

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE ALGORITMO PARA MEDIÇÃO DE PRÉ-TRINCA DE FADIGA E CRESCIMENTO ESTÁVEL UTILIZANDO ANÁLISE DIGITAL DE IMAGENS¹

Adriano Cintra Barbosa²

Gustavo Henrique Bolognesi Donato³

Resumo

Ensaio de mecânica da fratura são fortemente dependentes da medição precisa das pré-trincas de fadiga (e de eventual crescimento estável) para que sejam obtidos resultados confiáveis de forças motrizes (K , J e CTOD) ou curvas de crescimento de trincas. As normas correntes não especificam técnicas de medição preferenciais, se limitando ao estabelecimento de níveis mínimos de precisão. O presente trabalho analisa diversos espécimes fraturados SE(B) e SE(T) sob avaliação post-mortem, dimensionados utilizando: a) projetor de perfil; b) lupa estereoscópica; c) algoritmo desenvolvido para análise digital de imagens por meio de análise de pixels (fotográficas e digitalizadas em escâner). O objetivo principal é avaliar a viabilidade de utilização de análise de imagens com precisão e sua decorrente maior facilidade de uso. Um algoritmo computacional de medição foi desenvolvido e os resultados apontam que a utilização de fraturas escaneadas em alta resolução apresenta praticidade e atende aos requisitos normativos de precisão.

Palavras-chave: Avaliação pós-ensaio; Pré-trinca de fadiga; Crescimento estável; Análise de imagens.

DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF ALGORITHM FOR FATIGUE PRE-CRACK AND CRACK GROWTH MEASUREMENT USING DIGITAL IMAGE ANALYSIS

Abstract

Fracture mechanics tests depend on the accurate measurement of fatigue precrack (and eventual stable crack growth) in order to guarantee reliable crack tip driving forces (K , J and CTOD) and crack growing curves results. Current standards do not specify preferable measurement techniques, but determine minimum precision requirements. This work investigates several fractures from SE(B) and SE(T) specimens measuring its features using: a) profile projector; b) stereo microscope; c) specially developed code for image evaluation using pixel analysis (using digital photographs and high quality scanned images). The main objective is to evaluate the feasibility of using image analysis with enough precision and less time consuming to measure fracture surfaces. A special algorithm was developed and results indicate that it can be precisely used with high definition scanned images, fitting precision requirements from all considered standards and reducing measuring time.

Key-words: Post-fracture evaluation; Fatigue precrack; Stable crack growth; Image analysis.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Aluno do curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da FEI.

³ Professor do Depto. de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da FEI, gdonato@fei.edu.br



1 INTRODUÇÃO

Atividades de previsão e análise de falha, avaliação de integridade estrutural, ou mesmo práticas de projeto de componentes considerando defeitos do tipo trinca são usualmente baseadas na teoria clássica de mecânica da fratura.^(1,2) Por exemplo, as recomendações da API 579,⁽³⁾ BS 7910⁽⁴⁾ e SINTAP⁽⁵⁾ são largamente utilizadas para verificações do tipo “*fitness for service*” e se apóiam nos parâmetros K , J e δ , os quais são entendidos como forças motrizes de trinca e em seus valores críticos (K_{IC} , J_C ou δ_C) são tidos como propriedades de resistência à fratura de um material.^(1,2) Caso o material apresente plasticidade acentuada e rasgamento dúctil, os mesmos parâmetros suportam a determinação experimental de curvas R .⁽¹⁾

É comum a toda e qualquer prática de análise de falha e avaliação de integridade estrutural a grande dependência de duas informações consideradas básicas: i) acurado dimensionamento das trincas e/ou defeitos existentes nas estruturas; ii) quantificação experimental da tenacidade à fratura dos materiais envolvidos na análise. Caso estas informações não estejam disponíveis ou suficientemente detalhadas, os protocolos estabelecem hipóteses altamente conservadoras em busca de segurança, mas que muitas vezes tornam a análise muito restritiva técnica e economicamente. O dimensionamento de defeitos existentes em estruturas em operação pode ser conduzido por meio de diversas técnicas de ensaios não destrutivos que fogem ao escopo do presente trabalho.^(6,7) A adequada quantificação experimental da tenacidade à fratura, por outro lado, é um tema central e é abordado no presente trabalho.

Os ensaios de tenacidade à fratura são conduzidos a partir de espécimes padronizados e contendo pré-trincas induzidas por fadiga, as quais têm a finalidade de garantir a criticidade necessária à frente do defeito.^(1,2,8) Para que os resultados sejam considerados válidos diante dos requisitos normativos, a medição precisa de tais pré-trincas (e da eventual ocorrência de crescimento estável do defeito antes da falha) é fundamental ao término do ensaio. Diversas técnicas de medição são citadas na literatura, como medição com paquímetro, análise manual de fotografias, análise em lupa estereoscópica, projetor de perfil ou mesmo análise digital de imagens em alta resolução. Alguns métodos são operacionalmente complexos, enquanto outros não atingem os níveis de precisão exigidos pelas normas.

O desafio prático é que as normas correntes não fazem menção às técnicas preferenciais de medição, o que faz com que diferentes laboratórios desenvolvam práticas particulares de medida e tratamento dos resultados. Como um passo na direção de um melhor entendimento das técnicas disponíveis e do estabelecimento de um protocolo de medida de pré-trincas e morfologia de fraturas, este trabalho utiliza espécimes fraturados sob avaliação post-mortem (SE(B) e SE(T), com trincas rasas e profundas, homogêneos e soldados, com e sem entalhes laterais), cujas pré-trincas e região de crescimento estável de defeito foram dimensionadas utilizando: a) projetor de perfil; b) lupa estereoscópica; c) algoritmo desenvolvido para análise digital de imagens (fotográficas e digitalizadas em escâner) por meio de análise de pixels. O foco é utilizar análise digital de imagens para facilitar as práticas laboratoriais e a repetibilidade nas medições. Um algoritmo computacional para medição de fraturas foi especificamente desenvolvido e os resultados revelam que sua utilização para o tratamento de imagens de fraturas digitalizadas em escâner com alta resolução atende aos requisitos normativos, ao mesmo tempo em que reduz a dificuldade e o tempo de medição.

2 RELEVÂNCIA DE MEDIÇÕES PÓS-FALHA EM ENSAIOS DE FRATURA E TÉCNICAS LABORATORIAIS MAIS DIFUNDIDAS

Os ensaios de tenacidade à fratura usualmente seguem as normas ASTM E1820,⁽⁸⁾ E1290,⁽⁹⁾ E399⁽¹⁰⁾ e BS 7448,⁽¹¹⁾ as quais empregam espécimes C(T), DC(T) e SE(B). A Figura 1 apresenta um espécime SE(B) para ilustração dos dimensionais de interesse do trabalho. Este corpo-de-prova é solicitado em flexão, mas se solicitado em tração na direção horizontal recebe o nome de SE(T) e ainda não é contemplado pelas normas. Em todos os casos, a preparação dos corpos-de-prova até o momento do ensaio segue o mesmo procedimento: i) inicialmente são usinadas as faces externas; ii) na sequência é usinado por fresamento ou eletroerosão (de penetração ou fio) o entalhe agudo (de dimensão a_e); iii) por fim, uma pré-trinca de fadiga (de dimensão a_f , da ordem de ~ 1,3 – 2,0 mm dependendo do procedimento) é induzida na ponta do entalhe para garantir ao ensaio severidade análoga à de uma trinca real.^(1,2,8-11)

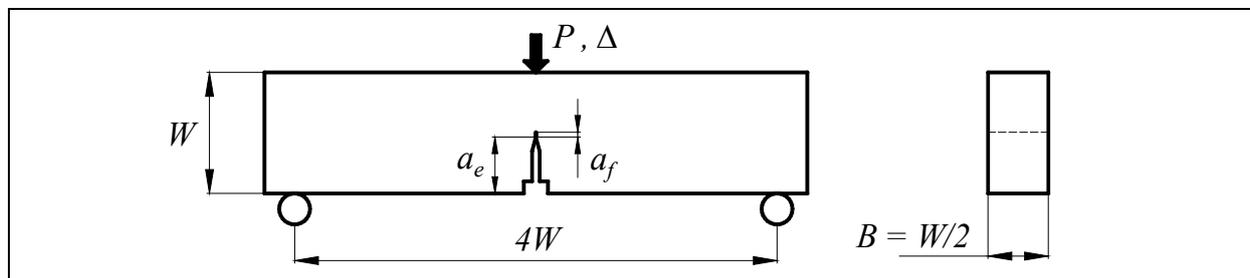


Figura 1. Espécime de fratura de tipo *single edge notched under bending* SE(B).⁽⁸⁾

Como a frente da pré-trinca de fadiga não é estritamente plana, a medição de seu perfil e comprimento equivalente só pode ser realizada por meio de avaliação post-mortem dos espécimes já fraturados. A Figura 2(a) apresenta uma superfície de fratura real para espécime SE(B) homogêneo com crescimento estável da trinca anterior à fratura final. As Figs. 2(b,c), por sua vez, contêm ilustrações esquemáticas de cada uma das regiões da amostra respectivamente para espécimes sem e com a presença de entalhes laterais.^(8,9) Ficam evidenciadas aí as regiões usinadas por eletro erosão, pré-trincadas por fadiga, de crescimento estável do defeito e de fratura final. A medição do comprimento original da pré-trinca de fadiga (a_0) é obtido segundo a ASTM E1820⁽⁸⁾ por meio da Eq. (1) a partir da média ponderada das medições da base do espécime até o final da pré-trinca de fadiga ($a_e + a_f$ segundo Figura 1) nas posições de 1 a 9 indicadas na Figura 2. Analogamente, o comprimento incluindo o crescimento estável do defeito (a_p) é calculado pela Eq. (2) por meio de nove medidas da base até o final da região de crescimento estável. A magnitude do crescimento estável de trinca (Δa_p) é determinada por meio da Eq. (3) e é levada em conta para a validação dos resultados de tenacidade à fratura.

$$a_0 = [(a_{0-1} + a_{0-9})/2 + a_{0-2} + a_{0-3} + a_{0-4} + a_{0-5} + a_{0-6} + a_{0-7} + a_{0-8}]/8 \quad (1)$$

$$a_p = [(a_{p-1} + a_{p-9})/2 + a_{p-2} + a_{p-3} + a_{p-4} + a_{p-5} + a_{p-6} + a_{p-7} + a_{p-8}]/8 \quad (2)$$

$$\Delta a_p = a_p - a_0 \quad (3)$$

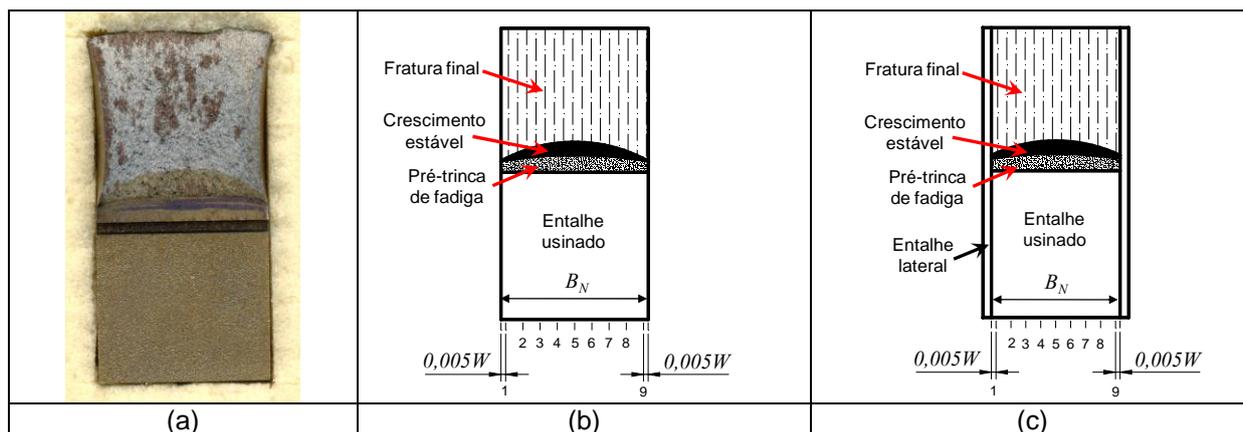


Figura 2. (a) Superfície de fratura de espécime SE(B) homogêneo, (b) ilustração esquemática das regiões analisadas em espécimes sem entalhe lateral e (c) com entalhe lateral.

A medição precisa de tais pré-trincas e regiões de crescimento estável é fundamental para que o tratamento dos dados de carga *vs.* deslocamento obtidos dos ensaios conduza a resultados confiáveis de forças motrizes (K , J e CTOD) ou curvas de crescimento de trincas, já que tais resultados são altamente sensíveis ao comprimento original da trinca (a_0) e podem ser invalidados caso o crescimento estável precedente à falha (Δa_p) seja maior do que valores de referência.⁽⁸⁻¹¹⁾ As técnicas de medição mais utilizadas na prática são: lupa estereoscópica; projetor de perfil; análise digital de imagens em alta resolução.⁽¹²⁾ Alguns comentários sobre tais métodos são brevemente endereçados a seguir, seguidos de uma rápida revisão sobre determinação de precisão de equipamentos metrológicos.

Lupas estereoscópicas são um tipo de microscópio óptico utilizado para avaliações de superfícies com baixa ampliação (usualmente entre 10X e 200X) e com o uso de luz natural de múltiplas fontes. Como uma grande vantagem, tais equipamentos apresentam grande nitidez e realismo das imagens. A Figura 3(a) ilustra uma lupa posicionada acima de uma mesa micrométrica analógica de dois eixos adaptada para a medição de superfícies de fratura com ampliação de 30 vezes. A resolução deste sistema é 0,001 mm. Como desvantagem, o alinhamento e ajuste de foco do equipamento são trabalhosos e ampliam o tempo de medida.

Projetores de perfil são ilustrados pelas Figuras 3(b-c) e são equipamentos ópticos caracterizados por ampliações entre 10X e 100X, contendo mesa micrométrica de medição (com movimentação nos 3 eixos e resolução no plano horizontal de 0,001 mm) e dedicados ao dimensionamento de perfis geométricos e superficiais. Podem operar em dois modos de iluminação: i) com luz de fundo, para evidenciar contornos; ii) com luz de superfície, para avaliação morfológica ou dimensionamento planar. Em relação à lupa, o projetor apresenta maior facilidade de operação, e similares precisão e repetibilidade (para mesmo aumento). No entanto, quando operando no modo superfície, algumas fraturas (escuras ou com morfologias particulares) não são visíveis, inviabilizando o uso de tal técnica.

Como opção aos métodos mecânicos de medição, a utilização de análise digital de imagens por meio de programas computacionais vem ganhando expressividade. Na área de engenharia e ciência de materiais, a análise de imagens obtidas por microscopia (óptica e eletrônica) é bastante usual para quantificação de fases e medição automática de tamanhos de grão, contando inclusive com normas como a ASTM E1382.⁽¹³⁾ Para a análise de superfícies de fraturas, no entanto, a técnica mais utilizada atualmente é a captura de imagens diretamente com máquinas fotográficas digitais de grande resolução (como esquematiza a Figura 4a). Para fins

qualitativos esta abordagem pode ser considerada adequada. No entanto, para fins de medição das pré-trincas e crescimento estável de defeitos, as máquinas fotográficas contam com alguns inconvenientes: i) o conjunto óptico causa distorção fora da região central das imagens; ii) dependendo do posicionamento, ocorrem erros de paralaxe e alinhamento, comprometendo a precisão e repetibilidade. Como alternativa, algumas poucas menções na literatura são feitas ao uso de análise de imagens de alta resolução obtidas por meio de escâner⁽¹²⁾ ou até de análise da morfologia de imagens obtidas em MEV⁽¹⁴⁾ para medição de fraturas. Como vantagem no caso do escâner, estes equipamentos são de fácil uso e acesso, fornecem suficiente resolução a custos relativamente baixos, causam pequena distorção nas imagens, eliminam a necessidade de um aparato experimental complexo e se bem usados minimizam os problemas de paralaxe. As Figuras 4(b,c) ilustram o posicionamento de fraturas em um escâner (o que será detalhado adiante) e as diferentes posições de interesse deste trabalho. Basicamente, o escâner utiliza um sensor CCD (*charge coupled device*) ligado a um conversor analógico-digital para capturar a imagem por meio da reflexão da luz oriunda de uma lâmpada fluorescente. O sistema óptico é móvel acionado por motor de passo, o que propicia a desejável varredura planar da imagem. A característica mais importante para a precisão de um escâner é a resolução medida em pixels por polegada (ou em inglês, *dot per inch*, dpi), a qual descreve quantos pontos por polegada quadrada estão disponíveis para a descrição digital da imagem. Este valor depende da qualidade do sensor CCD (número de diodos sensíveis na direção transversal) e da precisão de movimento proporcionada pelo motor de passo na direção longitudinal.

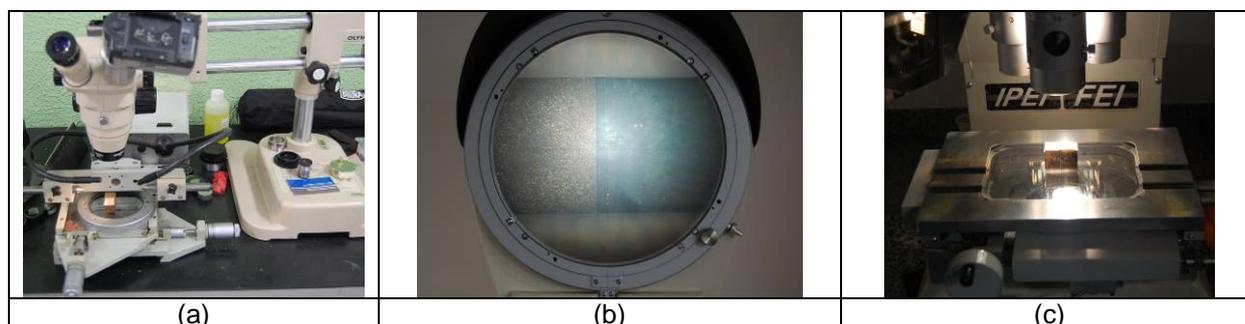


Figura 3. (a) Detalhe da lupa estereoscópica modelo Olympus SZ 40 com aumento em 30X utilizada em conjunto com mesa micrométrica de dois eixos e (b,c) detalhe do projetor de perfil Nikon V-12B com aumento em 10X utilizado em modo de iluminação de superfície.

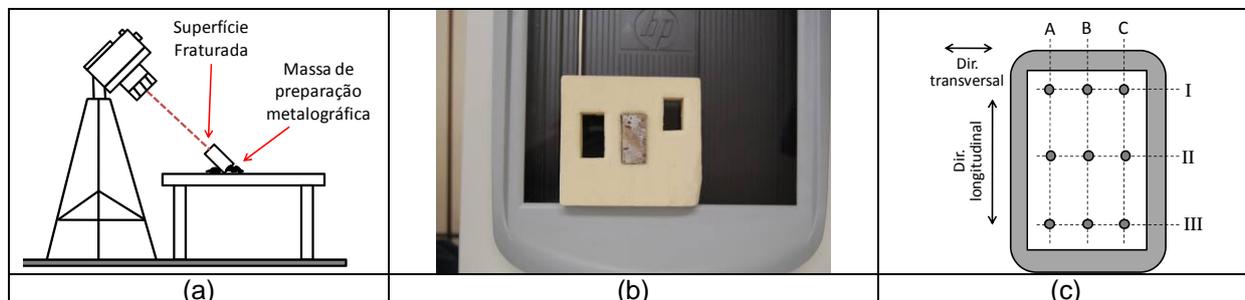


Figura 4. (a) Esquema de aquisição de fotografias digitais de fraturas, (b) posicionamento de corpo-de-prova fraturado no escâner apoiado por espuma e (c) posições de interesse no aparelho.⁽¹²⁾

Para a devida quantificação da precisão de medição do escâner utilizado (foco principal do trabalho), uma breve discussão sobre precisão de equipamentos metrológicos se faz de interesse. Erros de medição podem ser sistemáticos ou

aleatórios (estes últimos também chamados de erros de precisão), sendo que o erro total de uma medida qualquer é a soma destes dois.^(15,16) As fontes de incerteza nas medições realizadas neste trabalho são:

- i. Incerteza de repetitividade (u_{rep}).
- ii. Incerteza de resolução do equipamento metrológico (u_{res}).
- iii. Incerteza do padrão utilizado (u_{pat}), sendo este metrologicamente superior.

Admitindo que medições repetitivas em um mesmo ponto descrevam uma distribuição normal, a incerteza de repetitividade (u_{rep}) pode ser estimada de posse do desvio padrão (SD) com base na Eq. (4) sendo n o número de medições realizadas. Admitindo ainda que a distribuição de probabilidades seja retangular e que seja conhecida a mínima divisão identificada pelo equipamento (resolução - Res), a Incerteza de resolução do equipamento metrológico (u_{res}) pode ser determinada a partir da Eq. (5). Por fim, a Incerteza do padrão utilizado (u_{pat}) pode ser obtida a partir da Eq. (6) desde que conhecidos o desvio máximo entre a média das medições e a medida nominal do padrão (MD), assim como a incerteza total (U_p) dos padrões utilizados. De posse de tais valores, a incerteza característica (u_c) pode ser calculada por meio da Eq. (7) e determina, para intervalo de confiança de 95% na distribuição normal (com fator de abrangência 2), a incerteza total expandida (U).

$$u_{rep} = SD/\sqrt{n} \quad (4)$$

$$u_{res} = Res/(2\sqrt{3}) \quad (5)$$

$$u_{pat} = MD + U_p/2 \quad (6)$$

$$u_c = \sqrt{u_{rep}^2 + u_{res}^2 + u_{pat}^2} = U/2 \quad (7)$$

3 FERRAMENTA COMPUTACIONAL PROPOSTA E ESTIMATIVA DA PRECISÃO A PARTIR DE IMAGENS ESCANEADAS

A ferramenta desenvolvida neste trabalho é baseada em um programa implementado em linguagem MatLab, com uso de interface gráfica de padrão Microsoft Windows e que se utiliza da calibração e análise de pixels para fins metrológicos. São duas telas de operação e uma de resultados, como apresenta a Figura (5). O objetivo é suprir as atividades de: i) abertura e preparação da imagem a ser medida (Figura 5a); ii) calibração dos pixels e realização das medidas (Figura 5b); iii) pós processamento, julgamento e exportação dos dados para planilha eletrônica (Figura 5c). O programa permite a medição de fraturas contendo ou não região de crescimento estável e o funcionamento é brevemente descrito a seguir. Inicialmente, como apresenta a Figura 5(a), a imagem (proveniente de máquina fotográfica digital, digitalizada em escâner ou de qualquer outra fonte) é carregada e pode ser ajustada em termos de angulação, brilho e transformada em tons de cinza se desejado. Ainda, a imagem pode ser cortada em região de interesse e ter o aumento ajustado. Na sequência (Figura 5b), são fornecidos os dados transversais básicos do espécime (B e W) e são inicialmente selecionados 4 pontos marcados por caixas brancas na figura. Os dois inferiores delimitam a largura do espécime (B), a qual serve de base para a calibração dos pixels e para a transformação das coordenadas da imagem para o sistema cartesiano (caso o espécime esteja inclinado). Os dois superiores delimitam a cota vertical na qual se posiciona a frente

do entalhe usinado permitindo a medição da dimensão a_e apresentada pela Figura 1. Ao clicar no botão "Selecionar Pontos e Calcular", automaticamente linhas vermelhas são traçadas nas nove posições de medição indicadas na Figura 2 e para medir o comprimento da pré-trinca e do crescimento estável em cada posição basta que o operador clique com o mouse sobre os pontos de interseção de tais retas com: i) a frente da pré-trinca de fadiga e ii) a frente do crescimento estável do defeito. A seleção do último ponto seguida de uma confirmação pela tecla "Enter" libera a realização dos cálculos e são processados os valores de a_0 , a_p e Δ_{ap} segundo as Eqs. (1-3). Clicando-se no botão "Tabela de Resultados", as medidas são confrontadas com os requisitos dimensionais da norma e ensaio escolhidos (neste ilustração, ASTM E1820⁽⁸⁾ aplicada a ensaio de integral J), exportando os resultados finais (Figura 5 c). Para a validação do ensaio, são neste caso checados:⁽⁸⁾ i) propagação mínima da pré-trinca de fadiga e máxima do crescimento estável; ii) estabilidade dos pontos medidos em busca de oscilações das fronteiras que invalidem o ensaio; iii) relação a_0/W real a considerar.

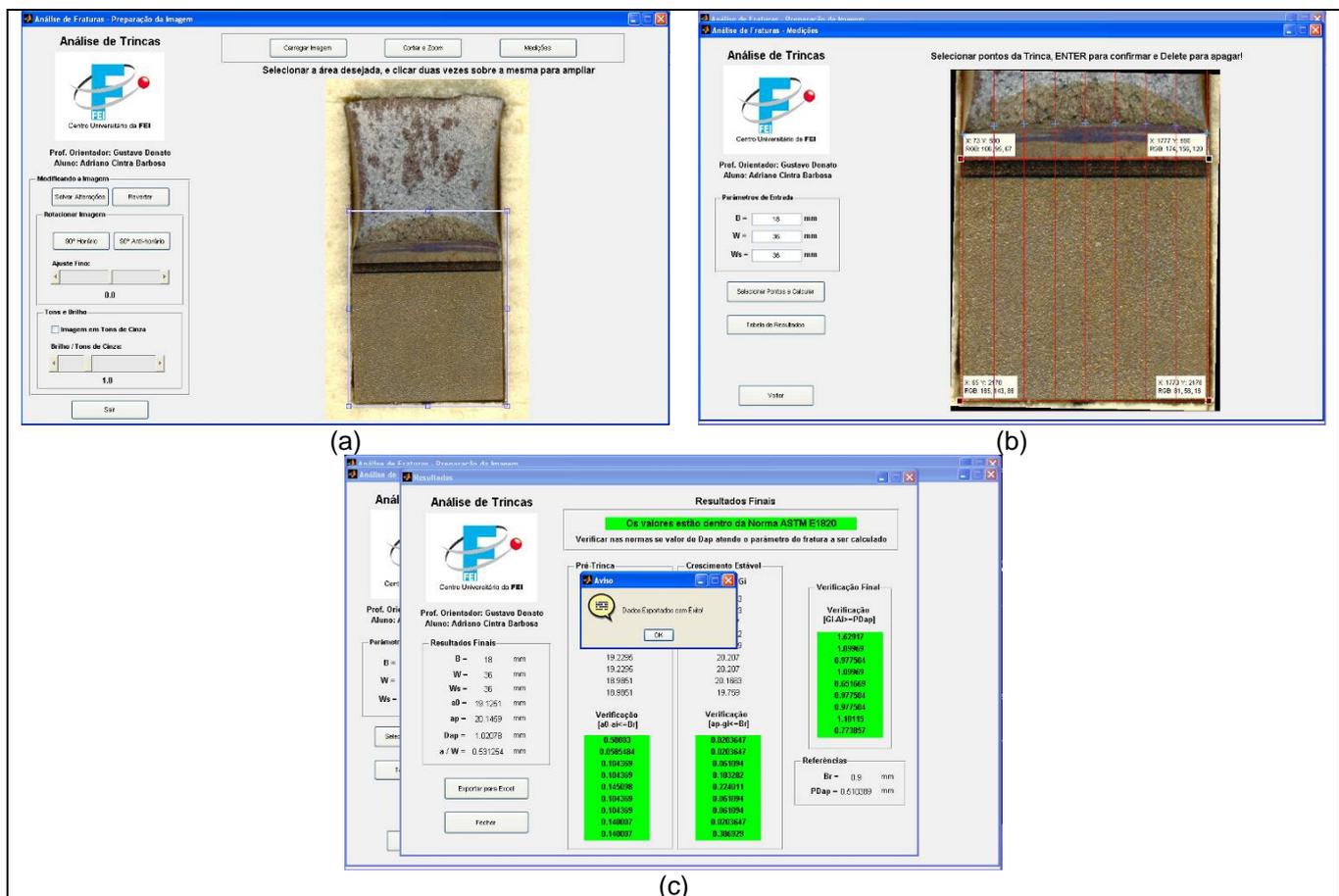


Figura 5. Telas do aplicativo computacional desenvolvido. (a) Abertura e preparação da imagem, (b) calibração e medições e (c) pós-processamento e exportação dos resultados.

Para a quantificação do potencial metrológico do programa desenvolvido, assim como do equipamento de escaneamento disponível, um bloco-padrão de 15 mm foi escaneado na horizontal e na vertical para as nove posições identificadas na Figura 5(b), totalizando 18 imagens analisadas com um total de 162 medidas. Foi utilizado um escâner HP modelo Scanjet G2410, na configuração de 3.600 dpi de resolução e cujo vidro de escaneamento apresenta dimensões de 216 x 297 mm. Com exceção da posição BII (central), todas as demais estão localizadas a 30 mm

das bordas. Com a resolução selecionada, o tamanho do pixel resulta 0,007 mm (25,4 mm / 3600 pixels). Em tese, esta dimensão poderia ser diferenciada durante o processo de medição, no entanto, efeitos de bordas difusas, desvios ópticos dos espelhos/lentes e variações exógenas (relativas ao discernimento do operador) geram uma piora da resolução real. Testes de medição conduzidos no próprio programa a partir de pequenos pontos impressos em impressora laser sobre papel branco com mesmos níveis de ampliação mínima das fraturas (~ 8X) indicam resolução efetiva (acuidade do operador no sistema) da ordem de 0,015 mm. Assim, foi admitida $Res = 0,015$ mm para as condições utilizadas. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos de acordo as Eqs. (4-7), sendo que U representa a incerteza total obtida. Fica evidente pelos resultados que a incerteza total está abaixo de 0,018 mm tanto na horizontal como na vertical, o que garante que tal protocolo atende a todas as normas consultadas, como apontam os requisitos da Figura 6.

Tabela 1: Resultados das calibrações conduzidas em escâner HP G2410 utilizando bloco-padrão Mitutoyo Classe 0 de 15 mm escaneado na horizontal e vertical nas nove posições da Figura 4(c)

Bloco-padrão e posição utilizada.	15 mm Horizontal	15 mm Vertical
Média (mm)	14,9989	14,9968
SD (mm)	0,0439	0,0544
MD (mm)	0,0011	0,0032
u_{rep} (mm)	0,0052	0,0064
u_{res} (mm)	0,0043	0,0043
u_{pat} (mm)	0,0016	0,0037
u_c (mm)	0,0069	0,0086
U (mm)	$\pm 0,0139$	$\pm 0,0171$

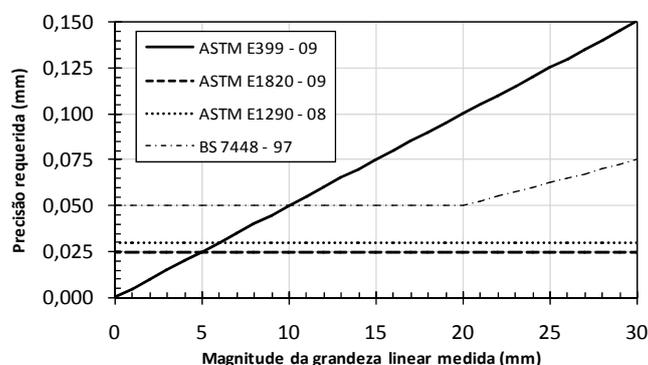


Figura 6. Requisitos das normas utilizadas em ensaios de mecânica da fratura em termos de precisão requerida para dimensionamento de pré-trincas de fadiga e crescimento estável.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL E PROCEDIMENTOS DE MEDIDA

Para avaliação prática e comparativa da ferramenta em desenvolvimento com as demais técnicas de uso corrente, foi conduzido um programa experimental de avaliação pós-falha de uma série de espécimes de fratura SE(B) e SE(T) com trincas rasas e profundas, homogêneos e soldados, com e sem entalhes laterais. A matriz de análise conta com 12 espécimes, com as características apresentadas pela Figura 7. Todos os espécimes foram preliminarmente cortados (na região remota à fratura) com mesmo comprimento (~ 25 mm) e tiveram as dimensões B e W medidas por meio de micrômetro digital Mitutoyo. Na sequência, o dimensionamento das pré-

trincas e eventual crescimento estável de todos os espécimes foi conduzido utilizando as quatro técnicas comparadas no trabalho, a saber:

- lupa estereoscópica Olympus SZ 40 com aumento de 30X acoplada a mesa micrométrica de resolução 0,001 mm (Fig. 3(a));
- projetor de perfil Nikon V-12B configurado para aumento de 10X em modo de iluminação de superfície e com mesa de resolução 0,001 mm (Figura 3(b,c));
- análise digital de imagens (com o aplicativo desenvolvido) obtidas a partir de:
 - máquina fotográfica digital Nikon D40 (em resolução máxima de 3008 x 2000 pixels) equipada com lente Nikkor DX ED 18-55 posicionada em aumento máximo e alinhada a 300 mm do espécime (Figura 4a).
 - escâner detalhado na seção 3 e ilustrado na Fig. 4(b). Testes foram conduzidos com um espécime medido em todas as posições do escâner e nenhuma alteração sistemática de precisão pôde ser notada. Assim, todas as fraturas foram digitalizadas na posição BII (Figura 4c) e foram apoiadas em espuma de poliuretano com altura zero em relação ao vidro.

(1) SE(B), MB, trinca profunda, B = 18,15 mm, W = 36,00 mm	(2) SE(B), MB, trinca profunda, B = 18,13 mm, W = 36,00 mm	(3) SE(B), MB, trinca profunda, B = 17,97 mm, W = 35,95 mm	(4) SE(B), MB, trinca profunda, B = 17,98 mm, W = 36,00 mm	(5) SE(B), MB, trinca rasa, B = 18,00 mm, W = 35,90 mm	(6) SE(B), MB, trinca rasa, B = 18,00 mm, W = 36,00 mm
(7) SE(B), MS, trinca profunda, B = 17,00 mm, W = 33,95 mm	(8) SE(B), MS, trinca profunda, B = 17,00 mm, W = 34,00 mm	(9) SE(B), MS, trinca profunda, B = 18,15 mm, W = 36,10 mm	(10) SE(T), MB, trinca profunda, B = 15,00 mm, W = 25,00 mm	(11) SE(T), MS, trinca profunda, B = 14,90 mm, W = 25,00 mm	(12) SE(T), MB, trinca rasa, B = 11,90 mm, W = 19,85 mm

Figura 7. Fraturas avaliadas e respectivos detalhes. O material de base é ASTM A516 Grau 70, MB denota espécime de metal de base, MS denota espécime com trinca no centro do metal de solda.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA MEDIÇÃO DAS FRATURAS E DISCUSSÃO

Todos os espécimes em avaliação tiveram suas pré-trincas e crescimento estável (quando aplicável) dimensionados por meio das quatro técnicas avaliadas nas nove posições indicadas pela ASTM E1820.⁽⁸⁾ A análise dos dados foi realizada graficamente para melhor visualização geral e tabularmente para precisão na quantificação. A Figura 8 apresenta os resultados da medição de pré-trincas e

crescimento estável para espécimes representativos na forma de gráficos. A Figura 9 apresenta os desvios absolutos médios (obtidos pela Eq. 8) para as pré-trincas de cada corpo-de-prova com os diferentes métodos, assim como a média geral de cada método tendo a lupa estereoscópica como referência (as medições de crescimento estável evidenciaram mesmas tendências e não são apresentadas por questões de brevidade). A opção pela lupa como referência se deu por alguns motivos: i) esta apresentou excelente clareza nas imagens e foi o método de maior aumento utilizado (30X), permitindo perfeita compreensão morfológica da fratura; ii) por contar com mesa micrométrica e linhas de centro na lente objetiva, a precisão e repetibilidade das medidas foi a maior dentre os métodos utilizados. As Figuras 8(a,b) e 8(c,d) dizem respeito a espécimes SE(B) de metal base com crescimento estável e respectivamente com trinca profunda (espécime 2) e rasa (espécime 6). Em ambos os casos o formato da pré-trinca e crescimento estável apresentaram geometria usual e todos os métodos propiciaram tendências similares, à exceção da análise de fotografia digital no espécime 6, a qual dificultou a distinção do operador. A Figura 8(e) apresenta os resultados para um espécime SE(T) com trinca profunda no metal de solda, a qual não atendeu aos requisitos dimensionais da norma (pelo formato irregular da pré-trinca), mas que pôde ser igualmente mensurada por todas as técnicas. A Fig. 8(f) apresenta os resultados para espécime SE(T) de metal base, trinca rasa e entalhe lateral. Mesmo neste caso, as medições foram viáveis.

Com relação aos desvios médios obtidos para cada técnica, a Figura 9 revela que espécimes com trinca rasa (5,6 e 12) apresentam erros percentuais superiores aos demais pelo relativo pequeno comprimento da pré-trinca. Em valores absolutos, no entanto, a precisão e resolução de cada método é mantida independente da magnitude. Comparando todos os métodos avaliados, a análise computacional de fotografias digitais teve o pior desempenho (com média geral dos desvios em módulo de 1,24%), enquanto o escâner apresentou média dos desvios de 0,90% e o projetor de perfil 0,81%, sendo o mais próximo da lupa. Tais dados aparentam coerência, devido à similaridade do princípio básico mecânico de funcionamento do projetor e da lupa, e das limitações apontadas para o uso de fotografias digitais.

Sob a óptica do interesse do trabalho, algumas constatações emergem das impressões e resultados obtidos:

- a lupa estereoscópica e o projetor de perfil atendem à precisão exigida por todas as normas consultadas e podem ser usados com sucesso na medição de fraturas. No entanto, a lupa exige tempo significativo de preparação para as medidas e o projetor não é capaz de medir algumas fraturas escuras ou com superfície irregular;
- a utilização de fotografias digitais para a medição de fraturas, mesmo que com alta resolução, exige rigor no posicionamento do tripé e amostra, é susceptível a problemas de paralaxe, desvios ópticos nas periferias das lentes e apresentou o pior desempenho dentre as técnicas utilizadas. Verificações exploratórias conduzidas com fotografias tiradas (a mesma distância e aumento das fraturas) do bloco padrão de 15 mm revelaram incerteza total que atenderia somente a ASTM E399 na Figura 6, violando as demais.
- a utilização de fraturas digitalizadas em escâner com o aplicativo desenvolvido apresentou níveis de desvio próximos ao do projetor de perfil e como já mencionado anteriormente atendeu aos requisitos normativos quanto à precisão. Desta maneira, a análise de imagens escaneadas em alta resolução por meio de programas computacionais pode complementar ou

substituir o uso de lupas ou projetores de perfil. Recomenda-se, no entanto, o uso de resoluções ainda maiores à de 3.600 dpi usada no trabalho (p. ex.: 4.800 dpi), a qual pode ser encontrada em equipamentos atuais disponíveis no mercado e que permite um incremento da ampliação e precisão.

$$\text{desvio médio}_{\text{cada_espécime_e_cada_método}} = \left[\sum_{i=1}^9 \left(\frac{a_{0-i-\text{método}} - a_{0-i-\text{lupa}}}{a_{0-i-\text{lupa}}} \cdot 100 \right) \right] / 9 \quad (8)$$

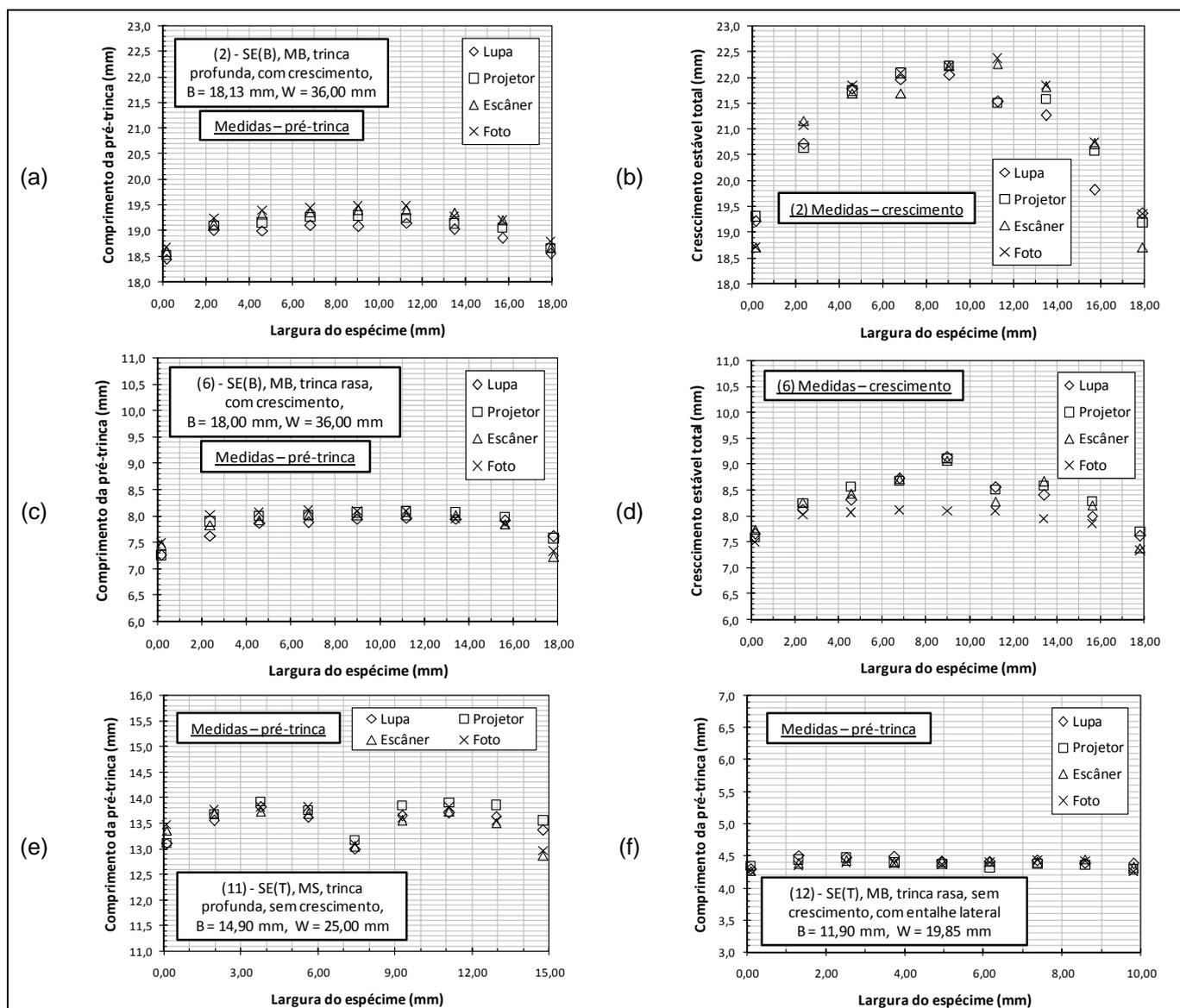


Figura 8. Medições do comprimento da pré-trinca e do crescimento estável total (quando aplicável) respectivamente para (a,b) espécime "2", (c,d) espécime "6", (e) espécime "11" e (f) espécime "12".

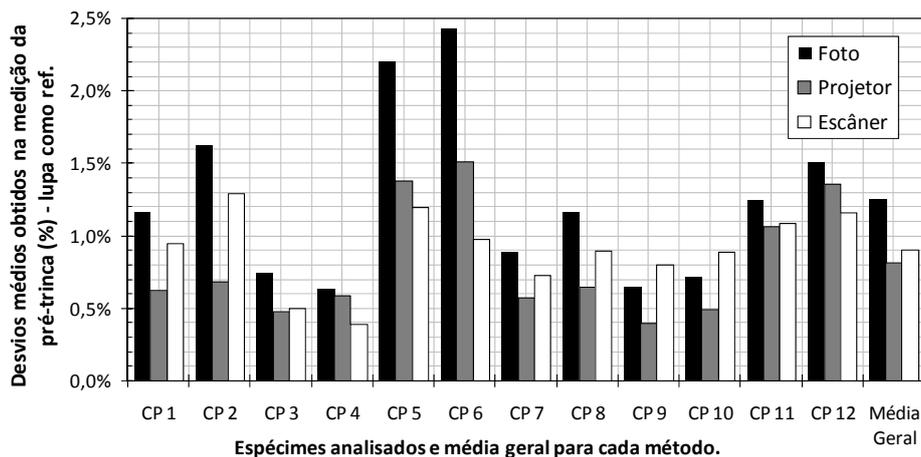


Figura 9. Desvios médios percentuais (obtidos pela Eq. (8)) para as medições das pré-trincas de todos os espécimes ensaiados utilizando as técnicas de foto, projetor de perfil e escâner. A lupa estereoscópica é utilizada como referência e, portanto, não é apresentada.

6 CONCLUSÕES

Do presente trabalho pode-se concluir que:

- A lupa estereoscópica e o projetor de perfil podem ser usados com grande precisão e repetibilidade na medição de fraturas, incluindo regiões de pré-trincas e crescimento estável. Como limitações, a lupa demanda um tempo razoável de preparação, enquanto algumas imagens são de difícil visualização no projetor.
- O uso de fotografias digitais, mesmo que de alta resolução, apresentou dificuldades operacionais com erros de paralaxe e alinhamento. Com isto, o tratamento de tais imagens no aplicativo desenvolvido apresentou os maiores desvios dentre as técnicas estudadas.
- A verificação do potencial metrológico de fraturas digitalizadas demonstrou que, para 3600 dpi de resolução e com aumento mínimo de 8X, a incerteza total na medição de fraturas com o aplicativo desenvolvido está abaixo de 0,018 mm tanto na horizontal como na vertical, o que atende a todas as normas correntes consultadas para exame pós-falha de espécimes de mecânica da fratura. O uso de 4800 dpi pode permitir aumentos e precisão de avaliação ainda maiores.
- Assim, a digitalização de fraturas em alta resolução por meio de escâner, combinada com a ferramenta computacional desenvolvida, atende aos requisitos normativos e se apresenta como uma técnica laboratorial prática, econômica e precisa como complemento ou substituição aos equipamentos tradicionais.

Agradecimento

Investigação patrocinada pelo Centro Universitário da FEI, São Paulo, Brasil.

REFERÊNCIAS

- 1 ANDERSON, T. L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 2nd Edition, CRC, Boca Raton, 1995.
- 2 SAXENA, A. Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers, CRC, Boca Raton, 1998.
- 3 API RP-579. Recommended Practice for Fitness-for-Service, 2000.



- 4 BS 7910. Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, 1999.
- 5 SINTAP. Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry, 1999.
- 6 BLITZ, J. Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing, 2nd edition, Chapman & Hall, Londres, 1997.
- 7 BLITZ, J.; SIMPSON, G. Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing, Chapman & Hall, Londres, 1996.
- 8 ASTM. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM E 1820-09, Philadelphia, 2009.
- 9 ASTM. Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement, ASTM E 1290-08, Philadelphia, 2008.
- 10 ASTM. Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM E 399-08, Philadelphia, 2008.
- 11 BS 7448-1. Fracture Mechanics Toughness Tests – Part 1: Method for Determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of Metallic Materials, Inglaterra, 1991.
- 12 KORIN, I.; LARRAINZAR, C.; IPINA, J. P. Medición Óptica de Longitud y Crecimiento de Fissura Mediante Adquisición de Imágenes com un Escáner Convencional, anais do SAM/CONAMET, San Nicolás, 2007.
- 13 ASTM. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis, ASTM E 1382-10, Philadelphia, 2009.
- 14 YEO, K. B.; LIM, E. H. Micrographic technique for linear-elastic fracture evaluation of crack initiation zone. J. Applied Sci., V. 10, p. 2663-2667, 2010.
- 15 BECKWITH, T.; MARANGONI, R.; LIENHARD, J. Mechanical Measurement: International Edition, 6^a edição, Pearson Prentice Hall, 2008.
- 16 DOTSON, C. L. Fundamentals of Dimensional Metrology, Delmar Cengage, 2006.