



IBP2548_10

DESENVOLVIMENTO DE ELETRODOS REVESTIDOS IMPERMEÁVEIS DO TIPO BAIXO HIDROGÊNIO

Claudio T.Vaz¹, Alexandre Q.Bracarense², Ivanilza Felizardo³, Gustavo S. Hugo⁴, Juliano S. Becho⁵, Aurecyl Dalla⁶, Ivan Fichel⁷, Ezequiel C.P.Pessoa⁸

Copyright 2010, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2010*, realizada no período de 13 a 16 de setembro de 2010, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2010*.

Resumo

Fissuração por hidrogênio é um dos maiores problemas de soldabilidade de aços estruturais usados em plataformas, navios, etc. Sua ocorrência está associada à presença de hidrogênio, à microestruturas com alta dureza e às tensões residuais. Eletrodos revestidos do tipo básico, por produzirem metal de solda com baixos teores de hidrogênio, são os mais indicados para a soldagem de aços estruturais. Entretanto, devido à alta higroscopicidade das principais matérias primas de seu revestimento, eletrodos básicos requerem controle das condições de armazenagem e secagem/manutenção em estufas antes de seu emprego. Este artigo descreve o desenvolvimento de eletrodos de básicos onde os aglomerantes usuais foram substituídos por polímeros. Essa substituição, além de produzir um revestimento resistente à absorção de umidade, proporciona ganhos tanto na fabricação quanto na utilização do eletrodo. A redução no custo de fabricação e insumos é obtida pela eliminação da secagem em fornos durante a produção e pela eliminação da necessidade de armazenagem sob condições especiais e do procedimento de secagem e manutenção em estufa antes do uso. A microestrutura obtida com os eletrodos impermeáveis apresentou morfologia e constituintes típicos de eletrodos básicos. Entretanto, o volume de ferrita acicular observado foi significativamente superior. Além disso, o teor de hidrogênio difusível e resultados de dureza foram satisfatórios em comparação com eletrodos revestidos do tipo básico.

Abstract

Hydrogen cracking is one of the most important structural steel welding problems. It occurs when these three factors are present: high hydrogen content, brittle microstructure and residual or external stress. Then, low hydrogen covered electrodes are the most recommended on equipments and structures welding. However, due the hygroscopicity of main coating raw materials, this electrode requires special storage conditions, re-drying, storage in holding oven and electrically-heated quivers before use. This paper describes the development of basic covered electrodes where the usual binders (potassium and sodium silicates) were replaced by polymers. This new electrode has a moisture resistant coating. The new technology promotes gains on the production and use. Production cost reduction is obtained by drying elimination. Elimination of special storage conditions, re-drying, storage in holding oven and electrically-heated quivers before use are possible with it. The weld metal microstructure showed the same morphology and typical phases of weld metal produced by the same class conventional basic covered electrode. However, acicular ferrite volume was significantly higher. The diffusible hydrogen content and weld metal hardness were satisfactory when compared with traditional basic covered electrodes.

¹ Doutorando, Engenheiro Metalurgista – UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais

² PhD., Físico, Professor Associado - UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica

³ Doutora, Engenheira Mecânica, Pesquisadora – ELBRÁS Eletrodos do Brasil Ltda.

^{4,5} Graduando em Engenharia Mecânica – UFMG, Universidade Federal De Minas Gerais

⁶ Engenheiro Químico, Gerente Industrial – ELBRÁS Eletrodos do Brasil Ltda.

⁷ Economista, Diretor – ELBRÁS Eletrodos do Brasil Ltda.

⁸ Doutor, Engenheiro Mecânico, Professor – IFMG, Instituto Federal de Minas Gerais, Congonhas.

1. Introdução

Dos processos de soldagem a arco, o com eletrodo revestido (SMAW – Shielded Metal Arc Welding) é o apresenta maior facilidade operacional. O investimento em equipamentos é relativamente baixo e os eletrodos são facilmente encontrados no mercado. Uma grande vantagem desse processo é o controle da composição química do revestimento, através do qual se consegue uma vasta gama de consumíveis e um maior controle da microestrutura e das propriedades do metal de solda (Marques et al., 2008). O processo de fabricação de eletrodos revestidos se baseia na sequência representada na Figura 1.

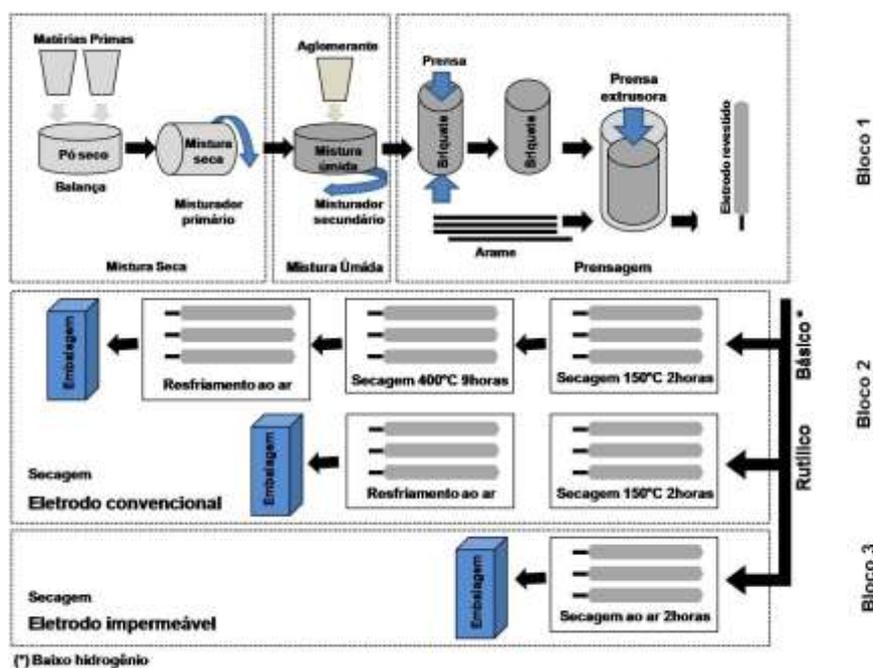


Figura 1. Sequência esquemática de fabricação de eletrodos revestidos.

O primeiro passo é a pesagem das diversas matérias primas que são introduzidas no misturador para se obter a homogeneização da mistura seca. Em seguida, é adicionado um aglomerante (silicato de sódio ou de potássio ou uma mistura dos dois) para se obter uma mistura úmida. A massa resultante é compactada para formar briquetes e alimentar a prensa extrusora, onde o arame é alimentado a uma velocidade sincronizada com a massa extrusada, de forma a obter uma superfície lisa e um revestimento concêntrico em relação ao arame (Bloco 1, Figura 1). Os eletrodos são então colocados em grades próprias e deixados ao ar para perder o excesso de umidade e adquirir consistência ideal para a secagem, que varia em função do tipo de revestimento: rutilico ou básico (ASM, 1994). Os eletrodos rutilicos são secos em estufas a 150° C por 2 horas e depois deixados ao ar para esfriar, sendo posteriormente embalados. Os eletrodos básicos, além da secagem em estufas, a 150° C por 2 horas, são colocados em cavaletes e levados ao forno para uma nova secagem a 400° C por 9 horas. Posteriormente são deixados ao ar para esfriar e depois embalados (Bloco 2, Figura 1). Recomenda-se ainda aos usuários armazenar esses eletrodos em estufas e antes do uso, fazer o processo de ressecagem adequado a cada tipo. No caso dos eletrodos básicos, essa ressecagem é feita a 275° C com controle do número de ressecagens realizadas sendo permitidas no máximo duas.

Pesquisas anteriores para soldagem subaquática (FICHEL et al., 2009) mostraram a viabilidade da produção em escala industrial de eletrodos revestidos do tipo rutilico onde os aglomerantes usuais foram substituídos por “polímeros”. Isso resultou na impermeabilidade do eletrodo, eliminando a necessidade do processo de secagem em forno durante a fabricação, economizando insumos (GLP, energia elétrica) e tempo. A impermeabilidade observada nos eletrodos do tipo rutilico é promissora e encorajou a continuidade das pesquisas, tanto na soldagem subaquática quanto convencional sendo, nesse último caso, eletrodos do tipo básico os de maior interesse.

Conforme indicado na Figura 1, eletrodos revestidos do tipo básico passam por secagem ao ar e, posteriormente, por duas etapas de secagem em forno durante sua fabricação. O eletrodo revestido proposto nesse trabalho elimina a secagem durante a fabricação e ainda a necessidade de ressecagem e manutenção em estufa antes de sua aplicação em campo. Este artigo descreve, portanto, o desenvolvimento de eletrodos revestidos do tipo básico onde os aglomerantes usuais (silicatos de potássio e sódio) foram substituídos por polímeros.

2. Metodologia

A primeira etapa de desenvolvimento do eletrodo proposto nesse trabalho – eletrodo impermeável básico – consistiu em alterar a formulação padrão de eletrodos revestidos convencionais do tipo básico da classe E7018: substituição do aglomerante (silicato líquido de potássio e sódio) por polímeros em solução. Os resultados obtidos por Fichel et al. (2009), onde diferentes porcentagens de polímeros e a eficiência de diferentes solventes foram avaliados na produção de eletrodos impermeáveis rutilicos, serviram de ponto de partida para o presente trabalho. Os primeiros lotes de eletrodos impermeáveis básicos foram fabricados em laboratório e com o objetivo de adequar a porcentagem de polímero (indicado no trabalho de Fichel) na formulação para obter uma aglomeração satisfatória da massa do revestimento que possibilitasse uma boa extrudabilidade.

A etapa seguinte de desenvolvimento consistiu na produção em escala industrial de lotes de eletrodos impermeáveis básicos. Para cada lote de eletrodo fabricado, soldagens sobre chapa foram executadas, visando avaliar a estabilidade do arco elétrico e a aparência do cordão de solda. A análise química do metal de solda também foi realizada com o objetivo de validar as alterações de fórmula e criar subsídios para as novas alterações. Análise metalográfica, avaliação microestrutural, teste de hidrogênio difusível e de dureza também foram realizados para complementar o desenvolvimento do consumível.

Para a análise química e metalográfica foram empregados procedimentos padrão de avaliação. No primeiro, diversos cordões foram executados, um sobre o outro, até que a diluição do metal de base no metal de solda fosse eliminada. A superfície do metal de solda foi lixada e a análise química por espectrofotometria de emissão ótica foi executada. 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. Avaliação microestrutural 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 Doc. IX-1533-88 (1988). O teste de hidrogênio difusível foi feito por cromatografia gasosa conforme AWS A4.3 (2006) e o teste de dureza foi feito pelo método Vickers com carga de 100g.

3. Resultados e Discussões

Os silicatos, além de atuarem como aglomerantes, também atuam como estabilizantes e ionizantes do arco elétrico. Visando manter essas últimas funções, na fabricação dos eletrodos impermeáveis, o silicato líquido passou por um processo de secagem em forno e depois foi moído. Assim, silicato seco foi mantido na formulação do eletrodo impermeável e o polímero em solução foi adicionado para atuar como aglomerante. Após um adequado balanceamento da fórmula, lembrando que a fórmula padrão utilizada foi de um eletrodo revestido comercial do tipo básico, lotes de eletrodos foram fabricados em laboratório. A Figura 2 apresenta a máquina utilizada para a fabricação dos eletrodos em laboratório e alguns eletrodos produzidos (Lote B1). Tendo como base a formulação obtida em laboratório, lotes de eletrodos foram fabricados em escala industrial na fábrica, Figura 3 (Lote B2).



Figura 2. Máquina usada em laboratório para fabricação de eletrodos e exemplos de eletrodos fabricados (B1).



Figura 3. Eletrodo fabricado em escala industrial (B2).

Soldagens sobre chapa com os eletrodos B1 e B2 foram executadas e os cordões resultantes foram comparados com os cordões depositados por eletrodos revestidos do tipo básico comercial (Padrão), Figura 4. Todos os testes de soldagem foram realizados manualmente por soldador qualificado e sob condições similares.

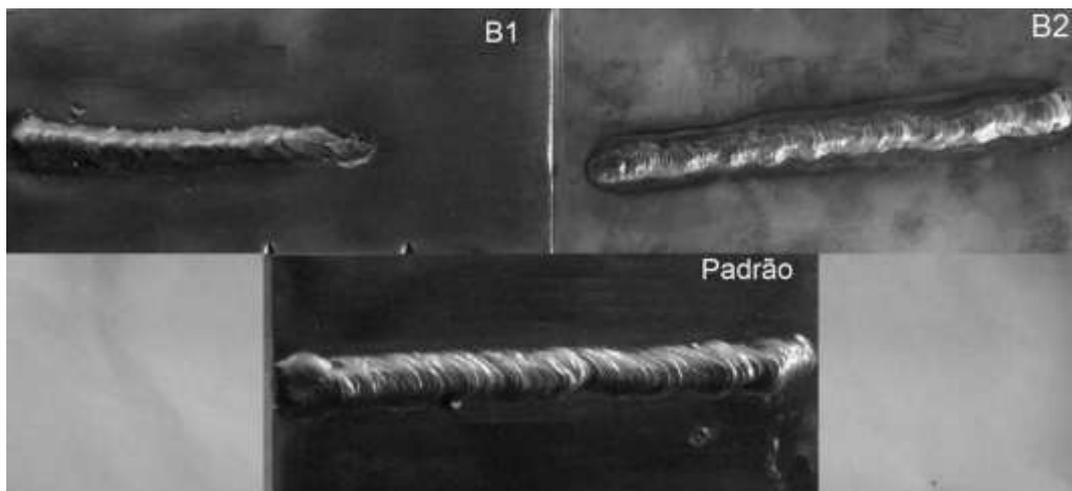


Figura 4. Cordões sobre chapa: B1, eletrodo impermeável fabricado em laboratório; B2, eletrodo impermeável fabricado em escala industrial em fábrica e Padrão, eletrodo revestido do tipo básico comercial classe E7018.

Foi observado durante a soldagem dos eletrodos B1 e B2 uma maior agressividade do arco elétrico e um jato de plasma mais forte em relação ao eletrodo padrão, tornando o controle da soldagem desses eletrodos um pouco mais complexa para o soldador. Outro ponto observado se refere à aparência do eletrodo B2: a baixa resistência da massa do revestimento após sua extrusão resultou em pequenas deformações externas ao revestimento devido ao manuseio durante a fabricação antes de sua cura.

A análise química do metal de solda depositado com o eletrodo B2 apresentou um teor de carbono 20% superior ao indicado pela especificação AWS A5.1 (2004) para classe E7018, sendo que os demais elementos permaneceram dentro da faixa. Com base nesses resultados alterações na fórmula do eletrodo impermeável foram realizadas.

Conforme comentado, a cada alteração de fórmula: soldagens sobre chapa; análise química do metal de solda; análise microestrutural e teste de dureza eram realizados. Com base nos resultados, novas alterações de fórmula eram realizadas e o ciclo de teste se repetia. A apresentação desses resultados no presente trabalho não seguirá a ordem cronológica de execução dos testes. Os resultados serão apresentados em blocos. Por exemplo: a Tabela 1 sumariza as principais modificação de formulação realizadas durante o desenvolvimento do eletrodo impermeável do tipo básico e a Tabela 2 apresenta os resultados de análise química do metal de solda depositado com os respectivos eletrodos, além da análise do eletrodo B2, do eletrodo padrão (eletrodo revestido básico comercial utilizado nesse trabalho) e dos limites estabelecido pela especificação AWS A5.1.

Conforme pode ser observado na Tabela 2, os valores em vermelho destacam os teores dos elementos que apresentaram valores acima do especificado.

Os ajustes na formulação foram realizados com o objetivo principal de manter os teores de elementos de liga (silício e manganês) no metal de solda próximos aos limites estabelecidos pela especificação e basicidade da escória similar ao eletrodo revestido básico padrão. Em paralelo foi avaliada a operacionabilidade dos eletrodos por meio da deposição de cordões de solda sobre chapa.

Tabela 1. Alterações na formulação do eletrodo revestido impermeável

Eletrodo Impermeável	Modificação em Fórmula
B3	Redução do teor de calcário, aumento dos teores de rutilo e fluorita
B4	Redução dos teores de FeSi e FeMn
B5	Adição de hematita
B6	Aumento dos teores de FeSi e FeMn
B7	Redução do teor de hematita
B8	Aumento do teor de calcário, redução dos teores de rutilo e fluorita e eliminação da hematita
B9	Aumento do teor de calcário, redução do teor de fluorita e adição de microesfera

Tabela 2. Análise química do metal de solda depositado

	Norma	Padrão	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
C	0,15	0,09	0,18	0,26	0,14	0,08	0,17	0,17	0,23	0,13
Si	0,75	0,45	0,61	1,61	0,31	0,09	0,68	0,95	0,97	0,61
Mn	1,6	1,11	1,57	1,99	1,08	0,49	1,21	1,49	1,58	1,57
P	0,035	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
S	0,035	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cr	0,2	0,10	0,05	0,09	0,16	0,11	0,05	0,06	0,04	0,06
Ni	0,3	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Mo	0,3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
V	0,08	0,01	0,01	0,11	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01

Os eletrodos B6 e B7 não apresentaram operacionabilidade satisfatória (dificuldade no controle do arco elétrico). A composição química do metal de solda depositado pelo eletrodo B3 apresentou teores de carbono, silício e manganês muito acima dos limites estabelecidos por norma. Por esses motivos estes eletrodos não foram submetidos aos demais testes. Os eletrodos B2 e B8, mesmo apresentando teores de alguns elementos acima do limite estabelecido por norma, foram submetidos aos demais testes por terem apresentado operacionabilidade satisfatória.

As Figuras 3 a 8 apresentam as metalografias do metal de solda em diferentes posições dos eletrodos padrão, B2, B4, B5, B8 e B9, respectivamente.

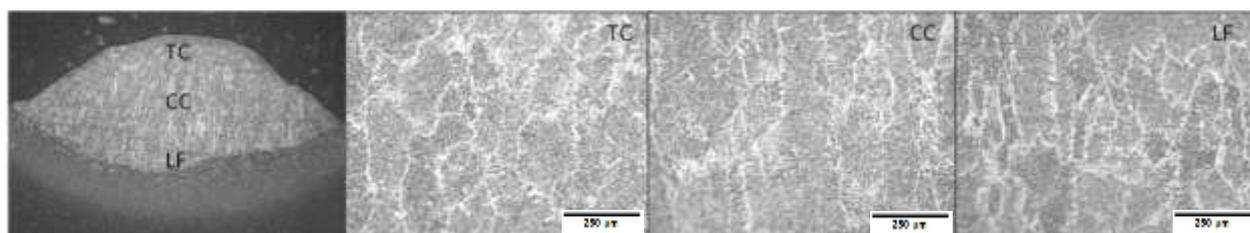


Figura 3. Detalhes da microestrutura do cordão de solda produzido com o eletrodo padrão. Ataque Nital 2%, 200X.

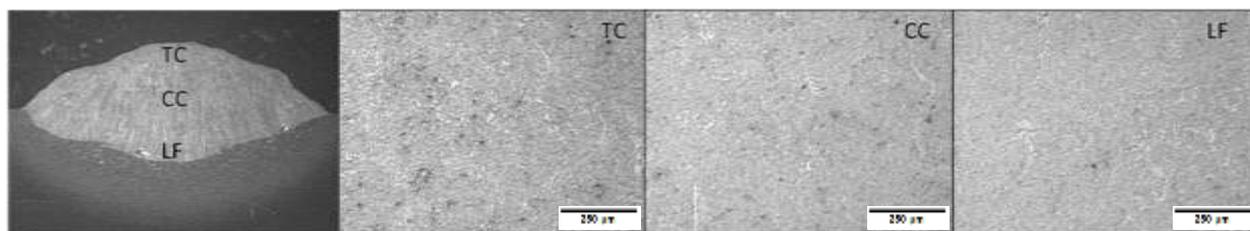


Figura 4. Detalhes da microestrutura do cordão de solda produzido com o eletrodo B2. Ataque Nital 2%, 200X.

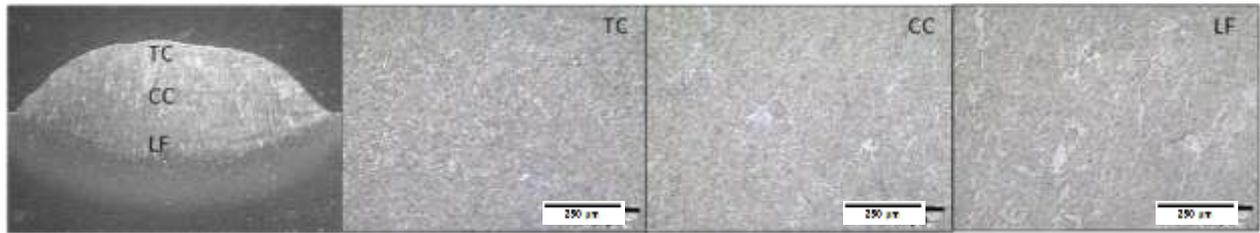


Figura 5. Detalhes da microestrutura do cordão de solda produzido com o eletrodo B4. Ataque Nital 2%, 200X.

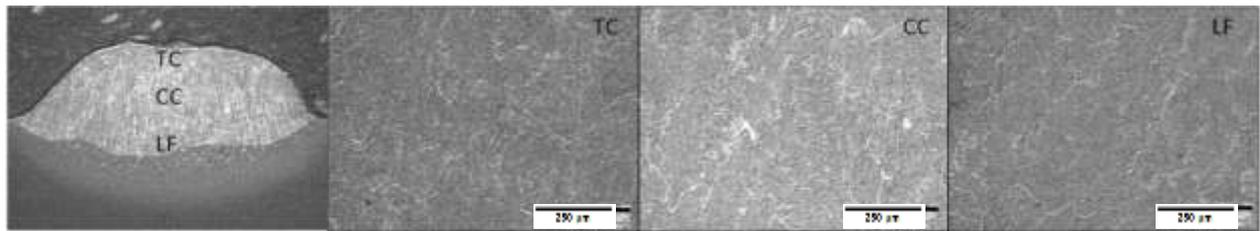


Figura 6. Detalhes da microestrutura do cordão de solda produzido com o eletrodo B5. Ataque Nital 2%, 200X.

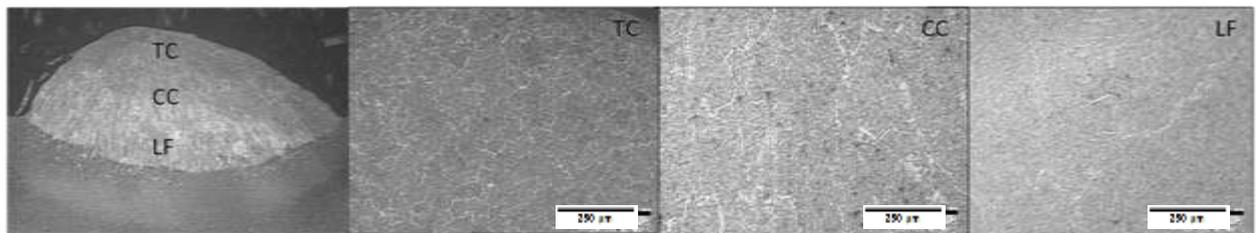


Figura 7. Detalhes da microestrutura do cordão de solda produzido com o eletrodo B8. Ataque Nital 2%, 200X.

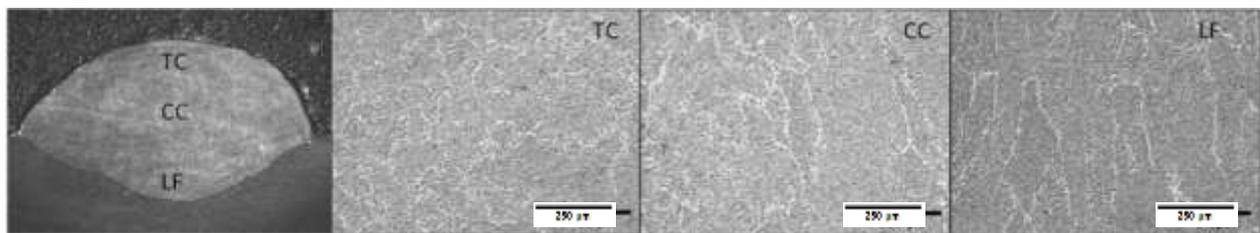


Figura 8. Detalhes da microestrutura do cordão de solda produzido com o eletrodo B9. Ataque Nital 2%, 200X.

Em comparação ao eletrodo padrão, a microestrutura dos eletrodos impermeáveis indicou uma menor quantidade de ferrita de contorno de grão alotrópica. Análises metalográficas dessas amostras com ampliação de 1000 vezes indicaram, para os eletrodos B4 e B9, morfologia característica de ferrita acicular em grandes quantidades no interior dos grãos austeníticos originais.

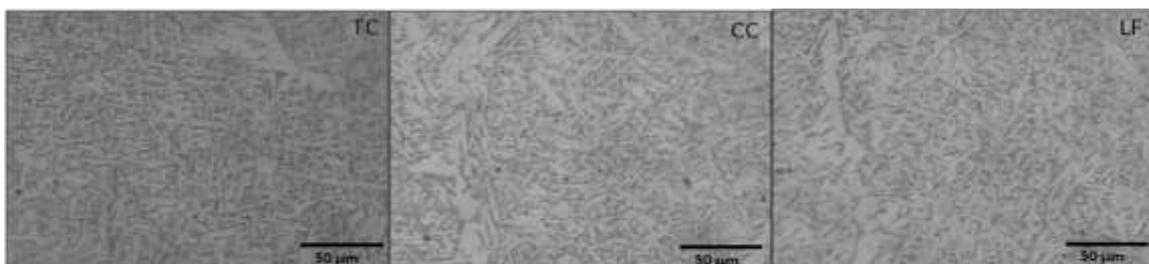


Figura 9. Detalhes da microestrutura do cordão de solda produzido com o eletrodo padrão. Ataque Nital 2%, 1000X.

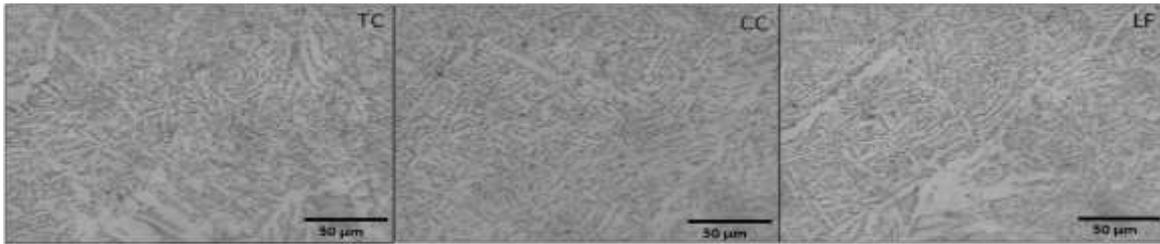


Figura 10. Detalhes da microestrutura do cordão de solda produzido com o eletrodo B4. Ataque Nital 2%, 1000X.

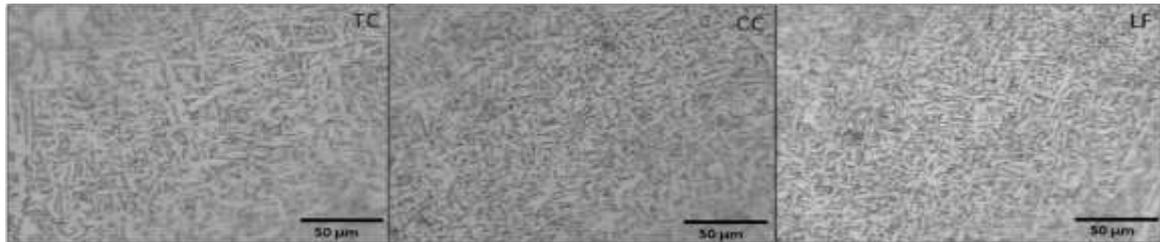


Figura 11. Detalhes da microestrutura do cordão de solda produzido com o eletrodo B9. Ataque Nital 2%, 1000X.

O valor característico de dureza da ferrita acicular no metal de solda indicado em literatura é de 283 HV (BABU et al, 1990 e 1991). Os valores médios de dureza obtidos no metal de solda dos eletrodos B4 e B9 nas regiões com morfologia típica de ferrita acicular encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de dureza medidos em regiões com ferrita acicular.

		Dureza HV ₁₀₀				
B4		254	264	268	254	254
B9		264	245	245	236	228

Através de técnicas de metalografia quantitativa foram determinadas as quantidade de ferrita acicular do metal de solda em diferentes posições dos cordões produzidos com os eletrodos Padrão, B4 e B9. Os resultados obtidos (Figura 12) confirmam que o eletrodo B9 apresenta maior quantidade de ferrita acicular em comparação ao eletrodo padrão. O eletrodo B4 apresenta quantidade de ferrita acicular similar ao eletrodo padrão.

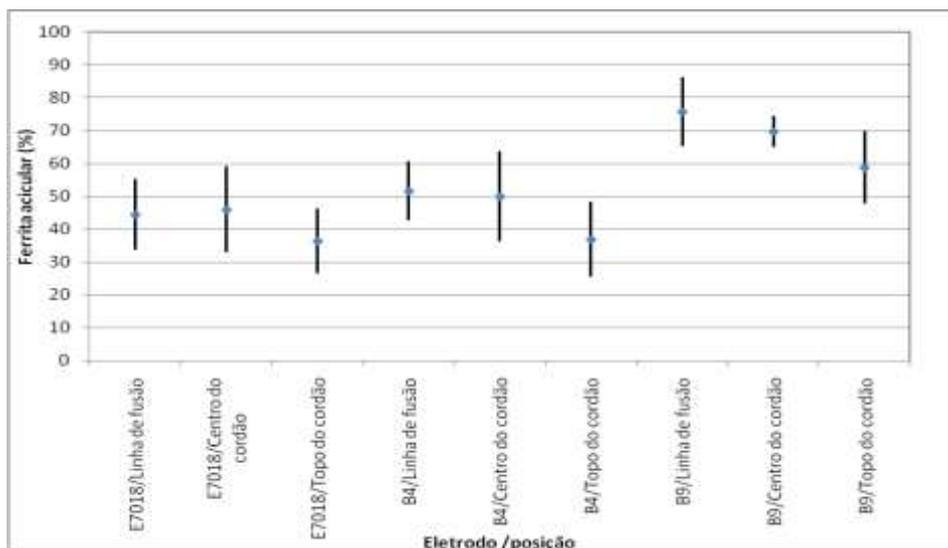


Figura 12. Porcentagem de ferrita acicular no metal de solda (eletrodos Padrão, B4 e B9).

Ensaio preliminares de hidrogênio difusível do metal de solda produzido com os eletrodos impermeável B4 e B9 indicaram teores nos mesmos níveis encontrados para eletrodos revestidos básicos classe E7018. Testes preliminares realizados com esses eletrodos impermeáveis expostos à umidade por longos períodos de tempo indicaram que não há tendência de aumento no teor de hidrogênio difusível do metal de solda.

4. Conclusões

Os resultados obtidos nesse trabalho permitem afirmar que:

- A fabricação em escala industrial de eletrodos revestidos impermeáveis aglomerados com polímeros é tecnologicamente viável;
- Ajustes nas quantidades de polímero em solução foram necessários para obtenção de uma massa úmida com consistência adequada a uma boa extrusão e resistência do revestimento;
- Os eletrodos revestidos impermeáveis tiveram que sofrer ajustes de formulação para adequação da operabilidade e da composição química do metal de solda;
- Eletrodos revestidos impermeáveis apresentaram microestrutura, no mínimo, similar ao do eletrodo revestido padrão;
- Há uma tendência, que deve ainda ser melhor compreendida, de obtenção de microestruturas com maior quantidade de ferrita acicular em comparação ao eletrodo revestido padrão (classe E7018).

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq e a CAPES pelo apoio dado em bolsas para execução do projeto. Adicionalmente, gostaria de agradecer a empresa ELBRAS Eletrodos do Brasil por autorizar a publicação destes resultados.

6. Referências

- ASM. Welding, Brazing, and Soldering. *Metals Handbook*, v. 6, American Society for Metals, 1994.
- AWS A4.3-93. Standard Methods for Determination of the Diffusible Hydrogen Content of Martensitic, Bainitic, and Ferritic Steel Weld Metal Produced by Arc Welding, 2006.
- AWS A5.1 Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, 2004
- BABU, S.S., BHADSHIA, 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.
- BABU, S.S., BHADSHIA, H.K.D.H. Mechanism of the Transition from Bainite to Acicular Ferrite. *Materials Transaction, JIM*, v.32, n. 8, p. 679-688, 1991.
- 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.
- IIW Doc. IX-1533-88. Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals, 1988.
- MARQUES, P.V., MODENESI, P.J., BRACARENSE, A.Q. *Soldagem Fundamentos e Tecnologia*. Editora UFMG, 2008.