

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DOS RESULTADOS DE TRINCAS INDUZIDAS PELO HIDROGÊNIO EM METAIS DE SOLDAS FCAW

José Hilton Ferreira da Silva¹, jhiltonf@ct.ufpb.br
Roseana da Exaltação Trevisan², roseana@fem.unicamp.br

¹ Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário I - João Pessoa - Paraíba - CEP 58059-900 - Tel.: (83) 3216-7356

² Faculdade de Engenharia Mecânica - Unicamp, Rua Mendeleiev, s/n - Cidade Universitária "Zeferino Vaz". Barão Geraldo - Campinas - SP, Caixa Postal: 6122 CEP: 13083-970

Resumo: O fenômeno de trincas induzidas pelo hidrogênio (TIH) é talvez o mais sério e menos entendido de todos os problemas que afetam a soldagem dos aços. Apesar de ser largamente estudada, a formação de TIH em juntas soldadas continua sendo um tema que desafia pesquisadores e usuários, devido às mudanças de comportamento dos fatores e mecanismos que atuam sobre o fenômeno, como consequência do crescente desenvolvimento de novos materiais, novos processos de soldagem e, portanto, novos tipos de consumíveis. A grande diversidade dos fatores e mecanismos que estão envolvidos no fenômeno contribui para a grande dispersão encontrada nos resultados de pesquisas que estudam trincas induzidas pelo hidrogênio. Este trabalho tem como objetivo principal analisar a confiabilidade e a validade dos resultados de trincas induzidas pelo hidrogênio em metais de solda do aço API X80, soldado pelo processo FCAW. Os parâmetros de controle utilizados foram a energia nominal de soldagem e a constante de deposição. O desenvolvimento experimental foi realizado de forma totalmente aleatória, com o auxílio de um procedimento conhecido como planejamento aleatorizado por níveis (PAN). A variável de influência foi o tipo de arame tubular. Como variável de resposta foi avaliado o percentual de trincas de hidrogênio (T_H) presente no metal de solda do aço API X80. Os resultados foram submetidos à análise de variância e validados para uma confiança de 90%. Os resultados foram discutidos em função do tamanho da amostra a ser ensaiada e de sua confiabilidade. Concluiu-se que os resultados de trincas induzidas pelo hidrogênio apresentaram uma confiabilidade de 90%, para um nível de significância do erro de 10%, em amostras com no mínimo 4 réplicas; concluiu-se também que os metais de solda dos arames tubulares E71T-1 e E71T8-K6 mostraram-se susceptíveis ao fenômeno.

Palavras-chave: Aço API X80, processo FCAW, trincas induzidas pelo hidrogênio, análise estatística.

1. INTRODUÇÃO

Um dos mais sérios e menos entendido de todos os problemas que afetam a soldagem dos aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) é a ocasional presença das indesejáveis trincas induzidas pelo hidrogênio (Yurioka & Suzuki, 1990; Tsuboi et al., 1996). Apesar de ser largamente estudada, a formação de TIH em juntas soldadas continua sendo um tema que desafia pesquisadores e usuários, devido às mudanças de comportamento dos fatores e mecanismos que atuam sobre o fenômeno, como consequência do crescente desenvolvimento de novos materiais, novos processos de soldagem e, portanto, novos tipos de consumíveis. A grande diversidade dos fatores e mecanismos que estão envolvidos no fenômeno contribui para a grande dispersão encontrada nos resultados de pesquisas que estudam trincas induzidas pelo hidrogênio.

No início de todo trabalho de pesquisa que envolva a realização de experimentos, sempre deve haver a preocupação de como esses experimentos devem ser conduzidos de forma que possam ser reproduzidos sob condições controladas, obtendo-se resultados confiáveis e que se repitam nessas condições. Uma metodologia importante consiste no planejamento experimental (equipamentos, instrumentos, materiais, número de ensaios e condições de ensaio). Dentro do planejamento experimental, o delineamento de experimentos e a instrumentação necessária para sua execução são de extrema importância para a pesquisa. O delineamento de experimentos tem como objetivo a determinação do número ideal de experimentos que leve à obtenção de resultados com um dado grau de confiabilidade.

Montgomery (1997) indica um procedimento para o planejamento e para a análise dos resultados:

- i. Reconhecimento e definição do problema;
- ii. Escolha das variáveis (fatores de influência) e das faixas de valores em que essas variáveis serão avaliadas;

- iii. Escolha adequada da variável de resposta;
- iv. Delineamento dos experimentos: tamanho da amostra (número de réplicas), seqüência de execução dos ensaios, necessidade de aleatorização ou do uso de blocos;
- v. Execução dos experimentos, monitorando-os e controlando-os;
- vi. Análise dos resultados, com o uso de métodos estatísticos, a fim de que as conclusões estabelecidas sejam objetivas;
- vii. Elaboração das conclusões e recomendações a partir da análise dos resultados.

Vários autores já utilizam metodologias estatísticas para planejamentos e análises de resultados em pesquisas com soldagem (Silva e Trevisan, 2009; Scotti et al., 2007; Costa e Alfaro, 2003; Ollé et al., 1999); No entanto constata-se ainda que muitos dos pesquisadores em engenharia não contam com uma metodologia para o planejamento experimental que seja ao mesmo tempo útil e simples.

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a confiabilidade e a validade dos resultados de trincas induzidas pelo hidrogênio em metais de solda do aço API X80, soldado pelo processo FCAW

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O Metal de Base utilizado, para o desenvolvimento experimental deste trabalho, foi o aço API X80. A composição química fornecida pelo fabricante e o valor do carbono equivalente (parâmetro de trinca do metal de solda - Pcm), estão mostrados na Tab. (1).

Tabela 1. Composição química do aço API X80

Composição Química (% em peso)								
C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	V
0,04	0,17	1,75	0,019	0,004	0,032	0,01	0,073	0,005
Ti	Cr	Ni	Mo	N	B	Ca	Sb	CE (Pcm)
0,013	0,21	0,02	0,16	0,0035	0,0002	0,0014	0,01	0,156

Foram selecionados dois tipos de arames tubulares: o arame autoprotetido (FCAW-SS) do tipo E71T8-K6, com diâmetro de 1,7 mm e o arame com proteção auxiliar de gás (FCAW-SG) do tipo E71T-1, com diâmetro de 1,6 mm. Estes arames têm suas especificações baseadas na norma AWS A5.29 (1998). A composição química dos arames foi fornecida pelo fabricante e estão apresentadas na Tab. (2).

Tabela 2. Propriedades mecânicas e composição química dos arames tubulares

Composição Química (% em peso)								
Arame	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Cr
E71T8-K6	0,04	0,24	0,91	0,006	0,003	0,77	0,92	0,03
E71T-1	0,04	0,59	1,41	0,012	0,006	-	-	-

O gás de proteção utilizado para a soldagem com arame E71T-1 foi o CO₂ com vazão de 15 l/min, conforme a recomendação do fabricante do arame.

As soldas foram realizadas no laboratório de soldagem da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), para tanto foi utilizada uma célula constituída por uma central de soldagem a arco micro processada, multiprocessos e sinérgica “MTE Digitec 450/600” e um carro motriz, Modelo 5302 BUG-O SYSTEM, para sustentação/translação da tocha.

A energia nominal de soldagem (Es) gerada pelo arco foi utilizada como parâmetro de controle. A corrente e tensão de soldagem foram monitoradas por um sistema de aquisição computadorizado, constituído de uma placa A/D e do Software Oscilos4. A energia nominal de soldagem foi calculada em função da corrente (I), da tensão (U) e da velocidade de soldagem (Vs), como mostrado na Eq. (1).

$$E_s = \frac{60 \cdot I \cdot U}{1000 \cdot V_s} \quad (1)$$

Os parâmetros de soldagem foram definidos a partir de recomendações do fabricante dos eletrodos, catálogos, livros (Welding Handbook - AWS, 1991; Machado, 1996). As condições de soldagem foram definidas de forma a se obter um arco estável, cordões de solda homogêneos e com qualidade superficial. Com base nestes requisitos e em ensaios preliminares realizados foi verificado que, devido às diferenças entres os arames, as condições de soldagem não poderiam ser as mesmas para os dois arames tubulares. A partir daí decidiu-se manter constante, também, além da

energia nominal de soldagem, a constante de deposição (K_D), que é calculada em função da velocidade de alimentação do arame (V_a) e da velocidade de soldagem, conforme mostrado na Eq. (2).

$$K_D = \frac{V_a}{V_s} \quad (2)$$

A constante de deposição K_D , isto é, a relação entre a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem foi sempre igual para os dois arames tubulares. Esse procedimento teve como objetivo, também, manter mais um referencial constante entre os testes, bem como para diminuir a interferência de qualquer diferença na quantidade de material depositado por comprimento de solda na análise dos resultados.

As condições de soldagem selecionadas utilizadas nos ensaios experimentais, para os arames tubulares E71T-1 e E71T8-K6, são apresentadas na Tab. 3.

Tabela 3. Parâmetros de soldagem para os diferentes arames tubulares

Arame	I (A)	U (V)	V_a (m/min)	V_s (mm/min)	DBCP (mm)	Es (kJ/mm)	K_D
E71T-1	200	25	3,5	150	19	~2	23,33
E71T8-K6	220	22	3,5	150	25	~2	23,33

Comparando-se as condições de soldagem apresentados na Tab. (3), para cada arame tubular, observa-se que os parâmetros de soldagem utilizados para os arames tubulares E71T-1 e E71T8-K6 apresentaram diferenças. O arame E71T8-K6 usou maior corrente de soldagem e DBCP, enquanto o arame E71T-1 foi usado com maior tensão do arco. Esse comportamento dos parâmetros de soldagem deve-se, principalmente, às características peculiares de cada tipo de arame, tais como tipo de fluxo, tipo de proteção e polaridade da corrente.

O desenvolvimento experimental foi realizado de forma totalmente aleatória, com o auxílio de um procedimento conhecido como planejamento aleatorizado por níveis (PAN). A variável de influência foi o tipo de arame tubular. Como variável de resposta foi avaliado o percentual de trincas de hidrogênio (T_H) presente no metal de solda do aço API.

Para realizar os ensaios de trincas induzidas pelo hidrogênio foi selecionado teste G-BOP (gapped bead-on-plate). O crescente interesse pelo fenômeno TIH no metal de solda instigou o desenvolvimento desse teste simples e barato. O teste G-BOP foi desenvolvido em 1974 por Graville & McParlan (1974) e é constituído por 2 blocos de aço com dimensões de 100mm x 125mm x 50,8mm. Um dos blocos tem um entalhe de 0,75mm usinado numa das faces. Para executar ensaios, os dois blocos são fixados um ao outro por um apropriado dispositivo de fixação, geralmente um grampo, para prevenir que não ocorram movimentos relativos, enquanto um cordão de solda de 100mm é depositado sobre eles na região do entalhe, conforme é mostrado na Fig. (1).

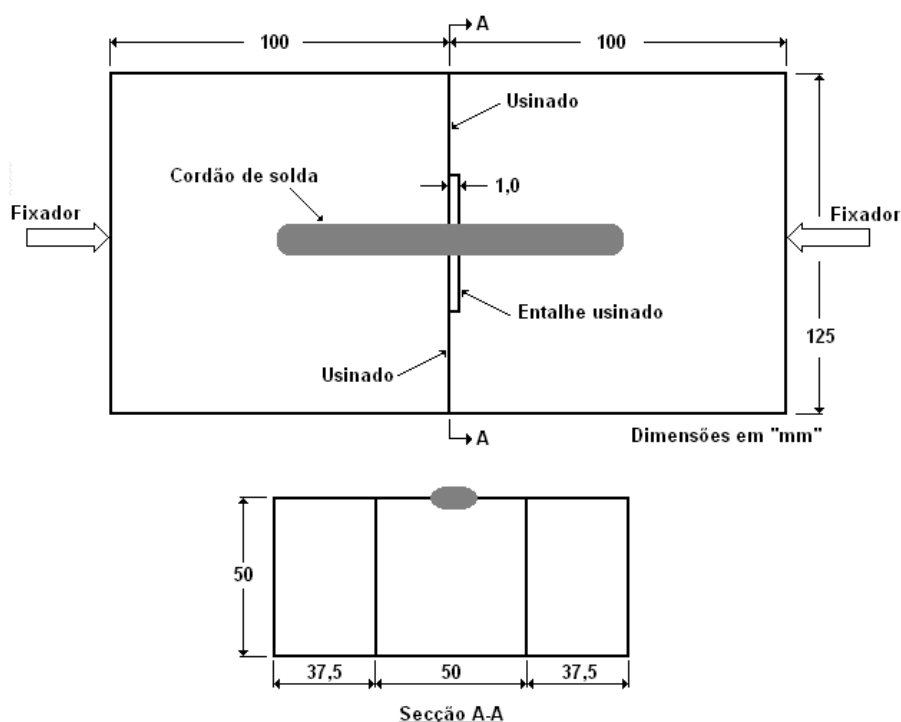


Figura 1. Esquema representativo do teste G-BOP (adaptado de McParlan & Graville, 1975)

Após a soldagem, os blocos são mantidos fixos por 48 horas. Em seguida o grampo é retirado e a porção de solda sobre o entalhe usinado é aquecida por uma tocha de oxigás, até o rubro. O corpo de prova é deixado em repouso até resfriar; após 24 horas o corpo de prova é aberto. O aquecimento tem a função exclusiva de revelar a região previamente trincada. Após a abertura do corpo de prova, faz-se uma inspeção visual na seção transversal do cordão de solda. Quando a seção transversal (região da quebra) do cordão de solda apresentar duas superfícies, uma colorida (oxidada) que corresponde à presença de trincas de hidrogênio e outra mostrando uma fratura recente, resultante da abertura do corpo de prova, comprova que uma trinca estava presente no cordão de solda antes do aquecimento (McParlan & Graville, 1974; Chakravarty & Bala, 1989; Davidson, 1995; Adonyi, 2000; Atkins et al., 2002).

Foi definida previamente a realização de 5 réplicas para cada condição, resultando num total de 10 ensaios. Os ensaios experimentais foram realizados numa seqüência totalmente aleatorizada objetivando, além de minimizar o erro aleatório das condições ambientais sobre os resultados dos ensaios e diminuir os erros provocados por vícios inerentes às práticas experimentais. A metodologia adotada para analisar e validar consistiu em estimar o tamanho da amostra (n) de tal forma que se obtenha uma estimativa da média da amostra para um nível de significância de 10%, o que indica uma confiabilidade de 90% (Montgomery, 1997).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta a vista superior de um corpo de prova do teste G-BOP já ensaiado, isto é, com um cordão de solda. Pode ser observado nesta figura o grampo que prende os dois blocos, o entalhe de 1mm e o cordão de solda depositado.

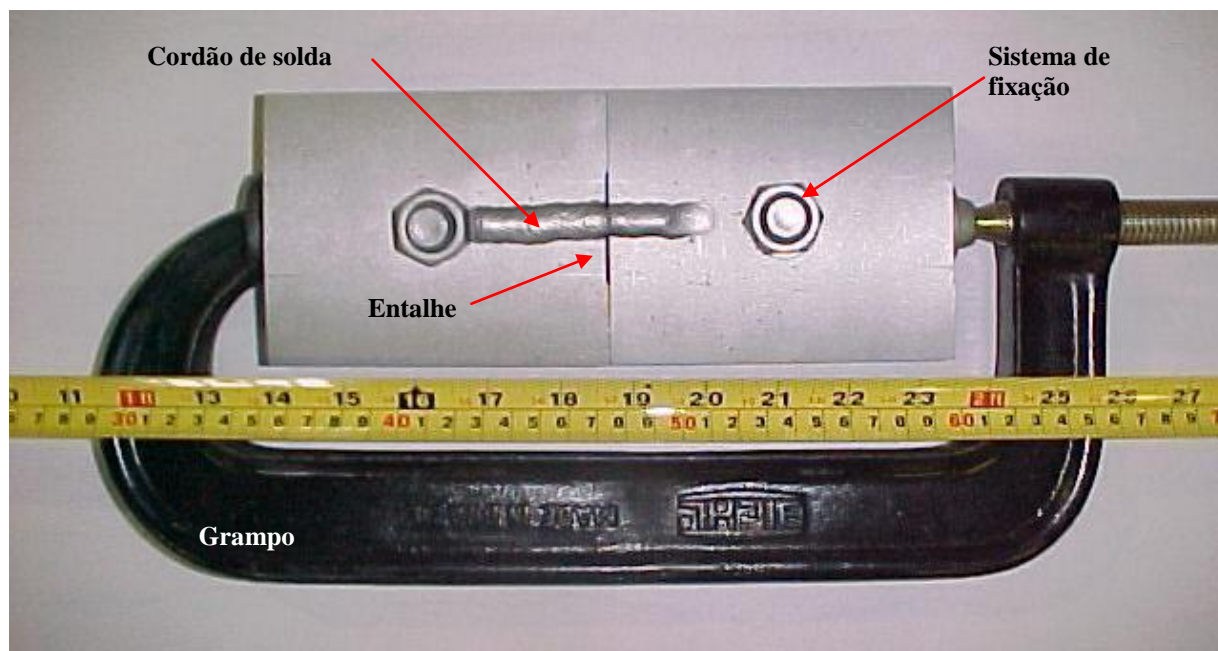


Figura 2. Corpo de prova do teste G-BOP ensaiado

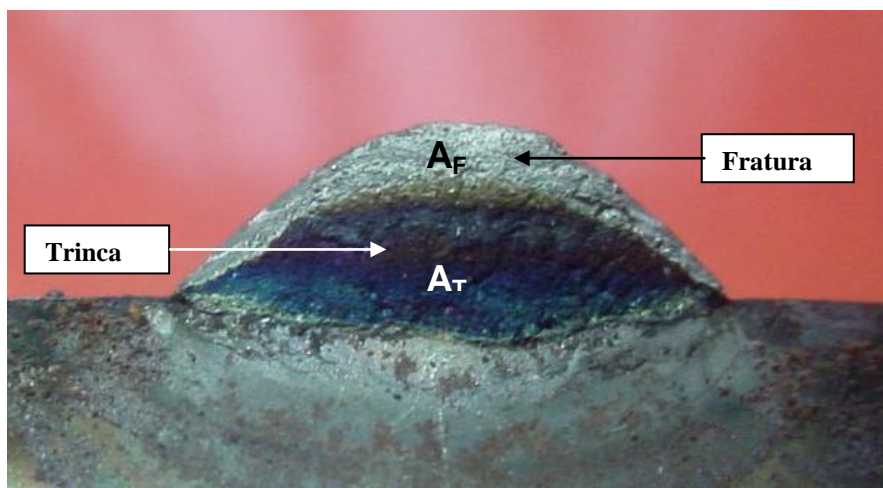


Figura 3. Representação das regiões correspondentes à área da trinca de hidrogênio (A_T) e a área da fratura (A_F)

Após a soldagem do corpo de prova, conforme mostrado na Fig. (2), seguiu-se o procedimento padrão do teste. Concluído o período de ensaio, o corpo de prova foi aberto e inspecionado visualmente na seção transversal do cordão de solda. Identificada a presença de trincas, a morfologia do cordão de solda (altura, largura e área da seção transversal) foi medida e o total de trincas calculado. A Fig. (3) apresenta o aspecto da seção transversal de um corpo de prova contendo trincas de hidrogênio.

A Figura (3) mostra duas regiões distintas, uma região referente à trinca de hidrogênio (A_T) e a outra região (A_F) referente à área da fratura resultante da quebra efetuada durante a abertura da amostra. A área total do cordão de solda (A_{CS}) é dada pela soma das duas regiões A_F e A_T .

As trincas de hidrogênio são quantificadas quando se utiliza o teste G-BOP pela presença e percentual de trincas no cordão de solda (Macparlan & Graville, 1975; Atkins, 2002), ou seja, as trincas de hidrogênio são quantificadas pela relação entre a área da trinca e a área total da seção transversal do cordão de solda. Na Equação 5.1 é apresentada uma fórmula simples e direta para o cálculo de TIH em metais de solda ensaiados com o teste G-BOP.

$$T_H = \frac{A_T}{A_T + A_F} \cdot 100(\%) \quad (3)$$

Sendo: T_H = Trincas de Hidrogênio (%);
 A_T = Área da Trinca (mm^2);
 A_F = Área da fratura (mm^2).

A Eq. (3) foi utilizada para calcular o percentual de trincas de hidrogênio em todos os ensaios. Foram realizadas 5 réplicas para cada condição (arame tubular e temperaturas de preaquecimento). A Tab. (4) apresenta os resultados, a média e o desvio padrão dos experimentais obtidos com o teste G-BOP para avaliar TIH no metal de solda do aço API X80 com os arames tubulares E71T-1 e E71T8-K6.

Tabela 4. Resultados de TIH no MS obtidos com o teste G-BOP

Arame	Corpo de prova	A_{CS} (mm^2)	A_T (mm^2)	T_H (%)
E71T-1	01	41,5	26,4	63,8
	07	42,8	24,8	57,9
	03	41,5	24,5	59,1
	05	44,4	25,2	56,8
	07	42,9	29,9	69,8
	Média - \bar{Y} (%)	61,5	Desvio padrão - S(%)	5,4
Arame	Corpo de prova	A_{CS} (mm^2)	A_T (mm^2)	T_H (%)
E71T8-K6	06	50,5	39,8	78,8
	10	49,5	37,4	75,5
	08	50,7	33,3	65,7
	04	50,8	35,7	70,2
	02	50,2	32,0	63,8
	Média - \bar{Y} (%)	70,8	Desvio padrão - S(%)	6,4

A análise da Tab. (4) permite observar que os corpos de prova soldados com o arame E71T-1 apresentam um percentual de trincas de hidrogênio de 61,5 %, enquanto aqueles soldados com o arame E71T8-K6 apresentaram 70,8 % de trincas de hidrogênio. Este resultado corrobora com resultados de TIH em metais de solda em que se usa o teste G-BOP apresentados na literatura (Atkins, 2002; Adoniy, 2000).

3.1. Análise da confiabilidade dos resultados

A análise da confiabilidade dos resultados, do ponto de vida estatístico, foi realizada a partir de uma avaliação do nível de repetitividade da variável de resposta (presença e percentual de trincas de hidrogênio no metal de solda - T_H) obtida nos experimentos realizados.

Para a análise foi considerada a abordagem que define o tamanho da amostra (número de réplicas) para os ensaios a serem realizados para se obter a confiabilidade pré-definida e desejada nos resultados.

Para determinar o tamanho da amostra usou-se a distribuição *t de Student*. Um número de réplicas grande pode inviabilizar um trabalho de pesquisa experimental. Logo era desejável que o tamanho da amostra fosse menor do que 20 ($n < 20$), que é considerado uma amostra pequena e nesses casos recomenda-se o uso da distribuição *t de Student*, que

depende do tamanho da amostra, e seu valor pode ser utilizado para estimar n , de tal forma que se obtenha uma estimativa da média da amostra para uma dada confiança (Dally, 1993). O tamanho da amostra pode ser determinado com a aplicação da eq. (4):

$$n = \left(t \frac{S}{\delta} \right)^2 \quad (4)$$

Sendo: n – tamanho da amostra;
 S - desvio padrão da amostragem;
 δ - comprimento do intervalo de confiança (precisão - α x média - μ);
 t – parâmetro da distribuição *t de Student*.

Com base nos cálculos realizados do tamanho da amostra e resultados de pesquisas anteriores (Carvajal Fals, 1999; Martins, 2000), que desenvolveram estudos utilizando testes experimentais, foi adotada uma precisão da estimativa da média (μ) de $\pm 10\%$, ou seja, a tolerância do intervalo de confiança $\delta = \pm 0,1\mu$ e, conseqüentemente, um nível de confiança de 90% nos resultados deste estudo. Considerando-se a tolerância e o nível de confiança adotados determinou-se o valor da distribuição *t de student*. A Tab. (5) apresenta os valores de δ , t e n , para a condição de ensaio analisada. O valor de t foi retirado da tabela de distribuição *t de Student* (Montgomery, 1997) para $GL = 4$ ($n-1$ - graus de liberdade) e $\alpha/2 = 0,05$; o valor de n foi calculado com a Eq. (4).

Tabela 5. Análise estatística para determinação do tamanho da amostra

Arame	δ	$\alpha/2$	GL	t	n
E71T-1	6,15	0,05	4	2,132	3,46
E71T8-K6	7,08	0,05	4	2,132	3,66

A Tabela (5) mostra que o menor valor de n que satisfaz as condições analisadas é 4. Como foram realizadas 5 réplicas para cada condição de ensaio comprova-se que esse número de réplicas é mais que suficiente para se obter a confiabilidade desejada dos resultados de 90% e um nível de significância do erro de 10%.

3.2. Análise de variância dos resultados

A Figura 3 apresenta um gráfico que mostra os resultados médios de TIH e seu respectivo desvio padrão para os dois tipos de arames tubulares analisados.

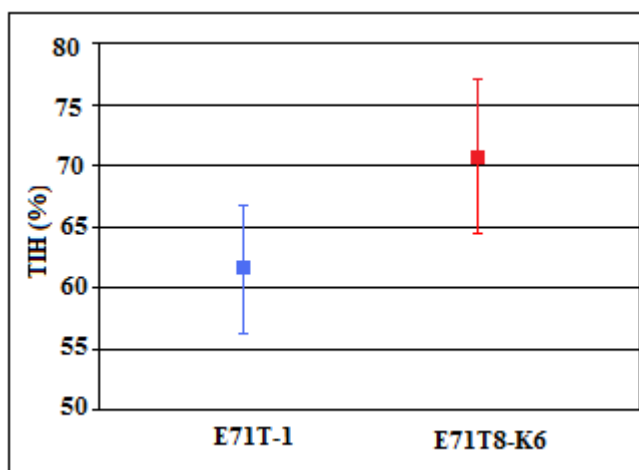


Figura 4. Resultados do trincamento por hidrogênio no metal de solda do aço API X80

A análise quantitativa do gráfico mostrado na Fig. (3) mostra que não é possível afirmar qual dos metais de solda dos diferentes arames é mais susceptível a ocorrência de trincas de hidrogênio, pois se verifica que há uma intersecção dos valores médios com seus desvios padrões. Este fato deve-se ao alto grau de dispersão observado nos resultados experimentais.

Os resultados de trincas de hidrogênio apresentados na Tab. (4) foram tratados estatisticamente para se determinar a influência dos tipos de eletrodos, em caso positivo, como se deu esta influência sobre as trincas de hidrogênio no metal de solda. Assim, os valores médios de trincas de hidrogênio (T_H) dos dois diferentes tipos de arames tubulares foram submetidos a uma análise de variância. A análise de variância consistiu em calcular, a partir dos resultados de T_H , um fator F para a variável de influência e compará-lo ao valor correspondente da distribuição F que é obtido em função da confiabilidade adotada de 90%, do nível de significância do erro de 10%, do grau de liberdade da variância da variável analisada e do grau de variabilidade total dos resultados.

O teste de hipóteses é feito para verificar se as médias dos tratamentos são iguais:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots \mu_a \quad (4)$$

$$H_1 = \mu_i \neq \mu_j \text{ (para pelo menos um par } i,j) \quad (5)$$

Se a hipótese nula H_0 é verdadeira, não há diferença entre as médias dos tratamentos. Caso a hipótese nula H_0 seja rejeitada, existe diferenças entre as médias da variável analisada e elas influenciam no resultado de trincas induzidas pelo hidrogênio.

Tabela 6. Análise de variância dos resultados de T_H

ANÁLISE DOS EFEITOS PRINCIPAIS DAS VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA					
Variável	SS _{TRATAMENTOS} (SQ)	Graus de Liberdades (GL)	Fator F Calculado (F_0)	Fator F Adotado ($F_{\alpha,2, v_1, v_2}$)	Conclusão
Tipo de Arame Tubular	704,36	1	20,383	3,36	Rejeita H_0
VARIABILIDADE TOTAL DOS RESULTADOS			VARIABILIDADE DEVIDO AO ERRO		
SS _T		GL	SS _E		GL
980,808		9	276,448		8

Quando o valor de F calculado é maior que o valor de F adotado, a hipótese nula é rejeitada, conseqüentemente a variável de influência analisada tem efeito significativo sobre o fenômeno estudado. Os resultados da análise de variância são apresentados na Tab. (6). A análise da tabela mostra que a hipótese nula (H_0) foi rejeitada, pois o valor do fator F calculado para a variável de influência foi maior que o valor de F adotado, ou seja, como $F_0 (20,383) > F_{0,05,3,12} (3,36)$ tem-se que a hipótese nula é rejeitada.

Assim, ao analisar a Tab. (6) pode-se afirmar que o tipo de arame tubular influenciou na incidência de trincas de hidrogênio no metal de solda e que o metal de solda do arame E71T8-K6 foi mais susceptível ao trincamento por hidrogênio do que o arame E71T-1.

4. CONCLUSÕES

Com base nos objetivos propostos, na metodologia experimental usada e nos resultados obtidos e discutidos, algumas conclusões podem ser pressupostas.

- ✓ Os resultados de trincas induzidas pelo hidrogênio apresentaram um nível de significância do erro de 10%, o que indica uma confiabilidade de 90%, para amostras com no mínimo quatro réplicas;
- ✓ Os arames tubulares E71T-1 e E71T8-K6 mostraram-se susceptíveis ao fenômeno trincas induzido pelo hidrogênio;
- ✓ O metal de solda do aço API X80 executado com o arame tubular E71T8-K6 é mais susceptível as trincas de hidrogênio que o metal de solda do arame E71T-1.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP e ao CNPq pelo auxílio financeiro, que foram de fundamental importância para a realização deste trabalho. A faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP pela infra-estrutura indispensável de seus laboratórios.

6. REFERÊNCIAS

Adonyi, Y., 2000, "Weldability of High Performance Steels. In: Conference of high performance steel", Baltimore, Maryland. Pp. 1-15, Disponível em <<http://www.nabro.unl.edu/articles/20002012/download/Adonyi1.pdf>> Acesso em: maio 2002.

- Atkins, G., et al., 2002, "Welding Process Effects in Weldability Testing of Steel", *Welding Journal*, 81 (4), pp. 61-s – 68-s, Disponível em <<http://www.aws.org/wj/supplement/04-2002-ATKINS-s.pdf>> Acesso em: Fevereiro 2003.
- Chakravarti, A. P., Bala, S. R., 1989, "Evaluation of weld metal cold cracking using the G-BOP test" *Welding Journal*, 68 (1), pp. 1s-8s.
- Davidson, J. L., 1995, "Hydrogen-Induced Cracking of Low Carbon – Low Alloy Ateel Weldments", *Materials Forum*, v. 19, pp. 35-51, 1995.
- American Welding Society, 1998, "AWS A5.29: Specification for low-alloy steel electrodes for flux cored arc welding", Miami, 39p.
- Costa, André L. G. Alfaro, Sadek C. A., 2003, "Modelamento Estatístico para Otimização do Processo TIG com Onda Retangular em Soldagem do Alumínio", 13^o POSMEC, FEMEC/UFU, Uberlândia-MG.
- Dally, J. W., Riley, W. F., McConnell, K. G., 1993, "Instrumentation for engineering measurements", New York, John Wiley and Sons, 2nd edition.
- Graville, B. A., McParlan, M. *Metal Construction*, 6 (2), pp. 62-63, February 1974.
- Machado, I. G., 1996, "Soldagem & Técnicas Conexas: Processos", Porto Alegre, RS: Editado pelo Autor, 447p.
- McParlan, M., Graville, B. A. Development of the G-BOP test for weld metal cracking. IIW Doc. n. IX-922, 1975. 12p.
- Montgomery, D. C., 1997, "Design and analysis of experiments", 4 ed., New York – USA, John Wiley & Sons.
- Ollé, L., Leal, A., Baixo, C., Dutra, J., Pope, A. Teixeira, J. C., 1999, "Desenvolvimento de Metodologias Aplicadas ao Controle da Corrente na Soldagem a Arco em Ambiente Molhado", XXV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Belo Horizonte, MG.
- Scotti, A., Nascimento, A. S., Batista, M. A., Nascimento, V. C., 2007, "Comparação de Métodos para Cálculo da Potência Elétrica através de uma Abordagem Experimental / Matemática, em Processos de Soldagem a Arco", 8^o Congresso Ibero americano de Engenharia Mecânica, Cusco, Peru.
- Silva, J. H. F., Carvajal Fals, H., Trevisan, R. E., 2009, "Proposal of a New G-BOP Test to Evaluate Cracks in Weld Beads in Thin Sheets", *J. Fail. Anal. and Preven*, 9, 74–80.
- Tsuboi, K., Yatabe, H., Yamada, K., 1996, "Hydrogen induced cracking in high strength steel, *Mater. Sci. Technol.* 12, 400.
- Welding Handbook, 1991, AWS - American Welding Society, Miami, 1991, v. 2, 8th edition, Chapter 5 – Flux cored arc welding, pp. 158-190.
- Yurioka, N., Suzuki, H., 1990, "Hydrogen assisted cracking in C-Mn and low alloy steel weldments", *Int. Mater. Rev.* 35(4), pp. 217–252.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

METODOLOGY TO ANALYZE OF THE RELIABILITY OF RESULTS OF HYDROGEN INDUCED CRACKING IN WELD METALS FCAW

José Hilton Ferreira da Silva¹, jhiltonf@ct.ufpb.br
Roseana da Exaltação Trevisan², roseana@fem.unicamp.br

¹Department of Mechanical Engineering, Federal University of the Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brazil

²Department of Mechanical Engineering, State University of Campinas (UNICAMP), Sao Paulo, Brazil

Abstract: The objective of the present work is analyzing the reliability and validity of the results of Hydrogen-induced cracks in weld metals of the API X80 steel welded by FCAW process. The parameter controls used were the nominal energy of welding and constant deposition. The experimental was carried out with a random level design. The variable of influence was the type of cored wire. How variable of response was evaluated the percentage of Hydrogen induced cracking (HIC) present in the weld metal of the API X80. Results showed that the new the crack-induced Hydrogen had a reliability of 90% e the cored wires showed susceptibility to hydrogen induced cracking.

Keyword: API X80 Steel, FCAW Process, Hydrogen Induced Cracking, Statistic Analyze.