup>2</sup>. Também é possível constatar, que depois desse patamar de pressão hidrostática, é apresentada uma queda no teor de hidrogênio difusível.



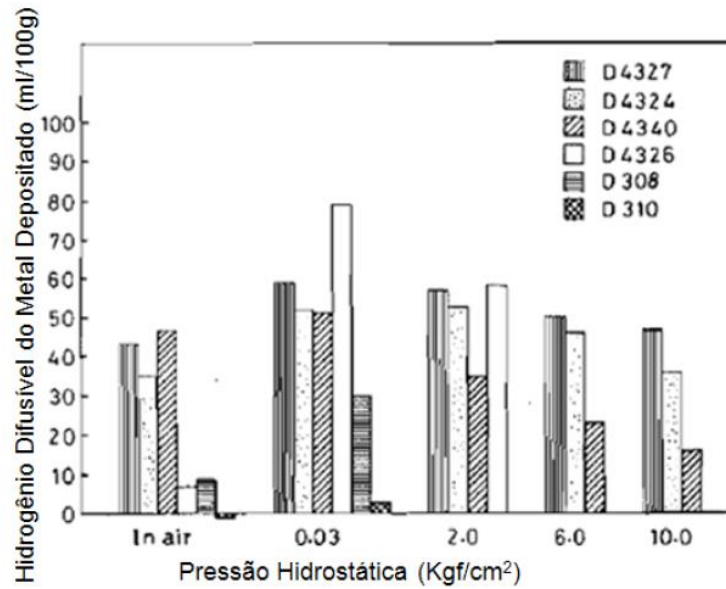


FIGURA 2.14 - Relação entre a pressão da água e o teor de hidrogênio difusível no metal depositado.  
 FONTE – DIAZ, 2012 apud ANDO e ASAHINA, 1983.

DIAS (2012) na sua pesquisa, nomeada: “Efeito da profundidade de soldagem sobre o hidrogênio difusível das solda molhadas”, fez medições do hidrogênio difusível de um eletrodo revestido E6013 comercial em quatro profundidades (0,3 m, 10 m, 20 m e 30 m), trabalhando somente como polaridade direta (DCEN) e em uma corrente de soldagem fixa em 170 A.

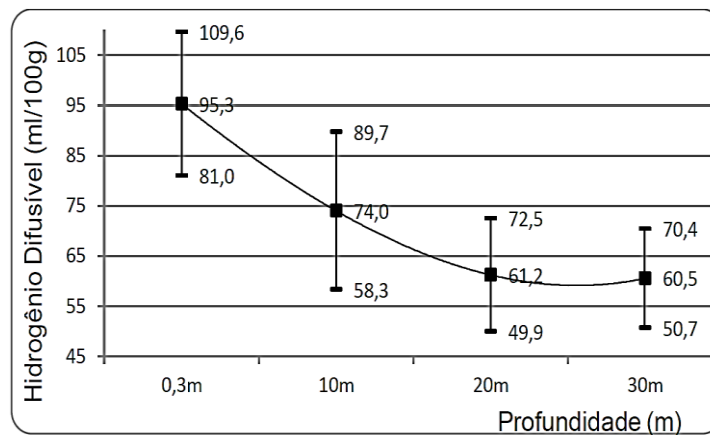


FIGURA 2.14 - Variação do hidrogênio difusível do metal de solda depositado com a profundidade.  
 FONTE – DIAS (2012).

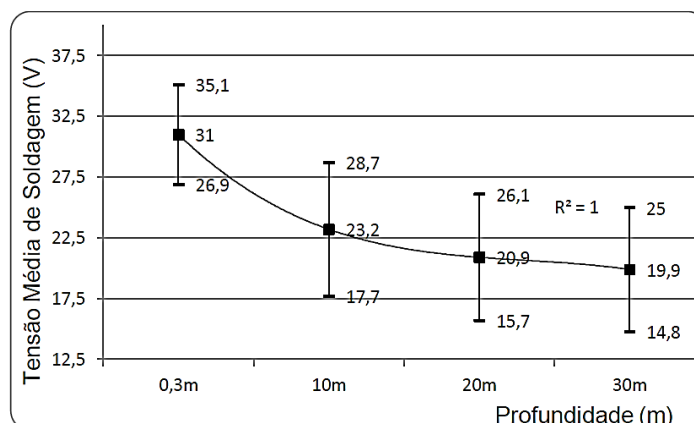


FIGURA 2.15 - Variação da tensão média de soldagem com a profundidade  
 FONTE – DIAS (2012).

É possível notar uma redução de 23% do teor de hidrogênio difusível para a variação da profundidade de 0,3 m até 10 m e, uma redução de 18% de 10 m para 20 m (Figura 2.14). Nesse último ponto, o teor de hidrogênio difusível mantém-se praticamente estável até a seguinte profundidade (30 m). O autor explica a ocorrência deste comportamento como uma relação inversamente proporcional com o teor de oxigênio no metal de solda, o qual atinge um patamar constante na profundidade de 3 atmosferas como consequência de atingir o limite de saturação da sua concentração no metal de solda.

Uma explicação mais interessante é descrita sobre a relação que tem o teor de hidrogênio difusível, o aumento da profundidade e a tensão média da soldagem. O autor, mediante a aquisição dos sinais de tensão durante a solda dos cordões sobre chapa faz a projeção da figura 2.15, onde, com a mudança da profundidade, o valor da tensão média de soldagem também altera. Este fenômeno foi relacionado como o aumento da instabilidade do arco causado pela perda de potência, que ocorre com o aumento da pressão hidrostática. Esta redução da tensão média contribui possivelmente com a redução do hidrogênio difusível, como é relatado por WOODS (1974).

Além disso, foi reportada a ocorrência de curtos-circuitos, o que é explicado pelo fato da redução na tensão de soldagem com o aumento da profundidade e, o acréscimo das chances da gota líquida de tocar a poça de fusão em função do reduzido comprimento do arco.

(WOODS, 1974) demonstra que a absorção de hidrogênio é influenciado pela corrente no processo de solda. A Figura 2.16 apresenta uma parte das conclusões dos seus estudos sobre solda com alumínio e, o gráfico, evidencia uma relação de linearidade entre a corrente (numa faixa entre 100 até 300 A) e o teor de hidrogênio no metal de solda representado como porosidade.

TREVISAN et al (1990) explica que o aumento na corrente, aumenta a temperatura do meio superficial da poça de fusão, o que acrescenta a área da zona quente sobre a qual, a absorção de hidrogênio ocorre.

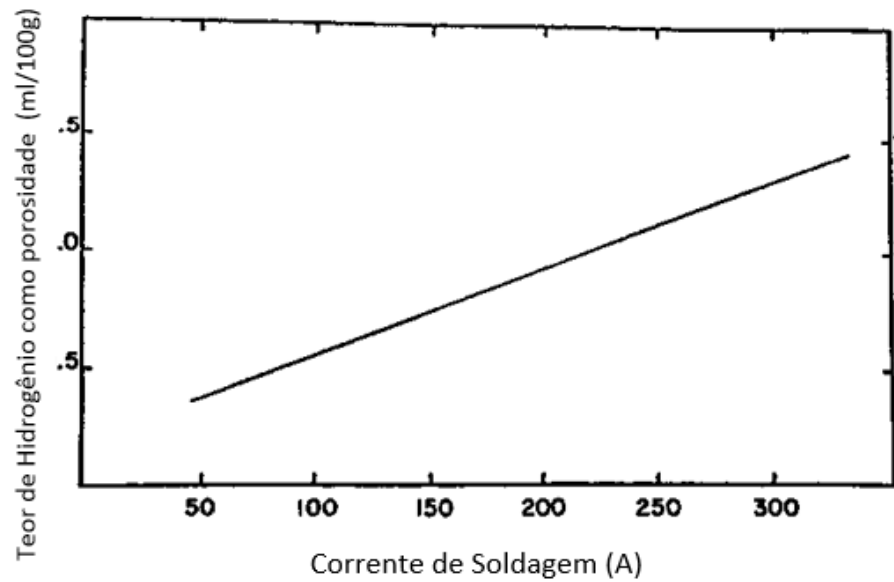


FIGURA 2.16 - Absorção de hidrogênio e porosidade como uma função da corrente na soldagem.  
FONTE – WOODS (1974).

Ademais, WOODS (1974) estuda a relação entre o comprimento do arco e a capturação de hidrogênio no metal de solda (Figura 2.17). Este comportamento foi explicado como o resultado de um acréscimo da área de superfície da poça de fusão da solda como consequência de um maior comprimento de arco.

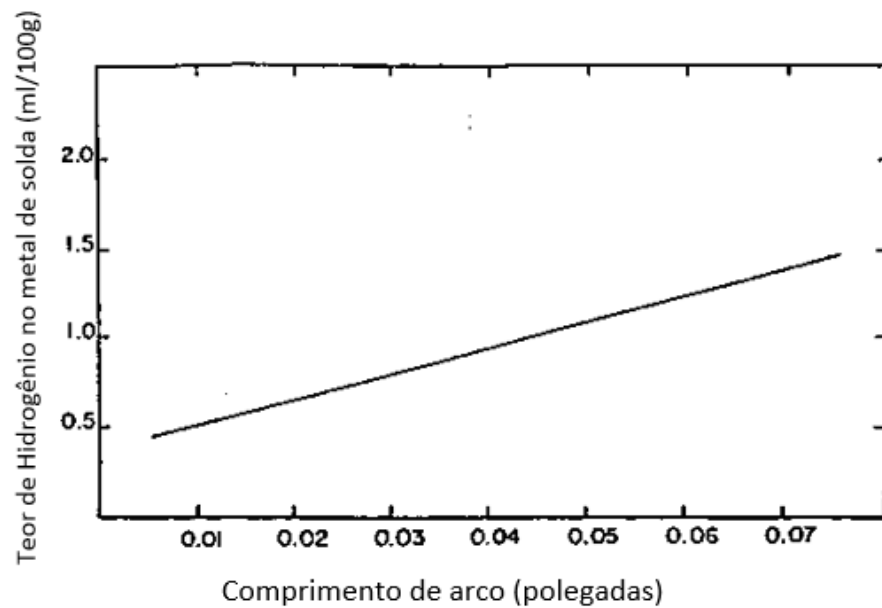


FIGURA 2.17 - Teor de hidrogênio no metal de solda em função do comprimento do arco.  
 FONTE – WOODS (1974).

### 2.3 Estabilidade e Transferência Metálica no Processo De Soldagem

O grau de estabilidade pode definir desde as irregularidades no formato do cordão de solda até descontinuidades na deposição e o nível de respingos. Deste modo, acredita-se que num processo estável, tem-se o melhor desempenho do consumível e como resultado, juntas com mínima quantidade de defeitos. Por conseguinte, a “estabilidade” afetará o desempenho operacional do processo e por sua vez, será o resultado da configuração de parâmetros elétricos do arco (Tensão, Corrente e Polaridade), a composição química do eletrodo, a pressão atmosférica, o meio de proteção e a relação das anteriores características com o ambiente. (MODENESI, 2017).

Especificamente para um processo à arco elétrico imerso num meio aquoso, a decomposição da água, a geração de bolhas e a pressão do local de trabalho tem efeito direto sob o desempenho da técnica de soldagem (DIAS, 2012). Assim, no caso da aplicação de eletrodo revestido, se devem considerar os aspectos anteriores para definir a estabilidade.

Neste ponto, é interessante considerar o modo em que o metal líquido na ponta do eletrodo se transfere à poça de fusão e a influência deste fenômeno sob o processo. Efetivamente, o fluxo de massa de metal líquido na soldagem com arco elétrico é de importância essencial considerando o eletrodo consumível como fonte de calor e fonte de metal de adição. (LANCASTER, 1994).

Assim, LARSON (1942) afirma que cerca de 90% do metal é transferido a través do plasma em forma de gotas e além disso, um pequeno porcentagem é vaporizado e condensado pelo calor do arco elétrico. Este autor sugere que a expansão dos gases no metal fundido da ponta do eletrodo, é o fator primário na transferência através do arco. Daí, a fusão do consumível gera reações que liberam gases dissolvidos: estes vapores se formam embaixo da superfície do metal fundido e com o auxílio da tensão superficial do líquido, geram bolhas de metal na ponta do eletrodo. Esta bolha gasosa pode explodir devido apenas à pressão do gás ou pode se expandir até atingir a peça de trabalho e gerar o curto-circuito no arco. Quando estas bolhas de gás explodem, produzem um aerossol de partículas mais finas.

A Figura 2.18 ilustra o modelo proposto por LARSON (1942): (a), (b), (c) e (d) descrevem o crescimento da gota metálica ao mesmo tempo com a geração da bolha de gás na extremidade do eletrodo. A pressão interna desenvolvida na bolha promove a explosão da gota metálica antes do acontecimento do curto-circuito. Na seqüência posterior de (e) e (f), a explosão acontece após o curto-circuito.

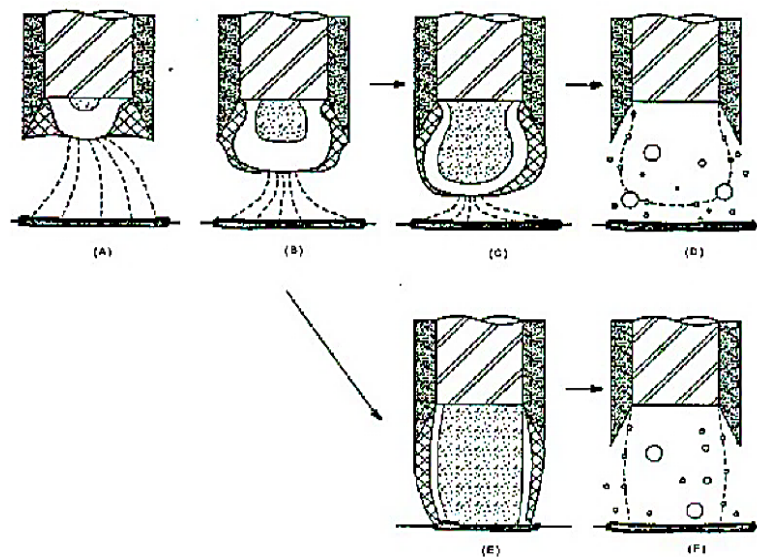


FIGURA 2.18 - Modelo da expansão da bolha de gás no interior de uma gota metálica durante o seu crescimento e transferência no arco elétrico.

FONTE – LARSON (1942).

Esta mesma característica (Expansão da bolha de gás) foi observada mais recentemente por PESSOA (2007), o qual mostra a formação de gotas unidas na ponta do eletrodo para soldas feitas com E6013, a 50 m de profundidade e realizadas com o processo UWW (Figura 2.19). O

autor relaciona a ocorrência deste fenômeno com a geração e o aprisionamento de gás durante a transferência de metal.

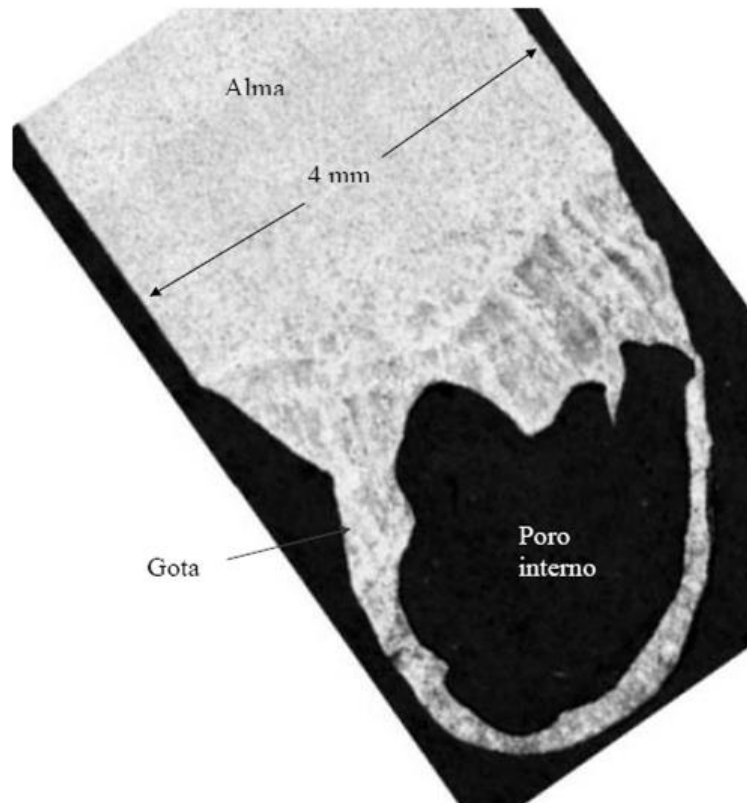


FIGURA 2.19 - Seção longitudinal da ponta de um eletrodo E6013 que apresenta a formação de uma gota.

FONTE – PESSOA (2007).

Contudo, como resultado da experimentação e estudo de vários autores, foi desenvolvido pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW) uma classificação da transferência metálica para processos com arco elétrico (Tabela 2.2). BRANDI et al (1991) define a primeira classificação como “gotas de metal fundido que destacam da ponta do eletrodo e viajam através do comprimento do arco elétrico”. Em seguida, “*Brinding transfer*” é caracterizada por contatos momentâneos do eletrodo com a poça de fusão. Enfim, na transferência protegida por escória, as gotas de metal são geralmente cobertas por uma camada de escória fundida.

TABELA 2.2- Classificação da transferência metálica por IIW. Modificado (BRANDI et al, 1991).

<b>Tipo de Transferência</b>	<b>Processo de Soldagem (exemplo)</b>
1. Transferência por Queda Livre (Free flight transfer)	
1.1 Globular	
1.1.1 Gotas (Drop)	GMAW – Baixa corrente
1.1.2 Repelida (Repelled)	GMAW – Com proteção CO <sub>2</sub>
1.2 Aerossol (Spray)	
1.2.1 Aerossol com Alongamento (Projected)	GMAW – corrente intermediária
1.2.2 Aerossol axial (Streaming)	GMAW - corrente média
1.2.3 Aerossol rotacional (Rotating)	GMAW – alta corrente
1.3 Explosiva (Explosive)	SMAW (Eletrodo revestido)
2. Transferência por contato (Bridging Transfer)	
2.1 Curto – Circuito (Short – circuiting)	GMAW – arco “curto”
2.2 Contínua (Without Interruption)	GTAW com alimentação contínua
3. Transferência protegida por Escória (Slag – protected transfer)	
3.1 Guiada pela parede (Flux – wall guided)	SAW
3.2 Outros modos (other modes)	SMAW, FCAW, ESW

FONTE - BRANDI et al, 1991.

Levando em consideração a Tabela 2.2, a transferência através do plasma em eletrodo revestido, pode ser caracterizada como Globular (gotas grandes) ou aerossol (um grande número de pequenas gotas). Geralmente, o material é transferido numa combinação dos dois modos (WELDING HANDBOOK, Physics of Welding, 2008).

Também, considerando de novo o estudo sob o análises da transferência metálica no processo SMAW, BRANDI et al (1991) desenvolve a sua experimentação com o uso de eletrodos comerciais, visando como objetivo, atingir uma suave transferência de gotas metálicas e um mínimo de respingos. Entre os principais resultados obtidos pelos autores, os modos de transferência explosiva, Curto-circuito e protegida por escória foram os observados para os consumíveis avaliados.

BRANDI et al (1991) complementam, afirmando que a transferência metálica está relacionada com a qualidade da solda, pelo fato que afeta a estabilidade do arco e determina também: os respingos no processo, a penetração, a taxa de deposição e a posição da solda.

MAZAFERRO (1998) expõe que é necessário a definição de critérios que possibilitem caracterizar e classificar um eletrodo quanto ao nível de estabilidade do arco elétrico que o mesmo fornece. Contudo, são apresentados a continuação índices de avaliação da estabilidade em processos de soldagem. Estes critérios são classificados em índices quantitativos (Coeficiente de Variação e índice de estabilidade de Madatov); também, a estabilidade pode ser avaliada com o uso de índices qualitativos (Histogramas e Ciclogramas).

Em particular, alguns autores utilizam unicamente o desvio padrão para identificar e comparar a variabilidade nas amostras, porém, segundo SCOTTI e PONOMAREV (2008), é mais útil medir a dispersão em termos relativos por meio da divisão do desvio padrão pelo valor médio da grandeza. O anterior é definido como o Coeficiente de Variação ( $K_V$ ) (Equação 1), onde  $\sigma$  é o desvio padrão da amostra e  $\bar{X}$  é a média dos dados em estudo.

$$K_V = (\sigma / \bar{X}) \tag{1}$$

Não obstante, o desvio padrão (como medida de dispersão e fator determinante de  $K_V$ ) é influenciado diretamente pela transferência metálica própria de um processo com eletrodo consumível, fato que resulta em sinais sujeitas a flutuações próprias da dinâmica de geração de gotas e a movimentação da poça de fusão. Dito isto, é bem conhecido que a melhor forma de avaliar o arco elétrico em soldagem para uma fonte de características de corrente constante, é pelo controle do comprimento do arco (Tensão). Deste modo, Segundo FILHO (2005), os sinais em um processo com eletrodo revestido, devem ser filtrados com o objetivo de obter constância do sinal base em relação ao tempo e assim, atingir um parâmetro comparativo entre sinais sob diferentes condições. Em conclusão, com a aplicação de filtros digitais procura-se avaliar o comportamento do arco elétrico sem a influência da transferência metálica, obtendo deste



modo, uma dispersão em torno da media menor e assim, coeficientes de variação que expressam a estabilidade dos períodos de arco aberto e refletem o efeito das variáveis do processo sobre este último.

Adicionalmente, um fator de estabilidade foi definido por Madatov com o intuito de avaliar as sinais resultantes de UWW. Este indicador é estabelecido como a razão entre a corrente máxima ( $I_{MAX}$ ) e a corrente mínima ( $I_{MIN}$ ); este índice foi apresentado inicialmente por TSAI e MASUBUCHI (1977), e utilizado mais recentemente por PESSOA (2003) e SANTOS et al (2012). A equação 2 apresenta o indicador:

$$S = \frac{I_{MAX}}{I_{MIN}} \quad (2)$$

Outra técnica utilizada na avaliação do desempenho dos consumíveis em função dos parâmetros de soldagem, é o uso de histogramas. DUTRA (2008) relatou que o histograma é uma ferramenta científica e matemática, a qual fornece informações sobre o caráter de repetitividade dos fenômenos de transferência metálica. Esta metodologia para o tratamento dos dados, consiste na representação do número de ocorrências em função da grandeza em estudo. Segundo BAUNÉ et al (2001), um processo de soldagem estável gera um histograma com um pico comprido e estreito.

Também, os Ciclogramas, o qual é uma técnica gráfica que fornece informação em relação com estabilidade e a transferência metálica. Com o anterior, SUBAM (2003), expõe que pequenas áreas do ciclograma, que a sua vez representam uma menor dispersão dos pontos de tensão em função da corrente, representam processos mais estáveis.

## **2.4 Parâmetros Que Influenciam A Morfologia Do Cordão De Solda**

O foco da pesquisa é a penetração, o qual é considerado comumente um dos requerimentos mais importantes na solda, pelo fato de que uma penetração profunda pode permitir uniões estreitas e uma menor preparação da junta. Assim, “penetração” é um termo não padronizado, utilizado para fazer referência de profundidade de fusão, penetração da junta ou penetração da raiz (Welding HandBook, 2011). Contudo, diversas variáveis do processo podem ter uma influência importante na penetração final de um simples cordão sobre chapa. A seguir, são apresentados os modelos que definem características geométricas do cordão de solda em função dos parâmetros do processo, no ar e embaixo da água.

#### 2.4.1 Modelo térmico da penetração e taxa de fusão em eletrodos consumíveis.

WASZINK e PIENA (1985), considerando os processos térmicos em eletrodos revestidos, estipularam que a geração de calor é dominada pelo fenômenos de catodo e anodo que ocorrem na ponta do eletrodo, que quando em contato com o plasma do arco, absorvem parte da energia gerada pela corrente e assim, causam a fusão do núcleo metálico. Os autores também demonstram que a taxa de fusão varia linearmente com a corrente elétrica e além disso, só uma pequena parte da energia térmica necessária para aquecer e fundir o eletrodo, é fornecida pelo efeito Joule.

Segundo relatado por MACHADO (1996), o arco apresenta três regiões bem definidas (região da queda de tensão Catódica, Região da queda de tensão Anódica e a região da coluna do arco). Considerando o arco elétrico no ponto de vista térmico, o calor é gerado principalmente em duas regiões: zona de queda anódica e zona de queda catódica (uma próxima à peça ou junta a ser soldada e a outra adjacente do eletrodo, em função da configuração de polaridade). Também, a maior parte do volume do arco compreende a coluna (como apresentado no modelo simplificado da estrutura do arco, Figura 2.20); porém, uma parte importante desta energia representa perdas, pela transferência de calor radial. (MODENESI, 2017).

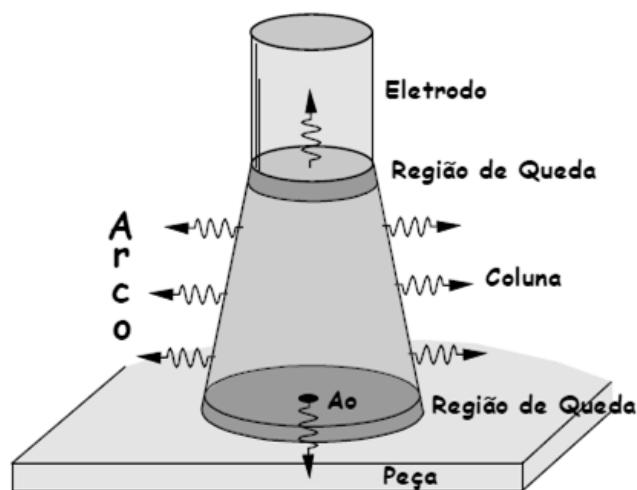


FIGURA 2.20 - . Representação simplificada das direções dominantes do fluxo de calor nas diferentes regiões do arco.

FONTE – MODENESI, 2017.

Em particular, a região de queda catódica para a configuração de polaridade DCEP está localizada na peça, e assim, a quantidade de energia difundida pela peça ( $Q_C$ ) é igual à energia

gerada pela passagens dos elétrons pela zona de queda ( $U_c I$ ) e os resfriamentos (ou perdas de energia) gerados pela energia necessária para a emissão dos elétrons ( $\Phi I$ ) e a energia para que estes sejam aquecidos até a temperatura da coluna do arco ( $3/2 kTI/e$ ) (Equação 3):

$$Q_{cátodo} = \left( U_c - \left( \phi + \frac{3 kT}{2 e} \right) \right) I \quad (3)$$

Em relação ao discutido anteriormente e como parte de um balanço térmico na ponta do consumível, LESNEWICH (1958) representa o calor absorvido do arco pelo eletrodo mediante a seguinte equação (Equação 4):

$$\Sigma Q_{electrodo} = Q_{joule} + Q_{ánodo} \quad (4)$$

Deste modo, sem levar em consideração o aquecimento resultado do efeito Joule ( $Q_{joule}$ ), para a região anódica a energia associada com o aquecimento e fusão do eletrodo pode ser expressa pela (Equação 5):

$$Q_{ánodo} = \left( U_a + \phi + \frac{3 kT}{2 e} \right) I \quad (5)$$

LANCASTER (1994) relata que para o anodo a entrada de calor é devida à condensação de elétrons mais a energia adquirida ao passar pela zona de queda anódica.

Portanto, tendo em conta que nos processos de soldagem com eletrodos consumíveis os elétrons são emitidos pelo fenômeno de emissão por campo (SCOTTI e PONOMAREV, 2008), GUILLE (1970) relata que a queda catódica está na faixa de 10 à 20 V, enquanto a queda da região anódica está na ordem de 1 à 5 V (LANCASTER, 1994). Conseqüentemente e considerando a configuração CC+, QC resultaria num maior aquecimento e fusão da peça, pelo fato de que a maior parte do calor seria gerado nesta região. Assim, maiores penetrações são esperadas nessa configuração de polaridade (WAINER et al, 1992). Logo, pode-se evidenciar que a penetração e fusão da peça aumentam com o incremento da corrente (QUITES e DUTRA, 1979), inferindo a relação direta entre a quantidade de calor transferida para peça e a corrente de soldagem.

No entanto, para uma mudança na localização do catodo e o anodo com a polaridade (o primeiro no eletrodo e o ultimo na peça) em DCEN ocorreria uma maior taxa de fusão e menor penetração (QUITES e DUTRA, 1979).

Também, para a Figura 2.21 (a) tem-se um área de contato entre a peça e o arco A1. Deste modo, a energia gerada nessa zona de queda seria difundida principalmente para a peça, com o qual, a capacidade de fundir localmente (ou potência específica associada) é definida pela relação entre o calor gerado por unidade de tempo na região de queda junto a peça e a área de contato entre a coluna de plasma e a peça ( $Q_{RQ} / A$ ) (MODENESI, 2017). Deste modo, pode-se considerar o formato da coluna de arco como um tronco de cone e o comprimento do arco equivalente com a tensão, acréscimos da tensão resultam em maiores áreas de contato entre a peça e o arco elétrico, como exibido na Figura 2.21 (b). Por isso, a tensão influencia principalmente a característica geométrica da largura do cordão.

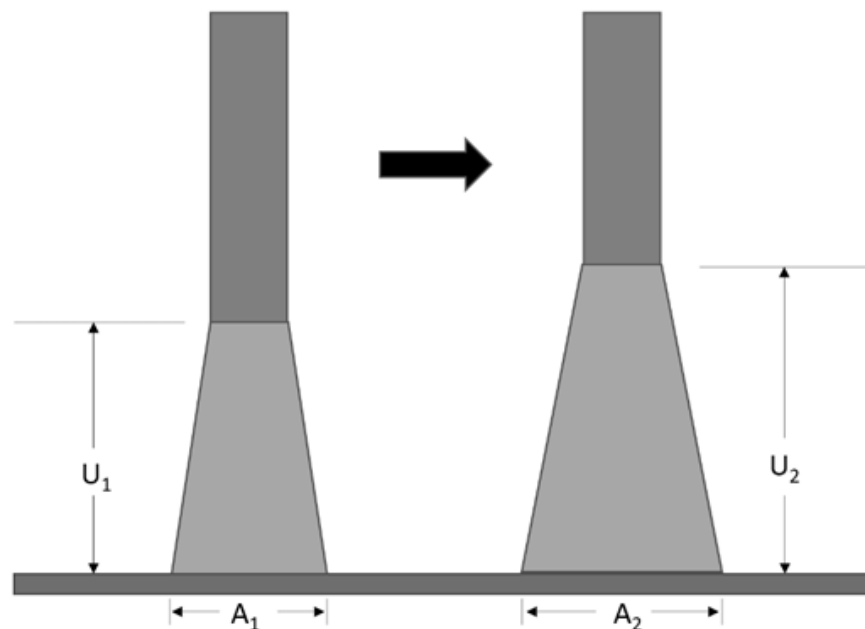


FIGURA 2.21 - . Relação entre a tensão do arco e a largura.

FONTE – Modificado de MODENESI, 2017.

Enfim, a aplicação do processo SMAW requer o estudo em detalhe das variáveis de soldagem. Com o uso de eletrodo revestido, a velocidade de fusão aumenta com a intensidade da corrente do processo. No que diz respeito da velocidade de soldagem, definida pelo Welding HandBook (2001) como a taxa na qual o eletrodo se desloca ao longo da junta, influencia em certa medida a penetração e o reforço. Com isto, altas velocidades de soldagem diminuem a penetração, acrescentam a rugosidade da superfície do cordão, e podem gerar uma mais alta quantidade de inclusões de escória e porosidade. A Figura 2.22 apresenta o efeito dos parâmetros corrente, velocidade de soldagem e comprimento do arco, sob a morfologia do cordão.

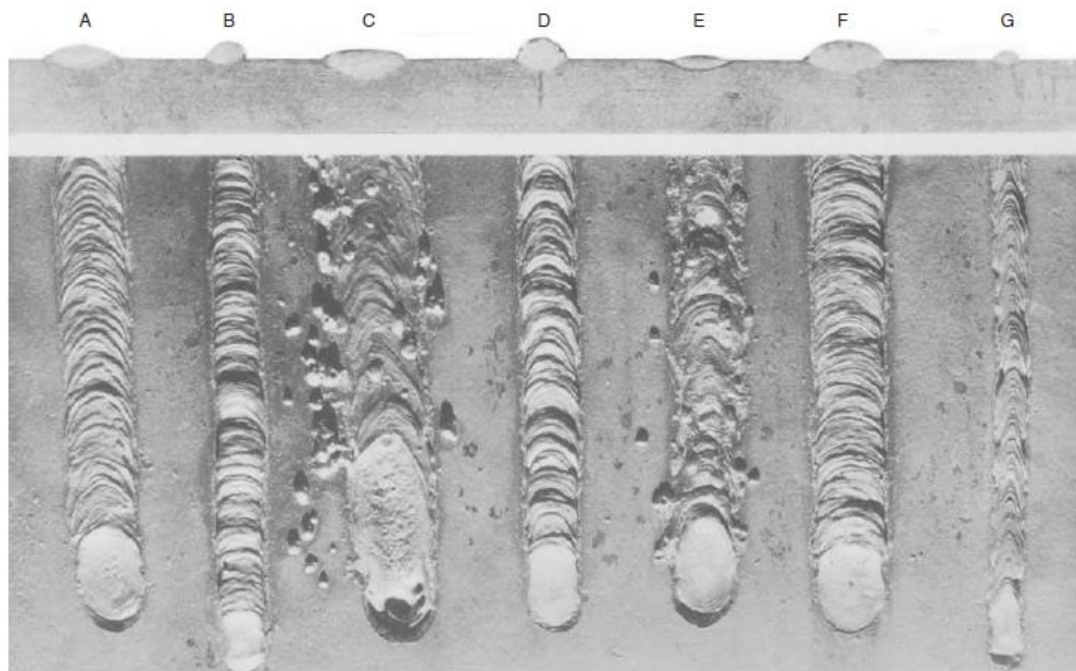


FIGURA 2.22 - . Efeito da corrente, comprimento de arco e velocidade de deslocamento na junta. A. Corrente, comprimento de arco e velocidade de soldagem iniciais. B. Baixa corrente. C. Alta Corrente. D. Comprimento de arco curto. E. Longo comprimento de arco. F. Baixa velocidade de soldagem. G. Alta velocidade de soldagem.

FORNE – WELDING HANDBOOK, 2001.

#### 2.4.2 Modelo de TSAI e MASUBUCHI

TSAI e MASUBUCHI (1977) relacionam a mudança das características do arco com a polaridade do processo e conseqüentemente com as possíveis alterações na forma do cordão de solda. Para soldagem subaquática com eletrodo revestido, concluem que a polaridade é o fator de controle na penetração. Deste modo, é exposto que a polaridade direta (DCEN) proporciona cordões estreitos com penetração profunda como resultado do calor gerado no arco, que é dirigido para a poça de fusão e age no metal base. A mordedura é um defeito presente no uso da polaridade direta, devido a elevada penetração, não permitindo que o metal líquido tenha tempo suficiente para fluir de volta para o lado da cratera de solda. Na polaridade inversa (DCEP) o calor gerado pelo arco é dirigido para o eletrodo de modo que a alma funde rapidamente gerando uma maior taxa de deposição e uma penetração baixa. Quanto à geometria de cone do arco, esta tem maior comprimento para DCEP em relação com DCEN, como mostrado na Figura 2.23.

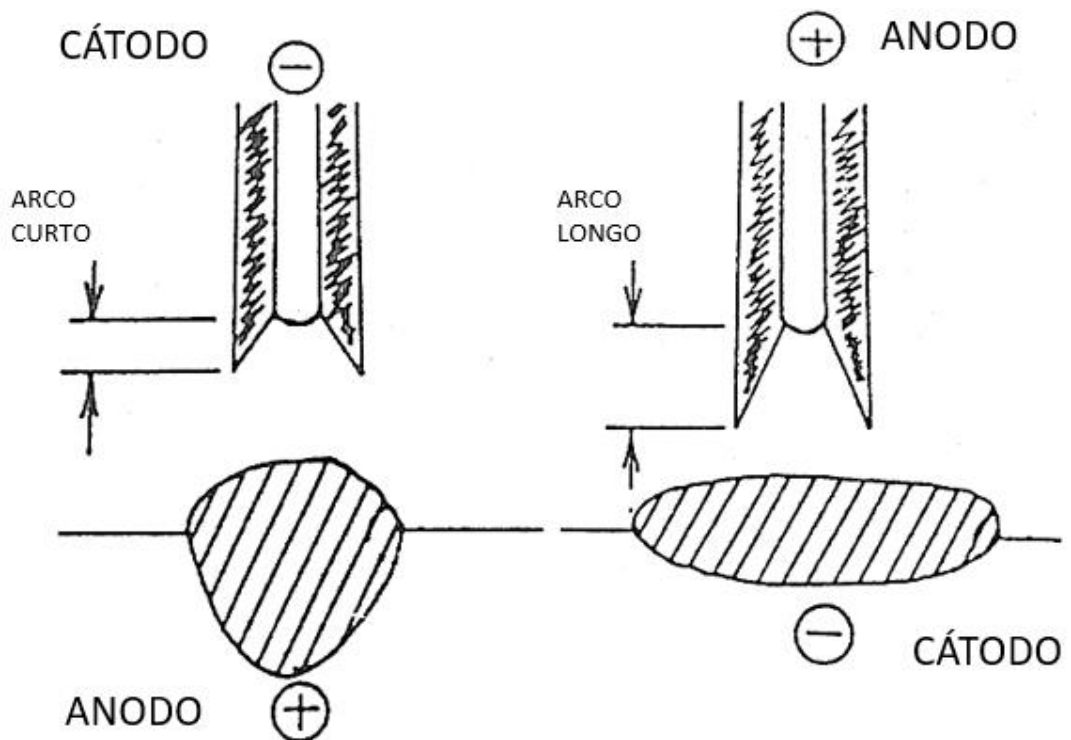


FIGURA 2.23 - . Efeito da polaridade na forma do cordão de solda em soldagem subaquática molhada..  
 FONTE – Modificado TSAI e MASUBUCHI, 1977.

Em relação à distribuição do calor no arco elétrico (TSAI e MASUBUCHI, 1977), 80% deste vai para o ânodo, 15% é removido pelos gases gerados pela fusão do fluxo de revestimento e o 5% restante vai para o cátodo (Figura 2.24). Os autores concluem que a polaridade inversa (DCEP) é a melhor configuração para o processo de Soldagem Subaquática Molhada apresentando melhores soldas, mas, tendo como consequência um detrimento no suporte do eletrodo. Também, essa polaridade resulta em cordões de solda com maior largura e com menor profundidade, o que não ocorre no processo ao ar. No final, estes autores determinam que a polaridade da corrente pode ser o fator que em maior medida controla a aparência do cordão e a sua penetração.

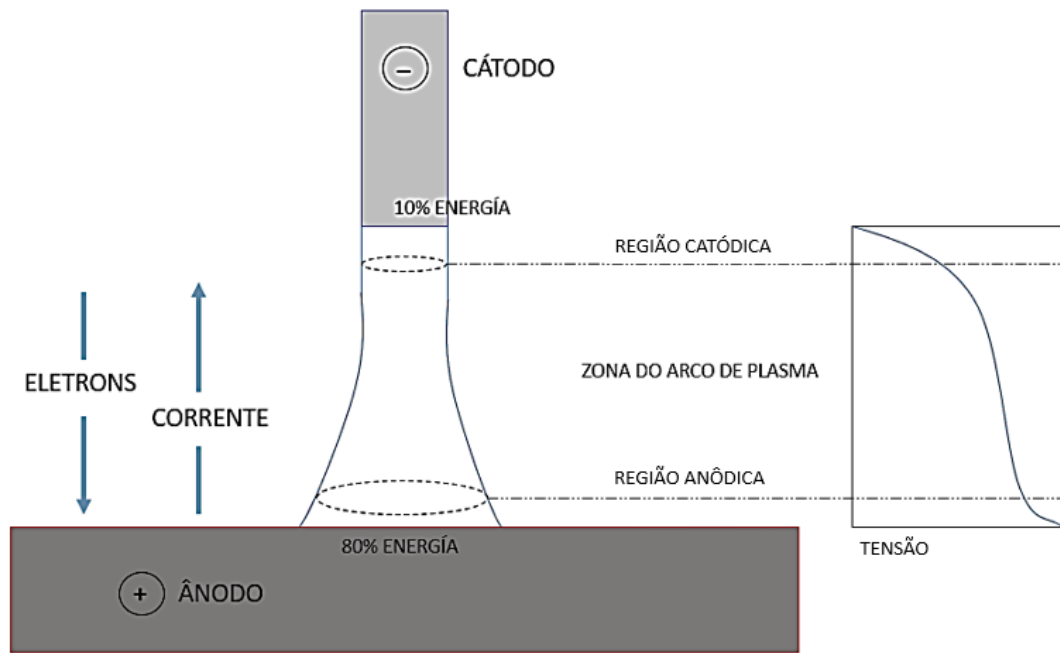


FIGURA 2.24 - . Estrutura básica do arco elétrico e sua distribuição de calor.

FONTE – Modificado TSAI e MASUBUCHI (1977).

SILVA e HAZLETT (1971) concluíram que a polaridade direta (DCEN) claramente produz melhores soldas, porque possui menos mordedura e respingos, além de um cordão melhor, com forma mais regular. KIM (2003) define o uso da polaridade direta como uma recomendação pela soldagem subaquática molhada, justificando que a polaridade inversa (DCEP) acelera a corrosão do suporte do eletrodo.

Em particular PESSOA (2003), estudou o desempenho de eletrodos revestidos comerciais em soldagem subaquática. Ele encontrou uma relação direta entre a polaridade e algumas características da solda. É evidente por exemplo, a existência de um arco mais estável com o uso da polaridade inversa (DCEP) no eletrodo AWS E6013 para todos os aços (metal base) em todas as profundidades de seu experimento. Também, no que se refere a geometria do cordão de solda, na polaridade direta (DCEN), a penetração do cordão sempre é maior em todos os testes.

Também DESAW et al (1969) encontram que soldas feitas em DCEP apresentaram menor penetração e maior largura em comparação com DCEN.

GRUBSS et al (1996) fizeram um estudo de soldagem e corte subaquático, enfatizando o processo molhado e as características que definem o cordão (corrente, velocidade de deslocamento e ângulo do eletrodo na junta). Os autores apresentam a relação entre localizações geográficas e polaridade, narrando por exemplo que no Mar do Norte a polaridade inversa

(DCEP) é significativamente melhor que a polaridade direta, deixando claro que geralmente o processo com eletrodo negativo (DCEN) é o mais comumente utilizado.

WATSON et al (1994) em seu trabalho de validação das soldas molhada como um método de uso confiável para a manutenção de estruturas subaquáticas, ratificaram os resultados de muitos pesquisadores escolhendo a polaridade direta como a melhor opção. Por sua parte GOOCH (1983), não encontrou um efeito direto da polaridade nos resultados de seu trabalho experimental.

PESSOA (2007) declara que a modificação na polaridade produz alterações na direção do movimento dos elétrons no arco, influenciando a distribuição de calor no eletrodo e no metal base. Parâmetros tais como a taxa de fusão do eletrodo, a composição química do revestimento e as mudanças na transferência de metal são algumas das alterações que resultam do aumento da temperatura. O autor caracteriza a geometria resultante de cordões sobre chapa para 50 e 100 m de profundidade. Assim, o consumível rutilico apresenta maior penetração, reforço e menor largura para a configuração de polaridade negativa. Também, o consumível básico (E7018) com o uso de DCEP, resulta em cordões de menor penetração se comparado com CC-. PESSOA (2007) conclui que a posição do anodo é efetiva na determinação da penetração dos cordões de solda, pelo fato que esta zona tem a maior concentração de calor no arco.

Em relação com a literatura, SUGA (1985, 1986, 1990) e SUGA e HASUI (1986, 1988) usam em seus procedimentos experimentais uma fonte de energia de corrente contínua (CC) e polaridade direta (eletrodo no negativo/DCEN), mas, não há critérios definidos ou razões subjacentes à escolha deste parâmetro. Além disso, SZELAGOWSKI et al (1992), POPE e LIU (1996) e WERNICKE e POHL (1998), também utilizaram polaridade direta (DCEN) em todos os testes.

Em suma, a reversão das características do arco que resultam em menor penetração em DCEP com o uso de eletrodos revestidos não foi explicada ainda (MAZAFERRO, 1998).

#### **2.4.3 Definição Da Geometria Do Cordão Pelo Fluxo De Metal Na Poça De Fusão**

Pequenas diferenças na composição química podem ter uma influência profunda sob a solda. Por exemplo, para consumíveis no processo SMAW, o revestimento tipo celulósico gera um arco muito violento, o qual, causa um grande volume de respingos (VILLANI et al, 2017). Isto é resultado da alta quantidade de material orgânico que o eletrodo possui e é refletido na



poça de fusão que forma, na qual a força do arco (jato de plasma) produz uma cavidade, derivando em fluxos que atingem altas penetração (LANCASTER, 1993).

Como uma analogia, pequenas diferenças na concentração de elementos tensoativos, geram mudanças substanciais na tensão superficial do ferro e outros materiais (MILLS y KEENE, 1990). Deste modo HEIPLE y ROPER (1982), expõem que no caso de um aço com baixo teor de enxofre, a curva  $\gamma$ -T apresenta uma inclinação negativa e assim, a tensão superficial nas bordas mais frias da poça será maior que no centro, ocorrendo um fluxo termocapilar radialmente para afora (Figura 2.25. a). Contudo, para um aço de alto teor de S, a tensão superficial é maior no centro e assim, o fluxo será radialmente para adentro, como mostrado na Figura 2.25 (b).

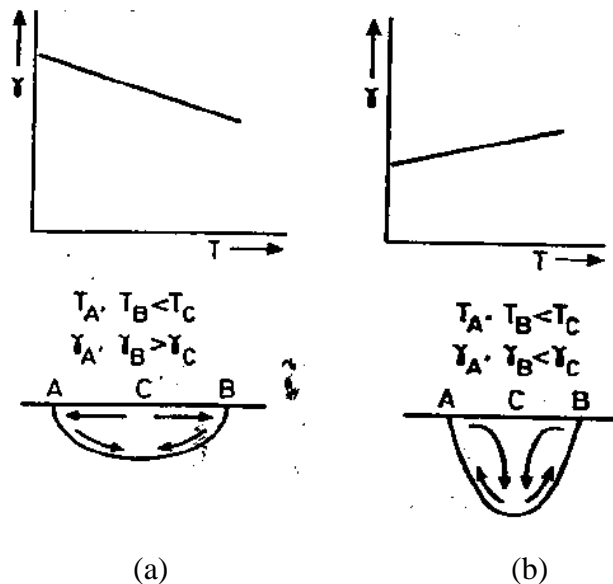


FIGURA 2.25 - Fluxo de fluido em poça de fusão resultante da convecção de Marangoni. (a) Baixos níveis de elementos ativos; (b) altas concentrações de elementos ativos.

FONTE – MILLS y KEENE, 1990.

Para o primeiro caso, o fluxo para o exterior levará líquido aquecido à borda da poça, mesclando-o na interface e fornecendo um cordão de maior largura; enquanto no outro caso, o fluxo de superfície induz um fluxo descendente no centro, de tal forma que ocorre uma fusão no fundo da poça e uma solda mais profunda é gerada.

Estes fluxos conduzidos pela tensão superficial são geralmente chamados Convecção de Marangoni. Como pode ser visto, a superfície de tensão conduz fluxos que são sempre direcionados da região de baixa tensão superficial para a região de alta tensão superficial. Desta forma, conclui-se que a penetração da solda é o resultado (em parte) das mudanças no fluxo de

fluido resultante da convecção de Marangoni e que, por sua vez, é controlada em grande parte pela composição do aço (MILLS y KEENE, 1990).

### 2.4.3.1 O Oxigênio Como Elemento Tenso Ativo

AIDUN Y MARTIN (1997) relatam que o teor de oxigênio tem um efeito maior sob a penetração da solda que o enxofre e assim, segundo POLLARD (1988), medições na concentração de Oxigênio requerem-se para explicar a diferença nas características da penetração. KEENE (1988) mostra que para teores maiores a 40 ppm, o coeficiente  $dY/dT$  é positivo. Por sua parte, HEIPLE Y BURGARDT (1993) explicam que quando oxigênio é adicionado ao gás de proteção, a relação  $d/w$  da solda incrementa (Figura 2.26). Na mesma Figura é possível evidenciar que depois de atingir um valor máximo, a fator  $d/w$  decresce como consequência da formação de um filme de óxido líquido (escória) na superfície da poça, o que altera os gradientes de tensão superficial.

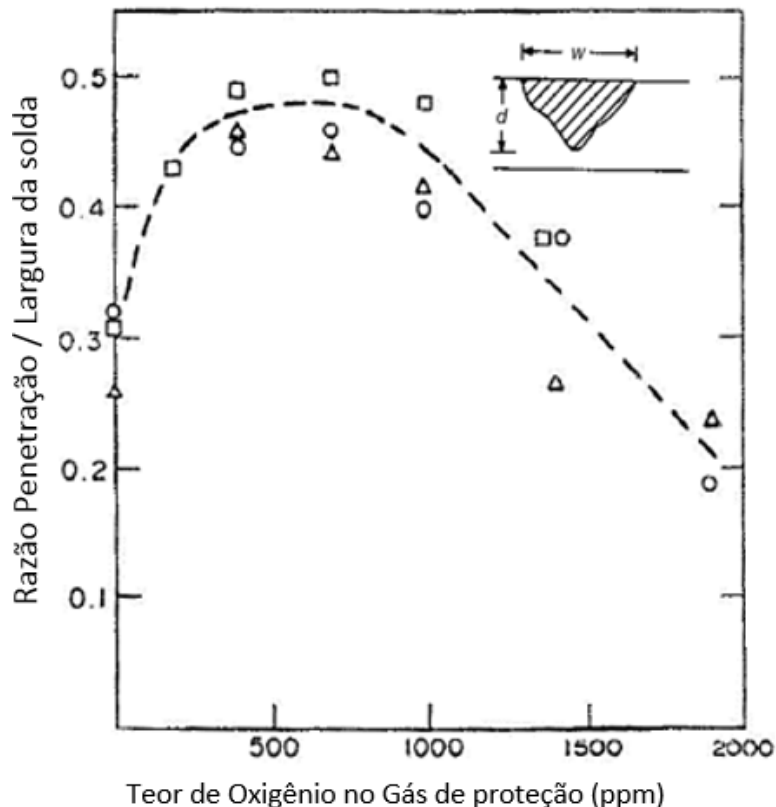


FIGURA 2.26 - Efeito da adição de Oxigênio ao gás de proteção (Argônio) sob o formato da zona fundida em soldas GTAW de aço inox. O critério  $d/w$  é de uso comum na literatura, onde  $d$  = profundidade e  $w$  = largura.

FONTE – Modificado de HEIPLE Y BURGARDT, 1983.

### 2.4.3.2 Defeitos no cordão de solda com consequência do fluxo de metal líquido na poça de fusão

HEIPLE y BURGARDT (1993) estabelecem que o fluxo de fluido na poça de fusão é importante porque afeta a forma da solda e influência na formação de defeitos. Tem-se observado que as ondas na superfície das soldas são finas para aços que apresentam má penetração e grossas para aqueles com boa penetração. Com o anterior, as ondulações estariam relacionadas com as propriedades da superfície da massa fundida de aço. Assim, MILLS y KEENE (1990) apud BENNET y MILLS (1974) apresentam como mostrado na Figura 2.27, a relação entre a rugosidade relativa do cordão de solda e o fator P/L (penetração vezes a Largura ou  $d/w = \text{depth/width}$ ).

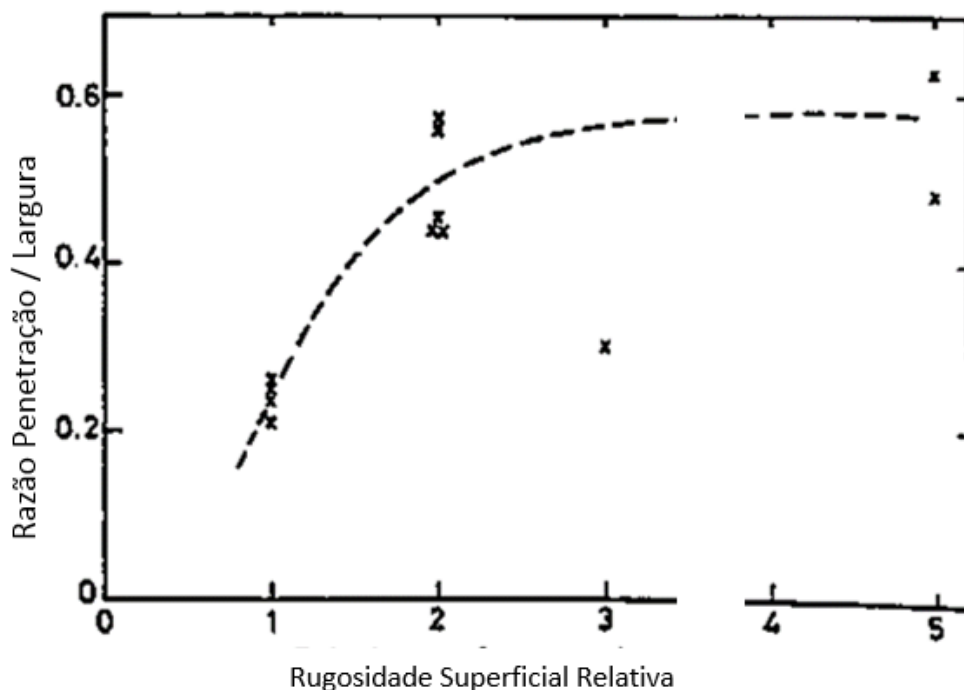


FIGURA 2.27 - Rugosidade relativa da superfície da solda como uma função do critério de aspecto  $d/W$  ou  $P/L$ .

FONTE – BENNET y MILLS, 1974.

O mecanismo que exemplifica este defeito é descrito como segue (Figura 2.28): No caso de um sistema que apresenta um  $dY/dT$  positivo, o fluxo de fluido radial de alta velocidade na superfície dirige-se para o centro da poça de fusão desde todas as direções e se poderia esperar que a interação resultante na zona central resultaria em turbulência (presença de ondas). Por

outro lado, é provável que para um  $dY/dT$  negativo, o fluxo superficial se desloque para a borda da poça de fusão, onde a energia dinâmica do fluido pode ser mais facilmente dissipada.

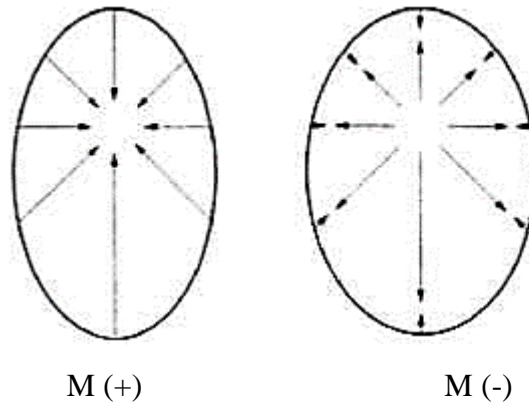


FIGURA 2.28 - Esquema mostrando o fluxo de fluido desde uma vista superior.

FONTE – HEIPLE y BURGARDT, 1993.

Por último, MILLS y KEENE (1990) descrevem outro tipos de defeitos resultantes da concentração de elementos tenso ativos. A corcova ou “Humping” acontece em altos teores de Oxigênio ou enxofre (Figura 2.29).



FIGURA 2.29 - Perfil de superfície previsto.

FONTE – MILLS e KEENE, 1990.

## 2.5 Considerações Especiais

As altas densidades de corrente e as pequenas áreas de superfície apresentadas na soldagem por fusão em comparação com processos siderúrgicos, fornecem as condições para que reações termoquímicas e eletroquímicas exerçam influência importante sob a composição final do metal de solda (KIM et al, 1990). Especificamente, as reações eletroquímicas ocorrem somente na ponta fundida do eletrodo e na poça de fusão embaixo do arco. Assim, a composição global da solda é controlada pela composição das gotas de metal que entram no conjunto da solda e estão em função de condições específicas, apresentadas nas Tabela 2.3.

TABELA 2.3- Regiões do arco de soldagem. Modificado (Modenesi, 2017).

Característica	Valores típicos	
	Na gota	Na poça
Temperatura média do metal fundido/aço (°C)	2100 – 2350	1700 – 2000
Tempo de interação com a vizinhança (s)	0,1 – 0,2	3 – 40
Massa de metal fundido (g)	0,008 – 0,25	0,5 – 50
Área específica de interação (cm <sup>2</sup> /g)	2,1 – 4,1	0,4 – 1,0

FONTE - MODENESI, 2016.

Deste modo, em processos com eletrodo consumível e presença de fluxos (revestimentos), interações metal-gás (absorção de gás pelo metal fundido), reações com componentes da poça de fusão e interações metal – escória governam a química do metal de solda em soldagem com corrente contínua (MODENESI, 2016; KIM et al, 1990).

Assim, as interfaces da escória com o metal fundido na ponta do eletrodo e a poça de fusão, dão como resultado reações anódica e catódicas, responsáveis pelas perdas de oxidação de elementos de liga e absorção de oxigênio e também, o refino de elementos no metálicos como o oxigênio, respetivamente.

Contudo, depois do destaque da gota metálica (metal de adição) da ponta do eletrodo, as reações eletroquímicas cessam e assim, as altas temperaturas resultantes do superaquecimento do metal viajando pelo plasma (MODENESI, 2016), propiciam reações termoquímicas encarregadas da absorção de oxigênio na gota. A Figura 2.30 apresenta a maior quantidade de Oxigênio absorvido com o eletrodo configurado em DCEP, fato que é refletido na análise química da ponta do eletrodo e gotas de metal de adição recolhidas.

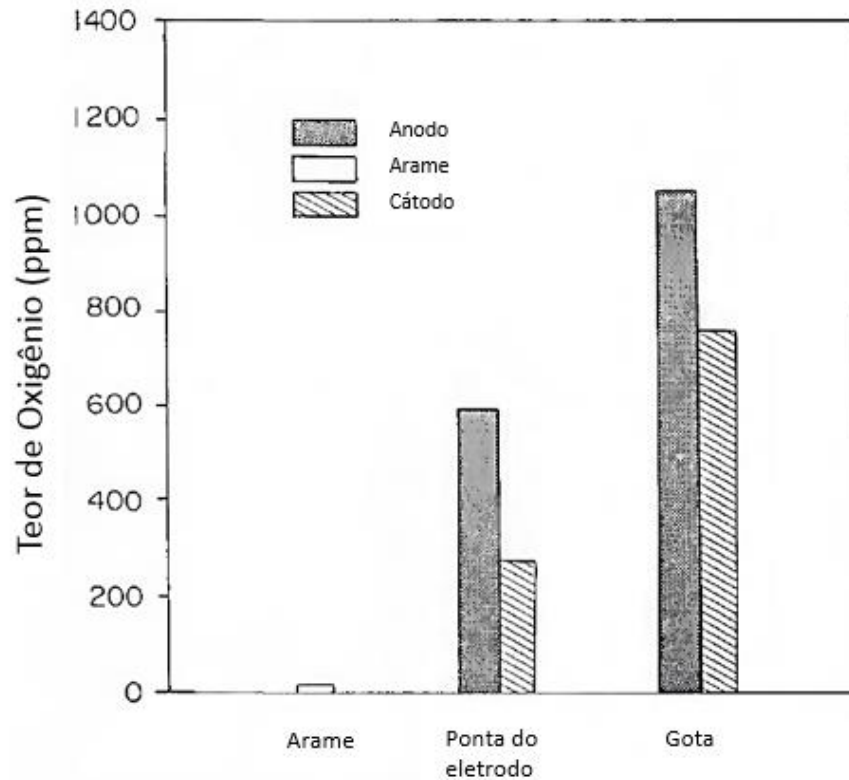


FIGURA 2.30 - Teores médios de oxigênio do arame de soldagem, as pontas do eletrodo e as gotas destacadas para polaridades DCEN (arame no cátodo) e DCEP (Arame no anodo).

FONTE – KIM et al, 1990.

Também, a maior absorção de Oxigênio pode ser favorecida pela maior área específica de interação na polaridade inversa, onde tem-se gotas de maior tamanho (KIM et al, 1990). Este fenômeno é refletido na soldagem com eletrodo revestido, onde foi descrito por BRANDI et al (1991), que com a mudança da polaridade (de DCEP a DCEN) tem-se uma diminuição do diâmetro característico das gotas de metal e a quantidade de respingos: o anterior foi relacionado com a temperatura na superfície da gota de metal (Figura 2.31).

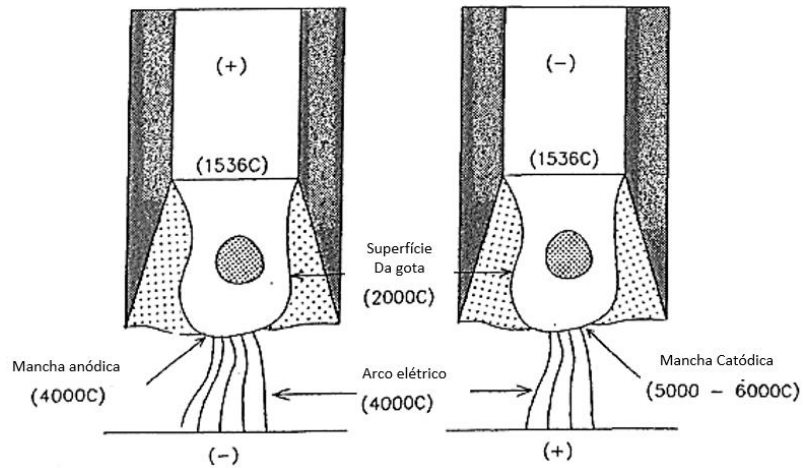


FIGURA 2.31 - Temperatura da superfície da gota em função da polaridade.

FONTE – Modificado de BRANDI et al, 1991.

Assim, o gradiente de temperatura na ponta do eletrodo fundido gera forças sensíveis à temperatura, que adicionadas a uma mudança na tensão superficial, geram alterações no padrão de fluxo do metal líquido e influenciam na redução do diâmetro das gotas e o aumento dos respingos.

Adicionalmente, VAZ (2014) na tentativa de avaliar a transferência metálica do uso de um eletrodo básico e outro com polímero, realizou soldas manuais num tubo de cobre refrigerado: coletou gotas, fez a remoção da escória e procedeu com a classificação granulométrica. Na figura 2.32, o autor apresenta as gotas embutidas à frio, e estas permitiram concluir a presença de um vazio maior para gotas de maior diâmetro.

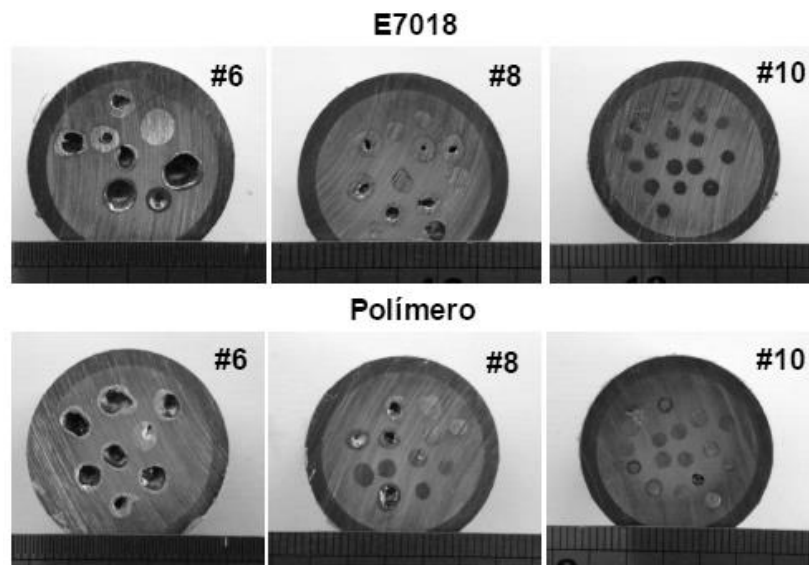


FIGURA 2.32 - Macrografias de gotas retidas nas malhas #6, #8 y #10.

FONTE – VAZ, 2014.

Por conseguinte, fazendo uma analogia com PEREZ e LIU (2006), os autores concluem que uma maior quantidade de gás é transportado por gotas grandes que pequenas, no desenvolvimento do seu trabalho denominado “The Mechanism of Porosity Formation in Underwater Wet Welds”.

Assim, os autores relacionam a porosidade com a difusão do hidrogênio no metal fundido na ponta do eletrodo, expondo que para as gotas maiores, o vazio representa o 41% do volume da gota e somente o 15 % para gotas pequenas.

Por último, mais recentemente WANG et al (2017) no seu estudo sob a transferência de oxigênio no processo de soldagem por eletro escória, descrevem que o eletrodo aquecido no processo de fusão é oxidado facilmente pelo ar, criando um óxido no arame. Este óxido entra na escória com a fusão do eletrodo, par depois reagir na poça de fusão, se descompõe em oxigênio na escória e viajar até a gota de metal líquido, aumentando o teor de oxigênio nesta e sendo trazido de volta para poça de fusão no destacamento da gota. O esquema da Figura 2.33 descreve o fenômeno. Também, os autores relatam um acréscimo da concentração de oxigênio com o incremento das gotas.

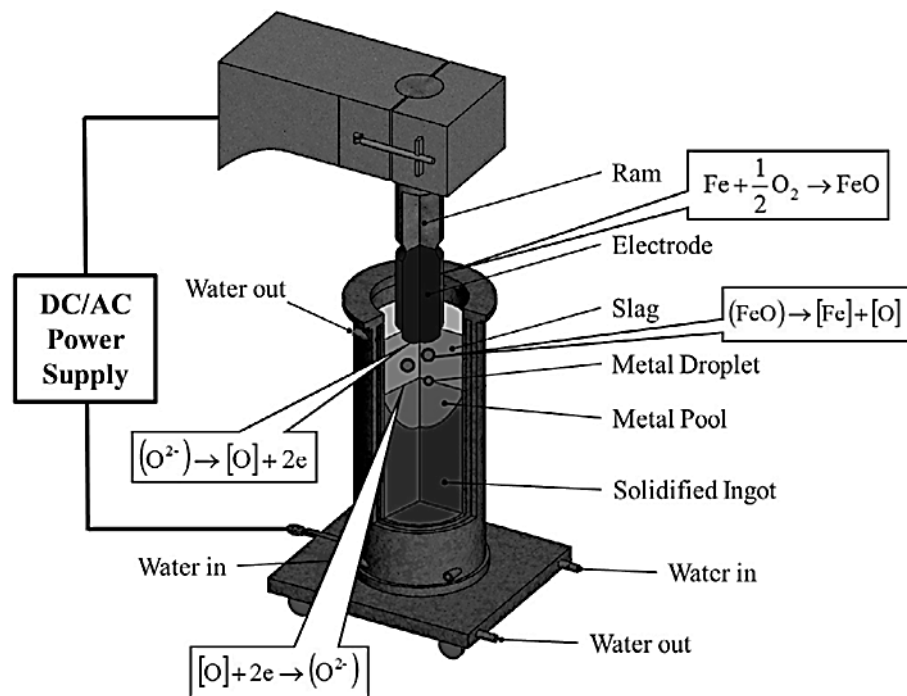


FIGURA 2.33 - Esquema do processo de eletroescória.

FONTE – WANG et al, 2017.

Continuando com os fenômenos eletroquímicos e sua influência sob a composição química final do metal de solda, MEDEIROS e LIU (1998) apresentam um modelo da absorção



de hidrogênio em soldagem subaquática molhada com eletrodo revestido (Figura 2.34). Assim, os autores, levando em consideração o princípio de que qualquer desvio na composição pode ser atribuído às reações eletroquímicas, realizaram soldas de cordão sobre chapa com eletrodos oxidantes contendo adições sistemáticas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Assim, os autores consideram que a interface escória/gota metálica é o sítio da reação importante para a absorção do hidrogênio no metal de solda na configuração de polaridade DCEN. Deste modo, o modelo baseia-se na simples compreensão de que as mais baixas temperaturas do eletrodo encontradas nesta configuração de polaridade, dariam como resultado uma reação mais lenta na interface ambiente/escória. Contrariamente, a interface poça de fusão/escória pode ser o sítio de reação importante para a absorção de hidrogênio no metal de solda em polaridade inversa (DCEP).

Também, foi avaliada a escória resultante de soldas feitas em CC-. Encontrou-se que para a menor quantidade de hidrogênio difusível no metal de solda se obteve a presença de Faialita ( $2\text{FeOSiO}_2$ ).

Por conseguinte, o mais baixo teor de hidrogênio difusível foi obtido com o uso de polaridade inversa. Além disso, com eletrodos oxidantes o teor de hidrogênio difusível no metal de solda foi de 13,2 ml/100g, em comparação com os 90 – 100 ml/100g obtidos com os eletrodos tipo rutilicos.

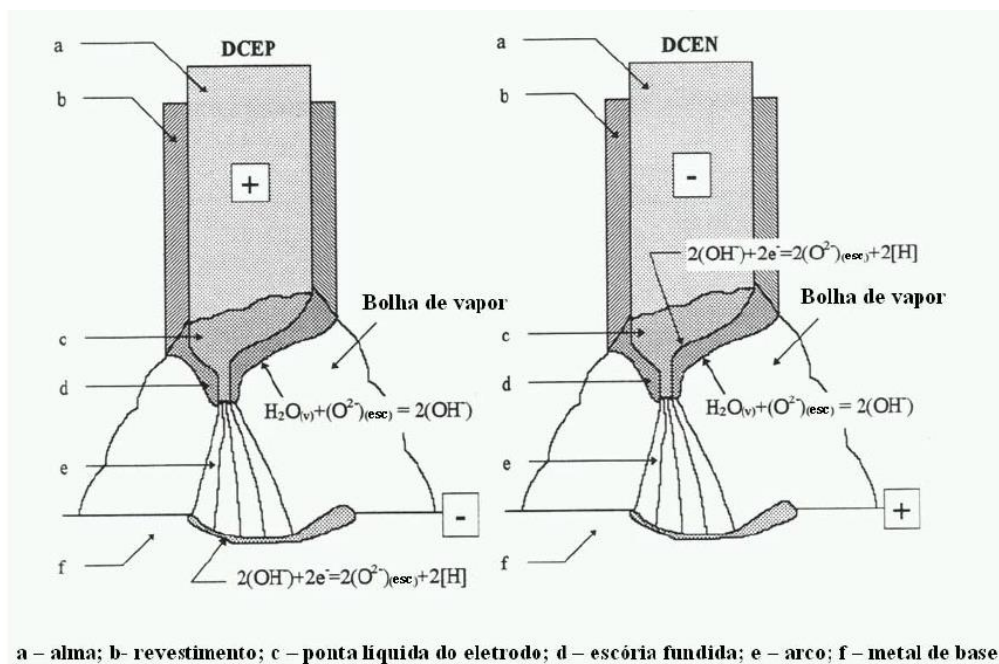


FIGURA 2.34 - Desenho esquemático mostrando o mecanismo de transferência de hidrogênio para o metal de solda para as duas polaridades em corrente contínua.

FONTE – PESSOA, 2007 apud MEDEIROS e LIU, 1998.

Tal como expressado por MEDEIROS e LIU (1998), POPE e LIU (1996) observaram que o teor de hidrogênio difusível de soldas depositadas por eletrodos oxidantes apresentam um nível mais baixo em comparação com as soldas depositadas por eletrodos rutilicos. Assim, é apresentada uma relação inversa entre o teor de hidrogênio difusível e o oxigênio no metal de solda (Figura 2.35). Porém, detalha-se que para os eletrodos tipo A e E (rutilico e oxidante, respetivamente), tem-se o mesmo teor de oxigênio. O comportamento anterior revela que o oxigênio no metal de solda por si só não explica satisfatoriamente o mais baixo teor de hidrogênio depositado pelo eletrodos oxidantes.

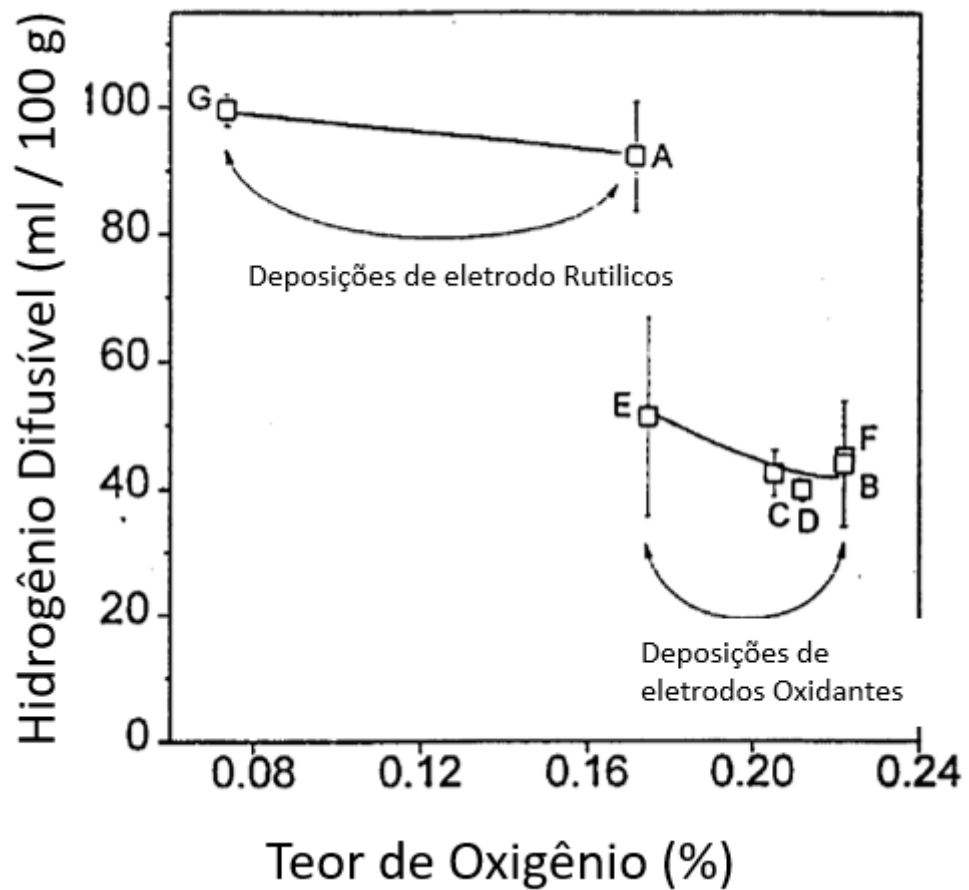


FIGURA 2.35 - Teor de Hidrogênio difusível no metal de solda em função do teor de oxigênio em soldas subaquáticas molhadas.

FONTE – POPE e LIU, 1996.

### 3. METODOLOGIA

O trabalho tem como objetivo principal estudar o efeito da polaridade sob a penetração e estabilidade de soldas feitas com os consumíveis E6013 e WW70. Assim, a análises dos sinais e as macrografias são as ferramentas centrais do estudo. Porém, foram utilizadas análises químicas e a descrição das características do processo com o intuito de complementar a pesquisa.

Este capítulo descreve sucintamente cada um dos passos feitos no desenvolvimento da pesquisa, incluindo a escolha dos matérias e a descrição dos equipamentos utilizados.

#### 3.1 Equipamento utilizado

##### 3.1.1 Câmara para Soldagem Hiperbárica

Para a simulação do processo UWW em as profundidades de estudo, foi utilizado um vaso de pressão que permite operar com pressões de trabalho de até 20 atm. Este equipamento está localizado no LRSS – Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação. A Figura 3.1 apresenta o desenho do vaso.

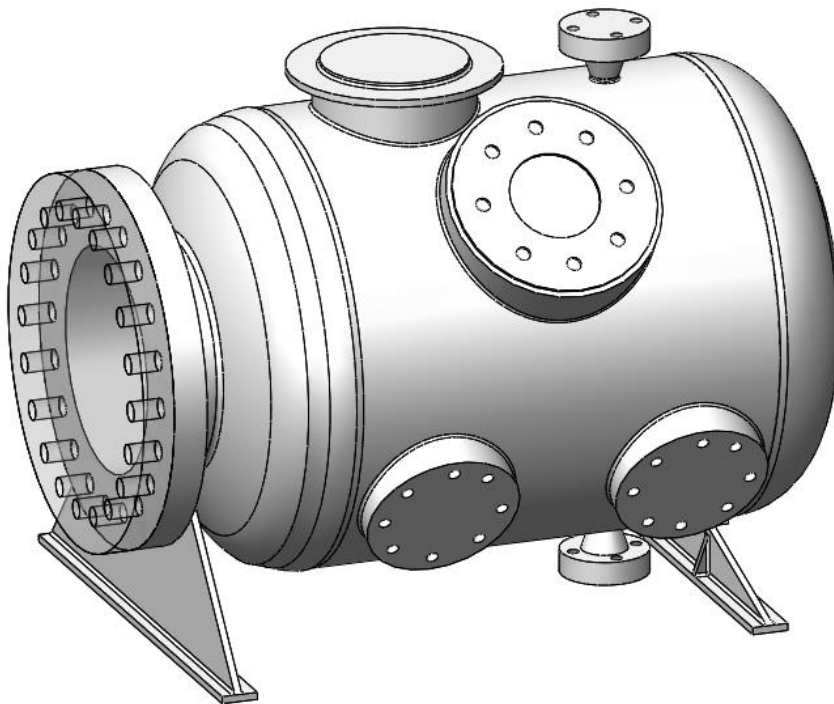


FIGURA 3.1 - Vaso de pressão para Soldagem subaquática.

### 3.1.2 Sistema de Soldagem por Gravidade

Para o desenvolvimento das soldas molhadas, utilizou-se um dispositivo para soldagem mecanizada com eletrodos revestidos. As principais características deste aparelho são:

- Permite o uso de consumíveis com diâmetro de 2,5 a 6,0 mm e comprimento máximo de 450 mm.
- Apresenta ótima repetibilidade pelo fato que utiliza a gravidade como fonte de energia.
- A velocidade de Soldagem é dependente da taxa de fusão do eletrodo e do valor dos ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  (Figura 3.2). Deste modo, o ângulo  $\alpha$  está relacionado à velocidade de soldagem e o ângulo  $\beta$  está relacionado à componente da força gravitacional atuando na garra de fixação do eletrodo, e assim, no comprimento do arco elétrico durante o andamento das soldas. Estes foram mantidos fixos de acordo com a Tabela 3.1.

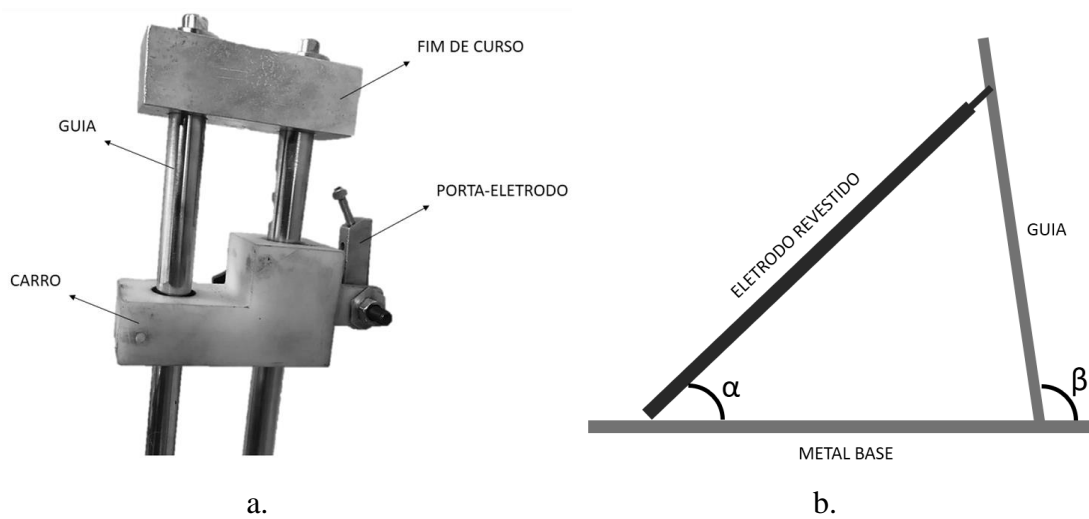


FIGURA 3.2 - . a. Detalhe do sistema de soldagem por Gravidade e b. Desenho esquemático do dispositivo de soldagem e a configuração dos ângulos  $\alpha$  e  $\beta$ .

Tabela 3.1. Ângulo  $\alpha$  e  $\beta$  utilizados na execução das soldas.

$\alpha$	$\beta$
60°	100°

### 3.1.3 Fonte de Soldagem

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi utilizada uma fonte de soldagem eletrônica – IMC SOLDAGEM, modelo HipER-1, o qual é um equipamento projetado especialmente para a soldagem com eletrodos revestidos em ambiente submarino (Figura 3.3). Como características elétricas do equipamento, a Tensão em Vazio é de 80 V e a corrente máxima configurável é de 450 A. Uma mais profunda descrição das características da Fonte é apresentado no Apêndice I.



FIGURA 3.3 - Equipamento HipER1 para operações em ambientes marítimos.  
FONTE – IMC – Engenharia de Soldagem.

### 3.1.4 Sistema de Aquisição de Dados

Foi utilizado o sistema de aquisição de dados de soldagem – IMC SOLDAGEM, modelo SAP V4 (devidamente calibrado pelo fabricante), em conjunto com o software SapTiV4.37s da mesma marca, utilizado na visualização e coleta das sinais durante o processo de soldagem e a exportação dos dados para um arquivo tipo texto. Deste modo, foram obtidas sinais com uma taxa de amostragem de 5000 Hz. A Figura 3.4 apresenta o diagrama geral das conexões no arranjo do estudo.

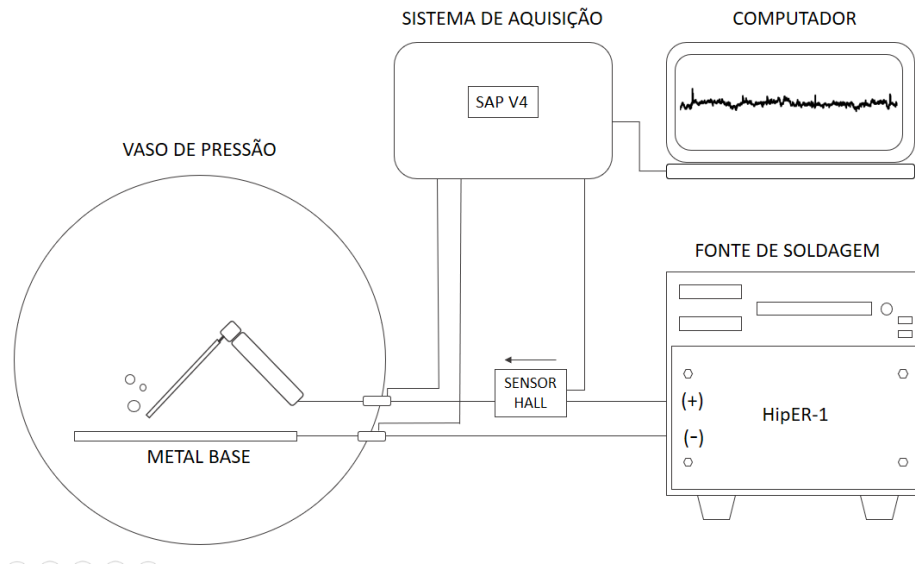


FIGURA 3.4 - Diagrama geral para aquisição de dados.

Para a medição da corrente de soldagem, foi utilizado um sensor Hall tipo janela LEM, modelo HAT 200-S, com uma faixa de medição de -600 a 600 A e sinal na saída de  $\pm 4$  V. Este equipamento é de uso comum em fontes para aplicação em processos de soldagem.

Como pode ser observado na Figura 3.4, a medição da tensão do arco foi feita nos cabos de força (diferença de potencial entre o polo positivo e negativo), no ponto em que estes atravessam a parede do vaso. O anterior é justificado desde o ponto de vista de minimizar as quedas de tensão. SCOTTI e PONOMAREV (2008) relatam que para medir o parâmetro elétrico da tensão, deve-se tentar coletar esta grandeza o mais perto do ponto de contato elétrico entre o consumível e o porta eletrodo, com o fim de obter uma sinal com menos ruído. Contudo, a faixa de medição da tensão está na ordem de -100 a 100 V.

Além disso, a análise dos dados obtidos foi feita com o uso do Programa Sinal 2017, desenvolvido pelo LRSS/LabSEND – Universidade Federal de Minas Gerais.

## 3.2 Materiais

### 3.2.1 Corpo de Prova

O metal base utilizado foi do tipo de baixo carbono, apresentando um Carbono Equivalente de (Ceq) 0,20. A continuação, a Tabela 3.2 apresenta a composição química.

Tabela 3.2. Composição química do corpo de prova.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	Al	W	V	Ti	Ce	Fe%
0,1	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	99,2
2	1	8	1	1	1	2	0	0	0	7	0	1	0	0	6

Os corpos de prova utilizados na pesquisa tinham as dimensões apresentadas na Figura 3.5.

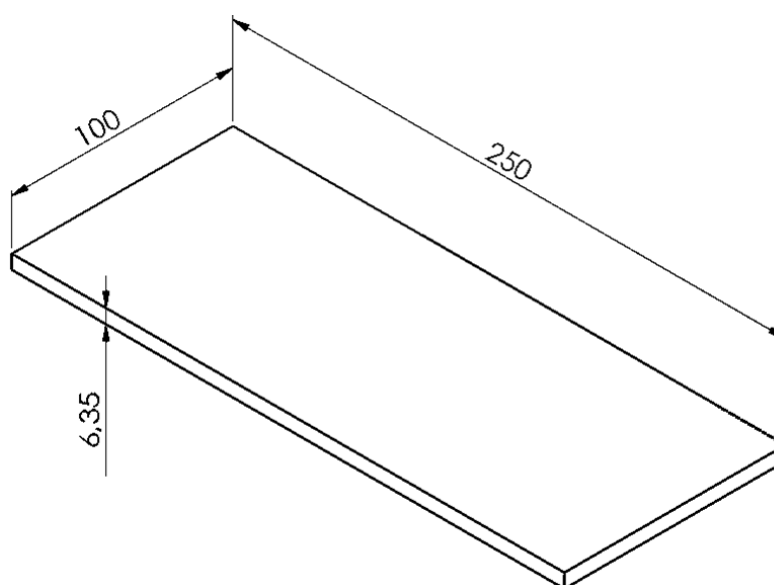


FIGURA 3.5 - Corpo de prova para deposição de cordão sobre chapa, cotas em mm.

### 3.2.2 Consumíveis

Os eletrodos revestidos utilizados neste trabalho foram fornecidos pela ESAB, com um diâmetro nominal de 3,25 mm e um comprimento de 350 mm.

O AWS E6013, eletrodo rutilico de uso geral e com bom desempenho em quanto estabilidade do processo, boa soldabilidade e de fácil abertura do arco elétrico, foi um dos primeiros consumíveis utilizados em aplicações de UWW. Conjuntamente, o consumível foi protegido com verniz vinílico Tubolit VVE 815, evitando assim a degradação do revestimento durante o processo de soldagem.

A composição química do metal de solda depositado com este consumível é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Análises químico do metal depositado com E6013.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
0,064	0,23	0,37	0,015	0,009	0,016	0,028	0,003	0,014

FONTE - ESAB - Certificado de Qualidade Eletrodo OK 46.00 E6013, Lote: VT432E4425 (Anexo 1)

Também, a composição aproximada do revestimento em função dos principais ingredientes é estabelecida na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Composição do revestimento de um consumível OK Serralheiro.

<b>Composto químico</b>	<b>Concentração (%)</b>
Óxido de Titânio	40 - 50
Silicato de Alumínio	10 - 15
Silicatos de Ferro	10 - 15
Cálcio	5 - 10
Manganês	5 - 10
Celulose	2 - 5
Quartzo	2 - 5
Óxido de Zircônio	< 1

FONTE - ESAB - Ficha de informações de segurança de produtos químicos OK Serralheiro (Anexo 2)

Por sua parte, o consumível Wet Weld 70 – WW70, eletrodo tipo Oxi – rutilico desenvolvido numa parceria entre Petrobras, PUC-Rio, UFMG e ESAB, substitui os consumíveis comerciais rutilicos e oxidantes, apresentado um teor de hidrogênio difusível do mesmo nível que o último e superando a tenacidade e ductilidade dos tipo rutilicos. Também, a baixa porosidade e ausência de micro trincas no metal de solda constituem as principais vantagens deste consumível sobre os eletrodos comerciais. Contudo, os principais constituintes do revestimento são apresentados na Tabela 3.5. Além disso, o WW70 foi fornecido de fábrica com um revestimento impermeabilizado.



Tabela 3.5. Formulação do revestimento para o consumível experimental WW70.

<b>Composto</b>	<b>Concentração (%)</b>
<b>químico</b>	
Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	40 - 60
Rutila (TiO <sub>2</sub> )	5 - 25
Sílica (SiO <sub>2</sub> )	10 - 40
Formadores de gases e escória, estabilizadores de arco.	15
Elementos de Liga (Ni e Fe-Mo)	3

FONTE - SANTOS et al (2012)

### 3.3 Procedimento Experimental

Foram estabelecidos os parâmetros de estudo em função das recomendações da literatura e do escopo da pesquisa. Deste modo, os fatores de ambiente, consumível e polaridade se subdividiram em uma série de níveis, como exibido na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Condições experimentais.

<b>Parâmetro</b>	<b>Níveis</b>		
<b>Ambiente</b>	(ar)	5 m	10 m
<b>Consumível</b>	E6013	WW70	-
<b>Polaridade</b>	DCEN	DCEP	-

O primeiro parâmetro (ambiente), estabelece a condição da pressão simulada no local de trabalho para a produção da solda. Assim, Foram feitas soldas convencionais no ar, e nas profundidade simuladas de 5 m e 10 m. Também, como anteriormente relatado, os consumíveis utilizados foram o E6013 e o WW70. Por último, o tipo de polaridade da corrente: DCEN e DCEP.

Em vista disso, para cada combinação de parâmetros (Ambiente, Consumível e Polaridade), foram feitas 3 soldas, totalizando 36 Cordões. A nomenclatura utilizada para

referenciar cada um dos testes é apresentada na Figura 3.6, e baseia-se na metodologia de PESSOA (2003).

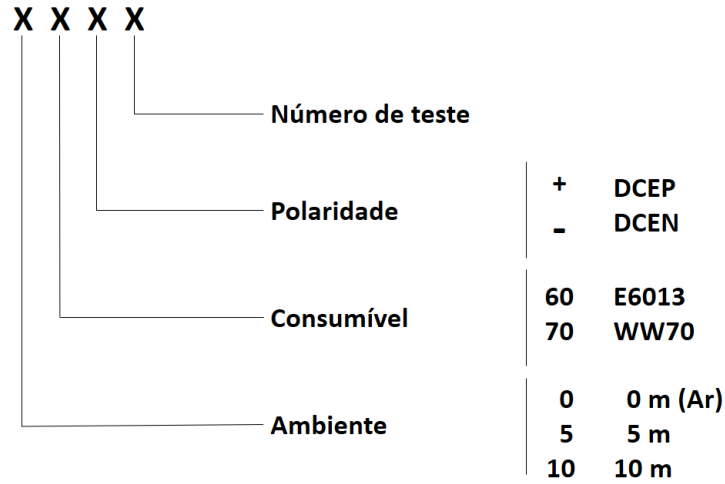


FIGURA 3.6 - Nomenclatura utilizada no estudo.

A modo de exemplo, a corrida 060 (-) 3 denota que a solda foi feita ao ar, com o uso do eletrodo E6013, configurado no polo negativo e foi o terceiro teste nessa condição.

Também, a partir de estudos realizados no LRSS, foram adotados os valores de corrente aplicados nos testes, os quais são exibidos na Tabela 3.7. Para o consumível E6013, foi adotada uma corrente de 170 A para todas as condições do estudo; este parâmetro foi adotado de DIAS (2012) quem avaliou o desempenho deste consumível na soldagem subaquática molhada. No caso do WW70, a corrente escolhida apresenta os melhores resultados em ensaios de laboratório e em estudos de aplicação em campo (LRSS, 2017b). Com o objetivo de observar as modificações na morfologia e a estabilidade das soldas em ambiente subaquático e comparar com os depósitos feitos ao ar, a corrente foi a parâmetro chave fixado.

Tabela 3.7. Valores de Corrente em função do revestimento e a profundidade.

Ambiente	ar		5 m		10 m	
Consumível	E6013	WW70	E6013	WW70	E6013	WW70
Valor de Corrente (A)	170	190	170	190	170	190

### 3.3.1 Inspeção Visual

O primeiro análise feito em as soldas resultantes foi a inspeção visual destas. O objetivo da avaliação foi ter um indicativo da qualidade das mesmas, por meio da observação de características ou defeitos superficiais como inclusões de escória, variação da largura do cordão, mordedura, porosidade, reforço excessivo e respingos sobre a chapa. Esta primeira observação foi feita sem o uso de equipamentos.

### 3.3.2 Análises dos Sinais obtidas com o Sistema de Aquisição

Após a coleta dos sinais, estes foram tratados para o seu estudo com o Software Sinal 2017. Para isso, dos oscilogramas de corrente e tensão, foi escolhido o intervalo de 10 a 15 s do tempo total da solda, com o intuito de desprezar as perturbações resultantes da abertura do arco, garantindo uma faixa onde o processo de soldagem estava sob regime quase estável. Deste modo, foi obtido o valor médio da tensão e corrente e seus respectivos desvios padrões. Logo, com o objetivo de avaliar a estabilidade do processo de soldagem nessa faixa de 5 s, foram estabelecidos índices e métodos relatados pela literatura.

### 3.3.3 Avaliação da Morfologia do Cordão de Solda

Com o propósito de avaliar as soldas resultantes, foram feitos uma serie de cortes no cordão, como apresentado na Figura 3.7. No Desenho, apresenta-se a finalidade de cada uma das amostras coletadas.

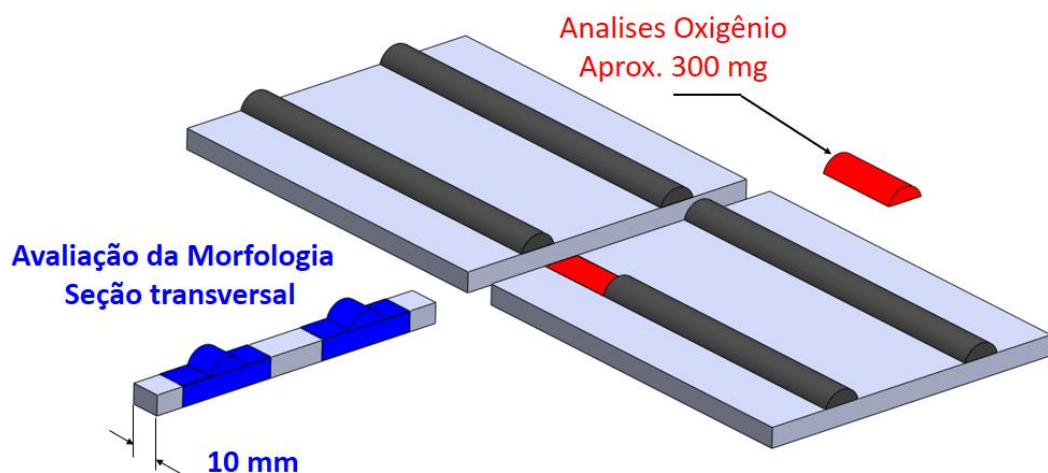


FIGURA 3.7 - Metodologia para a retirada de amostras após ensaios.

Como pode ser visto na Figura 3,7, foi retirada uma amostra de 10 mm da região central do cordão, com o objetivo de estudar as principais características geométricas. O espécime foi embutido em baquelite e lixado nas granulações 100, 220, 440 e 600. As amostras foram atacadas por solução de Nital 2% (Solução com 2% de ácido nítrico e 90% de álcool 92,8°INPM), e depois, fotografadas com o uso de uma câmera fotográfica digital.

A Largura (L), o Reforço (R) e a Penetração (P) foram medidos com o uso do software ImageJ. Na Figura 3.8 é exibido o desenho esquemático com as características morfológicas do cordão de solda.

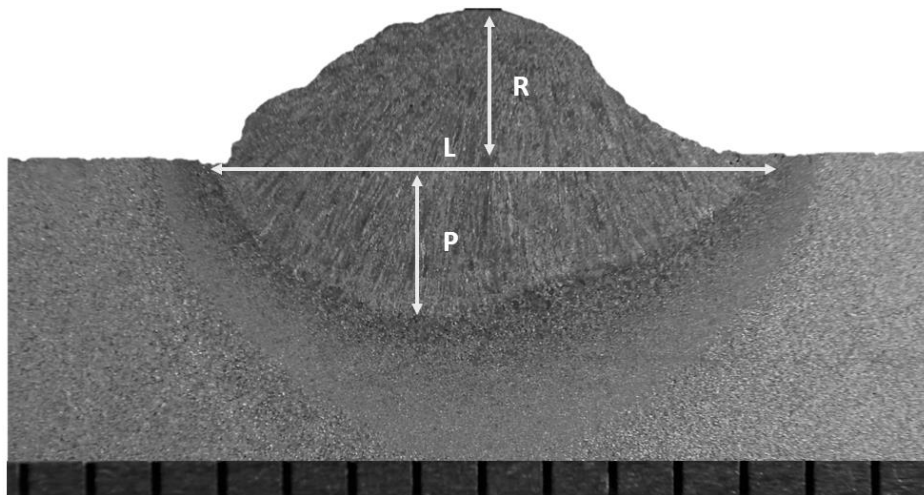


FIGURA 3.8 - Morfologia do Cordão de solda, R= Reforço; L= Largura, P= Penetração.

### 3.3.4 Análises química

#### 3.3.4.1 Determinação do teor de Oxigênio no metal de solda

Na determinação do teor de Oxigênio, amostras do metal de solda de aproximadamente 300 mg foram coletadas conforme apontado na Figura 3.7; estas foram obtidas por meio da remoção do reforço do cordão de solda através de um arco de serra. Para cada conjugação de condições (ambiente, consumível e polaridade), um total de dois corpos de prova foi analisado. Deste modo, a análises das amostras foi realizada pelo método de fusão de gás inerte, num analisador ELTRA ON 900. O anterior implica o aquecimento da amostra num forno de pulsos que pode atingir temperaturas da ordem de 3000 °C. Deste modo, a amostra é fundida num

cadinho de grafito, e o oxigênio é determinado por células infravermelhas não dispersivas (Oxygen/Nitrogen Analyer ELEMENTRAC ON – p, 2017).

### 3.3.4.2 Determinação do Hidrogênio difusível no metal de solda

Foram feitos ensaios para avaliar a quantidade de Hidrogênio difusível no metal de solda produzido com os consumíveis de estudo, em função da polaridade. Deste modo, as soldas foram feitas em lamina de água (0,3 m), utilizando o aquário do LRSS da UFMG.

Para cada polaridade e tipo de consumível, foram feitas duas soldas, gerando um total de 16 ensaios. Os corpos de prova utilizados nesta análise são apresentados na Figura 3.9: eles foram desidrogenados em forno elétrico numa temperatura de 650°C por uma hora. É interessante comentar que a peça central foi reduzida no seu comprimento até o valor de 20 mm. Isto é justificado pela faixa na qual o cromatógrafo pode medir, já que os altos teores de Hidrogênio difusível achados em UWW estariam muito por cima dos níveis mensuráveis pelo equipamento; esta modificação é relatada na literatura (POPE e LIU, 1996) (MEDEIROS e LIU, 1998) (DÍAZ, 2012). O valor da corrente e os ângulos do sistema de soldagem por gravidade foram mantidos como na Tabela 3.1.

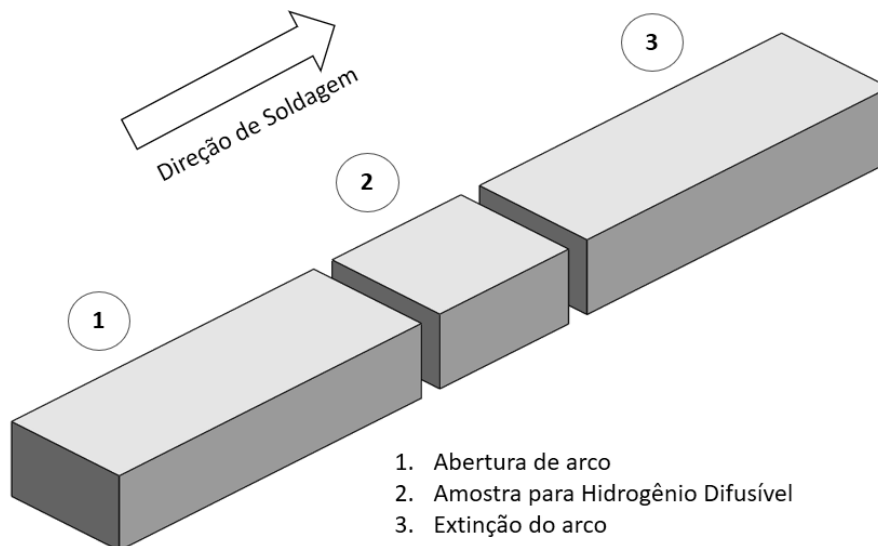


FIGURA 3.9 - Corpos de prova para medição do Hidrogênio Difusível.

Para a medição dos teores de Hidrogênio difusível, foi aplicado o método de Cromatografia gasosa (Norma ASTM E260-96) com o uso do equipamento da OERLIKON

YANACO, modelo HDM ANALIZER G-1006H. A Figura 3.10 mostra o equipamento utilizado.

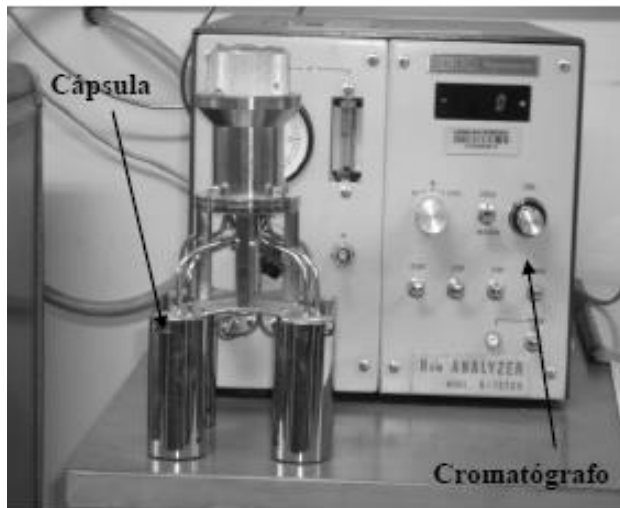


FIGURA 3.10. - cápsulas conectadas ao cromatógrafo durante a calibração.

FONTE – DÍAZ, 2012.

O cromatógrafo fornece o valor de hidrogênio que se difundiu no metal de solda ( $H$ ) e assim, o hidrogênio difusível do metal de solda depositado (ml/100 g) ( $H_{DIF}$ ) é calculado pela equação 6:

$$H_{DIF} = \frac{H(100)}{\Delta m} \quad (6)$$

$\Delta M$  = Metal de solda depositado na peça 2 (g), obtido da diferença entre o corpo de prova a pós a solda e antes do ensaio.

### 3.3.4.3 Taxa de fusão, Velocidade de soldagem e Energia de Soldagem

Com o intuito de comparar os resultados da presente pesquisa com o relatado na literatura, a taxa de fusão do eletrodo foi analisada através da variação do comprimento do eletrodo vezes o tempo total de soldagem. Também, a velocidade de soldagem foi calculada mediante o comprimento do cordão de solda dividido pelo tempo de soldagem (PESSOA et al, 2010).

A energia de soldagem ( $H$ ) (Equação 7), que representa a quantidade de energia gerada pela fonte de calor por unidade de comprimento da junta, é calculada com o objetivo de encontrar uma relação direta com os efeitos resultantes na peça, porém, devem-se considerar os

efeitos de outros parâmetros de soldagem, como a corrente, tensão e velocidade de deslocamento, os quais afetam de modo diferente a intensidade do arco (MODENESI et al, 2016).

$$H = \frac{1}{v_T} \int_0^T VI dt \quad (7)$$

V = tensão

I = Corrente

T = intervalo de tempo

v = velocidade de soldagem

#### **3.3.4.4 Determinação de fases por Difração de Raios X**

Levando em consideração a metodologia apresentada por VAZ (2014), a escória produto de cada cordão foi coletada e processada do seguinte modo:

- Secagem em forno elétrico à 100°C por 1 hora (com o objetivo de retirar a umidade).
- Separação magnética das gotas de metal de adição e os respingos próprios do processo de soldagem.
- Moída por 10 segundos utilizando o moinho pulverizador de panela do Laboratório de Tratamento de Minérios da UFMG.

Assim, as amostras de escória com uma granulometria aproximada de 38 µm foram quantificadas pelo método de Rietveld: o qual é uma técnica baseada na comparação do padrão de difração de raios x presente, com um padrão calculado dos dados de estruturas (parâmetros cristalográficos) das fases existentes (KÖNIG et al, 2002). Este método é de uso comum em misturas de hematita e minérios de ferro em geral.

Nesta avaliação foi utilizado o equipamento da marca PANalytical, modelo Empyrean, usando radiação CuKα e cristal monocromador de grafita.

Segundo VAZ (2014), a técnica de análise baseia-se na comparação das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras avaliadas e o banco de dados do laboratório de raios X da UFMG.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Características Morfológicas do cordão e parâmetros gerais do processo de Soldagem para o consumível E6013

Para o E6013, é evidente que o comportamento das soldas feitas no ar corresponde com o relatado amplamente na literatura, expondo uma maior penetração em DCEP (Figura 4.1). Deste modo, percebe-se que a zona catódica nesta configuração da polaridade, governa os fenômenos de geração de calor e resulta numa maior fusão no metal base, resultando em maior penetração (MODENESI, 2017).

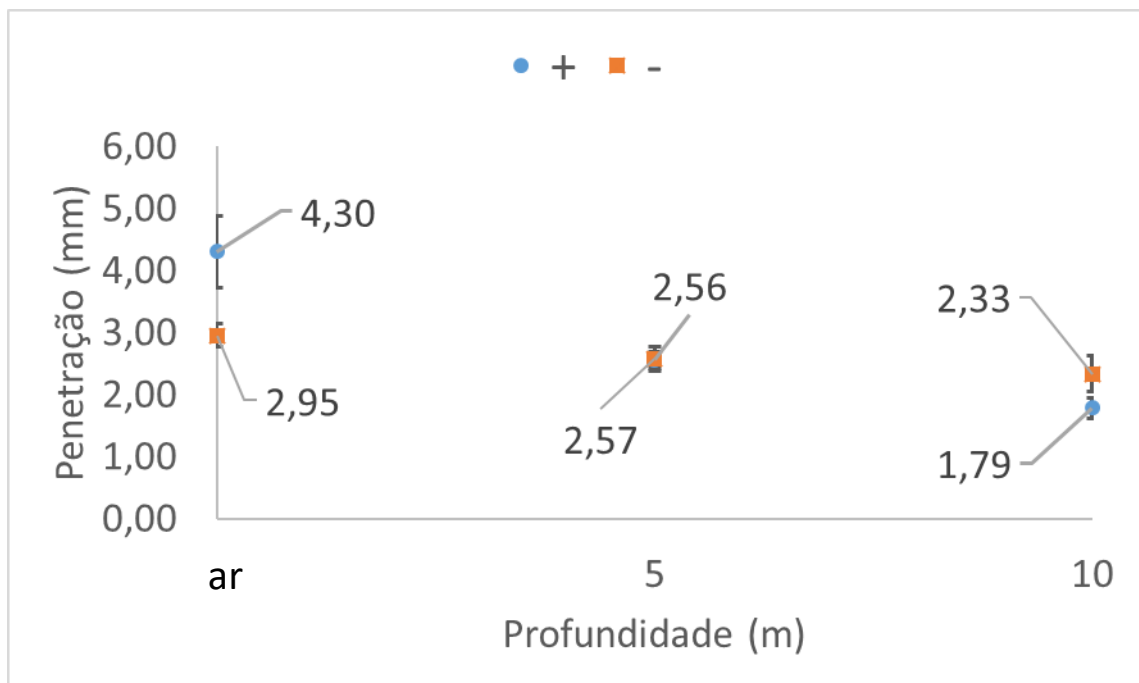


FIGURA 4.1 - Penetração vs profundidade para o eletrodo E6013.

Continuando na configuração de polaridade em CC+, é possível observar que a penetração do cordão de solda diminui de forma significativa (em torno de 40%) com o aumento da profundidade em 5 m. Por outro lado, de 5 a 10 m, a redução da penetração atinge um valor de 30%, ou seja, o aumento da profundidade provoca a redução da penetração.

Para a polaridade direta (DCEN), houve uma ligeira tendência de redução da penetração (de 12% e 8% com o aumento da profundidade em 5 e 10 m, respetivamente), mas somente nos valores médios. Levando em consideração que estes valores estão dentro dos seus desvios padrões correspondentes, não é possível concluir estatisticamente que houve uma redução da penetração com o aumento da profundidade para CC-.



Deste modo, a penetração em DCEN mantém-se invariável e somente os valores para a polaridade inversa deslocam-se para um patamar inferior.

Comparando as duas configurações da polaridade na profundidade de 5 m, não tem-se diferenças na penetração. Este comportamento é o resultado da baixa estabilidade do arco elétrico em águas pouco profundas, o qual será aprofundado na seção de avaliação da estabilidade.

Aos 10 m de profundidade e contrário do comportamento geral para soldas feitas no Ar, tem-se uma inversão na morfologia do cordão em relação com a polaridade, com o qual se obtiveram maiores penetrações na polaridade direta (DCEN). O anterior está em consonância com o modelo exposto por TSAI e MASUBUCHI (1977), os quais relatam maior penetração nestas condições de soldagem.

Por sua vez, a largura apresenta maiores valores em polaridade inversa (DCEP), até os 5 m, ponto no qual diminui num 35% (Figura 4.2). Com o aumento da pressão hidrostática (de 5 a 10 m) a largura diminui mais um 12%, onde atinge o mesmo valor em comparação com a polaridade direta. A largura nesta última configuração (DCEN) é menor em soldas no Ar, para depois aumenta 9% em 5 m e manter-se invariável. Com o anterior, pode-se evidenciar uma possível maior influência da pressão hidrostática sobre as soldas feitas para o eletrodo ligado no polo positivo (DCEP). Para os 5 m de profundidade, a geometria da largura desempenha-se como descrito por TSAI e MASUBUCHI (1977).

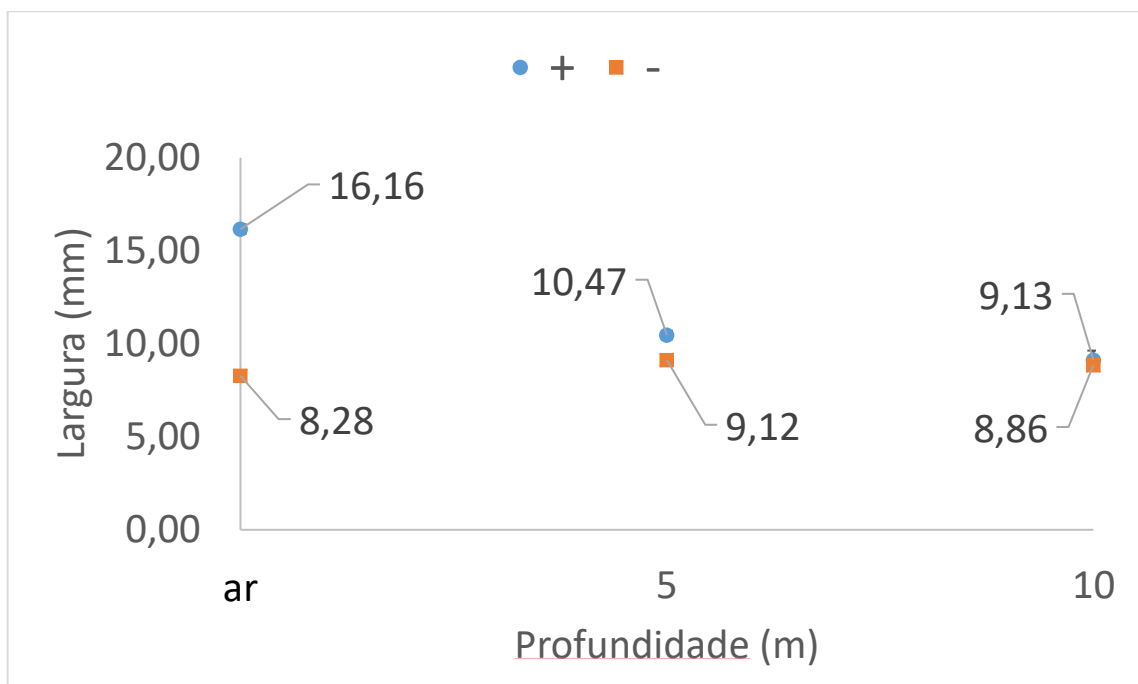


FIGURA 4.2 - Largura vs Profundidade para o eletrodo E6013.

Finalmente, o reforço é maior em DCEP para as soldas no Ar, atingindo o mesmo valor em 5 m com a polaridade direta (Figura 4.3). DCEN por sua parte apresentou um reforço sem variação desde o Ar até os 5 m, para depois decrescer a 10 m até adotar o mesmo valor nas duas configurações de polaridade. Assim, o reforço diminui com o aumento da pressão hidrostática e sem influência da polaridade (MAZAFERRO, 1998). Esta característica morfológica não se comporta como o modelo de TSAI e MASUBUCHI (1977), pelo fato de que não se destaca um valor de reforço com a mudança da polaridade para soldas embaixo da água.

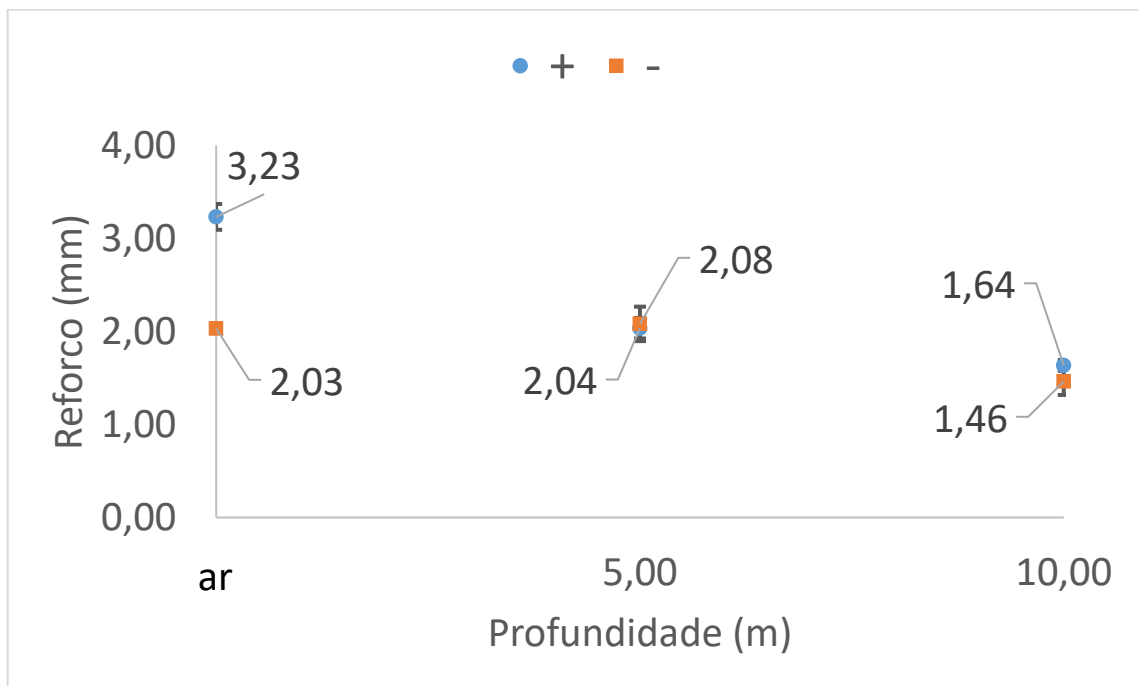


FIGURA 4.3 - Reforço vs Profundidade para E6013.

Contudo, em relação a taxa de fusão (Figura 4.4), para as soldas feitas ao ar, apresenta-se o comportamento descrito na literatura (uma maior taxa de fusão em DCEN). O anterior é resultado da localização da região catódica junto ao eletrodo. Porém, sob a influência da pressão hidrostática, tem-se uma diminuição deste fator. Também e como relatado por TSAI e MASUBUCHI (1977), tem-se maior taxa de deposição na polaridade inversa para soldas subaquáticas: isto é justificado pelo fato de que nesta configuração, o calor gerado pelo arco é dirigido para o eletrodo de modo que a alma funde rapidamente.

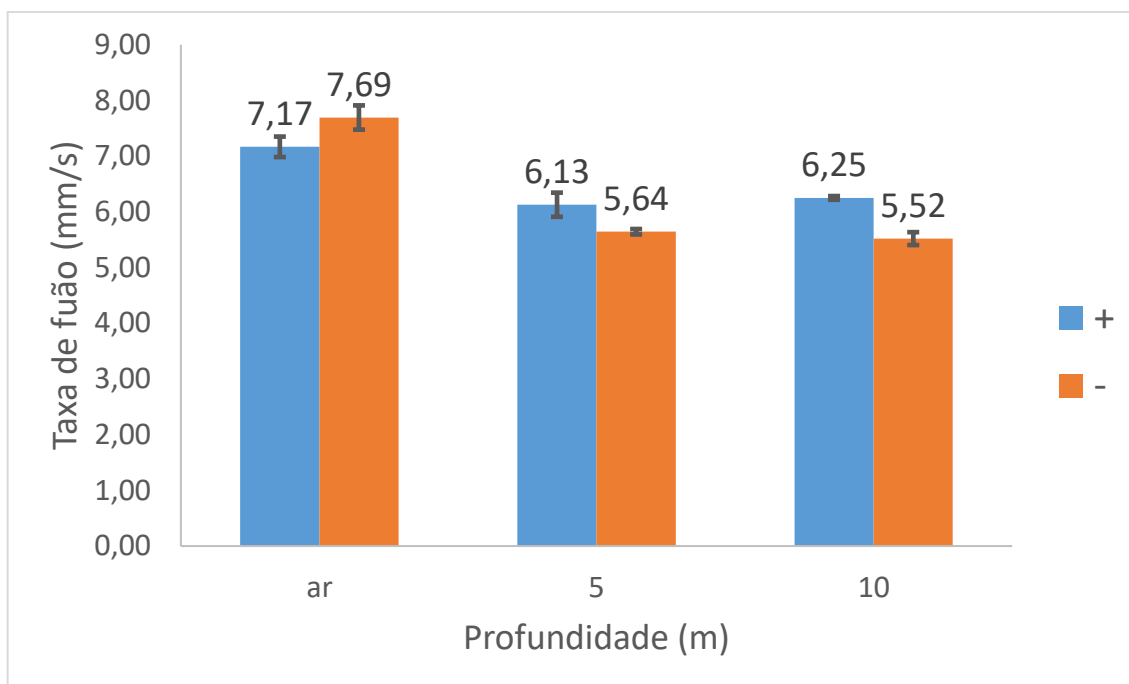


FIGURA 4.4 - Taxa de fusão vs Profundidade para E6013.

Também, é possível considerar que as características do processo de soldagem definem a taxa de fusão. JACKSON (1950) apud FELIZARDO (2003) expõe que a taxa de fusão em eletrodos revestidos é fundamentalmente proporcional à corrente de soldagem. Adicionalmente, em estudos sobre o aquecimento de eletrodos revestidos durante a soldagem, foi verificado que o único responsável pela variação da taxa de fusão do eletrodo revestido é o calor gerado pelo efeito Joule (FELIZARDO, 2003). Com o anterior, se considera que em termos gerais, duas parcelas são importantes para o aquecimento do eletrodo revestido durante a soldagem e sua fusão: o calor gerado por efeito Joule (como consequência da resistência à passagem de corrente elétrica) e o aquecimento da ponta do arame pela região de queda anódica ou catódica (MODENESI, 2017) (FELIZARDO, 2003). As mesmas considerações são apresentadas para o processo GMAW, levando em conta que a velocidade de fusão esteja sendo considerada para condições operacionais onde a corrente de soldagem é mantida aproximadamente estável. Porém, para MIG/MAG um “estado estacionário” é mantido e assim, o comprimento energizado do eletrodo se preserva relativamente constante. Por sua parte, para SMAW, “o comprimento do eletrodo varia continuamente, não sendo possível considerar o estabelecimento de uma distribuição estacionária de temperatura ao longo do eletrodo” (MODENESI, 2017).

Mesmo assim, no esforço de justificar os fenômenos apresentados nesta pesquisa, na continuação são utilizadas particularidades consolidadas da tecnologia MIG/MAG.

Deste modo, MODENESI (2017) relata que o aquecimento da ponta do arame é função da configuração da polaridade. Assim, para a soldagem com eletrodo positivo, a contribuição do aquecimento anódico pelo arco apresenta-se independente sob o efeito da corrente de operação, o comprimento ou tensão do arco e a pressão. No entanto, o uso de eletrodo negativo em GMAW acrescenta a contribuição do aquecimento da região de queda pelo arco em comparação com CC+, e esta configuração por sua vez, é dependente do nível da corrente, da presença de revestimentos na superfície do arame, do comprimento do arco e a pressão.

Neste ponto em particular e pelo fato da configuração DCEN ser sensível com a pressão, a contribuição do aquecimento catódico pode resultar menor em comparação com o uso do eletrodo no polo positivo na soldagem hiperbárica (MODENESI, 2017). Por conseguinte, a taxa de fusão poderia ser menor em CC- (quando comparada com CC+) para soldas subaquáticas.

A velocidade de soldagem (Figura 4.5) também apresentou diferenças significativas em função da mudança da polaridade. Assim, para as soldas feitas ao ar, tem-se um acréscimo do 13% com a mudança da polaridade inversa para direita. Isto reflete a maior taxa de fusão relatada nessa configuração de polaridade. Na profundidade de 5 m observa-se um incremento de 21% na mudança de CC+ para CC-. Enquanto a 10 m, é exibida uma diminuição de 12 % de CC+ a CC-, e este este resultado é coerente com a taxa de fusão nesta profundidade.

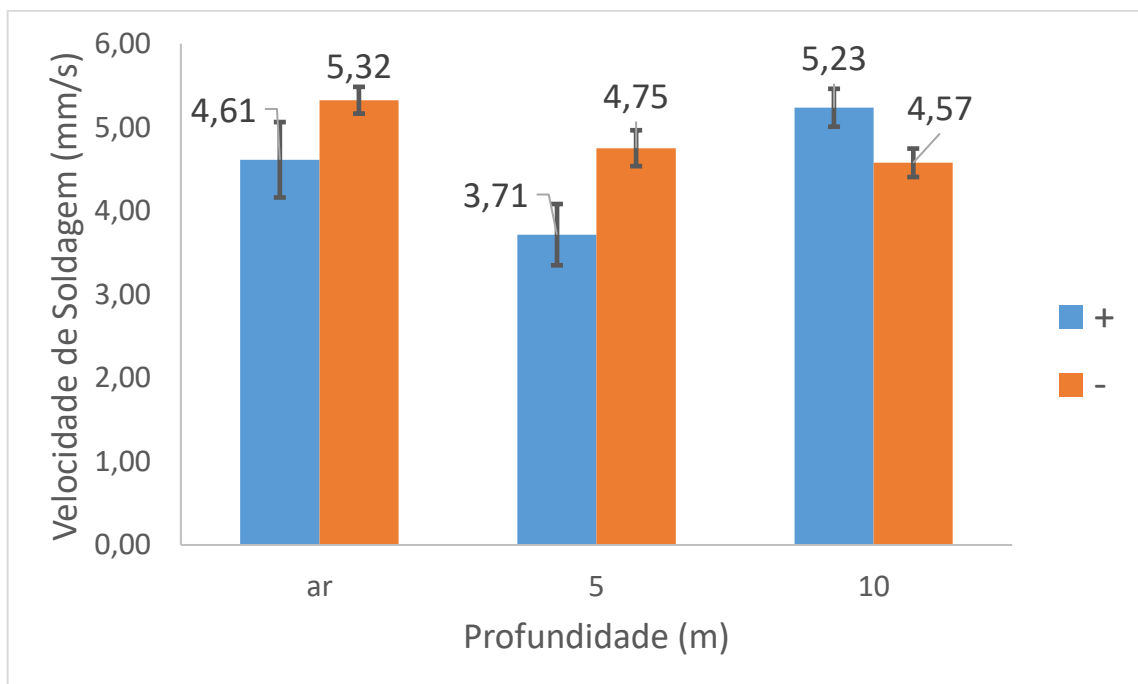


FIGURA 4.5 - Velocidade de Soldagem vs Profundidade para E6013.

No caso em que se fixa a polaridade e compara-se a velocidade de soldagem, em CC+ a velocidade é menor ao ar, aumenta para 10 m e diminui em 5 m.

Para CC-, a velocidade de soldagem diminui em 10% quando aumenta a profundidade até 5 m, mantendo-se invariável desde este ponto com o incremento da pressão.

Finalmente, a energia de soldagem é quase a mesma (sem variações importantes) nas soldas feitas ao ar e para 10 m de profundidade, sem mudanças com a polaridade. Também, para as soldas feitas a 5 m em polaridade direta.

Para o eletrodo configurado em CC+ e uma profundidade de 5 m, a energia de soldagem é maior em comparação com o resto de configurações (Figura 4.6). Este resultado se justifica como um erro experimental na medição do comprimento do cordão de solda produzido em 5 m e na polaridade inversa. Assim, um menor comprimento do cordão de soldagem, que define a velocidade do processo, determina uma maior entrada de calor, refletida na Figura 4.6. O valor da velocidade de soldagem e a energia de soldagem em polaridade inversa e para 5 m, não devem ser levados em consideração.

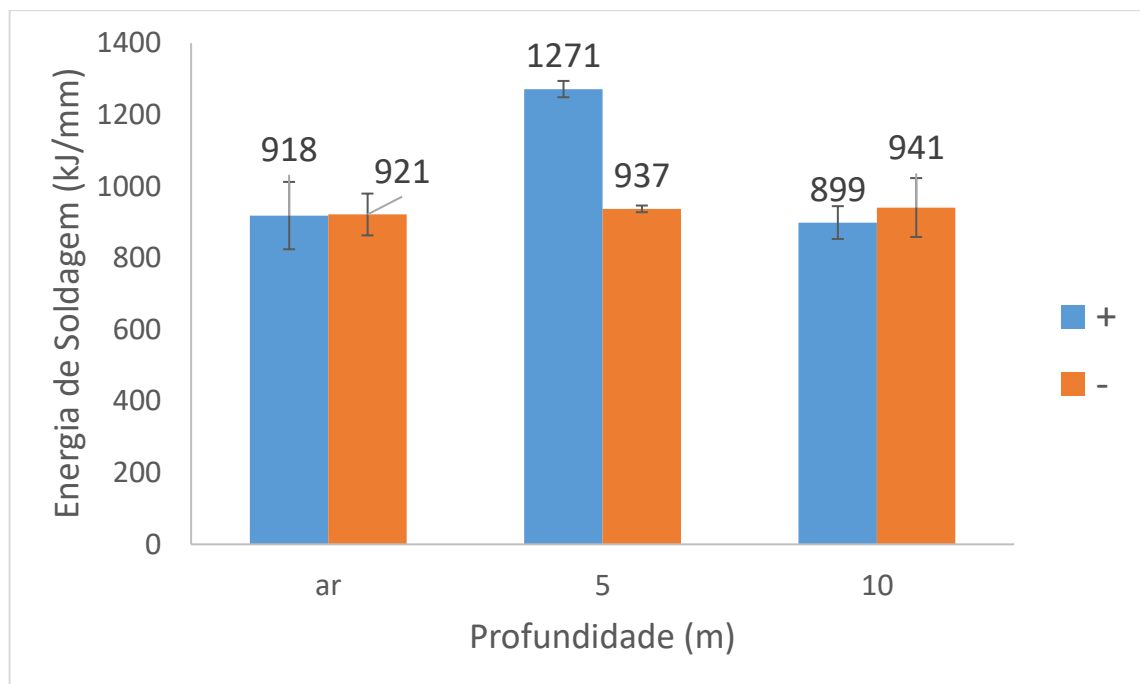


FIGURA 4.6 - Energia de soldagem vs Profundidade para E6013.

Na Figura 4.7 é apresentado um esquema que expõe conjuntamente macrografias das amostras em estudo para o eletrodo E6013 e a variação das características morfológicas do cordão e a taxa de fusão (Figura 4.7).

Neste ponto, é interessante ressaltar que para as soldas feitas ao ar, a configuração da polaridade em DCEP fornece os maiores cordões de solda (ou seja, as maiores dimensões na seção transversal se comparado com a configuração de polaridade do eletrodo no polo negativo - Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3). Também, ao eletrodo ligado no polo positivo, o processo apresenta-se mais sensível sob o efeito da profundidade, fato que pode-se demonstrar nas maiores variações morfológicas do cordão.

Para os 10 m de profundidade, o reforço e a largura não mostram diferenciação com a polaridade. Em relação com a Penetração e a Taxa de Fusão para a maior profundidade (10 m) do estudo, a penetração é maior nas soldas feitas com DCEN e a taxa de fusão é menor nesta polaridade: conforme descrito por TSAI e MASUBUCHI (1977). Por último, os resultados de penetração, reforço e velocidade de soldagem, foram influenciados pela instabilidade característica dos 5 m de profundidade.

Estabelece-se também que as soldas produzidas ao ar, que são o ponto inicial de comparação, é possível evidenciar como em DCEP o acréscimo da profundidade torna a seção transversal do cordão menor (A penetração, largura e o reforço são menores ao ar até os 5 m, e diminuem ainda mais de 5 a 10 m). Por sua vez, para as soldas feitas em DCEN, em termos gerais e levando em consideração o erro estatístico, somente o reforço diminuiu para a profundidade simulada de 10 m.

O apêndice III apresenta um resumo gráfico da morfologia do cordão de solda e os parâmetros gerais do processo para o eletrodo E6013.

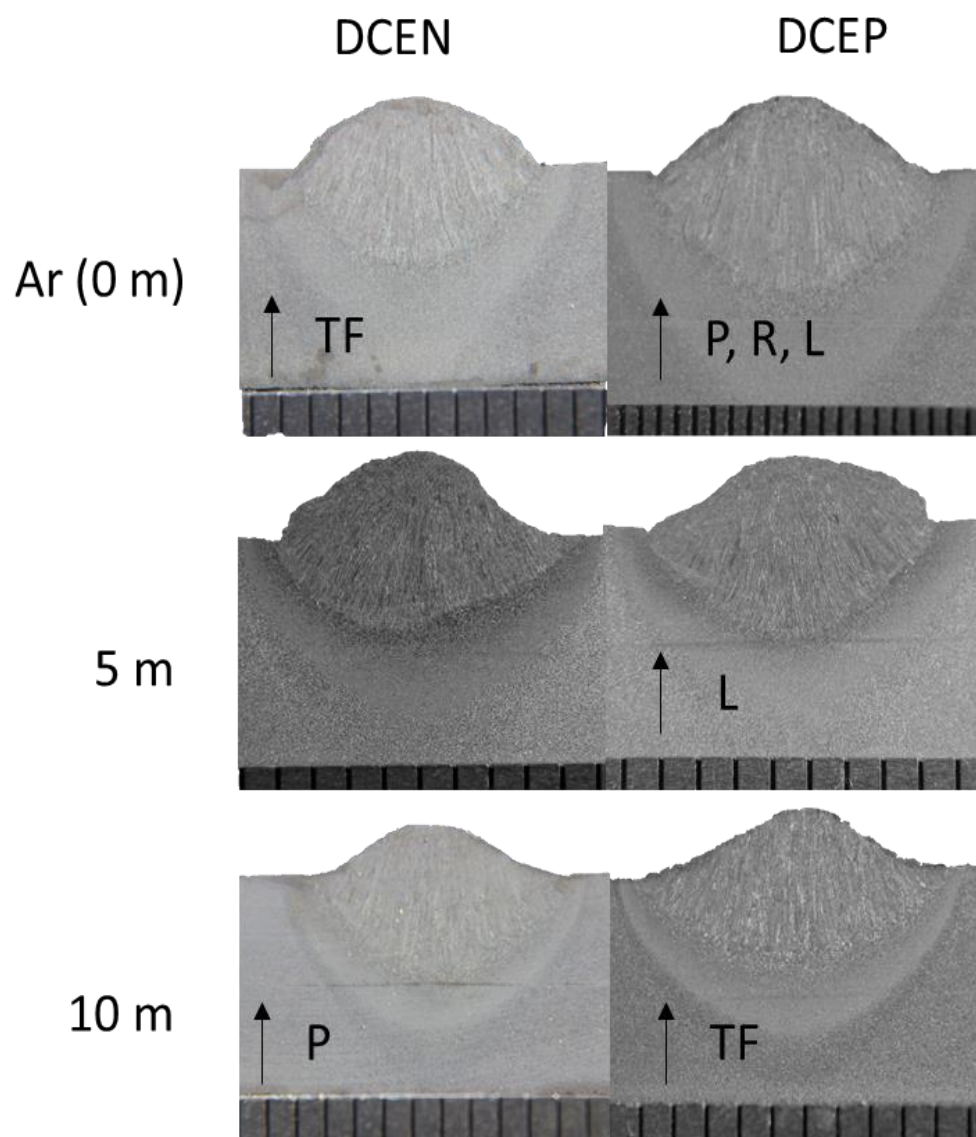


FIGURA 4.7 - Macrográfias de soldas feitas com E6013 em relação com a Polaridade, Profundidade, a mudança nas características morfológicas e a Taxa de Fusão. L= largura, R= Reforço, P=Penetração, TF= Taxa de Fusão. Nota: O símbolo ↑ representa o destaque do parâmetro avaliado.

#### 4.2 Características Morfológicas do cordão e parâmetros gerais do processo de Soldagem para o consumível WW70

Conforme apresentado na Figura 4.8, nas soldas feitas com o eletrodo WW70 ao ar e na profundidade de 10 m, a penetração é maior na polaridade inversa. Este resultado contradiz o modelo exposto por TSAI e MASUBUCHI (1977) feito a 40 anos, e também, demonstra novamente a importância da natureza do revestimento e a sua relação com as características elétricas do arco. Por outro lado, para 5 m, considera-se que o valor da penetração nas duas configurações de polaridade não teve mudanças, como resultado do alto desvio padrão

apresentado. Assim, pode-se justificar o resultado anterior como repercussão da instabilidade em baixas profundidades.

Nas soldas ao Ar, a mudança de CC+ para CC- reduz a penetração em 13%. Também, com o incremento da profundidade (Ar à 5 m), a penetração diminui 28% em CC+. Por fim, não houve variações no valor de penetração quando se aumentou a profundidade de 5 m para 10 m, na configuração DCEP.

No mesmo sentido, para o eletrodo configurado no polo negativo (CC-), tem-se uma redução do 24% na penetração quando se varia a profundidade de 0 a 5 m. Depois, uma redução na penetração da ordem de 26% é evidenciada quando se muda de 5 m a 10 m.

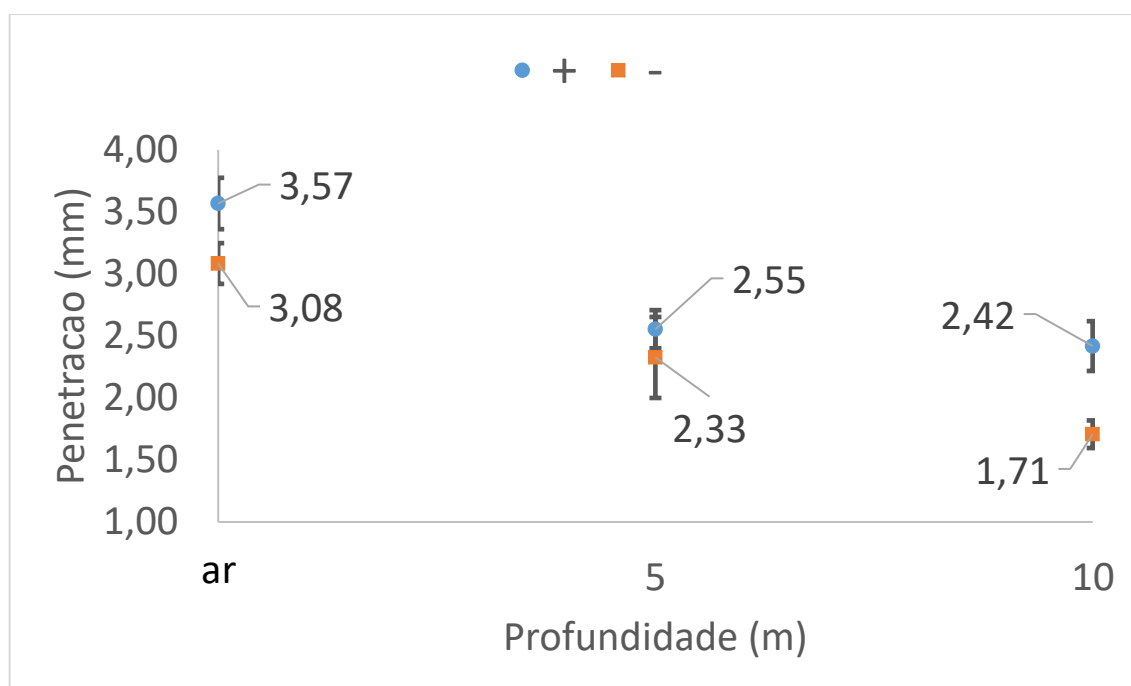


FIGURA 4.8 - Penetração vs Profundidade para WW70

Quando comparadas às soldas ao ar a largura do cordão é maior em polaridade inversa (Figura 4.9). Trocando a polaridade para CC-, tem-se uma redução do 20%. Nesta última polaridade (DCEN), tem-se um aumento na largura de 16% quando se acrescenta a pressão hidrostática desde uma condição no ar até os 5 m. Desde este ponto, a largura é invariável. Para CC+, não é possível concluir sob uma modificação na largura do cordão como resultado da pressão hidrostática, quando avaliados os resultados no Ar e para 5 m. Porém, é observada uma tendência de diminuição da largura com o incremento da profundidade (se comparados os valores meios).



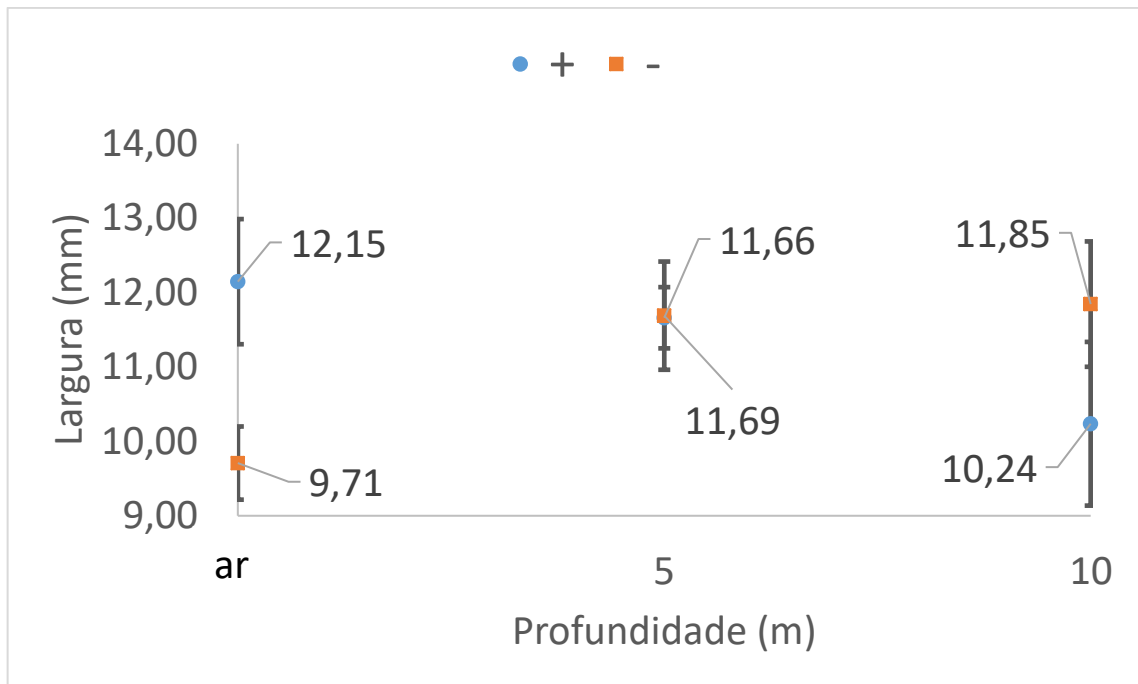


FIGURA 4.9 - Largura vs Profundidade para WW70

Por outra parte, o reforço das soldas resultantes do eletrodo WW70 no Ar é maior com polaridade direta (DCEN) (Figura 4.10). Porém, a diferença do valor de reforço médio entre as duas configurações de polaridade é 5%. Para CC-, o reforço acrescenta 25% desde as soldas no Ar até os 5 m, mantendo-se invariável com o aumento da profundidade. Este último resultado está em consonância com o modelo de TSAI e MASUBUCHI (1977).

Contudo, na configuração de polaridade inversa (CC+), o valor do reforço aumenta 20% com o aumento da profundidade de 0 m a 5 m. Desde este ponto, atinge quase o mesmo valor de reforço em comparação com a polaridade direta.

Contudo, contrário do relatado por TSAI E MASUBUCHI (1977), as soldas feitas na presença de água apresentam maior largura na polaridade direta.

Além disso, mais uma vez, em 5 m não tem-se diferenciação do parâmetro geométrico de estudo (largura) com a polaridade; é provável que este comportamento seja devido à instabilidade típica do processo nesta configuração.

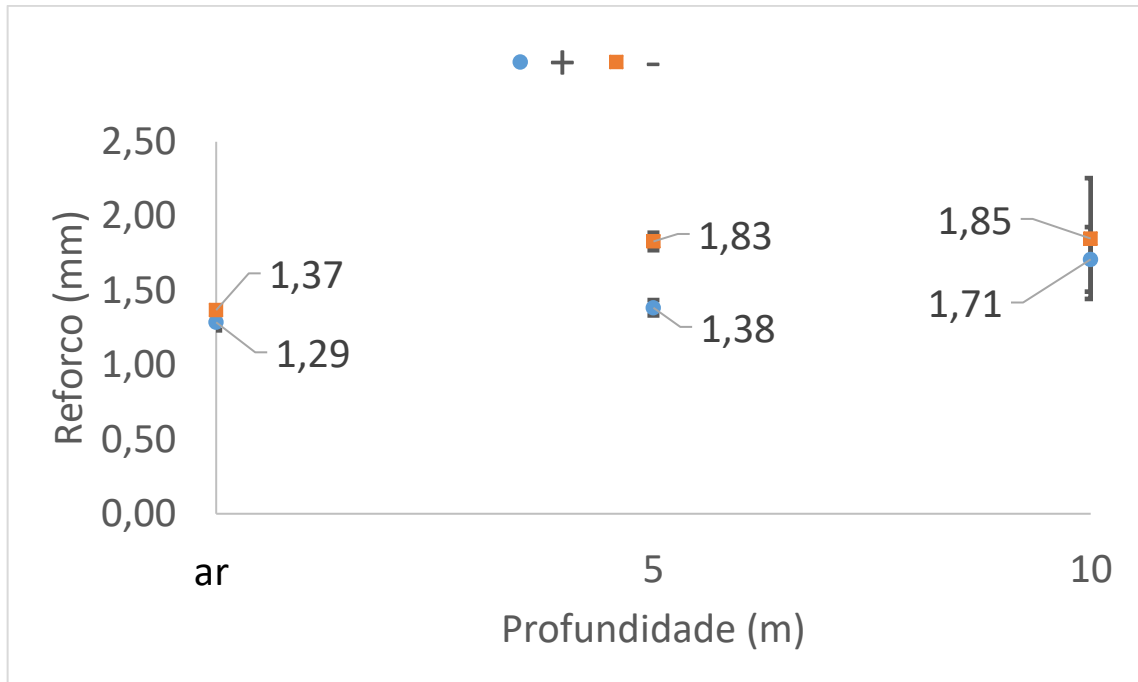


FIGURA 4.10 - Reforço vs Profundidade WW70.

Em relação a taxa de fusão, esta se apresenta sem diferenciação com a configuração da polaridade para cada um dos ambientes do estudo (ar, 5 m e 10 m) (Figura 4.11). Maiores taxas são observadas nas soldas feitas ao ar, para depois exibir uma diminuição com o acréscimo da profundidade. Em termos gerais e comparando os valores da taxa de fusão entre os dois consumíveis (considerando que cada um utiliza um valor de corrente diferente), o eletrodo oxi-rutílico apresentou as taxas de fusão mais baixas. Este comportamento poderia ser o resultado de uma maior espessura do revestimento do eletrodo (FELIZARDO, 2003). Ou seja, quanto maior a espessura do revestimento, maior a quantidade de material a ser fundido e deste modo, mais lenta é a fusão. Se comparados os dois consumíveis, o WW70 exibe uma espessura maior.

Como descrito acima, a taxa de fusão para o WW70 não tem diferenciação com a polaridade. Deste modo, os resultados obtidos neste trabalho não seguem o relatado na literatura: TSAI e MASUBUCHI (1977), VILANI et al (2017). Assim, possivelmente, a natureza do revestimento é o fator determinante. Foi exibido por FELIZARDO (2003) que “o tipo de revestimento e as diferentes temperaturas nas que acontece a dissociação dos componentes deste, influenciam a temperatura do eletrodo”. Nas suas pesquisas, a autora descreve que para o consumível E6013, a taxa de fusão na polaridade negativa é maior que em DCEP. Por outro lado, para o E7018, a polaridade inversa (CC+) resulta nas maiores taxas de fusão. Este efeito foi associado com a composição química dos eletrodos: elementos de baixa

função trabalho estão presentes no revestimentos dos eletrodos, e estes reduzem a função trabalho efetiva do eletrodo, diminuindo o aquecimento do mesmo e facilitando a emissão de elétrons. Assim, a temperatura final do eletrodo é menor e, conseqüentemente, sua taxa de fusão. Contudo, na pesquisa desenvolvida por FELIZARDO (2003), a temperatura registrada do consumível rutílico foi maior em comparação com o eletrodo básico. Também MODENESI (2017) relata que na soldagem com eletrodo revestido, os constituintes do revestimento tem uma função determinante no processo, podendo contribuir para o resfriamento ou aquecimento do eletrodo. Conseqüentemente, tem-se neste exemplo da literatura e nos resultados apresentados na Figura 4.11, que podem ocorrer fenômenos que são contrários do amplamente estabelecido na literatura.

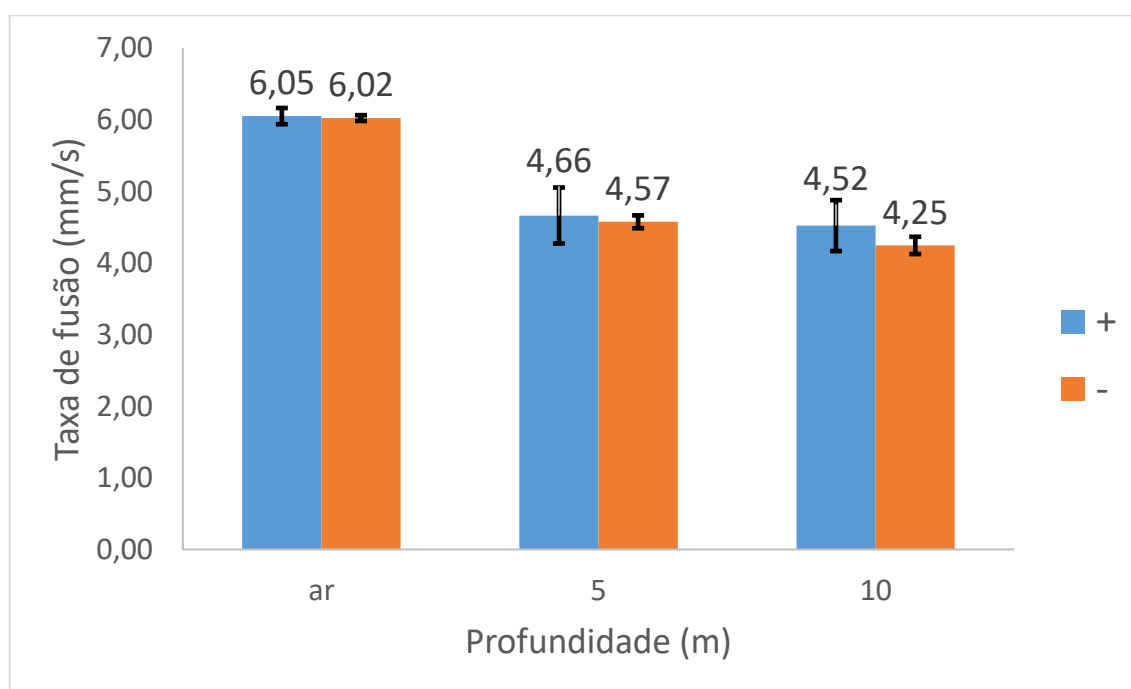


FIGURA 4.11 - Taxa de fusão vs Profundidade para WW70

Por outro lado, foi observado que a velocidade de soldagem apresenta uma relação diretamente proporcional com a taxa de fusão (Figura 4,12), o qual é esperado pelo fato de que em um sistema de soldagem por gravidade, a velocidade de soldagem é dependente da taxa de consumo (PESSOA, 2007).

Como no caso do eletrodo E6013, com o WW70 o desvio padrão dos valores médios da energia de soldagem não permite estabelecer se houve mudanças dessa grandeza com o efeito da pressão hidrostática ou com a troca da polaridade (Figura 4.13).

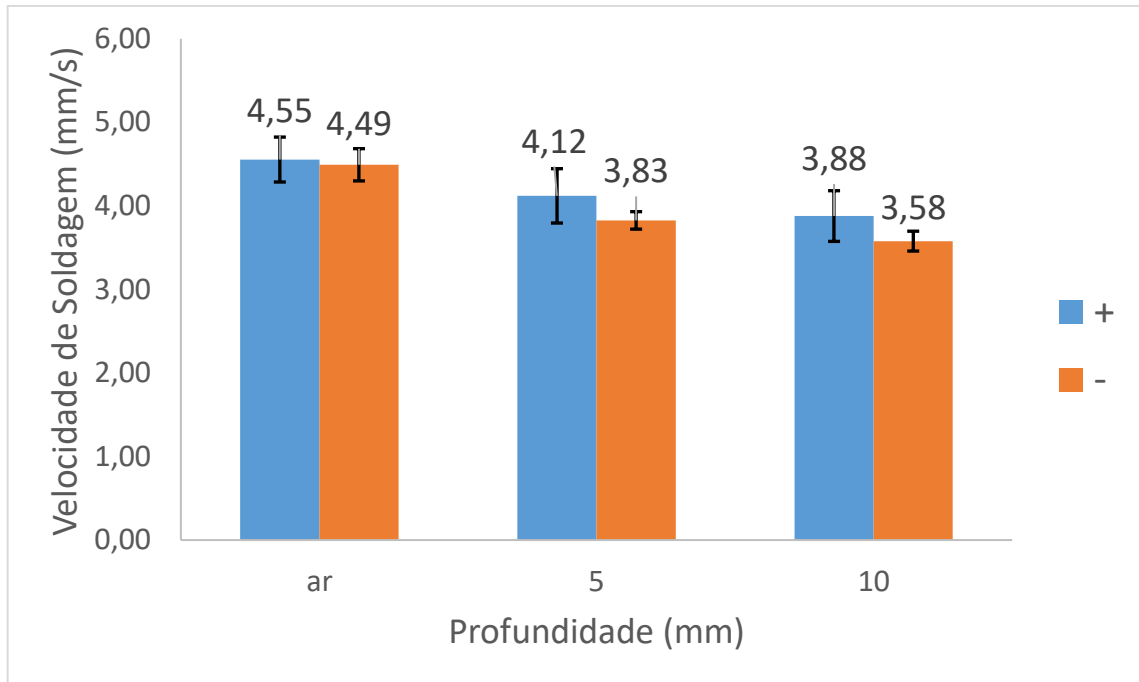


FIGURA 4.12 - Velocidade de Soldagem vs Profundidade para WW70.

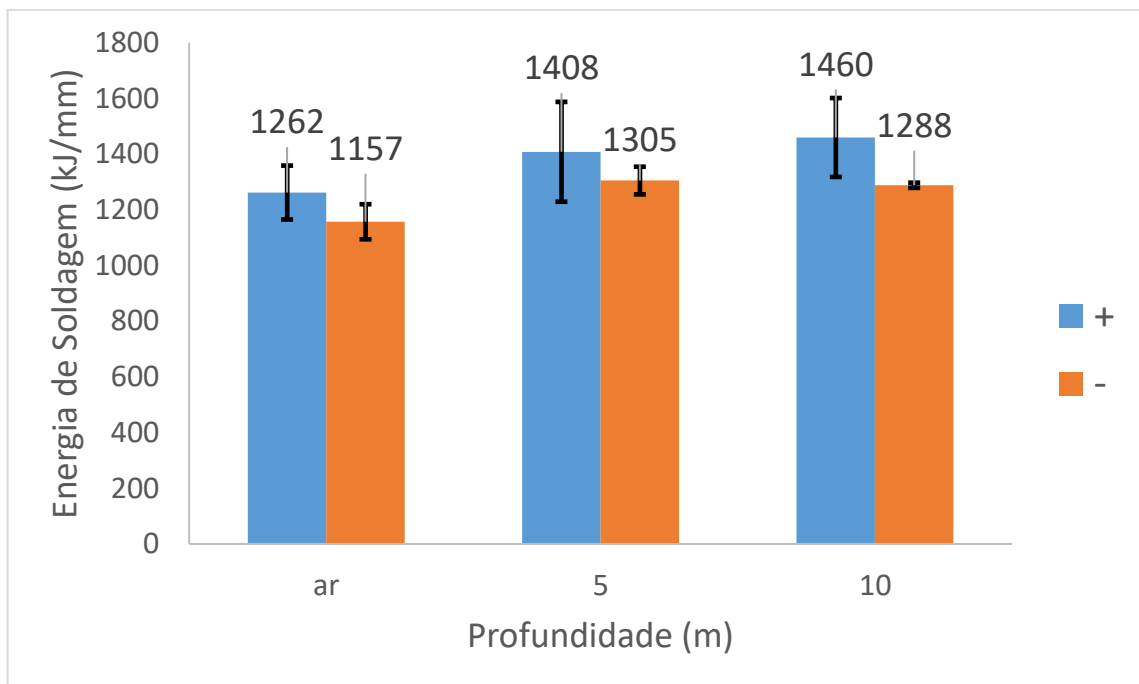


FIGURA 4.13 - Energia de soldagem vs Profundidade para WW70.

A continuação, é apresentado um esquema que expõe conjuntamente macrografias das amostras em estudo para o eletrodo WW70 e a variação das características morfológicas do cordão e a Taxa de Fusão (figura 4.14).

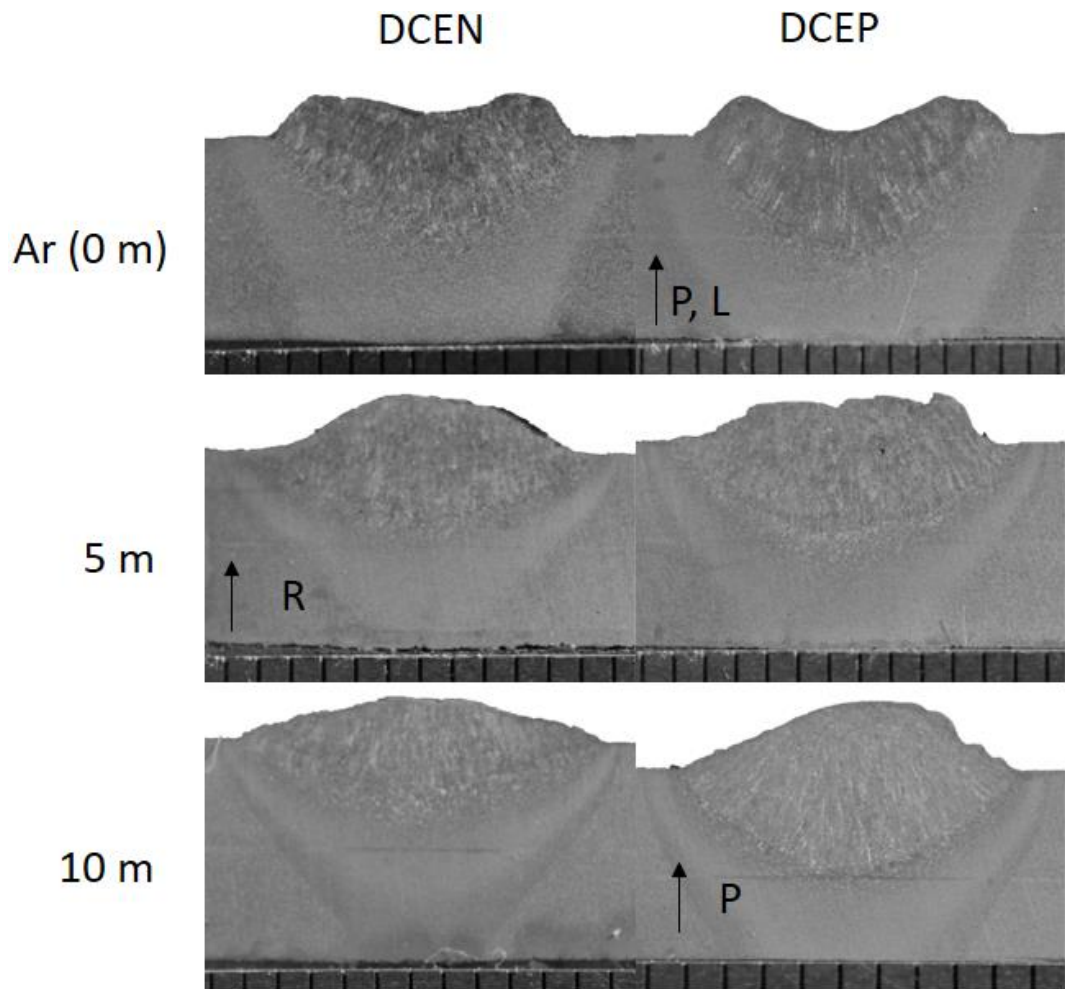


FIGURA 4.14 - Macrografías do WW70 em relação com a Polaridade, Profundidade, a mudança nas características morfológicas e a Taxa de Fusão. L= largura, R= Reforço, P=Penetração, TF= Taxa de Fusão. Nota: O símbolo ↑ representa o destaque do parâmetro avaliado.

Em suma, contrariamente do modelo mostrado por TSAI e MASUBUCHI (1977), as soldas molhadas feitas com o eletrodo oxi-rutílico WW70, apresentam a maior penetração com o uso da polaridade inversa (DCEP). Também, não tem-se diferenciação da taxa de fusão com a polaridade. Em termos gerais, a penetração diminui com o acréscimo da pressão hidrostática e o reforço apresenta uma ligeira tendência de aumentar com o aumento da profundidade. O perfil das soldas feitas ao ar (independente da polaridade) reflete o formato de “*humping*” ou corcova, característico dos processos de fusão por arco elétrico com correntes elevadas (GMAW) ou de alta intensidade (LASER ou feixe de elétrons), em combinação com altas velocidades de soldagem (MENDEZ e EAGAR, 2003). Mais uma vez considerando as soldas ao Ar como ponto de comparação, para as duas configurações da polaridade, o acréscimo da profundidade diminui a penetração. Em DCEP, o reforço apresenta uma relação diretamente

proporcional com a pressão hidrostática; este comportamento é resultado de uma geometria irregular ao ar como consequência da alta corrente de operação, porém, com o incremento da profundidade e a constrição do arco, o equilíbrio da pressão do arco sob a poça de fusão é controlado. Por outro lado, a largura se mantém constante. Em DCEN, a largura e o reforço acrescentam em 5 m e desde esse ponto mantem-se constantes.

O apêndice III apresenta um resumo gráfico da morfologia do cordão de solda e os parâmetros gerais do processo para o eletrodo WW70.

### **4.3 Avaliação da estabilidade do processo de soldagem SMAW com consumível convencional (ao ar) e UWW**

Um arco estável é requerido para soldas de qualidade, e estas são atingidas garantindo uma fácil e uniforme transferência de material desde o eletrodo até a peça. Fusão incompleta, inclusão de escória e porosidade são defeitos resultantes de um arco instável (WELDING HANDBOOK, 2001).

Deste modo, a “estabilidade” afetará o desempenho operacional do processo e por sua vez, será o resultado da configuração de parâmetros elétricos do arco (Tensão, Corrente e Polaridade), a composição química do eletrodo, a pressão atmosférica e a relação das anteriores características com o ambiente (MODENESI, 2017). Especificamente para um processo a arco elétrico imerso num meio aquoso, a decomposição da água, as altas taxas de resfriamento, a geração de bolhas e a pressão do local de trabalho tem efeito direto sob o desempenho da técnica de soldagem (DIAZ, 2012). Assim, no caso da aplicação de eletrodo revestido, devem-se considerar os aspectos anteriores para definir a estabilidade.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 estão apresentadas a tensão média de soldagem em função da polaridade e profundidade com o uso dos eletrodos E6013 e WW70, respetivamente.

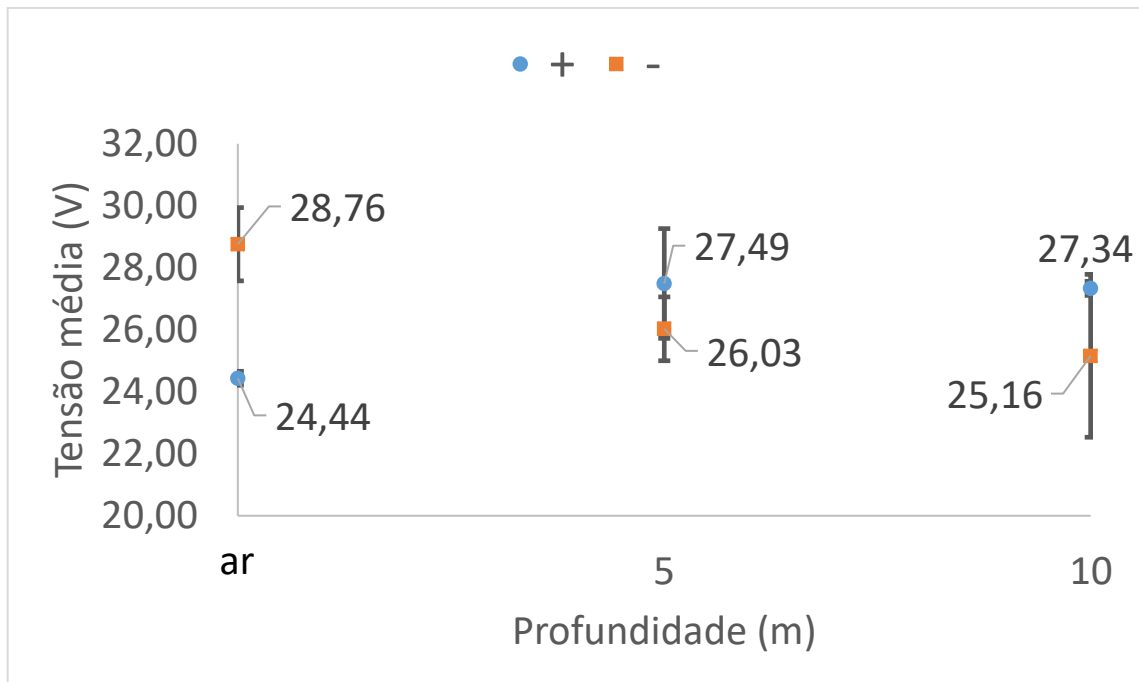


FIGURA 4.15 - Tensão média vs profundidade para E6013.

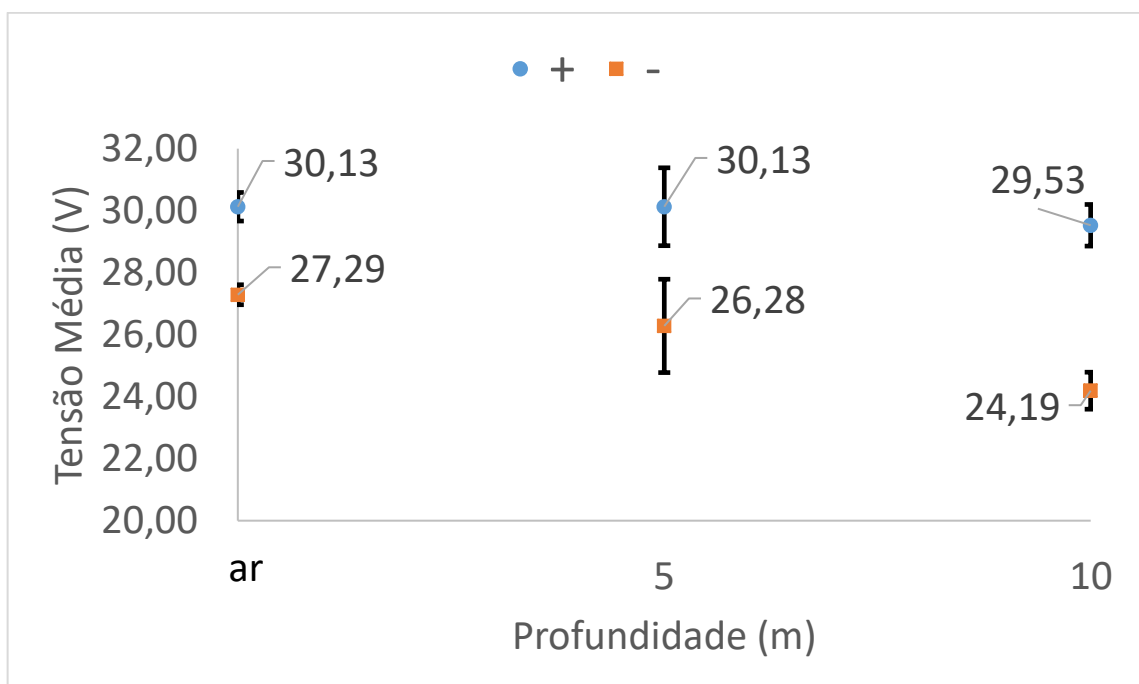


FIGURA 4.16 - Tensão média vs profundidade para WW70.

É interessante relatar que para as soldas ao ar com o uso do consumível rutilico (Figura 4.15), a configuração do eletrodo no polo negativo fornece maiores tensões de operação. Este comportamento se fundamenta no mecanismo de emissão de elétrons próprio da soldagem com eletrodos consumíveis: a emissão “a frio”. Sabe-se (MODENESI, 2017) que elétrons devem ser

emitidos em quantidades suficientes para a manutenção da corrente no arco; deste modo, na soldagem sem o uso de materiais refratários, a formação de filmes de óxidos no cátodo gera campos elétricos intensos como resultado da absorção de íons positivos. O antecedente, ocasiona a formação de filetes condutores no óxido, permitindo assim, a emissão dos elétrons desde a zona de carga. Deste modo, extrapolando do processo GMAW e para este caso específico, a localização do cátodo está na ponta do consumível, e assim, o arco, na sua necessidade de atingir regiões recobertas de óxidos (necessárias na emissão de elétrons), se desloca fazendo o envolvimento da ponta do eletrodo, derivando num comprimento de arco maior e desta forma, maiores tensões. Isto é pertinente para o processo com arame metálico nu, porém, o revestimento poderia limitar a procura do arco elétrico de regiões recobertas de óxidos no arame.

Também, as barras de erro mostram uma maior dispersão em torno da média (Figura 4.15), o qual representa maiores flutuações da sinal se comparados com a polaridade inversa (DCEP). Nesta última por sua parte (CC+), tem-se uma tensão menor (comprimento de arco), o que poderia representar um área de contato entre o arco e a peça reduzida e assim, menores perdas de calor da coluna de plasma ao ambiente e uma maior quantidade de calor difundido na direção longitudinal, contribuindo na fusão do metal base e uma maior penetração. Também, como resultado do polo negativo estar ligado no eletrodo, maior energia é gerada e assim, é justificada a maior taxa de fusão nesta polaridade.

Adicionalmente, com o incremento da profundidade, o processo em CC+ atinge tensões maiores. O anterior foi relatado por TSAI e MASUBUCHI (1977), os quais estabelecem que para a configuração do consumível no polo positivo, o cone formado na ponta do eletrodo é maior, o que representa maiores comprimentos de arco. No entanto, em DCEN tem-se uma queda do valor da tensão média com a profundidade, o qual é uma resposta direta do efeito da pressão hidrostática sob o arco elétrico (Constricção da coluna de arco). Logo, pode-se tentar supor que a pressão hidrostática tem um maior efeito sobre o arco elétrico na polaridade direta, e a sua vez, que a profundidade afeta mais notadamente a poça de fusão quando o eletrodo está configurado em DCEP. Por sua vez, PESSOA (2007) expõe que para sistemas de soldagem por gravidade, a ponta do consumível está sempre em contato com a peça de trabalho, resultando num comprimento de arco menor para soldas em CC- em comparação com DCEP.

O eletrodo WW70 opera em tensões médias maiores se relacionado com o consumível rutilico; no entanto, a polaridade inversa apresenta os maiores comprimentos de arco, tanto nas soldas feitas no Ar como aquelas desenvolvidas no ambiente aquático. Tal como nos casos



anteriores, maiores tensões médias de operação estão relacionadas com maiores taxas de fusão. Também, a maior largura do cordão nesta polaridade (CC+) e para soldas ao Ar, é o resultado de tensões de operação mais altas.

Como pode ser corroborado, para os dois consumíveis em estudo não é possível concluir estatisticamente que houve redução ou acréscimo da tensão com a profundidade (de 5 a 10 m), pelo fato que os valores médios ficaram dentro do erro estatístico (desvio padrão). Por esta razão, se precisa de índices que avaliem a estabilidade do processo.

#### **4.3.1 Índices de estabilidade Quantitativos**

No que concerne com a estabilidade do processo, o Coeficiente de Variação ( $K_V$ ), o qual é uma conhecida ferramenta estatística utilizada na avaliação de sinais dinâmicos, representa as flutuações no comportamento do arco mediante a medição da dispersão em relação a tensão média (SCOTTI e PONOMAREV, 2008). Deste modo, um sinal mais estável seria o resultado de um processo no qual as oscilações em torno da tensão de soldagem mantem-se pequenas, o qual geraria “um melhor cordão de solda” (FILHO, 2005).

Em relação com o filtro digital, o programa Sinal 2017 permite processar o oscilograma de tensão com uma serie de rotinas de filtragem, entre as que tem-se os filtro passa baixa: esta opção permite remover ruídos de alta frequência da sinal em estudo. Nesse sentido, foi utilizado um filtro *Kalman*, o qual busca estimar o estado de um sistema que pode ser descrito por uma equação estocástica linear de diferenças (LRSS, 2017a). Este filtro suaviza as diferencias bruscas de valor (cada ponto da sinal). Para os dados coletados em todos os testes e para as diversas combinações de parâmetros e níveis, foi utilizada uma intensidade de filtro de 10 e um valor de corte de 100. Também, a abordagem do sinal para filtragem foi de ambos lados, com o que se procura obter uma menor distorção.

Como exemplo e seguindo a metodologia de FILHO (2005), na Figura 4.17 é apresentado o oscilograma de tensão para uma solda subaquática feita com eletrodo E6013, em uma profundidade simulada de 10 m e com o uso de polaridade direta DCEN.

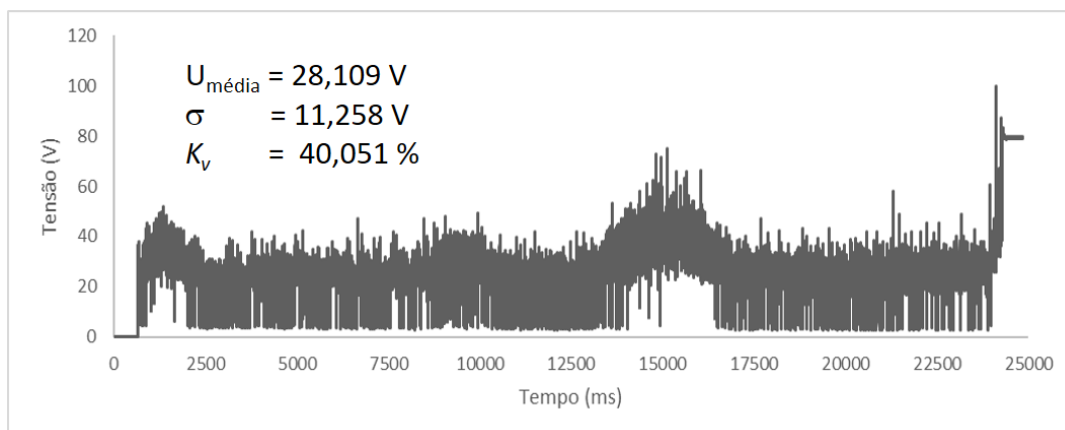


FIGURA 4.17 – Oscilograma de Tensão para E6013.

Como é possível observar, no processo tem-se uma grande quantidade de Curtos-Circuitos (Valores de tensão que atingem o patamar de 5 V), com o qual tem-se uma grande dispersão em termos de desvio padrão. Apesar disso, o uso do filtro *Kalman* “limpa” o sinal dos pontos que caracterizam a transferência metálica, obtendo-se as flutuações do arco em aberto e em consequência um menor desvio padrão (Figura 4.18)

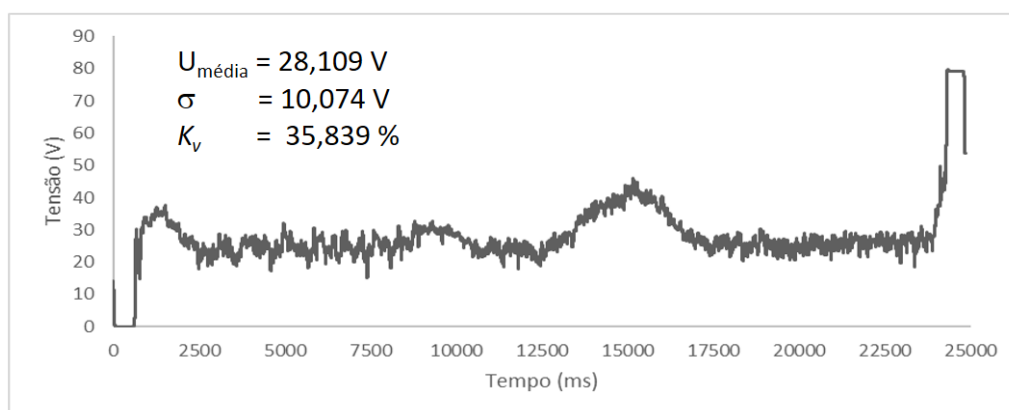


FIGURA 4.18 - Sinal resultante do uso de filtro Digital no oscilograma da Figura 4.17.

Sabe-se que a transferência metálica em soldas com eletrodo consumível define a estabilidade do processo e influencia no aspecto do cordão. Tomando como exemplo novamente o oscilograma da Figura 4.17, é possível observar a mudança no tipo de transferência durante o desenvolvimento da solda, e seu efeito sobre a estabilidade do processo. Para o primeiro caso, tomando um tempo de 5 a 10 s, o modo em que o eletrodo foi adicionado na poça de fusão aconteceu principalmente por Curto-Circuito (Figura 4.19).

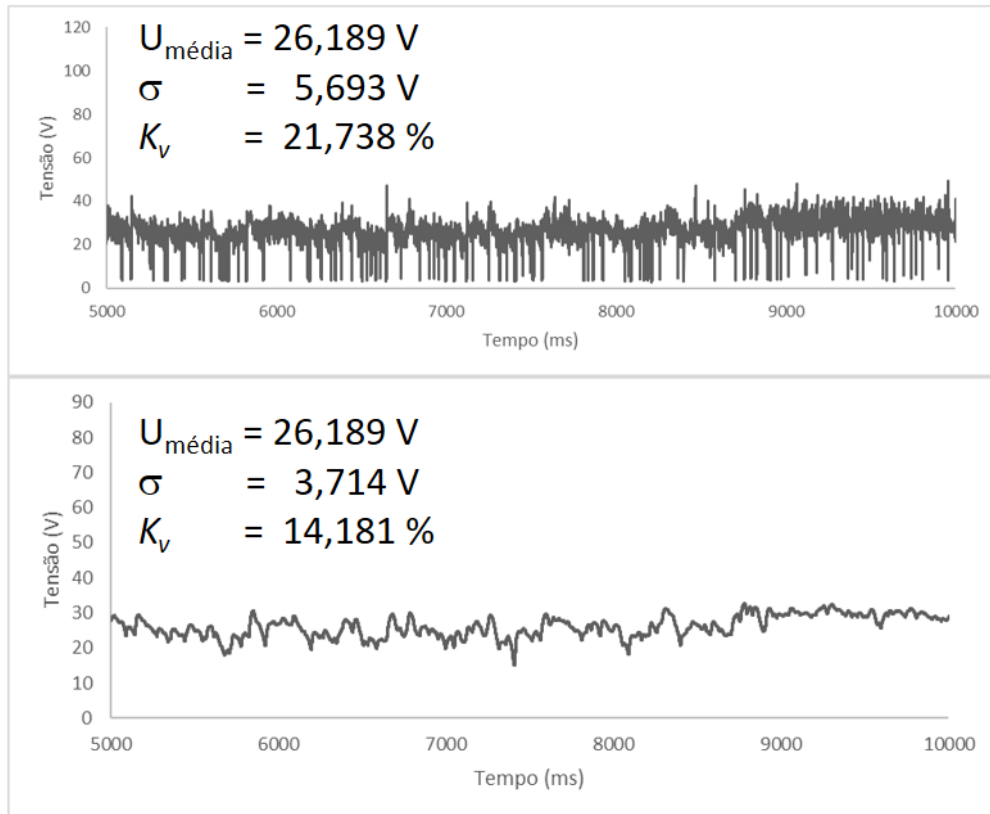


FIGURA 4.19 - Transferência por Curto-Circuito. Superior: oscilograma de tensão para uma transferência por Curto-Circuito; Inferior: Oscilograma com filtragem. Tempo: 5 a 10 s.

Assim, o oscilograma da Figura 4.20, tem-se mudanças no modo de transferência, sendo neste caso do tipo Globular. Além disso, fazendo uma comparação entre os dois oscilogramas superiores sem o uso do filtro Kalman, o Coeficiente de variação é maior (menor estabilidade) para a transferência por Curto-Circuito. Da mesma forma, se comparados os oscilogramas após a filtragem, aquele resultante da transferência do tipo Curto-Circuito se apresenta com maior estabilidade ( $K_v = 14 \%$ ); fato que vai contra do exposto acima. Deste modo, o uso de filtros digitais providenciam um modo de avaliar a estabilidade em função do tempo de arco aberto, sem a influência da transferência metálica.

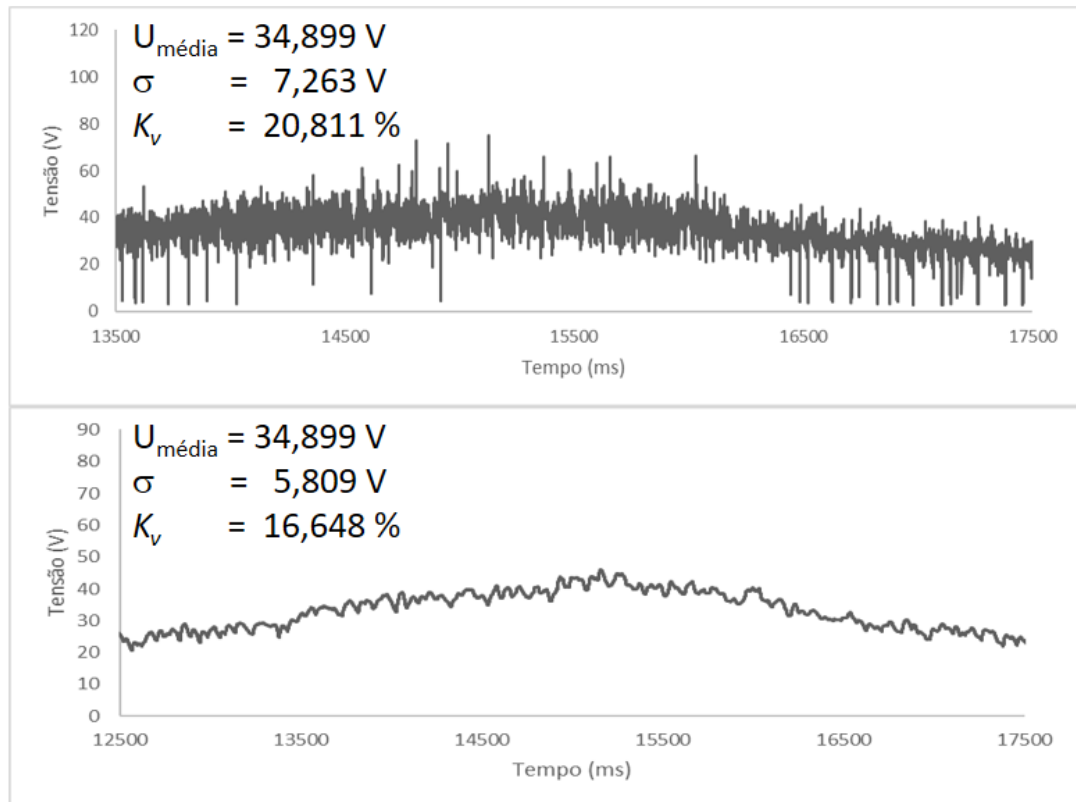


FIGURA 4.20 - Transferência Globular. Superior: oscilograma de tensão para uma transferência Globular; Inferior: Oscilograma com filtragem. Tempo: 5 a 10 s.

Tendo em consideração o exposto anteriormente, para o consumível E6013 em polaridade direta e para as soldas feitas a 0 e 10 m, o processo apresenta-se mais instável (Figura 4.21). No caso das soldas ao Ar com consumível rutilico, a maior instabilidade é resultado do uso de DCEN, polaridade na qual a geração de elétrons característica é refletida em maiores oscilações da sinal de tensão. Por sua vez para os 10 m, a menor tensão como resultado da constrição do arco elétrico faz aumentar a instabilidade, mudando possivelmente características como o tipo de transferência. Na Figura 4.22, esta apresentado o comportamento deste critério em função da pressão hidrostática e a polaridade da corrente para o eletrodo oxi-rutílico. Desta forma, o processo aponta para uma maior estabilidade com o uso de polaridade inversa ao ar e depois, com o incremento da profundidade, o comportamento é invertido, denotando menor estabilidade nesta polaridade e para os 10 m. Especificamente para as soldas feitas ao ar, foi relatado que com o uso de DCEN e para o processo GMAW, a transferência metálica é dificultada pelas forças dos jatos de plasma e vapores metálicos que repelem a gota; os fenômenos anteriores seriam causas possíveis (entre outras coisas), da falta de estabilidade (WAINER et al, 1992). Embora a justificativa anterior seja do processo GMAW, tenta-se extrapolar para o uso de eletrodo revestido.

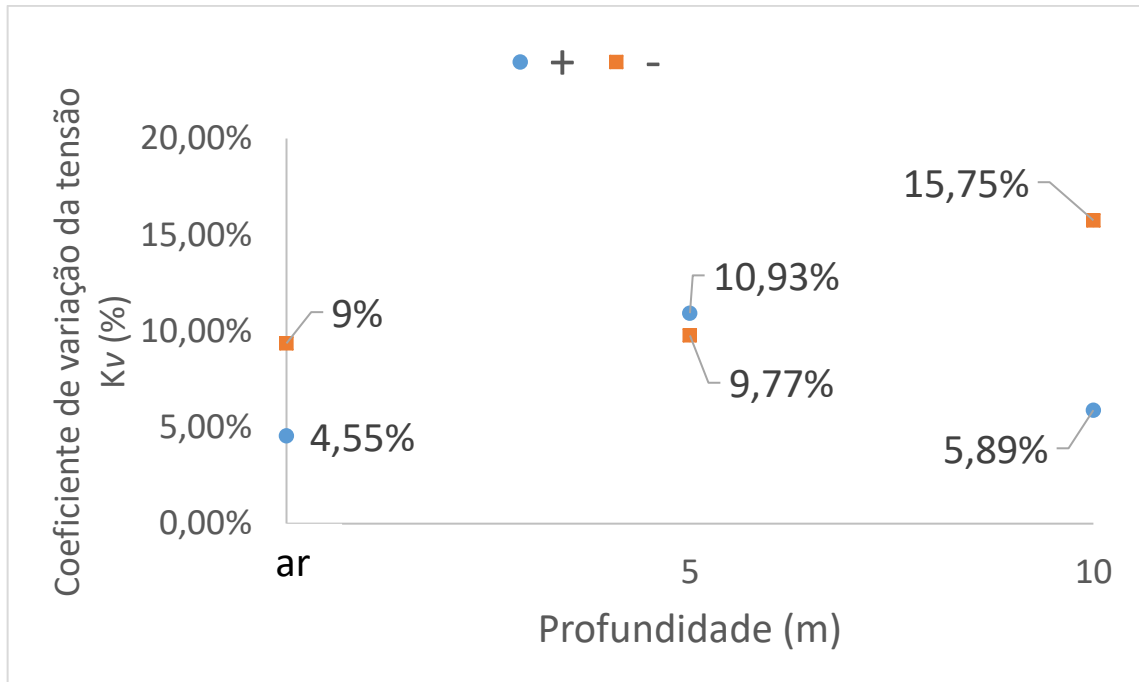


FIGURA 4.21 - Coeficiente de Variação em função da Profundidade e Polaridade para E6013.

É interessante relatar que a aplicação do filtro digital permitiu corroborar a maior estabilidade do processo na profundidade de 10 m, em polaridade direta e para o uso de eletrodo WW70. Se é analisado o oscilograma de tensão que descreve a configuração anterior (Apêndice II, Figura XIV), é possível evidenciar o acontecimento de curtos-circuitos; este comportamento definia um coeficiente de variação maior em comparação com o oscilograma de tensão correspondente com o uso de DCEP, à 10 m e com o mesmo consumível (Apêndice II, Figura XIII). Porém, como relatado (MORENO et al, 2017), o tipo de transferência Globular mostra-se mais instável (para certas condições) e essa conclusão, foi também obtida pela remoção dos picos característicos de curto-circuito. Assim, o uso do filtro digital em conjunto com a avaliação da intensidade deste, é uma poderosa ferramenta para a determinação da estabilidade.

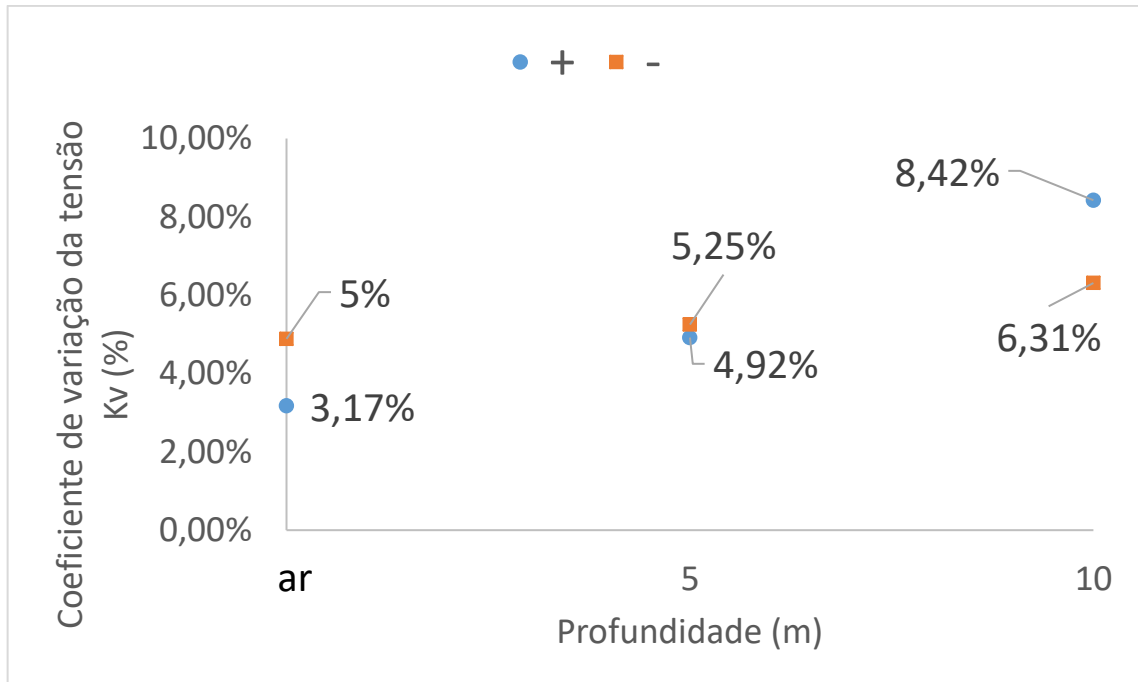


FIGURA 4.22 - Coeficiente de Variação em função da Profundidade e Polaridade para WW70.

No caso particular da profundidade simulada a 5 m, note-se que os valores do  $K_v$  são muito próximos, sem uma marcada diferença com a mudança da polaridade como nas outras condições. Neste ponto, pode-se tentar formular uma hipótese através do exposto por NIXON e GRAHAM (1993). É bem sabido que o comportamento do arco elétrico em baixas profundidades apresenta o melhor desempenho na profundidade de 6 m. Abaixo deste nível, foi comprovado a partir de relatos de soldador/mergulhador e a avaliação de oscilogramas e soldas, que o processo é significativamente menos estável. Efetivamente, para os dois consumíveis e ambas polaridades, o processo apresenta instabilidade em 5 m; por conseguinte, é provável que a baixa estabilidade característica do processo em baixas profundidades, disfarce o efeito dos fenômenos que governam a emissão de elétrons e a geração de calor no catodo e anodo, resultando numa região sem diferenciação.

Também, com o acréscimo da profundidade o processo torna-se mais instável (em termos gerais), porém, esse comportamento é o resultado de um arco elétrico constringido pela pressão hidrostática e influenciado pela dinâmica de formação das bolhas (MAZZAFERRO, 1998).

Fica em evidencia que o desvio padrão por si só não pode ser um critério para a avaliação da estabilidade, pelo fato de que a transferência metálica tem efeito direto sobre a flutuação do sinal. Deste modo, o coeficiente de variação apresenta-se mais indicado para a avaliação do arco em aberto. Não obstante, a forma na qual as gotas de metal fundido se transferem desde a

ponta do eletrodo para a poça de fusão tem efeito em aspectos operacionais da soldagem, como a morfologia do cordão, a quantidade de respingos e até a estabilidade do processo. Por esta razão, a avaliação do tipo de transferência metálica em função das diferentes configurações do processo explica também, a qualidade do metal de solda resultante.

Foi coletado o Número de Curtos-Circuitos (NCC) com a finalidade de caracterizar o tipo de transferência metálica em função da profundidade, polaridade e consumível, e a relação com a estabilidade do processo. Para isso, foi definida a tensão de referência de 5 V (PESSOA et al, 2010; MAZZAFERRO, 1998), com o qual o programa Sinal 2017 contou o número de ocorrências ou pontos nos quais o valor da tensão atingiu esse patamar.

Como apresentado nas Figuras 4.23 e 4.24, o NCC varia em função da Profundidade, Polaridade e o tipo de consumível. Assim, para o tempo de amostragem total e com o uso do eletrodo E6013 em polaridade direta, o modo de transferência é por Curto-Circuito (este resultado suporta a maior instabilidade apresentada nesta configuração e para as condições de soldagem, já que a dispersão num processo com transferência metálica por Curto-Circuito é maior, podendo registrar valores de tensão entre o valor de operação, a tensão em vazio da fonte e a tensão de curto-circuito (Apêndice I). Adicionalmente, pode ser evidenciado na Figura 4.23 que o NCC aumenta com o aumento da profundidade, refletindo deste modo o efeito que tem a pressão hidrostática sobre a transferência metálica. No entanto, com o uso de polaridade inversa, a transferência metálica é uma combinação entre os modos Globular/Curto-Circuito (maiormente do primeiro). Para o eletrodo Oxi-Rutílico (Figura 4.24), o modo de transferência em CCEP é totalmente globular. Já com a mudança de polaridade (CCEN), o processo apresenta quantidades insignificantes de Curtos, e estes aumentam com o acréscimo da profundidade. Por conseguinte, para o eletrodo WW70, o modo de transferência é tipicamente globular.

Assim, é possível supor que o acontecimento de curtos-circuitos diminui o efeito da profundidade sob a geometria do cordão de solda, uma vez que este tipo de transferência de metal mantém a poça de fusão perante uma perturbação constante e dessa forma, a influência da pressão hidrostática sob a massa de metal fundido diminui. Isto pode ser evidenciado na geometria resultante do uso de E6013 com polaridade direta, onde em termos gerais, a penetração e largura mantem-se constantes.

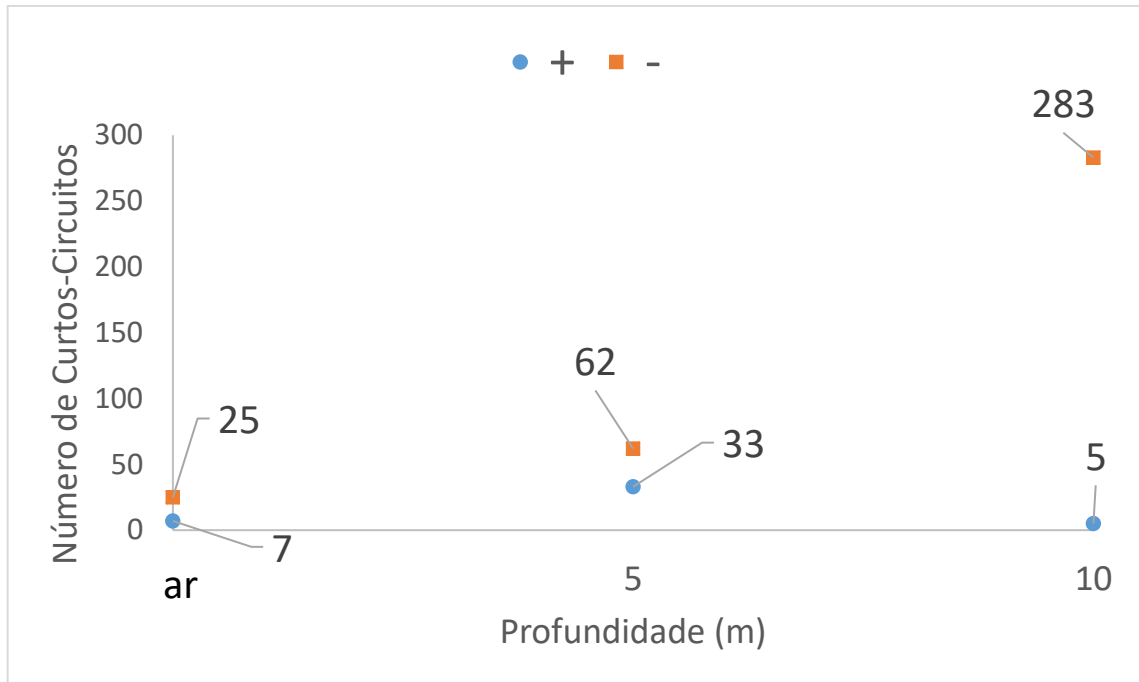


FIGURA 4.23 - NCC em função da Profundidade e Polaridade para E6013.



FIGURA 4.24 - NCC em função da Profundidade e Polaridade para WW70.

Da mesma forma, foi calculado o índice de Madatov ( $S$ ). Para Soldagem de eletrodo revestido com o uso de CC, foi estabelecido que para valores deste fator próximos de 1, o arco elétrico é considerado estável. Pelo contrário, para valores  $S > 1$ , o arco é considerado instável (GUERRERO, 2002). No caso do E6013 e segundo este critério (Figura 4.25), o processo exibe



maior estabilidade com o uso de polaridade inversa. Portanto, é possível mostrar que o arco elétrico com consumível rutilico é mais sensível com as variações de pressão em DCEN. Note-se que para o WW70 (Figura 4.26), DCEP é a configuração mais estável ao ar e depois, com o incremento da profundidade, a polaridade direta apresenta maior estabilidade. Portanto, pode-se relatar uma certa convergência na análise das sinais de tensão e corrente mediante o uso do  $K_v$  e  $S$ . Por outro lado, tem-se que considerar que o índice de Madatov foi desenvolvido para aplicação em fontes do tipo gerador (TSAI e MASUBUCHI, 1977), as quais eram os equipamentos mais comuns na década de 60 e se caracterizam pela baixa velocidade de resposta e a ausência de controles nos fenômenos que ocorrem no arco e na transferência metálica. Por conseguinte, este fator não é válido para aplicação em fontes modernas de controle eletrônico, as quais garantem alta reprodutibilidade e resposta dinâmica. Além disso, constata-se que para a profundidade simulada de 5 m não se tem região de instabilidade, fato pelo qual pode-se considerar que o índice de Madatov está sujeito a uma limitada capacidade de avaliação.

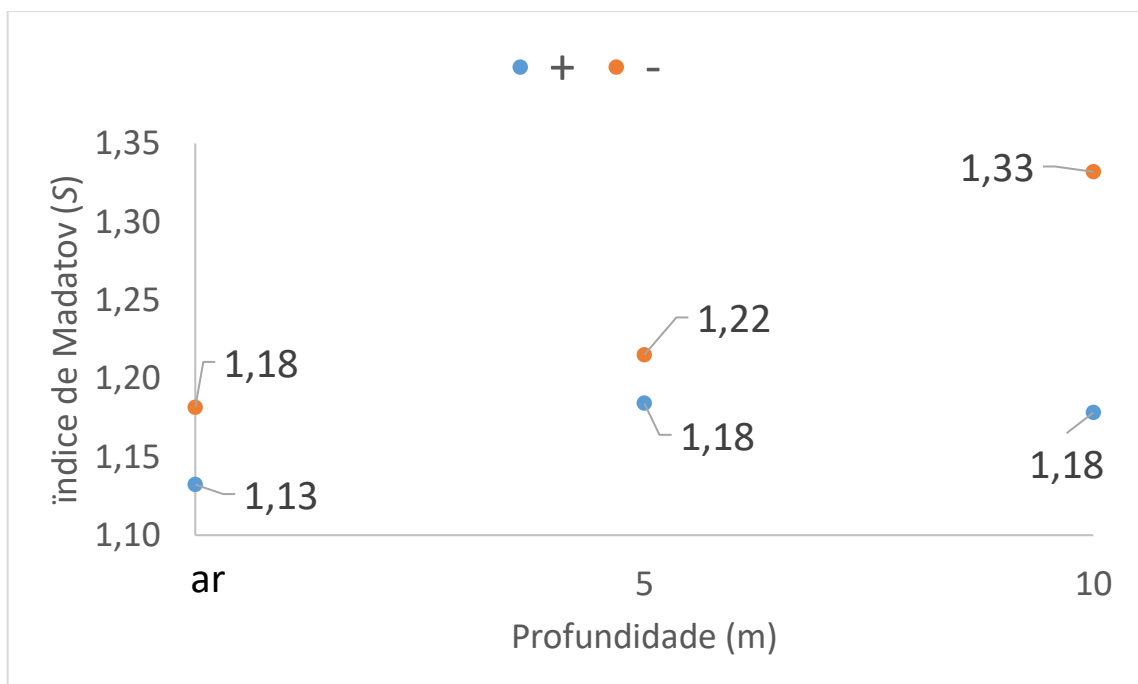


FIGURA 4.25 - Índice de Madatov (S) em função da polaridade e profundidade para E6013.

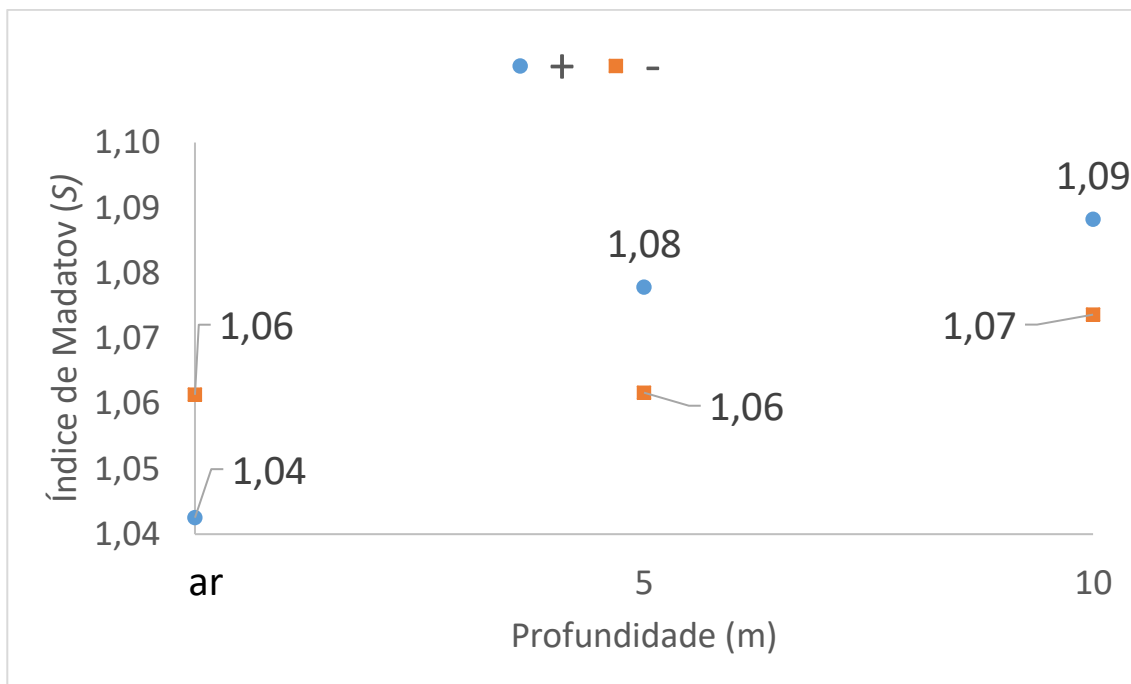


FIGURA 4.26 - Índice de Madatov (S) em função da polaridade e profundidade para WW70.

#### 4.3.2 Índices de estabilidade Qualitativos

A avaliação do processo com o uso de técnicas qualitativas revela também o comportamento apresentado pelo Coeficiente de Variação ( $K_V$ ). Como exposto por BAUNÉ et al (2001), é possível caracterizar um arco elétrico confiável pela análise da altura e largura dos Histogramas. Desse modo, um processo estável gera histogramas de pico alto e estreito. Adicionalmente e segundo SUBAN (2007), uma área menor representada nos gráficos de potência (Ciclogramas de Corrente vs Tensão) aponta para arcos estáveis. Assim, os principais aspectos para qualificar dos anteriores diagramas são a área e a dispersão dos pontos (PESSOA et al, 2010).

A Figura 4.27 representa o comportamento das soldas feitas com o eletrodo rutilico ao ar. O histograma revela a maior estabilidade do uso da polaridade inversa. Pode-se notar também, que apesar de ter-se maiores tensões na polaridade direta, acontecem curtos na parte esquerda do histograma, para os valores de tensão de 0 à 10 V; estes fenômenos de transferência metálica embora sejam poucos, são facilmente identificáveis nesta ferramenta gráfica e influenciam na operabilidade do processo. Igualmente, no Ciclograma (Figura 4.28) é demonstrada uma menor área para DCEP: refletindo uma menor dispersão da nuvem de pontos e assim, maior estabilidade.

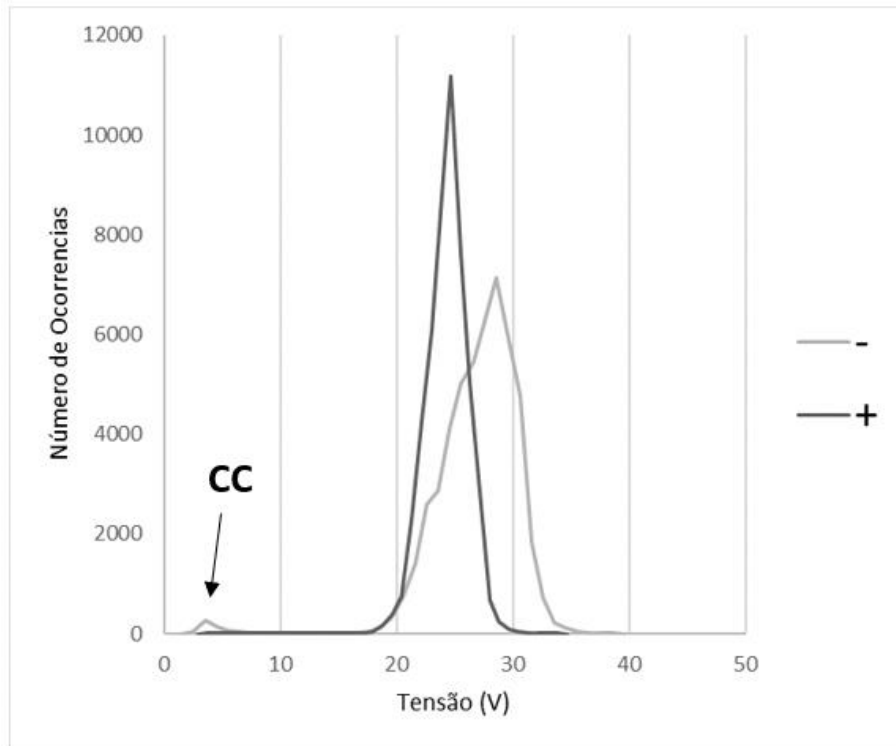


FIGURA 4.27 . Histograma de Tensão para solda feita ao ar com E6013.

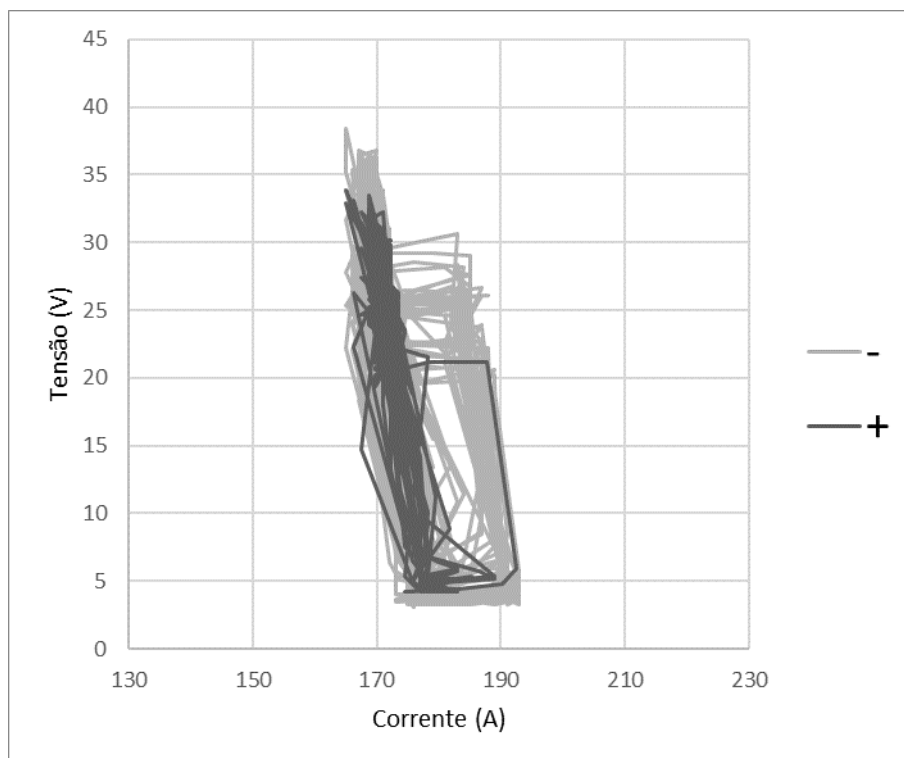


FIGURA 4.28 . Ciclograma de Tensão vs Corrente para solda feita ao ar com E6013.

O comportamento das Figuras 4.29 e 4.30 será justificado em conjunto com os oscilogramas e histogramas resultantes das soldas produzidas com o eletrodo WW70 na mesma profundidade.

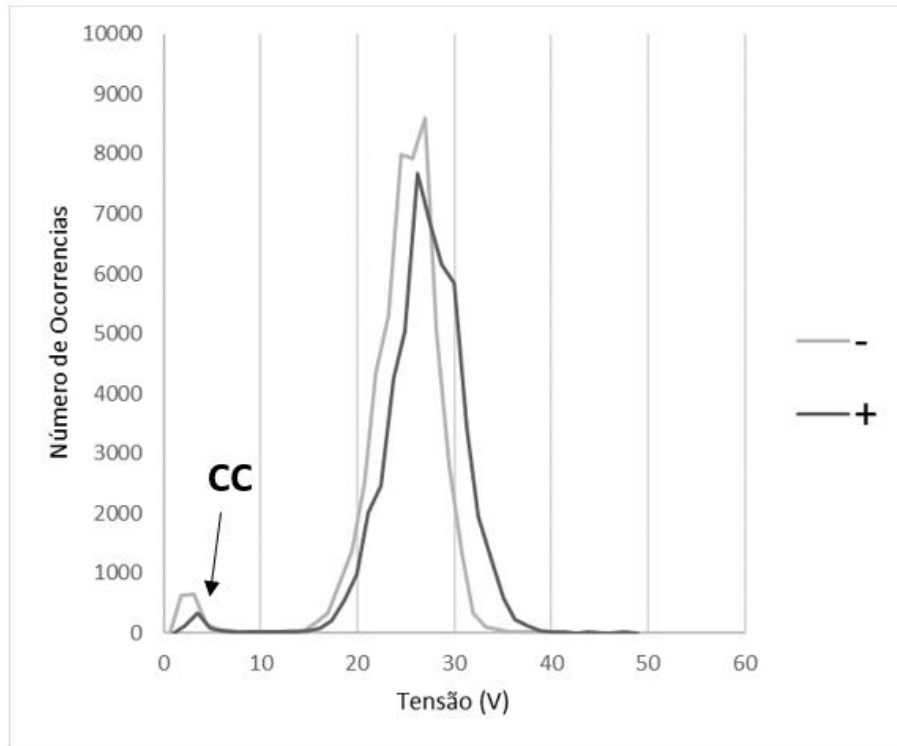


FIGURA 4.29 . Histograma de Tensão para solda feita em 5 m com E6013.

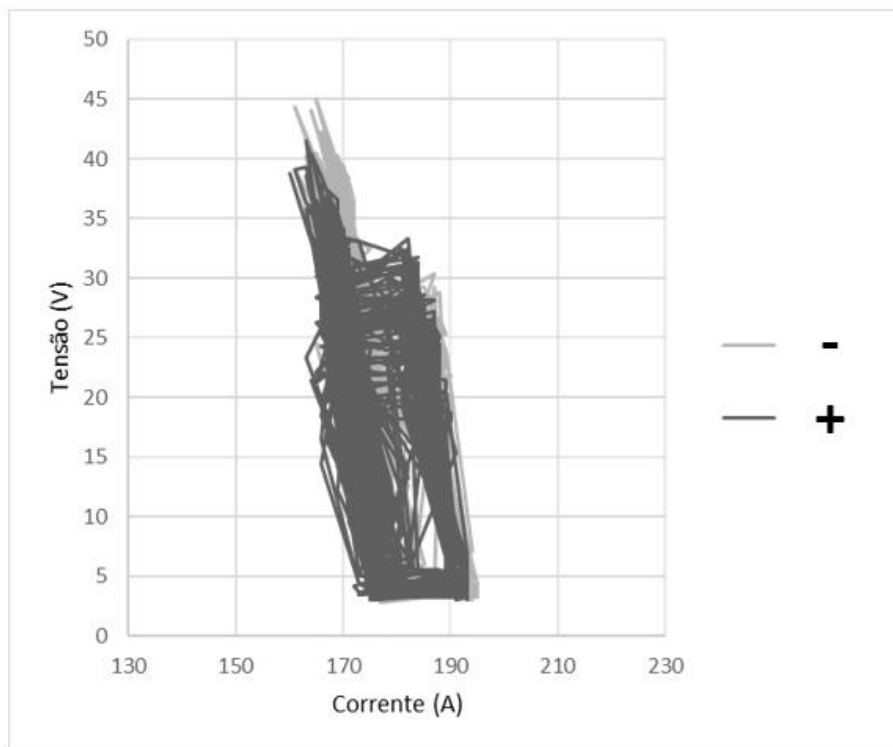


FIGURA 4.30 . Ciclograma de Tensão vs Corrente para solda feita em 5 m com E6013.

Como nas análises anteriores, para a profundidade simulada de 10 m (Figura 4.31), o eletrodo ligado ao polo positivo gera o processo mais estável. No entanto, com o uso da polaridade direta o histograma desloca para regiões de tensão menor, o que resulta num pico entre os 0 e 10 V e denota o acontecimento de Curtos-Circuitos. Também, a maior dispersão ou maior instabilidade resulta do uso da polaridade direta (Figura 4.32).

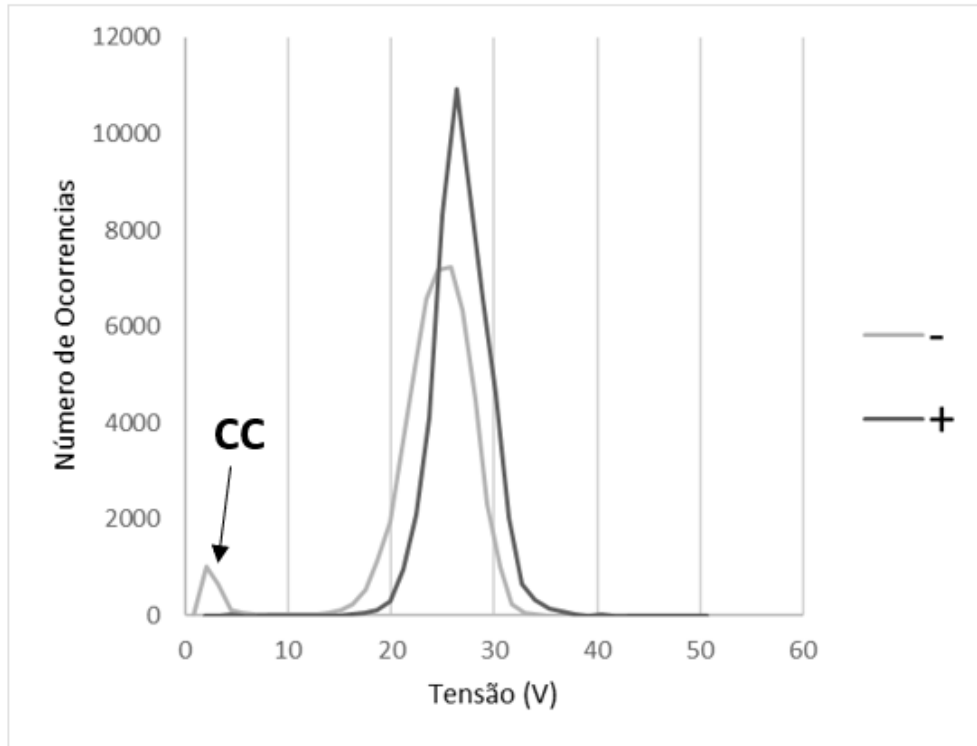


FIGURA 4.31 . Histograma de Tensão para solda feita em 10 m com E6013.

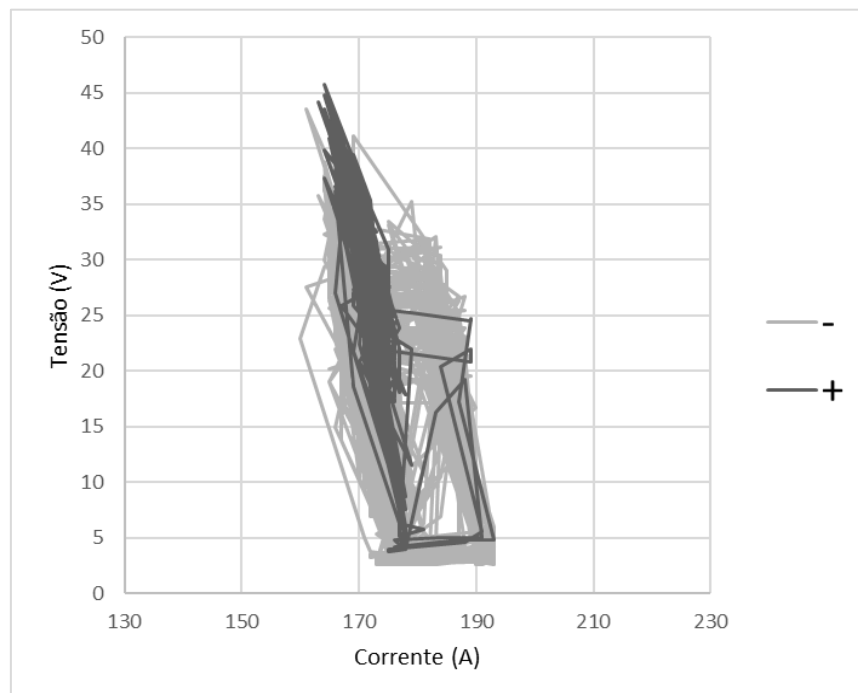


FIGURA 4.32 . Ciclograma de Tensão vs Corrente para solda feita em 10 m com E6013.

Com o emprego do consumível oxi-rutílico, o eletrodo ligado no polo positivo gera o comportamento mais estável para as soldas feitas na pressão atmosférica (ao ar) (Figura 4.33) e evidencia-se que com polaridade direta a dispersão dos pontos que representam a tensão (mancha vertical) é superior (Figura 4.34). A mancha vertical representa maiores variações no comprimento do arco e diminuição da estabilidade. Fazendo um parêntese, foi pelo uso de esta ferramenta (ciclograma), que se facilitou a visualização desse fenômeno. Finalmente e para a Figura 4.37 e Figura 4.38, constata-se que o processo para os 10 m se apresenta mais estável com o uso de DCEN, portanto pode-se inferir, que este comportamento confirma os resultados obtidos pelo Coeficiente de Variação ( $K_v$ ). É evidente que para os ensaios feitos em 5 m (e para os dois consumíveis), não tem-se distinção do uso da polaridade e os níveis de instabilidade são semelhantes (Figura 4.29 e 4.30; Figura 4.35 e 4.36). Deste modo, como já discutido, nesta profundidade o arco elétrico sofre o efeito negativo do ambiente, independente da natureza química dos revestimentos.

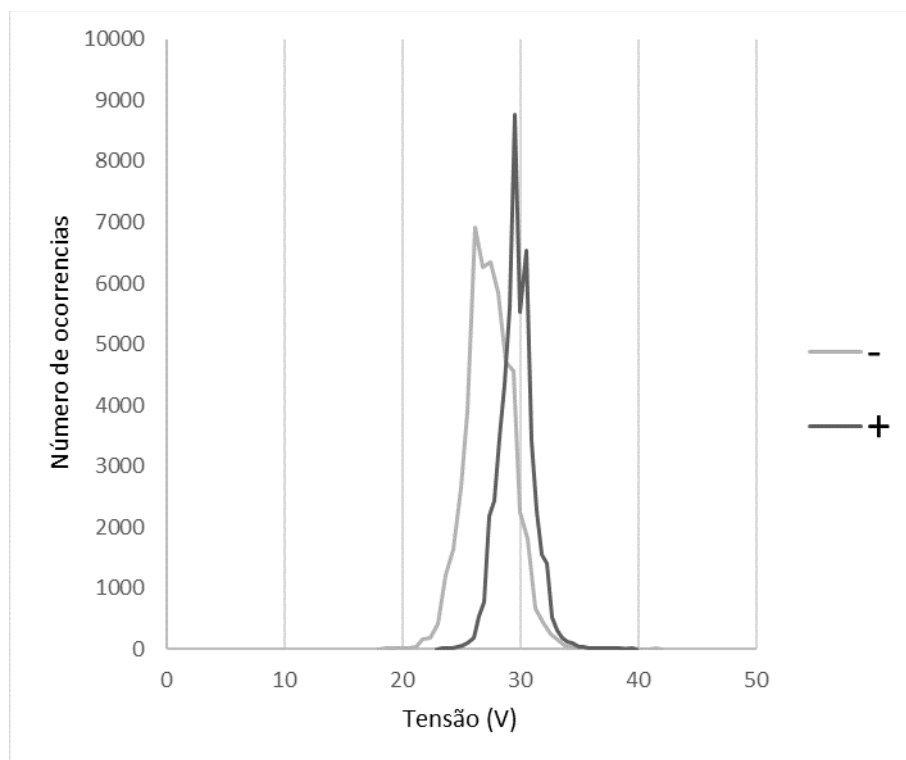


FIGURA 4.33 . Histograma de Tensão para solda feita no ar com WW70.

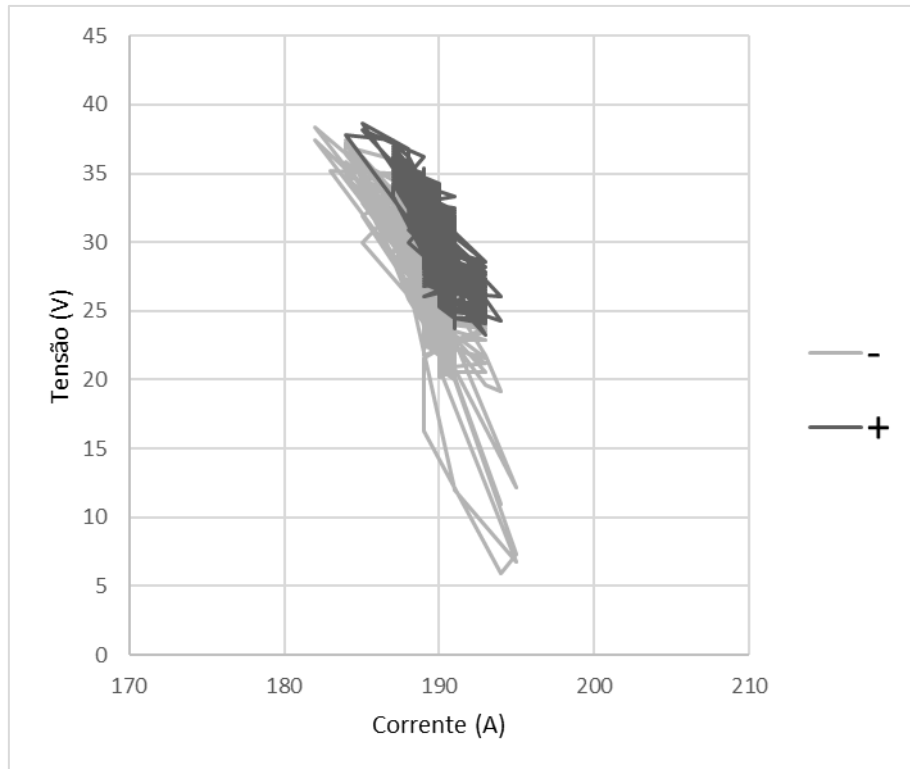


FIGURA 4.34 . Ciclograma de Tensão vs Corrente para solda feita ao ar com ww70.

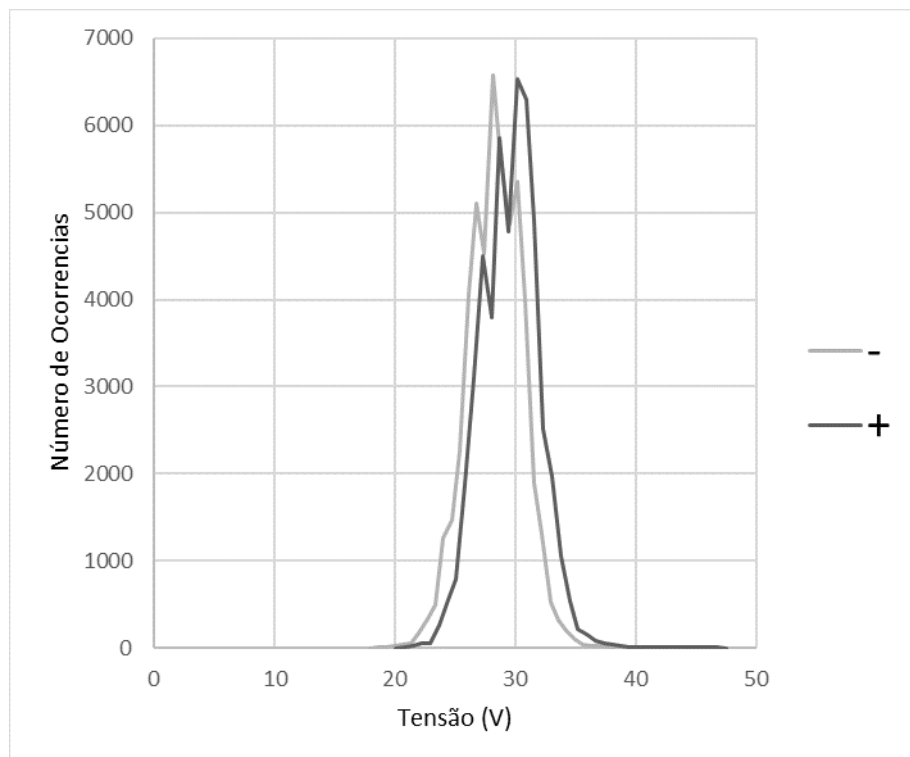


FIGURA 4.35. Histograma de Tensão para solda feita em 5 m com WW70.

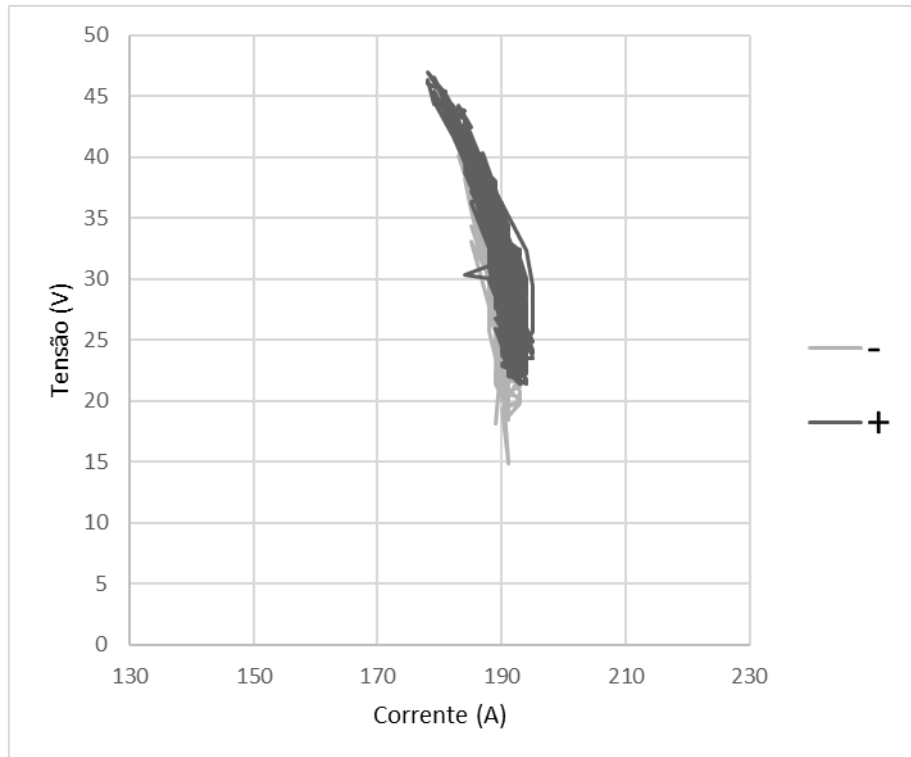


FIGURA 4.36 . Ciclograma de Tensão vs Corrente para solda feita em 5 m com WW70.

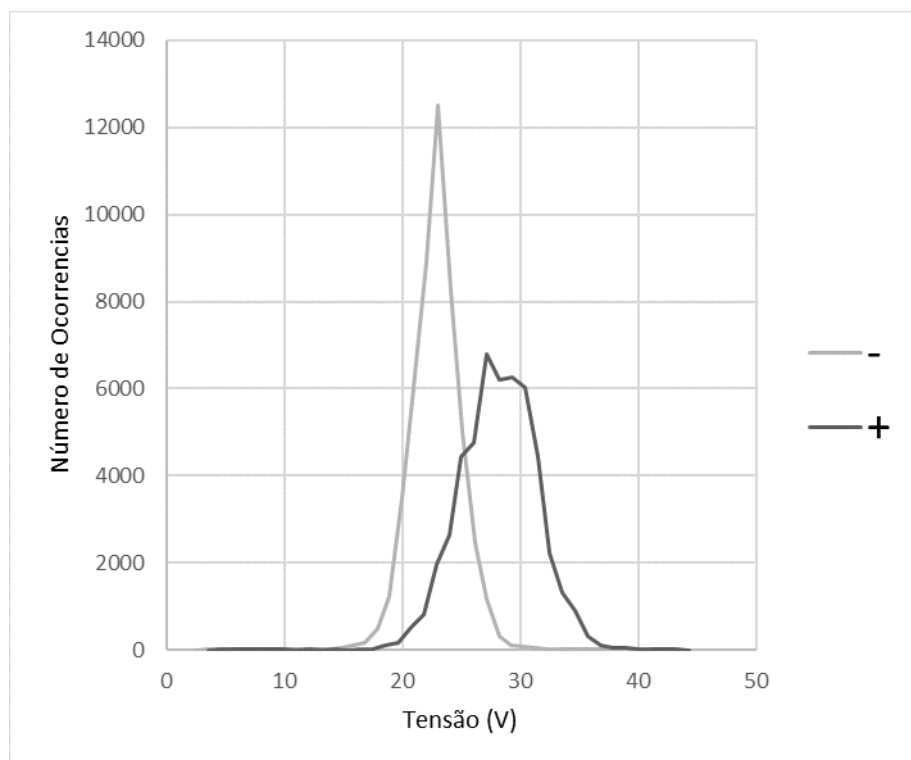


FIGURA 4.37. Histograma de Tensão para solda feita em 10 m com WW70.



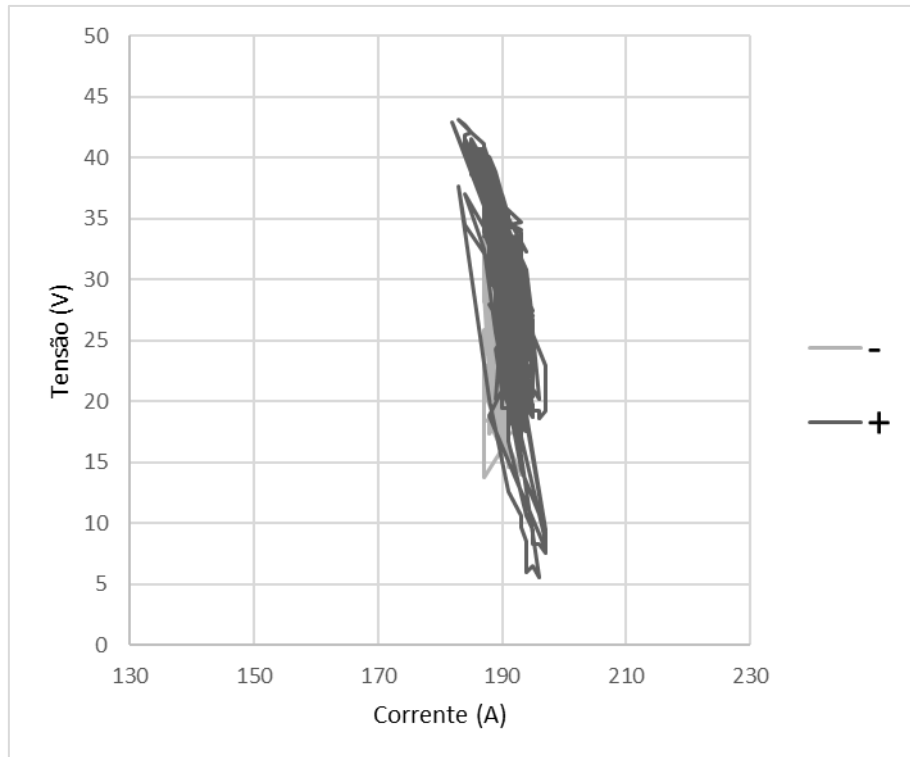


FIGURA 4.38 . Ciclograma de Tensão vs Corrente para solda feita em 10 m com WW70.

#### 4.4 Inspeção visual dos cordões de solda

Inspeção Visual sobre as deposições resultantes do estudo, foi feita onde procurou-se um indicativo da qualidade dos cordões por meio da observação de características ou defeitos superficiais. Para as soldas feitas com E6013 a pressão atmosférica (ao ar) (Figura 4.39), é evidente uma maior quantidade de mordeduras, respingos e um cordão maior em polaridade inversa (DCEP) que em polaridade direta (DCEN). Assim, o uso do eletrodo E6013 ao ar apresenta-se instável como consequência das altas correntes de operação (170 A), em comparação com o valor ótimo de corrente (125 A) (ESAB, 2005). Entretanto, com o incremento da profundidade (5 m) (Figura 4.40) se evidencia uma menor quantidade de defeitos, o que demonstra a influência da pressão hidrostática sobre a poça de fusão e consequentemente, sobre o formato resultante do cordão. A rugosidade do cordão aumenta nas duas polaridades e também, as soldas em polaridade inversa continuam tendo uma maior largura e maior quantidade de respingos, porém, na polaridade direta tem-se inclusões e variação da largura do cordão. Por último, das soldas feitas dentro d'água, aquelas na profundidade de 10 m apresentam menor quantidade de defeitos (Figura 4.41). A altura do reforço é menor nas duas polaridades e em comparação com as outras configurações do ambiente. Aliás, não tem-se

mordedura ou inclusões. Aparentemente a pressão hidrostática melhora a geometria do cordão de solda em profundidades maiores do que 5 m. Mais uma vez, em DCEP, tem-se maior quantidade de respingos sobre a chapa. DCEN por sua vez, apresenta o cordão com melhor aspecto superficial na profundidade de 10 m.

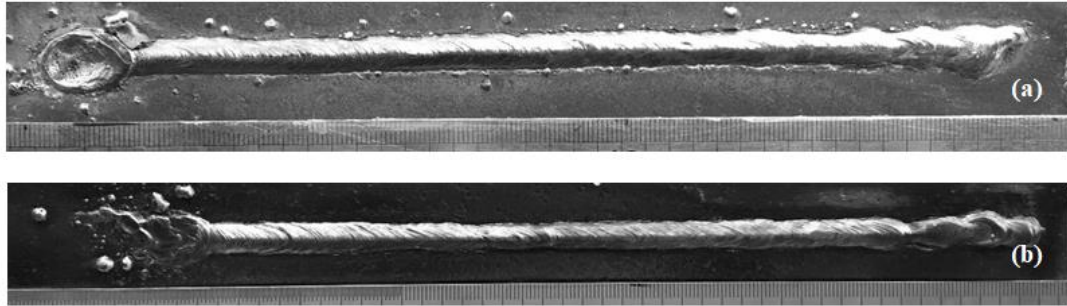


FIGURA 4.39 . Cordões de solda feitos com eletrodo E6013 ao ar em DCEP (a) e DCEN (b).

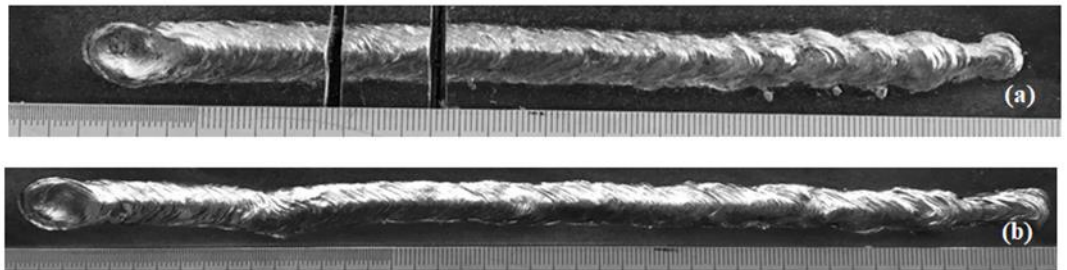


FIGURA 4.40 Cordões de solda feitos com eletrodo E6013 a 5 m de profundidade em DCEP (a) e DCEN (b).

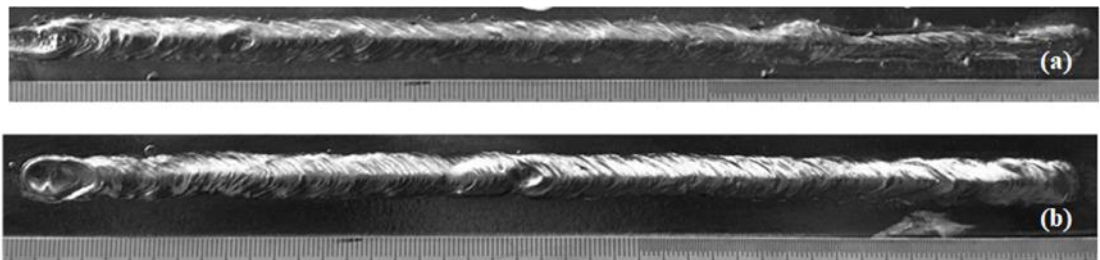


FIGURA 4.41 Cordões de solda feitos com eletrodo E6013 a 10 m de profundidade em DCEP (a) e DCEN (b).

Por outro lado, as soldas realizadas com WW70, foram as que apresentaram os piores resultados em termos do aspecto visível da deposição. Os cordões feitos ao Ar, apresentam porosidade e inclusão de escória nas duas configurações de polaridade (Figura 4.42). Para DCEN, é evidenciada variação na largura do cordão e mordedura. Contudo, as irregularidades superficiais nos testes com este eletrodo são evidentes, caracterizadas por uma morfologia indicativa de grande quantidade de poros e um reforço com muita rugosidade. É importante

destacar que este consumível não foi desenvolvido para operações no Ar, o que poderia explicar a notável ocorrência de defeitos, entre eles, a ocorrência de “Humping”.

Nas soldas feitas a 5 m, não tem-se uma diferenciação notável das deposições em função da polaridade (Figura 4.43), não obstante, os cordões feitos apresentam um formato com ondas mais regulares e menor porosidade em comparação com as soldas no Ar. Por último, na maior profundidade (10 m), tem-se uma destacada melhora no aspecto visual do cordão (Figura 4.44), obtendo-se para DCEN o maior desempenho deste eletrodo. Deste modo e em concordância com estudos prévios (LRSS, 2017b), a polaridade direta resulta numa morfologia indicadora de menor presença de defeitos.

Assim, é interessante destacar que para o eletrodo E6013, o acontecimento de Curtos-Circuitos melhora a aparência superficial do cordão de solda; deste modo, DCEN fornece os cordões com menor quantidade de defeitos ao ar e à 10 m.

Ao contrário do que se esperaria com o resultado do mais baixo coeficiente de variação ( $K_V$ ), os cordões em DCEP revelam um processo mais instável em termos de quantidade de respingos e também, uma maior quantidade de defeitos (mordedura).

Por conseguinte, para o eletrodo E6013, maiores  $K_V$  resultam em cordões com melhor aparência superficial.

Trazendo em comparação o processo GMAW, sabe-se que a aparência superficial do cordão é melhor no ponto de máxima frequência de curtos-circuitos (MORENO et al, 2017), e do mesmo modo, segundo MODENESSI e AVELAR (1999), a tensão associada com o mínimo valor do período médio de transferência de metal, está relacionada com uma condição de estabilidade ótima para GMAW em curto-circuito. Assim, os autores anteriores encontraram uma relação entre a menor quantidade de respingos e o menor período de transferência metálica (que representa a máxima frequência de curtos). Contudo, pode-se tentar supor que uma grande quantidade de curtos-circuitos e a ausência de respingos sobre a chapa se refletem num cordão de bom aspecto superficial.

Também, tensões altas (que resultam em transferência do tipo globular) representam processos mais estáveis pela ausência de Curtos, porém, menor qualidade do cordão (MORENO et al, 2017).

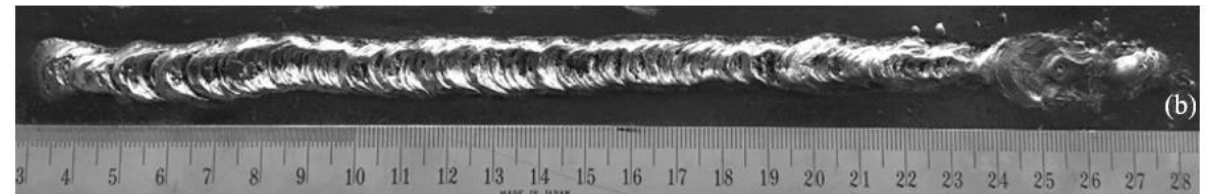
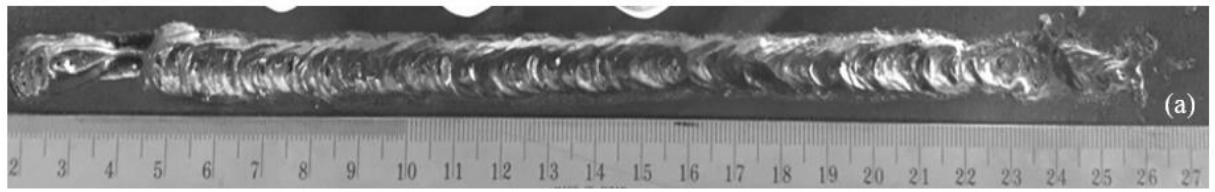


FIGURA 4.42. Cordões de solda feitos com eletrodo WW70 no ar em DCEP (a) e DCEN (b).

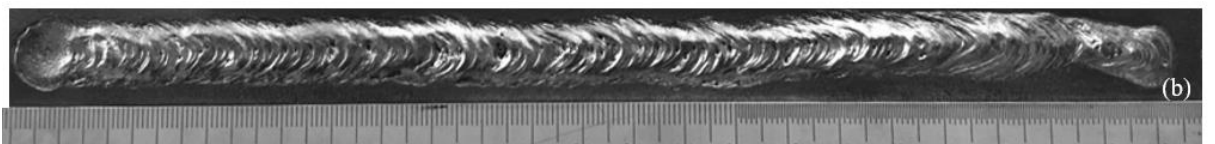
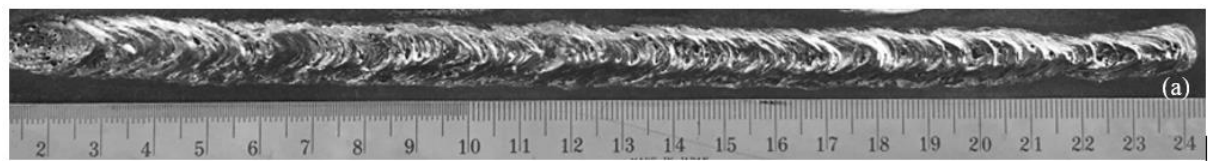


FIGURA 4.43 Cordões de solda feitos com eletrodo WW70 a 5 m de profundidade em DCEP (a) e DCEN (b).

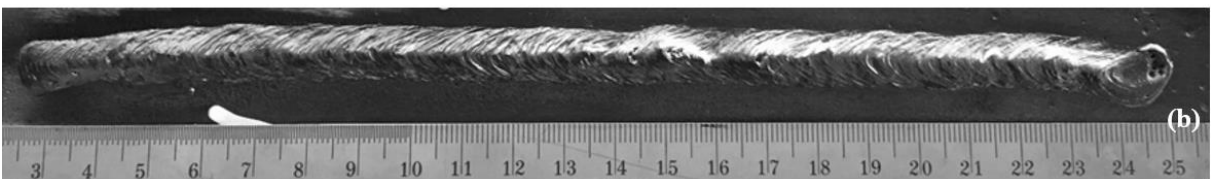
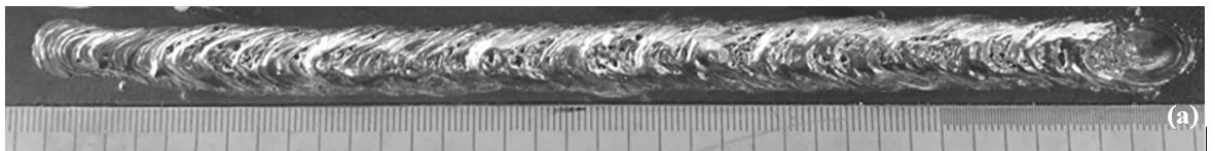


FIGURA 4.44 Cordões de solda feitos com eletrodo WW70 a 10 m de profundidade em DCEP (a) e DCEN (b).

## 4.5 Análise química

### 4.5.1 Determinação do teor de Oxigênio no metal de solda

Como foi estudado por KIM et al (1990), pelas altas densidades de corrente nos processos de soldagem com eletrodo consumível e as pequenas áreas de superfície, reações eletroquímicas exercem uma influência significativa sob a composição final do metal de solda. Deste modo, este tipo de reações acontece principalmente na ponta fundida do eletrodo e na poça de fusão imediatamente embaixo do arco. No caso de processos de soldagem com o uso de corrente contínua (CC), as possíveis reações no anodo incluem (entre outras) a absorção de ânions de oxigênio. Por outra parte, o refino de elementos não metálicos como o enxofre e o oxigênio são reações esperadas no catodo.

Deste modo, dentro da dinâmica da transferência do metal de adição, sabe-se que as gotas formadas na ponta do eletrodo viajam através do plasma em poucos milissegundos, com o qual, são superaquecidas (KIM et al, 1990). Assim, como consequência da maior área específica de interação (em comparação com a poça de fusão) e das altas temperaturas apresentadas na ponta do metal fundido e as gotas transferidas, o oxigênio é absorvido pelo metal nessas duas zonas. Daí, após seu destacamento, as gotas mudam a composição química da poça de fusão (IBARRA et al, 1989).

Levando em consideração o apresentado, na Figura 4.45, é mostrada a relação entre a concentração de oxigênio no metal de soldas subaquáticas feitas com o consumível oxi-rutílico, e a polaridade junto com a profundidade do ensaio.

As linhas horizontais na Figura 4.45 representam os teores de oxigênio no metal de solda apresentados na literatura por SANTOS et al (2012). Estes autores fizeram análises químicas para oito amostras na profundidade conhecida como lâmina de água, com o qual, a linha superior exhibe o maior valor de oxigênio e a linha inferior o mais baixo teor deste elemento. Isto representa os limites no conteúdo de oxigênio no metal de solda para uso de eletrodos Oxi-rutílicos e serve como ponto de referência para os resultados obtidos nesta pesquisa.

Assim, é possível evidenciar que em termos gerais, o teor de oxigênio no metal de solda neste trabalho é menor em comparação com o limite inferior apresentado na literatura. Também, é interessante levar em consideração que o nível de saturação do oxigênio no ferro líquido está na ordem de 2000 ppm, com o qual, segundo POPE (1994), acima desse limite de solubilidade, a monocamada de FeO é formada, contribuindo no menor teor de hidrogênio difusível no metal

de solda. Especificamente para a profundidade simulada de 5 m, tem-se uma queda no teor de oxigênio nas duas polaridades, o qual pode sugerir um efeito da instabilidade do processo sobre a absorção de oxigênio.

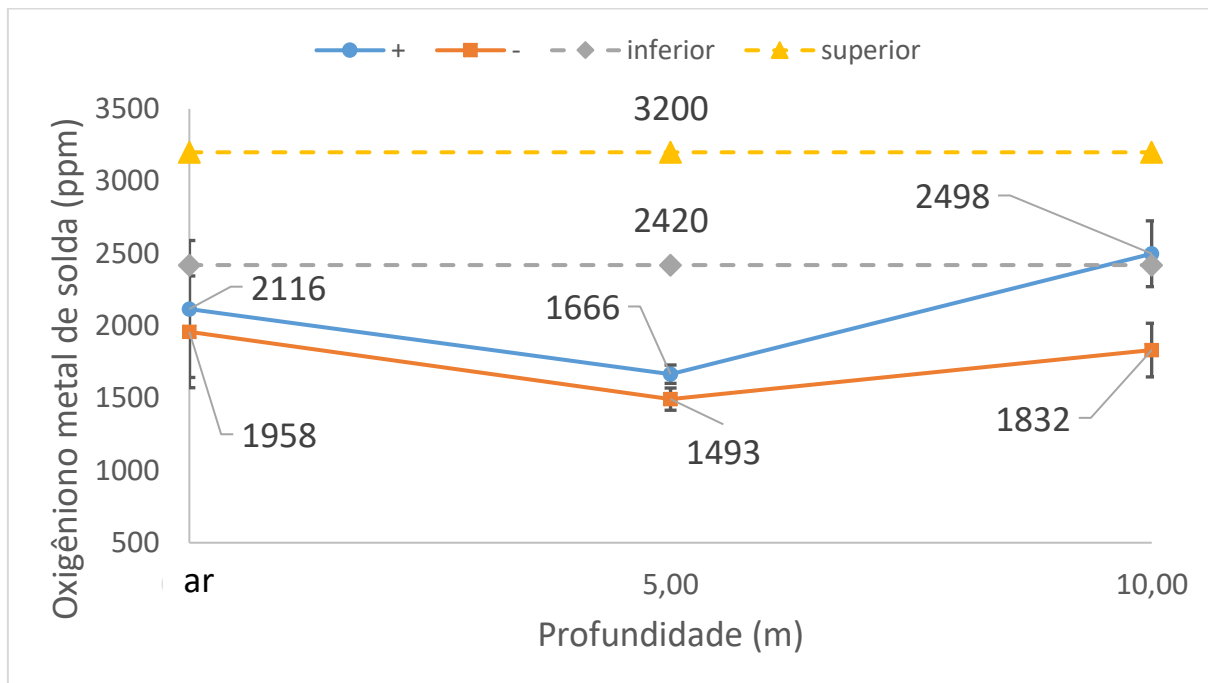


FIGURA 4.45 Teor de Oxigênio no metal de solda em função da Polaridade e profundidade para WW70.

Neste caso específico, as consideráveis quantidades de Hematita contidas neste consumível, além do ambiente aquático circundante, fornecem as condições para que existam altos teores de oxigênio no metal de solda.

No caso de UWW, a água ao redor do processo, é termodinamicamente instável e se decompõe facilmente em contato com o arco elétrico produzindo Hidrogênio e Oxigênio (MEDEIROS, 1997). Desta maneira, diferentes gases estão presentes em forma molecular, atômica ou ionizada na atmosfera do arco, reagindo com vapores metálicos e elementos constitutivos da escória (MODENESI, 2016). É importante destacar neste ponto que a escória, como característica de processos com uso de fluxos (SMAW, SAW, FCAW, etc), gera interfaces com o metal fundido, transferindo elementos de liga e cumprindo tarefas de refino metalúrgico, desoxidação, proteção do metal em altas temperaturas, etc (MACHADO, 1996).

Com todo, na polaridade inversa apresentam-se as maiores quantidades de oxigênio no metal de solda para o WW70. Para as soldas feitas no Ar, não tem-se diferenciação com a polaridade como resultado da alta dispersão.

Segundo KIM et al (1990), a diferença no teor de oxigênio é o resultado de reações eletroquímicas e termoquímicas no anodo e catodo. Em DCEP, foi relatado que o teor de

Oxigênio é duas vezes a concentração em polaridade direta: esta conclusão baseia-se na análises química das pontas dos eletrodos e gotas recolhidas. Comparando essas duas últimas, as gotas de metal fundido foram as que exibiram uma maior concentração de oxigênio; isto é resultado de reações termoquímicas que continuam após o destaque da gota e seu desligamento do arame (o qual permitia reações eletroquímicas). A absorção de maiores teores de Oxigênio nas gotas, foi o resultado de sua interação com o ambiente (no caso desse estudo, decomposição de fluxo para o processo SAW).

Deste modo, extrapolando estas análises para o processo de UWW com WW70, é possível supor que a maior concentração de Oxigênio no metal de solda para a configuração da corrente em CC+, seja o resultado de:

- Absorção de ânions de oxigênio na ponta do eletrodo como resultado de reações eletroquímicas.
- Com o destaque da gota, reações termoquímicas são protagonistas e facilitam a captação de oxigênio durante a viagem das gotas pelo plasma (rico em oxigênio).
- Por último, a gota transferida é diluída com o metal fundido da poça de fusão.

Na poça, a absorção de Oxigênio é facilitada pelos maiores tempos de interação com a vizinhança encontrados (MODENESI, 2016). A turbulência existente na poça de fusão cria uma agitação efetiva do metal líquido, superando assim a dificuldade de uma menor área específica de interação na poça, em comparação com a gota.

Deste modo, pode-se tentar explicar a maior penetração presente nas soldas feitas com WW70 na profundidade de 10 m. Assim, se sabe que pequenas diferenças na concentração de elementos tenso-ativos geram mudanças substanciais na tensão superficial do ferro e outros materiais (HEIPLE e ROPER, 1990).

Como relatado por PESSOA (2007) e DIAZ (2012), o efeito Marangoni pode ser um fator determinante na penetração em soldas subaquáticas. Os dois autores utilizaram eletrodos rutilicos e fizeram suposições em função da ausência ou presença de elementos como Oxigênio e Hidrogênio. Eles relatam que a presença de oxigênio promove a redução da tensão superficial e assim, esta variação gera um fluxo radialmente para adentro no metal de solda, resultando em penetrações maiores.

Embora as considerações anteriores sejam convenientes e oportunas na tentativa de justificar os resultados em torno da penetração obtidos com o eletrodo Oxi-rutílico, não tem-se claras evidências da presença da convecção de Marangoni no processo com eletrodo revestido. Deste modo, sempre tem-se estudado este fenômeno no processo GTAW, onde está bem consolidado e amplamente conhecido (KOU et al, 2011) (HEIPLE et al, 1983) (POLLARD, 1988). Porém, não deixa de ser interessante a avaliação dos fatos em comparação com a literatura.

Em relação com o anterior, se evidencia que o formato das soldas feitas com o consumível oxi-rutílico ao ar, apresenta na sua seção transversal com o uso das duas polaridades, uma depressão. Este defeito no cordão corresponde com o formato de “Humping”, apresentado por MILLS e KEENE (1990). Os autores explicam que este fenômeno acontece para aços com altos teores de elementos tenso ativos (como o enxofre) e em altas velocidades. Porém, não é dada nenhuma outra explicação em torno desta característica.

BRADSTREET (1968) experimentou com composições de gás de proteção contendo oxigênio e Argônio na soldagem GMAW. Ele relatou um incremento de humping para acréscimos do nível de oxigênio.

Também PATON et al (1971), desde outro ponto de vista, sugerem que um balanço de pressões existe entre o arco e a poça de fusão em velocidades normais de soldagem. Assim, a pressão do arco incrementa até o ponto que um desequilíbrio forças acrescenta com a corrente e deste modo, os defeitos iniciam. Os autores expõem que as forças de arraste do plasma são suficientes para deslocar a poça de metal fundido abaixo do arco. Por oposição, LIN e EAGAR (1985) concluem que a pressão do arco influencia a geometria da poça de fusão em apenas correntes superiores a 500 A. Mesmo assim, para ROKHLIN e GUU (1993), o início da depressão da poça de fusão acontece nos 200 A; depois deste nível, a depressão da poça depende quase numa função linear com a corrente de soldagem. Mas recentemente CHO et al (2006) simularam a operação dos mecanismos de escoamento de fluidos na poça de fusão em GMAW, observando o acontecimento de *humping* na seção transversal da poça de fusão de área menor e para altas pressões de arco. Por último HU et al (2008) simulam o escoamento de fluidos e a transferência de massa em GMAW, considerando o impacto das gotas de metal de adição, forças eletromagnéticas, força do arco de plasma e o efeito Marangoni. Os autores relatam que as “ondulações” são o resultado do impacto periódico das gotas, a dinâmica da poça de fusão e a solidificação. Assim, supondo que a corrente estabelecida para o uso do consumível WW70



no ar seja sobre estimada (190 A em relação com os valores máximos de corrente para operação fornecidos para consumíveis com 3,25 mm de alma, 150 A; ESAB, 2005), uma combinação entre a força do arco e o alto teor de oxigênio resultariam provavelmente em a depressão no centro do cordão. Contudo, esse formato de “*Humping*” sofre correção com o aumento da profundidade, pelo fato de que é aumentada a constrição do arco devido à pressão hidrostática (MAZZAFERRO, 1998).

Adicionalmente e na tentativa de justificar os resultados obtidos, é cativante comparar a relação entre a rugosidade superficial das soldas feitas com WW70, a sua penetração e os resultados obtidos por BENNET e MILSS (1978). Num primeiro estágio, MILLS e KEENE (1990) relatam que as ondas superficiais das soldas são finas para aços de baixa penetração e grosseiras para aqueles com boa penetração. Neste contexto, de novo BENNET e MILSS (1978) classificam as soldas de 1 até 5 em função da rugosidade superficial, com 1 iniciando na mais ligeira rugosidade. Estes mesmos autores relacionam essa classificação com a razão P/L (Penetração/Largura), defendendo sua postura no fato de que esse critério é o mais utilizado na literatura. Contudo, como conclusão, maiores penetrações apresentam uma rugosidade relativa maior. Assim, é descrito que no caso em que as ondulações estiveram relacionadas com as propriedades superficiais da massa fundida de aço, as ondas grosseiras estariam relacionadas com uma baixa tensão superficial e um coeficiente de temperatura positivo.

Se comparados os reforços dos cordões de solda depositados com o WW70 e o critério P/L, o qual segundo DIAZ (2012): “permite uma visualização mais rápida e macroscópica do comportamento da morfologia do cordão de solda com a profundidade”, é possível evidenciar que valores mais altos de penetração apresentam os cordões de solda mais grosseiros (Figura 4.46). Este fenômeno acontece para as profundidades de 5 e 10 m. Constate-se que no caso de BENNET e MILSS (1978), as soldas foram feitas no processo GTAW e em aço inox de altos teores de Ni e Mn. Assim, a alta rugosidade foi o resultado do teor de Nitrogênio e o nível das inclusões de oxigênio. Contudo, apesar de mostrar-se uma tendência entre a rugosidade e a penetração, não é possível confirmar que os mecanismos que agiram no caso das soldas com aço inox, estejam presentes em soldas molhadas com consumível oxi-rutílico. Também, é importante considerar que a diferença de GTAW, no processo SMAW tem-se transferência de metal de adição e reações entre a escória, a poça de fusão e o plasma (VILANI et al, 2017), o que faz que a geometria resultante seja a conjugação de um maior número de fatores.

Especificamente das ondas dos cordões, também LANCASTER (1993) conclui que um fluxo radialmente para fora pode ser estável, porém, um fluxo radialmente para adentro desenvolve remoinhos, fato que pode explicar as ondas grosseiras.

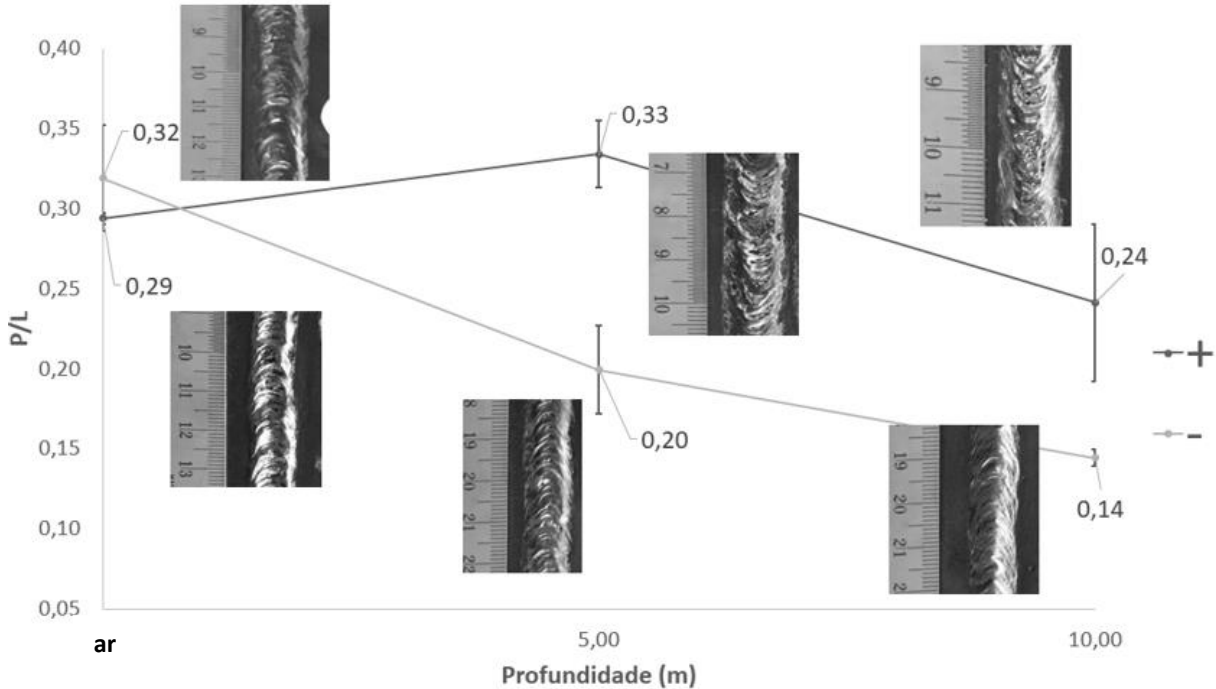


FIGURA 4.46 Razão P/L (Penetração/Largura) para soldas feitas com WW70.

Também, as maiores tensões apresentadas com o uso do eletrodo WW70 podem ser assumidas como resultado do teor de Oxigênio. Com o uso da polaridade inversa, o processo apresenta as maiores tensões para todos os ambientes (ar, 5 m e 10 m). Nesta mesma configuração de polaridade, obtém-se sempre as maiores quantidades de Oxigênio no metal de solda.

Desde o ponto de vista da física da soldagem e considerando a coluna de plasma, nas altas temperaturas atingidas no arco elétrico, a dissociação da molécula de água pode acontecer facilmente. Deste modo, gases diatômicos simples são resultantes destas reações. O Oxigênio é um deles. Assim, para este tipo de gás molecular, energia é necessária para ionizar os átomos do mesmo (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Desta forma, plasma contendo Oxigênio, o qual é um elemento de alta energia de ionização (WELDING HANDBOOK, 2001), poderia resultar em maiores tensões de operação. Além disso, maiores energias de ionização resultam em menor estabilidade e menor facilidade de abertura de arco (MODENESI, 2017). A estabilidade do arco por sua parte (avaliada com o uso de  $K_v$  e as técnicas gráficas), foi menor para 10 m com o uso da polaridade inversa (onde tem-se o mais alto teor de Oxigênio).

Tudo o anterior é apenas uma simples suposição, pelo fato que no processo de eletrodo revestido, tem-se os gases e escórias provenientes da decomposição do revestimento, gerando assim uma atmosfera protetora rica de elementos desse sistema de soldagem (Revestimento, alma do eletrodo, metal base, arco elétrico, superfície do metal base e eletrodo) (FELIZARDO, 2003). Ainda mais, interações físicas e químicas entre o metal fundido e o ambiente ao redor, tem no processo UWW, todas as condições necessárias para o seu desenvolvimento. O anterior, dificulta além de tudo, a compreensão dos fenômenos que definem a tensão do processo e deixa em evidencia, a grande quantidade de fatores envolvidos no processo. Por este motivo, não é possível garantir que a maior presença de oxigênio no metal de solda seja o fator que determina as maiores tensões em polaridade inversa. Porém, possibilita a hipóteses. Também, as altas tensões gerarem transferência do tipo globular, o qual é refletido nos resultados obtidos.

Para o consumível rutilico, por sua parte, somente as soldas feitas ao ar mostram uma diferenciação no teor de oxigênio com a polaridade (Figura 4.47). Assim, os valores de Oxigênio no metal de solda para as profundidades de 5 e 10 m, estão dentro da dispersão. Em comparação com os limites superior e inferior da literatura (SANTOS et al, 2012) (1100 ppm e 920 ppm, respetivamente), o teor de oxigênio no metal de solda desta pesquisa é maior e provavelmente está em funcao da profundidade (IBARRA et al, 1994). Assim, não é atingido o limite de saturação do oxigênio no ferro líquido, e isto sugire um efeito de desoxidação maior, como resultado de um revestimento com alto teor de ferro – silício e ferro – manganês (Tabela 3.4) (GRUBBS et al, 1996).

De novo, o modelo de KIM et al (1990), fornece uma possível explicação para a diferença notável do teor de Oxigênio com a polaridade ao ar. Deste modo, na polaridade inversa, tem-se presença de transferência globular, o que permitiria um maior tempo da gota crescendo na ponta para a interação com a vizinhança (em comparação com a transferência por curto-circuito) e a absorção do oxigênio; logo, a gota seria transferida para a poça.

Contudo, pode-se relatar que a natureza do revestimento define as características finais do metal de solda (morfologia, composicao quimica, etc) e também, define a estabilidade e características operacionais do processo.

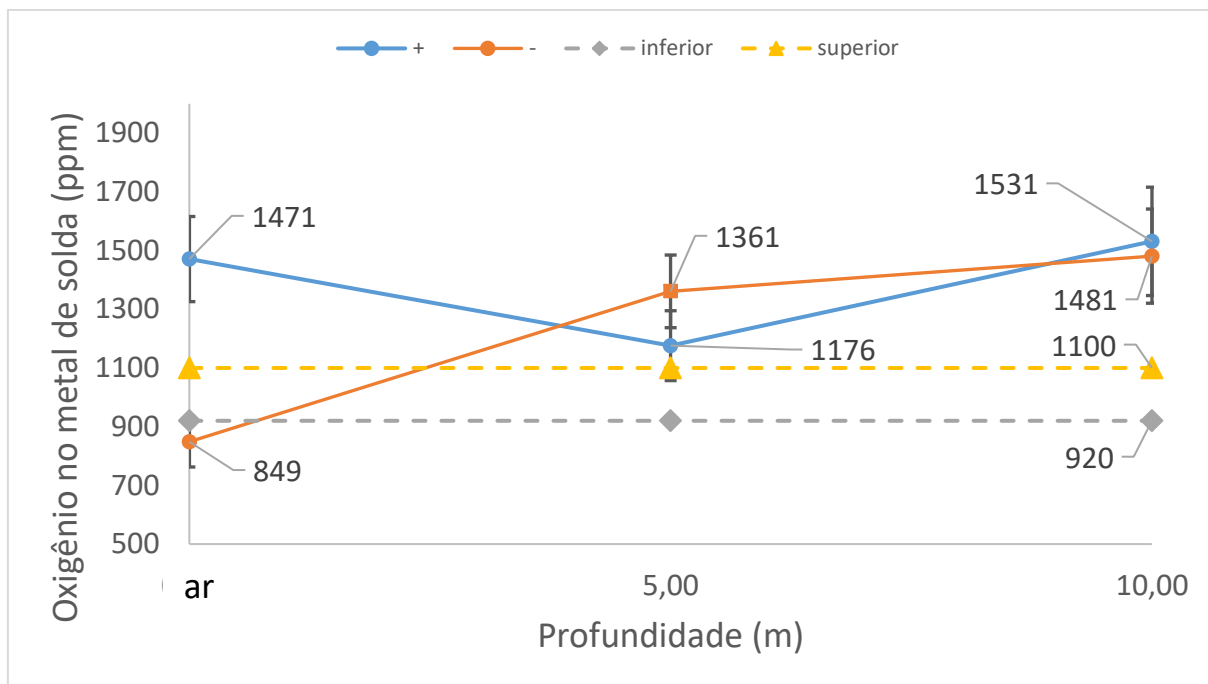


FIGURA 4.47 Teor de Oxigênio no metal de solda em função da Polaridade e profundidade para E6013.

#### 4.5.2 Determinação do teor de Hidrogênio Difusível no metal de solda

A Figura 4.48 apresenta a relação entre o Hidrogênio Difusível e a polaridade para cada um dos consumíveis utilizados no estudo. Os testes foram desenvolvidos na profundidade conhecida como lâmina de água (0,3 m). Assim, é evidenciado que para o eletrodo E6013, apresentam-se os maiores teores de hidrogênio difusível e sem diferenciação com a polaridade. Ao ar, é relatado um teor de Hidrogênio difusível entre 15 e 30 ml/ 100 g (ESAB, 2005) para este consumível. Contudo, o teor apresentado nesta pesquisa para o E6013 era o esperado (POPE e LIU, 1996). Também, evidencia-se claramente a diferença no teor de hidrogênio difusível entre os eletrodos Oxi-rutílicos e o rutilico. Desta forma, é interessante trazer em consideração que os eletrodos rutilicos apresentam altos teores de hidrogênio difusível, e baixas concentrações de Oxigênio no metal de solda. Por sua parte, os eletrodos de natureza oxidante, alto teor de oxigênio e menores concentrações de hidrogênio difusível (como já relatado na literatura). O argumento fornecido por POPE e LIU (1996), baseia-se em STALKER (1977), quem expõe que a alta quantidade de oxigênio na atmosfera do arco de eletrodos oxidantes (neste caso o WW70), promove a oxidação de hidrogênio em vapor, o que resulta em menor absorção deste último elemento no metal de solda. Esta última conclusão poderia tentar sustentar as maiores tensões apresentadas com o WW70: maiores tensões como resultado de maior oxigênio na atmosfera do eletrodo oxi-rutílico.

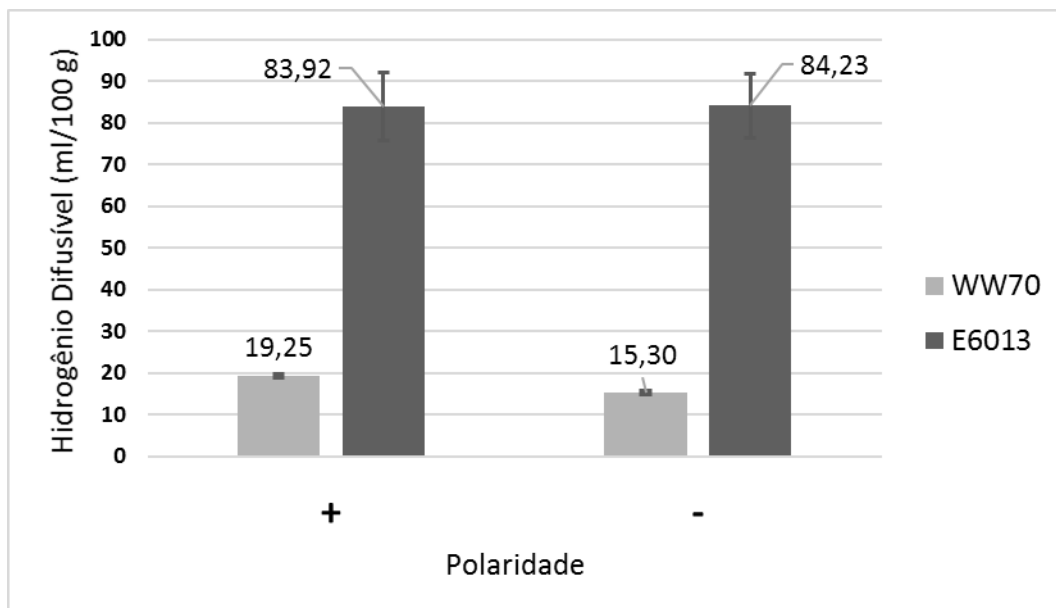


FIGURA 4.48 Teor de Hidrogênio Difusível no metal de solda em função da Polaridade e o tipo de consumível. Soldas feitas em Lamina d'água (0,3 m).

POPE e LIU (1996) também estabelecem comparações entre os tipos de revestimento. Para os eletrodos oxidantes, a decomposição de Hematita resulta em FeO e Oxigênio; deste modo, a reação de sílica com FeO gera uma escória de Faialita, a qual estabiliza a superfície da camada de FeO, quem representa o mecanismo responsável da menor absorção de Hidrogênio no metal de solda.

Por outro lado, o revestimento tipo rutilico gera uma escória rica em  $TiO_2$ , a qual destrói a camada superficial de óxido de ferro, pela dissolução deste último na primeira. Além disso, a presença de elementos de liga como o Mn e o Si, impedem a formação da monocamada de FeO. Assim, se conclui que os revestimentos e as soldas com altos teores de desoxidantes, fornecem altas quantidades de Hidrogênio Difusível.

Os autores também consideram que um alto teor de oxigênio é absorvido na ponta do eletrodo. Isto pode-se relacionar com o modelo de KIM et al (1990). O esquema da Figura 4.49 tenta resumir as considerações anteriores:

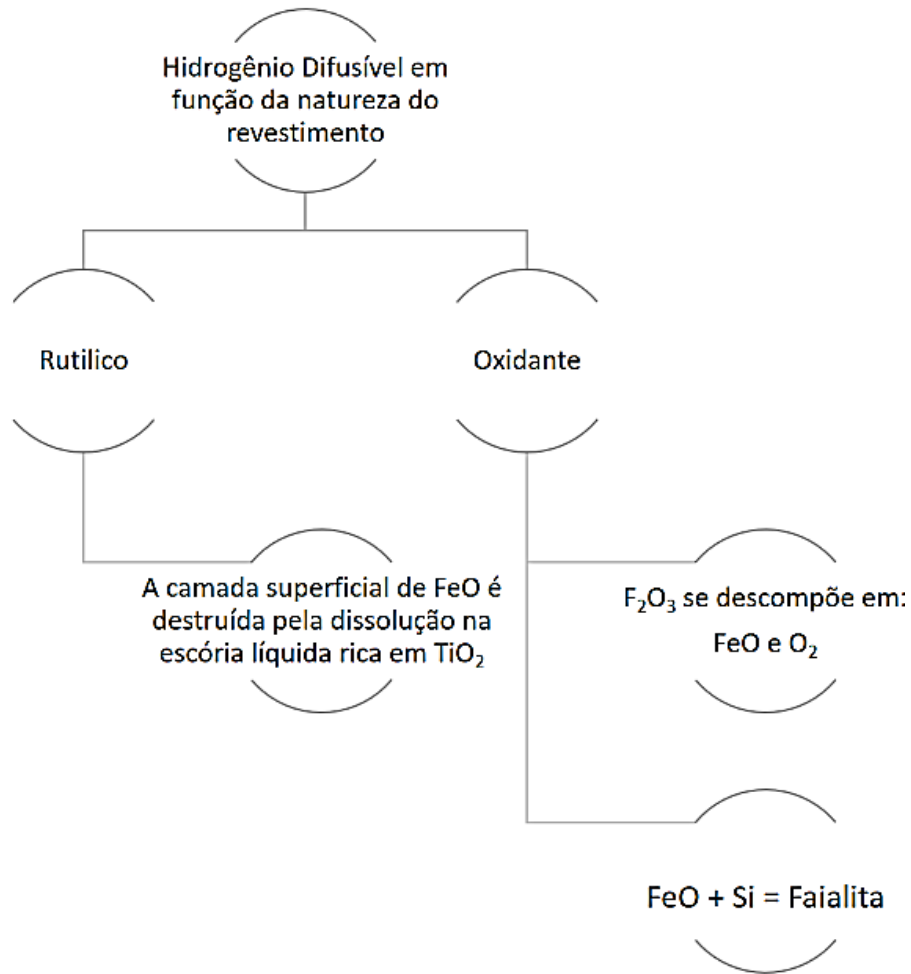


FIGURA 4.49 Mecanismos que explicam o Hidrogênio difusível.

Em relação com a polaridade, MEDEIROS e LIU (1998) propõem um modelo eletroquímico que explica a absorção de hidrogênio no metal de solda com eletrodos oxidantes. Em função do relatado, o eletrodo WW70 se comporta como esperado, apresentado uma maior quantidade de Hidrogênio difusível na polaridade inversa (DCEP). Por sua parte, em DCEN tem-se o menor teor de Hidrogênio Difusível no metal de solda.

Segundo MEDEIROS e LIU (1998), para DCEN, a interface escória/gota metálica é o sitio de reação importante na absorção de hidrogênio no metal de solda. Por oposição, a interface poça de fusão/escória poderia ser o sitio importante onde a reação de absorção de hidrogênio no metal de solda, acontece para DCEP.

Os autores justificam a absorção de hidrogênio na ponta do consumível como consequência das mais baixas temperaturas do eléctrodo encontradas na soldagem em

CC-. Isto, gera uma reação mais lenta na interface ambiente/escória, resultando nos menores teores de Hidrogênio já comentados.

Neste ponto em particular, MEDEIROS e LIU (1998) não especificam se a conclusão das menores temperaturas no eletrodo em DCEN obedece o modelo de distribuição de calor de TSAI e MASUBUCHI (1977) para UWW, ou simplesmente adotaram o amplamente conhecido modelo do efeito do tipo de corrente e polaridade na soldagem GTAW (VILANI et al, 2017). Contudo e como discutido no modelo do balanço térmico de MODENESI (2017), se sabe que em CC- a maior parte do calor é gerada no eletrodo e assim, podem-se esperar maiores taxas de fusão do consumível.

#### **4.5.3 Determinação de fases por Difração de Raios X**

A análises de difração de Raios X forneceu também informação relevante em relação com o Hidrogênio difusível. Adicionalmente, estes estudos reafirmam o modelo eletroquímico de MEDEIROS e LIU (1998) e avaliam as habilidades dos elementos desoxidantes relatadas por POPE e LIU (1994) (1996).

Na Figura 4.50 é apresentado o difratograma de Raios X de uma escória da solda feita com eletrodo rutilico, polaridade Inversa e na profundidade simulada de 10 m. O software encarregado da análises do ensaio, estabelece proporções entre as fases presentes, os picos característicos de cada fase e as suas respectivas intensidades: deste modo, estipula uma avaliação quantitativa das estruturas e sua presença na amostra. Assim, é possível observar que para este primeiro difratograma, tem-se fases em que reagiram o Ferro, oxigênio e o Titânio (fase resultante de um revestimento rutilico) e o aparecimento de uma fase com Manganês. Esta última esperada como resultado da ação dos elementos desoxidantes, os quais podem estar no metal base, no arame, no revestimento, etc. Por último, uma fase conhecida como formador de escória: Ilmenita (KAMALA et al, 2006).

Este comportamento mantém-se para as duas polaridades e muda em pequenas proporções.

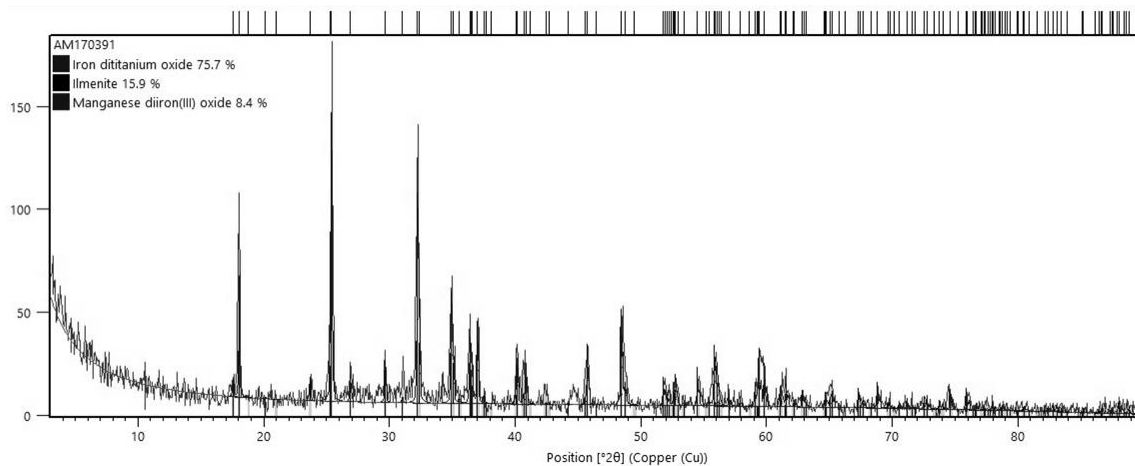


FIGURA 4.50 . Difratoograma de Raios X da escória resultante de E6013 em DCEP à 10 m.

O comportamento mais interessante aconteceu para os eletrodos Oxi-rútílicos. As Figuras 4.51 e 4.52 apresentam os difratograma de Raios X deste consumível na profundidade de 10 m, para DCEN e DCEP.

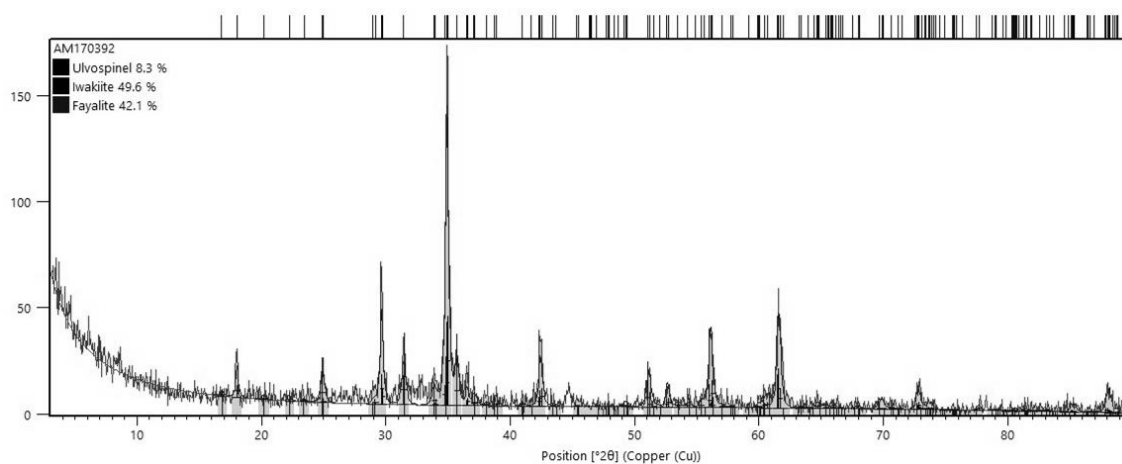


FIGURA 4.51. Difratoograma de Raios X da escória resultante de WW70 em DCEN à 10 m.

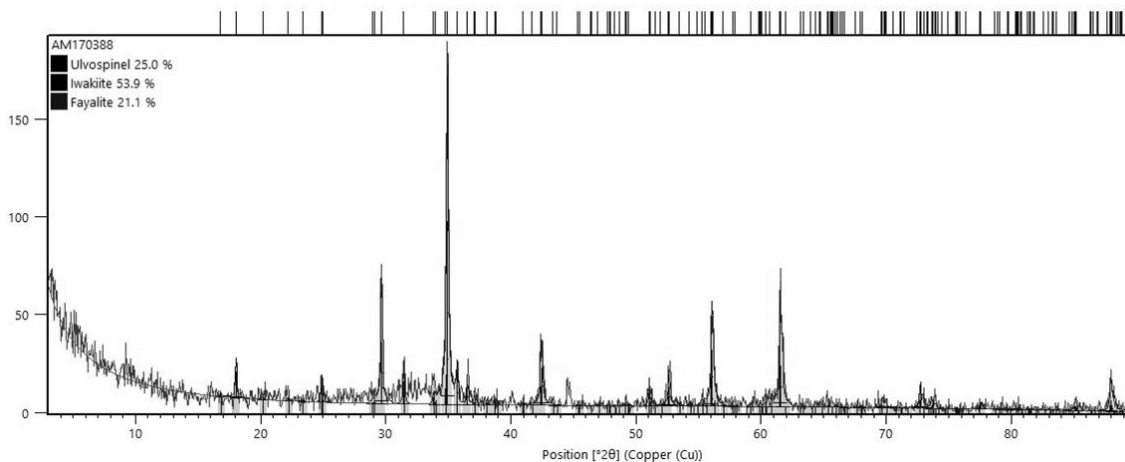


FIGURA 4.52. Difratoograma de Raios X da escória resultante de WW70 em DCEP à 10 m.



As fases de Ulvospinel presentes nos dois difratograma são reações de  $\text{Fe}_{16.74}\text{Ti}_{7.26}\text{O}_{32}$ . Este resultado é esperado uma vez que o WW70 tem um teor aproximado de entre 5 à 25 % de rutila. Do mesmo modo, Iwakite de fórmula química  $\text{Mn}_{6.4}\text{Fe}_{4.80}\text{O}_{16}$  pode ser o resultado de reações químicas com um elemento desoxidante: Mn. Estas duas fases se encontram em diferentes proporções na escória das soldas com o consumível oxi-rutílico. Porém, MEDEIROS e LIU (1998) relataram que o teor de hidrogênio difusível no metal de solda e na escória são dependentes da fase presente na escória. Assim, eles relacionaram os menores teores de Hidrogênio difusível com a presença de Faialita.

Neste ponto, pode-se tentar associar o maior porcentagem em fase da Faialita com a menor quantidade de Hidrogênio difusível, como apresentado na Figura 4.52.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados e discussões apresentadas, neste trabalho tem-se como principais conclusões:

1. Como relatado por Tsai e Masubuchi (1977), nas soldas feitas com o eletrodo E6013 embaixo da água, acontece uma inversão na morfologia do cordão: resultando em maiores valores de penetração em polaridade direta (DCEN). Também, a taxa de fusão do eletrodo apresenta-se maior na configuração DCEP em 10 m de profundidade, o qual é contrário dos resultados obtidos em soldas convencionais ao Ar.
2. Para o consumível rutílico na polaridade Inversa (DCEP), a morfologia do cordão de solda subaquática é mais sensível com a profundidade, em comparação com DCEN. Também à 10 m de profundidade o reforço e a largura exibem o mesmo valor sem diferenciação com a polaridade.
3. Em contradição com o modelo de Tsai e Masubuchi (1977), as soldas com o eletrodo WW70 apresentam maior penetração em polaridade inversa (DCEP), em todos os ambientes do estudo (No ar e embaixo da água). Além disso, a taxa de fusão de este eletrodo é sempre maior em CC+ para todas as profundidades (5 e 10 m).
4. Para os dois consumíveis se observa o claro efeito da pressão hidrostática sob o processo, evidenciando-se uma diminuição da penetração com o aumento da profundidade.
5. Com o eletrodo E6013, a polaridade direta (DCEN) apresenta ocorrência de curtos-circuitos, e estes aumentam com a profundidade. Este fato se reflete na queda de tensão média do processo desde as soldas feitas ao ar até aquelas embaixo da água. Assim, a maior instabilidade deste consumível se exibe com o uso do eletrodo ligado no polo negativo. Em polaridade inversa (DCEP), por sua parte, o eletrodo rutílico apresenta-se mais estável, porém, a transferência de metal de adição é do tipo Globular.

6. O eletrodo oxi-rutílico mostra transferência do tipo Globular nas duas polaridades. Também, maiores tensões na polaridade inversa para todas as condições do estudo. Adicionalmente, em 10 m de profundidade, o processo de soldagem com o uso do WW70 e polaridade inversa é mais instável.
7. Especificamente para as soldas feitas ao ar, o processo apresenta-se mais instável em polaridade direta (DCEN) sem diferenciação com a natureza do revestimento. O anterior foi justificado desde o ponto de vista da emissão de elétrons em cátodos não refratários.
8. Na profundidade simulada de 5 m e como relatado por Nixon e Graham (1993), o processo apresenta os mesmos níveis de instabilidade para ambos consumíveis e as duas polaridades; assim, este fato é refletido nas sinais e na morfologia dos cordões.
9. O índice de Madatov exhibe uma limitada capacidade de avaliação da estabilidade no processo UWW.
10. Com o incremento da profundidade (de 5 a 10 m), a quantidade de defeitos como mordeduras e respingos diminui para o uso do eletrodo E6013, apresentando-se uma melhora na geometria do cordão de solda.
11. Por sua parte, as soldas realizadas com WW70, foram as que apresentaram os piores resultados em termos do aspecto visível da deposição. No Ar, porosidade superficial e inclusões de escória apresentam-se para as duas polaridades. O anterior é justificado pelo fato que este consumível somente foi desenvolvido para soldagem subaquática. Também, com o acréscimo da profundidade, a aparência superficial melhora. Por último, na profundidade de 10 m em DCEN, apresentam-se os melhores cordões.
12. O teor de oxigênio no metal de solda é sempre maior na polaridade inversa (para o WW70 em 5 e 10 m e também, para o E6013 no ar). O anterior é justificado pela dinâmica das reações eletroquímicas e termoquímicas que acontecem na ponta fundida do eletrodo e na gota em destacamento em CC+.

13. As maiores concentrações de Oxigênio em DCEP poderiam provavelmente justificar a maior penetração exibida nesta polaridade para todas as condições de estudo com o WW70.
14. Hipoteticamente, para o uso do WW70, as maiores tensões médias de operação apresentadas pelo consumível oxi-rutílico em CC+ são o resultado da maior presença de Oxigênio nesta polaridade.
15. Para o eletrodo E6013, somente nas soldas feitas no Ar tem-se uma marcada diferenciação no teor de oxigênio com a polaridade. O comportamento anterior é justificado pelo modelo de KIM et al (1990).
16. Como relatado na literatura, eletrodos oxi-rutílicos apresentam menores teores de Hidrogênio Difusível em comparação com eletrodos rutílicos. Além disso, em DCEP a quantidade de Hidrogênio Difusível no metal de solda é maior em comparação com DCEN para o uso do WW70. A concentração de Hidrogênio Difusível com o eletrodo E6013 não tem diferenciação com a polaridade.
17. Como apresentado por POPE e LIU (1996), eletrodos rutilicos apresentam deposições com altos teores de Hidrogênio Difusível e baixas concentrações de oxigênio no metal de solda. O WW70, apresenta o comportamento contrário.
18. Como comentado por Medeiros e Liu (1998), tem-se uma relação entre a fase presente na escória e a quantidade de Hidrogênio Difusível no metal de solda. Assim, maior porcentagem de Faialita na escória resulta em menores teores de Hidrogênio Difusível no metal de solda. DCEN apresenta os menores teores de  $H_{DIF}$ .
19. O eletrodo E6013 não apresenta tendências nas análises químicas ou resultados, os quais permitam inferir uma justificativa em relação com a inversão da penetração em presença da água.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Propõe-se para trabalhos futuros:

1. Estudos complementários com o uso de eletrodos oxidantes que forneçam um melhor entendimento dos fenômenos de absorção de Hidrogênio Difusível e/ou oxigênio no metal de solda.
2. Avaliar a ponta dos eletrodos mediante uma metodologia que permita garantir regiões nas quais o processo de soldagem esteja sob regime quase estável.
3. Relacionar o nível de porosidade das soldas feitas em UWW e a estabilidade do processo.
4. Pesquisar a influência da polaridade sob a microestrutura resultante de soldas subaquáticas molhadas com o uso de E6013 e WW70.
5. Avaliar a relação entre trincas na secão longitudinal do cordao e os níveis de Hidrogênio Difusível e/ou oxigênio no metal de solda.

## APÊNDICE I

A tabela I apresenta as características que foram mantidas constantes durante o estudo.

Tabela I. Configuração do equipamento

$I_{cc}$ – Corrente de Curto-Circuito	190 A (E6013) / 210 A (WW70)
$U_{cc}$ – Tensão abaixo da qual se considera Curto-Circuito	5 V
$I_{ab}$ – Corrente de abertura de arco	450 A
$t_m$ - Tempo morto	5,9 ms

Assim, a corrente de abertura de arco ( $I_{ab}$ ) é estabelecida no início do processo de soldagem, mantendo-se neste nível até passar para o valor de corrente ajustado ou corrente de operação ( $I_s$ ). A Figura I exhibe o comportamento anteriormente descrito.

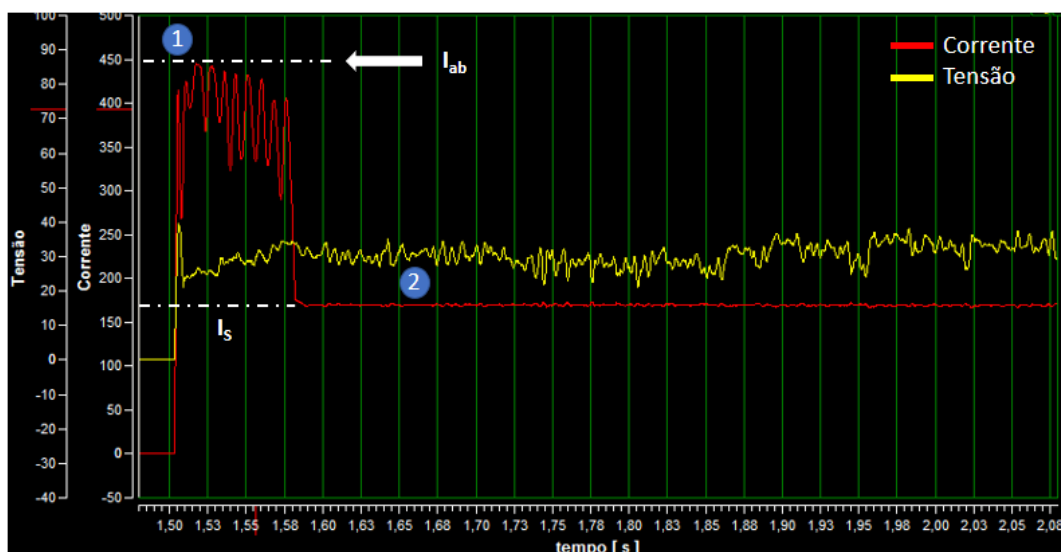


FIGURA I. Início do processo de soldagem. 1. Estabelecimento da corrente de abertura de arco ( $I_{ab}$ ); 2. Adopção da Corrente de Operação ( $I_s$ ). Interface do SAP V4.

As demais características da fonte são apresentadas na Figura II. Deste modo, o princípio de controle do equipamento baseia-se no reconhecimento das extinções do arco: assim, sempre que a corrente de soldagem estiver abaixo de 20 A é considerado arco extinto (situação na qual a tensão fica em vazio e a corrente vai a zero) (RAUL GOHR, 2017). Porém, é possível ajustar os parâmetros da fonte com o objetivo de obter um melhor controle. Em vista disto, durante a solda, se a tensão atinge um valor inferior a  $U_{cc}$ , por um tempo maior que  $t_m$ ,

será aplicada a corrente  $I_{CC}$  (situação que é considerada como o acontecimento de curto-circuito), até o restabelecimento do arco.

No exemplo embaixo, a corrente de operação (IS) é de 170 A,  $I_{CC} = 190$  A,  $U_{CC} = 5$  V e  $t_m = 5,9$  ms. É possível perceber como em a ocorrência de curto e para um  $t_m \geq 5,9$  ms, a fonte aplica  $I_{CC}$ .

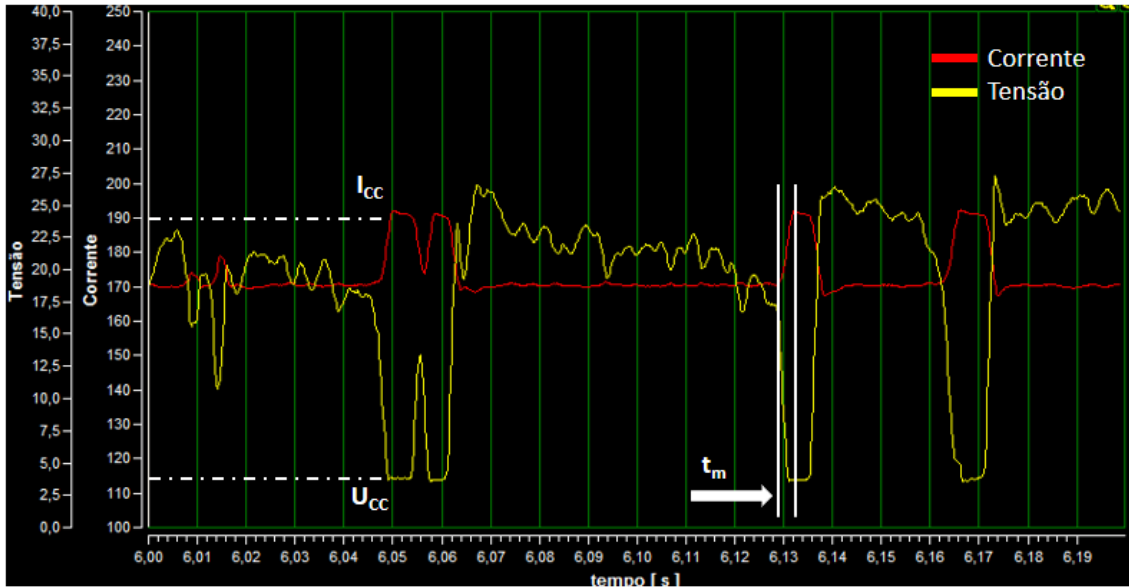


FIGURA II. Controle da Fonte na ocorrência de Curto-Circuito;  $I_{CC}$  – Corrente de Curto-Circuito,  $U_{CC}$  – Tensão abaixo da qual se considera Curto-Circuito,  $t_m$  - Tempo morto. Interface do SAP V4.

## APÊNDICE II

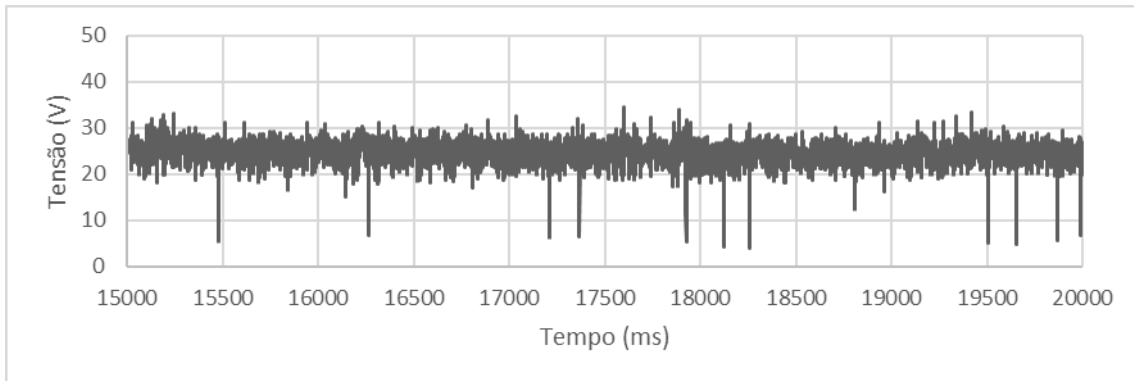


FIGURA III. Oscilograma de Tensão para E6013 em DCEP ao ar.

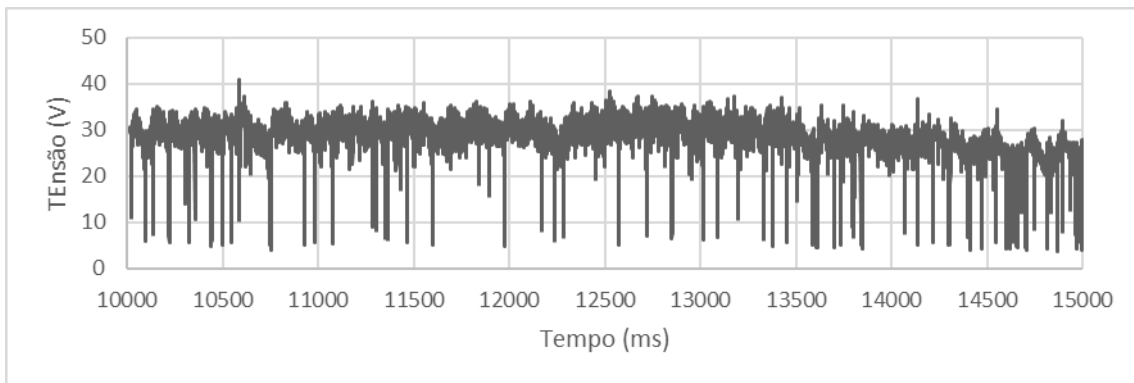


FIGURA IV. Oscilograma de Tensão para E6013 em DCEN ao ar.

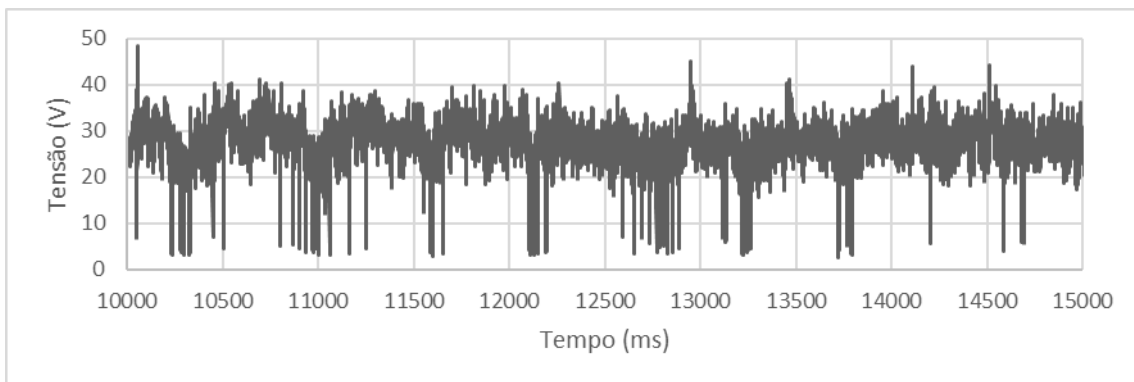


FIGURA V. Oscilograma de Tensão para E6013 em DCEP em 5 m.



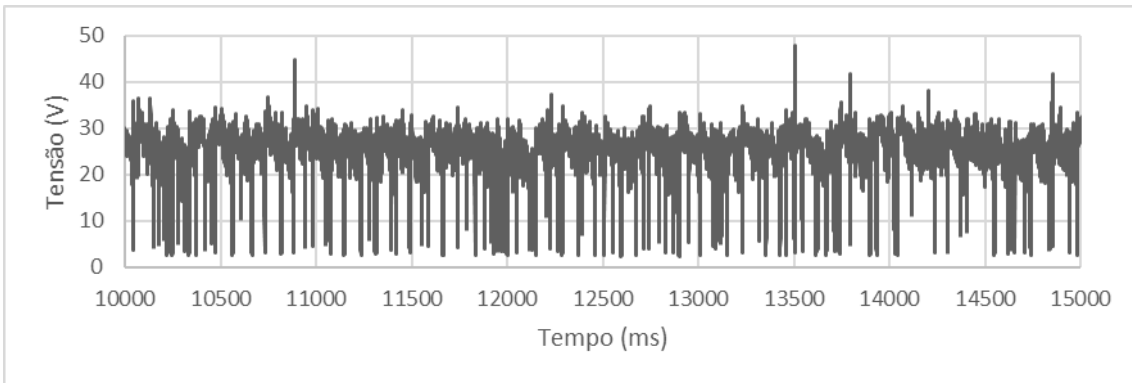


FIGURA VI. Oscilograma de Tensão para E6013 em DCEN em 5 m.

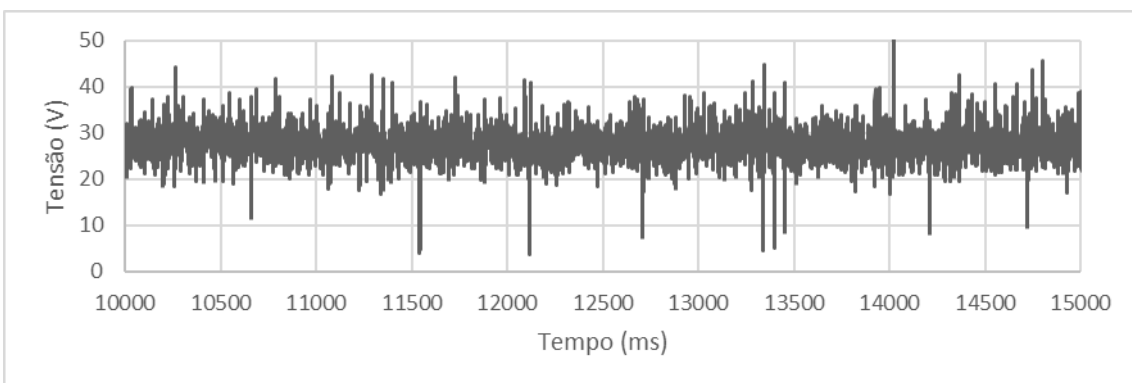


FIGURA VII. Oscilograma de Tensão para E6013 em DCEP em 10 m.

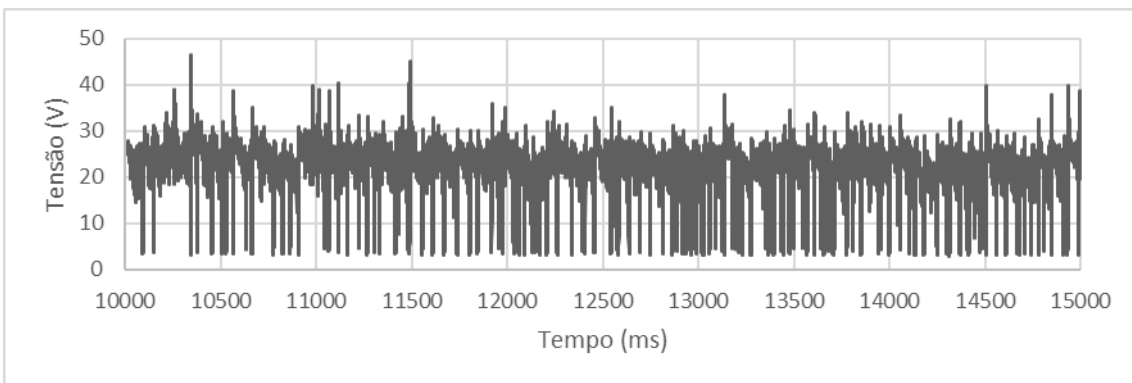


FIGURA VIII. Oscilograma de Tensão para E6013 em DCEN em 10 m.

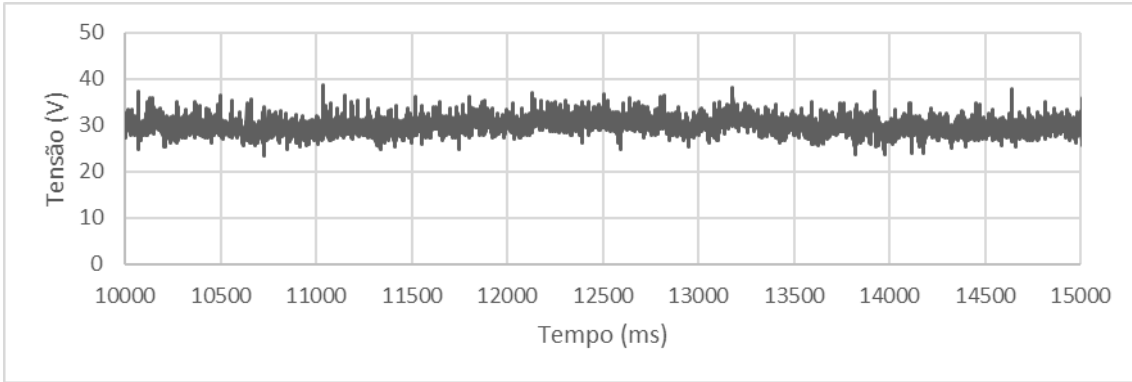


FIGURA IX. Oscilograma de Tensão para WW70 em DCEP ao ar.

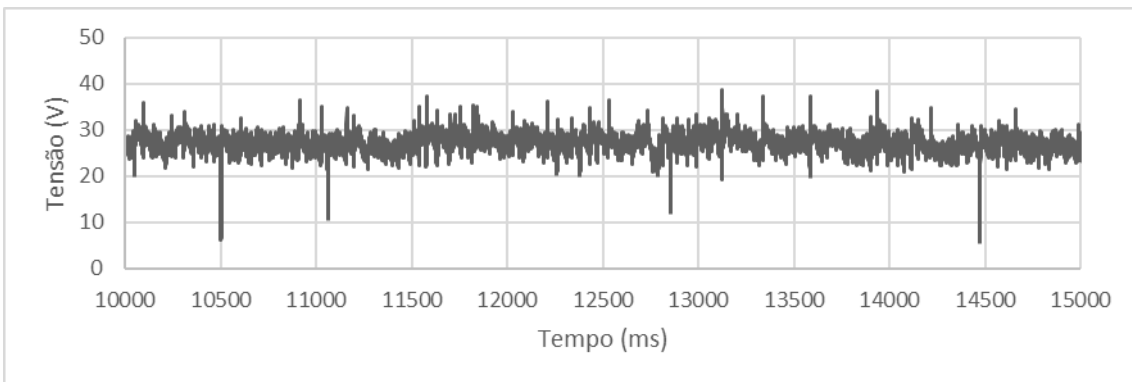


FIGURA X. Oscilograma de Tensão para WW70 em DCEN ao ar.

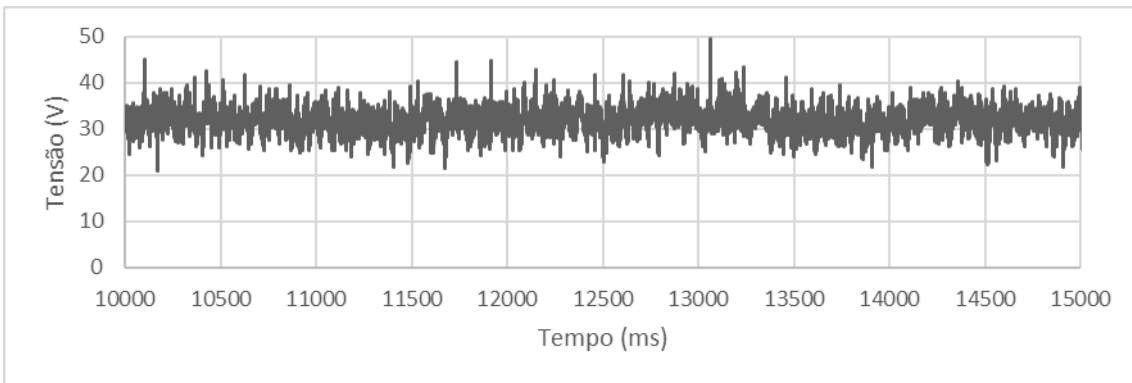


FIGURA XI. Oscilograma de Tensão para WW70 em DCEP em 5 m.

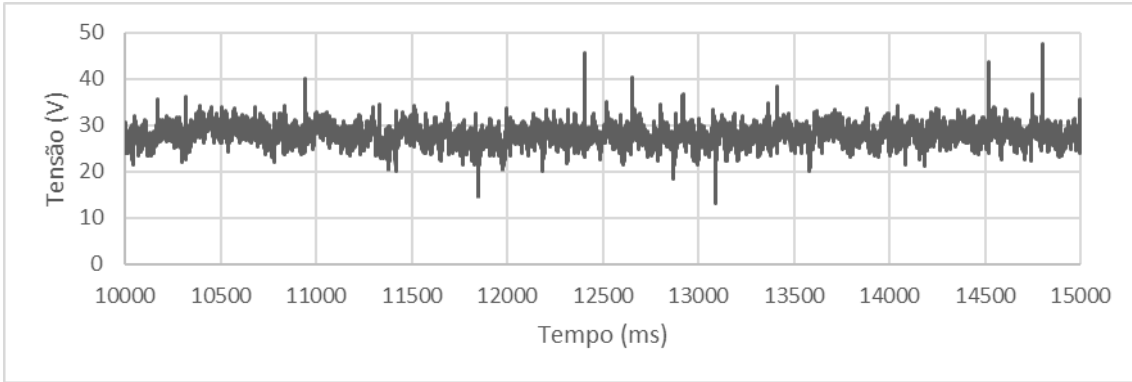


FIGURA XII. Oscilograma de Tensão para WW70 em DCEN em 5 m.

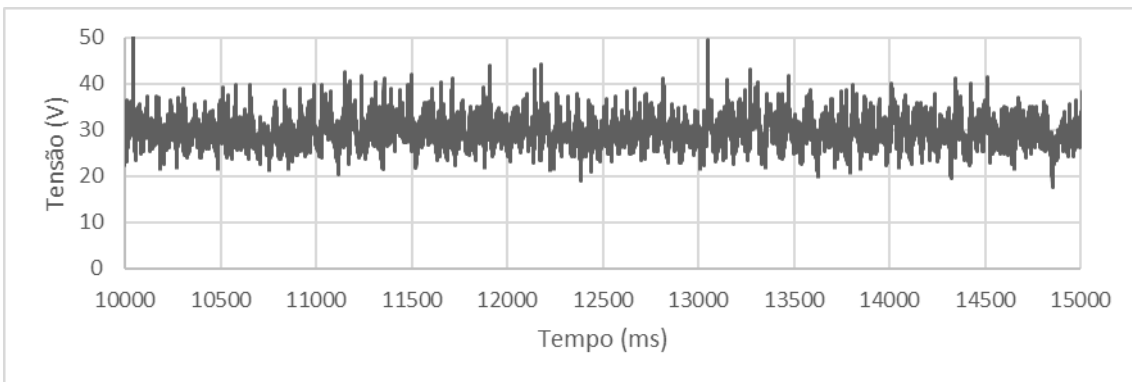


FIGURA XIII. Oscilograma de Tensão para WW70 em DCEP em 10 m.

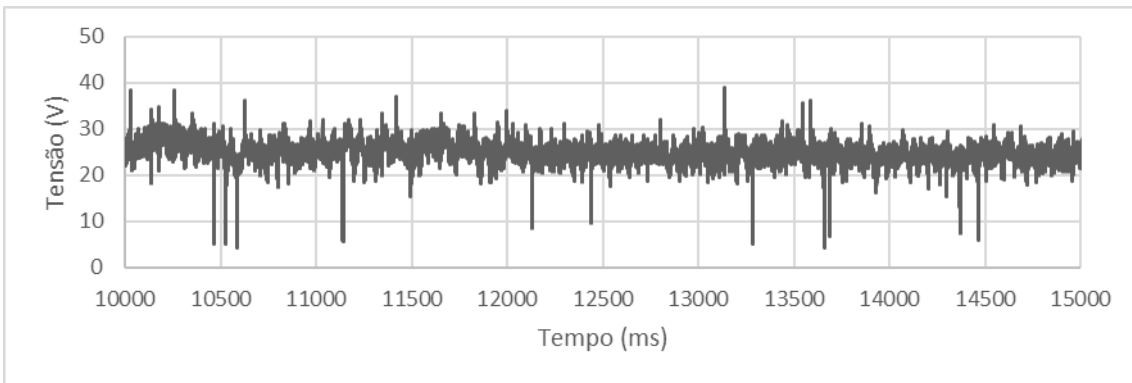
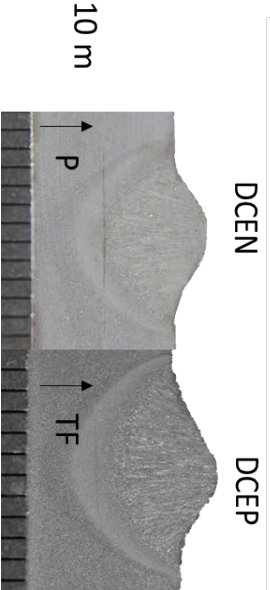
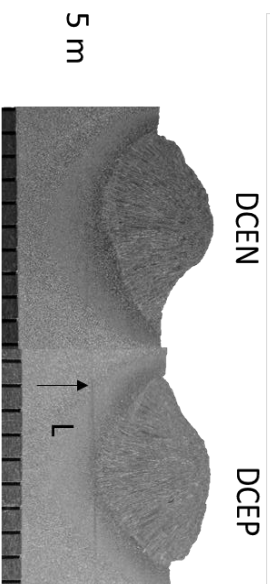
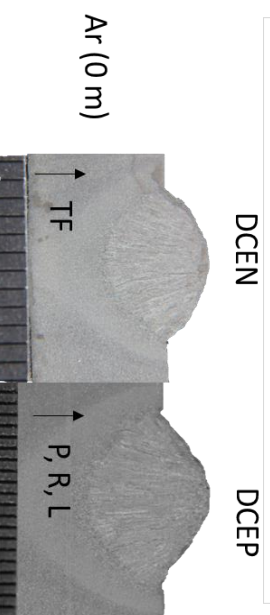
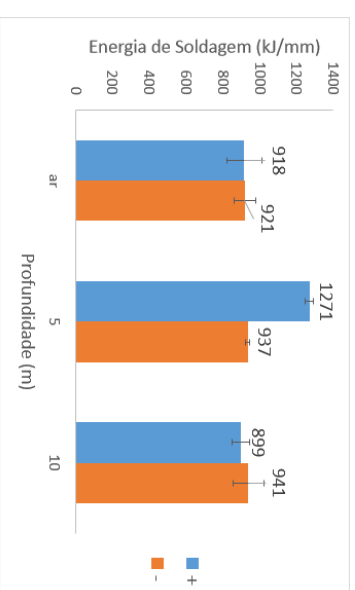
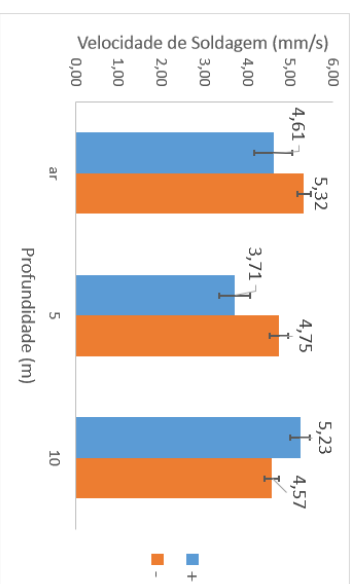
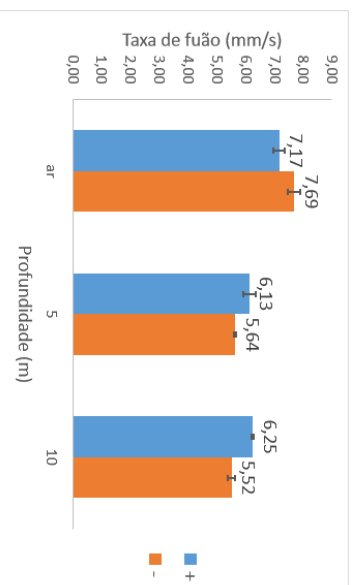
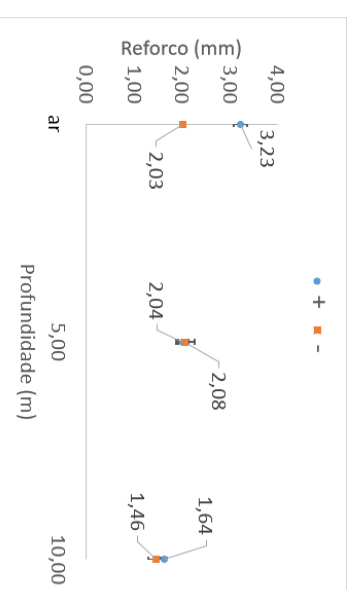
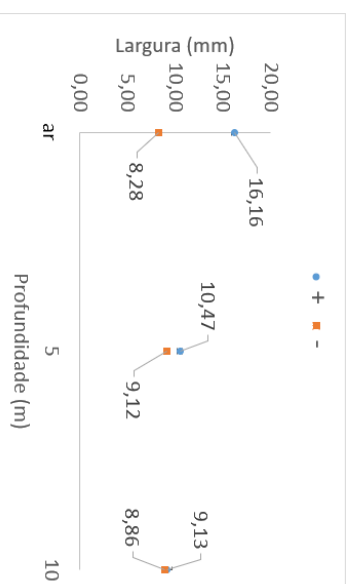
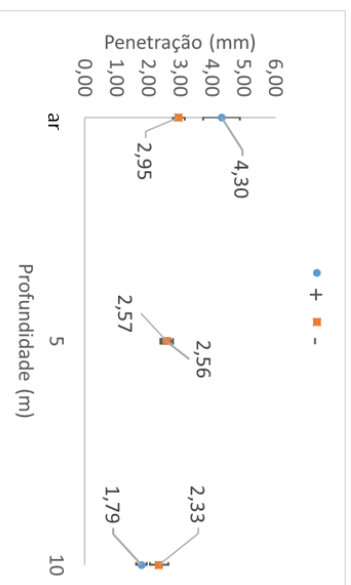


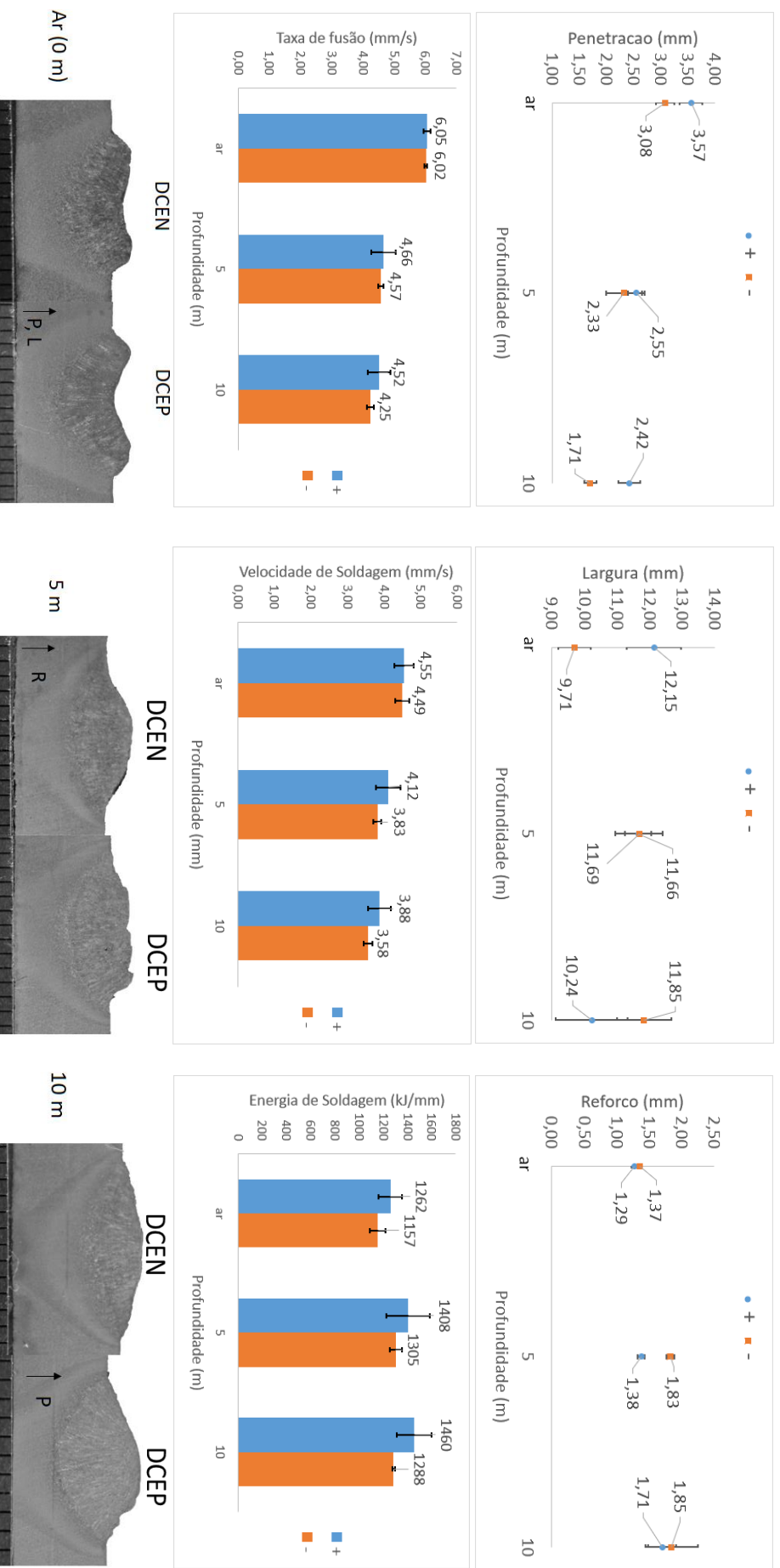
FIGURA XIV. Oscilograma de Tensão para WW70 em DCEN em 10 m.

### APÊNDICE III

#### Resumo gráfico da morfologia do cordão de solda e parâmetros gerais do processo para o eletrodo E6013



## Resumo gráfico da morfologia do cordão de solda e parâmetros gerais do processo para o eletrodo WW70



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIDUN, D. K., MARTIN, S. A. Effect of Sulfur and Oxygen on Weld Penetration of High-Purity Austenitic Stainless Steels, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 6, N° 4, 1997.
- ANDO, S., ASAHANI, T. A. Study on the Metallurgical Properties of Steel Welds with Underwater Gravity Welding. *Underwater Welding: Proceedings of the International Conference held at Trondheim, Norway. International Institute of Welding*, 1983.
- ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook: Welding, Brazing and Soldering, Volume VI*, EUA, 1993.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. *Specification for Underwater Welding, ANSI/AWS D3.6M*, EUA, 1999
- BAUNÉ, E., BONNET, C., LIU, S., Assessing metal transfer stability and spatter severity in flux cored arc welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 6 N° 3, 2001.
- BENNETT, W. S., AND MILLS, C. S. GTA weldability studies on high manganese stainless steel. *Welding journal*, Vol. 53 N° 12, 1974.
- Bradstreet, B. J. Effect of surface tension and metal flow on weld bead formation. *Welding Journal*, Vol. 47, N° 7, 1968.
- BRANDI, S., TANIGUCHI, C. e LIU, S. 1991. Analysis of Metal Transfer in Shielded Metal Arc Welding, *Welding Journal*, Vol. 70, N° 10, 1991.
- CHO, M. H., LIM, C. Y., FARSON, D. F. Simulation of Weld Pool Dynamics in the Stationary Pulsed Gas Metal Arc Welding Process and Final Weld Shape, *Welding Journal*, Vol. Dezembro, 2006.
- DIAS, W. C., Efeito Da Profundidade De Soldagem Sobre O Hidrogênio Difusível Das Soldas Molhadas, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, Tese, 2012.
- DUTRA, J. C., MIG/MAG – Transferência Metálica por Curto-Circuito – Fontes de Soldagem versus Gases do Arco, *Soldagem & Inspeção*, Vol. 13, N° 1, 2008.
- FELIZARDO, I., Estudo Experimental e Numérico do Aquecimento de Eletrodos Revestidos durante a Soldagem, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, Tese, 2003.
- FORTES, C., Apostilla de Eletrodos Revestidos, ESAB Brasil, 2005.
- FILHO, A. L., Análise Da Influência Dos Parâmetros Do Processo De Soldagem Com Eletrodos Revestidos Na Estabilidade Do Arco E Características Geométricas Do Cordão, Universidade Federal De Itajubá, Brasil, Tese, 2005.

GAO, W. B., WANG, D., CHENG, F., DENG, C., Xu, W. Underwater Wet Welding for HSLA Steels: Chemical Composition, Defects, Microstructures, and Mechanical Properties, Acta Metallurgica Sinica, Vol. 28, 2015.

GOHR, R. J., Assistência Técnica Fonte para soldagem submarina HipEr-1. IMC SOLDAGEM, 2017

GOOCH, T. G. Properties of Underwater Welds. Part 1. Procedures Trials. Metal Construction, pp.164-167, vol.8, March, England, 1983.

GRUBBS, C. E., SETH, O. W. Underwater Wet Welding With Manual Arc Electrodes, ASCE National Water Resources and Ocean Engineering Convention, San Diego CA, 1976.

GRUBBS, C. E., BERTELMANN, A. E., IBARRA, S., LIU, S., MARSHALL, D. J., OLSON, D. L. Welding Handbook Material and Applications. Part 1. Eighth Edition, Vol. 3. American Welding Society. Miami: 446-500, 1996.

GUERRERO, F. P. Effect of nickel additions on rutile electrodes for underwater welding. Dissertação de mestrado – Metallurgical and Materials Engineering Department, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, EUA, 84f , 2002.

GUILE, A. E. Studies in short electric arcs, Welding in the world, Vol. 8, N° 1, 1970.

HEIPLE, C. R., BURGARDT, P., , Welding Journal, Vol. 64, 1985

HEIPLE, C. R., ROPER, J. R., Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry, Welding Journal, Vol. 61, N° 4, 1982.

HOLDSWORTH, R. D., Underwater Welding Techniques & Technologies, IEE, 1986.

HU, J., GUO, H., TSAI, H. L., Weld pool dynamics and the formation of ripples in 3D gas metal arc welding, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, 2008.

IBARRA, S., OLSON, D. L., GRUBBS, C. E., Underwater Wet Welding Of Higher Strength Offshore Steels, Proceedings of the 21 annual offshore technology conferencia, Houston TX, 1989.

IBARRA, S., GRUPPS, C. E., LIU, S. State-of-the-Art and Practice of Underwater Wet Welding of Steel, Proceedings: Internationaal Workshop on Underwater Welding of Marine Structures. New Orleans, Lousiana. pp 49-67, 1994.

IMC – ENGENHARIA DE SOLDAGEM, Fonte HipEr-1, Consultado em: <http://www.imc-soldagem.com.br/pt-br/equipamentos/fontes-de-soldagem/soldagem-submarina>. 2017.

Jackson, C.E. and Shrubsaall, A.E. Energy Distribution in Electric Welding, Welding Journal, Vol. 29, No. 5, pg. 231s-241s, 1950.

KAMALA, K. S., ALEX, T. C., MISHRA, D., AGRAWAL, A., An overview on the production of pigment grade titania from titania-rich slag, Waste Management & Research, Vol. 24, 2006.

KEENE, B. J., The effect of thermocapillary flow on weld pool profile, NPL Report DMA (A) 167, National Physical Laboratory, Teddington, 1988.

KIM, M., A study on the development of underwater wet welding electrodes, 2003.

KIM, J. H., FROST, R. H., OLSON, D. L., BLANDER, M., Effect of electrochemical reactions on submerged arc weld metal compositions, *Welding Journal*, Vol. Dezembro, 1990.

KÖNIG, U., PÖLLMANN, H., RÔMULO, A. S., O Refinamento de Rietveld como um método para o controle de qualidade de minérios de ferro, *Revista escola de minas*, Vol. 55, N° 2, 2002.

KOU, S. “Welding Metallurgy”, A Wiley-Interscience Publication, 2th, EUA, 2003

KOU, S., LIMMANEEVICHITR, C., WEI, P. S., Oscillatory Marangoni Flow: A Fundamental Study by Conduction-Mode Laser Spot Welding, *Welding Journal*, Vol. 90, 2011.

LANCASTER, J. F. “Metallurgy of Welding, Springer, 5<sup>th</sup>, EUA, 1993.

LANCASTER, J. F. “The Physics of Welding”, Pergamon Press, 2th, England, 1994.

LARSON, L. J., Metal transfer in the metallic arc. *Welding Journal*, Vol. 21, N° 2, 1942.

LESNEWICH, A., Control of melting rate and metal transfer in gas shielded metal arc welding, *Welding Journal*, Vol. 37, 1958.

LIN, L. M., EAGAR, T. W., Influence of arc pressure on weld pool geometry, *Welding Journal*, Vol. , N° 6, 1985.

LIU, S., OLSON, D. L., IBARRA, S., Critical Issues In Quality Underwater wet welding, First International Simposium on Welding SIS, 1998.

LIU, S., POPE, A. M., and DAEMEN, R. Welding Consumables and Weldability, International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures, Louisiana, USA, 1994.

LRSS, Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação, Programa Sinal, Brasil, 2017a.

LRSS, Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação, Comunicação Interna, Brasil, 2017b.

MACHADO, I. G., “Soldagem & técnicas conesas: processos”, Centro de tecnologia Universidade Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil, 1996.

MAZZAFERRO, J. A., Estudo da Estabilidade do Arco Elétrico na Soldagem Subaquática com Eletrodos Revestidos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, Tese, 1998.

MEDEIRO, R. C., LIU, S., A predictive electrochemical model for weld metal hydrogen pickup in underwater wet welds, 17<sup>th</sup> international conference on offshore mechanics and arctic engineering, 1998.

MEDEIROS, R. C. DE., Effect of Oxidizing Electrodes and Polarity on Hydrogen Mitigation in Underwater Wet Welding. Golden, Colorado, EUA, Colorado School of Mines, Tese , 1997.



MENDEZ, P. F., EAGAR, T. W., Penetration and Defect Formation in High-Current Arc Welding, *Welding Journal*, Vol. October, 2003.

MENESES, P. M., Estudo Comparativo Entre Eletrodos E7018 Convencional E Aglomerados Com Polímeros Em Soldagem Subaquática Molhada, Trabalho De Graduação Engenharia Mecânica UFMG, 2017.

MILLS, K. C., KEENE, B. J., Factors Affecting variable weld penetration, *International Materials Review*, Vol. 35, N° 4, 1990.

MODESENI P. J., Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais, Universidade Federal De Minas Gerais, Brasil, 2017.

MODESENI P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, Introdução à Metalurgia da Soldagem, Universidade Federal De Minas Gerais, Brasil, 2016.

MORENO, A. M., NOGUEIRA, N., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q., Evaluación de la transferencia metálica y la estabilidad del proceso GMAW, 17 Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales, Copiapó, Chile, 2017.

NIXON, J.H.; GRAHAM, S.R.B.; Arc Instability in Shallow Water Wet Welding, *Proceedings OMAE*, 1993.

PATON, E. O., MANDEL'BERG , S. L., SIDORENKO, B. G., *Autom. Weld.*, Vol. 24, N° 8, 1971.

PESSOA, E. C., Estudo Comparativo Do Desempenho De Eletrodos Revestidos Comerciais E6013, E7018 E E7024 Em Soldagem Subaquática Molhada, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, Tese, 2003.

PESSOA, E. C., Estudo Da Variação Da Porosidade Ao Longo Do Cordão Em Soldas Subaquáticas Molhadas, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, Tese, 2007.

PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P., ZICA, E. M., Porosity Variation Along Multipass Underwater Wet Welds and its Influence on Mechanical Properties, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 179, 2006.

PESSOA, E. C., RIBEIRO, L. F., BRACARENSE, A. Q., DIAS, W.. ANDRADE, L. G., LIU. S, SANTOS, V. R., MONTEIRO, M. J., Arc stability indexes evaluation on underwater wet welding, *OMAE proceedings of the ASME 2010 29<sup>th</sup> international conference on Ocean, Offshore, and Arctic Engineering*, 2010.

PETT, M. A., Wet (underwater) welding becomes a viable option, *Welding Metal fabrication*, 5, 1998.

POLLARD, B., The effects of minor elements on the welding characteristics of stainless steel, *Welding Journal*, Vol. September, 1988.

POPE, A. M., LIU, S., Hydrogen content of underwater wet welds deposited by rutile and oxidizing electrodes, OMAE – Materials Engineering ASME, Vol. III, 1996.

POPE, A. M., LIU, S., OLSON, D. L. Effects of the Electrode Oxidizing Potential on Underwater Wet Welds, Proceedings: 13th Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, Vol. III, 1994.

POPE, A.M., LIU, S., TEIXEIRA, J.C.G., dos SANTOS, V.R., PAES, M.T.P. Use of Nickel to Improve the Mechanical Properties of High Oxygen Underwater Wet Welds, OMAE – Materials Engineering, Volume III, 1995.

QUITES, A.M., DUTRA, J.C., "Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico", EDEME, Brasil 1979.

ROKHLIN, S. I., GUU, A. C., A STUDY OF ARC FORCE, POOL DEPRESSION, AND WELD PENETRATION DURING GAS TUNGSTEN ARC WELDING, Welding Journal, Vol. August, 1993.

ROWE, M. D., LIU, S., Recent Development in Underwater Wet Welding, Science and Tecnology of Welding and Joining, Vol. 6, N° 6, 2001.

SANCHEZ-OSIO, A., LIU, S., OLSON D. L., IBARRA, S., Underwater Wet Welding Consumables for Offshore Applications, Preceedings OMAE, Vol.III-A, 1993.

SANTOS, V. R., MONTEIRO, J. M., RIZZO, F. C., BRACARENSE, A. Q., PESSOA, E. P, MARINHO, R. R., VIEIRA, L. A, Development of na oxyrutile electrode for wet welding, Welding Journal, Vol. 91, 2012.

SCOTTI, A., PONOMAREV, V., “Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho”, Artliber Editora, Brasil, 2008.

STALKER, A. W., Welding Institutute Research on Underwater Welding, Underwater welding of offshore installations, The Welding Institute, 1977.

SUBAN, M., TUSEK, J., Methods for the determination of arc stability, Journal of materials processing and technology, 2003.

SUGA, Y., HASUI, A. On formation of porosity in underwater weld metal, Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 17, N°. 1,1986.

SZELAGOWSKI, P., IBARRA, S., OHLINGER, A., e DOS SANTOS, J. F., The Application of in situ Post Weld Heat Treatment to Wet Welds. Proc. Conf. ‘OMAE 92’. American Society of Mechanical Engineers, 1992.

TEICHMANN, E. W. Contribuição ao Desenvolvimento da Soldagem Molhada com Arames Tubulares, Universidade Federal de Santa Catarina, Tese, 2000.

TREVISAN, R. E., SCHWEMMER, D.D., e OLSON, D.L. The fundamentals of weld metal pore formation. Welding: Theory and Practice, Elsevier Science publisher, Chapter 3, 1990.

TSAI, C. L. MASUBUCHI, K. Interpretive Report on Underwater Weldng. Welding Research Council Bulletin, 1977.

TURANI, C. V., Influência do polímero utilizado como aglomerante em eletrodos revestidos básicos sobre a formação de ferrita acicular no metal de solda, Universidade Federal De Minas Gerais, Brasil, Tese, 2014.

VILLANI, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q., “SOLDAGEM Fundamentos e Tecnologia”, Elsevier, 4th, Brasil, 2017.

WAINER, E., BRANDI, S. D., DÉCOURT, F. H., “Soldagem: processos e metallurgia”, BLUCHER, Brasil, 1992.

WANG, Q., WANG, f., LI, G., GAO, Y., LI, B., Simulation and experimental studies of effect of current on oxygen transfer in electroslag remelting process, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 113, 2017.

WASZINK, J.H., PIENA, M.J. Thermal Process in Covered Electrode, Welding Journal, Vol. 64, No. 2, 1985.

WATSON, P.D., TSAI, C.L., WOOD, B. Fitness for service Design Application for Underwater Wet Welds. International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures, USA, 1994.

WERNICKE, R., POHL, R. Underwater Wet Repair-Welding and Strength Testing on Pipe-Patch Joints. 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE – 1998.

WOODS, R. A., Porosity and Hydrogen Absorption in Aluminum Welds, Welding Journal, 1974.

## ANEXO 1




### CERTIFICADO DA QUALIDADE

Quality Certificate / Certificado de Calidad  
Conforme ASMESFA5.01/2013 Programa(Schedule) G

<b>Produto :</b> <i>Product/Productos</i>	OK 46.00 3,25 350,00 LT 20KG		<b>Data de Produção :</b> <i>Date/Fecha de Produccion</i>	06.08.2014	
<b>Lote :</b> <i>Heat Number/Produccion</i>	VT432E4425				
<b>Classificação :</b> <i>Classification/Clasificación</i>	AWS A5.1-04 ASME SFA5.1/ 2013 E6013				
<b>Corpos de Prova de Metal Depositado</b> <i>All-Weld Metal Test Assemblies/Cuerpos de Prueba del Metal Depositado</i>					
<b>Análise Química (%)</b> <i>Chemical Analysis/Análisis Químico</i>					
C	Si	Mn	P	S	
0,064	0,230	0,370	0,015	0,009	
	Cr	Ni	Mo	V	
	0,016	0,028	0,003	0,014	
<b>Propriedades Mecânicas Típicas</b> <i>Typical Mechanical Properties / Propiedades Mecánicas Típicas</i>					
Resistência a Tração (MPa)/Tensile Strength/Resistencia a la Tracion			480		
Limite de Escoamento (MPa)/Yield Strength/Limite de Fluencia			410		
Alongamento (%) /Elongation/Alargamiento			29		
Teste de Impacto CHARPY-V (J)/Impact Test/Ensayo de Impacto					
Temperatura (°C)/Temperature/Temperatura					
<b>Teste de Filete</b> <i>Fillet Weld Test / Ensayo de Filete</i>					
ATENDE AOS REQUISITOS    SATISFY THE REQUIREMENTS    ATIENDE A LOS REQUISITOS					
<b>Qualidade Radiográfica</b> <i>Radiographic Test/Calidad Radiografica</i>					
GRAU 2		GRADE 2		GRADO 2	

  
**LUIZ HENRIQUE C. GONÇALVES**  
**ESAB Indústria e Comércio Ltda.**  
 Controle de Qualidade Consumíveis  
*Quality Control / Control de la Calidad*

## ANEXO 2


	<b>FISPQ - FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTOS QUÍMICOS</b> <small>Esta FISPQ está em conformidade com a Norma ABNT NBR Nº 14.725-2 (GHS).</small>	Página: 1 (5) Data de revisão: 17/07/2017 Produto: OK Serralheiro
---	---	---

### 1. IDENTIFICAÇÃO

**Nome da substância ou mistura (nome comercial)** OK SERRALHEIRO  
**Código interno de identificação do produto**  
**Principais usos recomendados para a substância ou mistura** Soldagem ao Arco Elétrico  
**Nome da Empresa** ESAB Indústria e Comércio Ltda.  
**Endereço** Rua Zezé Camargos, 117 Cid. Industrial, Contagem – MG.  
**Telefone para contato /Fax** (31) 2191-4333.  
**E-mail** faleconosco@esab.com.br.  
**Contato para emergência: Telefone para emergências** WGRA Gerenciamento de Riscos Ambientais Ltda. 0800 720 8000 / 0800 777 2323.

### 2. IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS

**Classificação do produto** Corrosivo para os metais – Categoria 1.  
 Corrosão/irritação à pele – Categoria 1B.  
 Lesões oculares graves/irritação ocular – Categoria 1.  
 Toxicidade para órgãos-alvo específicos – Exposição única – Categoria 3.

**Elementos apropriados de rotulagem**  
**Simbolo GHS**


**Palavras de advertência** PERIGO!  
**Frases de perigo** H290: Pode ser corrosivo para os metais.  
 H314: Provoca queimadura severa à pele e dano aos olhos.  
 H318: Provoca lesões oculares graves.  
 H335: Pode provocar irritação das vias respiratórias.

**Frases de precaução**  
**Geral**  
 P103 Leia o rótulo antes de utilizar o produto.  
**Prevenção:**  
 P234 Conserve somente no recipiente original.  
 P260 Não inale as poeiras / fumos / gases / névoas / vapores / aerossóis.  
 P264 Lave as mãos cuidadosamente após o manuseio.  
 P271 Utilize apenas ao ar livre ou em locais bem ventilados.  
 P280 Use luvas de proteção/roupa de proteção/proteção ocular/proteção facial.

ESAB Indústria e Comércio Ltda.

### Resposta

P301 + P330 + P331 EM CASO DE INGESTÃO: Enxágue a boca. NÃO provoque vômito.  
 P303 + P361 + P353 EM CASO DE CONTATO COM A PELE (ou com o cabelo): Retire imediatamente toda a roupa contaminada. Enxágue a pele com água/ tome uma ducha.  
 P363 Lave a roupa contaminada antes de usá-la novamente.  
 P304 + P340 EM CASO DE INALAÇÃO: Remova a pessoa para local ventilado e a mantenha em repouso numa posição que não dificulte a respiração.  
 P310 Contate imediatamente um CENTRO DE INFORMAÇÃO TOXICOLÓGICA ou um médico.  
 P305 + P351 + P338 EM CASO DE CONTATO COM OS OLHOS: Enxágue cuidadosamente com água durante vários minutos. No caso de uso de lentes de contato, remova-as, se for fácil. Continue enxaguando.  
 P390 Absorva o produto derramado a fim de evitar danos materiais.  
**Armazenamento**  
 P403 + P233 Armazene em local bem ventilado. Mantenha o recipiente hermeticamente fechado.  
 P405 Armazene em local fechado à chave.  
 P406 Armazene num recipiente resistente à corrosão com um revestimento interno resistente.  
**Eliminação**  
 P501: Eliminar o conteúdo/recipiente de acordo com as normas locais (ver item 13)

**Outros perigos que não resultam em uma classificação** Não possui outros perigos.

### 3. COMPOSIÇÃO E INFORMAÇÕES SOBRE OS INGREDIENTES

Produto químico	Este produto é composto por um arame sólido revestido pelo processo de extrusão. O arame é do tipo Aço Carbono	
Nome químico comum ou nome genérico	NÚMERO DE CAS	Concentração %
<b>Oxido de titânio</b>	13463-67-7	40-50%
<b>Silicato de alumínio</b>	12141-46-7	10-15%
<b>Silicatos</b>	1344-09-8	10-15%
<b>Ferro</b>	7439-89-6	5-10%
<b>Calcário</b>	1317-65-3	5-10%
<b>Manganês</b>	7439-96-5	5-10%
<b>Celulose</b>	9004-34-6	2-5%