

Estudo do efeito da tensão sobre a permeação por Hidrogênio em Aços API 5L X60 e API 5L X65

Bruno Allison Araújo^[1], Reginaldo Florêncio de Paiva Filho^[2], Eudésio Oliveira Vilar^[3], Misael Souto de Oliveira^[4], Antonio Almeida Silva^[5]

[1] bruno.araujo@ifpb.edu.br. [2] reginaldo.paiva@ifpb.edu.br. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba – Campus Cajazeiras. [3] oliveiravilar@live.com.. [4] misaeloliveira_ai@hotmail.com. [5] antonio.almeida@dem.ufcg.edu.br. Universidade Federal de Campina Grande – Campus Campina Grande

RESUMO

Sob as condições de operação, os dutos de transporte de óleo e gás podem estar submetidos a pressões elevadas e, ao mesmo tempo, sofrer o efeito de substâncias ácidas presentes nos hidrocarbonetos transportados, como o H₂S, cuja ação isolada ou combinada com as tensões atuantes na estrutura pode gerar processos de degradação das propriedades mecânicas do material. Diante da importância do fenômeno, este trabalho tem como objetivo principal a realização de testes de permeação eletroquímica de hidrogênio em aços API 5L X60 e API 5L X65 sob condições de carregamento mecânico. Um dispositivo para a realização de testes de permeação eletroquímica de hidrogênio, em corpos de prova submetidos a tensões, foi empregado para a realização dos testes. Com isso, foi possível observar, experimentalmente, a influência da tensão sobre as propriedades de difusão da amostra durante o experimento. Através da aplicação de tensões da ordem de 20% do limite de escoamento dos aços, foi possível verificar o aumento da difusividade do aço API 5L X60. Além disso, verificou-se uma forte influência desse nível de carregamento sobre a permeabilidade, pois ocorreu um grande aumento da permeabilidade do aço API 5L X65. Os resultados indicam que a deformação no retículo cristalino, devido à solitação mecânica imposta, tem grande influência sobre as propriedades de difusão dos materiais.

Palavras-chave: Aços API 5L X60 e API 5L X65. Fragilização por Hidrogênio. Permeação por Hidrogênio.

ABSTRACT

Under operating conditions, the oil and gas transmission pipelines can be subjected to high pressures and, at the same time, suffer the effect of acidic substances in the transported hydrocarbons such as H₂S, whose action alone or combined with stresses acting in the structure can cause degradation processes of the mechanical properties of the material. Given the importance of the phenomenon, this work has as main objective the realization of hydrogen electrochemical permeation tests in API 5L X60 and API 5L X65 steels under mechanical loading conditions. A device for performing electrochemical permeation tests of hydrogen in the specimens subjected to stress was used for the tests. Thus, it was possible to observe experimentally the influence of stress on the diffusion properties during the experiment. By applying stress on the order of 20% of the yield strength, it was possible to verify the increase of diffusivity of API 5L X60 steel. Furthermore, there was a strong influence of the stress level of permeability, because a large increase of permeability of API 5L X65 steel. The results indicate that the lattice deformation due to imposed mechanical stress has a great influence on the diffusion properties of materials.

Keywords: API 5L X60 and API 5L X65 Steels. Hydrogen Embrittlement. Hydrogen Permeation.

1 Introdução

Os problemas de falhas em materiais, especificamente os de trincamento assistido por hidrogênio (*Hydrogen Assisted Cracking – HAC*), é uma das principais questões para o desenvolvimento de aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), já que a possibilidade de HAC aumenta com o nível de resistência do material (ARAFIN; SZPUNAR, 2011).

Sob as condições de operação, os dutos de transporte de óleo e gás podem estar submetidos a pressões elevadas e, ao mesmo tempo, sofrer o efeito de substâncias ácidas presentes nos hidrocarbonetos transportados, como o H_2S , cuja ação isolada ou combinada com as tensões atuantes na estrutura pode gerar processos de degradação das propriedades mecânicas do material. Nos aços, os danos induzidos por hidrogênio podem ocorrer durante (CWIEK, 2005): operação em ambiente corrosivo na forma de fragilização por hidrogênio (*Hydrogen Embrittlement – HE*), ou fragilização por hidrogênio em presença de sulfeto (*Sulfide Stress Cracking – SSC*), caso o ambiente seja rico em H_2S ; trincamento induzido por hidrogênio (*Hydrogen Induced Cracking – HIC*); corrosão sob tensão intensificada por hidrogênio (*Hydrogen Enhanced Stress Corrosion Cracking – HSCC*).

Dos fenômenos citados, *HE* destaca-se como sendo um dos principais problemas. Os átomos de hidrogênio, produzidos durante os processos de fabricação, como fundição e soldagem, e produzidos eletroquimicamente nos sistemas de proteção catódica ou durante a corrosão, podem difundir-se na rede cristalina e, dependendo de alguns fatores, como nível de concentração, microestrutura e nível de esforço mecânico, podem fragilizar o metal ainda na etapa de fabricação ou quando a estrutura se encontra em serviço (ARAÚJO, 2013).

Uma forma de se avaliarem as propriedades do hidrogênio na microestrutura dos materiais é por meio de testes de permeação eletroquímica de hidrogênio. O método de permeação eletroquímica de hidrogênio foi desenvolvido por Devanathan e Stachurski (1962) e utiliza uma célula de permeação que é formada por duas células adjacentes denominadas célula de carga e célula de detecção. O princípio do método consiste em produzir hidrogênio sobre uma das faces da membrana metálica, situada na célula eletroquímica de carga, e medir seu fluxo de permeação através da membrana pela oxidação eletroquímica na célula adjacente, conhecida como célula de detecção. A

intensidade de corrente de oxidação do hidrogênio atômico é, portanto, uma medida direta do fluxo de permeação de hidrogênio através da membrana metálica.

Esses testes, em geral, são realizados em corpos de prova sem aplicação de nenhum esforço mecânico nas amostras ensaiadas. Para se ter, entretanto, um melhor comparativo entre os materiais bem como uma melhor descrição do fenômeno, deve-se procurar avaliar, também, a permeação por hidrogênio em corpos de prova tracionados e, desta forma, poder obter-se resultados mais conclusivos em relação aos fenômenos de degradação das propriedades dos materiais que são provocados pelo hidrogênio e intensificados por tensões.

Nos testes de permeação eletroquímica de hidrogênio, o objetivo é a determinação da permeabilidade, solubilidade e difusividade (VELASCO, 2007), considerando-se que:

- **Permeabilidade:** é a quantidade máxima de hidrogênio que atravessa uma membrana metálica de espessura conhecida num tempo determinado;
- **Solubilidade:** é a concentração máxima de hidrogênio que o material pode reter. Na realidade, na maioria das vezes, está relacionada à concentração máxima de hidrogênio absorvido na superfície do metal e no volume do material;
- **Difusividade:** também conhecida como coeficiente de difusão. Esta propriedade qualifica a velocidade de propagação do hidrogênio no interior do metal, sendo o parâmetro de comparação mais importante entre os metais.

O estudo da permeação por hidrogênio em materiais metálicos depende de muitos parâmetros experimentais, o que torna o experimento muito complexo. Introduzir uma variável a mais, que neste caso é o esforço mecânico, tornará ainda mais complexa a análise. Pesquisas têm indicado que a densidade de corrente de permeação, que está diretamente relacionada ao fluxo de hidrogênio, aumenta quando imposta uma tensão de tração elástica, devido à expansão do retículo cristalino dos materiais (KIM; JUNG; KIM, 2012).

Outros autores têm investigado a influência de tensões plásticas sobre o fluxo de permeação de hidrogênio nos materiais. Nesse caso, especialmente

em materiais com estrutura cristalina Cúbica de Corpo Centrado (CCC), uma significativa diminuição no fluxo de hidrogênio tem sido observada. Para os pesquisadores, a causa desse efeito seria o maior grau de aprisionamento do hidrogênio nas discordâncias geradas durante o processo de deformação plástica do material (HUANG *et al.*, 2003; KIM; JUNG; KIM, 2012).

Diante de tudo o que foi exposto, verifica-se a necessidade de se conhecerem os parâmetros de difusividade não apenas em materiais sem nenhum estado de tensão; deve-se, também, procurar avaliar essas propriedades com os materiais sujeitos à aplicação de um determinado estado de tensão, pois, assim, seria possível avaliar condições mais realísticas, tendo em vista que os dutos de transporte de hidrocarbonetos sempre estão submetidos, em maior ou menor grau, a um estado de tensão decorrente das condições de serviço que lhes são impostas.

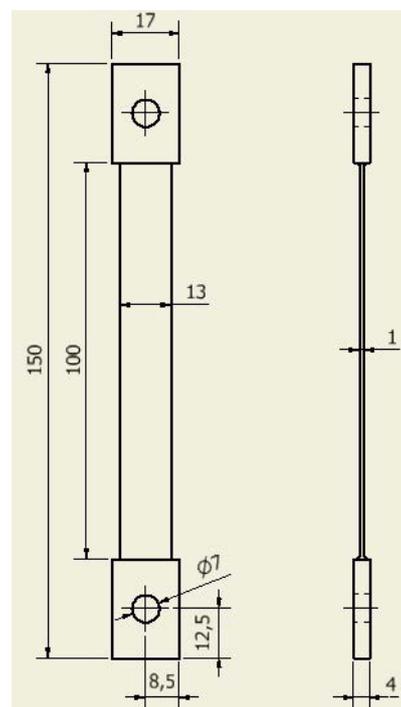
O objetivo deste trabalho consiste, portanto, no estudo da permeação por hidrogênio nos aços API 5L X60 e API 5L X65. Para tanto, foram realizados testes de permeação em amostras sem carregamento mecânico e com carregamento mecânico. No caso da análise com carregamento mecânico, foi verificado tanto o efeito da tensão no início do teste quanto o efeito após se atingir o estado estacionário de permeação.

2 Materiais e metodologia

Neste trabalho, foi utilizado o aço API 5L X60 e API 5L X65, cedidos pela UFCG ao IFPB. O aço API 5L X60 fora cedido à UFCG pela PETROBRAS, em forma de tubo com costura, com diâmetro externo de 600 mm e 17 mm de espessura de parede. A partir da tubulação, foram extraídas tiras de material, de modo a serem usinados os corpos de prova para a realização dos experimentos, conforme desenho mostrado na Figura 1. O aço API 5L X65 havia sido cedido à UFCG pela USIMINAS, em forma de placas de 19 mm de espessura. As composições químicas dos dois aços são mostradas na Tabela 1. A composição química do aço API 5L X60 empregado foi determinada em trabalho anterior (ALBUQUERQUE, 2004) e a do aço API 5L X65 foi fornecida pelo fabricante. Análises metalográficas das amostras dos aços API 5L X60 e API 5L X65 foram realizadas. As amostras foram lixadas, polidas e submetidas ao ataque químico com Nital (2%), por um tempo que variou de 5 a 10s. As

análises metalográficas foram realizadas em um microscópio Olympus modelo SZ3060.

Figura 1 – Desenho do corpo de prova empregado nos testes de permeação



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 1 – Composição química dos aços API 5L X60 e API 5L X65

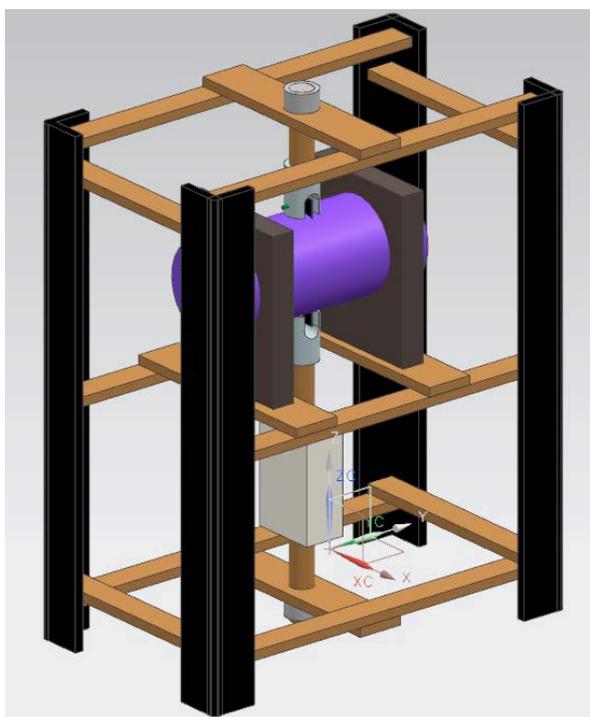
	API 5L X60	API 5L X65
C	0,12	0,07
Si	0,27	0,18
Mn	1,48	1,37
P	0,012	0,019
S	0,008	0,005
Mo	0,032	0,0009
V	0,048	0,037
Al	0,039	-
Nb	0,041	-
Ti	0,009	-
Cu	0,006	0,006
Cr	-	0,021

Fonte: Albuquerque (2004); Tabela de composição enviada pelo Fabricante do aço API 5L X65.

Para o carregamento mecânico, foi empregado um dispositivo desenvolvido em trabalho anterior (OLIVEIRA, 2014). Tal dispositivo é ilustrado na

Figura 2. A aplicação dos esforços mecânicos do dispositivo se deu pela rotação de uma porca em relação a um eixo que se encontrava fixado na amostra, o que provocava esforço de tração, já que a amostra encontrava-se engastada na outra extremidade junto à célula de carga. O controle dos esforços mecânicos foi realizado através de uma célula de carga e um sistema de aquisição de dados da *HBM (Spider 8)*.

Figura 2 – Ilustração do dispositivo de aplicação de esforços de tração para amostras submetidas à permeação por hidrogênio



Fonte: Oliveira (2014).

Após a usinagem das amostras para os testes de permeação, as regiões centrais foram lixadas (lixas com granulometria 200, 300, 400, 500, 600 e 1200) e polidas com alumina 1 µm, 0,3 µm e 0,05 µm. Antes dos testes eletroquímicos, as amostras foram desengorduradas com acetona, limpas com álcool e secas em ar quente.

Posteriormente, montou-se o dispositivo com a amostra fixada em sua posição de teste. A solução eletrolítica utilizada nos testes de permeação de hidrogênio foi uma solução aquosa de 0,1M NaOH. Esta solução foi preparada com pelo menos 24 horas de antecedência para que, por meio do borbulhamento de gás nitrogênio, o gás oxigênio fosse retirado. Isto porque o oxigênio pode adsorver na superfície da

amostra, diminuindo a área efetiva por onde o hidrogênio pode penetrar no material. Durante todo o teste de permeação, a solução eletrolítica continuou sendo desaerada por meio de borbulhamento de nitrogênio.

Nesta etapa do trabalho, ambos os lados da célula de permeação estavam com solução, de modo que o sistema pudesse se estabilizar por pelo menos 24 horas antes do teste definitivo. Após o repouso necessário, iniciaram-se os testes, aplicando-se uma variação de potencial, de modo que a célula de detecção (lado de detecção da célula) fosse mantida sob uma polarização anódica de +300 mV em relação ao Eletrodo Saturado de Calomelano (*SCE*). Imediatamente, após atingir-se uma concentração desprezível de hidrogênio no lado de detecção (<0,1 µm/cm²), uma densidade de corrente catódica foi aplicada para eletrolisar a solução de entrada e produzir hidrogênio (lado de geração de hidrogênio da célula). A célula de carga para geração de hidrogênio foi controlada galvanostaticamente com uma densidade de corrente igual a 2,5 mA/cm².

Após se atingir o estado estacionário de permeação de hidrogênio, os valores da difusividade aparente, da permeabilidade e da solubilidade foram calculados por meio das equações abaixo:

$$D_{app} = 0,76 \frac{L^2}{\pi^2 t_b} \quad (1)$$

$$P = J_{\infty} \cdot L \quad (2)$$

$$S = \frac{P}{D_{apa}} \quad (3)$$

Em que t_b é o *break-through time*, que é o tempo decorrido para que os primeiros átomos atravessassem a amostra e sejam oxidados na célula de detecção, L é a espessura da amostra, D_{apa} é a difusividade aparente, P é a permeabilidade, J_{∞} é o fluxo de estado estacionário de hidrogênio e S é a solubilidade.

Para se avaliar o efeito do carregamento mecânico sobre a curva de permeação de hidrogênio, estabeleceu-se a seguinte metodologia:

1º Caso. Amostras sem carregamento no início dos testes de permeação: Após a curva de permeação atingir o estado estacionário de permeação, um carregamento mecânico de 20% da tensão Limite de Escoamento (σ_{Le}) foi aplicado. Verificou-se, pois,

o efeito da tensão sobre o fluxo estacionário de permeação de hidrogênio;

2º Caso. Amostras com carregamento mecânico no início dos testes: A curva de permeação de hidrogênio foi realizada com a amostra submetida a um carregamento mecânico de 20% (σ_{LE}) desde o início do teste. Assim, pode-se avaliar o efeito da tensão sobre a difusividade.

Os testes de permeação de hidrogênio foram realizados no Laboratório de Engenharia Eletroquímica da Universidade Federal de Campina Grande (LEEQ/UAEQ/UFCEG), empregando-se um Potenciostato multicanal PAR – Princeton Applied Research – modelo VMP3. Os testes foram realizados de acordo com a norma ASTM G148-97 (2011). Para cada condição de teste empregado, foram ensaiados 2 corpos

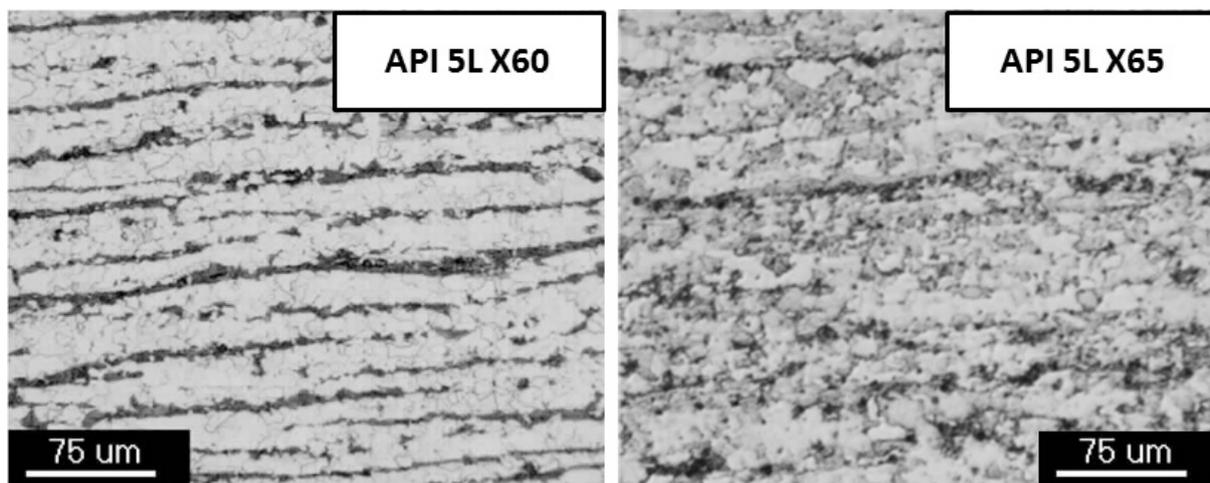
de prova, obtendo-se, assim, um valor médio entre dois experimentos realizados.

3 Resultados e discussões

A Figura 3 mostra as micrografias dos aços API 5L X60 e API 5L X65. Verifica-se que os dois aços apresentam predominantemente bandas de Ferrita e Perlita, característica típica dos aços laminados, sendo a distribuição dessas bandas mais uniformes no aço API 5L X60.

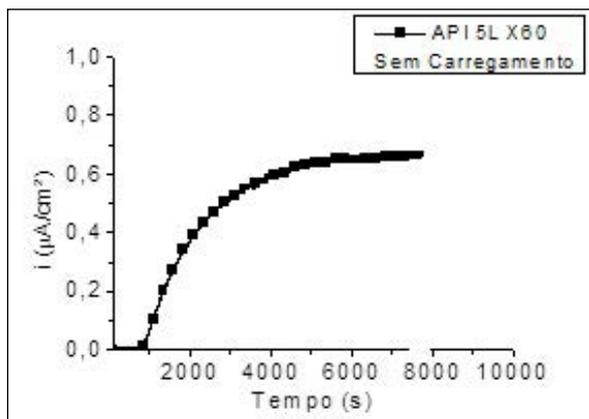
Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas as curvas de permeação para os aços API 5L X60 e API 5L X65, sem aplicação de carregamento mecânico. A Tabela 2 apresenta os valores calculados de difusividade aparente, permeabilidade e solubilidade.

Figura 3 – Microscopia dos aços API 5L X60 e API 5L X65



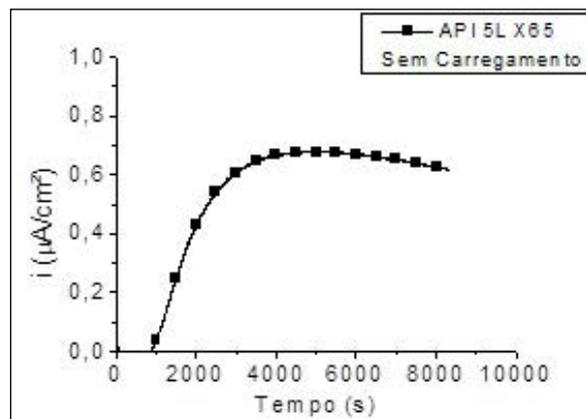
Fonte: Autoria Própria.

Figura 4 – Curva de permeação de hidrogênio para o aço API 5L X60



Fonte: Autoria própria.

Figura 5 – Curva de permeação de hidrogênio para o aço API 5L X65



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 2 – Valores calculados a partir das curvas iniciais apresentadas

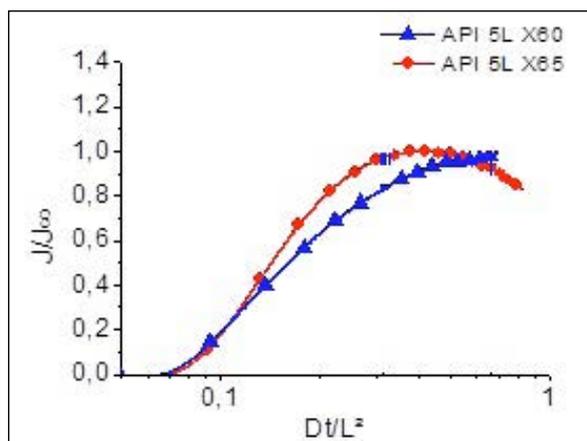
	D_{apa} ($m^2.s^{-1}$)	P ($molH.m^{-1}.s^{-1}$)	S ($molH.m^{-3}$)
API 5L X60	$9,48 \times 10^{-11}$	$6,63 \times 10^{-11}$	0,69
API 5L X65	$11,87 \times 10^{-11}$	$8,32 \times 10^{-11}$	0,70

Fonte: Araújo et al. (2017).

Conforme pode ser observado, as curvas de permeação dos aços API 5L X60 e API 5L X65, sob as condições de testes empregadas, apresentam certa similaridade, embora os resultados calculados apontem uma pequena diferença. O aço API 5L X60 apresentou uma difusividade ligeiramente inferior em relação ao aço API 5L X65. O mesmo caso ocorreu com a permeabilidade. As solubilidades dos dois aços, entretanto, foram bastante similares. Observando-se a composição química apresentada na Tabela 1, verifica-se que o aço API 5L X60 apresenta elementos químicos que têm muita afinidade com o hidrogênio, como nióbio, vanádio e titânio (HEALTH & SAFETY EXECUTIVE, 1999), e isso pode contribuir para um maior aprisionamento no aço API 5L X60, já que a composição química do aço API 5L X65 não apresentou titânio e nióbio. O fato de o aço API 5L X60 apresentar uma maior quantidade de carbono, juntamente com elementos com afinidade ao hidrogênio, pode ter afetado os valores de difusividade e permeabilidade, embora os valores de solubilidade sejam próximos, ou seja, na presente situação, o efeito do carbono no aço API 5L X60 seria agir como uma barreira ao processo difusivo, devido à maior quantidade e melhor distribuição das bandas de carboneto (Fe_3C) (ver Figura 3) agindo (LUU; WU, 1996), enquanto que, para o aço API 5L X65, o efeito do processamento mecânico bem como de outros elementos presentes, como o cromo, foi o de ter a mesma eficiência de aprisionamento que o aço API 5L X60, mesmo que os valores de difusividade e permeabilidade sejam ligeiramente superiores.

Como forma de se visualizar melhor o comportamento difusivo entre os aços, é apresentada, na Figura 6, a curva de permeação normalizada (adimensional).

Figura 6 – Curvas de permeação adimensionais para os aços API 5L X60 e API 5L X65 sem carregamento mecânico

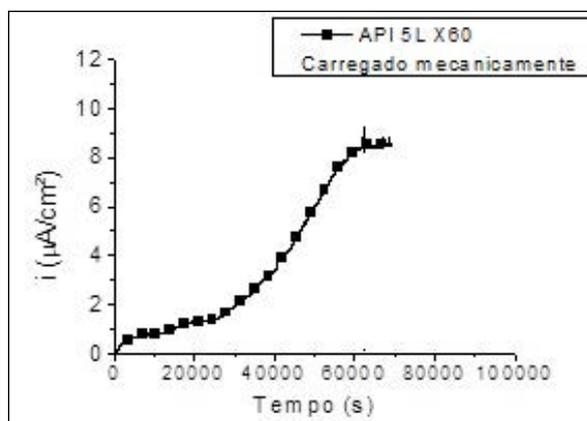


Fonte: Autoria Própria.

Conforme pode ser observado, a Figura 6 mostra o comportamento difusivo entre os aços, em que, ratificando os resultados apresentados na Tabela 2, se verifica que os processos difusivos se iniciam de formas similares entre os dois aços, porém, ao longo da parte transiente, verifica-se um comportamento difusivo mais lento para o aço API 5L X60.

Na Figura 7, é apresentada a curva de permeação para o aço API 5L X60 carregado mecanicamente. Nesse caso, o aço foi carregado mecanicamente em 20% σ_{LE} desde o início do teste de permeação, ou seja, desde a etapa de se obter uma densidade de corrente de fundo mínima na célula de detecção.

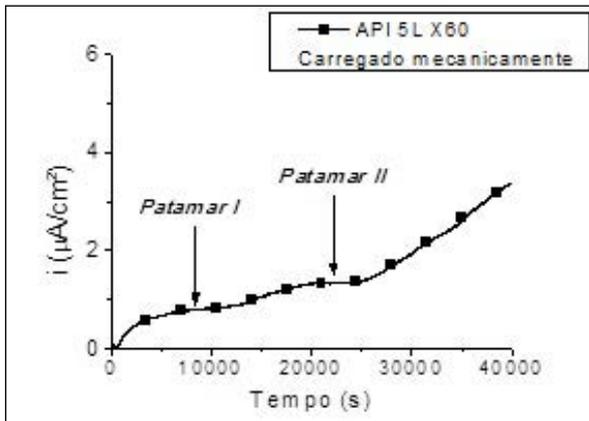
Figura 7 – Curva de permeação do aço API 5L X60 carregado mecanicamente



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a curva apresentada, verifica-se um comportamento bastante diferente em relação a outras apresentadas anteriormente. Como pode ser observado, o tempo para se atingir um patamar de estado estacionário de permeação foi bastante maior em relação às curvas sem carregamento mecânico. Além disso, para esse caso de permeação sob carregamento mecânico, desde o início dos testes, houve a ocorrência de degraus ao longo da evolução da curva de permeação. Tal comportamento pode ser observado na Figura 8.

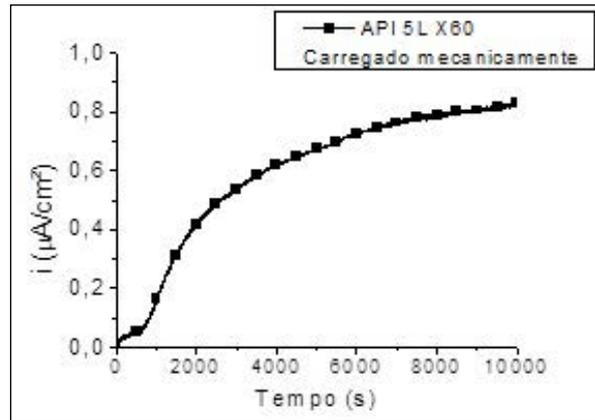
Figura 8 – Curva de permeação do aço API 5L X60 carregado mecanicamente. Indicação dos degraus na curva



Fonte: Autoria Própria.

Ao se analisar a curva, verifica-se que, devido à presença de tal comportamento, uma análise quantitativa de alguns parâmetros fica comprometida, pois, conforme equações recomendadas pela literatura bem como de acordo com as normas utilizadas, o equacionamento proposto parte do pressuposto de uma curva de permeação sem a presença de degraus ao longo da construção do transiente de permeação, logo, apenas a difusividade foi quantificada para essa condição. Para essa análise, torna-se necessário uma ampliação da região inicial, de modo que seja possível observar o tempo inicial de permeação t_b , ou seja, o tempo necessário para que os primeiros átomos de hidrogênio atravessem a amostra e sejam oxidados na célula de detecção.

Figura 9 – Curva de permeação do aço API 5L X60 carregado mecanicamente. Ampliação do patamar I de permeação

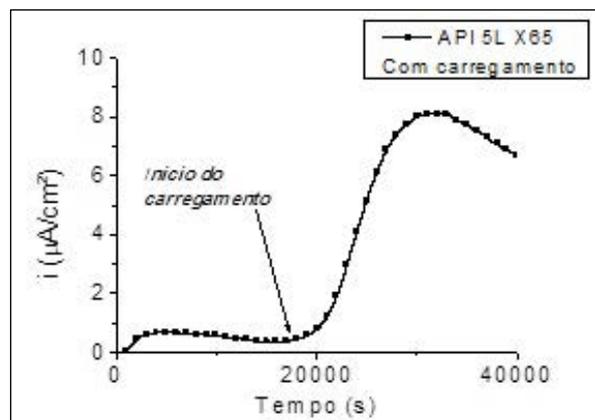


Fonte: Autoria Própria.

A partir da curva apresentada na Figura 9, o valor obtido da difusividade foi de $D_{apa} = 1,3038 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Verifica-se, então, um aumento no valor da difusividade, já que, sem a aplicação de esforços mecânicos, o valor da difusividade foi de $D_{apa} = 0,9480 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, ou seja, ocorreu um aumento em torno de 37% no valor da difusividade, sob estas condições.

Na curva de permeação apresentada na Figura 10, verifica-se a avaliação do efeito da tensão sobre a curva de permeação do aço API 5L X65, sob carregamento mecânico. Nesse caso, o teste de permeação foi iniciado e, quando o estado estacionário de permeação foi atingido, aplicou-se uma tensão de 20% σ_{LE} . O objetivo desse teste foi verificar o efeito da tensão sobre o estado estacionário de permeação. Assim, foi possível verificar a variação do fluxo de hidrogênio sob a amostra.

Figura 10 – Curva de permeação do aço API 5L X65 carregado mecanicamente

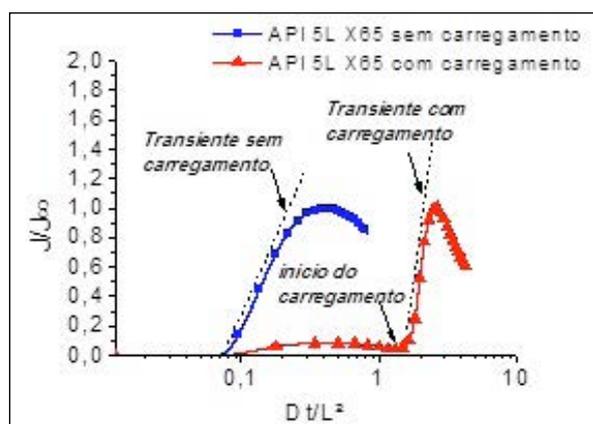


Fonte: Autoria Própria.

Ao se analisar a curva, verifica-se um efeito notório da tensão sobre o fluxo de permeação de estado estacionário. A permeabilidade sob estas condições foi de $10,09 \times 10^{-10} \text{ molH.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$. Considerando que, sob condições sem carregamento, o valor da permeabilidade foi de $0,83 \times 10^{-10} \text{ molH.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$, verifica-se um aumento da ordem de 12 vezes. Além disso, embora não seja possível uma avaliação quantitativa do efeito da tensão sobre a difusividade, já que o carregamento mecânico foi aplicado após se atingir o estado estacionário, uma avaliação qualitativa é possível de ser realizada através da análise da curva normalizada, ou seja, pode-se comparar a inclinação da parte transiente das curvas sem carregamento e com carregamento mecânico.

Tal comparação é realizada na curva de permeação normalizada apresentada na Figura 11. Assim, mesmo que a curva com carregamento mecânico tenha sido construída com o emprego da difusividade para a condição sem carregamento, devido ao fato de ter sido demonstrado para o aço API 5L X60 que a difusividade é afetada pelo carregamento mecânico, é de se esperar que, para maiores valores de difusividade, a inclinação tenda à vertical para as condições sob carregamento (ver linhas pontilhadas), ilustrando, assim, que o processo de difusão ocorre de forma mais rápida.

Figura 11– Comparativo entre as curvas de permeação normalizadas para o aço API 5L X65 com e sem carregamento



Fonte: Autoria Própria.

O presente estudo mostra claramente uma influência da tensão sobre os parâmetros de difusão determinados para os materiais. Tais informações são fundamentais para o estudo de trincamento assistido por hidrogênio, pois o estudo do efeito da tensão e do

hidrogênio combinados pode contribuir para atenuar a fragilização, desde que proporcione dados precisos de permeação (KIM; JUNG; KIM, 2012). Algumas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de verificar o efeito da tensão sobre a difusão do hidrogênio, como os trabalhos realizados por Huang *et al.* (2003), Kim; Jung; Kim (2012) e Kim *et al.* (2014).

Diferente dos resultados apresentados por alguns autores, no presente trabalho, uma variação pronunciada foi verificada na difusividade, conforme a análise dos dados apresentados para o aço API 5L X60. No caso da difusividade, foi verificado por Huang *et al.* (2003) que carregamentos mecânicos que provocassem baixo nível de tensão não teriam influência significativa sobre a difusividade. O aumento da permeabilidade foi verificado por KIM *et al.* (2014), cujos estudos sugeriram que o aço pode acomodar mais hidrogênio intersticialmente sob tensões elásticas trativas.

Ao se fazer uma análise na literatura, percebe-se claramente uma maior preocupação na determinação dos parâmetros de difusão sob condições de altos níveis de carregamento mecânicos, com tensões superiores ao limite de escoamento dos materiais, pois o efeito seria diminuir a difusividade e permeabilidade, devido ao surgimento de novas discordâncias, sugerindo que aprisionadores irreversíveis estejam envolvidos no material com elevado grau de deformação plástica (KIM *et al.*, 2014). Considerando-se, porém, que alguns fenômenos de fragilização podem ocorrer na presença de baixo nível de sollicitação mecânica, conclui-se que é necessário uma avaliação, também, sob baixos níveis de sollicitações mecânicas, conforme metodologia apresentada no presente trabalho, pois os níveis de tensões decorrentes de alguns processos de fabricação, como as tensões residuais de soldagem, variam ao longo do material, e sua influência pode ter efeito deletério nos fenômenos de fragilização (ARAÚJO, 2013).

4 Conclusões

O presente estudo procurou avaliar o efeito do carregamento mecânico sob as propriedades de difusão dos aços API 5L X60 e API 5L X65. De acordo com os resultados e discussões apresentadas, foi possível concluir que:

- Esforços de tração exercem influência sobre a permeação de hidrogênio nos aços API 5L X60 e API 5L X65;

- b) Uma tensão da ordem de 20% do Limite de Escoamento (σ_{LE}) já é suficiente para afetar a difusividade do aço API 5L X60;
- c) A tensão exerceu forte influência na permeabilidade, já que uma tensão de 20% do Limite de Escoamento (σ_{LE}) aumentou a permeabilidade em aproximadamente 12 vezes para o aço API 5L X65.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, M. C. S. **Comportamento à Fadiga de Juntas Soldadas de Tubulações Marítimas Tratadas pela Técnica TIG Dressing**. 2004. 190f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos)—Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

ARAFIN, M. A.; SZPUNAR, J. A. Effect of bainitic microstructure on the susceptibility of pipeline steels to hydrogen induced cracking. **Materials Science and Engineering A**, n. 528, p. 4927–4940, 2011.

ARAÚJO, B. A. **Avaliação do nível de tensão residual e susceptibilidade à fragilização por hidrogênio em juntas soldadas de aços API 5L X80 utilizados para transporte de petróleo e gás**. 2013. 210 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais)—Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

ASTM G148-97. **Standard Practice for Evaluation of Hydrogen Uptake, Permeation, and Transport in Metals by an Electrochemical Technique**. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2011.

CWIEK, J. Hydrogen assisted cracking of high-strength weldable steels in sea-water. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 164–165, p. 1007–1013, 2005.

DEVANATHAN, M. A. V.; STACHURSKI, Z. The Adsorption and Diffusion of Electrolytic Hydrogen in Palladium. **Proceedings of the Royal Society**, v. 270, n. 1340, p. 90–102, Oct. 1962.

HEALTH & SAFETY EXECUTIVE. **A Review of the Effects on the Hydrogen Embrittlement of High Strength Offshore Steels**. OFFSHORE TECHNOLOGY REPORT – OTO, 056, 1999.

HUANG, Y. *et al.* Effect of Mechanical Deformation on Permeation of Hydrogen in Iron. **ISIJ International**, v. 43, n. 4, p. 548–554, 2003.

KIM, S. J.; JUNG, H. G.; KIM, K. Y. Effect of tensile stress in elastic and plastic range on hydrogen permeation of high-strength steel in sour environment. **Electrochimica Acta**, n. 78, p. 139–146, 2012.

KIM, S. J. *et al.* Determination of Hydrogen Diffusion Parameters of Ferritic Steel from Electrochemical Permeation Measurement under Tensile Loads. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 16, n. 12, p. E173–E181, 2014.

LUU, W. C.; WU, J. K. The influence of microstructure on Hydrogen transport in Carbon steels. **Corrosion Science**, v. 38, n. 2, p. 239–245, 1996.

OLIVEIRA, M. S. **Desenvolvimento de um dispositivo para aplicação de esforços em corpos de prova de aços API utilizados no setor de petróleo e gás submetidos à permeação por Hidrogênio**. 2014. 51f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial)—Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2014.

VELASCO, J. A. C. **Interação do hidrogênio com filmes passivos na célula eletroquímica de permeação**. 2007. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais)—Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.