

# Análise de Bolhas Desprendidas Durante o Ensaio por Fadiga Realizado em Ambiente Subaquático

Gabriel Mendes de Almeida Carvalho<sup>1,2</sup> , Alexandre Queiroz Bracarense<sup>3</sup> , Ariel Rodriguez Arias<sup>4</sup> , Varney da Silva Medeiros Junior<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – IFMG, Betim, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Departamento de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, Brasil.

**Como citar:** Carvalho GMA, Bracarense AQ, Arias AR, Medeiros Junior VS. Análise de bolhas desprendidas durante o ensaio por fadiga realizado em ambiente subaquático. Soldagem & Inspeção. 2022;27:e2718. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI27.18>

**Resumo:** O estudo da fadiga em ambiente subaquático é dificultado pois envolve diversas variáveis, muitas delas estão relacionadas à interação do material com o meio em que está submetido. Em testes de fadiga em ambiente aquoso foi constatado o aparecimento de bolhas que se desprendem da região da trinca durante o ensaio, porém, até o momento a literatura não havia relatado esse fenômeno. Buscando a repetibilidade, este trabalho apresenta parâmetros de ensaio que promovam o desprendimento de bolhas, facilitando seu estudo e compreensão. Corpos de prova do tipo C(T) fabricados em aço ASTM A36 foram ensaiados em ambiente subaquático sob uma variação de carga constante ( $\Delta P$ ) de 5kN e frequência de 30Hz. Os desprendimentos das bolhas durante os ensaios foram registrados com uma câmera de alta velocidade (captura de 1000fps). Os resultados indicam que as primeiras bolhas desprendidas durante o ensaio são menores e aumentam de volume com o aumento do comprimento da trinca, chegando a um diâmetro médio máximo e após isso ocorre diminuição e supressão do fenômeno ao se aproximar do final do ensaio. A ocorrência foi associada à fragilização por hidrogênio, com existência já comprovada nesse tipo de ensaio.

**Palavras-chave:** Fadiga subaquática; Propagação de trinca; Desprendimento de bolhas.

## Analysis Of Bubbles Released During Fatigue Testing in Underwater Environment

**Abstract:** The study of fatigue in an underwater environment is difficult because it involves several variables, many of them are related to the interaction of the material with the environment in which it is submitted. In fatigue tests in an aqueous environment, the appearance of bubbles that detach from the crack tip region during the test was observed, however, until now the literature had not reported this phenomenon. Seeking repeatability, this work presents test parameters that promote the detachment of bubbles, facilitating their study and understanding. Type C(T) specimens made of ASTM A36 steel were tested in an underwater environment under a constant load variation ( $\Delta P$ ) of 5kN and frequency of 30Hz. The detachments of the bubbles during the tests were recorded with a high-speed camera (capture of 1000fps). The results indicate that the first bubbles released during the test are smaller and increase in volume with increasing crack length, reaching a maximum average diameter and after that, there is a decrease and suppression of the phenomenon when approaching the end of the test. The occurrence was associated with hydrogen embrittlement, with proven existence in this type of test.

**Key-words:** Underwater fatigue; Crack propagation; Bubble release.

### 1. Introdução

As estruturas utilizadas no segmento offshore, como navios e plataformas, são projetadas para resistirem às solicitações durante a operação, mantendo-se íntegras e sobretudo seguras. Nesse contexto, há uma grande preocupação a respeito da vida útil que esses componentes terão ao serem submetidos ao ambiente subaquático devido à diversidade e intensidade dos mais diversos esforços produzidos pelo ambiente agressivo [1]. Esses esforços, além de poderem possuir alta magnitude, normalmente são cíclicos e perenes, apresentando, portanto, flutuações das cargas impostas durante toda a vida do componente [2,3].

Quando submetidos a ambientes subaquáticos, além da preocupação necessária a respeito do ambiente corrosivo, um outro mecanismo que deve ser levado em consideração é a fratura por fadiga que esses componentes podem apresentar. A análise da fadiga já é amplamente difundida e considerada em projetos mecânicos, porém, na sua grande maioria, os ensaios

Recebido: 20 Jan., 2022. Aceito: 04 Jul., 2022.

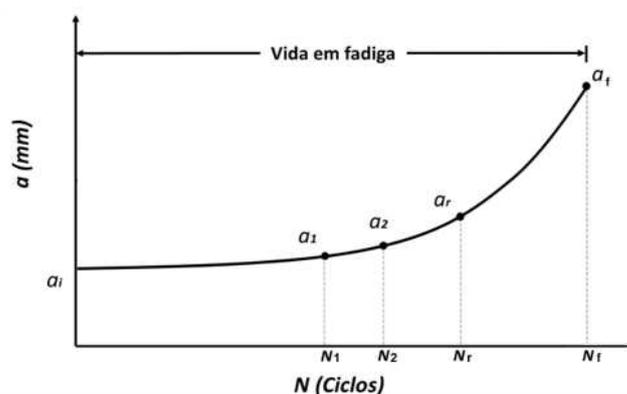
E-mails: gabriel.almeida@ifmg.edu (GMAC), bracarense@ufmg.br (AQB), arielra@demec.ufmg.br (ARA), varneymedeiros@gmail.com (VSMJ)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença [Creative Commons Attribution](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

são realizados em ambiente seco e conseqüentemente os dados e as propriedades coletadas não levam em consideração importantes interações que o material pode ter com o meio de trabalho que será realmente encontrado pelos componentes offshore.

Uma das formas de análise de um componente submetido a cargas cíclicas é através da curva “ $a \times N$ ”, obtida através de ensaio de fadiga e que permite acompanhar o crescimento de uma trinca no decorrer dos ciclos de carga impostos ao corpo de prova. Com a curva é possível acompanhar o número de ciclos ( $N$ ) necessários para que uma trinca cresça a partir de um tamanho inicial ( $a_i$ ) até um tamanho crítico ( $a_f$ ) [4]. Os dados de propagação da trinca são obtidos monitorando o seu tamanho durante um ensaio e traçando a curva de crescimento, com isso é possível estimar a vida em ciclos ( $N$ ) para um determinado tamanho de trinca ( $a$ ). Na Figura 1 é apresentada o exemplo de uma curva de crescimento de trinca em função do número de ciclos. Nessa curva,  $a_i$  representa o comprimento inicial da trinca,  $a_1$  como sendo o tamanho da trinca que já pode ser detectada por ensaios não destrutivos, possibilitando o acompanhamento do seu crescimento e comportamento. A partir daí a trinca cresce para maiores valores ( $a_2$ ) lentamente, até  $a_r$ , considerada na figura como a vida útil do componente, em seguida começa a se propagar muito rapidamente, atingindo um comprimento  $a_f$  em que ocorre a fratura final. Os valores de  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_r$  e  $N_f$  são os respectivos números de ciclos para  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_r$  e  $a_f$ .



**Figura 1.** Curva Típica do tamanho da trinca por fadiga ( $a$ ) em função do número de ciclos ( $N$ ) em um carregamento com amplitude constante. Adaptação [4].

Ao se considerar a propagação de uma trinca por fadiga deve-se saber que ela sofre a influência de muitas variáveis podendo ser externas ou do próprio material. Assim, nos materiais metálicos de um modo geral, os fatores mais comumente considerados na literatura que tendem a influenciar a propagação de uma trinca de fadiga são: microestrutura, carregamento e meio-ambiente [5,6]. Intrusões e extrusões formadas em meios mais agressivos favorecem a adsorção de elementos fragilizantes (como oxigênio ou hidrogênio) [7]. Assim, a corrosão-fadiga é um fenômeno que pode produzir falha em um componente ou estrutura por intermédio da combinação de cargas cíclicas com um ambiente agressivo, que isoladamente não necessariamente produziria uma falha [8].

Os mecanismos responsáveis por influenciar a propagação de uma trinca em ambiente agressivo podem estar associados à dissolução preferencial em região de maior deformação plástica, que age como anodo, também à ruptura de filmes protetores pelos ciclos de deformação ou ainda à fragilização por hidrogênio [9]. Estes efeitos podem agir separadamente ou em conjunto.

A dissolução anódica (AD) e a fragilização por hidrogênio são os dois principais mecanismos de dano da ponta de trinca no campo da fadiga por corrosão. Para dissolução anódica, ocorre reação eletroquímica local entre o metal exposto e o ambiente corrosivo. Com a carga flutuante de fadiga há a quebra do filme passivo na ponta da trinca [10]. A ruptura repetida e a formação do filme passivo levam à dissolução local do substrato e aceleram a taxa de propagação [11].

Para fragilização por hidrogênio (HE), a taxa de propagação da trinca (FCGR) é afetada pelo átomo de hidrogênio absorvido na ponta da trinca. O átomo de hidrogênio pode vir da reação eletroquímica em solução aquosa e a fragilização por hidrogênio pode ser interpretada por três mecanismos principais [12]: emissão de discordância induzida por adsorção (AIDE), plasticidade localizada aumentada pelo hidrogênio (HELP) e decoesão induzida por hidrogênio (HEDE). Em ambientes aquosos, a dissolução anódica e a fragilização por hidrogênio ocorrem simultaneamente na ponta da trinca, que é afetada pelas condições mecânicas, metalúrgicas e ambientais. Para a maioria dos tipos de aço carbono e ligas em solução de íon cloreto, a fragilização por hidrogênio é o mecanismo predominante devido à redução catódica da água [13,14].

Buscando melhor entendimento do comportamento da fadiga na presença de água, testes em ambiente subaquático foram realizados no Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação da UFMG, seguindo procedimentos estabelecidos pela ASTM E647-15 [15]. Durante os ensaios foi constatado o surgimento e de bolhas provenientes do corpo de prova e que se propagavam pelo meio aquoso após serem expelidas da região da ponta da trinca. Com o intuito de melhor visualização do

fenômeno e buscando elucidá-lo, filmagens de alta velocidade foram realizadas. O objetivo deste trabalho é buscar parâmetros de ensaios que promovam a repetibilidade do fenômeno e sua caracterização.

## 2. Metodologia

### 2.1. Corpo de prova

Os corpos de prova (CPs) foram usinados em aço ASTM A36 fornecido em chapas laminadas a quente, primeiramente foi realizada a composição química para caracterização do material. Seguindo a norma ASTM E647 [15], todos os corpos de prova foram usinados com refrigeração abundante e possuindo o entalhe sempre na mesma direção em relação à direção de laminação, configuração L-T de acordo com a norma. As dimensões características deste CP são apresentadas no esquema da Figura 2.

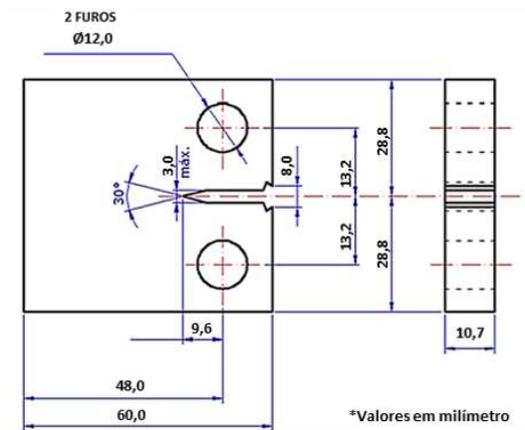


Figura 2. Esquema do corpo de prova que será utilizado - C(T) [15] (adaptado).

Para atingir as dimensões finais, as superfícies dos corpos de prova sofreram um processo de desbaste com um retificador e após essa etapa de retificação, as amostras foram lixadas, utilizando lixas até 1200# e posteriormente foram polidas com alumina ( $0,3\mu\text{m}$ ) para melhor visualização da trinca durante o ensaio.

Uma pré-trinca por fadiga com o comprimento de 7,4mm foi introduzida nos corpos de prova. Dessa forma o comprimento em relação ao centro dos furos do CP, onde são aplicadas as cargas do ensaio, totalizou 17,0mm. É apresentado na Figura 3 um esquema do corpo de prova posicionado nas garras de fixação da máquina. As pré-trincas e os ensaios de propagação de trinca por fadiga foram realizados no LRSS - Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação, no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em uma máquina servo-hidráulica INSTRON modelo 8802.

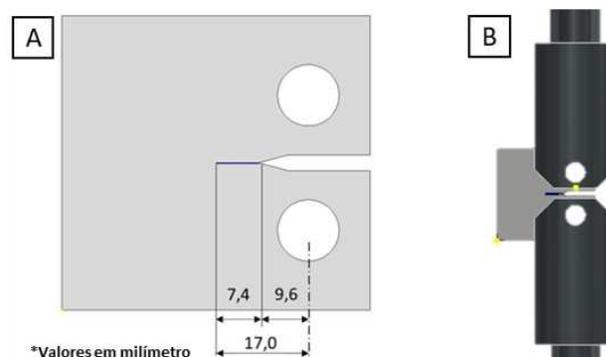


Figura 3. (A) Esquema do CP trincamento prévio; (B) CP posicionado nas garras para ensaio.

Para que fosse possível realizar o teste em ambiente subaquático, foi utilizado uma câmara semelhante a um vaso de pressão, previamente construída [16], com vedação que permite manter todo o interior da câmara (corpo de prova e garras de ensaio) em atmosfera controlada, líquida ou gasosa. Na Figura 4 é apresentado um esquema da montagem da câmara na máquina de ensaio.

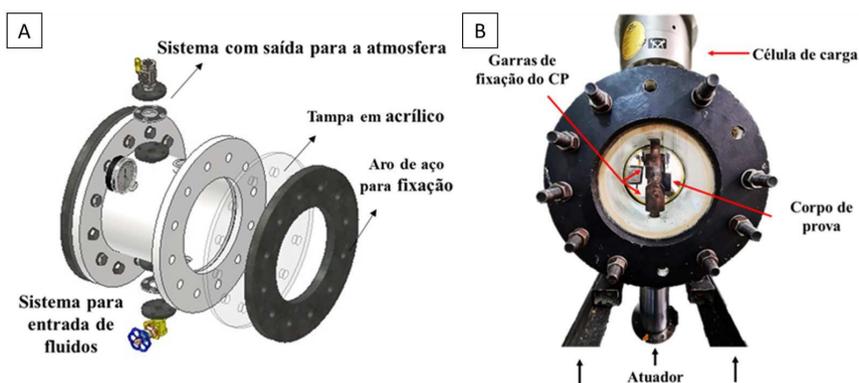


Figura 4. (A) Esquema câmara hiperbárica utilizada. (B) Montagem da câmara na máquina de ensaio [8].

## 2.2. Parâmetros de ensaio

O ambiente aquoso utilizado no ensaio de propagação da trinca foi “água de torneira” proveniente do sistema de abastecimento de Belo Horizonte – MG. Para servir de comparativo com os ensaios em ambiente subaquático, corpos de prova foram ensaiados ao ar em temperatura semelhante, em torno de 25°C. Diferentemente do ambiente subaquático, os ensaios ao ar foram acompanhados por um *clip-gage*, que permite o monitoramento do tamanho da trinca a partir da análise da flexibilidade do corpo de prova durante o ensaio. Essas análises são feitas pelo próprio software fornecido pelo fabricante da máquina e é o mesmo utilizado na realização e acompanhamento da propagação das pré-trincas feitas ao ar.

Para os parâmetros de carga, foi utilizado o método de ensaio com amplitude de carga ( $\Delta P$ ) constante. No ensaio com amplitude de carga constante, as cargas máxima ( $P_{\text{máx}}$ ) e mínima ( $P_{\text{mín}}$ ) são mantidas constantes de modo que a variação do fator de concentração de tensões ( $\Delta K$ ) na ponta da trinca cresce à medida que a trinca propaga. A aplicação de carga teve uma variação senoidal entre máximo e mínimo. Testes preliminares foram realizados buscando uma configuração para o desprendimento de bolhas que, após definida, foi submetida a 3 CPs distintos.

A configuração para cada CP é apresentada na Tabela 1 sendo R a razão entre as cargas mínima ( $P_{\text{mín}}$ ) e máxima ( $P_{\text{máx}}$ ).

Tabela 1. Parâmetros de ensaio.

Nomeclatura	Ambiente	$\Delta P$ (kN)	$f$ (Hz)	$P_{\text{máx}}$ (N)	R
CP1	Água de Torneira	5000	30	5500	0,1
CP2	Água de Torneira	5000	30	5500	0,1
CP3	Água de Torneira	5000	30	5500	0,1
Ao ar	Ar	5000	30	5500	0,1

## 2.3. Filmagem e análise de imagens

Para acompanhamento dos ensaios, filmagens foram feitas em posições distintas do corpo de prova. Duas câmeras foram posicionadas sempre na mesma posição em relação do CP, cada uma delas perpendicular à uma superfície lateral (de maior área) do corpo de prova, com o objetivo de capturar o desprendimento de bolhas caso acontecesse pelas laterais da amostra e também de acompanhar a propagação da trinca no decorrer do ensaio.

Uma das câmeras utilizadas foi a Phantom Miro LAB110, sendo a mais importante na metodologia do trabalho. Também denominada “câmera de alta velocidade” ou “super câmera lenta” possibilitando a análise de eventos rápidos com aquisição de 1000fps resolução de 1280x800. e 19,5s com 40000fps e menor resolução (128x8).

Filmagens periódicas a cada 1000 ciclos foram realizadas. Além disso, caso fosse constatado o desprendimento de bolhas na superfície observada pela Phantom, aquisições eram realizadas em intervalos menores, buscando uma maior quantidade de capturas do evento. Cada filmagem foi realizada, portanto, em um momento específico com o número de ciclos respectivo àquele momento.

Após realizados os ensaios, as filmagens e imagens capturadas foram tratadas para melhor visualização do fenômeno do desprendimento de bolhas e também para medição do tamanho da trinca durante o ensaio. Foi utilizado o software “PCC” (Phantom Camera Control), fornecido pela fabricante da câmera Phantom, para seleção e tratamento das imagens. Para análise e medição da trinca foi utilizado o *software* livre “ImageJ”. Uma das avaliações feitas foi o comportamento na propagação da trinca durante o ensaio. Curvas ( $a \times N$ ) foram levantadas para cada amostra.

O final do ensaio é definido, pela norma ASTM E647 [15] em relação ao parâmetro  $\Delta K$  e tem relação com o tamanho da trinca, a resistência do material ensaiado e geometria do corpo de prova. Para as condições ensaiadas o valor máximo da trinca considerado foi de 29,0mm.

## 3. Resultados e Discussão

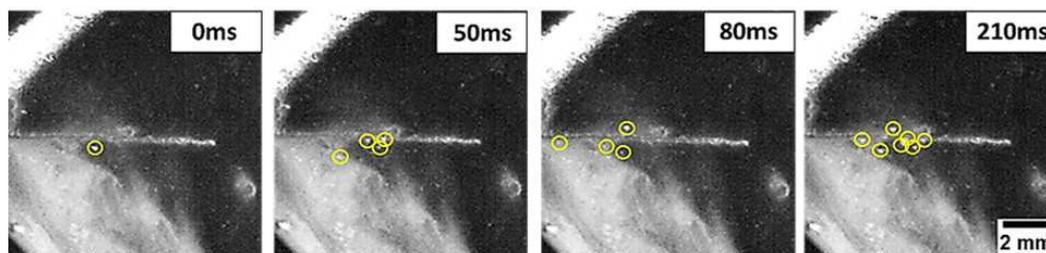
A composição química do aço dos CPs é apresentada na Tabela 2.

**Tabela 2.** Composição química do aço ASTM A36 utilizado no estudo (% em massa).

Elemento	Fe	C	Mn	Cu	Si	S	P
%Peso	bal	0,25	1,03	0,20	0,28	0,007	0,026

### 3.1. Desprendimento de bolhas

Em vários momentos no decorrer dos ensaios foram constatadas as bolhas sendo desprendidas da região próxima à ponta da trinca. Notou-se que quando as bolhas surgiam, elas apresentavam um diâmetro inferior quando se comparado com as outras bolhas que surgiam ao decorrer do ensaio, ou seja, o fenômeno fica mais intenso com o crescimento da trinca. Na Figura 5 estão apontadas as bolhas desprendidas nos 81000 ciclos do corpo de prova CP1.

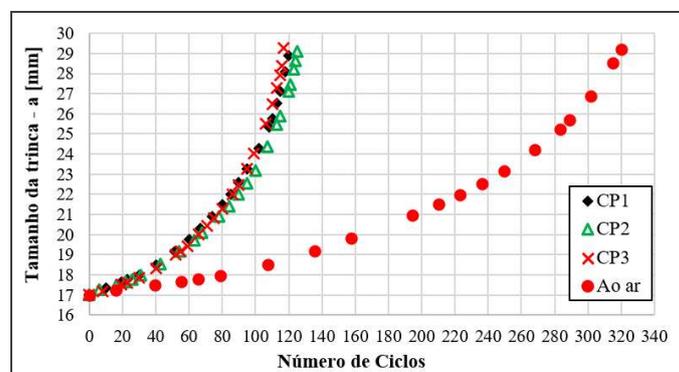


**Figura 5.** CP1 com desprendimento de bolhas nos 81000 ciclos. Imagens em 0, 50, 80 e 210ms.

Foi criado um canal no YouTube com uma seleção de vídeos do desprendimento de bolhas, onde é possível ver facilmente o fenômeno [17].

### 3.2. Curvas $a \times N$

São apresentadas na Figura 6 as curvas “ $a \times N$ ” para os corpos de prova ensaiados em ambiente subaquático e ao ar. Ao comparar o meio aquoso e ao ar, percebe-se uma grande diferença na quantidade de ciclos necessária para que a trinca alcance o tamanho crítico de 29,0mm.



**Figura 6.** Curvas  $a \times N$  para os CPs ensaiados.

Pelas curvas é possível perceber que para alcançar o tamanho crítico de 29,0mm, os CPs ensaiados em ambiente subaquático necessitaram de um menor número de ciclos, ou seja, esses corpos de prova tiveram uma maior velocidade na propagação da trinca. De acordo com Atkinson e Lindley [18] já há evidências consideráveis em uma ampla gama de aços que, sob certas condições de teste, a exposição a ambientes aquosos pode levar a taxas de propagação de trinca por fadiga (FCGR) aumentadas em comparação com um ambiente de ar, mesmo na ausência de suscetibilidade à corrosão sob tensão (SCC). Isso é frequentemente descrito como comportamento de Corrosão-Fadiga.

Em trabalho publicado Vosikovsky [19] afirmou que o aço X-65 embora não seja suscetível a SCC em água salgada, é muito sensível à corrosão-fadiga, assim como foi percebido neste trabalho para o aço A36. Semelhante aos resultados encontrados neste trabalho, Guo et al. [20] realizaram testes em um aço de 472MPa em ambientes aquosos de água destilada e com 3,5%NaCl, a taxa de crescimento de trinca por corrosão por fadiga exibiu as características de corrosão-fadiga. A taxa de propagação foi acelerada pelo ambiente corrosivo e os autores apontam para 2 causas principais, a Dissolução Anódica (DA) e a Fragilização por Hidrogênio (HE) e são os dois principais mecanismos de danos à ponta da trinca quando há a corrosão-fadiga, podendo ocorrer simultaneamente.

Para a dissolução anódica, ocorre uma reação eletroquímica local entre o metal exposto e o ambiente corrosivo [10]. Com o metal em ambiente aquoso, ocorrem reações de hidrólise. A hidrólise em água pode produzir filmes passivos na superfície da trinca [20], porém

a carga flutuante fratura esses filmes e expõe a superfície de metal da ponta da trinca à solução. A ruptura e formação repetidas do filme passivo aumentam a reação eletroquímica na ponta da trinca e aceleram a dissolução do aço e a velocidade de propagação [11].

Já a Fragilização por Hidrogênio em ambiente corrosivo resulta de um processo sequencial: acesso das espécies corrosivas à ponta da trinca; adsorção; dissociação e formação de hidrogênio atômico; entrada e transporte do hidrogênio na ponta da trinca provocando a fragilização [21]. Uma vez no interior da estrutura do aço, os átomos de H se difundem rapidamente, mesmo em baixas temperaturas, devido ao seu tamanho extremamente pequeno e à presença de gradiente de tensão através da estrutura metálica [22]. Há então a concentração de hidrogênio no metal, transportado por meio de difusão e movimento de discordâncias [12,23]. É apresentado na Figura 7 o processo de adsorção, dissociação e difusão do hidrogênio para o interior do metal submetido ao ambiente aquoso.

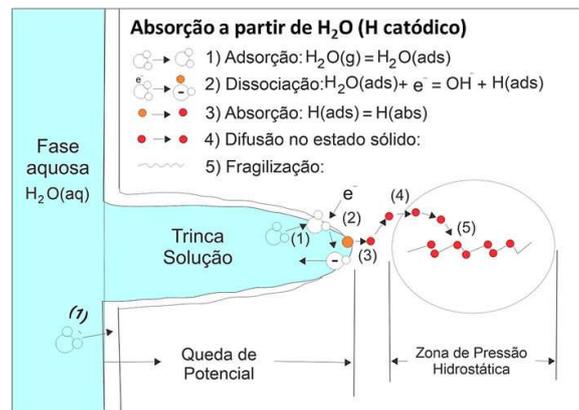


Figura 7. Esquema do processo de absorção do H a partir de H<sub>2</sub>O. Fonte: Adaptação [21].

Os principais locais para concentração de hidrogênio estão apresentados na Figura 8 e incluem: próximo a átomos de soluto; superfícies livres e locais entre as primeiras camadas atômicas; vacâncias e aglomerados de vacâncias; em região de discordâncias e campos de deformação; contornos de grão; interfaces entre os precipitados e a matriz; e vazios e trincas internas [24, 25]. Detalhe para o Hidrogênio acumulado em trincas, vazios e contornos de grão, pois nesses locais há a possibilidade de associação em hidrogênio gasoso H<sub>2</sub>.

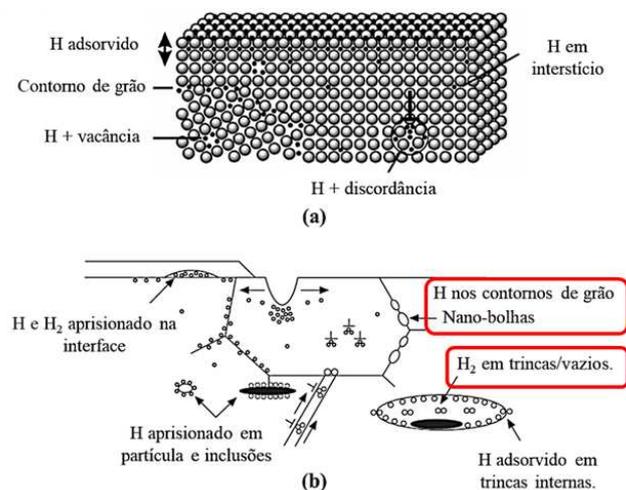


Figura 8. Esquema das armadilhas para o hidrogênio. (a) Escala atômica. (b) Escala macroscópica. Adaptação [24].

Muitos mecanismos são propostos para explicar a fragilização por hidrogênio, tais como o mecanismo de acúmulo da pressão de hidrogênio em bolhas que geram tensão que promovem a formação e propagação de trincas (em destaque na Figura 8), onde o hidrogênio solubilizado também pode recombinar como gás hidrogênio em vazios. O hidrogênio presente nos interstícios se concentrará à frente de trincas e entalhes onde há altas tensões hidrostáticas favorecendo a sua propagação [26,27].

Uma alta concentração de vacâncias a frente das trincas pode ocorrer não apenas devido a altas concentrações de hidrogênio em regiões de alta tensão triaxial, mas também porque o hidrogênio estabiliza vacâncias produzidas por interações deslocamento-deslocamento [28]. Assim, uma das explicações para a maior velocidade de propagação da trinca, encontrada neste trabalho e proposta por outros autores é através do processo de coalescência de vazios, mais intenso do que o que ocorreria em ambientes inertes. Como consequência, tem-se uma maior propagação da trinca em ambiente agressivo quando comparado ao ar. É apresentado na Figura 9 um esquema do maior avanço da trinca quando há a fragilização por hidrogênio.

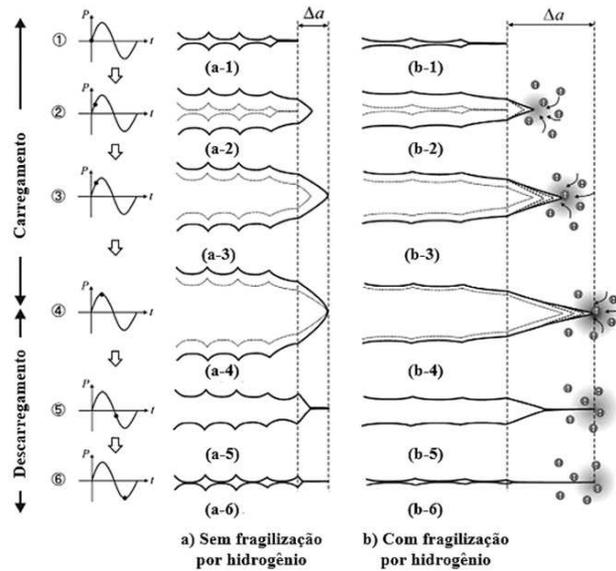


Figura 9. Abertura da trinca e mecanismo de fadiga. (coluna - a) Sem efeito do hidrogênio; (coluna - b) Com efeito do hidrogênio. Sendo Δa o avanço da trinca no ciclo. Adaptação [29].

### 3.3. Modelo proposto

Este trabalho propõe o modelo para desprendimento das bolhas aliado a modelos já propostos por trabalhos que estudam a influência do hidrogênio em carregamentos cíclicos. A hipótese criada para a ocorrência do desprendimento de bolhas é que sejam bolhas de hidrogênio que se acumulam à frente da trinca, no interior do material, e são liberadas à medida que a trinca avança. Esse modelo baseia-se principalmente nos resultados obtidos e que se relacionam com os autores que afirmam que as acelerações da propagação da trinca em situação semelhantes possuem, principalmente, relação com a fragilização por hidrogênio, sobretudo para regiões deformadas e com alta triaxialidade de tensões, condições que são encontradas na ponta da trinca.

Assim sendo, propõe-se que, quando aprisionados no interior dos aços, os átomos de H podem se recombinar, formando bolhas de H<sub>2</sub> [24]. Assim, o gás hidrogênio pode acumular em regiões distorcidas da rede, principalmente deformadas como são regiões à frente da ponta da trinca. A trinca ao propagar encontra essas cavidades com acúmulo de hidrogênio e as bolhas são liberadas. A Figura 10 apresenta um esquema do modelo proposto, adaptado do modelo de Murakami e Matsuoka [29]. Além da liberação das bolhas, também é apresentado a maior propagação da trinca Δa quando há a fragilização por hidrogênio, refletido nos resultados das curvas a<sub>x</sub>N (Figura 6).

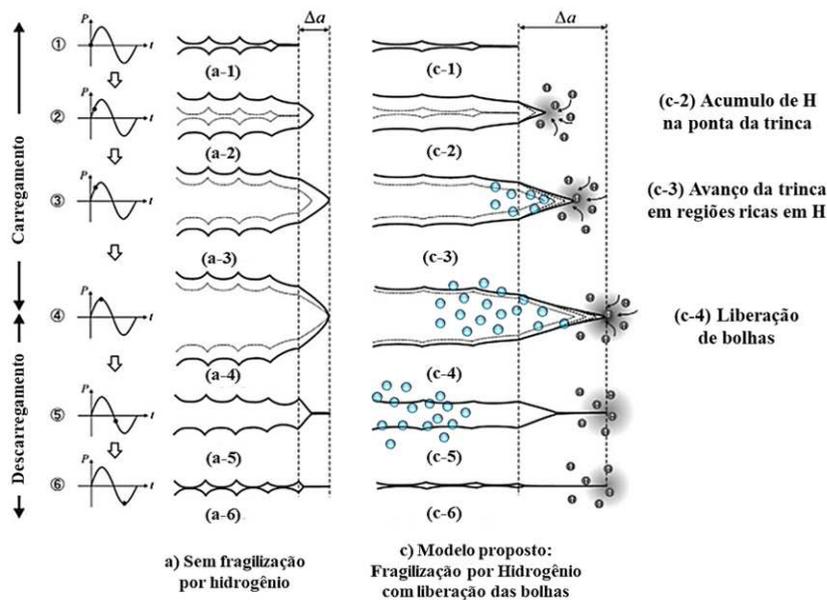


Figura 10. Modelo proposto para aceleração da propagação da trinca e desprendimento de bolhas. (coluna - a) Sem efeito do hidrogênio; (coluna - c) Com efeito do hidrogênio. Sendo Δa o avanço da trinca no ciclo. Adaptação [29].

### 3.4. Diâmetro das bolhas

Ao analisar as imagens, foi notado uma diferença no tamanho médio das bolhas no decorrer do ensaio. As primeiras bolhas desprendidas apresentavam um menor volume em comparação às bolhas em momentos posteriores do ensaio. Os valores médios do diâmetro das bolhas desprendidas em diferentes momentos do ensaio são apresentados na Figura 11.

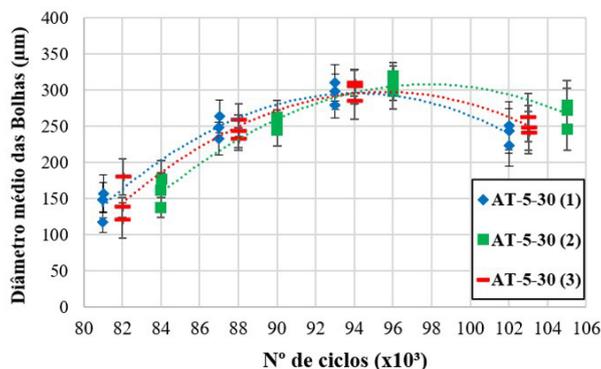


Figura 11. Diâmetro médio das bolhas desprendidas para os corpos de prova ensaiados.

Ao analisar o diâmetro das bolhas em diferentes momentos dos ensaios em ambiente aquoso foi possível perceber uma diferença no tamanho médio no decorrer do ensaio. O valor máximo para o diâmetro das bolhas foi cerca de 300µm, sofrendo uma pequena diminuição com a continuação do ensaio até que não fosse mais perceptível a presença de bolhas sendo desprendidas pela lateral do corpo de prova. Essa análise aponta para um fenômeno que se intensifica com o aumento da trinca até valores máximos e tende a diminuir e cessar após atingir sua maior influência no corpo de prova.

Autores relatam [19,20,30,31] que o fenômeno de aceleração da trinca em ambiente aquoso também apresenta o mesmo padrão, de aumento e diminuição de intensidade na propagação da trinca com o aumento de  $\Delta K$ , ou seja, com o aumento da trinca, semelhante ao encontrado neste trabalho e apresentado na Figura 11.

## 4. Conclusões

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho as seguintes conclusões podem ser dadas:

Neste trabalho, buscou-se capturar e caracterizar o fenômeno de desprendimento de bolhas na região de fratura em corpo de prova submetido à fadiga e ensaiado em ambiente aquoso, que até então não havia sido reportado em trabalhos para esse tipo de ensaio. A partir dos dados obtidos e embasado em trabalhos publicados, chegou-se às seguintes conclusões:

- O aço A36 apresentou, para os parâmetros ensaiados, um comportamento de corrosão-fadiga apresentando maiores valores de propagação de trinca em relação ao ar;
- A hipótese para o desprendimento é de que sejam bolhas de hidrogênio. O hidrogênio é proveniente das reações corrosivas experimentadas pelo A36 em água, possibilitando sua formação, dissociação e difusão para o interior do material onde se concentra a frente da ponta da trinca e parte dele associa-se formando  $H_2(g)$ . Com a propagação, a trinca avança sobre essas regiões, possibilitando o desprendimento das bolhas visualizadas durante o ensaio;
- A partir de determinado comprimento de trinca não foi mais possível detectar o surgimento de novas bolhas;
- O diâmetro médio das bolhas tende a crescer, atingindo um diâmetro médio máximo e após isso tende a diminuir, até ocorrer a supressão do fenômeno e não mais ser observado.

## Contribuição dos autores

GMAC: Conceituação, análise formal, investigação, metodologia, validação, redação – documento original, redação – revisão e edição. AQB: Conceituação, metodologia, supervisão. ARA: Conceituação, Metodologia, supervisão, redação – revisão e edição. VSMJ: Análise formal, investigação.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), do Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) e do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) - Campus Betim.

## Referências

- [1] Carvalho GMA, Bracarense AQ, Pessoa ECP, Gonçalves CN. Efeito da técnica de esmerilhamento do cordão na dureza da ZTA de soldas multipasses subaquáticas molhadas. *Soldagem e Inspeção*. 2020;25:e2538. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si25.38>.
- [2] Taier R. (2002). *Análise de fadiga em juntas tubulares de plataforma offshore fixa através de modelos em elementos finitos (dissertação de mestrado)*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto.
- [3] Carvalho CA. (2007). *Estudo do comportamento à fadiga de metais dentro e fora da água na presença da pressão hidrostática (tese de doutorado)*. Belo Horizonte: Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [4] Gdoutos EE. Fracture mechanics: an introduction. In: Gdoutos EE. *Solid mechanics and its applications*. USA: Springer Science & Business Media; 1993. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-015-8158-5>.
- [5] Cui W. A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures. *Journal of Marine Science and Technology*. 2002;7(1):43-56. <http://dx.doi.org/10.1007/s007730200012>.
- [6] Newman JC Jr. The merging of fatigue and fracture mechanics concepts: a historical perspective. *Progress in Aerospace Sciences*. 1998;34(5-6):347-390. [http://dx.doi.org/10.1016/S0376-0421\(98\)00006-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0376-0421(98)00006-2).
- [7] Suresh S. *Fatigue of materials*. 2ª ed. Cambridge: University Press; 2004.
- [8] Arias AR, Bracarense AQ. Fatigue crack growth assessment in underwater wet welds. *Welding Journal*. 2017;20(4):287-294.
- [9] Jivkov AP. Evolution of fatigue crack corrosion from surface irregularities. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2003;40(1):45-54. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8442\(03\)00033-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8442(03)00033-8).
- [10] El May M, Saintier N, Palin-Luc T, Devos O, Brucelle O. Modelling of corrosion fatigue crack initiation on martensitic stainless steel in high cycle fatigue regime. *Corrosion Science*. 2018;133:397-405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2018.01.034>.
- [11] Guo Q, Liu J, Yu M, Li S. Effect of passive film on mechanical properties of martensitic stainless steel 15-5PH in a neutral NaCl solution. *Applied Surface Science*. 2015;327:313-320. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.11.154>.
- [12] Barrera O, Bombac D, Chen Y, Daff TD, Galindo-Nava E, Gong P, et al. Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum. *Journal of Materials Science*. 2018;53(9):6251-6290. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-017-1978-5>. PMID:31258179.
- [13] Zhao W, Xin R, He Z, Wang Y. Contribution of anodic dissolution to the corrosion fatigue crack propagation of X80 steel in 3.5 wt.% NaCl solution. *Corrosion Science*. 2012;63:387-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2012.06.016>.
- [14] ASTM International. *Metals Handbook*. 9th ed. Vol. 13: Corrosion. West Conshohocken: ASM International; 1987.
- [15] ASTM International. ASTM E647-15. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. West Conshohocken: ASTM International; 2015.
- [16] Arias AR. *Comportamento da velocidade de propagação de trinca por fadiga do aço ASTM-A36 em condições atmosféricas e subaquáticas (Dissertação de mestrado)*. Belo Horizonte: Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais; 2012.
- [17] Carvalho GMA. Paper - Analysis of bubbles released during fatigue testing in underwater environment. Youtube; 2022 [acesso em 20 jan 2022]. Disponível em: <https://www.youtube.com/playlist?list=PL8UR8sfYH2-zn9i2eUHpxlYfsFd22Gt6>
- [18] Atkinson JD, Lindley TC. Effect of stress waveform and hold-time on environmentally assisted fatigue crack propagation in C-Mn structural steel. *Metal Science*. 1979;13(7):444-448. <http://dx.doi.org/10.1179/msc.1979.13.7.444>.
- [19] Vosikovskiy O. Fatigue-crack growth in an X-65 line-pipe steel at low cyclic frequencies in aqueous environments. *ASME. Journal of Engineering Materials and Technology*. 1975;97(4):298-304. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3443302>.
- [20] Guo Z, Ma Y, Wang L, Zhang J, Harik IE. Corrosion fatigue crack propagation mechanism of high-strength steel bar in various environments. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020;32(6):04020115. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003165](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003165).
- [21] Herring Group, Inc. Hydrogen embrittlement. Elmhurst, IL – EUA: Herring Group, Inc.; 2010. Relatório. [acesso em 20 jan 2022]. 4 p. Disponível em: <https://www.yumpu.com/en/document/read/11302838/hydrogen-embrittlement-the-heat-treat-doctor>
- [22] Evers S, Rohwerder M. The hydrogen electrode in the dry: a Kelvin probe approach to measuring hydrogen in metals. *Electrochemistry Communications*. 2012;24:85-88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.elecom.2012.08.019>.
- [23] Shipilov SA. Mechanisms for corrosion fatigue crack propagation. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2002;25(3):243-259. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1460-2695.2002.00447.x>.
- [24] Pundt A, Kirchheim R. Hydrogen in metals: microstructural aspects. *Annual Review of Materials Research*. 2006;36(1):555-608. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.matsci.36.090804.094451>.
- [25] Lynch SP. *Hydrogen embrittlement (HE) phenomena and mechanisms*. Australia: Defence Science and Technology Organization, Woodhead Publishing Limited; 2011. p. 90-130.

- 
- [26] Zhao T, Liu Z, Du C, Dai C, Li X, Zhang B. Corrosion fatigue crack initiation and initial propagation mechanism of E690 steel in simulated seawater. *Materials Science and Engineering*. 2017;708:181-192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.078>.
- [27] Robertson I. The effect of hydrogen on dislocation dynamics. *Engineering Fracture Mechanics*. 2001;68(6):671-692. [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7944\(01\)00011-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7944(01)00011-X).
- [28] Song J, Curtin W. Mechanisms of hydrogen-enhanced localized plasticity: an atomistic study using  $\alpha$ -Fe as a model system. *Acta Materialia*. 2014;68:61-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2014.01.008>.
- [29] Murakami Y, Matsuoka S. Effect of hydrogen on fatigue crack growth of metals. *Engineering Fracture Mechanics*. 2010;77(11):1926-1940. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.04.012>.
- [30] Igwemezie V, Mehmanparast A, Brennan F. The influence of microstructure on the fatigue crack growth rate in marine steels in the Paris Region. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2020;43(10):2416-2440. <http://dx.doi.org/10.1111/ffe.13312>.
- [31] Weng L, Zhang J, Kalnaus S, Feng M, Jiang Y. Corrosion fatigue crack growth of AISI 4340 steel. *International Journal of Fatigue*. 2013;48:156-164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.10.015>.