

# ESTUDO DA VARIAÇÃO DA POROSIDADE AO LONGO DO CORDÃO EM SOLDAS SUBAQUÁTICAS MOLHADAS EM POSIÇÃO SOBRE CABEÇA<sup>1</sup>

Luis Edmundo Ramírez Luna<sup>2</sup>  
Alexandre Queiroz Bracarense<sup>2</sup>  
Ezequiel Caires Pereira Pessoa<sup>3</sup>

## Resumo

A American Welding Society na norma D3.6M:1999, Specification for Underwater Welding define que a posição sobre cabeça é considerada aquela onde a chapa, em relação à horizontal sobre cabeça cobre dos 0° a 80° graus. A complexidade da posição sobre cabeça e a importância que a quantidade e localização de porosidade representa na qualidade da solda, levam à necessidade de documentar e analisar a distribuição dos poros dependendo dos ângulos nos quais as soldas sejam feitas. Estas mudanças de ângulo relacionam-se à mudança na transferência metálica durante a soldagem. Com o objetivo de detectar variações na porosidade ao longo do cordão e prováveis relações com a variação na transferência metálica foram feitas soldas a profundidades simuladas de 10 m e 50 m, testou-se diferentes ângulos de chapa (10°, 30° e 70°) e ângulos de trabalho (40°, 50° e 60°), utilizando eletrodos rútilicos E6013 envernizados manualmente. Os resultados mostram que a porosidade é fortemente dependente da profundidade e que são distribuídos em aproximadamente 50 % na penetração e 50 % no reforço. Assim também, conforme aumenta o ângulo da chapa com relação à horizontal a porosidade aumenta em até 36% a 10 metros e 22% a 50 metros de profundidade.

**Palavras-chave:** Solda subaquática molhada; Soldadura sobre cabeça; Ângulo trabalho Ângulo chapa.

## STUDY OF POROSITY VARIATION IN WELD BEAD IN UNDERWATER WET WELDS IN OVERHEAD POSITION

### Abstract

The AWS D3.6M:1999 specification for underwater wet welding defines that overhead position its considered when the plate, in relation to the overhead horizontal position goes from 0 to 80. The complexity of the overhead position and the importance of the quantity and location of the pores present on weld quality, this take us to document and analyze the pore distribution depending the angles and used current to weld. This angle changes are related to metal transfer when welding. With the objective to detect porosity variations through weld bead and provable relations with the weld metal transfer was made welds at simulated deeps of 10 m and 50 m, 3 different plate angles ( 10, 30 and 70) and 3 different work angles (40, 50 and 60), manually burnished E6013 electrode. The results show that porosity its highly dependent of the water deep and that pores are distributed 50% at penetration area and 50% at reinforcement area. With the increase of the plate angle related to horizontal, the porosity increase until 36 % at 10 m water deep and 22% at 50 m water deep.

**Key words:** Underwater wet weld; Overhead weld; Work angle; Plate angle.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, MSc e Físico, PhD, Professor Titular. Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil; luis.rl@live.com.mx, bracarense@ufmg.br

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico. Professor. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus Congonhas, Congonhas, MG, Brasil; ecpp76@gmail.com.

## 1 INTRODUÇÃO

A Soldagem sobre cabeça é uma das posições menos desejadas por causa da dificuldade para se realizar mas há situações nas que é mandatário realizar a solda nesta posição já que não é possível o soldador mudar a posição da peça a soldar. O AWS 3.6 define que a solda sobre cabeça cobre dos ângulos 0° até 80° na horizontal tendendo a vertical.<sup>(1)</sup>

Já que não existe pesquisa referente as condições necessárias para a obtenção de uma boa aparência no cordão de solda, nem metodologia para a diminuição da porosidade a diversas profundidades na posição sobre cabeça baixo da água, este trabalho procura aportar contribuições nesta área de pesquisa, através de uma investigação de alguns fatores que podem influenciar a quantidade de poros no cordão de solda

A porosidade na solda subaquática molhada começa a aparecer quando a pressão baixo agua excede os 0.5 Kgf/cm<sup>2</sup> já que a concentração de hidrogeno na poça de fusão atinge o ponto crítico.<sup>(2)</sup>

Os principais problemas que ocorrem na soldagem subaquática molhada se devem á dissociação da molécula de água em oxigênio e hidrogênio no arco elétrico. Esses elementos químicos (O- e H+) dissociados se dissolvem no metal líquido após a sua transferência da ponta do eletrodo para a poça de fusão, prejudicando a qualidade da junta soldada por formarem poros e inclusões não metálicas (óxidos), bem como por oxidarem os elementos de liga e modificarem a microestrutura do metal de solda.

Os principais fatores que afetam a porosidade no metal de solda são a profundidade do local de solda, tipo de revestimento do eletrodo, polaridade da corrente de solda, modo de transferência do metal e estabilidade do arco elétrico como mostra a Figura 1.

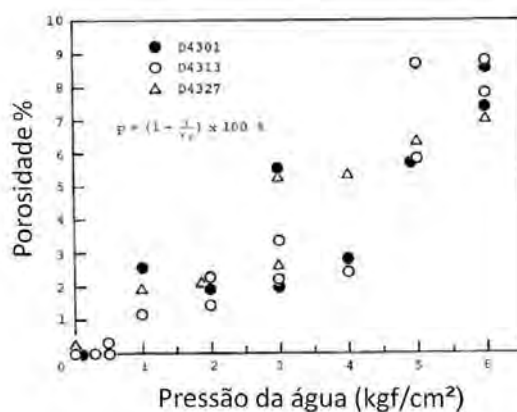


Figura 1. Efeito da pressão na porosidade.

A natureza e a quantidade de poros presente no metal de solda envolvem no mínimo quatro processos competitivos dependentes do tempo, tais como, nucleação, crescimento, transporte e coalescência dos poros. Assim, as distintas configurações dos poros vão depender do tempo de solidificação do metal fundido.<sup>(3)</sup>

O modo de transferência de calor na soldagem subaquática molhada é muito diferente que o da soldagem ao ar. A existência de bolhas dinâmicas durante a soldagem subaquática induz um fluxo em torno do arco. Este fluxo de água junto com a agitação das bolhas remove rapidamente o calor do metal base e produz o fenômeno de rápido resfriamento.<sup>(4)</sup> Quer dizer que o resfriamento e a solidificação

em soldagem subaquática são muito mais rápidos do que as soldas feitas fora da água, impedindo as bolhas se escapem do metal de solda pela ação da força de empuxo. Desta forma, esas bolhas ficam retidas no metal solidificado formando os poros.<sup>(5)</sup>

Suga<sup>(2)</sup> descobriu que com CDEN e usando eletrodo rutílico, ao variar da pressão da coluna de água sobre o arco elétrico, a forma do poro pode ser quase circular ou alongada. Eses autores dividiram os poros, segundo sua forma em poro tipo A e poro tipo B. O poro tipo A no metal de solda é obtido em pressões entre 0,5 kgf/cm<sup>2</sup> e 3 kgf/cm<sup>2</sup> debaixo água e são causados pelo hidrogênio concentrado no frente de solidificação. O poro tipo B é obtido no metal de solda em pressões entre 3 kgf/cm<sup>2</sup> e 6 kgf/cm<sup>2</sup> debaixo da água, onde é possível observar especiais linhas de solidificação ao redor dos poros. A forma alongada do poro é produzida por uma bolha formada no metal fundido, a qual é presa pelas sucessivas frentes de solidificação.

Estes tipos de poros são mostrados na Figura 2 os quais foram obtidos de cortes longitudinais do cordão de solda feito a diferentes profundidades.

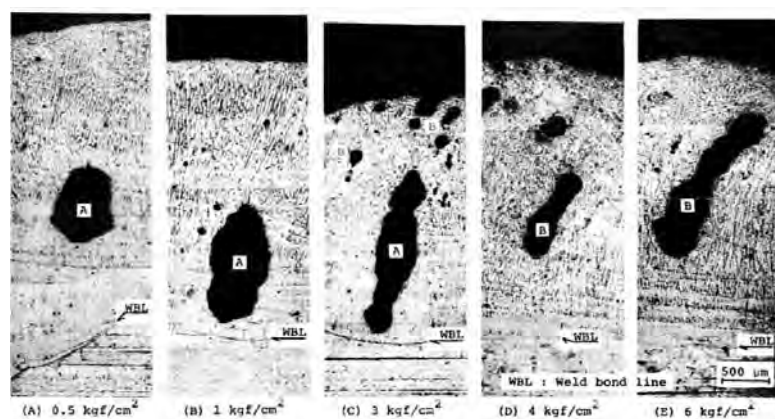


Figura 2. Efeito da pressão de água na forma do cordão.<sup>(2)</sup>

Pessoa<sup>(6)</sup> pesquisou sobre a variação de porosidade em multipasses de soldas subaquáticas em chanfro descobrindo que as partes finais das soldas apresentam uma menor quantidade de porosidade e melhores propriedades mecânicas. Ele também relatou que a porosidade além de variar com a profundidade, também depende do tipo de revestimento do eletrodo. Neste estudo o eletrodo rutílico produziu soldas com menor porosidade que o eletrodo básico. A diferença deste trabalho com o feito solo em cordões sobre chapa observou-se que a transferência de tipo curto circuito implica em maior tempo de exposição da gota metálica a atmosfera do arco elétrico e, conseqüentemente, maior queima de carbono e geração de CO, explicando assim o aumento do teor de carbono no metal de solda no final do cordão, exatamente onde se detectou menor porosidade e menor ocorrência de curtos circuitos.

Referente a configuração do poro (largura, reforço e penetração), Pessoa<sup>(7)</sup> pesquisou sobre a localização dos poros em soldas subaquáticas molhadas procurando encontrar os valores ótimos de corrente para atingir a melhor localização dos poros, já que é melhor ter os poros o mais perto ao topo do cordão pois fica mais fácil removê-los por técnica "re-melt" ou por desbaste.

O objetivo deste trabalho é conhecer os parâmetros de corrente e ângulos que favorecem uma baixa quantidade de poros e que eles fiquem no reforço nas soldas feitas em posição sobre cabeça.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram feitas soldas sobre chapa usando um dispositivo de soldagem por boiabilidade - gravidade dentro de uma câmara hiperbárica enchida com água da cidade.

Os eletrodos de 3,25 mm de diâmetro foram protegidos com verniz vinílico para que o revestimento não molhasse durante a soldagem.

Para a produção de soldas na câmara hiperbárica, realiza-se a seguinte sequência de operações:

- posicionamento do eletrodo e a chapa no mecanismo de soldagem;
- enchimento do tanque com água por meio de acionamento de uma bomba;
- pressurização da câmara com ar comprimido na pressão desejada;
- realização da solda;
- despressurizarão da câmara e esvaziamento da câmara;
- remove-se a placa de aço com o cordão de solda para limpeza e análises.

Os cordões de solda foram feitos em chapas ASTM A-36 com 300 mm de comprimento e 90 mm de largura e 10 mm de espessura. O carbono equivalente da chapa foi de 0,29, o que representa uma excelente soldabilidade.<sup>(8)</sup>

O dispositivo de soldagem, Figura 3a, usado neste trabalho permite controlar a velocidade de solda mudando o ângulo da guia  $\beta$  onde o porta eletrodo se movimenta, assim como o ângulo da base onde é colocada a chapa  $\alpha$ . Os ângulos  $\beta$  e  $\alpha$  formam o ângulo de trabalho  $\theta$ . Estes ângulos são medidos em relação a horizontal. Outro fator para controlar a velocidade de solda é a taxa de fusão de solda. A corrente usada foi 100 A para soldas a 10 m e 120 A nas soldas a 50 m CDEN (Corrente Direta Eletrodo Negativo).

A Figura 3b mostra a câmara hiperbárica onde as soldas foram feitas a 10 metros e 50 metros de profundidade simulada.

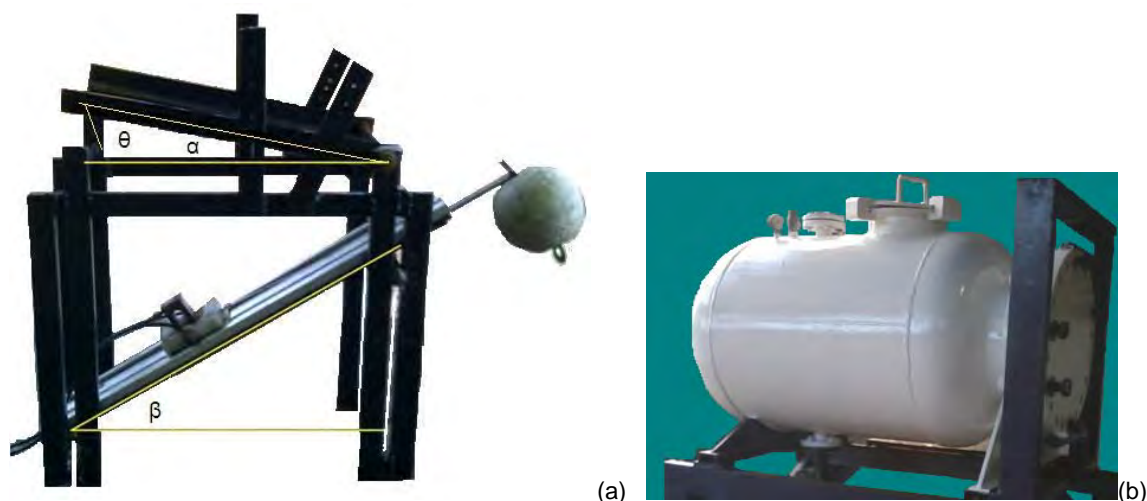


Figura 3. (a) Dispositivo de solda sobre cabeça; (b) Câmara Hiperbárica.

A fonte de soldagem conta com um sistema automático de regulação eletrônica de corrente.

A Tabela 1 mostra os ângulos e valores de corrente para cada uma das condições soldadas.

Tabela 1. Valores das correntes e ângulos usados nas soldadas

Chapa ( $\alpha$ )	Eléctrodo-Chapa	Guia ( $\beta$ )	Corrente (I)	
			10 m	50 m
10°	40°	40°	100A	120A
	50°	30°	100A	120A
	60°	20°	85 A	120 A
30°	40°	20°	100 A	120 A
	50°	10°	90 A	120 A
	60°	0°	100 A	120 A
70°	40°	- 20°	100 A	120 A
	50°	- 30°	100 A	120 A
	50°	- 40°	100 A	120 A

A Figura 4 apresenta as configurações dos ângulos descritos na Tabela 1.

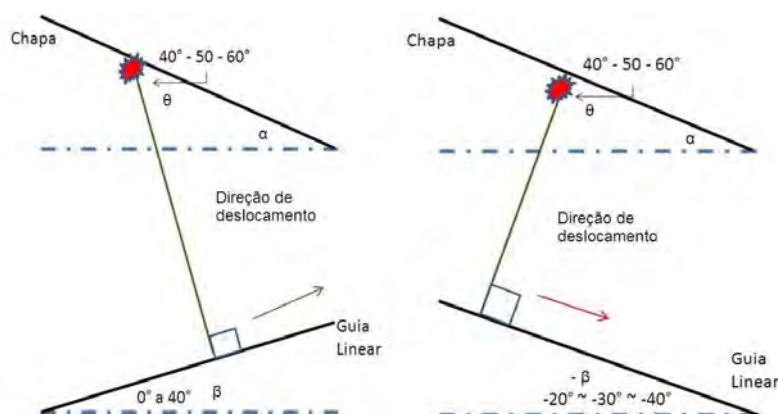


Figura 4. Configurações do dispositivo.

Todos os cordões foram cortados em três pontos diferentes, a 20 mm do início, no meio e a 20 mm do final (Figura 5). As amostras produzidas foram utilizadas para obtenção de imagens para medição de porosidade. A medição de porosidade foi feita por meio de um sistema de aquisição e análise de imagens.

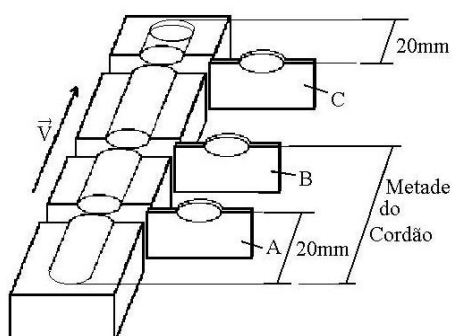
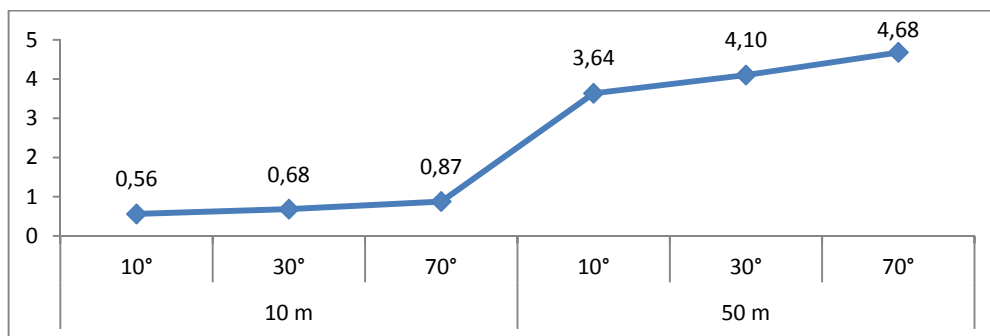


Figura 5. Metodologia para retirada das amostras nos testes de deposição sobre chapa.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O gráfico da Figura 6 mostra a variação da porosidade medida nas soldas em função da profundidade. É possível observar que a 50 m com ângulo de chapa 70° é obtida a maior quantidade de porosidade.



**Figura 6.** Média de porosidade em função a profundidade e ângulo de chapa.

Na Tabela 2 percebe-se que a solda sobre cabeça apresenta o comportamento da porosidade muito similar ao descrito na literatura onde os valores de porosidade diminuem do início ao final do cordão.<sup>(6)</sup> Nesta pesquisa, 67% da porosidade diminuem do início ao fim do cordão de solda tanto nas soldas a 10 quanto nas de 50 metros de profundidade. O 33% restante das soldas, as quais não se comportam desta forma, foram para 10 metros às feitas com ângulo de chapa a 10° e para as soldas feitas a 50 metros o ângulo de chapa foi de 30°. Mas nota-se que a diferença entre o valor máximo e mínimo nos dois casos não ultrapassa 1,8% no maior caso (50 m).

**Tabela 2.** Média de distribuição da porosidade por cordão para cada ângulo de chapa

Profundidade	Ângulo chapa	Posição	Cordão 1	Cordão 2	Cordão 3	Média	Tendência
			Média % Porosidade	Média % Porosidade	Média % Porosidade	Total	
10 m	10°	A	0,62	0,43	0,46	0,50	↑
		B	0,51	0,78	0,31	0,53	
		C	1,33	0,26	0,33	0,64	
	30°	A	0,80	0,88	0,64	0,77	↓ ↑
		B	0,69	0,29	0,67	0,55	
		C	1,13	0,74	0,37	0,75	
	70°	A	1,69	0,58	0,79	1,02	↓ ↑
		B	0,97	0,64	0,52	0,71	
		C	0,86	0,26	1,56	0,89	
50 m	10°	A	4,73	5,00	6,02	5,25	↓ ↑
		B	0,78	1,33	4,73	2,28	
		C	6,11	2,03	3,59	3,91	
	30°	A	5,34	1,80	2,55	3,23	↑ ↓
		B	5,93	5,45	3,71	5,03	
		C	3,55	4,70	3,90	4,05	
	70°	A	5,51	3,75	6,90	5,39	↓ ↑
		B	4,52	2,89	5,36	4,26	
		C	4,58	2,36	6,25	4,39	

É possível perceber na tabela que as soldas a 10 m apresentam uma tendência a diminuir a porosidade do início da solda até a metade do cordão e depois aumentar na parte final.

Na Tabela 3 são apresentadas as médias de porosidades obtidas para cada ângulo de chapa com os três ângulos de trabalho a 10 metros de profundidade. Nesta tabela percebe-se que a maior quantidade de poros está presente nas soldas feitas com ângulo de chapa 30° e ângulo de trabalho 40°. A menor porosidade foi nas soldas feitas com ângulo de chapa 10° e ângulo de trabalho 40°.

**Tabela 3.** Média dos 3 cordões por condição a 10 m

Condição	Ângulo Chapa	Ângulo trabalho	Ângulo Guia	Média dos 3 cordões
1.1	10°	40°	40°	0,34
2.1		50°	30°	0,64
3.1		60°	20°	0,69
4.1	30°	40°	20°	0,98
5.1		50°	10°	0,37
6.1		60°	0°	0,68
7.1	70°	40°	-20°	0,45
8.1		50°	-30°	1,04
9.1		60°	-40°	1,13

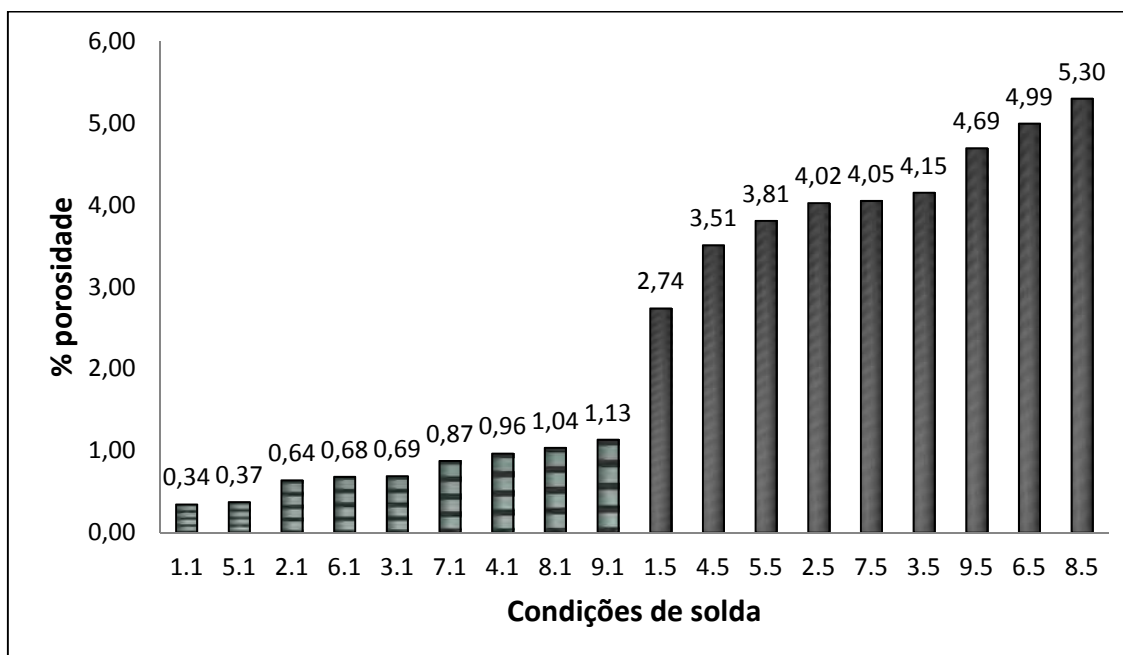
Na Tabela 2 também é possível que existe uma tendência a diminuir a porosidade do início da solda até a metade do cordão, exceto no caso da chapa com 30°, no qual na metade da solda apresenta aumento de porosidade para depois diminuir.

Na Tabela 4 são apresentadas as médias de porosidades obtidas para cada ângulo de chapa com os três ângulos de trabalho a 50 metros de profundidade. Nesta tabela percebe-se que a maior quantidade de poros está presentes nas soldas feitas com ângulo de chapa 70° e ângulo de trabalho 50°. A menor porosidade foi nas soldas feitas com ângulo de chapa 10° e ângulo de trabalho 40°.

**Tabela 4.** Média dos três cordões por condição a 50 m

Condição	Ângulo Chapa	Ângulo trabalho	Ângulo Guia	Media dos 3 cordões
1.5	10°	40°	40°	2,74
2.5		50°	30°	4,02
3.5		60°	20°	4,15
4.5	30°	40°	20°	3,51
5.5		50°	10°	3,81
6.5		60°	0°	4,99
7.5	70°	40°	-20°	4,05
8.5		50°	-30°	5,30
9.5		60°	-40°	4,69

Na Figura 7 está plotado o total de condições nas quais foram feitas as soldas deste trabalho de pesquisa. Percebe-se que o melhor ângulo de trabalho tanto para 10 metros como para 50 m é 40° ângulo de trabalho e ângulo de chapa 10°. O pior ângulo de trabalho na mesma profundidade é 60° e ângulo de chapa 70°. A tendência que o gráfico apresenta é que quanto menor o ângulo de trabalho e menor o ângulo de chapa, menor será a porosidade apresentada nas soldas.



**Figura 7.** Média de porosidade para todas as condições de soldagem.

Uma questão importante a conhecer além da quantidade de porosidade presente na solda é a localização da mesma. Pessoa fala que é mais fácil remover a porosidade presente no reforço por meio de esmerilhamento ou pela fusão do cordão no passe seguinte de solda.<sup>(7)</sup>

Tem que ser considerado que no trabalho anteriormente referenciado, as soldas foram feitas na horizontal, e neste caso as soldas são sobre cabeça, sendo o comportamento da bolha é distinto, já que sobre cabeça, ela poderia ficar presa no metal fundido por causa da flutuação da bolha.

Na Tabela 5 são apresentadas as médias de localização dos poros no cordão de solda obtidas nas profundidades de 10 e 50 metros para cada ângulo de chapa. O cordão é dividido como reforço e penetração.

**Tabela 5.** Distribuição de porosidade segundo profundidade e ângulo da chapa

Profundidade.	Ângulo $\alpha$	Reforço	Penetração
10 m	10 °	47,58	52,42
	30°	45,63	54,37
	70°	37,39	62,61
50 m	10 °	23,76	76,24
	30°	22,81	77,19
	70°	37,52	62,48

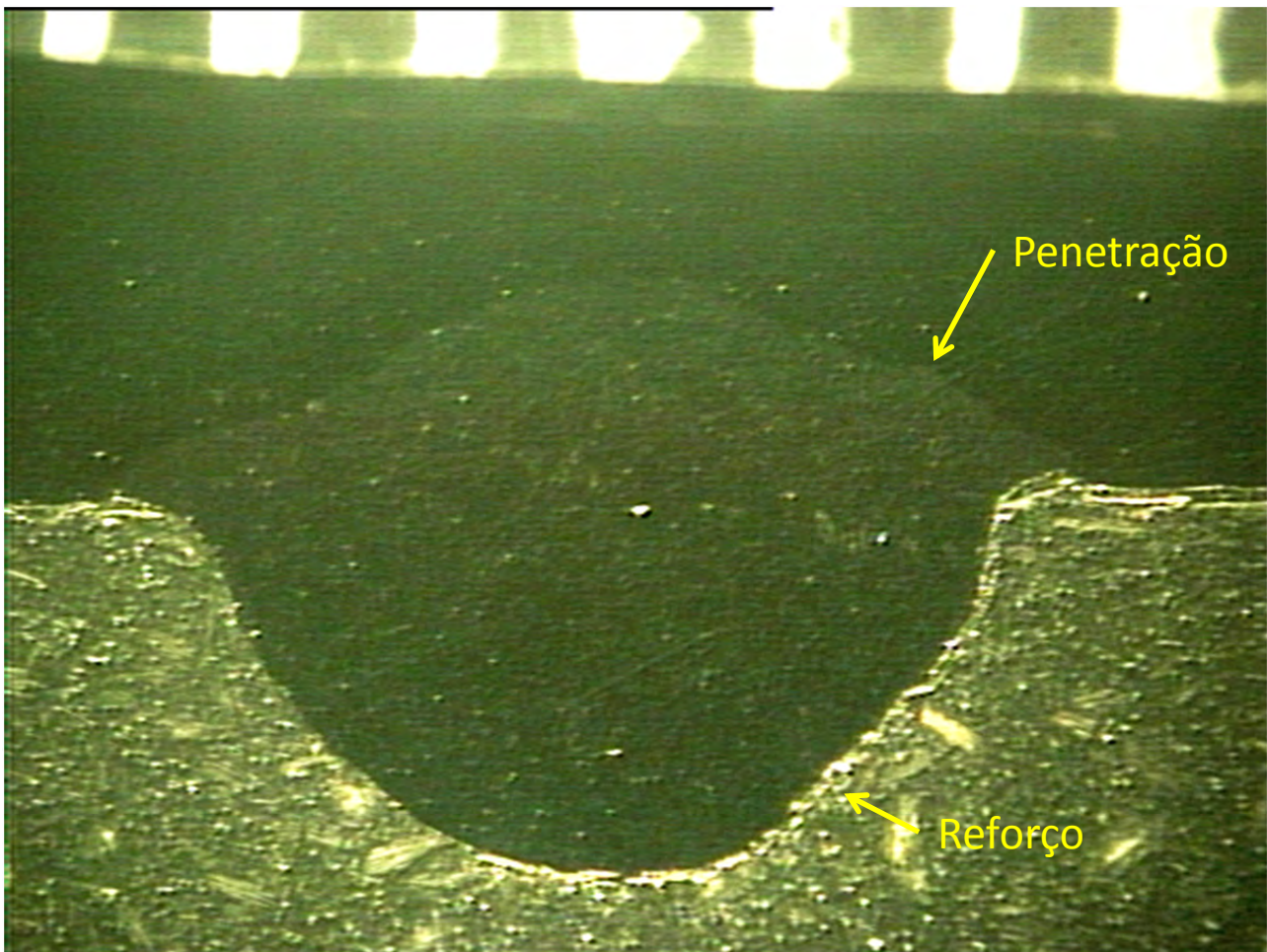
Pode-se ver que a maioria dos poros a 10 metros de profundidade estão presentes na parte central do cordão. Isso quer dizer, que do total da porosidade, a metade da porosidade está na zona de penetração e a outra metade no reforço. No caso de soldas a 50 metros de profundidade, a maior área de porosidade encontra-se na penetração.

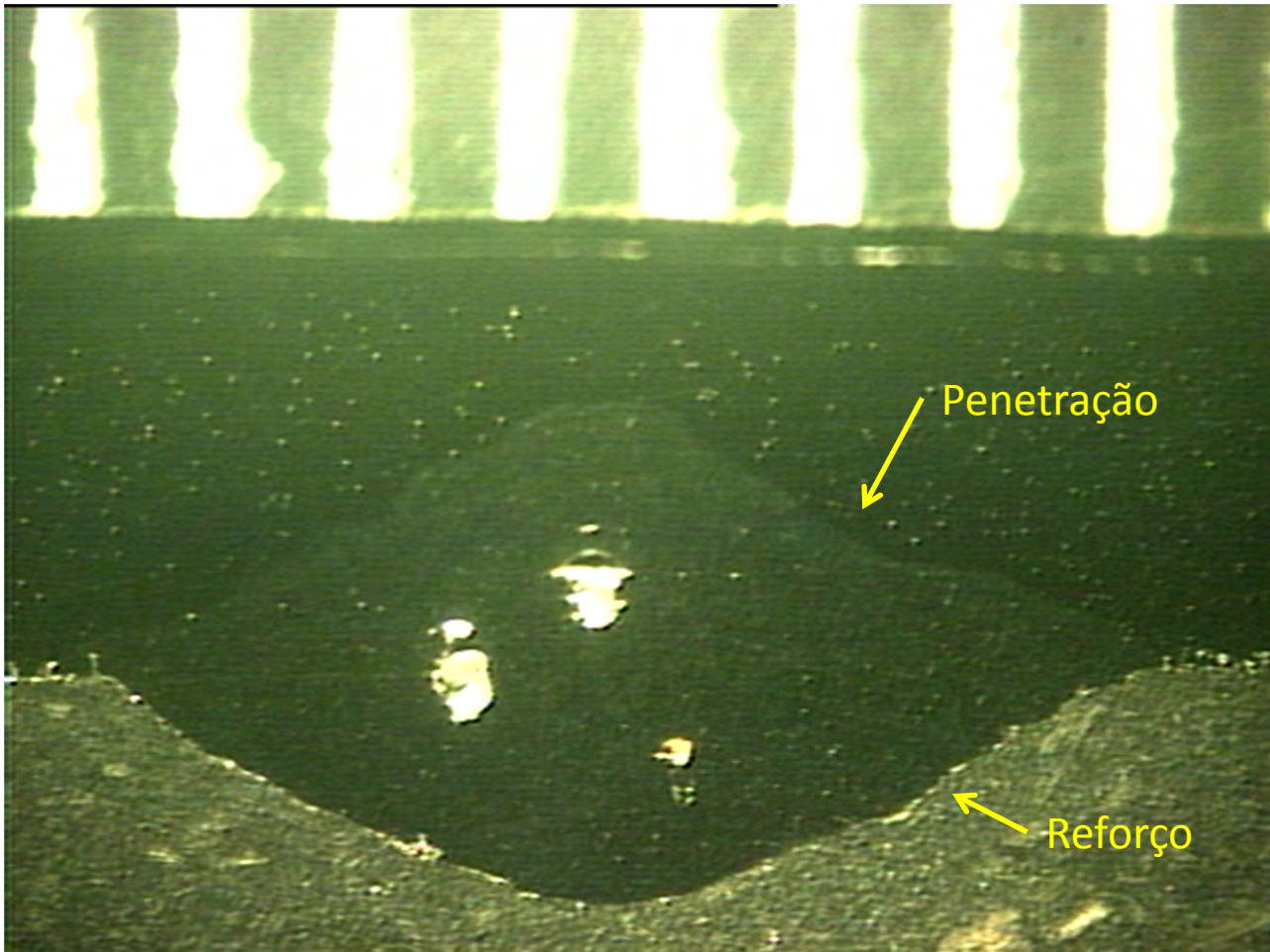
Na Figura 8 apresentam-se um caso de cada profundidade das 163 análises de medição feita para conhecer a medição de porosidade, deste trabalho.



**Tabela 6.** Distribuição do percentual de porosidade por condição de solda

Condição	Área do cordão	% Porosidade
1.1	% poros reforço	42,29
	% poros penetração	57,71
1.5	% poros reforço	31,30
	% poros penetração	68,70
2.1	% poros reforço	49,71
	% poros penetração	50,29
2.5	% poros reforço	16,38
	% poros penetração	83,62
3.1	% poros reforço	50,74
	% poros penetração	49,26
3.5	% poros reforço	23,60
	% poros penetração	76,40
4.1	% poros reforço	29,48
	% poros penetração	70,52
4.5	% poros reforço	24,71
	% poros penetração	75,29
5.1	% poros reforço	64,78
	% poros penetração	35,22
5.5	% poros reforço	31,29
	% poros penetração	68,71
6.1	% poros reforço	42,62
	% poros penetração	57,38
6.5	% poros reforço	12,43
	% poros penetração	87,57
7.1	% poros reforço	58,25
	% poros penetração	41,75
7.5	% poros reforço	37,26
	% poros penetração	62,74
8.1	% poros reforço	34,92
	% poros penetração	65,08
8.5	% poros reforço	34,69
	% poros penetração	65,31
9.1	% poros reforço	18,98
	% poros penetração	81,02
9.5	% poros reforço	40,61
	% poros penetração	59,39





**Figura 8.** Porosidade presente em solda feita com ângulo de chapa 10° e ângulo de trabalho 40° a 10 m (izq) e 50 m (der).

O comportamento da porosidade nas soldas a 10 metros difere muito das feitas a 50 metros e por isso é muito importante conhecer a localização e quantidade de poros no cordão já que pode assim ser escolhida a melhor opção de ângulo de trabalho dependendo do ângulo no qual a peça a soldar se encontrar. A ideia é procurar obter a maior quantidade de poros no reforço, portanto, podem ser eliminados por esmerilamento. Na Tabela 6 são colocados os valores obtidos nas soldas de cada condição de ângulos e profundidades.

#### 4 CONCLUSÕES

No caso das soldas a 10 metros com ângulo de chapa 10°, é melhor soldar com ângulo de trabalho de 60° já que a média de porosidade no reforço é de 50,74, depois com ângulo de trabalho 50° com média de porosidade de 49,71 no reforço e finalmente com ângulo de trabalho 40° com média de porosidade de 42,29.

Para as soldas com ângulo de chapa 30°, é melhor soldar com ângulo de trabalho de 50° já que a média de porosidade no reforço é de 64,78, depois com ângulo de trabalho 60° com média de porosidade de 49,71 no reforço e finalmente com ângulo de trabalho 40° com média de porosidade no reforço de 29,48.

Para as soldas com ângulo de chapa 70°, é melhor soldar com ângulo de trabalho de 40° já que a média de porosidade no reforço é de 58,25, depois com ângulo de

trabalho 50° com média de porosidade de 34,92 no reforço e finalmente com ângulo de trabalho 60° com média de porosidade no reforço de 19,98.

O anteriormente descrito significa que conforme aumenta o ângulo de chapa para a vertical, o ângulo de trabalho deve diminuir. Isso com a finalidade de obter a maior quantidade possível de poros no reforço da solda.

No caso das soldas a 50 metros de profundidade com ângulo de chapa 10°, é melhor soldar com ângulo de trabalho de 40° já que a média de porosidade no reforço é de 31,30, depois com ângulo de trabalho 60° com média de porosidade de 23,60 no reforço e finalmente com ângulo de trabalho 50° com média de porosidade de 16,38.

Para as soldas com ângulo de chapa 30°, é melhor soldar com ângulo de trabalho de 50° já que a média de porosidade no reforço é de 31,29, depois com ângulo de trabalho 40° com média de porosidade de 24,71 no reforço e finalmente com ângulo de trabalho 60° com média de porosidade no reforço de 12,43.

Para as soldas com ângulo de chapa 70°, é melhor soldar com ângulo de trabalho de 60° já que a média de porosidade no reforço é de 40,61, depois com ângulo de trabalho 40° com média de porosidade de 37,26 no reforço e finalmente com ângulo de trabalho 50° com média de porosidade no reforço de 34,69.

O anteriormente descrito significa que quanto mais horizontal sobre cabeça fique a chapa, o ângulo de trabalho deve ser o menor e quanto mais tende o ângulo de chapa a vertical, o ângulo de trabalho a usar deve aumentar. Uma coisa que é muito importante perceber é que a maior quantidade de porosidade na área de reforço é obtida nas soldas com ângulo de chapa a 70°.

## Agradecimentos

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa concedida para a realização de meus estudos e pesquisas com a finalidade de publicar este artigo.

## REFERENCIAS

- 1 AWS. (1999). AWS D3.6:1999 Specification for Underwater Welding. Miami FL: AWS.
- 2 SUGA, Y. H. (1986). On Formation of Porosity in Underwater Weld Metal. Japan Welding Society, 58-64.
- 3 TREVISAN, R. E. (1990). The fundamentals of Welding Pore Formation. Elsevier Science Publishers, 79-115.
- 4 TSAI, C. L. (1979). Mechanisms of Rapid Cooling and Theri Design Considerations in Underwater Welding. Houston, Texas: OCT 3469. 973-980.
- 5 WATSON, P. D. (1994). Fitness for service Design Application for Underwater Wet Welds. *International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures*, (pp. 2010-236). Louisiana, USA.
- 6 PESSOA, E. Estudo da Variação da Porosidade ao Longo do Cordão de Soldas Subaquáticas Molhadas. *Associação Brasileira de Soldagem*. (13 a 15 de Setembro de 2004), Rio de Janeiro - RJ.
- 7 PESSOA, E. C. (2004). *Study of Porosity Variation Along Underwater Wet Welds*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: Thesis. Universidade Federal de Minas Gerais.
- 8 Ginzburg, V. B., Ballas, R. (2000). *Flat rolling fundamentals*. New York: Marcel Dekker.