

VARIAÇÃO DA POROSIDADE AO LONGO DE SOLDAS SUBAQUÁTICAS MOLHADAS MULTIPASSES E SUA INFLUÊNCIA SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Ezequiel Caires Pereira Pessoa – ezequiel@demec.ufmg.br

Alexandre Queiroz Bracarense – bracarense@ufmg.br

Eduardo Maluf Zica - e.maluf@ig.com.br

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação. Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, 31270-901 – Belo Horizonte – MG. Telefone (31) 3499-5245; fax.: (31) 3443 3783

Stephen Liu – sliu@mines.edu

Faustino Perez-Guerrero – fperezgu@mines.edu

Colorado School of Mines – CSM, Center for Welding, Joining and Coatings Research. Golden, CO 80401, USA

Resumo. *O propósito deste trabalho é avaliar, através do método de análise da porosidade em seções transversais e ensaios de impacto, dobramento e tração, a influência das variações que ocorrem no eletrodo revestido durante a soldagem molhada sobre a porosidade no metal de soldas multipasses em chanfro V a 50 e 100 metros de profundidade utilizando-se de eletrodos revestidos comerciais (E6013 e E7024) em três aços diferentes (A-36, A-572 e API 5L grau B) utilizados em aplicações estruturais na construção de plataformas offshore. Para simular a profundidade utilizou-se um vaso de pressão com capacidade de suportar pressões de até 20 atmosferas com água doce. Para realizar as soldas utilizou-se um mecanismo de soldagem por gravidade que é capaz de abrir o arco elétrico e realizar a solda automaticamente. Amostras para medição da porosidade foram retiradas em quatro pontos distintos ao longo da solda e os resultados obtidos revelam que a porosidade reduz ao longo do cordão de solda. Os ensaios de dobramento e tração revelaram que as propriedades mecânicas são melhores nas amostras retiradas no final do cordão.*

Palavras-chave: *Soldagem Subaquática Molhada, Eletrodo Revestido, Efeito Joule e Porosidade.*

1. INTRODUÇÃO

Semelhantemente às modificações na composição química do metal de solda ao longo do cordão que ocorrem durante a soldagem ao ar citadas por Bracarense⁽¹⁾, Pessoa et al⁽²⁾ constataram que a porosidade reduz ao longo de cordões sobre chapa feitos em ambiente aquático. Nas soldas ao ar, constatou-se que ocorrem mudanças significativas na microestrutura e nas propriedades mecânicas devido às variações nos teores de oxigênio, manganês e silício. Foi observado também que a variação é maior para valores mais altos de corrente (150 A) e que, nessa condição, os teores de manganês e silício ao longo do cordão de solda aumentaram respectivamente 7,1 e 10,7% para o eletrodo E6013 e 6,3 e 14,5% para o eletrodo E7018.

A ocorrência desse fenômeno está relacionada ao aquecimento do eletrodo, principalmente por efeito joule, que faz com que o tamanho das gotas de metal líquido seja maior no final do eletrodo, diminuindo o potencial de oxigênio com o aumento do tempo de soldagem.

Nas soldas subaquáticas, a quantidade de oxigênio presente na poça de fusão é muito elevada, devido à dissociação da água no arco elétrico, fazendo com que o potencial de oxigênio não seja o principal mecanismo responsável pela variação da porosidade, sendo, provavelmente, o aumento no tamanho das gotas, devido ao aquecimento do eletrodo por efeito Joule, o fator preponderante para a redução da porosidade ao longo do cordão de solda.

Segundo Ibarra et al⁽³⁾ o fato de as soldas molhadas apresentarem propriedades mecânicas inferiores às soldas ao ar é explicado através dos resultados das reações químicas entre o oxigênio, hidrogênio e carbono que acabam por envolver os outros elementos importantes presentes na poça de fusão. Christensen⁽⁴⁾ cita que a variação dos teores de manganês e carbono afeta diretamente a temperabilidade do metal de solda enquanto que a variação do teor de oxigênio altera a tenacidade do mesmo, normalmente o aumento do teor de oxigênio promove uma redução da tenacidade.

Outra grande responsável pela redução dos valores das propriedades mecânicas é a porosidade. Liu et al⁽⁵⁾ afirmam que a influência da porosidade no metal de solda é semelhante à que acontece em aços sinterizados onde a porosidade acaba provocando a redução dos limites de escoamento e ruptura, módulo de Young, ductilidade e tenacidade. Os mesmos autores afirmam que os principais fatores que afetam a porosidade do metal de solda são: Profundidade (pressão), tipo de revestimento do eletrodo e estabilidade do arco.

Uma vez que foi constatado que a porosidade reduz ao longo de cordões de soldas subaquáticas molhadas feitos sobre chapa, tornou-se necessário estudar o comportamento da porosidade em soldas multipasses e sua influência nas propriedades mecânicas do metal de solda.

O objetivo deste trabalho é relatar e discutir a influência das variações que ocorrem no eletrodo revestido durante a soldagem molhada sobre a porosidade no metal de soldas multipasses tendo como base os resultados obtidos através do método de análise da porosidade em seções transversais e ensaios mecânicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Três tipos de aço normalmente aplicados em plataformas marítimas foram utilizados. ASTM A-36 e A-572 grau 50 e API 5L grau b com limites de escoamento de 250, 345 e 250MPa e limite máximo de resistência de 400-550, 450 (mínimo) e 400-550MPa respectivamente.

Os corpos de prova para deposição em chanfro V a 45° tinham 12,7mm de espessura para aços ASTM A-36 e A-572 e 18,0mm para o API 5L, 160,0mm de largura, 250,0mm de comprimento, abertura de raiz de 6,0mm com cobre-junta como mostrado na Figura 1.

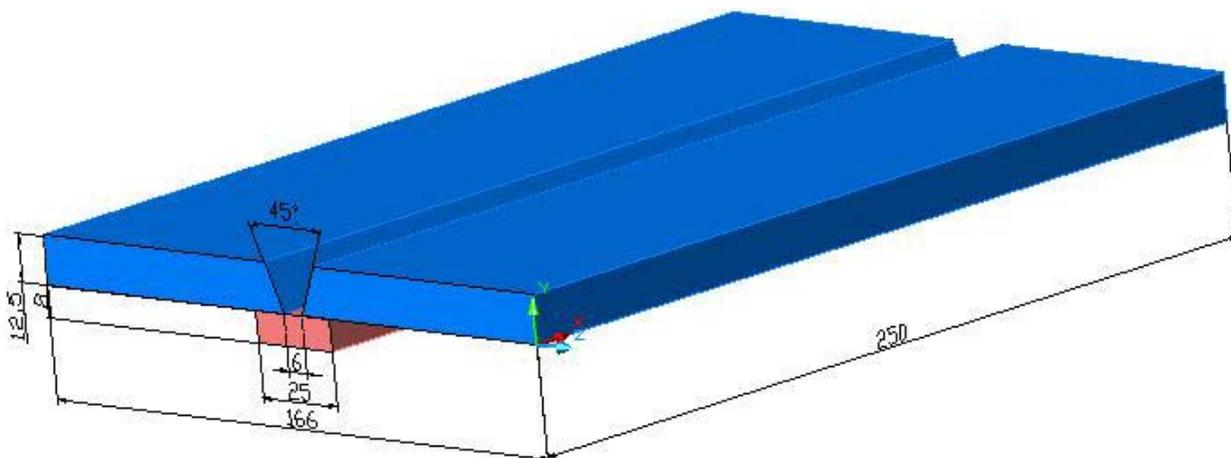


Figura 1 – Corpos de prova utilizados para a produção das soldas

Os consumíveis utilizados tinham alma de 5,0mm de diâmetro e 250 e 350mm de comprimento para o E6013 e E7024 respectivamente. Os eletrodos foram protegidos com verniz vinílico Tubolit VVE 815 para evitar a decomposição do revestimento.

A água utilizada nos experimentos foi tratada. A fim de garantir repetibilidade nos resultados e permitir que futuramente seja possível comparar estes resultados de soldas feitas em água salgada, a água utilizada para os experimentos foi constantemente (após 4 ou 5 soldas) substituída por água nova.

Para simulação das operações de soldagem molhada nas profundidades de 50 e 100m foi utilizada uma câmara hiperbárica que permite operar com pressões de trabalho de até 20 atmosferas.

As soldas foram realizadas através de um dispositivo mecanizado para soldagem com eletrodos revestidos (Pat. Req. Nº PJ 001331) em conjunto com uma fonte de soldagem eletrônica – LINCOLN ELECTRIC, modelo POWER WAVE 450. Esta fonte tem como tensão de circuito aberto de 75V e faixa de corrente para eletrodos revestidos de 30 a 450A.

Os valores de corrente aplicados para cada eletrodo e profundidade foram os mesmos utilizados para a realização dos cordões sobre chapa, mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de corrente para os eletrodos e profundidades

	E6013		E7024	
Profundidade (m)	50	100	50	100
Corrente (A)	260	280	310	310

Utilizou-se polaridade inversa (DCEP), com velocidade de soldagem variando entre 3,0 e 7,0mm/s dependendo do tipo de eletrodo, corrente e profundidade.

Foram realizados, em média 10 passes para preenchimento do chanfro, todos começando e terminando nos mesmos locais. Para cada condição realizou-se uma solda, totalizando-se 6 chapas que foram radiografadas e cortadas para a preparação dos corpos de prova como mostrado na Figura 2.

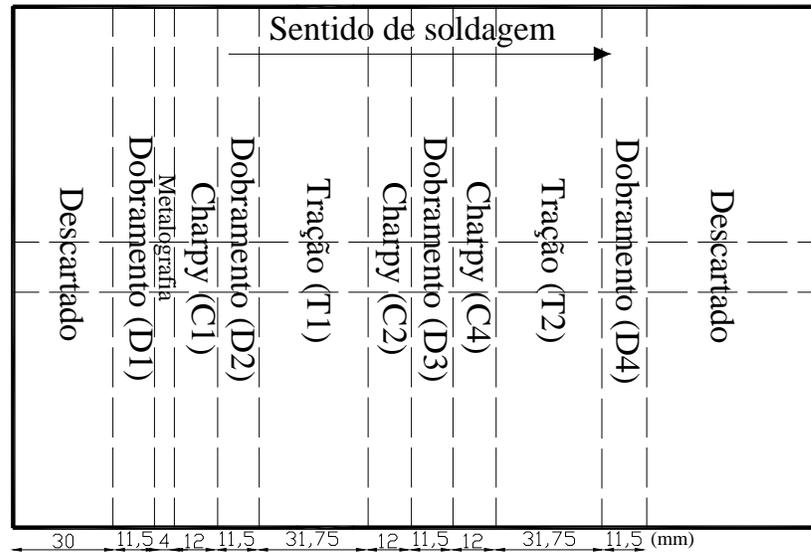


Figura 2 – Metodologia de retirada das amostras da chapa soldada

Todos os corpos de prova para os ensaios mecânicos foram produzidos seguindo-se as orientações da norma ASME de 1998⁽⁶⁾ com as dimensões em milímetros mostradas nas Figuras 3 a 5.

Os ensaios de dobramento foram feitos com cutelo de 85,7mm e os ensaios charpy foram feitos a 0° C.

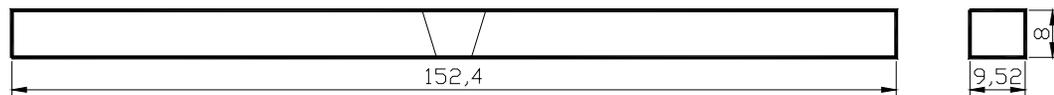


Figura 3 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de dobramento

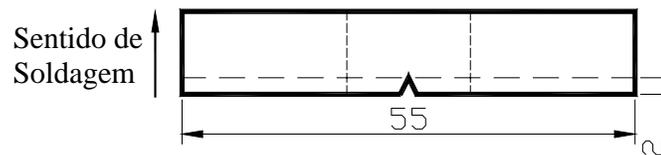


Figura 4 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio charpy “sub size”

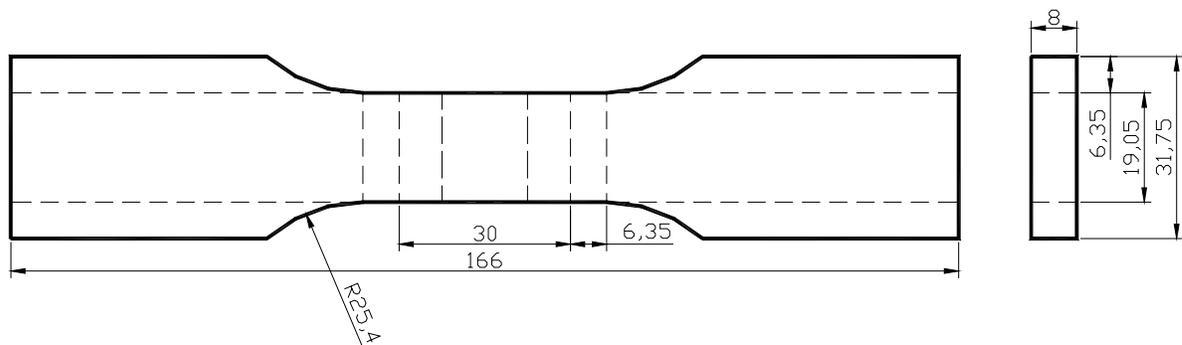


Figura 5 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração

A porosidade foi calculada na seção transversal dos corpos de prova de dobramento utilizando-se de um programa de computador que calcula e faz a proporção entre a área dos poros e a área de solda.

Como foram retirados quatro corpos de prova de dobramento em cada chapa (duas no início e duas no final da solda como mostrado na Figura 2) foi possível estudar a variação da porosidade ao longo da solda.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As radiografias mostraram que ocorre uma redução tanto na quantidade quanto no tamanho dos poros ao longo do cordão de solda como mostrado nas Figuras 6 e 7. Fotografias e medições da porosidade de seções transversais e de topo das amostras de dobramento e charpy confirmaram a tendência observada visualmente nas radiografias como exemplificado nas Figuras 8 e 9.



Figura 6 – Radiografia de solda feita a 50 metros em aço A-36 com eletrodo E6013



Figura 7 – Radiografia de solda feita a 50 metros em aço A-36 com eletrodo E6013

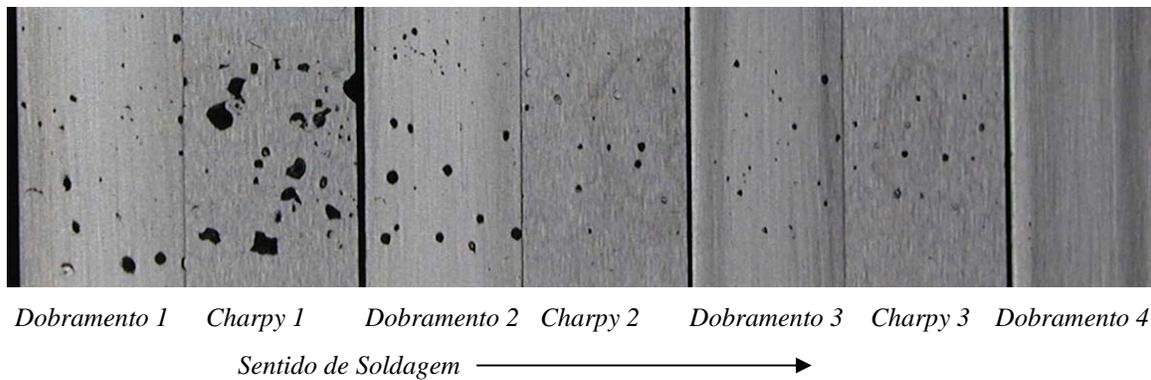


Figura 8 – Fotografia das seções longitudinais (vista de topo) de amostras de solda feita a 50 metros com eletrodo E7024 em aço A-572

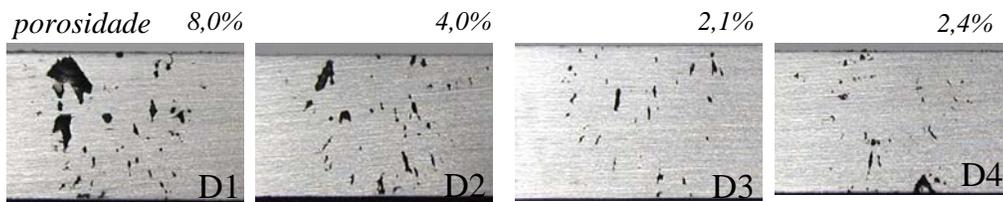


Figura 9 – Fotografia com medidas de porosidade das seções transversais (no sentido de soldagem) de amostras de solda feita a 100 metros com eletrodo E6013 em aço A-36

Nenhuma das amostras de dobramento foi aprovada no teste. Todas abriram trinca antes de dobrar 180°, evidenciando a fragilidade da junta soldada nessas condições, principalmente devido à alta taxa de resfriamento que promove o surgimento de martensita, alta porosidade e baixa tenacidade. Foram coletados os valores de carga máxima até a abertura da trinca no teste de dobramento, esses resultados estão mostrados nos gráficos das Figuras 10 e 11 juntamente com os resultados das medições de porosidade nas seções transversais dos mesmos, é possível visualizar que a porosidade reduz ao longo do cordão e os valores de carga máxima suportada durante o teste de dobramento aumentam ao longo do mesmo.

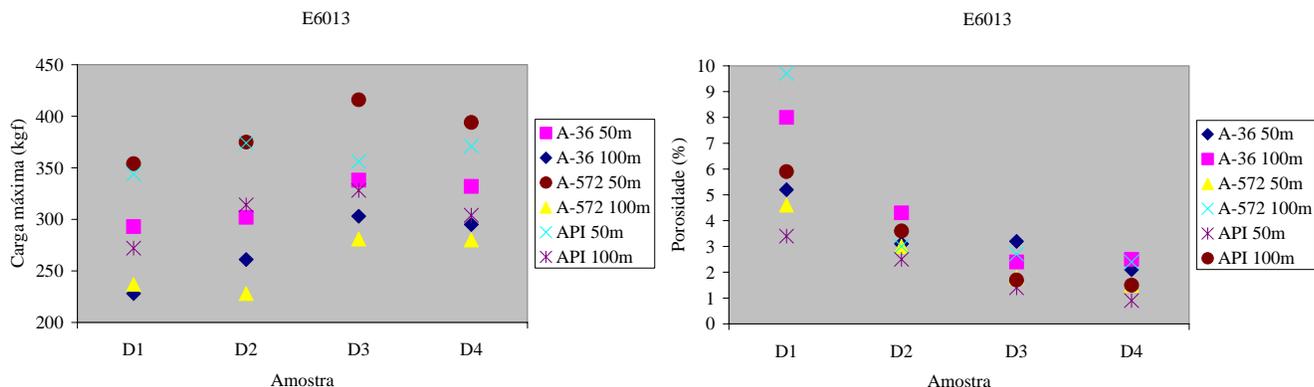


Figura 10 – Resultados para carga máxima no ensaio de dobramento e porosidade em soldas feitas a 50 e 100 metros com eletrodo E6013

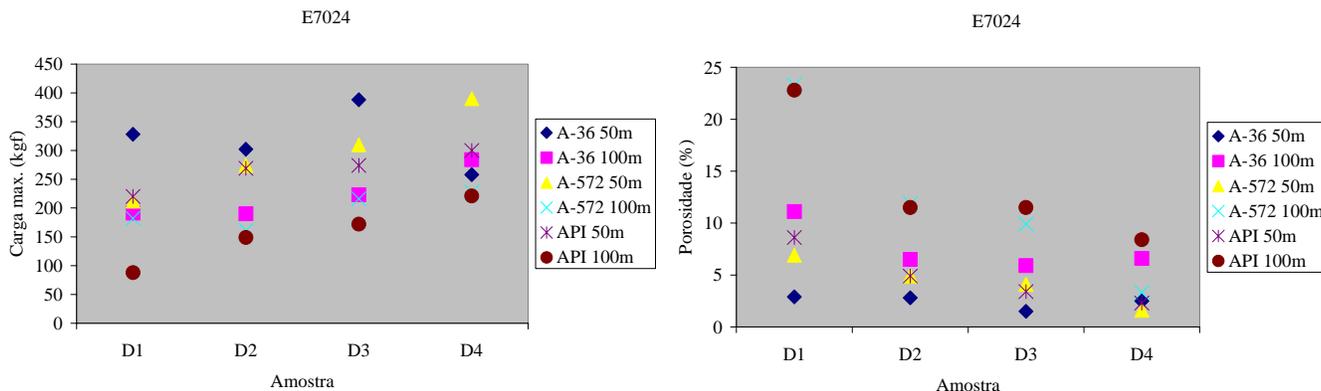


Figura 11 – Resultados para carga máxima no ensaio de dobramento e porosidade em soldas feitas a 50 e 100 metros com eletrodo E7024

Com o eletrodo E6013 foi possível produzir soldas que atendem à norma AWS D3.6M⁽⁷⁾ quanto a porosidade para soldas com classificação B, enquanto que, para o eletrodo E7024, somente as soldas feitas a 50 metros tiveram porosidade inferior a 5% como exigido pela norma.

Observa-se também que os valores de carga máxima suportada pelas amostras são sempre maiores para as soldas feitas a 50 do que a 100 metros, mostrando a relação entre a maior porosidade e perda de elementos de liga nas soldas feitas em maiores profundidades e a queda da resistência da junta soldada.

Os resultados dos ensaios de tração confirmaram a tendência observada nos testes de dobramento, ou seja, as amostras retiradas do final do cordão de solda apresentaram maior resistência em comparação com as amostras retiradas no início do cordão como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados para o ensaio de tração para soldas subaquáticas

Chapa	Corpo de Prova	Tensão de ruptura	
		E6013	E7024
A36, 50m	T1*	450,9	461,2
	T2**	425,5	403,5
A36, 100m	T1	393,9	263,3
	T2	425,5	326,5
A572, 50m	T1	456,8	430,4
	T2	467,8	473,9
A572, 100m	T1	381,8	292,1
	T2	409,0	363,5
API, 50m	T1	429,5	412,4
	T2	455,1	457,5
API, 100m	T1	393,6	295,9
	T2	419,0	311,1

*O corpo de prova T1 (E6013) escapou durante o teste e, devido ao encruamento, apresentou um valor de tensão de ruptura maior que o T2.

**O corpo de prova T2 (E7024) continha um defeito de usinagem que influenciou negativamente no valor da tensão de ruptura.

Todos os corpos de prova apresentaram fratura frágil no metal de solda, mostrada na Figura 12, com alongamento mínimo.

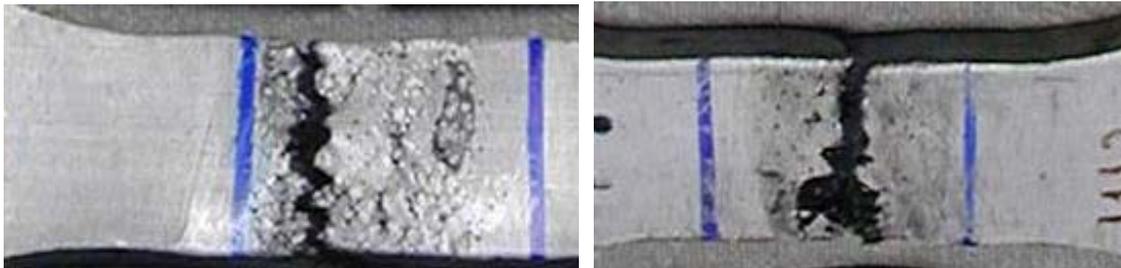


Figura 12 – Fotografias de fraturas em ensaio de tração de corpos de prova feitos com eletrodo E6013 a 50 metros

Os valores encontrados estão próximos dos relatados pelos pesquisadores para soldas a 50 metros (oscilam entre 400 e 500MPa) e um pouco abaixo das poucas soldas realizadas a 100 metros (em torno de 400Mpa) segundo Rowe e Liu⁽⁸⁾. Para os corpos de prova soldados com eletrodo E6013 observa-se que nenhum corpo de prova produziu resultados dentro da faixa especificada pelo fabricante (LR 480-250MPa), catálogo ESAB⁽⁹⁾, o mesmo ocorrendo para as soldas feitas com o eletrodo E7024 (LR 550-600MPa), evidenciando os efeitos da porosidade e alta taxa de resfriamento sobre o metal de solda.

Os resultados dos ensaios Charpy foram muito aleatórios e não revelaram nenhuma relação entre a redução da porosidade ao longo do cordão e a energia absorvida. Calculou-se a média dos dois resultados mais próximos de três realizados, mostrado nas Figuras 13 e 14.

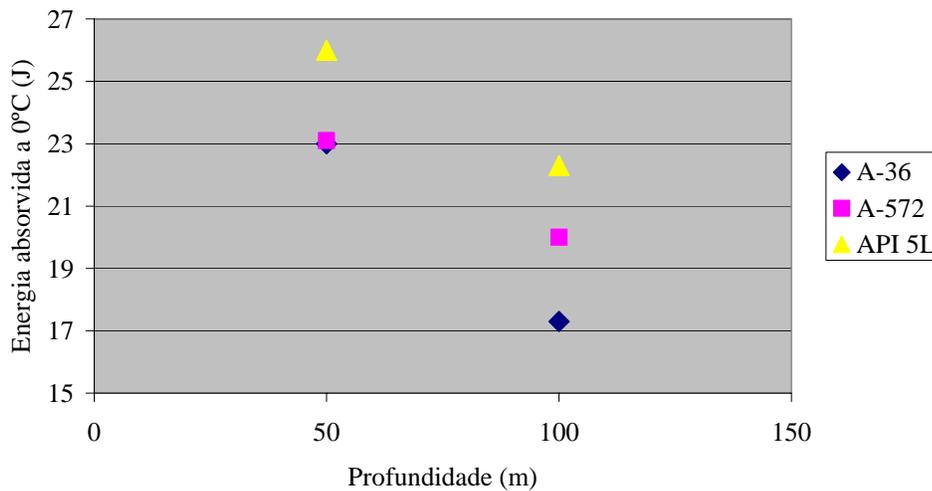


Figura 13 – Energia absorvida por metal de solda de eletrodo E6013 a 50 e 100 metros de profundidade

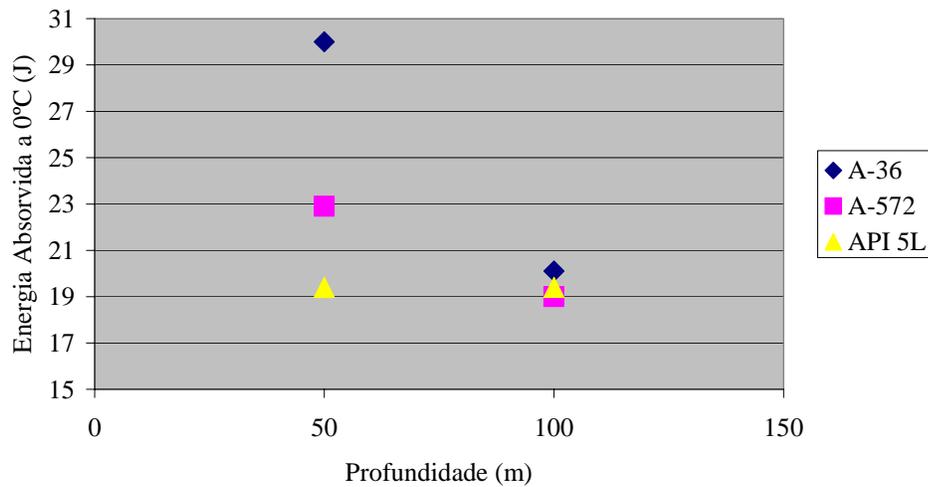


Figura 14 – Energia absorvida por metal de solda de eletrodo E7024 a 50 e 100 metros de profundidade

É possível observar que a energia absorvida decresce com o aumento da profundidade e que esta tendência ocorre para todos os eletrodos e todos os aços exceto para o eletrodo E7024 nas soldas realizadas no aço API 5L (para esse caso dos três resultados obtidos descartou-se 25,4 e 17,0J para 50 e 100m respectivamente, evidenciando a tendência observada para as outras soldas). Comparando com a literatura nota-se que os resultados alcançados para 50 metros estão próximos dos encontrados para eletrodos oxidantes, sem a adição de níquel, feitos a 1,1 metro de profundidade segundo Pope et al⁽¹⁰⁾ e de eletrodos experimentais e comerciais testados a 50 metros (próximo de 28J a 0°) segundo Rowe e Liu⁽⁸⁾ e Szelagowski et al⁽¹¹⁾. Para 100 metros os resultados encontrados na literatura [8] oscilam em torno de 20J a 0°, bem próximo dos resultados apresentados pelos eletrodos E6013 e E7024.

As propriedades mecânicas das soldas subaquáticas dependem fortemente da profundidade e do conseqüente aumento da oxidação e da porosidade. A atividade do oxigênio e hidrogênio na poça de fusão aumenta proporcionalmente à pressão total. A presença desses elementos na poça de fusão causa a redução de elementos de liga com afinidade para reagir com o oxigênio provocando a redução na temperabilidade do metal de solda e promovendo o surgimento de uma microestrutura grosseira com grãos de ferrita primária. Esse tipo de microestrutura reduz a resistência mecânica (tensão limite de escoamento e de resistência) e os valores de tenacidade comparando-se com uma microestrutura refinada de ferrita acicular. Grandes quantidades de hidrogênio na poça de fusão promovem o aumento da porosidade do metal de solda que provoca uma redução da seção útil do corpo de prova no ensaio de tração, implicando em redução na tenacidade e resistência.

4. CONCLUSÃO

Como resultado das análises feitas é possível concluir que:

- 1 – A porosidade reduz ao longo do cordão de soldas multipasses quando as soldas são feitas sempre no mesmo sentido em relação à chapa.
- 2 – As propriedades mecânicas como resistência mecânica nos ensaios de tração e dobramento são influenciadas pela variação da porosidade e apresentam maiores valores nas amostras retiradas nas partes finais das soldas.
- 2 – A porosidade aumenta com a profundidade.
- 3 – O eletrodo E6013 produz soldas, com a aplicação do sistema mecanizado, que atendem a norma AWS D3.6 M para soldas classe B, no que diz respeito à porosidade, abaixo de 5% tanto a 50 quanto a 100 metros de profundidade.
- 4 – O eletrodo E7024 produz soldas, com o uso de sistema mecanizado, que atendem a norma AWS D3.6 M para soldas classe B, no quesito porosidade apenas a 50 metros de profundidade.
- 5 – As soldas produzidas atendem a norma AWS D3.6 M para soldas classe B, nos testes de impacto para a temperatura de 0°.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus sinceros agradecimentos à USIMINAS, à DELP engenharia S.A. e a ESAB S. A. pelo apoio fornecendo material para os testes. Adicionalmente gostariam de agradecer ao engenheiro Roberto Francisco de Lorenzo e ao soldador Geraldo Scoralick, ambos do CDTN, pelo apoio e companheirismo e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo fornecimento de bolsas. Os autores também gostariam de agradecer ao Dr. Charles Smith do MMS - Minerals Management Service - USA - pelo suporte financeiro ao projeto cuja referencia é PO 01 01PO18117 e à CSM - Colorado School of Mines. Os autores também gostariam de reconhecer o apoio laboratorial do LRSS/UFMG – Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRACARENSE, A. Q. **Shielded Metal Arc Welding Electrode Heating Control by Flux Ingredients substitution**. 1994. 268 p. Tese (Doutorado em metalurgia). Colorado School of Mines. USA, 1994.
2. PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P. **Estudo da Variação da Porosidade ao Longo do Cordão de Soldas Subaquáticas Molhadas, XXX CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem**. Rio de Janeiro – RJ, 2004, 8 p.
3. 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, Louisiana, 1994. pp 49-67.
4. CHRISTENSEN N. **The Metallurgy of MMA Hyperbaric Welding**, SINTEF report N°. STF34 F83032, Trondheim, 1983.
 5. Liu S., Pope, A.M., and Daemen, R., , “**Welding Consumables and Weldability**”, International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures, Louisiana, USA, 1994. pp.321-350.
 6. ASME, **Boiler & Pressure Vessel Code**, An International Code, 1998.
 7. AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for Underwater Welding**, ANSI/AWS D3.6M:1999.
 8. ROWE, M. D., LIU, S. **Recent Development in Underwater Wet Welding**, Science and Tecnology of Welding and Joining, Vol. 6, No. 6. , 2001. pp 387-396.
 9. Catálogo de produtos ESAB. Disponível em: www.esab.com.br. Acessado em 09 de 2004.
 10. 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, American Society of Mechanical Engineering (ASME), August, USA, 1995a. pp. 102-117.
 11. SZELAGOWSKI, P., PACHNIUK, I., STUHF, H. **Wet Welding for Platform Repair**. Proc. 2nd Int. Offshore and Polar Engineering Conf., San Francisco, CA, International Society of Offshore and Polar Engineers, 1992. pp. 208-215.

POROSITY VARIATION ALONG MULTIPASS UNDERWATER WET WELDING AND ITS INFLUENCE ON MECHANICAL PROPERTIES

Ezequiel Caires Pereira Pessoa – ezequiel@demec.ufmg.br

Alexandre Queiroz Bracarense – bracarense@ufmg.br

Eduardo Maluf Zica - e.maluf@ig.com.br

Federal University of Minas Gerais - UFMG, Laboratory of Robotics, Welding and Simulation. Mechanical Engineering Department, Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, 31270-901 – Belo Horizonte – MG. Brazil. Tel. (31) 3499-5245; fax.: (31) 3443 3783

Stephen Liu – sliu@mines.edu

Faustino Perez-Guerrero – fperezgu@mines.edu

Colorado School of Mines – CSM, Center for Welding, Joining and Coatings Research. Golden, CO 80401, USA

Abstract. *The objective of this work is to evaluate, through the analysis of the porosity in traverse sections method and charpy v-notch tests, side bending tests and tensile tests, the influence of the variations that happen in the covered electrode during the wet welding on the multi pass V-groove weld metal porosity at 50 and 100 meters depth using commercial covered electrodes (E6013 and E7024) in three different steels (A-36, A-572 and API 5L grade B) used in structural applications in the construction of offshore platforms. A pressurized chamber with 20 atmospheres capacity was used to simulate the depth with fresh wate. To carry through welds a gravity feeding system with capacity to open the electric arc and make the weld automatically was used. Samples for measurement of the porosity were removed in four different points along the weld and the obtained results show that the porosity reduces a long of weld bead. The mechanical tests show that mechanical properties are better in the end of weld.*

Key-Words: *Underwater Wet Welding, Covered Electrode, Joule effect and Porosity.*