

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE HIDROGÊNIO DIFUSIVEL NO METAL DE SOLDA DEPOSITADO
POR DIFERENTES ELETRODOS REVESTIDOS.

por

Marcelo Gomes Caju

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2012.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE HIDROGÊNIO DIFUSIVEL NO METAL DE SOLDA DEPOSITADO
POR DIFERENTES ELETRODOS REVESTIDOS

por

Marcelo Gomes Caju

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Rubén González
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Ivan Guerra Machado

Comissão de Avaliação:

Prof.^a Cintia C. Petry Mazzaferro

Prof. Arnaldo Rubén González

Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Porto Alegre, Junho de 2012.

AGRADECIMENTOS:

A conclusão deste trabalho é uma somatória de valores em torno de um objetivo. Não haveria desenvolvimento sem a ajuda de diversas pessoas as quais presto minha homenagem.

Aos meus familiares pelo apoio nesta caminhada, pelo carinho e paciência neste período. Em especial a minha esposa Iolanda e a minha filha Helena, que foram as fontes da minha motivação.

Ao Prof. Dr. Ivan Guerra Machado pela orientação e colaboração, disponibilizando seu conhecimento e vasta experiência neste estudo.

Ao técnico Luiz Henrique Zaniratti, pelo apoio em toda parte prática e uso das instalações do LS&TC da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Também gostaria de agradecer aos meus colegas de trabalho e aos colegas do LS&TC que sempre me apoiaram para que pudesse concluir este ciclo.

CAJU, M. G. **Avaliação do nível de hidrogênio difusível no metal de solda depositado por diferentes eletrodos revestidos.** 2012. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar os níveis de hidrogênio difusível no metal de solda depositado por diferentes eletrodos revestidos. Foi utilizado o processo de Soldagem a Arco com Eletrodos Revestidos com diferentes classes de eletrodos revestidos. As principais origens deste hidrogênio são a umidade no revestimento do eletrodo revestido e em alguns casos, do próprio material orgânico com o qual este revestimento é composto. Este teor de hidrogênio, dependendo da sua quantidade, agindo em conjunto com microestruturas frágeis (martensita) e com as tensões que se desenvolvem nas juntas soldadas, pode gerar a “Trinca Induzida pelo Hidrogênio”. Para a presente análise, foram utilizadas as três classes diferentes de eletrodos revestidos mais comumente encontrados no mercado, ou seja: Celulósico, Rutilico e Básico. O metal de solda na fase líquida absorve uma considerável quantidade de hidrogênio (atômico) na sua poça de fusão e durante a etapa em que resfria, este se difunde migrando para a zona afetada pelo calor (ZAC). Com isso, passa a ser muito grande a possibilidade da formação de trincas, caso existam condições para tal, como mencionado. Através da soldagem de corpos de prova preparados exclusivamente para essa experiência, foi possível mensurar a presença deste elemento químico no metal de solda. Para efetuar esta análise, foi utilizado um equipamento de cromatografia gasosa, possibilitando para obter estes valores com uma boa aproximação. Verificou-se, assim, a influência da temperatura (e do tempo) de ressecagem, da exposição do eletrodo revestido ao ambiente, e também das condições climáticas no momento da execução da soldagem. Estes fatores apareceram como principais no aumento do nível de hidrogênio difusível no metal de solda.

PALAVRAS CHAVE: Eletrodo Revestido, Trinca Induzida por Hidrogênio, Celulósico, Rutilico, Básico.

CAJU, M. G. **Assessing the level of diffusible hydrogen in weld metal deposited by different coated electrodes** 2012. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRAC

This study aims to assess the diffusible hydrogen levels in weld metal deposited by different coated electrodes. The shielded metal arc welding process was used with different classes of electrodes and a set of specimens that helped to perform this study. The origins of this hydrogen come from the moisture in the electrode coating and, in some cases, the organic material which this coating is made. This hydrogen can act with fragile microstructures (martensite) and stresses which develop in the welded joints, to generates "Hydrogen Cracking." This analysis employed three different types of coated electrodes most commonly found on the market, i. e.: Cellulose, Rutile and Basic. The weld metal in the molten phase absorbs a considerable amount of hydrogen in the pool; during the cooling phase of it, this spreads migrating to the heat affected zone (HAZ). Thus, the possibility of appearance of cracks becomes very large, if there were certain conditions, as mentioned. By welding of test specimens prepared exclusively for this experiment, it was possible to measure the amount of hydrogen. To develop this analysis it was necessary to use of a dedicated gas chromatography equipment. In conclusion, it was possible to verify the influence of backing temperature (and time) of the electrode, the electrode exposition to environment and also the climatic conditions during the execution of welding. These factors appeared to increase the level of diffusible hydrogen in weld metal.

KEYWORDS: Coated electrode, Hydrogen Induced Cracking, Cellulose, Rutile, Basic.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3.1. Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodos Revestidos.....	1
3.2. Eletrodos Revestidos	2
3.2.1. Tipo de Eletrodos Revestidos	2
3.2.2. Classificações dos eletrodos	3
3.3. Trincas.....	3
3.4. Fragilizações por Hidrogênio.....	3
3.4.1. Trinca Induzida por Hidrogênio.....	3
3.4.2. Principais fontes	4
3.4.3. Solubilidade e Difusão do Hidrogênio	4
3.5. Carbono Equivalente (CE)	5
3.6. Nível de Hidrogênio em Relação aos Processos.....	6
4. METODOLOGIA.....	6
4.1. Preparação	6
4.2. Cromatógrafo OERLIKON YANACO G-1006H	8
4.2.1. Cromatografia Gasosa.....	8
4.2.2. Constituição e generalidades.....	8
4.2.3. Princípio de funcionamento.....	9
4.2.4. Procedimentos de Análise	10
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
5.1. Levantamento dos Valores	11
6. CONCLUSÃO.....	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	15
ANEXO 1.....	16

1. INTRODUÇÃO

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido surgiu como um dos procedimentos mais simples na ação da coalescência entre duas peças, tornando-se um dos mais importantes processos devido a sua enorme flexibilidade, versatilidade nas ações e baixo custo. [Machado, 1996].

Uma das vantagens da aplicação da soldagem com eletrodos revestidos é a flexibilidade do processo com aplicação simplificada para a união de duas peças em qualquer posição. Necessita de um circuito elétrico constituído apenas de uma fonte de corrente constante ou tensão, dois cabos ligados a esta fonte, um eletrodo e a peça propriamente dita a ser soldada. Nas extremidades desses cabos, em um deles é colocado o porta eletrodo, que serve para sustentação do próprio eletrodo e no outro, uma garra para prender a peça e executar o retorno de corrente para a fonte. As desvantagens são que os eletrodos revestidos apresentam taxas baixas de deposição comparadas a outros processos, a influência da umidade sobre o revestimento e uma necessidade maior de treinamento do soldador. [Marques, 1991]

Neste trabalho foi feita a comparação do nível de hidrogênio difusível no metal de solda usando três classes de eletrodos revestidos comerciais quando foram expostos a diferentes níveis de ressecagem. Foram testadas as classes de eletrodos revestidos: celulósicos, rútilicos e básicos. Esse elemento hidrogênio, em composição com estrutura frágil e com grandes tensões constrangidas, possibilita o aparecimento da “Trinca Induzida por Hidrogênio” (TIH). Para tal objetivo, foi produzido no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, um conjunto de corpos de prova que serviram de teste para os ensaios comparativos dos eletrodos revestidos comerciais solicitados.

2. OBJETIVOS

Esse trabalho foi baseado fundamentalmente na comparação entre os eletrodos celulósicos, os eletrodos rútilicos e os básicos em relação à quantidade de hidrogênio difusível depositado no metal de solda. A metodologia de análise constitui das seguintes etapas:

1 – Confecção, seguindo o padrão AWS 4.3-93, de corpos de prova nas medidas desejadas e sua preparação com tratamento destinado antes da soldagem.

2 – Utilização dos eletrodos consumíveis destacados acima para a realização do processo de soldagem nos corpos de prova, seguindo um estudo experimental com variação da temperatura de ressecagem diferenciado para as classes de eletrodos.

3 – Medição da quantidade de hidrogênio que foi depositado no metal de solda, através do equipamento de cromatografia gasosa. Avaliação da sua quantidade em mililitros por gramas de metal de solda depositado.

4 – Análise da relação entre a fragilização por hidrogênio, o surgimento das trincas e a soldagem por eletrodos.

5 – Comparação dos valores e justificativa dos resultados obtidos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodos Revestidos.

Segundo a definição da AWS (American Welding Society), “soldagem é o processo de união de materiais usado para obter a coalescência localizada de metais e não metais, produzindo por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”.

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido se mantém como um dos processos mais versáteis e funcionais no campo da soldagem. Conhecida também como soldagem manual a arco elétrico, esta se consolidou pela facilidade de manuseio e operação em diferentes posições para garantir a união entre as peça conforme a figura 3.1. É realizada

através do calor de um arco elétrico que se mantém entre o eletrodo e a peça. Ocorre então, a fundição do metal base juntamente com o eletrodo revestido, como metal de adição na poça de fusão, criando o metal de solda. O revestimento participa como o agente protetor desta poça de fusão através dos gases resultantes da sua queima e ainda contribui com elementos químicos que melhoram o desempenho do metal de solda solidificado [ESAB, 1993].

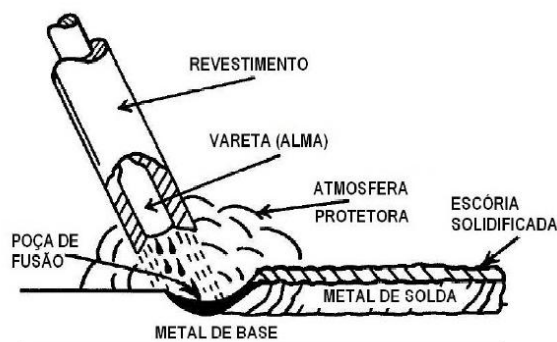


Figura 3.1 - Processo de soldagem com eletrodos revestidos. [ESAB, 1993]

É encontrada na região da soldagem a formação de três zonas distintas. Primeiro, a formação da zona fundida, onde é composta pelo material do eletrodo, como metal de adição, e mais uma porção do metal de base. Em seguida, a zona afetada pelo calor (ZAC), como uma região atingida pelo calor no entorno da zona fundida do metal de solda. É a região não fundida do metal de base que sofreu transformações na sua microestrutura devido ao ciclo térmico durante da soldagem. Em aços, sua microestrutura final dependerá exclusivamente da velocidade de resfriamento, do teor de carbono e do tamanho do grão austenítico, o que em muitos casos a deixa fragilizada. Com velocidade de resfriamento muito elevada, cria-se uma região com microestrutura martensítica e com grãos grosseiros. E por último, o metal base, como parte do metal que não sofreu mudança estrutural. [Marques, 1991].

3.2. Eletrodos Revestidos

Os eletrodos revestidos são constituídos de uma vareta metálica, também chamada de “alma”, e seu revestimento. Suas medidas estão entre a faixa de 230 a 450 mm e diâmetro entre 1,5 a 8 mm. Na produção da vareta metálica, são usados os aços de baixo carbono que são laminados a quente e em seguida trefilados a frio até o diâmetro pretendido.

As principais funções dos revestimentos são: proteção do metal de solda, estabilização do arco, adição de elementos de liga no metal de solda, direcionamento do arco elétrico, isolamento da alma, melhoria no desempenho das propriedades mecânicas-metalúrgicas, influência nas posições de soldagem, integridade do metal de solda e produção de escória. [Marques, 1991].

3.2.1. Tipo de Eletrodos Revestidos

Os revestimentos determinam as características operacionais dos consumíveis, influenciam a composição química e propriedades mecânicas da solda efetuada. Foram utilizados neste trabalho três classes de eletrodos revestidos, que serão relacionadas abaixo.

Os eletrodos celulósicos possuem no seu revestimento, material com alto teor de celulose proveniente da composição orgânica que constitui, juntamente com a dextrina e óxido de titânio (TiO_2). Possui as características de produzir um arco intenso que determina uma boa penetração em todas as posições. Tem a desvantagem para o problema da fragilização por hidrogênio devido ao seu próprio revestimento introduzir hidrogênio oriundo da celulose no metal de solda. Embora presente esse problema, ressecar este eletrodo levaria a queima da

celulose, gerando desempenho insatisfatório com perda da tensão no arco e porosidade no metal de solda. [ESAB, 1993] [Marques, 1991].

Os eletrodos rutilicos são de aplicação geral e tem grande versalidade. Seu revestimento misto possui até 50% de óxido de titânio (TiO_2) e até 15% de matéria orgânica, garantindo uma produção de escoria fluída de rápida solidificação destacada facilmente. O nível de hidrogênio que esta classe pode introduzir no metal de solda é alto, em torno de 30 ml/100 g, fazendo a necessidade de ressecagem em temperaturas médias. Havendo exposição em temperaturas superiores, ocorre a perda da capacidade redutora do hidrogênio. [ESAB, 1993] [Machado, 1996].

Já os eletrodos básicos superam os anteriores nos desempenhos de maior tenacidade e nas propriedades metalúrgicas. Seu revestimento é formado por cálcio ou outros carbonetos básicos e fluorita ligados com carbonetos de sódio ou potássio. Sua aplicação está voltada a projetos de grandes solicitações e onde necessária resistência ao impacto a baixas temperaturas. A grande vantagem é o baixo índice de hidrogênio que pode introduzir no metal de solda, diminuindo a possibilidade de trinca induzida por hidrogênio. Para atingir esse objetivo, precisa ser armazenado em locais climatizados, com embalagens a vácuo e requer ressecagem com altas temperaturas devido à capacidade higroscópica. [ESAB, 1993] [Marques, 1991].

3.2.2. Classificações dos eletrodos

Segundo o Instituto Internacional de Soldagem (IIW), os eletrodos são classificados em relação ao nível de hidrogênio como:

- Muito baixo hidrogênio (faixa de 0 a 5 ml/100 g)
- Baixo hidrogênio (faixa de 5 -10 ml/100 g)
- Médio hidrogênio (faixa de 10 -15 ml/100 g)
- Alto hidrogênio (acima de 15 ml/100 g)

Os eletrodos revestidos usados para essa experiência foram classificados segundo esta norma. Sem ressecagem, os eletrodos celulósicos e rutilicos foram classificados como alto hidrogênio e eletrodos básicos classificados como de médio hidrogênio.

3.3. Trincas

Um dos problemas mais preocupantes nas juntas soldadas são os surgimentos das trincas justamente por ser um fator muito grande de concentração de tensões. Após o resfriamento da ZAC, há o surgimento de tensões de tração, tensões residuais, ou até mesmo tensões oriundas de esforços externos desenvolvendo-se na região fragilizada. E esta é incapaz de absorver tais deformações. Essas tensões surgem devido à variação térmica resultante da soldagem nesta região, ou seja, a contração e a dilatação térmica e a variação do volume na transformação de fase que ocorre com o metal base. [Modenesi, 2001]

3.4. Fragilizações por Hidrogênio

3.4.1. Trinca Induzida por Hidrogênio

As Trincas Induzidas por Hidrogênio representam um dos problemas mais comuns apresentados em estruturas de aço soldáveis. Devido à alta energia consumida no processo de soldagem por eletrodos revestidos, esta consegue dissociar a molécula da água (H_2O) presente no revestimento, através da umidade, e transformá-la em hidrogênio iônico (H^+). Após isso, o hidrogênio é incorporado à poça de fusão e com outros fatores presentes possíveis, podem surgir trincas nos aços temperáveis, podendo levar a um possível colapso estrutural. [Davidson, 1995].

Conforme apresentado na figura 3.2, as trincas induzidas por hidrogênio são conhecidas também como “Trincas a frio” ou “Trincas retardadas”, com periculosidade maior que as trincas a quente. Frequentemente surgem após a solidificação do metal de solda por ação de alguns fatores que agem em conjunto. Isto pode ocorrer alguns minutos, horas ou dias após o término da soldagem em peças e estruturas constrangidas. Sua detecção torna-se muito difícil através de ensaios não destrutivos.

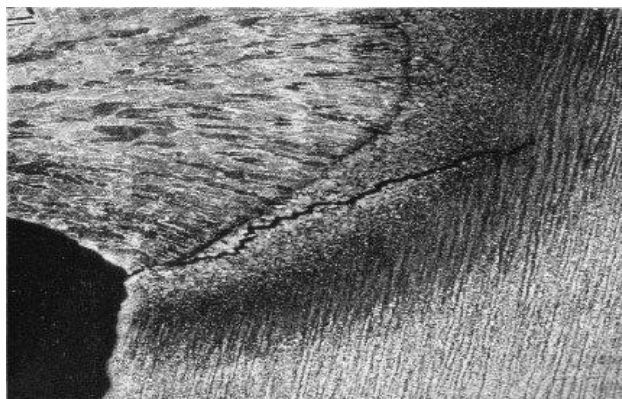


Figura – 3.2 Trinca sob cordão. [Wendland, 2011]

Esta fissuração é causada por consequência direta de quatro fatores que atuam de forma conjunta, porém esses fatores isoladamente não podem causar as trincas induzidas. [F. R. Coe 1986].

- Presença do hidrogênio dissolvido no metal de solda.
- Microestrutura martensítica.
- Grandes concentrações de tensão de tração.
- Baixa temperatura (abaixo de 150 °C).

3.4.2. Principais fontes

Alguns elementos formadores dos revestimentos dos eletrodos possuem capacidade de absorverem vapor d'água. Estes revestimentos possuem natureza higroscópica e quando expostos a umidade, absorvem altas taxas de vapor d'água e conseqüentemente elevam os níveis de hidrogênio no metal de solda. A taxa de absorção depende da umidade relativa do ar e das condições ambientais que serão desenvolvidos os processos de soldagem. [Granville, 1967].

Outros fatores que introduz o hidrogênio no metal de solda podem surgir através da corrosão, pelo próprio revestimento através de material orgânico e das formas inadequadas de armazenamento. Podem estar presentes também em graxas e lubrificantes, que são compostos de hidrocarbonetos, que são utilizados no trefilamento dos arames e nos processos de produção. [Granville, 1967].

3.4.3. Solubilidade e Difusão do Hidrogênio

Na temperatura do arco elétrico, a molécula de água dissocia-se em hidrogênio atômico ou hidrogênio iônico (H+) e supersatura o metal de solda. Este hidrogênio possui um comportamento diferenciado no metal de solda. Isso é em decorrência do processo de solidificação da fase líquida e, em seguida, devido as descontinuidades na solubilidade e na difusão durante o mesmo processo. A curva de solubilidade do hidrogênio apresenta no ferro y uma descontinuidade durante a transformação da austenita em ferrita, enquanto ocorre uma

descontinuidade inversa referente ao coeficiente de difusão que é maior na ferrita em relação a austenita, conforme a figura 3.4. [Granjon,1971].

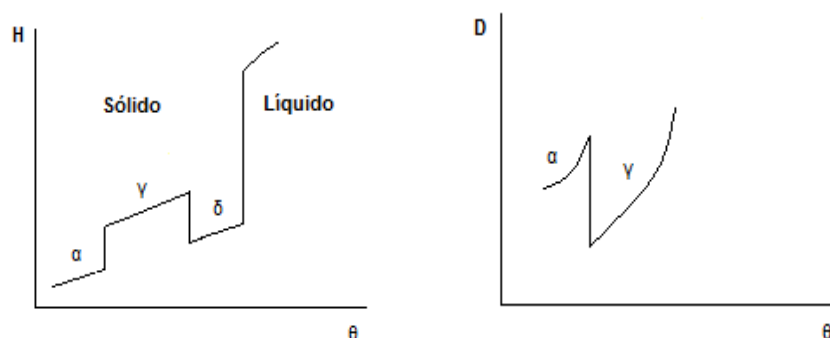


Figura 3.4 – Solubilidade e difusão do hidrogênio no metal de solda.[Granjon,1971]

Para exemplificar melhor, existe uma relação entre o diagrama de solubilidade do hidrogênio e as transformações que ocorrem no metal de solda e na ZAC, de tal forma que a solubilidade influencia diretamente a difusão do hidrogênio do metal de solda para o metal de base, quando este último começa a sofrer transformações martensíticas. A partir da isoterma T_f , o metal de solda está em estado austenítico (ferro γ) e carregado de H^+ com pouco tempo para difundir no metal base também austenítico, como mostra a figura 3.5. Quando ocorre a transformação perlitica no metal de solda, o hidrogênio fica menos solúvel, e difunde-se mais facilmente com um aumento súbito. Sob esta condição, a tendência é passar na adjacência da solda ao longo de A B e entrar na zona austenítica da ZAC. Considerando que o coeficiente de difusão na austenita é pequeno, cria-se então uma frente de hidrogênio.

A partir do ponto B é que a transformação austenítica ocorre na ZAC do metal base. Esta transformação move-se do exterior para o interior avançando e encontrando frente de hidrogênio. A austenita então transforma-se em martensita já carregada de hidrogênio. Nesta condição, juntamente com as características relacionadas anteriormente, a possibilidade de aparecimento de trincas torna-se provável.[Granjon,1971].

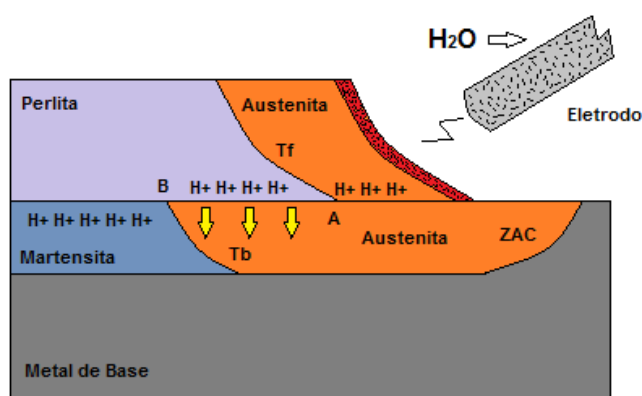


Figura 3.5 – Esquema da difusão do hidrogênio no metal de solda durante o processo de soldagem e resfriamento. [Grajon,1971]

3.5. Carbono Equivalente (CE)

A composição do metal de base tem uma influência forte sobre a transformação martensítica da ZAC devido às altas taxas de resfriamento comuns em processo de soldagem.

Em soldagem, a temperabilidade de um material é expresso basicamente em termos do seu teor de carbono ou quando outros elementos são levados em conta, no seu valor de carbono equivalente (CE). Quanto maior o valor de CE, maior a possibilidade de trincas de hidrogênio. Normalmente, os aços com um valor de carbono equivalente igual ou menor que 0,4 não são suscetíveis às trincas induzidas por hidrogênio na ZAC, quando for utilizado consumíveis de baixo valor de hidrogênio. Segundo a classificação da IIW tem-se:

$$CE = C\% + \frac{Mn\%}{6} + \frac{Cr\%}{5} + \frac{Mo\%}{5} + \frac{V\%}{5} + \frac{Ni\%}{5} + \frac{Cu\%}{15} \quad (3.1)$$

3.6. Nível de Hidrogênio em Relação aos Processos

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido é o processo mais suscetível à ação do hidrogênio, comparando com outros processos de soldagem existentes. Analisando a figura. 3.6, observa-se o nível potencial de hidrogênio dos processos por hidrogênio difusível no metal de solda. Este potencial de hidrogênio é a soma de todos os hidrogênios presentes nas mais variadas formas, e que podem introduzir na soldagem e influencia proporcionalmente no teor do hidrogênio no metal de solda. Verifica na figura 3.6, a diferença entre os processos de soldagem, com maior incidência nos eletrodos revestidos e em menor escala nos processos com proteção gasosa MIG/MAG - TIG. [F. R. Coe 1973].

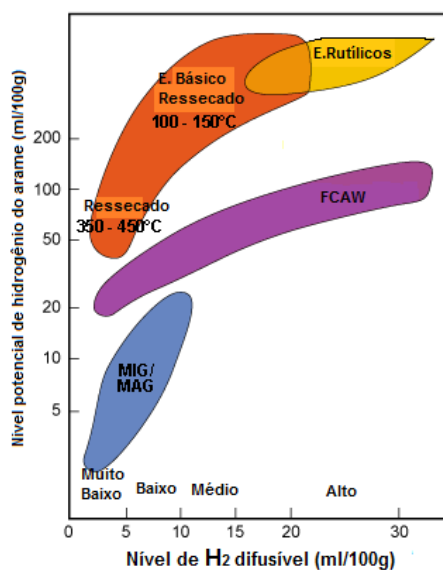


Figura 3.6 - Nível de hidrogênio comparativo entre os processos. [F. R. Coe, 1973]

4. METODOLOGIA

4.1. Preparação

A metodologia deste trabalho foi baseada na norma AWS 4.3-93 (Standart Methods for Determination of the Diffusible Hydrogen), partindo do ponto que os corpos de prova quando soldados com consumíveis expostos às condições de umidade, apresentavam uma determinada quantidade de hidrogênio medido através de um equipamento cromatógrafo.

Para tornar os resultados menos aleatórios e reprodutíveis foram realizados alguns procedimentos para garantir a confiabilidade. O número de corpos de prova soldados foram quatro em cada cordão de solda. Todas as soldagens das classes de consumíveis separados para essa experiência foram repetidas três vezes, tanto para os eletrodos não ressecados,

como também, para os eletrodos ressecados. As soldagens com os eletrodos utilizados e com diferentes tempos de ressecagem seguem a sequência descrita na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Eletrodos revestidos utilizados e suas ressecagens

Eletrodos	Ressecagem	Classe	Eletrodos	Ressecagem	Classe
1	0	Celulósico	12	0	Rutílico
2	0	Celulósico	13	150°C/2 h	Básico
3	0	Celulósico	14	150°C/2 h	Básico
4	0	Rutílico	15	150°C/2 h	Básico
5	0	Rutílico	16	135°C/2 h	Rutílico
6	0	Rutílico	17	135°C/2 h	Rutílico
7	0	Básico	18	135°C/2 h	Rutílico
8	0	Básico	19	350°C/2 h	Básico
9	0	Básico	20	350°C/2 h	Básico
10	0	Rutílico	21	350°C/2 h	Básico
11	0	Rutílico			

Para este estudo, foi utilizado um aço AISI 1020, para produzir os corpos de prova retangulares. As chapas possuíam as medidas de 250 mm x 100 mm x 12 mm, foram cortadas em filetes de 100 mm x 25 mm x 12 mm e novamente utilizando um disco de corte, em pequenas peças quadrilaterais de 25 mm x 25 mm x 12 mm. Após essas ações, as peças foram levadas a um forno elétrico numa temperatura de 800 °C por 2 h, e desta forma, liberarem os elementos químicos que estavam presentes na superfície da chapa até o início dessa experiência. Ao serem retiradas, as peças foram divididas em grupos de quatro e numeradas para facilitar a identificação nas medições. Logo em seguida, estas foram lixadas para a retirada da carepa e eliminação dos vestígios de corrosão, apresentando um melhor aspecto visual, como mostra a figura 4.1.



Figura 4.1 - Corpos de prova

Após preparação dos corpos de prova, foram iniciados os procedimentos de ajuste para a soldagem dos mesmos. As ações a seguir foram padronizadas para todos os eletrodos. A fonte de soldagem foi preparada, com corrente constante de 100 A e tensão de circuito aberto de 80 V. Foram anotados também os valores de outras variáveis que influenciavam o ambiente como: temperatura de bulbo seco e bulbo úmido e a umidade relativa do ar presente no ambiente.

Com as peças prontas, as mesmas foram mantidas condicionadas numa estufa a 150 °C, e retiradas apenas no momento da soldagem, impedindo desta forma que uma nova

oxidação das mesmas pudesse comprometer qualquer medição. Antes do início da soldagem, as peças numeradas foram selecionadas em grupo de quatro (1-2-3-4) e pesadas. Foi evitado qualquer contato manual, estas peças foram devidamente limpas com álcool etílico, para retirar os resíduos presentes.

Foi utilizado um bloco padrão para soldagem na produção de um cordão de solda sobre os quatro corpos de prova no sentido longitudinal, formando uma peça única. Foram registrados o tempo de soldagem e as variações de tensão, que neste caso apresentaram uma média entre 20 a 30 V.

Depois de soldados, os corpos de prova foram resfriados em uma cuba com água gelada. Em seguida, foram separados individualmente através do uso de um martelo e passaram a repousar em um recipiente contendo nitrogênio líquido, como mostra a figura 4.2. Nestas condições, os gases permaneceram presos no metal de solda evitando qualquer possibilidade de fuga dos mesmos. O corpo de prova era retirado do nitrogênio, e preso a uma morsa, sendo efetuada também a limpeza com uma escova de aço, para garantir a retirada da escória. Esses procedimentos foram repetidos para todos os corpos de prova. Tanto a morsa quanto o bloco padrão de soldagem foram lixados e limpos para tentar diminuir a ação de elementos externos. No fim, foi aplicado um jato de argônio no corpo de prova antes de ser colocado no compartimento respectivo de um amostrador do equipamento cromatográfico, sendo explicado mais detalhadamente à frente.



Figura 4.2 – Materiais e ferramentas utilizados na preparação e manuseio dos corpos de prova.

4.2. Cromatógrafo OERLIKON YANACO G-1006H

4.2.1. Cromatografia Gasosa

A cromatografia gasosa é um método de separação e análise de misturas de substâncias voláteis. No caso da medição do hidrogênio, a amostra desse elemento é conduzida juntamente com um fluxo de um gás adequado denominado fase móvel (FM) ou gás de arraste. Este fluxo de gás com a amostra vaporizada passa por um tubo contendo uma fase estacionária (FE) onde ocorre uma separação da mistura. Finalmente, os gases passam por um detector, responsável por mensurar a quantidade de gás.

4.2.2. Constituição e generalidades

O equipamento de cromatografia gasosa fabricado pela empresa suíça OERLIKON, modelo G-1006 H, foi desenvolvido para determinar e mensurar o hidrogênio difusível incluso no metal de solda, conforme figura 4.3.

Este equipamento é constituído por três partes. Um analisador trabalhando como equipamento de medição com dois circuitos de circulação de gás, um para o gás argônio e

outro para o gás hidrogênio. Um amostrador composto por um conjunto com cinco recipientes diferentes para recebimento dos corpos de prova e identificados como: 1-2-3-4-B, conforme figura 4.4.

Cada recipiente deste amostrador, ha um par de pequenos tubos de entrada e saída de gases. Estes recipientes são selecionados individualmente através de uma chave mecânica, sendo que um deles é um recipiente de passagem “by-pass” em B, para garantir que os recipientes 1-2-3-4 não sofram influência do meio externo após fechados. E por fim uma estufa, onde o amostrador é colocado e é feito a retirada dos gases presos no metal de solda dos corpos de prova.



Figura 4.3 - Cromatógrafo Oerlikon-Yanaco



Figura 4.4 – Amostrador com recipientes

4.2.3. Princípio de funcionamento

Este equipamento possui duas entradas para fornecimento de gás trazido por cilindros externos: uma para o argônio, que trabalha com gás de arraste e outra para o hidrogênio que trabalha como gás de referência. Esta referência é ocupada no espaço do tubo de medição de hidrogênio que possui um volume de 2 ml. O circuito interno do equipamento se mostra na figura 4.5.

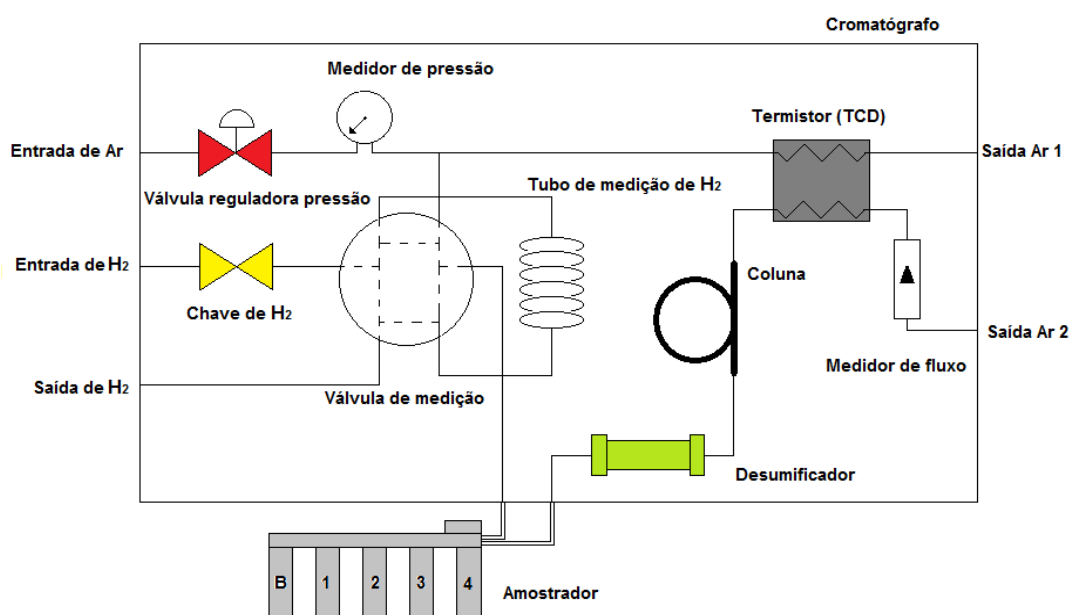


Figura 4.5 – Diagrama interno do cromatógrafo.

Para efetuar uma medição, o argônio, o gás de arraste, transporta o gás hidrogênio do amostrador para o cromatógrafo. Esta mistura passa por um desumidificador, que retém qualquer quantidade de vapor d'água que possa estar presente nas tubulações do equipamento e influenciar uma medição. Em seguida a mistura passa através de uma coluna cromatográfica, que é responsável pela separação de alguns elementos que possam estar presentes na mistura e também influenciar na medição. Esta é uma coluna do tipo empacotada e é composta de pequenas partículas de alumina dentro da tubulação. Tem um formato espiral e garante a passagem de hidrogênio para o detector.

No detector, é realizada a medição de hidrogênio proveniente da coluna. Seu funcionamento está baseado na taxa de perda de calor de um corpo quente que é proporcional entre outros fatores, à condutividade térmica do gás que envolve algum corpo. O resistor de condutividade térmica é aquecido por uma pequena fonte e está montado dentro de um orifício em um bloco metálico aquecido com temperatura menor que a temperatura da resistência. Por este orifício acontece a passagem do gás de arraste.

Ocorrendo uma passagem de gás de arraste puro, sendo enviado ao cilindro de gás externo, há uma taxa de perda de calor em um valor constante. Caso seja enviada uma mistura de gás de argônio e mais gás hidrogênio, haverá uma mudança na condutividade térmica do gás, e logo uma alteração na resistência diferente da anterior. Este termistor está ligado a uma Ponte de Wheatstone que envia as variações resistivas em forma de corrente para um circuito elétrico.

4.2.4. Procedimentos de Análise

Após a soldagem, os corpos de prova foram colocados dentro do amostrador e em cada recipiente marcado na ordem com B-1-2-3-4. Os corpos de prova também foram colocados nesses respectivos espaços obedecendo às marcações feitas nos mesmos na identificação.

Para a eliminação dos gases atmosféricos presentes nos recipientes, estes foram purgados com gás argônio durante 30 s, sendo direcionado em todas as posições com a chave seletora mecânica. Finalizando essa parte, o seletor do amostrador foi colocado na posição de "by-pass" em B sendo enviado para a estufa do próprio equipamento. Permanece por 6 h em uma temperatura de 150 °C.

Ao término deste período, o hidrogênio encontrava-se liberado e retido nos recipientes, pronto para ser mensurado pelo equipamento cromatógrafo. Ainda assim, foi necessário um tempo para o resfriamento do amostrador, para que a análise fosse feita em temperatura ambiente. Então, o amostrador na posição de "by pass" em B, foi conectado pelas entradas frontais de gás do cromatógrafo.

Com as leituras prontas, os corpos de prova foram retirados para novamente serem pesados e calculados na quantidade de hidrogênio em mililitros (ml) por 100 g de metal de solda. Essa pesagem final foi relatada o peso total, composto do peso do corpo de prova, mais o peso da quantidade de solda que foi depositada como metal de adição. Este valor de peso total foi subtraído do peso do corpo de prova que foi anotado inicialmente, antes do processo de soldagem. Com essa diferença, e mais o valor da quantidade de hidrogênio em mililitros obtido pelo cromatógrafo, foi feito um cálculo proporcional. Foi obtido o valor em ml/100 g de metal de solda que foi depositado no respectivo corpo de prova conforme a equação 4.1. Repetiu-se esse procedimento nos corpos de prova restantes.

$$H = 100 \times \frac{h}{\Delta ms} \quad (4.1)$$

Onde h a quantidade de hidrogênio difusível em mililitros (ml), Δms a quantidade de metal de solda em gramas (g) e H a mesma quantidade de hidrogênio difusível, porém em mililitros por 100 gramas de solda (ml/100 g).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Levantamento dos Valores

Após a leitura através do cromatógrafo, foram obtidos os valores das soldagens relativas às três classes de eletrodos com a variação no parâmetro da ressecagem. Foi também observada a influência da umidade relativa decorrente do dia das soldagens.

As soldagens foram iniciadas com o consumível E6010 celulósico e este tipo de consumível é composto por material orgânico. Após a soldagem e o tempo de análise no aparelho cromatográfico foram obtidos os valores conforme figura 5.1.

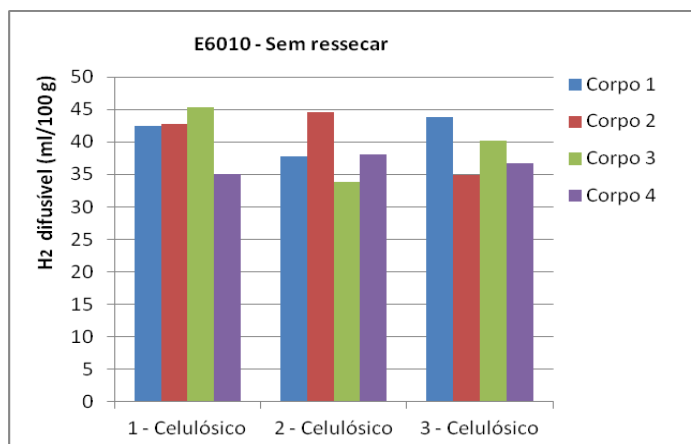


Figura 5.1 – Eletrodos celulósicos E6010 sem ressecar

Pela figura 5.1, verificou-se que em condições normais, os eletrodos celulósicos carregam altos níveis de hidrogênio e confirmaram os valores deste consumível permanecendo acima de 30 ml/100 g. Outro detalhe observado foram as condições de armazenagem dos eletrodos que estiveram em contato com o ambiente sem estarem devidamente protegidos da umidade.

Em seguida foram realizados os mesmos procedimentos para as classes de eletrodos revestidos rútilicos E6013 e eletrodos revestidos básicos E7018, nas mesmas condições, ou seja, sem ressecagem. Essas duas soldagens foram realizadas em dias diferentes, sendo anotados os valores de hidrogênio, os procedimentos durante a soldagem e as condições climáticas. Segue abaixo, figura 5.2, o nível de hidrogênio difusível do eletrodo E6013.

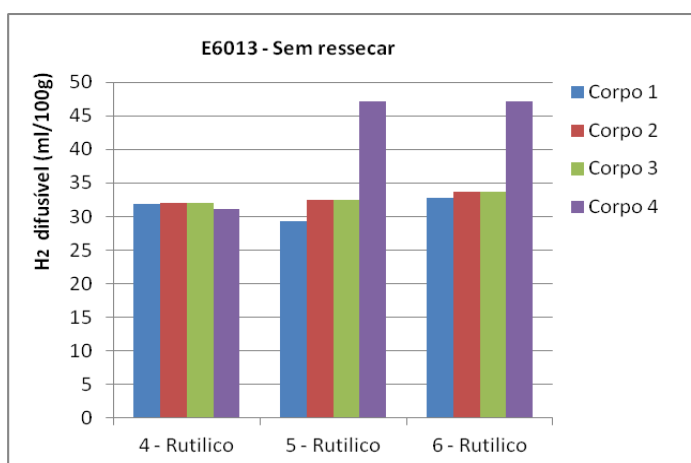


Figura 5.2 – Eletrodos rútilicos E6013 sem ressecar

Os valores que foram determinados ficaram acima do especificado, que para esta classe de eletrodo estabelece no valor de 25 ml/100 g de metal de solda. Além disso, alguns valores não corresponderam, apresentando índices acima de 40 ml/100 g. Isso pode ser devido as possíveis falhas no manuseio dos corpos de prova. Uma das justificativas, passa pelo o fato que os tratamentos no condicionamento de alguns corpos de prova não foram efetivos, surgindo o descontrole desses valores.

Os eletrodos básicos apresentaram um valor de médio hidrogênio, confirmando o bom comportamento e qualidade que esta classe determinava. Mesmo sem ressecar e em contato com a umidade, 75% dos seus valores ficaram abaixo de 15 ml/100 g conforme a figura 5.3.

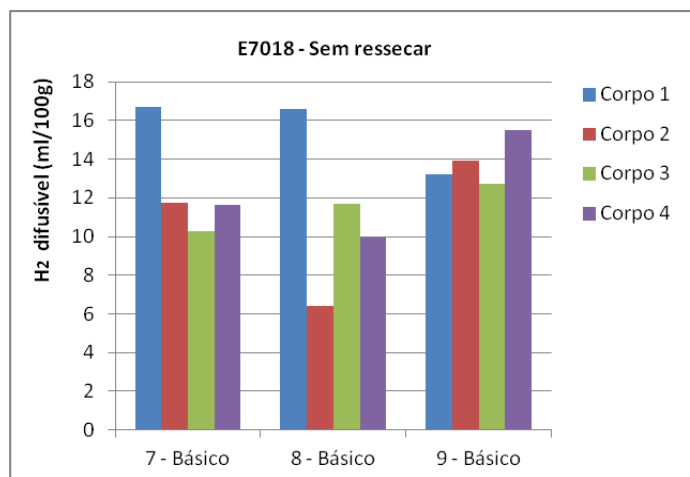


Figura 5.3 – Eletrodos básicos E7018 sem ressecar

A título de comparação, foi adquirido outro grupo de eletrodos revestidos rútilicos adquiridos no comércio, para serem avaliados junto com os eletrodos revestidos rútilicos que se encontravam no depósito do LS&TC. Os eletrodos rútilicos adquiridos no comércio também acusaram alto índice de hidrogênio. A justificativa pode ser condicionamento insuficiente na estocagem, já que os esses eletrodos foram adquiridos em pacotes abertos. Segue abaixo a figura 5.4, com os níveis de hidrogênio do eletrodo E6013.

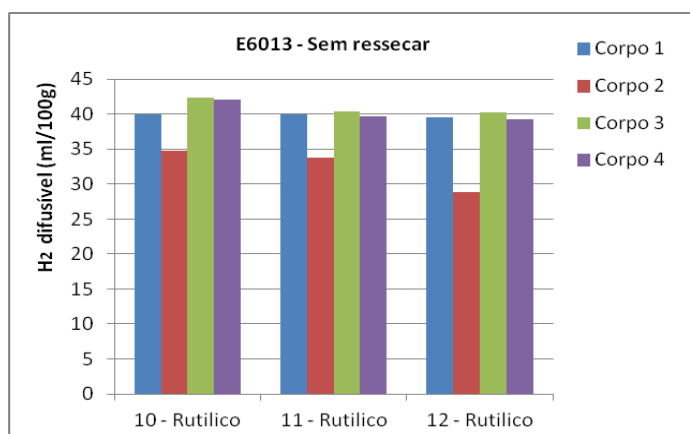


Figura 5.4 – Eletrodos rútilicos E6013 sem ressecar

Após esta primeira etapa, foi feito a ressecagem dos eletrodos revestidos para reduzir a umidade e por consequência o nível de hidrogênio. Porém, somente os eletrodos rútilicos E6013 e eletrodos básicos E7018 receberam este cuidado. Lembrando que não está previsto

nos eletrodos celulósicos este procedimento, pois comprometeria as qualidades do seu revestimento.

Os eletrodos básicos foram ressecados em uma temperatura de 150 °C por 2 h, segundo as normas exigidas pelo o fabricante, e os resultados foram menores que em relação aos valores da figura 5.3. Mostrando a ação do ressecamento sobre o eletrodo E7018, os valores apresentados seguem conforme a figura 5.5. Com isso, esses eletrodos revestidos puderam ser classificados como de “baixo hidrogênio”.

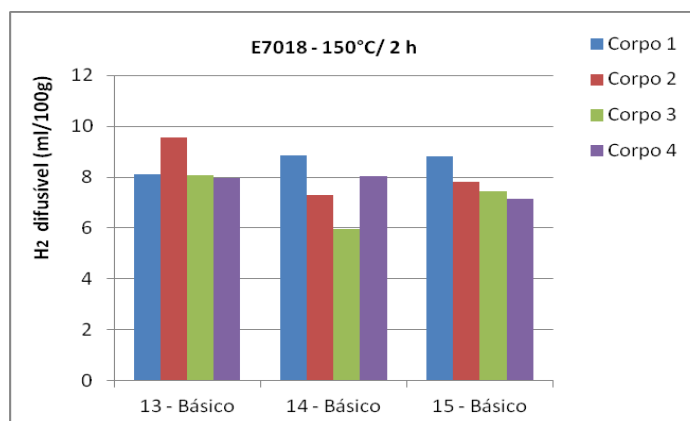


Figura 5.5 – Eletrodos básicos E7018 ressecados

Na etapa seguinte, foram ressecados os eletrodos rútilicos foram ressecados a 135 °C por 2 h e os resultados não corresponderam com o esperado, com 66% dos valores acima de 30 ml/100 g. Não houve uma ação efetiva do ressecamento para esta classe, embora comparando com os eletrodos rútilicos sem ressecagem da figura 5.4, os valores encontrados presentes na figura 5.6, são menores.

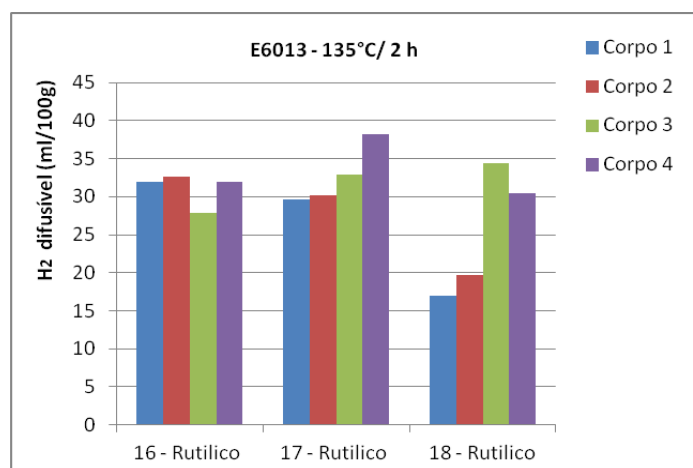


Figura 5.6 – Eletrodos rútilicos E6013 ressecados

Para finalizar, foram ressecados os eletrodos básicos a 350 °C por 2 h, mostrando que os valores encontrados foram próximos da faixa prevista. A partir deste tratamento, todos os valores colhidos foram classificados como “baixo hidrogênio”, porém nenhum desses valores não atingiu o exigido para a classificação de “muito baixo hidrogênio”. Segue abaixo os valores conforme figura 5.7.

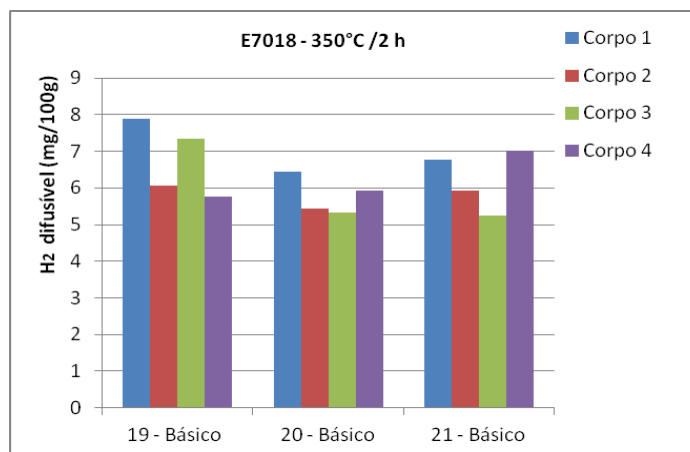


Figura 5.7 – Eletrodos básicos E7018 ressecados

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos foram relevantes e partindo dessa análise foram verificados os pressupostos.

- Os eletrodos celulósicos apresentaram valores muito altos de hidrogênio, por consequência direta da exposição demasiada a umidade do depósito. Os valores variaram na entre 38 e 41 ml/100 g.
- Os eletrodos rútilicos que não foram ressecados também apresentaram valores acima do previsto por permaneceram expostos à umidade e sem condicionamento previsto pelos manuais. Ficaram com uma entre 31 a 38 ml/100 g
- Os eletrodos rútilicos que foram adquiridos no comércio e sem ressecagem apresentaram um conjunto de valores altos, entre 35 a 37 ml/100 g de hidrogênio. Estes eletrodos também foram encontrados expostos à umidade e sem a proteção devida no comércio.
- Os eletrodos básicos sem ressecagem apresentaram valores que os classificavam com de “médio hidrogênio”, entre 10 e 15 ml/100 g, embora fossem os menores valores entre as três classes sem ressecagem que foram testadas. Conferindo assim, a qualidade e o baixo índice de hidrogênio desta classe de eletrodo.
- Após a primeira ressecagem, conforme previsto no manual do fabricante de 150°C/2 h, os eletrodos básicos ficaram com os valores de “baixo hidrogênio” com $H_2 \leq 10$ ml/.100 g. Foram encontrados os valores de 6 a 9 ml/100 g.
- Já os eletrodos rútilicos que foram ressecados a 135°C/2 h, apresentaram uma queda relativa em relação à mesma classe sem ressecamento, porém ainda acima do exigido. Entre os valores de hidrogênio difusível encontrados, 66% foram acima de 30 ml/ 100 g, não atendendo a finalidade do ressecamento. Houve também nos dias de execução das soldagens 94% umidade relativa do ar, o que pode ter contribuído para estes altos valores de hidrogênio.
- Finalmente, os eletrodos básicos foram ressecados em 350°C/2 h apresentaram valores baixos, entre 5 a 7 ml/100 g, porém não conseguiram atingir o patamar da classificação dos eletrodos com “muito baixo hidrogênio” com $H_2 \leq 5$ ml/100 g.

Finalizando, o tempo da ressecagem influenciou diretamente o nível de hidrogênio induzido na soldagem dos corpos de prova. Não foi descartada também a atuação da umidade presente no ambiente, que também contribuiu como fator adicional de hidrogênio.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS 4.3-93 **“Standart Methods for Determination of the Diffusible Hydrogen”**.

COE, F. R. - **“Welding Steels without Hydrogen Cracking”**, Abington Publishing, 1973.

DAVIDSON, J. L. - “Hydrogen-induced cracking of low carbon – low allow steel weldments. **“Materials Forum”**, v.19, p.35-51, 1995.

DAVIES, A. C. - **“The Science and Practice of Welding”**, Cambridge University Press. 1963.

ESAB, **“Eletrodos revestidos OK”**, <http://www.esab.com.br>.

GRANJON, H. - Cold cracking in the welding of steels. **“Welding in the World”**, v.9, n°11/12, p. 383-396, 1971.

GRANVILLE, B.A; BAKER, R.G & WATKINSON, F. - Effect of temperature and strain rate on hydrogen embrittlement of stell. **“British Welding Journal”**, p. 337-342, 1967.

MACHADO, I. G. - **“Soldagem e Técnicas Conexas: Processos”**, Porto Alegre, editado pelo autor, 1996.

MARQUES, P. V. - **“Tecnologia da Soldagem”**, Belo Horizonte, UFMG, 1991.

MODENESI, P. J; MARQUES, P. V - **“Metalurgia da Soldagem”**, Laboratório de Soldagem e Ensaio Não Destrutivos da – UFMG, 2001.

OKAMURA, T.; TANIGUCHI, C. - **“Engenharia de Soldagem e Aplicações”**, Rio de Janeiro, LTC; Tóquio: The Association for International Technical Promotion, 1982.

SILVA, C. L. J; PARANHOS, R. - **“Fissuração pelo Hidrogênio”**, Infosolda, 2003, www.infosolda.com.br

VIERA, M. C.B - **“Medição do Nível de Hidrogênio no Metal de Solda”**, Porto Alegre, Dissertação de mestrado,UFRGS, 1990.

WENDLAND. H - ,**“Hydrogen Induced Cold Cracking”**, UTP Newsletter, www.utp.de

ANEXO 1

Temperatura e tempo de ressecagem para diferentes tipos de eletrodos revestidos (fabricante ESAB).

Eletrodos OK	Temperatura efetiva nos pacotes de eletrodos (C°)	Tempo real à temperatura efetiva (h)
Básicos	$325 \pm 0,5$	$1,5 \pm 0,5$
Altíssimo Rendimento	$275 \pm 0,5$	$1,5 \pm 0,5$
Rutílicos	$80 \pm 0,5$	$1,5 \pm 0,5$
Ferro Fundido	$80 \pm 0,5$	$1,5 \pm 0,5$
Inoxidável Rutílico	$275 \pm 0,5$	$1,5 \pm 0,5$
Inoxidável Básico	$225 \pm 0,5$	$1,5 \pm 0,5$