

# ESTUDO DA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DO METAL DE SOLDA DEPOSITADO POR ELETRODOS REVESTIDOS IMPERMEÁVEIS DO TIPO BAIXO HIDROGÊNIO<sup>1</sup>

Cláudio Turani Vaz<sup>2</sup>

Ivanilza Felizardo<sup>3</sup>

Alexandre Queiroz Bracarense<sup>4</sup>

Ezequiel Caires Pereira Pessoa<sup>5</sup>

## Resumo

Eletrodos revestidos básicos convencionais requerem cuidados especiais quanto armazenagem para evitar incorporação de hidrogênio ao metal de solda. Neste artigo foi avaliada a microestrutura e propriedades do metal de solda depositado por eletrodos revestidos básicos onde os aglomerantes usuais foram substituídos por polímeros com o objetivo de tornar o revestimento impermeável. O metal de solda depositado por esses eletrodos foi submetido aos ensaios de tração, impacto (Charpy – entalhe V), hidrogênio difusível e avaliação metalográfica. A microestrutura do metal de solda depositado pelos eletrodos impermeáveis apresentou os constituintes e morfologia usualmente encontrados nos eletrodos convencionais. Entretanto, foi observada redução das frações volumétricas de ferrita primária de contorno de grão e de ferrita com segunda fase alinhada e aumento da fração volumétrica de ferrita acicular em comparação ao metal de solda depositado com eletrodo convencional. O teor de hidrogênio do metal de solda do eletrodo impermeável foi consideravelmente inferior ao obtido com eletrodos revestidos convencionais. Não foi observado aumento no teor de hidrogênio do metal de solda após exposição do eletrodo impermeável à umidade por longos períodos de tempo. Limites de escoamento e de resistência, alongamento e tenacidade ao impacto do metal de solda foram satisfatórios quando comparados aos mínimos requeridos para eletrodos da classe E7018.

**Palavras-chave:** Eletrodos revestidos impermeáveis; Polímeros; Hidrogênio; Ferrita acicular.

## LOW HYDROGEN IMPERMEABLE COVERED ELECTRODES: WELD METAL STRUCTURE AND PROPERTIES

### Abstract

Conventional basic covered electrodes require special handling and storage conditions to avoid hydrogen cold cracking. In this paper were evaluated the weld metal microstructure and properties obtained by covered electrodes where the usual binders (sodium and potassium silicates) were changed by polymers to make it impermeable. The weld metal was submitted to tension, impact (Charpy – V notch) and diffusible hydrogen testes and microstructural evaluation. The microstructure showed the typical morphology and constituents. However, the grain boundary and aligned second phase ferrite volume fraction decreased and acicular ferrite fraction increased in comparison with same class conventional covered electrodes. The impermeable covered electrode weld metal diffusible hydrogen was considerable low in comparison with the conventional basic covered electrodes (less than 4ml/100g). The hydrogen content didn't increase after moisture exposition by long time period. The weld metal yield and tensile strength, elongation and impact toughness met the E7018 requirements.

**Key words:** Covered electrodes; Polymers; Hydrogen; Acicular ferrite.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, MSc (UFMG/PPGMEC, IFMG).

<sup>3</sup> Engenheira Mecânica, Dr. (ELBRAS)

<sup>4</sup> Físico, PhD (UFMG)

<sup>5</sup> Engenheiro Mecânico, Dr. (IFMG).

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem com eletrodos revestidos (SMAW) foi desenvolvido no início do século XX. Nesse processo a união é obtida pela fusão localizada através do aquecimento por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo revestido consumível e a peça. Mesmo sendo um processo de soldagem de menor produtividade quando comparado a soldagem MIG/MAG (GMAW) e com arames tubulares (FCAW) ele continua sendo, na atualidade, uma alternativa interessante em operações de fabricação e manutenção. Esse fato está associado, principalmente, a sua versatilidade.

Os eletrodos podem ser classificados, quanto às matérias primas empregadas no revestimento, em: rútilicos, celulósicos, básicos ou oxidantes. Em soldagens onde é necessário garantir altos níveis de sanidade do metal de solda, ou seja, de grande “responsabilidade”, é recomendado o emprego de eletrodos do tipo básico. Sua utilização proporciona a obtenção de soldas caracterizadas por propriedades mecânicas diferenciadas e baixos teores de hidrogênio difusível (inferiores a 8ml/100g de metal depositado). Entretanto, o caráter higroscópico de alguns dos principais componentes do revestimento desse eletrodo (calcário e a fluorita), torna necessária a adoção de cuidados especiais antes de sua utilização visando evitar a incorporação de hidrogênio ao metal de solda. Esses cuidados incluem a armazenagem em condições controladas, secagem e manutenção em estufas.<sup>(1)</sup>

Estudos recentes realizados por Fichel et al.<sup>(2)</sup> indicaram a viabilidade técnica do emprego, na soldagem subaquática molhada, de eletrodos revestidos rútilicos onde o aglomerante tradicional foi substituído por polímeros. A utilização dessa nova tecnologia permitiu a obtenção de eletrodos com revestimento resistente à água. A redução ou eliminação total da secagem durante a fabricação desses eletrodos (conforme Figura 1) possibilitou também redução no custo de produção.

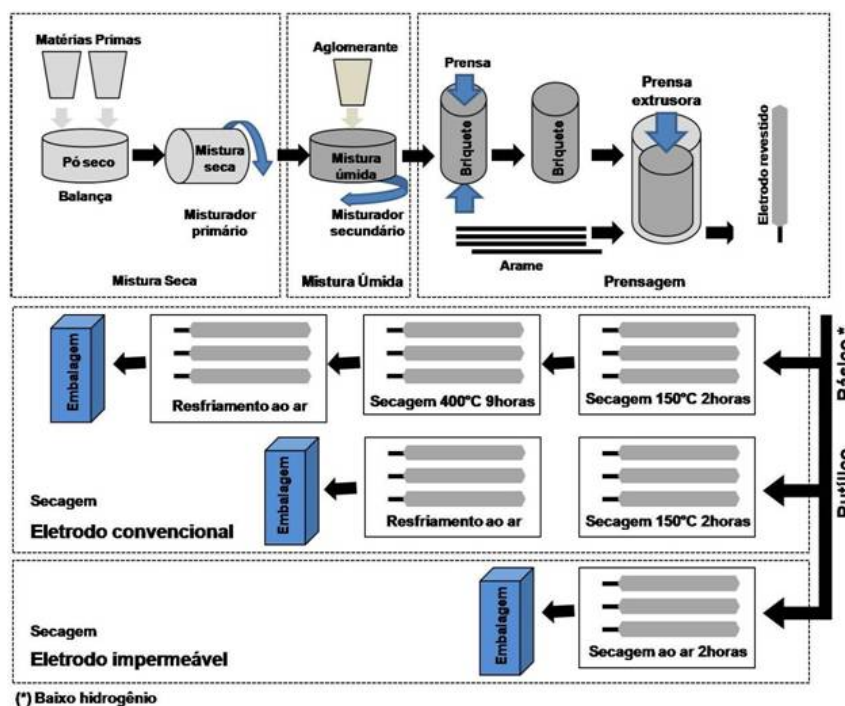


Figura 1. Fluxograma de produção dos eletrodos revestidos convencionais e impermeáveis.

Os resultados satisfatórios obtidos motivaram o desenvolvimento de eletrodos impermeáveis básicos para soldagem convencional. Nessa aplicação, para eliminar uma das principais fontes de hidrogênio, é necessário garantir que o revestimento dos eletrodos apresente baixos teores de umidade.<sup>(3)</sup>

Vaz et al.<sup>(4)</sup> desenvolveram, em escala de laboratório, um eletrodo revestido impermeável de baixo hidrogênio. Como ponto de partida foi adotada a fórmula do eletrodo revestido convencional classe E7018. Ajustes foram realizados na fórmula visando à obtenção de um consumível com características operacionais mínimas necessárias ao seu emprego. A análise metalográfica preliminar do metal de solda indicou microestrutura com morfologia e constituintes usuais. Entretanto, foi encontrada uma maior fração volumétrica de ferrita acicular que a usualmente observada no metal de solda depositado por eletrodos revestidos básicos classe E7018.

O objetivo desse estudo foi avaliar o metal de solda depositado pela formulação do eletrodo revestido de melhor desempenho no estudo de Vaz et al.<sup>(4)</sup> O metal de solda produzido foi submetido à análise química e metalográfica, ensaio de hidrogênio difusível, tração (visando determinar limite de escoamento, resistência e alongamento) e tenacidade ao impacto (Charpy – entalhe V).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

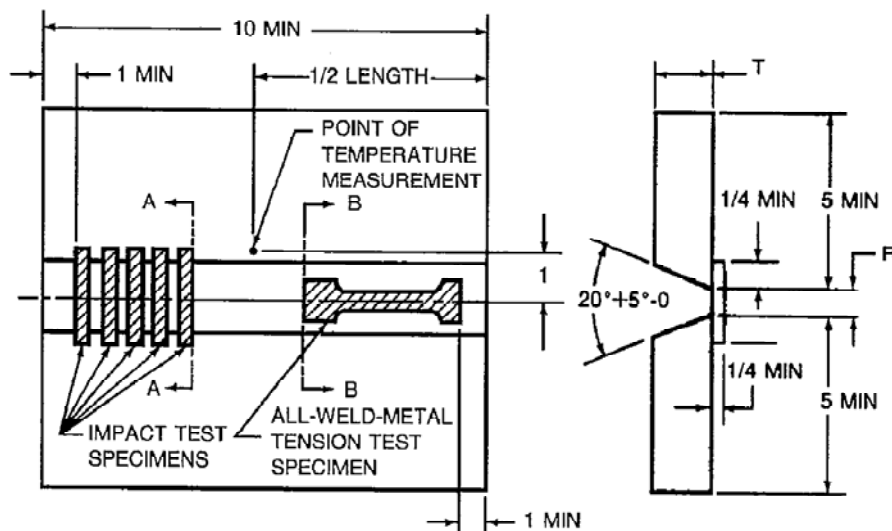
Para avaliação da estrutura e propriedades do metal de solda foram produzidos, em escala industrial, eletrodos revestidos impermeáveis utilizando a formulação de melhor desempenho do estudo de Vaz et al.<sup>(4)</sup>

A deposição do metal de solda para determinação da composição química foi realizada conforme proposto pela especificação AWS A5.1.<sup>(1)</sup> A análise do teor dos elementos químicos foi executada através de espectrofotometria de emissão ótica.

Para a análise metalográfica, cortes transversais na parte central do cordão de solda foram executados e amostras foram retiradas. Essas foram lixadas, polidas, atacadas em Nital 2%, levadas ao microscópio ótico e fotografadas com ampliação de até 1000 vezes. Metalografia quantitativa foi realizada com o intuito de verificar o percentual de ferrita acicular no metal de solda depositado de acordo com a metodologia proposta pelo IIW.<sup>(4)</sup> A dureza do metal de solda foi feita empregando o método Vickers com carga de 100g.

O teor de hidrogênio difusível do metal de solda foi determinado através de cromatografia gasosa conforme AWS A4.3.<sup>(5)</sup> Ensaios foram realizados com eletrodos impermeáveis logo após sua produção e após sua exposição à atmosfera por um período de 30 dias. Como não foi monitorada a umidade relativa do ambiente durante o período de exposição, foi determinado o teor de hidrogênio do metal de solda depositado por eletrodos classe E7018 imediatamente após a realização da secagem conforme recomendado pelo fabricante e após 30 dias de exposição desses sob as mesmas condições atmosféricas do eletrodo impermeável.

Chapas de teste para retirada dos corpos de prova destinados a realização dos ensaios de tração e impacto do metal de solda foram soldadas conforme proposto pela especificação AWS A5.1<sup>(1)</sup> (Figura 2).



**Figura 2.** Chapa de teste para retirada de corpos de prova de tração e impacto do metal de solda. (dimensões em polegadas).

### 3 RESULTADOS

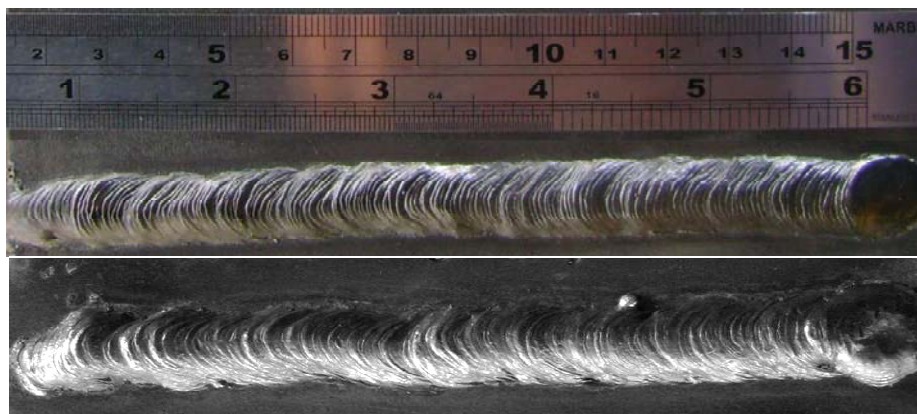
A Tabela 1 apresenta os resultados da análise química do metal de solda depositado pelo eletrodo impermeável e pelo eletrodo E7018 padrão. São apresentados também os valores especificados para eletrodos da classe E7018.

**Tabela 1.** Análise química em peso do metal de solda depositado pelo eletrodo impermeável

Elemento	Eletrodo Impermeável	Eletrodo E7018 padrão	Especificação E7018*
C	0,16	0,07	0,15
Si	0,67	0,55	0,75
Mn	1,29	1,40	1,6
P	0,03	0,03	0,035
S	0,01	0,01	0,035
Cr	0,03	0,02	0,2
Ni	0,01	0,01	0,3
Mo	0,01	0,01	0,3
V	0,01	0,01	0,08
<b>Mn+Cr+V+Ni+Mo</b>	<b>1,35</b>	<b>1,45</b>	<b>1,75</b>

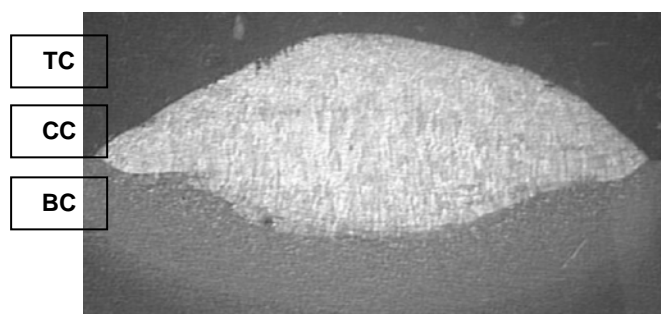
\* Valores máximos estabelecidos por norma

A Figura 3 apresenta o aspecto visual do cordão de solda depositado com o eletrodo revestido impermeável e com o eletrodo básico convencional classe E7018. Ambos cordões foram produzidos pelo mesmo soldador em nas mesmas condições de soldagem para ambos tipos de eletrodos.



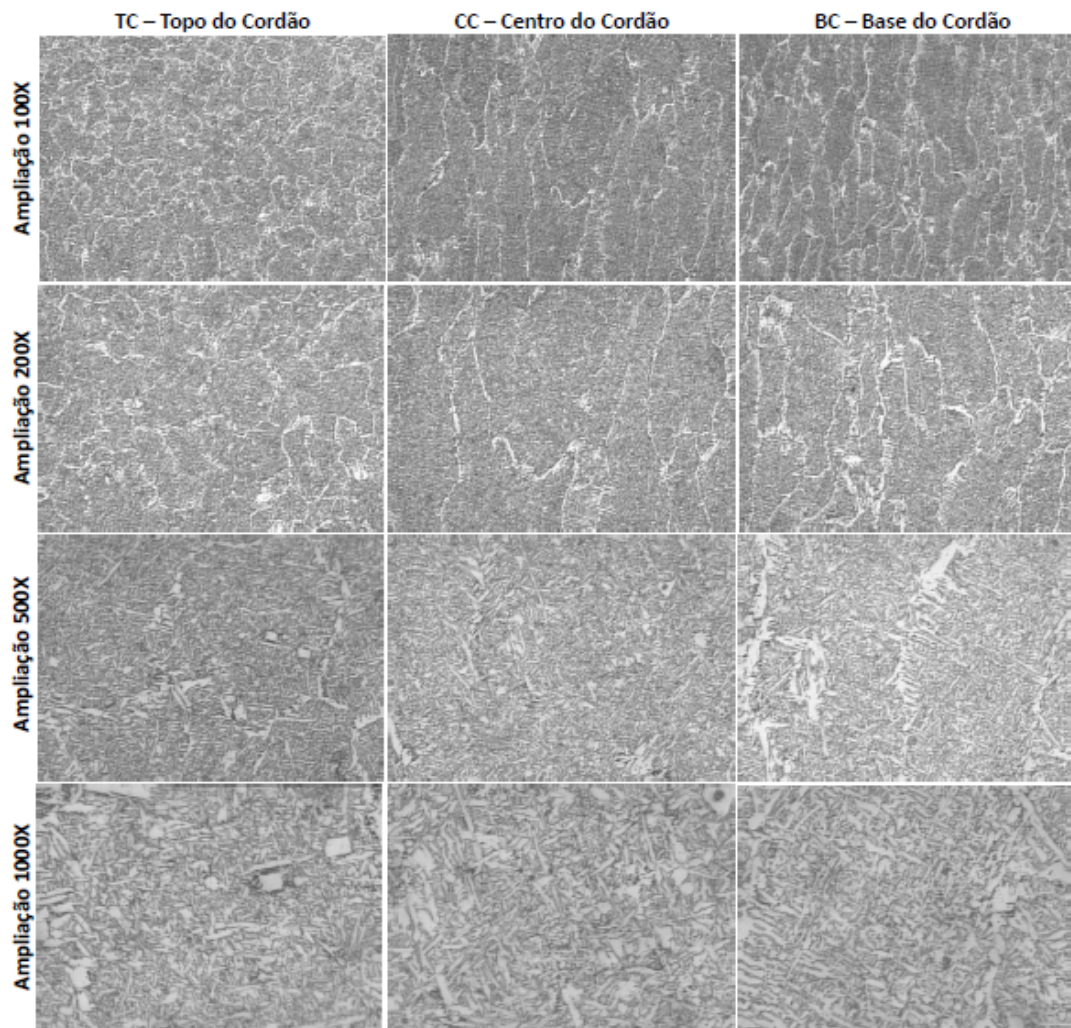
**Figura 3.** Aspecto visual do cordão de solda depositado sobre chapa com eletrodo impermeável (A) e classe E7018 padrão (B).

A Figura 4 apresenta a macrografia da seção transversal do cordão de solda depositado sobre chapa com eletrodo revestido impermeável, indicando as regiões transversais ao cordão onde foram realizadas análises microestruturais. Na Figura 5 são apresentadas, com ampliação de 100, 200, 500 e 1.000 vezes, as microestruturas correspondentes.

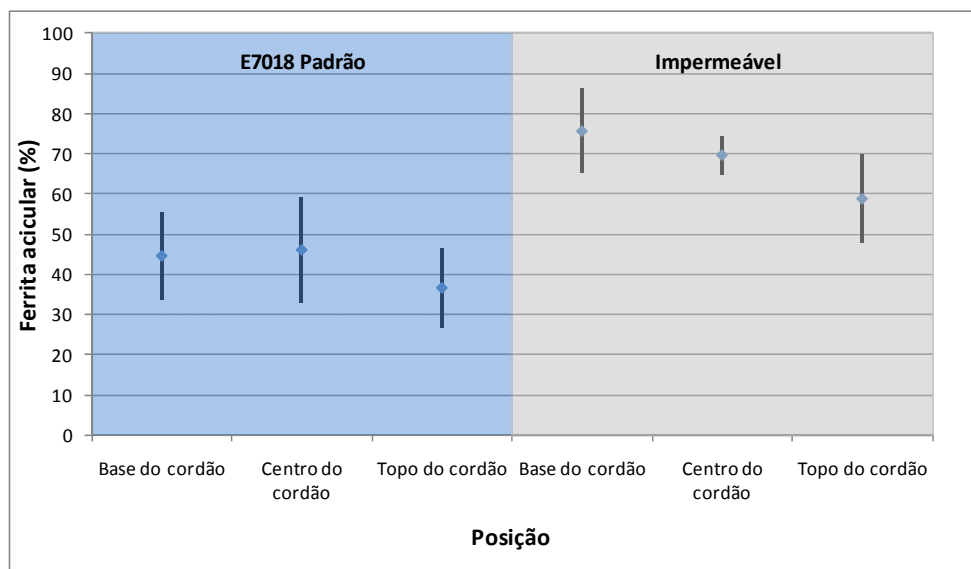


**Figura 4.** Macrografia do metal de solda depositado pelo eletrodo revestido impermeável.

A fração volumétrica de ferrita acicular nas diferentes regiões do metal de solda é apresentada na Figura 6 e a Tabela 2 apresenta os valores das medições de dureza Vickers (HV100) desse constituinte.



**Figura 5.** Microestrutura do metal de solda depositado pelo eletrodo revestido impermeável. Ampliação: 100, 200, 500 e 1.000x.



**Figura 6.** Fração volumétrica de ferrita acicular no metal de solda.

**Tabela 2.** Dureza HV100 da ferrita acicular

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
274	269	261	255	251	285	274	275	279	252	286	277	270

A Tabela 3 apresenta os resultados de propriedades mecânicas (limite de escoamento, de resistência, alongamento, redução de área e tenacidade ao impacto) do metal de solda depositado com os eletrodos impermeável e E7018 convencional além dos valores exigidos pela especificação AWS<sup>(1)</sup>. As superfícies fraturadas dos corpos de prova de Charpy ensaiados a -29°C e -45°C são apresentadas na Figura 6.

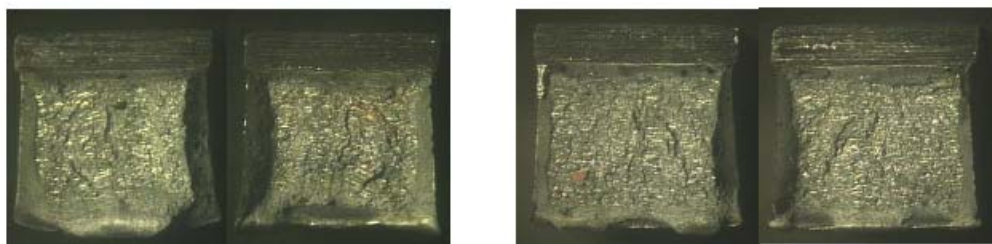
**Tabela 3.** Propriedades mecânicas do metal de solda (limite de escoamento, resistência, alongamento e tenacidade ao impacto)

Ensaio de tração	Eletrodo impermeável	Eletrodo E7018 convencional*	Especificação E7018
Limite de resistência	678 MPa	530-590MPa	490MPa**
Limite de escoamento	554 MPa	-	400MPa**
Alongamento	29 %	26-30%	22%**
Redução de área	67 %	-	

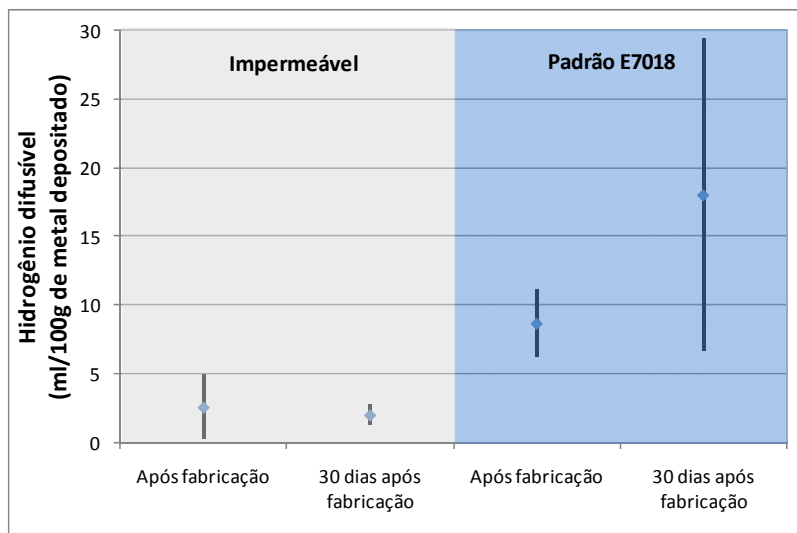
  

Tenacidade ao impacto (Charpy – entalhe V)	Eletrodo impermeável				Eletrodo E7018*	Especificação E7018
	Valores individuais		Média			
(-30°C)	56J	62J	74J	64J	90-120J	27J**
(-45°C)	30J	48J	52J	43J	Não aplicável	Não aplicável

(\*) Valores fornecidos pelo fabricante<sup>(1)</sup>; (\*\*) Valor mínimo

**Figura 7.** Superfície de fratura dos corpos de prova de impacto (Charpy - V).

No gráfico da Figura 8 são apresentados os valores de hidrogênio difusível do metal de solda dos eletrodos convencional e impermeável exatamente após a fabricação e após trinta dias de exposição à atmosfera sob as mesmas condições de temperatura e umidade relativa.



**Figura 8.** Teor de hidrogênio do metal de solda dos eletrodos revestidos impermeável e convencional e classe E7018.

#### 4 DISCUSSÃO

Pode-se observar, analisando os resultados apresentados na Tabela 1, que a composição química do metal de solda depositado com eletrodos impermeáveis encontra-se dentro dos limites especificados para a classe E7018. Em comparação a composição química do metal de solda depositado com o eletrodo revestido convencional classe E7018 somente foi verificada variação no teor de carbono.

Analisando a Figura 3 pode-se verificar que o aspecto visual do cordão de solda depositado pelo eletrodo impermeável é similar ao depositado pelo eletrodo classe E7018. Entretanto, durante a soldagem, foi possível observar que a abertura e a manutenção do arco com eletrodos impermeáveis foram realizadas com maior facilidade por parte do soldador quando comparado com o eletrodo revestido E7018. Tem-se que a microestrutura de um cordão de solda depositado por eletrodos revestidos do tipo básico E7018 é constituída principalmente por: ferrita acicular - AF, ferrita alotromórfica de contorno de grão PF(G) e de segunda fase alinhada - FS(A)<sup>(7)</sup>. A análise do gráfico da Figura 6 permite verificar que a fração volumétrica de ferrita acicular no metal de solda depositado pelo eletrodo impermeável é superior, para regiões equivalentes do metal de solda, quando comparada a do eletrodo classe E7018 avaliado. Como principal consequência, observa-se redução na fração volumétrica dos demais constituintes no metal de solda depositado pelo eletrodo impermeável. A presença de ferrita acicular em soldas é sempre desejável, pois esta fase está associada a uma maior tenacidade. Medidas de dureza Vickers realizadas em regiões do metal de solda onde foi observada a ocorrência de ferrita acicular indicaram coerentes com os obtidos por Babu.<sup>(8)</sup>

O limite de escoamento e resistência do metal de solda depositado com o eletrodo revestido impermeável encontram-se bem acima dos mínimos especificados para eletrodos classe E70XX (400 Mpa e 490 MPa respectivamente) e dos valores típicos para eletrodos E7018 informados pelo fabricante<sup>(7)</sup>. Todavia não foi notado, quando comparado aos valores típicos do eletrodo E7018, redução no alongamento percentual. Avaliando a composição química do metal de solda poderíamos associar o aumento nos limites de resistência e escoamento aos teores mais altos de silício e carbono do metal de solda depositado pelo eletrodo impermeável em comparação ao eletrodo convencional. A energia absorvida média no teste de impacto à -30°C foi



de 64J e a  $-45^{\circ}\text{C}$  foi de 43J. Esses resultados estão muito além do esperado para um metal de solda produzido por eletrodos revestidos classes E7018 (mínimo de 27J a  $-30^{\circ}\text{C}^{(1)}$ ) e E7018-1 (mínimo de 27J a  $-45^{\circ}\text{C}^{(1)}$ ).

Observa-se que os níveis de hidrogênio difusível encontrados no metal de solda produzido com eletrodo impermeável, tanto nos testados imediatamente após a fabricação quanto após trinta dias de exposição à atmosfera, são similares e muito inferiores aos encontrados no metal de solda produzido com eletrodos classe E7018, principalmente após exposição ao ambiente. Os valores obtidos para os eletrodos impermeáveis em ambas as condições (inferiores a 4ml/100g de metal depositado) são considerados excepcionalmente baixos para quando comparados a eletrodos básicos clássicos (geralmente inferiores a 8ml/100g de metal depositado). Destaca-se ainda, pelos resultados obtidos nos ensaios de hidrogênio difusível, que os eletrodos impermeáveis não necessitam de secagem em fornos e manutenção dos mesmos em estufas antes de sua aplicação.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesse trabalho permitem afirmar que:

- A composição do metal de solda depositado com os eletrodos impermeáveis se encontra dentro dos limites especificados para eletrodos da classe E7018;
- Há uma tendência, que deve ainda ser melhor compreendida, de obtenção de microestruturas com maior quantidade de ferrita acicular (superior a 25%) em comparação ao eletrodo revestido classe E7018;
- Os teores de hidrogênio difusível no metal de solda produzidos com os eletrodos impermeáveis são extremamente baixos, estando abaixo dos encontrados no metal de solda depositado por eletrodos classe E7018;
- A exposição dos eletrodos impermeáveis por períodos de tempo relativamente longos (30 dias) sob condições adversas não proporcionou aumento no teor de hidrogênio difusível do metal de solda como foi observado no caso do eletrodo classe E7018.
- As propriedades mecânicas do metal de solda depositado pelo eletrodo impermeável, ou seja, limites de resistência, escoamento, alongamento e tenacidade ao impacto foram satisfatórios quando comparados aos mínimos requeridos para os eletrodos classe E7018;
- A energia absorvida no ensaio de impacto está coerente com a microestrutura do metal de solda.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação da UFMG, ao CNPq e a empresa ELBRAS Eletrodos do Brasil.

## REFERÊNCIAS

- 1 AMERICAN WELDING SOCIETY, AWS A5.1: Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, 2004
- 2 FICHEL, I., DALLA, A., ROS, D.A., FELIZARDO, I., TURANI, C., GONZÁLEZ, L.P., PÉREZ, M.R., PUCHOL, R.Q., PESSOA, E.C.P., BRACARENSE, A.Q. Desenvolvimento de Eletrodos Revestidos Impermeáveis. In: *XXXV Congresso Nacional de Soldagem*, Piracicaba, SP, 2009.



- 3 BAILEY, N., COE, F.R., GOOCH, T.G., HART, P. H. M., JENKINS, N., PARGETER, R.J., Welding Steels without hydrogen cracking
- 4 VAZ, CLAUDIO TURANI; BRACARENSE, ALEXANDRE QUEIROZ; BERNARDINA, AURECYL DALLA; PESSOA, EZEQUIEL C. P.; FELIZARDO, IVANILZA. Desenvolvimento de Eletrodos Revestidos do Tipo Baixo Hidrogênio Impermeáveis. In: XXXVI CONSOLDA, 2010, Recife. *Anais...* São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2010.
- 5 INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, IIW Doc. IX-1533-88: Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals, 1988.
- 6 AMERICAN WELDING SOCIETY, AWS A4.3: Standard Methods for Determination of the Diffusible Hydrogen Content of Martensitic, Bainitic, and Ferritic Steel Weld Metal Produced by Arc Welding, 2006.
- 7 ELBRAS ELETRODOS DO BRASIL LTDA., Catálogo de eletrodos revestidos, Disponível em: <http://www.elbras.com.br/tabelas/catalogo.pdf>, Acesso em: 07 de abril de 2011.
- 8 BABU, S.S., BHADESHIA, H.K.D.H. Transition from Bainite to Acicular Ferrite in Reheated Fe-Cr-C Weld Deposits. *Materials Science and Technology*, v.6, p. 1005-1019, 1990.