

USO DA CORRELAÇÃO DE IMAGENS NO ESTUDO DA MECÂNICA DA FRATURA EM AÇOS 8630 E A182 F22 UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

USING THE CORRELATION OF IMAGES IN THE STUDY OF FRACTURE MECHANICS IN 8630 AND A182 STEELS F22 USED IN THE OIL INDUSTRY

JEAN MARCEL BEZERRA FRANÇA

Especialista em Engenharia de Petróleo e Gás - Universidade Federal Rural do Semi-árido – UFERSA.

E-mail: jean_marcel_02@hotmail.com

ALMIR MARIANO SOUSA JUNIOR

Engenheiro de Produção. Engenheiro de Segurança do Trabalho. Mestre em Engenharia de Petróleo e Gás Natural. Professor da UFERSA.

E-mail: almir.mariano@ufersa.edu.br

Envio em: Janeiro de 2014
Aceite em: Fevereiro de 2014

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar a validade do emprego da correlação de imagens na determinação de abertura do entalhe em ensaios da mecânica da fratura, analisando seus aspectos e aplicações. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica, no intuito de apresentar, de forma clara, os principais conceitos referentes às propriedades dos materiais, a correlação de imagem e a mecânica da fratura. Foram explanadas as diferentes técnicas e métodos de avaliação do comportamento dos materiais em relação à mecânica da fratura, em especial o fator de intensidade de tensões (K) e o parâmetro CTOD (Crack Tip Opening Displacement). Na revisão, vale ressaltar o guia de utilização do Correli Q4, rotina de cálculo desenvolvida no programa computacional matemático MatLab, ferramenta fundamental na técnica da correlação de imagens. Tendo sido definidos os principais conceitos, partiu-se para a realização do ensaio de flexão, para a determinação do fator de intensidade de tensões e abertura do entalhe nos corpos de prova em aço ASTM A182 F22 e AISI 8630M, materiais escolhidos devido a sua utilização em equipamentos de uso submarino na indústria do petróleo, em especial em operações no pré-sal. Os corpos de prova foram fresados, retificados e usinados por eletro-erosão, para ficarem de acordo com o que rege a norma BS 7448-1. O ensaio de flexão foi realizado ainda segundo essa norma. De acordo com a análise dos resultados obtidos neste ensaio e comparando com os resultados encontrados na literatura, ficou evidenciado o grande potencial do uso da correlação de imagens no estudo da mecânica da fratura.

Palavras Chave: Mecânica da Fratura. Tenacidade à Fratura. Correlação de Imagens. Correli Q4

ABSTRACT

This study aimed to examine the validity of using the correlation of images in determining the opening slot in fracture mechanics testing, analyzing its aspects and applications. Initially a literature review in order to clearly display the key concepts relating to the material properties, the image correlation and fracture mechanics was performed. It were explained the different techniques and methods for evaluating the performance of materials in relation to fracture mechanics, in particular the stress intensity factor (K) and the parameter CTOD (Crack Tip Opening Displacement). In review, it is worth mentioning the usage guide Correli Q4, calculation routine computer program developed in MatLab mathematical, fundamental tool in the art of the correlation of images. Having the main concepts defined, we departed to the test of flexion for determining the stress intensity factor and the opening slot on the test specimens in steel ASTM A182 F22 and AISI 8630M, materials chosen because of their use in subsea use in the petroleum industry, especially in the pre-salt operations equipment. The specimens were machined, rectified and machined by EDM to conform with the governing standard BS 7448-1. The bending test was still performed to this standard. According to the analysis of the results of this test and comparing with the results found in the literature evidenced the great potential of using the correlation of images in the study of fracture mechanics.

Keywords: Fracture Mechanics. Fracture toughness. Correlation Images. Correli Q4.

1- INTRODUÇÃO

A apreensão quanto ao comportamento das estruturas de construção mecânica e civil quando expostas a forças externas é antiga e primordial no cotidiano da indústria do petróleo e da sociedade como um todo, gerando, assim, a necessidade de conhecer e monitorar tal comportamento.

Para esse mensuramento, desenvolveu-se a extensometria, um conjunto de técnicas que permitem determinar o estado de deformação em torno de um ponto de um corpo, a partir do conhecimento das extensões em várias direções nesse ponto. Nesse contexto, a extensometria óptica correlaciona diferentes imagens de um corpo ao longo de um ensaio sobre a ação de uma força externa em um determinado espaço de tempo. As diversas técnicas de correlação de imagens fazem uso de programas computacionais, como o software Correli Q4, o qual faz a comparação das imagens digitais de um corpo e seus campos de deformação com o auxílio do MatLab.

A mecânica da fratura surgiu em função das limitações na aplicação dos conceitos tradicionais para prever o comportamento dos materiais quanto à presença de descontinuidades internas e superficiais. E se divide, basicamente, em dois segmentos, a saber, mecânica da fratura linear elástica (MFLE) e mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP).

A técnica de extensometria, a qual foi validada, pode ser utilizada no método CTOD (abreviatura da expressão inglesa Crack Tip Opening Displacement), em se dispondo dos corpos de prova (CP) normatizados, uma vez que tal método baseia-se na medição do deslocamento da abertura da ponta da trinca como parâmetro crítico de iniciação do processo de fratura.

O método extensiométrico da correlação de imagens aplicado à mecânica de fratura constitui-se uma poderosa ferramenta de auxílio à engenharia no estudo e caracterização dos materiais de construção.

2 TENACIDADE À FRATURA

O ensaio consiste na aplicação de uma força ou tensão de tração ou flexão em um corpo de prova confeccionado com um entalhe e uma pré-trinca obtida por fadiga, induzindo um ponto de triaxialidade ou de concentração de tensão. Graças aos resultados do ensaio na forma de curvas, é possível determinar o valor de intensidade de tensão que causa o crescimento da trinca e a consequente fratura do material.

Dessa forma, temos que este método de ensaio pode ser utilizado com o propósito de analisar a influência de parâmetros, como composição, tratamento térmico e operações de fabricação (soldagem e conformação me-

cânica na tenacidade à fratura de materiais novos ou já existentes), para a avaliação de um componente em serviço, estabelecendo a adequação do material para a aplicação especificada, quando as condições de tensão são pré-determinadas.

Por fim, pode-se afirmar que um tamanho de grão pequeno aumenta a tenacidade à fratura, enquanto defeitos localizados e alta densidade de discordância reduzem a resistência à fratura.

3 CTOD

O CTOD representa a distância entre as duas superfícies da trinca, medida na ponta da trinca. Diferentemente da mecânica da fratura linear elástica, a presença de uma zona plástica de tamanho significativo na ponta de uma trinca permite que as duas superfícies se separem sem haver crescimento da trinca.

É de se esperar que, para haver crescimento de uma trinca, seja necessário que a abertura na ponta da trinca (CTOD) atinja um valor crítico, dependente do material, da temperatura, da taxa de deformação (para materiais sensíveis a este parâmetro) e do estado de tensões reinante na ponta da trinca.

O valor crítico de CTOD, dependendo do critério de falha que se utilize, pode ser interpretado como o CTOD de início de propagação estável da trinca (CTOD de iniciação), ou o CTOD de início de propagação instável da trinca, ou o CTOD de carga máxima.

4 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em uma revisão de literatura, com o intuito de abordar e aprofundar os conceitos necessários ao trabalho, como resistência dos materiais, mecânica da fratura e extensometria.

O trabalho, no entanto, não se restringe à revisão da literatura. Sendo realizados ensaios mecânicos de flexão, no Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFERSA, para a determinação da abertura de entalhe com o auxílio da correlação de imagens; e para, posteriormente, comparar com os resultados encontrados na literatura, que foram obtidos com o uso de extensômetro comum, do tipo clip gage.

5 MATERIAIS

Devido à dificuldade de encontrar os materiais empregados e de usar os corpos de prova, apenas dois corpos de prova foram utilizados, sendo um em aço AISI 8630M e outro em aço A182 F22. Tais materiais foram escolhidos devido a sua utilização em equipamentos de uso submarino na indústria do petróleo, em especial em operações no pré-sal. Uma nova fronteira de exploração de petró-

leo, que se apresenta como um importante vetor para o desenvolvimento do país.

5.1 AÇO 8630M

Aço para componentes mecânicos em geral sob a ação de tensões dinâmicas. Utilizado para a fabricação de peças na indústria automotiva e na indústria petrolífera e construção naval. É fornecido tratado (revenido) e

totalmente ultrasonado com dureza média de 248 HB. O tamanho médio do grão é 6 (ASTM). O índice "M" refere-se a modificado, uma vez que, nessa composição, apresenta maiores índices de cromo, níquel e molibdênio do que o 8630 comum. Conforme norma, sofreu tratamento térmico de têmpera e revestimento, a fim de apresentar as propriedades mecânicas indicadas pela norma NACE MR0175, a qual rege os materiais utilizados na indústria do petróleo. Sua composição pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço AISI 8630M

AISI 8630M								
C	Si	Mn	P	Cu	Cr	Ni	Mo	Al
0,32	0,3	0,86	0,006	0,06	0,93	0,81	0,38	0,02

Fonte: Oliveira, 2013

5.2 AÇO ASTM A182 F22

A182 é a especificação padrão para flanges de tubos forjados ou laminados e de aço inoxidável, acessórios e válvulas forjados e peças para utilização a alta temperatura em sistemas pressurizados, com uma gama de temperatura de -28°C a 593°C.

Depois de forjado, o A182 tem de ser arrefecido até uma temperatura específica antes do tratamento térmico, de acordo com o tipo, temperatura de austenização/

solução, meio de arrefecimento e têmpera. Nesse caso, o material em questão foi normalizado e revenido, a fim de apresentar limite de resistência a tração de, no mínimo, 655 MPa e limite de escoamento de, no mínimo, 520 MPa – valores de acordo com a norma NACE MR0175. A composição do A812 F22 pode ser vista na Tabela 2 e o valor de algumas propriedades mecânicas dos materiais utilizados na Tabela 3. Esses valores foram obtidos de fato, determinados a partir de ensaios, por isso, diferem um pouco do encontrado na literatura.

Tabela 2 – Composição química do aço ASTM A182 F22

ASTM A182 F22								
C	Si	Mn	P	Cu	Cr	Ni	Mo	Al
0,15	0,17	0,40	0,012	0,04	2,25	0,06	0,93	0,024

Fonte: Oliveira, 2013

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos aços A182 F22 e 8630M

	Dureza (HV)	LE (MPa)	LRT (MPa)	%Área
AISI 8630M	Si 250	621	743	29
ASTM A1282 F22	200	623	771	33

Fonte: Oliveira, 2013

6 ENSAIO

Para o ensaio de flexão, foi utilizada a máquina de ensaio EMIC DL 1000, tendo sido o cabeçote móvel da máquina equipado com o dispositivo adequado para tal ensaio. A câmera para a obtenção das imagens foi posicionada de frente para a máquina, com o auxílio de um tripé, de forma que seu foco centralizasse o entalhe no

corpo de prova.

O parâmetro de descida da máquina foi determinado de acordo com a norma BS 7448-1, em que uma ordem de 1mm/s mostra-se de acordo como o especificado por tal norma. O que se mostra uma velocidade adequada, também, para o uso da correlação de imagens, uma vez que a câmera fotográfica utilizada tem a capacidade de registrar uma foto a cada dois segundos, e tendo o en-

saio uma duração de, aproximadamente, 1 minuto até o ponto de interesse (carga máxima), é possível obter uma boa amostragem de imagens a serem analisadas.

Ainda em relação à montagem, a norma BS 7448-1 recomenda o uso de base própria para dobramento em três pontos. O clip gage é um medidor de deslocamento, o qual é fixado na abertura do entalhe, com o objetivo de medir seu deslocamento durante os ensaios; que, nesse caso, será substituído pela câmera e o Correli Q4. Depois de fixado na base, o corpo de prova é submetido a uma carga máxima, o que causará seu deslocamento e, conseqüentemente, o trincamento. Os valores de carga e os respectivos valores de abertura do entalhe, medidos pelo ex-

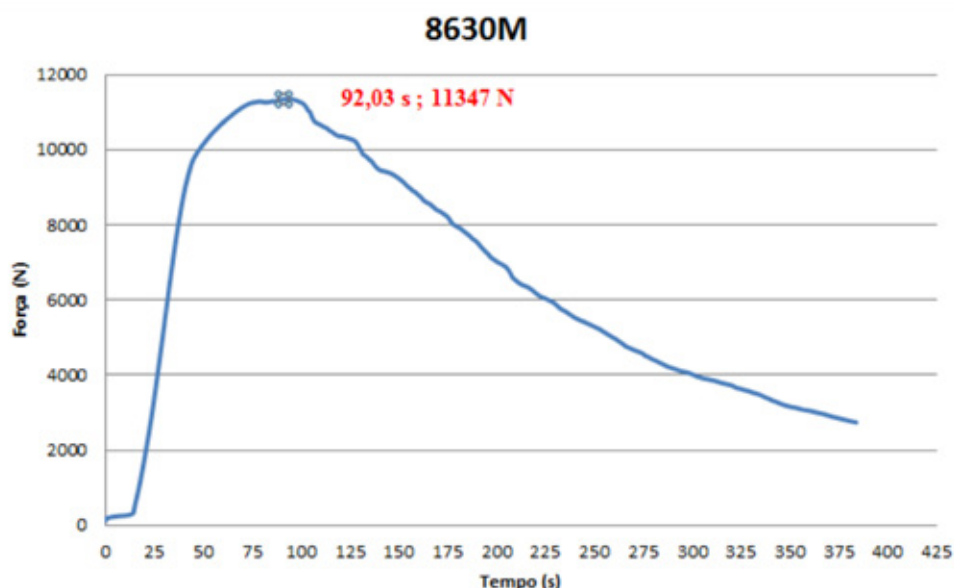
tensômetro, são plotados numa curva carga versus deslocamento.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 CP EM AÇO 8630M

Para exemplificar o procedimento descrito no tópico anterior, é apresentado, agora, o resultado de abertura do entalhe para o CP em aço 8630M. Inicialmente, é preciso determinar o tempo em que a força máxima é aplicada, o que pode ser visualizado no gráfico de força x, deslocamento obtido a partir do ensaio de flexão realizado, que é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Gráfico força x tempo para o aço 8630M



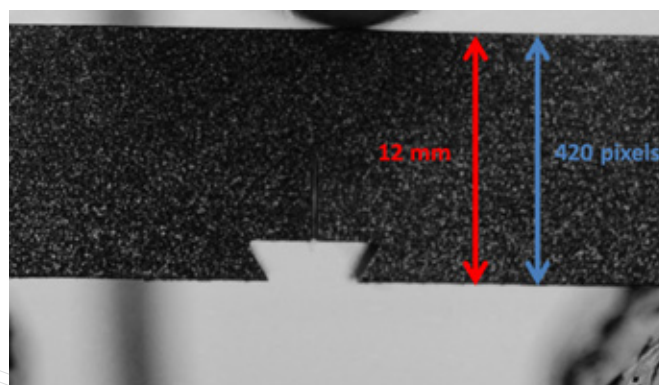
Fonte: Autoria própria, 2013.

De acordo com a Figura 1, tem-se que a força máxima é aplicada após 92,03 segundos depois do início do ensaio. Sabendo que a aquisição de imagens foi de uma foto a cada dois segundos, temos que a imagem de interesse será a 46ª foto obtida,

ou seja, a foto que foi tirada após 92 segundos do início do ensaio.

Agora, faz-se necessário determinar a relação pixel/mm das imagens. Essa relação pode ser visualizada na Figura 2.

Tabela 2 – Relação pixel/mm

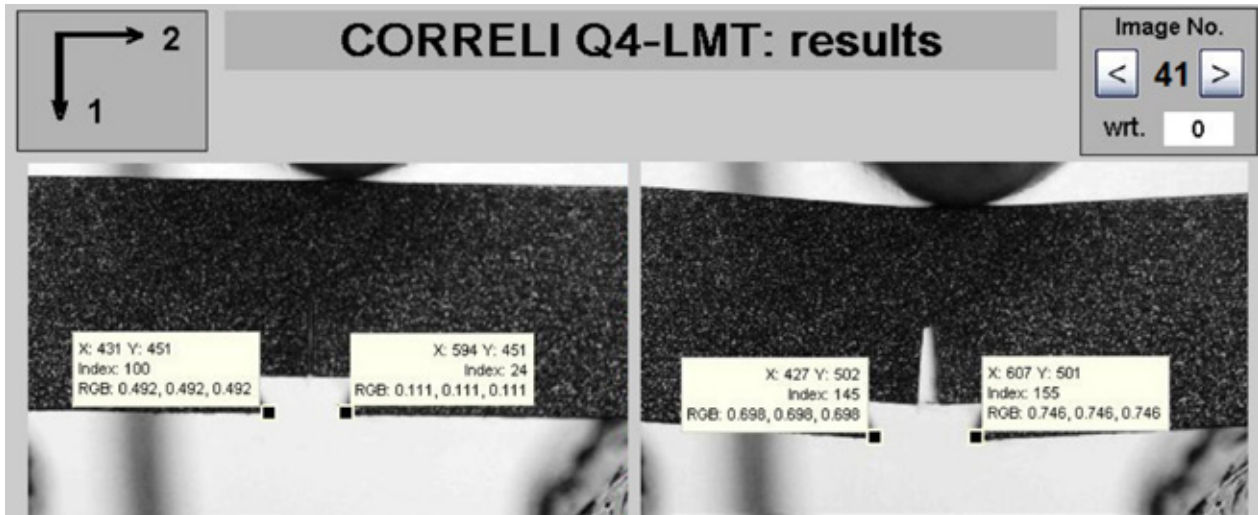


Fonte: Autoria própria, 2013.

É sabido que a largura W do corpo de prova W mede 12 mm; e, com auxílio de um programa editor de imagens, foi possível determinar essa mesma dimensão em pixels, no caso, 420 pixels. Com isso, temos uma relação de 35 pixels/mm.

Conhecidas a relação pixel/mm e a imagem de interesse, resta, apenas, comparar o tamanho do entalhe entre a imagem de referência e a imagem de interesse, o que pode ser visto na Figura 3.

Tabela 3 – Comparação entre a imagem de referência e a imagem de interesse para o aço 8630M



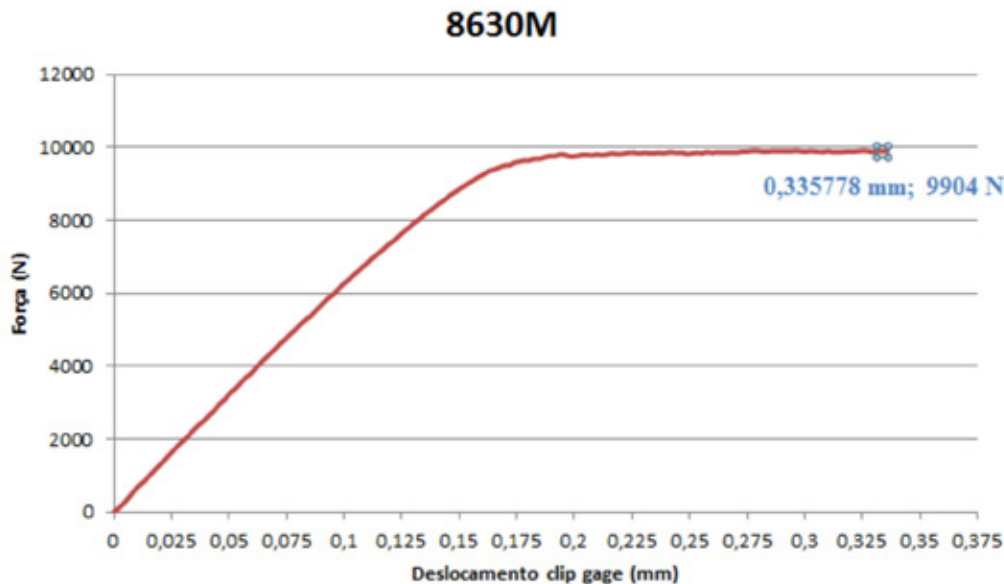
Fonte: Autoria própria, 2013.

Os valores das coordenadas fornecidas pelo programa Correli são dados em pixels. Com isso, temos que a abertura do entalhe, inicialmente, mede 163 pixels ou 4,6571 mm (imagem da esquerda). Já o tamanho do entalhe na imagem de interesse é de 180 pixels ou 5,1428 mm (imagem da direita). Ou seja, temos que até o ponto de carga máxima o deslocamento do entalhe

foi de 17 pixels ou 0,4857 mm.

Como comparação, parte-se, agora, para a apresentação dos resultados de abertura de entalhe obtidos através do *clip gage* para esse mesmo material, de acordo com os ensaios realizados por Oliveira (2013). Têm-se, na Figura 4, os resultados de *clip gage* para o aço 8630M até o seu ponto de carga máxima.

Tabela 4 – Abertura do entalhe para o aço 8630M fornecido por Oliveira (2013)



Fonte: Oliveira, 2013.

De acordo com a Figura 4, é possível constatar o que o valor da abertura do entalhe no ponto de carga máxima é igual a 0,3358 mm. Com isso, temos:

Tabela 4 – Comparação entre os valores de abertura do entalhe para o aço 8630M

AÇO 8630M	
	Abertura do entalhe
FRANÇA, 2013	0,4857 mm
OLIVEIRA, 2013	0,3358 mm

Fonte: Oliveira, 2013

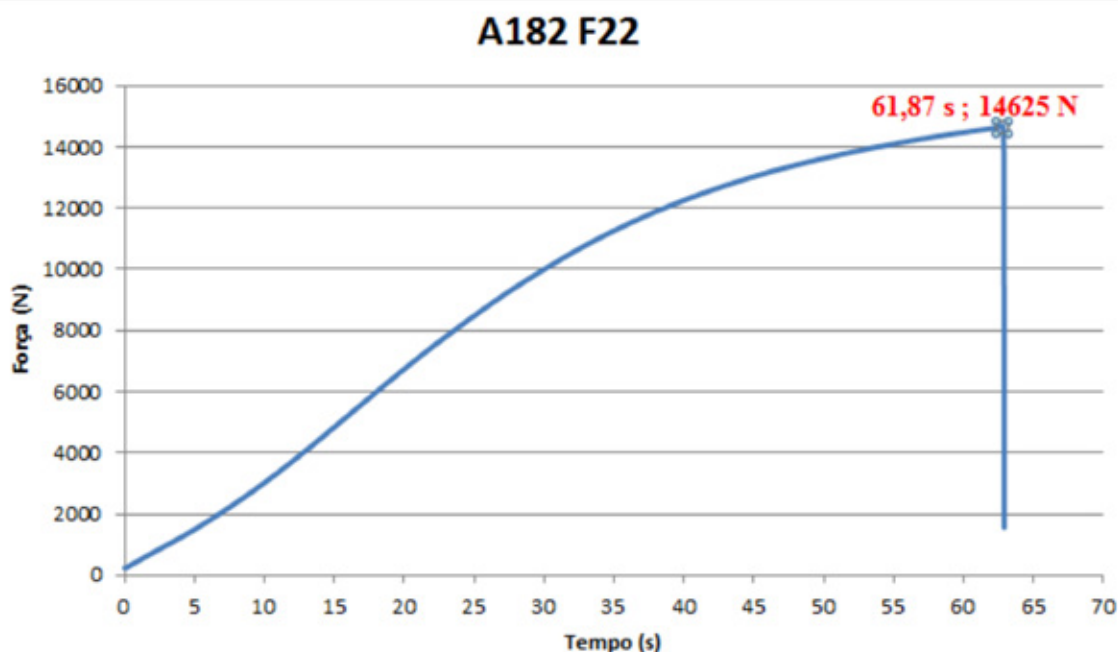
O deslocamento do entalhe obtido pela correlação de imagens representa um valor 44,64 % maior ao obtido pelo *clip gage*. Essa diferença mostra-se bastante aguda, porém, não se pode descartar, sumariamente, a técnica da correlação, uma vez que a máquina de ensaios utilizada apresentou uma série de defeitos, como cutelo empenado, desnivelamento e folga nos apoios do CP's, que acabaram por deslizar durante a realização dos ensaios, saindo da posição determina pela norma BS 7448-1. Esses defeitos podem ter influenciado, diretamente, nos resultados. Ademais, pesa o fato da pouca

quantidade de CP's disponíveis, impedindo uma análise mais contundente de resultados. Antes de uma discussão final, são analisados, no tópico a seguir, os resultados para o aço A182 F22.

7.2 AÇO A182 F22

De forma análoga ao procedimento realizado no tópico anterior, inicialmente, é necessário determinar o tempo em que a força máxima é aplicada, agora para o aço A182 F22. O que pode ser visto na Figura 5.

Tabela 5 – Gráfico força x tempo para o aço A182 F22

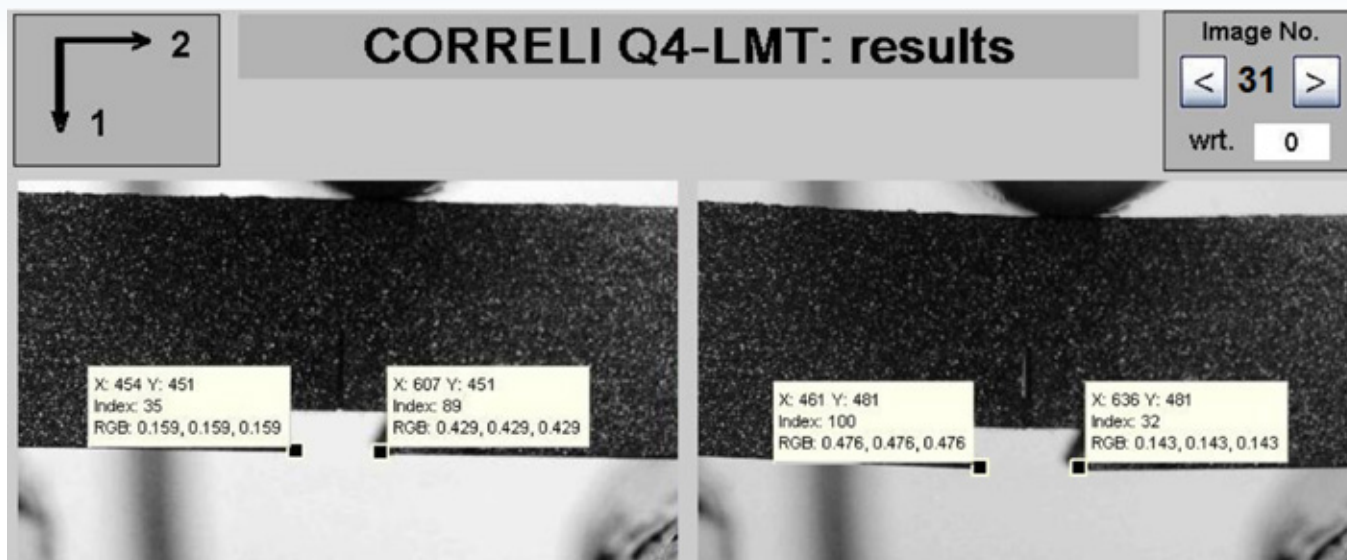


Fonte: Autoria própria, 2013

De acordo com a Figura 5, tem-se que a força máxima é aplicada após 61,87 segundos depois do início do ensaio. Sabendo que a aquisição de imagens foi de uma foto a cada dois segundos, temos que a imagem de interesse será a 31ª foto obtida, ou seja, a foto que foi tirada após 62 segundos do início do ensaio.

A relação pixel/mm é a mesma determinada para o corpo de prova em aço 8630M, uma vez que a dimensão W e o zoom da câmera também foram os mesmos. Em vista disso, resta, apenas, comparar o tamanho do entalhe entre a imagem de referência e a imagem de interesse, o que pode ser visto na Figura 6.

Tabela 6 – Comparação entre a imagem de referência e a imagem de interesse para o aço A 182 F22

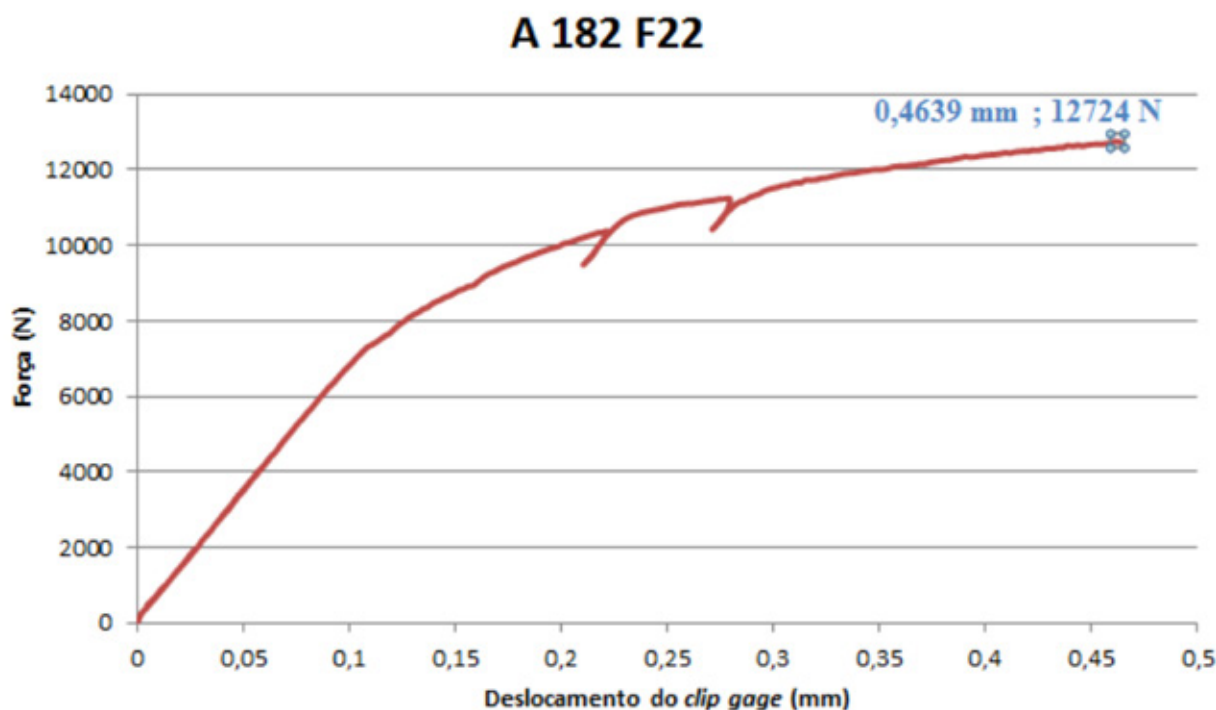


Fonte: Autoria própria, 2013

De acordo com a Figura 6, temos que a abertura do entalhe, inicialmente, mede 163 pixels ou 4,6571 mm (imagem da esquerda). Já o tamanho do entalhe na imagem de interesse é de 175 pixels ou 5,00 mm (imagem da direita). Ou seja, temos que até o ponto de carga máxima o deslocamento do entalhe foi de 12 pixels ou 0,3429 mm.

Como comparação, parte-se, agora, para a apresentação dos resultados de abertura de entalhe obtidos através do *clip gage*, de acordo com os ensaios realizados por Oliveira (2013). Têm-se, na Figura 7, os resultados de clip gage para o CP em aço A182 F22 até o seu ponto de carga máxima.

Tabela 7 – Abertura do entalhe para o aço A182 F22 fornecido por Oliveira (2013)



Fonte: Autoria própria, 2013

De acordo com a Figura 7, é possível constatar o que o valor da abertura do entalhe no ponto de carga máxima é igual a 0,4659 mm. Com isso, temos:

Tabela 5 – Comparação dos resultados de abertura de entalhe para o aço A182 F22

AÇO A182 F22	
	Abertura do entalhe
FRANÇA, 2013	0,3429 mm
OLIVEIRA, 2013	0,4659 mm

Fonte: Oliveira, 2013

O deslocamento do entalhe obtido pela correlação de imagens representa um valor 35,87 % menor ao obtido pelo *clip gage*.

Dessa forma, o presente trabalho esbarra, mais uma vez, na dificuldade de obtenção dos corpos de prova, o que torna os resultados inconclusivos por hora. Com isso, pesando as dificuldades encontradas na realização dos ensaios (resultando em uma reduzida quantidade destes realizados aqui, como os fornecidos por Oliveira, 2013), tem-se que o uso da correlação de imagens na determinação de deslocamento de entalhe não pode ser imediatamente descartado, carecendo de amostragem mais ampla de ensaios para resultados mais precisos e coesos.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final deste trabalho, ficou evidenciada a importância do estudo da mecânica da fratura, em seus diferentes métodos e técnicas. Quanto ao objetivo específico do trabalho, que era determinar a validade do uso da correlação de imagens na determinação de abertura de entalhe em ensaio monotônico de flexão em três pontos, as dificuldades encontradas na realização dos ensaios e a pouca quantidade de corpos de prova resultaram em resultados discrepantes e inconclusivos.

Em se tratando de um trabalho inicial e precursor, não é de todo frustrante, restando elencar pontos de melhoria para estudos futuros.

- Utilizar máquina de ensaios mais bem ajustada, impedindo falhas na aplicação da carga.
- Utilizar câmera fotográfica com melhor resolução e maior velocidade de aquisição de imagens, permitindo resultados mais precisos.
- Aumentar a quantidade de ensaios, utilizando mais cor-

pos de prova e com diferentes materiais e geometrias.

Tratando, agora, do objetivo geral do trabalho, que era analisar a validade do uso da correlação de imagens na mecânica da fratura, é possível concluir que, apesar dos resultados inconclusivos para o deslocamento da abertura do entalhe, a referida técnica apresenta grandes potencialidades e vantagens em diferentes aspectos da mecânica da fratura, seja utilizada sozinha, seja em conjunto com o *clip gage*. Podem ser citadas algumas dessas vantagens:

- Permite o acompanhamento dos campos de deslocamento e deformação de forma bastante pontual e ao longo de todo o corpo de prova e não tão somente no entalhe.
- Acompanha deslocamentos e deformações em todas as direções dos planos.
- Permite acompanhar o comportamento da fratura ao longo de todo ensaio, auxiliando na determinação do caminho preferencial de propagação, importante em ensaios com juntas soldadas.
- A utilização da ferramenta Vector permite determinar anomalias na aplicação da carga.
- Não entra em contato com o corpo de prova, evitando interferência nos resultados - porém, apresenta a desvantagem de não poder ser utilizada em ensaios cuja configuração prejudique a qualidade da imagem.

Outras potencialidades podem ser observadas por aqueles que se alvitrem a estudar a mecânica da fratura e/ou a correlação de imagens. E este trabalho se propõe a ser uma referência inicial para o desenvolvimento dessa potente, e cheia de potencial, ferramenta no estudo da ciência dos materiais.

REFERÊNCIAS

ASKELAND, Donald R. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo, 2008.

BRITISH STANDARD. **BS 7448-1**: Fracture mechanics toughness tests. Part 1: Method for determination of K_{Ic}, critical CTOD and critical J values of metallic materials. London, 2002. 39p.

FORTES, Cleber. **Mecânica da Fratura**. São Paulo: ESAB, 2003

NATIONAL ASSOCIATION OF COLLEGES AND EMPLOYERS. **MR0175**: Petroleum and natural gas industries - Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production - Part 1: General principles for selection of cracking-resistant materials. USA, 2005. 175p.

OLIVEIRA, George L. G. de. **Soldagem dissimilar dos aços AISI 8630M e ASTM A182 F22 para aplicação subaquática**. Dissertação (Doutorado)- UFC, Fortaleza, 2013.